

CIENCIA, **y el "Cosmos" del siglo XXI**

Coordinadores:

Alicia Parra Ruiz

Quintín Garrido Garrido

Contribución especial:

"COSMOS: un viaje personal"

Jon Lomberg

Introducciones:

"Carl Sagan"

Inés Pellón González

"COSMOS"

Jesús Martínez Frías

CIENCIA, y el “Cosmos” del siglo XXI

Cubierta:

Inspiración de portada. Approaching the Milky Way. Imagen cedida por el autor Jon Lomberg para esta obra (Blog y Libro)

[Jon Lomberg \(web\)](#)

Montaje cortesía de Pablo Garrido Parra.

Este libro tiene una licencia Creative Commons.

Cualquier reproducción total o parcial de esta obra deberá hacer un reconocimiento expreso a la autoría de la misma y/o de los capítulos mencionados.

No se permite el uso comercial de la obra original ni de las posibles obras derivadas.

La distribución y uso de las obras derivadas se debe hacer bajo una licencia igual a la que se regula la obra original.

Las imágenes, figuras, ilustraciones que aparecen están amparadas bajo esta licencia salvo en las que expresamente se hace mención a su autoría/crédito al pie de las mismas.



Presentación y agradecimientos.

La presentación de este libro resulta ser muy fácil a la vez que gratificante: “un libro para disfrutar”, un libro que aúna las virtudes de un buen libro de divulgación.

Los autores participantes son referentes, reputados científicos y excelentes divulgadores, en sus distintas áreas de trabajo y estudio. Los textos aportados por cada uno de ellos son un ejemplo de claridad, rigor y conseguir, que no siempre es fácil, que la lectura sea amena e interesante.

Un libro que consigue mantener al lector “enganchado” a sus páginas, que despierta esa “curiosidad innata de los niños” que todos llevamos dentro y que en muchas ocasiones hemos dejado en el olvido en aras de cuestiones más “importantes y transcendentales”, o eso nos hacemos creer a nosotros mismos.

Desde la más sincera humildad este libro pretende ser un homenaje a Carl Sagan y su *COSMOS*, del que se cumplen en este 2020 cuarenta años de su publicación. Y que mejor manera de hacerlo que intentando que el desarrollo y temática de este *CIENCIA, y el “Cosmos” del siglo XXI* se acerque a aquel libro que marcó un antes y después en la divulgación científica para todos los públicos.

Desde estas líneas queremos expresar nuestro agradecimiento impagable, nunca mejor dicho ya que todos lo han hecho de manera altruista, a todos los participantes en este libro. Agradecer que en aras de la divulgación científica hayan hecho un paréntesis en sus labores cotidianas para aportar un pequeño “grano de polvo” de conocimiento en la vasta inmensidad “interestelar” de la sabiduría.

Este *CIENCIA, y el “Cosmos” del siglo XXI* se suma a la colección, aunque solo sea por el comienzo de los títulos, que se inició con *CIENCIA, y además lo entiendo!!!* (2017), que siguió con *CIENCIA, y yo quiero ser científico!!!* (2018) y con *CIENCIA, y un gran paso para la humanidad!!!* (2019), destacar que más de dos centenares de científicos han participado en estos libros (en los cuatro de manera altruista lo que ha permitido que los cuatro sean

de descarga, en pdf, gratuita), todos con enorme humildad y con extraordinaria vocación de hacer y difundir buena ciencia. A todos ellos queremos expresar nuestro más sincero reconocimiento por la ardua tarea que realizan. Confiamos en que entre los lectores jóvenes germine la semilla del afán por el conocimiento, en todas sus vertientes, de la misma manera que nuestro homenajeadó Carl Sagan consiguió, con su COSMOS, que germinara en multitud de científicos en el último medio siglo.

En último lugar y no por ello menos importante, todo lo contrario, mención y agradecimiento a nuestras familias, sin su apoyo este libro no hubiera podido salir adelante.

Y por supuesto, compartir y difundir que para eso lo hemos hecho.

Madrid, Junio – 2020.

Alicia Parra Ruiz.

Quintín Garrido Garrido.

Índice.

Presentación..... 5

Índice..... 7

Contribución especial

COSMOS: Un viaje personal..... 13
(Jon Lomberg)

Introducciones..... 19

Carl Sagan: Introducción al científico y divulgador..... 21
(Inés Pellón González)

COSMOS: Introducción al libro original de Carl Sagan. 29
(Jesús Martínez Frías)

1 *En la orilla del océano cósmico..... 35*

1.1 Océanos cósmicos..... 37
(Vicent J. Martínez)

2 *Una voz en la fuga cósmica..... 41*

2.1 El origen de la música de la vida: polvo de estrellas. 43
(Patricia Sánchez Pérez)

**2.2 Una visión racional de la naturaleza: Cosmos frente
a Caos..... 47**
(Alfonso Ogayar Serrano)

2.3 La música de la vida..... 51
(Ester Lázaro Lázaro)

3	<i>La armonía de los mundos.</i>	55
3.1	Los sonidos del Cosmos. (Manuel de León)	57
3.2	A vueltas con los astros, todavía. (Enrique Joven Álvarez)	61
3.3	Kepler y la melancolía de los poliedros. (José L. Fernández Barbón)	65
4	<i>Cielo e infierno.</i>	69
4.1	Esculpiendo sistemas planetarios. (Benjamín Montesinos Comino)	71
4.2	La Tierra y Venus, ¿Cielos o Infiernos? (Juan Antonio Belmonte Avilés)	75
4.3	Cuentos de cometas. (Elsa de Cea del Pozo)	79
5	<i>Blues para un planeta rojo.</i>	83
5.1	Rock and Roll para un planeta rojo. (Beatriz Sánchez-Cano)	85
5.2	El papel español en la exploración de Marte. (Juan F. Cabrero Gómez)	89
5.3	Se anima la música en el planeta rojo. (Jorge Pla-García)	93
6	<i>Historias de viajeros.</i>	97
6.1	Viajeros espaciales, curiosidad innata y vocaciones STEAM. (David Delgado Iglesias)	99
6.2	Exploradores del siglo XXI. (Antonio Huertas Peña)	103
6.3	Los retos de los Voyager y los desarrollos tecnológicos. (Jose Manuel Urech Ribera)	107

7	<i>El espinazo de la noche</i>	111
7.1	Curiosidad innata, niños y científicos. (Francisco Guinea)	113
7.2	Mitología de la Ciencia: evolución de las cosmovisiones	117
	(Tomás Sánchez Sánchez-Pastor)	
8	<i>Viajes a través del espacio y del tiempo</i>	121
8.1	Un viaje virtual por el Universo observable. (Jose Miguel Mas Hesse)	123
8.2	Los orígenes del Sistema Solar y otros mundos: la historia de la vida	127
	(Luis Velilla Prieto)	
8.3	Teleportación Cuántica y Causalidad	131
	(Javier Mas Solé)	
8.4	La física hoy en los viajes temporales	135
	(Gustavo Alfredo Arciniega Durán)	
8.5	La velocidad de la luz y la Teoría de la Relatividad de Einstein	139
	(Antonio Dobado González)	
8.6	Reflexiones sobre la velocidad de la luz durante el confinamiento.	143
	(Carlos Barceló)	
8.7	Sueños de viajes espaciales a velocidad infinita.	147
	(Martín Monteiro)	
8.8	Otros mundos	151
	(David Galadí Enríquez)	
9	<i>Las vidas de las estrellas</i>	155
9.1	Una tabla para ordenarlos a todos	157
	(Bernardo Herradón García)	
9.2	Química en estado puro durante la muerte de una estrella.	161
	(Marcelino Agúndez Chico)	

9.3	La Química como Origen del Universo Molecular.	165
	(Elena Jiménez Martínez)	
9.4	La muerte del Sol y de la Tierra.	169
	(Joaquín M. Ramírez Rodríguez)	
9.5	El ciclo de las estrellas.	173
	(Andrea Verónica Ahumada)	
9.6	Agujeros negros.	177
	(Ernesto Lozano)	
9.7	La gravedad y sus efectos.	181
	(Luis J. Goicoechea Santamaría)	
9.8	Un universo en constante cambio.	185
	(Leonardo Fernández Jambrina)	
9.9	El amanecer de la astronomía de neutrinos.	189
	(José I. Crespo-Anadón)	
9.10	Estrellas de neutrones, estrellas de récords.	193
	(Óscar Moreno Díaz)	
	10 Al filo de la eternidad.	197
10.1	La eterna danza en la historia del Universo.	199
	(Pedro Naranjo Pérez)	
10.2	Multiverso: ¿existen otros universos?	203
	(Alberto Güijosa Hidalgo)	
10.3	Elogio a la pequeñez.	207
	(Andrés Gomberoff)	
	11 La persistencia de la memoria.	211
11.1	Más ancho que el cielo, más profundo que el mar.	213
	(Alberto Rábano Gutiérrez)	
11.2	ADN, cerebro y bibliotecas. Todo forma parte de nosotros. Todo forma parte del Cosmos.	217
	(Judith Estengre Pérez)	
11.3	Computación cuántica.	221
	(Diego García-Martín)	

11.4	Supremacía cuántica: recibiendo con los brazos abiertos a nuestros nuevos señores cuánticos.....	225
	(Elías Fernández-Combarro Álvarez)	
	 12	 229
	Enciclopedia galáctica.....	
12.1	Una Solución a la Paradoja de Fermi: el Principio Subantrópico y la Conjetura de Indetectabilidad.....	231
	(Beatriz Gato Rivera)	
12.2	Estamos solos.	235
	(Rodrigo Gil-Merino y Rubio)	
12.3	Los otros mundos.	239
	(Luisa G. Jaime)	
12.4	Buscando peces en el océano cósmico.....	243
	(J. Emilio Enríquez Rascón)	
	 13	 247
	¿Quién habla en nombre de la Tierra?.....	
13.1	La destrucción de la Biblioteca de Alejandría y la muerte de Hipatia.....	249
	(Pilar Sánchez Sánchez-Pastor)	
13.2	¿Pero quién habla en nombre del Universo?.....	253
	(Fernando Ortuño Guerrero)	

Apéndices

Apéndice 1	La reducción al absurdo y la raíz cuadrada de dos	
14.1	Saber perder en ciencia: cuando no te gusta el resultado.	257
	(Emilio Tejera Puente)	
Apéndice 2	Los cinco sólidos pitagóricos	
14.2	La forma del mundo.	263
	(Enrique Macías Virgós)	

Epílogo

15.1	Del Cosmos de Humboldt al Cosmos de Sagan.....	269
	Dos obras básicas para la comprensión de la Tierra y el Espacio.	
	(Jorge Olcina Cantos)	

COSMOS

Un viaje personal por Jon Lomberg¹.

Carl Sagan y yo empezamos a pensar en *COSMOS* años antes de que lo creáramos. Habíamos estado trabajando juntos en libros y otros proyectos desde 1972, cuando ilustré su primer libro *The Cosmic Connection (La Conexión Cósmica)*. Desarrollamos una colaboración en la que Carl aportaba la ciencia y la interpretación, y yo la parte artística, como el trabajo que hicimos con Gilbert y Sullivan. Nuestra colaboración duró hasta su muerte en 1996, cuando trabajábamos juntos en la película de su novela *Contact*, en la que diseñé la animación en la secuencia de apertura, trasladando al espectador desde la Tierra hasta el borde del Universo, en una reinterpretación digital de la animación de apertura análoga de *COSMOS*.

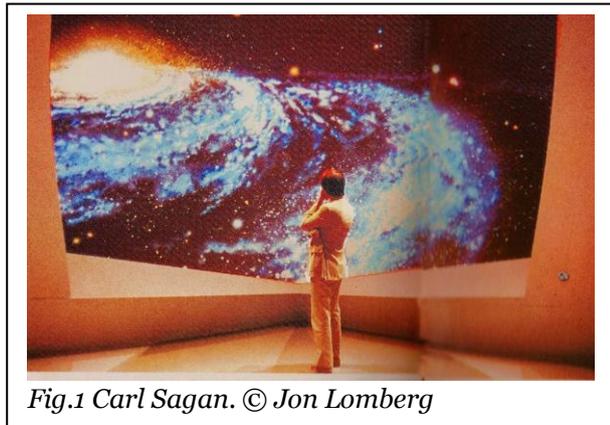


Fig.1 Carl Sagan. © Jon Lomberg



Fig.2 El autor con el productor de efectos especiales George Andorfer, pintando hojas de acetato y señalando algunas de las maquetas que hizo su equipo. © Jon Lomberg

Carl y yo no solo fuimos colaboradores, también fue mi amigo personal más cercano. Nos reímos y nos divertimos tanto como trabajamos. Todavía sueño con él y lo extraño a menudo. Sin duda, el planeta Tierra necesita ahora de su sabiduría. Pero me siento feliz al ver que su trabajo sigue siendo popular e influyente en todo el mundo.

Años antes de comenzar *COSMOS* en 1978, desarrollamos la metodología con la que presentar

¹ Traducción realizada por Jorge Pla-García.

conceptos difíciles de física, astronomía y biología al público general. Cuando Carl me pidió que me trasladara a Los Ángeles y supervisara los aspectos artísticos de la producción, yo ya estaba preparado. El proyecto terminó involucrando no solo a la astronomía, sino también a la biología, la bioquímica, la geología e incluso, la historia.

Comenzaron así dos años emocionantes y a menudo difíciles aprendiendo sobre los mundos de la animación de Hollywood y los efectos especiales. Formé y dirigí un equipo de artistas que crearon la gran cantidad de imágenes que necesitaríamos. Algunos de mis mejores recuerdos son de trabajar con mis colegas artistas Don Davis y Rick Sternbach, así como con el astrónomo Donald Goldsmith, con quien forjé una amistad duradera. ¡Nunca olvidaré la noche en la que Don Goldsmith y yo usamos dos discos voladores (frisbees) para representar la orientación de las galaxias Vía Láctea y Andrómeda!



Fig.3 Los artistas Adolf Schaller, Don Davis, y Susan Brown en la sala de arte de la serie COSMOS. © Jon Lomberg



Fig.4 Starseeds (Semillas estelares). ©Jon Lomberg
https://www.jonlomberg.com/digital_prints/dp_starseeds.html

Trabajé con Carl todos los días durante la primera fase de la producción, cuando estábamos planificando todos los episodios, creando un guion gráfico de las secuencias de animación y tratando de visualizar la serie. Un problema era cómo debía ser la "nave espacial de la imaginación" de Carl. *Star Wars: A New Hope* había sido un gran éxito en 1977 y dos años después se lanzó la secuela *Star Wars: The Empire Strikes Back* (fíjense en el caza X-wing de la foto en la pared de nuestra sala de arte). Nuestro presupuesto era mucho más pequeño que el de *George Lucas* y yo sabía que no podíamos competir con sus maquetas de naves espaciales. Carl tampoco quería una nave espacial realista, sino algo más abstracto. Cuando vio mi pintura *Starseeds* (semillas estelares), decidió que esa era la apariencia que quería.

Su nave espacial sería como una semilla a la deriva por el Cosmos. Ese es el origen del simbólico diente de león que aparece a lo largo de la serie.

De manera similar, mi cuadro *The Backbone of Night* (*El Espinazo de la Noche*) se convirtió en el título del Capítulo 7 de COSMOS. La combinación de motivos biológicos y astronómicos fue la expresión visual perfecta de la visión de Sagan del Universo, de que estamos profundamente conectados con el Cosmos. Cuando miramos las estrellas, nos estamos mirando a nosotros mismos.



Fig.5 *Backbone of Night* (*El Espinazo de la Noche*).
https://www.jonlomborg.com/digital_prints/dp_backbone_of_night.html ©Jon Lomborg

Una vez que empezamos a grabar, no vi tanto a Carl. Viajaba por el mundo para filmar todas las secuencias en Japón, Europa, etc. Mientras tanto,

los artistas se quedaron en Hollywood creando el Universo. Esto me dio una gran responsabilidad de tomar muchas decisiones sin la guía de Carl. Las animaciones no solo tenían que ser atractivas, sino que debían ser precisas en muchos campos de la ciencia donde se realizaban nuevos descubrimientos a diario, desde el ADN hasta las galaxias. Pero él confiaba en mí para hacerlo correctamente y quedó satisfecho con los resultados.

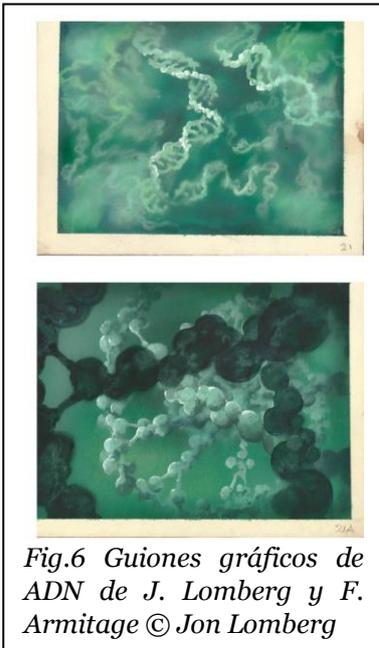


Fig.6 Guiones gráficos de ADN de J. Lomborg y F. Armitage © Jon Lomborg

Debido a que la misión *Voyager* apareció de forma destacada en la serie, trabajar en COSMOS me permitió tener un contacto aún más cercano con los científicos e ingenieros que trabajaron en la misión. Ya me sentía parte de la misión al ser el jefe de diseño de los Discos de Oro que transportaban la sondas, pero trabajar en el JPL con el director de planificación de la misión, *Charley Kohlhase* y otros investigadores, me dio una visión especial de este increíble proyecto. Durante el encuentro de la *Voyager 1* con *Júpiter* en 1979, estábamos filmando los episodios sobre

los planetas exteriores. Los artistas de COSMOS pintaban maquetas de los planetas y sus lunas tan rápido como los estaba viendo la *Voyager 1*, por lo que teníamos que conducir a gran velocidad desde el JPL hasta el estudio de arte de COSMOS con las fotos más recientes en nuestras manos. En aquel momento no había internet, por lo que fuimos de los primeros en ver estos nuevos mundos y en construir maquetas basadas en las más recientes observaciones.

La serie COSMOS también me permitió conocer y trabajar con el pionero de la computación gráfica *Jim Blinn*, del JPL. Jim inventó para COSMOS técnicas de modelado tridimensional que sentaron las bases del mundo CGI (imágenes generadas por ordenador) y desarrolló la técnica de *morphing* (efecto especial que utiliza la animación por ordenador para transformar la imagen fotográfica de un objeto real en la imagen fotográfica de otro objeto real) utilizada en la animación de la evolución humana.



Fig.7 Carl Sagan. © Jon Lomberg

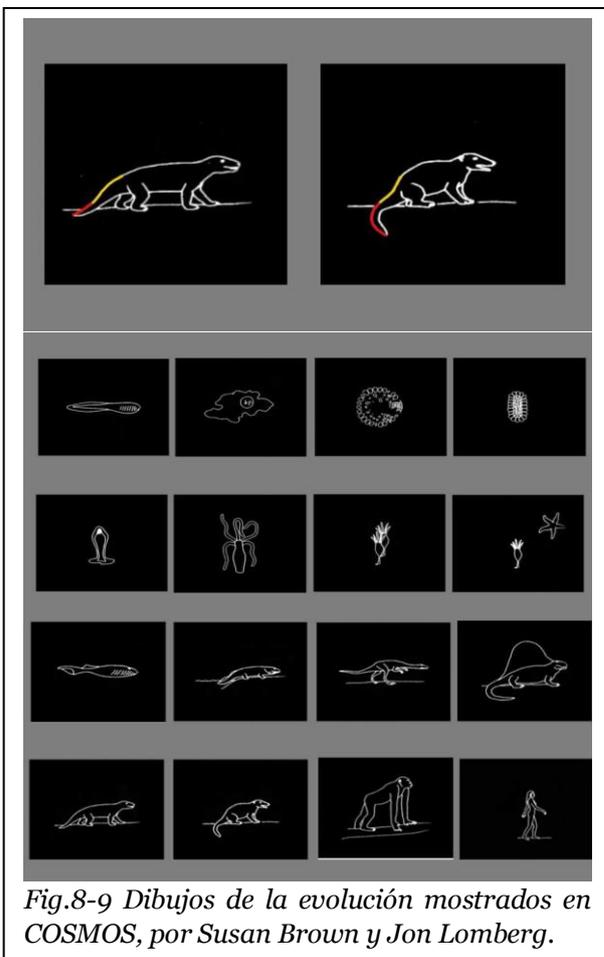


Fig.8-9 Dibujos de la evolución mostrados en COSMOS, por Susan Brown y Jon Lomberg.

Cada dibujo lineal se dividió en el mismo número de segmentos y el ordenador transformó cada segmento en el siguiente. Ahora parece simple, pero en aquel momento fue revolucionario y la base de todas las animaciones *morphing* siguientes.

Esta animación de la evolución humana además me permitió trabajar de cerca con el biólogo evolutivo *Stephen Jay Gould*, quien se rio cuando le pregunté por la secuencia de la evolución de los organismos desde las primeras células hasta los humanos. "¡A todos nos gustaría saberlo!" me dijo. Stephen proporcionó a la artista de COSMOS, *Susan Brown*, los modelos a partir de los cuales ella

dibujó todos los animales en el formato requerido. El equipo de *Jim Blinn* les dio vida en la que sigue siendo una de las mejores secuencias de toda la serie,

mejorada sustancialmente por la brillante elección de la música. Todos sabíamos que la música sería una parte muy importante de los episodios, y todos los artistas sugirieron diferentes temas. *Carl* también tenía sus preferencias musicales y escogió la música de *Vangelis* para el tema central de la serie.

COSMOS fue también el último programa científico importante en utilizar las técnicas tradicionales de animación, maquetas de yeso y uso de humo real, niebla, etc. Como resultado del desarrollo de imágenes generadas por ordenador, las técnicas tradicionales se volvieron rápidamente obsoletas y fueron reemplazadas por CGI. Ahora, cuando hablo con los animadores de la actualidad, me siento como un oficial en uno de los últimos veleros hablando con ingenieros marinos modernos. Nunca nadie volverá a producir animaciones de la forma en que las hicimos en COSMOS.

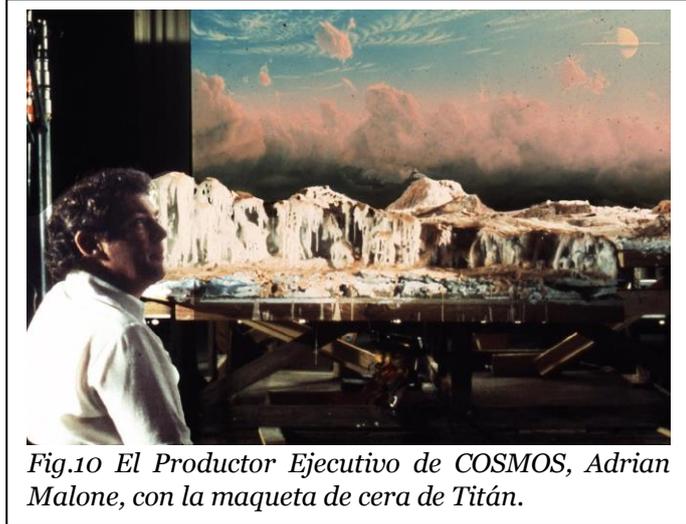


Fig.10 El Productor Ejecutivo de COSMOS, Adrian Malone, con la maqueta de cera de Titán.

Construimos superficies planetarias con yeso y cera, y grandes fondos pintados. La Vía Láctea, mostrada a continuación, es en realidad la sucesión

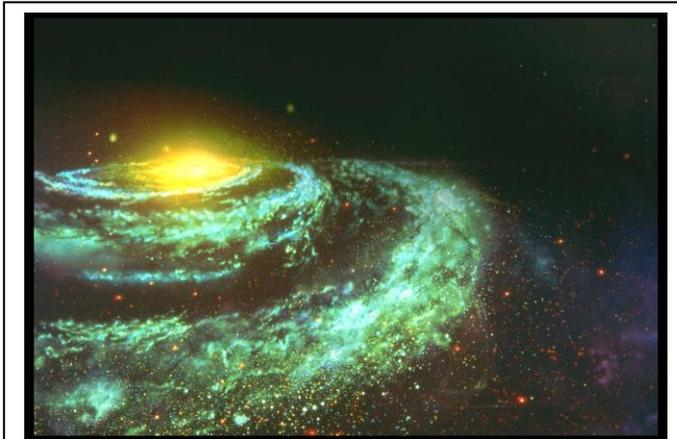


Fig.11 Approaching the Milky Way. ©Jon Lomberg
https://www.jonlomberg.com/limited_edition/le_a_approaching_milkyway.html

de muchas hojas de acetato separadas (que por cierto todavía conservo). Tuve que recortar la galaxia en secciones, de atrás hacia adelante y pintar cada sección en una hoja separada. Cada hoja de acetato se iluminaba de forma individual, formándose una composición en la cámara junto con todas las demás. Al aumentar la distancia de cada hoja con la cámara se creaba un efecto de tridimensionalidad. Esta técnica se llama animación

multiplano y fue desarrollada por primera vez por *Walt Disney* en la película *Blancanieves* (1937).

La serie COSMOS estableció la manera de ver el Universo para toda una generación. En los albores de la óptica adaptativa, antes del *Telescopio Espacial Hubble* y de que la sonda *Voyager* hubiera visitado los planetas exteriores, las representaciones artísticas eran lo único que teníamos para mostrar imágenes nítidas y coloridas de estrellas, lunas y planetas, y COSMOS tiene parte de culpa del colorido estilo que ahora se usa en todos los medios cuando se representan los colores, bastante pálidos y sutiles, del espacio real. A veces la gente se siente incluso decepcionada cuando ven cómo las nebulosas y las galaxias realmente se ven a través de un buen telescopio. ¡Pido disculpas por ello!

Y más importante aún, COSMOS parece haber inspirado a una generación de personas a adentrarse en las ciencias y participar en las aventuras científicas que mi amigo *Carl Sagan* describió tan maravillosamente. En las cuatro décadas desde que hicimos el programa, he conocido a cientos de personas que me han agradecido la forma en que la serie influyó en sus vidas, en su interés en la ciencia y en la elección de sus carreras profesionales con perfiles científicos. En un mundo saturado de medios donde nos olvidamos tan rápido de los



Fig.12 Jon Lomberg fue el Director Artístico de COSMOS y ganó un Premio Emmy por este trabajo en 1981. Además, fue Director de Diseño del Disco de Oro de las sondas Voyager y diseñador de los mensajes artísticos a bordo de algunos rovers de NASA que se encuentran en Marte. Vive en Hawai y su trabajo puede verse en www.jonlomberg.com

programas, series y documentales del día anterior, es increíble cuánto impacto ha tenido esta serie. Por supuesto estoy orgulloso, y en nombre de *Sagan* y de todos los demás que trabajaron en la serie, les agradezco a todos los que nos han hecho sentir que contribuimos con algo importante para el mundo.

Jon Lomberg.

Director Artístico de COSMOS.

Director de Diseño del Disco de Oro de las sondas Voyager.

Introducciones

Llegará una época en la que una investigación diligente y prolongada sacará a la luz cosas que hoy están ocultas. La vida de una sola persona, aunque estuviera toda ella dedicada al cielo, sería insuficiente para investigar una materia tan vasta... Por lo tanto este conocimiento solo se podrá desarrollar a lo largo de sucesivas edades. Llegará una época en la que nuestros descendientes se asombrarán de que ignoráramos cosas que para ellos son tan claras... Muchos son los descubrimientos reservados para las épocas futuras, cuando se haya borrado el recuerdo de nosotros. Nuestro universo sería una cosa muy limitada si no ofreciera a cada época algo que investigar... La naturaleza no revela sus misterios de una vez para siempre.

SÉNECA, Cuestiones naturales, Libro 7, siglo I

Carl Sagan **Introducción al científico y divulgador.**

“Estamos hechos de sustancia estelar”

Carl Sagan

Cosmos. Capítulo 9: “Las vidas de las estrellas”, pág. 233

Nombrar a Carl Sagan (1934-1996) es citar a ese conocido científico y escritor cuya amplia sonrisa iluminaba el espacio en el que se encontraba, y cuya labor divulgativa ha generado una profunda huella en varias generaciones. Entre sus muchas y muy variadas contribuciones se pueden destacar la serie documental de televisión *Cosmos: Un viaje personal* (1980) de la que fue coautor y narrador; la novela *Contact* [1] en la que se basa la película homónima de 1997 dirigida por Robert Zemeckis y protagonizada por Jodie Foster, y el haber ganado en 1978 el Premio Pulitzer de Literatura General de No Ficción por su libro *Los dragones del Edén* [2].

En esta introducción nos acercaremos a la persona que se encuentra detrás de una vida cuajada de éxitos, cuál es su historia y cómo pudo llegar a ser quien fue.

La forja de un mito: infancia y adolescencia.

Carl Edward Sagan nació en Nueva York (USA) un 9 de noviembre de 1934. Su padre, Sam Sagan, era natural de Ucrania y había emigrado a los Estados Unidos, donde trabajaba como obrero en una industria textil. Su madre, Rachel Molly Gruber, era natural de Nueva York y había vivido la pobreza extrema de niña, habiendo sufrido la “Gran Depresión” de 1920. Carl recibió su nombre en honor de su abuela materna, Chaiya Clara, tenía una hermana llamada Carol y su infancia transcurrió en el sencillo apartamento que la familia tenía en Brooklyn (Nueva York). Eran judíos reformistas, y aunque su padre no era especialmente religioso, su madre sí participaba activamente en los oficios y creía en las tradiciones, por lo que solo servía carne kosher. Su padre era un hombre tranquilo y bondadoso, cuyo talante conciliador le llevó a intentar

suavizar las tensiones entre patronos y trabajadores en la complicada situación del Nueva York industrial de principios del siglo XX. El propio Carl admitía que mantuvo una estrecha relación con ellos durante toda su vida, de quienes aprendió la capacidad para sorprenderse y la tendencia a analizarlo todo, base del pensamiento científico [3, 4, 5]. Su poderosa influencia queda patente en casi todas sus publicaciones, como en el libro *El mundo y sus demonios*, en el que indica [6]:

“Mis padres no eran científicos. No sabían casi nada de ciencia. Pero al iniciarme simultáneamente al escepticismo y a hacerme preguntas, me enseñaron los dos modos de pensamiento que conviven precariamente y que son fundamentales para el método científico.”

Una de las vivencias infantiles que Sagan recordaba con mayor intensidad fue la visita que la familia realizó a la Exposición Universal de Nueva York de 1939, que lo marcó profundamente. Dicho evento se celebró en *Flushing Meadows*, el segundo parque público más grande de la ciudad de Nueva York después del Central Park de Manhattan. Tuvo lugar del 30 de abril al 31 de octubre de dicho año con el eslogan “Construyendo el mundo del futuro”, y su éxito fue tal que se volvió a abrir al público del 11 de mayo al 27 de octubre de 1940. El niño asistió a ella cuando tenía cuatro años de edad, y mucho después recordaría incluso el característico crujido que se producía cuando una lámpara iluminaba una célula fotoeléctrica, y cómo al activar un diapasón, el sonido que generaba se convertía en una onda en un osciloscopio. Además, contempló en primicia un invento que pronto reemplazaría a la radio: la televisión, y asistió a uno de los acontecimientos que mayor repercusión mediática tuvo: el entierro de una cápsula del tiempo en el suelo del parque público que alojó la exposición. En ella se guardaron varios recuerdos de la humanidad de la década de 1930 para que fueran recuperados por las futuras generaciones, y esta idea cautivó a Carl completamente.

Por desgracia, ese mismo año se inició la segunda guerra mundial (1939-1945), y el origen judío de su familia hizo que la vivieran con especial horror, sobre todo al finalizar ésta y conocerse los detalles del holocausto. Afortunadamente, como el pequeño Carl solamente era un niño no fue muy consciente de lo que significó, tal y como indica *El mundo y sus demonios* [4,5,6].

Mientras realizaba sus estudios elementales se interesó vivamente por los fenómenos naturales, y para poder acceder a ese conocimiento su madre le consiguió el carnet de lector de la biblioteca pública. El niño tenía una gran curiosidad por saber qué eran las estrellas, y como ni sus padres ni ninguno de sus amigos le sabían dar una respuesta satisfactoria [4]:

“Fui al bibliotecario y pedí un libro sobre las estrellas... Y la respuesta fue sensacional. Resultó que el Sol era una estrella pero que estaba muy cerca.

Las estrellas eran soles, pero tan lejanos que solo parecían puntitos de luz... De repente, la escala del universo se abrió para mí. Fue una especie de experiencia religiosa. Había algo magnífico en ello, una grandiosidad, una escala que jamás me ha abandonado. Que nunca me abandonará.”

Otra de las instituciones que le impresionaron vivamente fue el Museo Americano de Historia Natural de la ciudad de Nueva York, que visitó con un amigo cuando contaba unos seis o siete años de edad. Asistieron al Planetario y observaron las colecciones de meteoritos, las de dinosaurios y las de animales en entornos naturales. Este interés por la ciencia continuó siendo alimentado por sus padres, quienes incluso le compraron varios juegos de química [7], aunque lo que a él realmente le fascinaban eran las cuestiones relativas al espacio, sobre todo después de leer las historias de ciencia-ficción que estaban tan de moda en aquella época. Estas primeras experiencias lo marcaron para toda la vida y fueron el germen de sus investigaciones posteriores [4, 5].

Juventud, carrera universitaria y cargos académicos y científicos.

Una vez que se graduó en la *Rahway High School* de Rahway (Nueva Jersey) en 1951 y aprobó lo que nosotros llamamos bachillerato, se matriculó en la Universidad de Chicago [4]. Allí participó en su club de astronomía, la *Ryerson Astronomical Society* (RAS), cuyo propósito es “observar a las luminarias celestiales en silencio en nuestra cúpula de observación en el techo de Ryerson Hall, y difundir el amor por la astronomía y la astrofísica a través de charlas y eventos” [8].

En esta universidad se graduó en *Artes* en 1954; en 1955 se graduó en *Ciencias*, en 1956 aprobó un máster en *Física*, y en 1960 se doctoró en *Astronomía y Astrofísica* con la tesis titulada “Physical studies of planets” [9]. Gracias a su brillante currículum, ese mismo año obtuvo una beca Miller para trabajar en la Universidad de California (Berkeley) que duró hasta 1962, cuando se trasladó al *Smithsonian Astrophysical Observatory* de Cambridge (Massachusetts). Allí impartió clases e investigó hasta que en 1968 se incorporó a la Universidad Cornell en Ithaca (Nueva York),

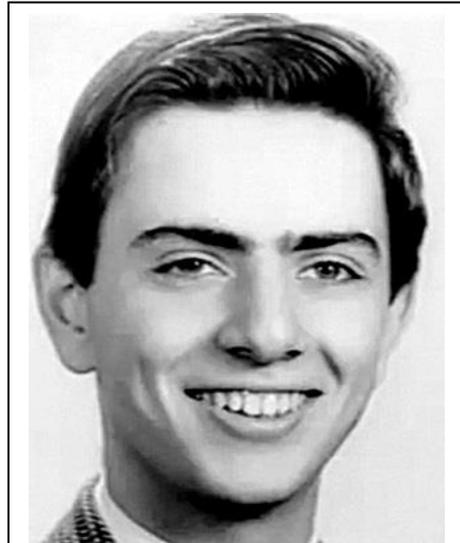


Fig.1 Carl Sagan en 1951, año de su graduación en la *Rahway High School* donde cursó su enseñanza preuniversitaria.

Fotografía del anuario de la *Rahway High School*, obtenida de: <https://futurism.com/known-your-scientist-carl-sagan>, visitada el 25/04/2020.

donde fue nombrado profesor titular y director del *Laboratorio de Estudios Planetarios* en 1971. Al año siguiente (1972) y hasta 1981 fue Director Asociado del Centro de Radiofísica e Investigación Espacial de Cornell, siendo el primer titular de la *Cátedra David Duncan de Astronomía y Ciencias del Espacio* en 1976, donde también ofreció un curso de pensamiento crítico hasta su muerte en 1996. Su prestigio traspasó fronteras y entre otros honores impartió la edición de 1977 de las *Royal Institution Christmas Lectures* en Londres [10].

Una prueba de su innata genialidad queda constatada en su *currículum vitae* de diciembre de 1961, donde se puede ver que, además de tener ya dos hijos a la temprana edad de 27 años, pertenecía a las más prestigiosas asociaciones científicas y había publicado importantes artículos de investigación puntera sobre diferentes aspectos de la Luna, Venus, los meteoritos y el espacio exterior. También puede comprobarse que había iniciado su trabajo como divulgador, pasión que le acompañó toda su vida [11].

Sagan perteneció al programa espacial estadounidense desde sus comienzos y gracias a su trabajo como asesor de la NASA se elaboraron, entre otras cosas, las pautas que debían seguir los astronautas del Programa Apolo que viajaban a la Luna. Asimismo, participó en el diseño de los experimentos de varias misiones no tripuladas que fueron enviadas a explorar el sistema solar. Inspirado por la "cápsula del tiempo" que vio cuando era un niño en la Exposición Universal de Nueva York de 1939, en ellas se incluyó un mensaje fácilmente entendible por cualquier inteligencia extraterrestre que se colocó en dichas naves; el primero de ellos fue una placa anodizada colocada en la sonda espacial *Pioneer 10* lanzada en 1972, y el segundo, copia del primero, en la sonda *Pioneer 11* lanzada al año siguiente (1973). Ilusionado con la idea de conectar con las hipotéticas civilizaciones extraterrestres, Sagan ideó el denominado "Disco de Oro" que fue enviado en las sondas espaciales *Voyager* en 1977. Sin embargo, también fue crítico con algunas propuestas de la NASA, porque estaba en contra de la financiación del transbordador espacial y de la estación espacial en detrimento de posibles futuras misiones robóticas [12].

Sin embargo, a pesar de que buscó con ahínco la vida extraterrestre, se mantuvo muy cauto con el denominado "fenómeno ovni", porque opinaba que debería ser estudiado sin restricciones por los científicos para poder establecer alguna conclusión fiable [1].

Interesado en el rigor de las publicaciones científicas, fue editor de la revista *Icarus*, especializada en estudios sobre el Sistema Solar tanto desde el punto de vista de la astronomía como de otros aspectos como la geología, la meteorología, la física, la química o la biología [13].

En 1980, Carl Sagan, Bruce Murray y Louis Friedman fundaron la *Sociedad Planetaria* [14], una organización no gubernamental cuyo objetivo es

desarrollar la exploración espacial del sistema solar y divulgar las ciencias planetarias y la astronomía. Tiene su Sede en Pasadena (USA), y además se encarga del programa SETI de búsqueda de vida extraterrestre a través de emisiones de radio, el primero de los cuales surgió bajo el patrocinio de la NASA durante los años 1970.

Carl Sagan ocupó cargos de importancia en varias sociedades científicas americanas de gran prestigio; fue presidente de la División de Ciencia Planetaria (DPS) de la *Sociedad Astronómica Americana*, presidente de la Sección de Planetología de la *American Geophysical Union* y presidente de la Sección de Astronomía de la *Asociación Estadounidense para el Avance de la Ciencia*, entre otras muchas [15].

Sus contribuciones científicas.

El testimonio de que fue un extraordinario científico lo atestiguan los numerosos artículos de investigación que escribió, muchos de los cuales han sido recopilados por su biógrafo William Poundstone [16].

Su trabajo resultó fundamental para descubrir las altas temperaturas que existen en la superficie del planeta **Venus**, un gran desconocido a principios de la década de 1960. Publicó sus resultados en el libro *Planets* [17] y según sus datos, todo parecía indicar que era un planeta seco y muy caliente, con una temperatura superficial de unos 380 °C. Más adelante, en el *Laboratorio de Propulsión a Chorro* de la NASA participó en las primeras misiones del Programa *Mariner* a Venus, y en 1962, la sonda *Mariner 2* confirmó sus conclusiones, determinando que su atmósfera es considerablemente caliente y muy densa. Sus investigaciones sobre Venus le llevaron a pronosticar que un calentamiento global de la Tierra generado por los seres humanos sería un peligro creciente que lo llevaría a tener una evolución similar a la de Venus, convirtiéndolo en no apto para la vida como consecuencia de un efecto invernadero fuera de control.

Sagan fue de los primeros científicos que planteó la hipótesis de que **Titán**, una de las lunas de **Saturno**, podría contener grandes extensiones de compuestos líquidos bajo su superficie, y también proporcionó una explicación al color rojizo de su atmósfera, al deducir que estaba formada por moléculas orgánicas.

También supuso que **Europa**, una de las lunas de **Júpiter**, podría albergar océanos de agua subterráneos. La existencia de este océano fue confirmada de forma indirecta por la sonda espacial *Galileo*, que fue lanzada el 18 de octubre de 1989 y entró en la atmósfera de Júpiter el 7 de diciembre de 1995. Otro planeta que centró su atención fue **Marte**, porque le intrigaban las variaciones de color de su superficie, y después de varios estudios llegó a la

conclusión de que estaban producidos por movimientos del polvo superficial originados por tormentas de viento.

Carl Sagan tuvo éxito en casi todas las investigaciones que emprendió excepto en una: la localización de vida extraterrestre, a pesar de que le ilusionó especialmente y le dedicó innumerables esfuerzos. Para ello experimentó con la generación de aminoácidos a través de radiaciones y de reacciones químicas [18], participó en el programa SETI anteriormente citado y en el denominado "mensaje de Arecibo", que fue una emisión de radio que se envió al espacio desde el radiotelescopio de Arecibo (Puerto Rico) el 16 de noviembre de 1974. En ella se informaba sobre la situación del Sistema Solar, de nuestro planeta y de los seres humanos, y fue dirigido a un cúmulo de estrellas que está a una distancia de unos 25.000 años luz de la Tierra. Hasta hoy no hemos recibido respuesta.

Su vida privada, su ideología y su labor divulgativa.

Carl Sagan estuvo interesado en una gran cantidad de temas que siempre abordaba desde la perspectiva de un científico, y vivió en una época convulsa, pero a la vez extraordinariamente interesante. Además de ser testigo de la "guerra fría" derivada de la segunda guerra mundial (1939-1945), asistió a los numerosos avances científicos, técnicos y biosanitarios que caracterizaron al siglo XX.

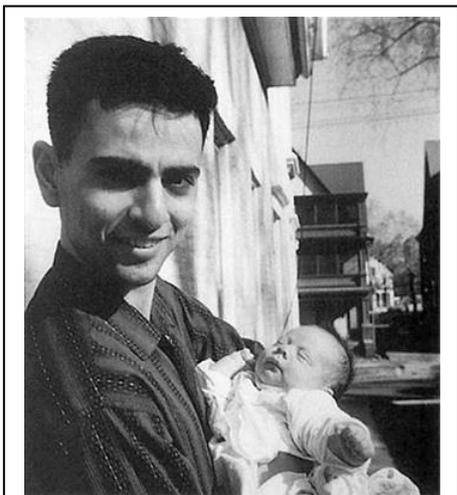


Fig.2 Carl y su primogénito Dorion. Cortesía de su primera esposa y madre de Dorion, Lynn Margulis.

(<http://www.librosmaravillosos.com/carlsaganunavidaenelcosmos/index.html>, visitada el 25/04/2020).

Sus biógrafos le definen como una persona escéptica y librepensadora, agnóstico declarado, cuya vida privada fue un reflejo de dicha época. Contrajo matrimonio tres veces: En 1957 con la bióloga Lynn Margulis, en 1968 con la artista y guionista Linda Salzman, y 1981 con la escritora y activista Ann Druyan, unión que duraría hasta la muerte del científico en 1996. Con ellas tuvo cinco hijos: Dorion S. Sagan Margulis (1959), Jeremy E. Sagan Margulis (1960), Nicholas J. Z. Sagan Salzman (1970), Alexandra R. Sagan Druyan (1982) y Samuel D. Sagan Druyan (1991).

Genial divulgador, intentó transmitir los conceptos científicos de forma sencilla para que llegaran a todo el público y así acabar con las pseudociencias. Su obra más conocida es la ya citada serie *Cosmos*, que se completó con un libro de igual título [19] al que continuó como secuela *Un*

punto azul pálido: Una visión del futuro humano en el espacio [20]. Este último se inspiró en una fotografía de la Tierra tomada por la nave espacial *Voyager 1* a una distancia de 6000 millones de kilómetros, cuando estaba a punto de abandonar nuestro Sistema Solar en 1990.

Contrario a la violencia, se oponía a la guerra del Vietnam y a la escalada armamentística nuclear que protagonizaron Estados Unidos y la Unión Soviética, y debido a su participación en las protestas pacifistas llegó a ser detenido en varias ocasiones [5].

Por desgracia, cuando contaba 60 años Carl Sagan enfermó de mielodisplasia y se sometió a tres trasplantes de médula ósea que le donó su hermana, pero su organismo no resistió y falleció de neumonía el 20 de diciembre de 1996, con 62 años de edad. Fue enterrado en el cementerio Lake View de Ithaca (Nueva York) [21], y los reconocimientos y homenajes a su figura y a su obra han sido innumerables, continuando hasta hoy en día. Descanse en paz.

In memoriam

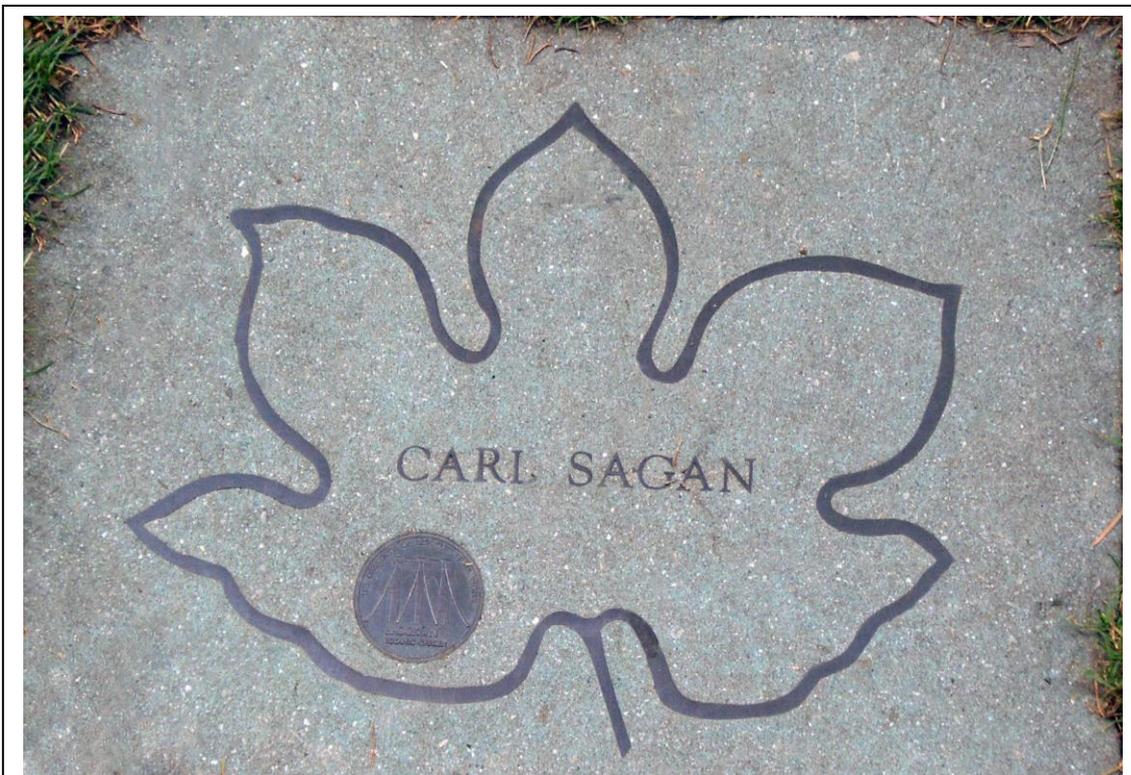


Fig.3 Piedra conmemorativa dedicada a Carl Sagan en el "Sendero de los Famosos" del Jardín Botánico de Brooklyn (Nueva York).

(<https://en.wikipedia.org/wiki/File:Carl-sagan-brooklyn.JPG>, visitada el 25/04/2020).

Referencias:

- [1] SAGAN, Carl (1985) *Contact*. New York, Simon and Schuster.
- [2] SAGAN, Carl (1977) *The Dragons of Eden: Speculations on the Evolution of Human Intelligence*. New York, Random House.
- [3] https://www.accuracyproject.org/cbe-Sagan_Carl.html, visitada el 02/01/2010.
- [4] DAVIDSON, Keay (1999) *Carl Sagan: A life*. New York, etc, John Wiley & Sons.
- [5] SPANGENBURG, Ray; MOSER, Diane (2004) *Carl Sagan: A Biography*. Westport, Conn., Greenwood Publ.
- [6] SAGAN, Carl (1995) *The Demon-Haunted World: Science as a Candle in the Dark*. New York, Random House.
- Fue continuado por SAGAN, Carl (1997) *Billions and Billions: Thoughts on Life and Death at the Brink of the Millennium*. New York, Random House.
- [7] <http://www.famousscintists.org/carl-sagan/>, visitada el 12/01/2020.
- [8] <https://astro.uchicago.edu/RAS/>, visitada el 12/01/2020.
- [9] <http://chronicle.uchicago.edu/931111/sagan.shtml>, visitada el 12/01/2020. Su memoria de tesis se puede consultar en <https://search.proquest.com/docview/301918122>, visitada el 28/04/2020.
- [10] "Christmas Lectures 1977: The Planets: RI Channel", <https://www.rigb.org/christmas-lectures/watch/1977/the-planets>, visitada el 12/01/2020. No podemos citar aquí los numerosos premios que recibió, que se pueden consultar en cualquiera de las biografías aquí citadas.
- [11] <https://docs.google.com/file/d/0B7q4isbMzJa6SVJoU3Q3RG5KZ2s/view>, visitada el 25/04/2020.
- [12] <https://charlierose.com/videos/18982>, visitada el 12/01/2020.
- [13] <https://www.sciencedirect.com/journal/icarus>, visitada el 12/01/2020.
- [14] The Planetary Society, <https://www.planetary.org/>, visitada el 12/01/2020.
- [15] <https://aas.org/about-aas>, www.agu.org, y <https://www.aaas.org/>, visitadas el 12/01/2020.
- [16] POUNDSTONE, William (1999) *Carl Sagan: A Life in the Cosmos*. New York, Henry Holt. Puede leerse on-line en: <http://www.librosmaravillosos.com/carlsaganunavidaenelcosmos/index.html>, visitada el 25/04/2020.
- [17] SAGAN, Carl (1966) *Planets*. Nederland, Time-Life International.
- [18] <https://web.archive.org/web/20071011220013/>, <http://bartelby.com/65/sa/Sagan-Ca.html>, visitada el 26/04/2020.
- [19] SAGAN, Carl (1980) *Cosmos*. New York, Random House.
- [20] SAGAN, Carl (1994) *Pale Blue Dot: A Vision of the Human Future in Space*. New York, Random House.
- [21] <https://es.findagrave.com/memorial/1347/carl-sagan>, visitada el 01/05/2020.

Inés Pellón González.

Doctora en Ciencias Químicas.

Profesora Titular de Universidad, Departamento de Ingeniería Química y del Medio Ambiente.

Escuela de Ingeniería de Bilbao, Universidad del País Vasco (UPV-EHU), Bilbao.

COSMOS

Introducción al libro original de Carl Sagan.

Escribir una Introducción sobre una obra como Cosmos conlleva una gran responsabilidad. No tiene nada que ver con introducir un libro nuevo sobre ciencia, literatura o una novela de ficción científica o relacionada con cualquier otro ámbito cultural. Cosmos es –al menos en mi opinión— mucho más que todo eso. Esta extraordinaria obra supuso un cambio paradigmático en los textos acerca de estas temáticas, adelantándose a su tiempo en muchos aspectos, de manera similar, en el ámbito divulgativo, a lo que el “Cosmos” de Alexander Von Humboldt [1] implicó en el siglo XIX. Además, como veremos más adelante, su concepción holística, conectando las ciencias con las artes y las humanidades en un conjunto coherente y vanguardista, ha servido de modelo de divulgación y comunicación científica de calidad, durante los últimos 40 años.

Cosmos, como muchas grandes obras, tiene como hilo conductor, un viaje. El programa de televisión “*Cosmos: un viaje personal*”, fue el título de la famosa y –en mi opinión hasta hoy inmejorable serie de divulgación científica— que dio pie a Sagan a publicar su libro. La serie estuvo lista en 1980 y constó de trece episodios de aproximadamente una hora, acompañada de una preciosa música de Vangelis y otros autores. Sería difícil decir cuál fue el mejor, pues todos ellos eran realmente maravillosos. Se emitió en 60 países y se estima que, en su momento, fue seguida por más de 400 millones de personas. La serie ganó un Premio Emmy y un Peabody. Por ello, aunque el libro Cosmos, tiene *per se* talla y vida propia, si quisiéramos contextualizarlo apropiadamente, sería conveniente conjugarlo con el visionado de la serie, para ser del todo conscientes de la extraordinaria relación entre el texto, las magníficas ilustraciones y el programa. También sería interesante compatibilizar la lectura de la presente introducción con el capítulo del libro relacionado con la vida y actividades del autor, de lo cual se encarga otro colega.

Por ello, me centraré en la obra realizando ese “viaje personal” de Sagan a través del libro, describiendo lo que supuso para mí como investigador y, concretamente, como geólogo planetario y astrobiólogo, pues también fue un “*viaje personal*” que, sin duda, influyó de manera crucial en mi posterior

actividad como científico y, también de divulgación y comunicación [2]. Un viaje que, en aquel momento, cuando era un joven estudiante enamorado de la Naturaleza y el Universo (algo que no ha cambiado con los años), cubría para mí tres posibles opciones. En aquella época, Cosmos fue uno de los tres grandes programas de divulgación que tuvimos en España, los otros dos estaban relacionados con la Tierra, El Hombre y la Tierra, dirigido por Félix Rodríguez de la Fuente (emitida entre el 1974 y 1981) y los océanos a través de Mundo Submarino de Jacques Cousteau (que tuvo su apogeo entre 1966 y 1976, pero siguió emitiéndose entrados ya en los 80 del siglo pasado). La llegada a España del libro Cosmos, en 1982, fue todo un acontecimiento y, personalmente, fue uno de los factores que contribuyeron a que me decantara por esta línea (ese mismo año me licencié como geólogo).

Ese "viaje personal" de Sagan fue también el modelo que hizo que más adelante tomara la dirección del mío propio y que centrara mi trayectoria futura hacia el espacio. Mi ejemplar del libro de Cosmos (Fig.1) se remonta a 1983 y el hecho que demuestra el éxito de la obra es que ya era la séptima edición (primera edición en Mayo de 1982, segunda en septiembre de 1982, especial para Círculo de Lectores, tercera y cuarta en octubre de 1982, quinta en noviembre de 1982, sexta en diciembre de 1982 y séptima en noviembre de 1983). Dos años después, en 1985, cuando La Sociedad Planetaria, co-fundada por Sagan, llegó a España, me incorporé ilusionado como uno de sus miembros. ¡Quién me iba a decir a mí que, más adelante, sería, durante más de 15 años, su coordinador en nuestro país, recibiendo las cartas del propio Sagan y realizando numerosas actividades en coordinación con ella, una de ellas el Homenaje a Carl Sagan en el 70 Aniversario de su Nacimiento [3,4]! Este evento constó de un simposio científico internacional celebrado en la sede central del CSIC, y otros eventos en Madrid, en el Ilustre Colegio Oficial de Geólogos, la Universidad Complutense de Madrid y el Centro de Astrobiología (en este último contamos con la presencia de José María del Río, voz española de Sagan), en la Universidades de Valladolid, en el Parque de las Ciencias de Granada y en el Museo de las Ciencias de Castilla-La Mancha. En el marco de este aniversario, Luois Friedman, co-fundador de la Sociedad Planetaria junto

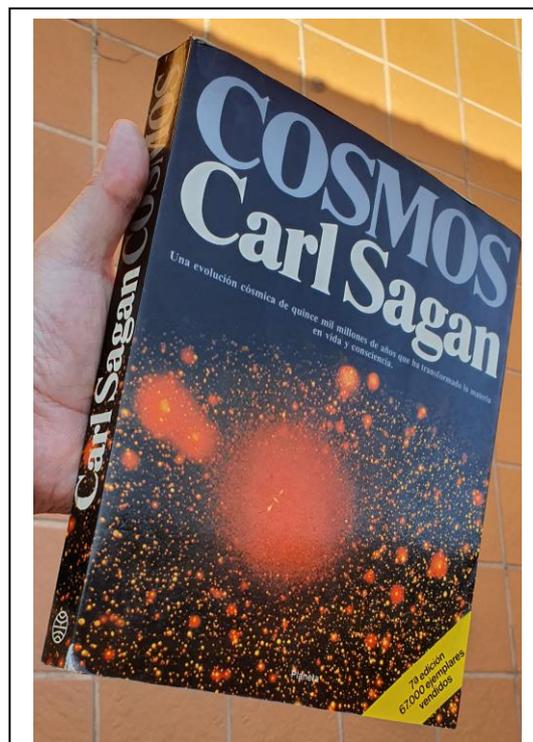


Fig.1 La gran "joya" de mi biblioteca.

con Sagan y Bruce C. Murray (y en ese momento su director), me envió el siguiente texto (mantengo el original en inglés, tal y como lo recibí):

Dear Jesus,

Congratulations on your very noble event of Homage to Carl Sagan. Dr. Sagan and I were close colleagues for many years, both in our work as part of space exploration missions, and of course as co-founders, with Prof. Bruce Murray, of The Planetary Society. We all knew Dr. Sagan as a brilliant scientist and great communicator, a combination which inspired and educated millions of people. He also had a wonderful ability to see the really big issues while precisely studying the smallest details. This quality contributed greatly to helping us create a Society with a very large world view and at the same time create research and education projects helping us in our understanding of other worlds and possibilities of other life. Both in the 25 years I knew him, and in the 7 years since his untimely passing, I continually marvelled at how many lives he so positively influenced.

Your homage is worthy, and we appreciate your efforts to continue Dr. Sagan's legacy.

Best wishes,

Louis Friedman

Executive Director, The Planetary Society

Centrándonos ya en las características más específicas de la obra, Cosmos llegó a España de la mano de la editorial Planeta, con composición y compaginación de Gráficas Perramón, Barcelona, 22 Manresa (Barcelona) e Impresión de Grafson, Esplugues, Barcelona. En su versión española [5], Cosmos es un volumen de 366 páginas (365 en la versión original), que consta de agradecimientos, índice, introducción y trece capítulos, profusamente ilustrados (más de 250 ilustraciones), incluyendo fotografías, figuras, esquemas e obras artísticas, dos apéndices, una sección de lecturas complementarias y, finalmente, un índice onomástico y analítico. La imagen de la cubierta fue realizada por el prestigioso y reconocido autor de temas espaciales, Adolf Schaller y la cubierta trasera consiste en un resumen de la obra y una foto del autor. Su espléndida traducción al español fue llevada a cabo por Miquel Muntaner i Pascual y M^a del Mar Moya Tasis.

Los trece capítulos del libro se corresponden con los trece episodios de la serie de televisión: 1) En la orilla del océano cósmico; 2) Una voz en la fuga cósmica; 3) La armonía de los mundos; 4) Cielo e infierno; 5) Blues para un planeta rojo; 6) Historias de viajeros; 7) El espinazo de la noche; 8) Viaje a través del espacio y del tiempo; 9) Las vidas de las estrellas; 10) El filo de la

eternidad; 11) La persistencia de la memoria; 12) Enciclopedia galáctica y 13) ¿Quién habla en nombre de la Tierra? Tal vez, si hubiera que hacer una síntesis de lo que significan e intentan trasladar al lector, la mejor sería el propio subtítulo que figura en la cubierta: "Una evolución cósmica de quince mil millones de años que ha transformado la materia en vida y consciencia". Sin ninguna duda, una idea vanguardista y precursora del concepto moderno de astrobiología del que Sagan fue uno de sus pioneros.

El éxito del libro fue de tal envergadura que durante 50 semanas formó parte de la lista de los "best-sellers" en la prestigiosa revista norteamericana Publishers Weekly y 70 semanas en la lista de "best-sellers del New York Times. Fue el libro de ciencia más vendido de su época e internacionalmente ha superado los 5 millones de ejemplares. En 1981, Cosmos recibió el "Premio Hugo" como mejor libro de no-ficción. Fue tal su relevancia que la Biblioteca del Congreso de los EEUU designó a Cosmos como uno de los 88 libros que "han modelado América" [6].

Yo diría incluso mucho más. Sagan a través de Cosmos impulsó vocaciones a nivel mundial y consolidó el concepto de Ciencia como Cultura, proporcionando una forma rigurosa, amena y elegante de hacer divulgación y comunicación científica de primer nivel, "con clase". Revisando documentación antigua para la elaboración de la presente contribución, localicé mi carnet de La Sociedad Planetaria con la firma de Carl Sagan (Fig. 2), como Presidente y Bruce Murray, como Vicepresidente.



Fig.2. Carnet que guardo con celo entre mis documentos y en mis recuerdos.

Lo más llamativo es que este carnet, con fecha diciembre de 1996, debió de ser uno de los últimos que dejó firmados Carl Sagan, fallecido precisamente el 20 de diciembre de 1996. Un documento y un legado que conservo con mucho cariño y que me parece procedente compartir aquí.

Referencias:

- [1] Von Humboldt, A. (1845) COSMOS: A Sketch of the Physical Description of the Universe, Vol. 1, Translated by E C Otte on Project Gutenberg, Foundations of Natural History, ISBN-10: 0801855020, 4040p
- [2] Martínez-Frías (2004). Homenaje a Carl Sagan. 70 Aniversario de su nacimiento. Red Tierra. RedIRIS http://tierra.rediris.es/merge/Carl_Sagan/
- [3] Lunar, R. & Martínez Frías, J. (2004) Carl Sagan, coloso de la ciencia. Sección Ciencia. Tribuna Complutense, 16.
- [4] Somohano, V. (2009) El Cosmos de Carl Sagan. <https://archive.org/details/SonidoExcelente-ElCosmosDeCarlSaganPorElGeologoJesusMartinezFrias>
- [5] Sagan, C. (2002) Cosmos. Editorial Planeta, Barcelona, ISBN 10: 8432036269, 366p
- [6] Library of Congress "Books That Shaped America" <https://www.loc.gov/item/prn-13-005/books-that-shaped-america-on-amazon/2013-01-22/>

Jesús Martínez Frías.

Doctor en Ciencias Geológicas.

Ex-Coordinador en España de La Sociedad Planetaria (The Planetary Society).

Fundador y Director de la Red Española de Planetología y Astrobiología (REDESPA).

Presidente de la Comisión de Geología Planetaria de la Sociedad Geológica de España.

Instituto de Geociencias (CSIC-UCM), Madrid.

Capítulo 1

En la orilla del océano cósmico

Los primeros hombres creados y formados se llamaron el Brujo de la Risa Fatal, el Brujo de la Noche, el Descuidado y el Brujo Negro... Estaban dotados de inteligencia y consiguieron saber todo lo que hay en el mundo. Cuando miraban, veían al instante todo lo que estaba a su alrededor, y contemplaban sucesivamente el arco del cielo y el rostro redondo de la tierra... [Entonces el Creador dijo]: Lo saben ya todo... ¿qué vamos a hacer con ellos? Que su vista alcance solo a lo que está cerca de ellos, que solo puedan ver una pequeña parte del rostro de la tierra... ¿No son por su naturaleza, simples criaturas producto de nuestras manos? ¿Tienen que ser también dioses?

El Popol Vuh de los maya-quichés

*¿Has abrazado el conjunto de la tierra?
¿Por dónde se va a la morada de la luz, y dónde residen las tinieblas?*
Libro de Job

No debo buscar mi dignidad en el espacio, si no en el gobierno de mi pensamiento. No tendré más aunque posea mundos. Si fuera por el espacio, el universo me rodearía y se me tragaría como un átomo; pero por el pensamiento yo abrazo el mundo.

BLAISE PASCAL, Pensées

Lo conocido es finito, lo desconocido infinito; desde el punto de vista intelectual estamos en una pequeña isla en medio de un océano ilimitable de inexplicabilidad. Nuestra tarea en cada generación es recuperar algo más de tierra.

T. H. HUXLEY, 1887

1.1 Océanos cósmicos.

La analogía del océano cósmico que utiliza Carl Sagan (1934-1996) para iniciar tanto su serie televisiva de divulgación *Cosmos* como el libro que publicó con el mismo título [1] no es nueva. Tiene, en realidad, miles de años de antigüedad. En la cosmogonía egipcia se habla del *Nun*, las aguas primitivas: un océano ilimitado, oscuro, desconocido e inerte que se encuentra por encima del cielo y por debajo de la Tierra [2]. Sagan, al inicio de la serie televisiva camina por un acantilado, desde el que se observa la inmensidad del océano y pronuncia la célebre frase en la que define su *Cosmos*: "El Cosmos es todo lo que es o lo que fue o lo que será alguna vez" para continuar con lo que va a ser el hilo conductor de su viaje personal: la capacidad del ser humano para maravillarse con la observación y el entendimiento del universo y afirma "Nuestras contemplaciones más tibias del Cosmos nos conmueven: un escalofrío recorre nuestro espinazo, la voz se nos quiebra, hay una sensación débil, como la de un recuerdo lejano, o la de caer desde lo alto. Sabemos que nos estamos acercando al mayor de los misterios".

El capítulo I de *Cosmos* se titula «En la orilla del océano cósmico». La orilla para Sagan no es más que la superficie de la Tierra, nuestra atalaya, como el acantilado sobre el que camina en la primera escena de la serie televisiva: el lugar desde donde vamos a observar la inmensidad del universo. Y ese océano cósmico nos llama, como el inmenso mar llamaba, casi obsesivamente, a los balleneros en la novela *Moby Dick* de Herman Melville (1819-1891). Inicia Sagan su viaje hablando de la estructura a gran escala del universo, de la textura que forman la distribución de galaxias en el Cosmos. Algo que empezaba a ser conocido en ese momento. No es casualidad que el libro de referencia en esta materia haya sido, por muchos años, el que publicó el recientemente galardonado con el premio Nobel de Física, Jim Peebles (1935), precisamente en 1980, el mismo año en que se emitió el primer episodio de *Cosmos*. Esa obra, *The Large-Scale Structure of the Universe* [3], ha sido el libro de cabecera durante muchos años de los que nos hemos dedicado a estudiar este campo de la Cosmología. En *Cosmos* Sagan muestra, en blanco y negro, uno de los primeros cartografiados de la distribución de galaxias, el catálogo realizado por Donald Shane (1895-1983) y Carl Wirtanen (1910-1990), del observatorio Lick de la Universidad de California [4]. Ese tipo de mapas del cielo mostraban las posiciones proyectadas sobre la esfera

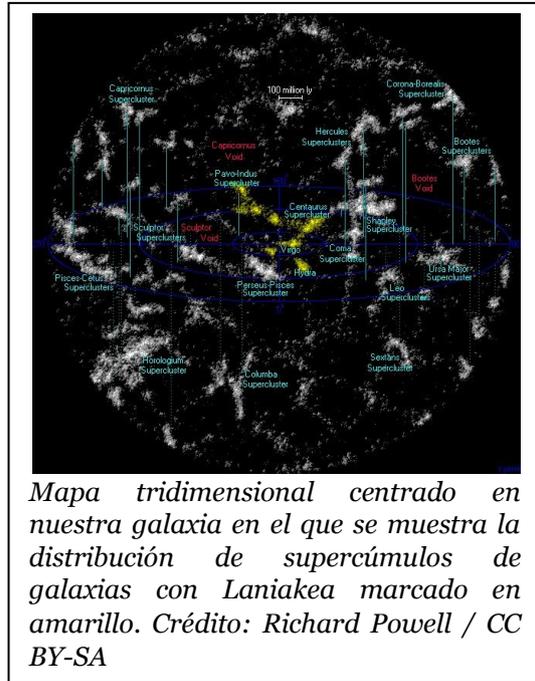
celeste de miles de galaxias. En ellos se aprecia inequívocamente la tendencia al agrupamiento de las galaxias, consecuencia de la fuerza dominante a estas escalas cósmicas que las hace sociables: la gravedad. Sagan lo explica con elocuencia: "Son las galaxias. Algunas son viajeras solitarias; la mayoría habitan en cúmulos comunales, apretadas las unas contra las otras errando eternamente en la gran oscuridad cósmica". Con el paso del tiempo, estos cartografiados crecieron en extensión e incorporaron la tercera dimensión, a partir de medidas espectroscópicas del desplazamiento hacia el rojo de las galaxias (el *redshift*). Conocer esta cantidad permite estimar la distancia a la que se encuentra una galaxia en el marco de un modelo cosmológico: los mapas se hicieron tridimensionales que contienen centenares de miles e incluso millones de galaxias hoy en día.

Los astrónomos también han sido capaces de medir, para las galaxias de nuestro entorno, sus velocidades peculiares, es decir, no solo sabemos a qué velocidad se alejan las galaxias de nosotros como consecuencia de la expansión cósmica postulada por Edwin Hubble (1889-1953), sino que además podemos llegar a medir las velocidades que experimentan como consecuencia de la atracción gravitatoria que ejercen unas galaxias sobre otras y fundamentalmente, la materia oscura que las envuelve sobre cada una de ellas. Esta información nos ha permitido comprender las entidades más grandes de la macroestructura cósmica: los supercúmulos.

Carl Sagan habla del Grupo Local en este capítulo y lo define como un "cúmulo disperso, oscuro y sin pretensiones". Se trata del pequeño grupo de galaxias (la palabra cúmulo hoy se utiliza para agrupaciones con más de 50 miembros grandes). En el Grupo Local hay dos galaxias espirales grandes: Andrómeda (M31) y la Vía Láctea, una tercera algo menor, también espiral, la galaxia del Triángulo (M33) y otras 40 galaxias bastante más pequeñas, elípticas o irregulares, muchas de ellas satélites de la Vía Láctea (como las Nubes de Magallanes) o de Andrómeda (como M32 o NGC205). Tiene una extensión de unos 3 millones de años luz. Sobre este tema, Carl Sagan se extiende en el capítulo X, «Al filo de la eternidad». Allí habla del cúmulo de Virgo, a unos 60 millones de años luz de nuestra galaxia: un enjambre formado por miles de galaxias, algunas descomunales, como M87, que recientemente ha adquirido fama ya que un grupo internacional de radioastrónomos ha conseguido fotografiar el agujero negro supermasivo que alberga en su centro [5]. Nombra Sagan en este capítulo a George Smoot (1945), que más tarde obtendría el premio Nobel de física, junto a John Mather (1946), por sus estudios de la radiación cósmica de fondo con el satélite COBE. Dice Sagan que Smoot y sus colegas han sido capaces de medir las velocidades de la Vía Láctea y otras galaxias de nuestro entorno cayendo hacia el cúmulo de Virgo.

Otras estructuras aún más grandes pero no ligadas gravitatoriamente, como lo están los cúmulos, son los supercúmulos de galaxias. El cúmulo de Virgo y el Grupo Local pertenecen al supercúmulo Laniakea, un término hawaiano que podríamos traducir por «cielo inmenso». Los astrónomos R. Brent Tully (1943), Hélène Courtois (1970), Yehuda Hoffman y Daniel

Pomarède postularon su existencia (y lo bautizaron con ese bonito nombre) en una artículo publicado en la revista *Nature* [5] en 2014. Midieron las posiciones y velocidades peculiares de más de 8.000 galaxias y determinaron las fronteras del supercúmulo, de manera similar a como se definen los límites de una cuenca hidrográfica (la línea divisoria de aguas): cualquier punto del supercúmulo está cayendo hacia su interior. Su extensión sería de unos 520 millones de años luz y albergaría una masa equivalente a cien mil billones de soles (ver imagen). Seguro que Sagan, tan amante de la geografía como mi colega Jorge Olcina (autor del epílogo de este libro-tributo a Cosmos), acabaría su hipotético capítulo sobre estos descubrimientos diciendo algo así: Nuestra dirección cósmica es a partir de ahora: la calle en la que vivimos y el número del portal, código postal, ciudad, país, la Tierra, Sistema Solar (tercer planeta), Brazo de Orión, Vía Láctea, Grupo Local, Laniakea.



La última vez que estuve en el Museo Galileo de Florencia compré una camiseta con una frase de Galileo Galilei (1564-1642): *Misuraciò che è misurabile, e rendimisurabileciò che non lo è*, o sea, mide aquello que sea medible y haz medible lo que no lo sea. En los diferentes episodios de la serie Cosmos, Carl Sagan explica muchas de las mediciones que han hecho los astrónomos a lo largo de la historia para entender el universo y relata las técnicas que se han utilizado para llevarlas a cabo. Sin duda, una de las mediciones más potentes, por lo simple del método y lo espectacular del resultado obtenido es la medición del perímetro de la Tierra que realizó Eratóstenes de Cirene (276-195 a. C.). Explica Sagan que Eratóstenes era conocedor de que un obelisco que estuviera en la ciudad de Asuan (la actual Asuan), situada aproximadamente sobre el Trópico de Cáncer, no proyectaría ninguna sombra a mediodía del solsticio de verano (el 21 de junio), ya que el Sol culminaría en el cenit, en cambio, ese mismo día a y la misma hora, en Alejandría sí que lo hacía. Alejandría era la ciudad en la que vivía Eratóstenes, ya que era el responsable de su magnífica biblioteca. Como el Sol está tan lejos, podemos considerar que los rayos que inciden tanto en Asuan como en Alejandría son paralelos. El ángulo que forman esos rayos con el obelisco es de 0° en Asuan y de 7° en Alejandría. Con esta medición y sabiendo que Asuan y Alejandría están aproximadamente en el mismo meridiano, a 800 km de distancia una de la otra, Eratóstenes dedujo que la circunferencia completa de la Tierra, mediría 40.000 km, un valor extraordinariamente preciso. La Unesco

declaró que 2009 fuese el año internacional de la astronomía para conmemorar el 400 aniversario de las observaciones telescópicas de Galileo. Aquel año el experimento de Eratóstenes se repitió en decenas de escuelas, institutos y universidades de todo el mundo con las mismas técnicas que tan ilustrativamente describe Sagan: "Las únicas herramientas de Eratóstenes fueron palos, ojos, pies y cerebros, y además el gusto por la experimentación".

La admiración que siente Sagan por el periodo helenístico y en particular por Alejandría aparece en toda la obra de Cosmos. Es curioso que el año en que murió Carl Sagan, 1996, se publicó un libro en Italia que habría sido muy de su agrado: *La rivoluzione dimenticata* (La revolución olvidada) del físico teórico Lucio Russo (1944). En 2004, se tradujo al inglés [7]. Russo defiende que el conocimiento adquirido en esta época de la mano de sabios como Eratóstenes, Euclides de Alejandría (325-265 a.C.), Aristarco de Samos (310-230 a.C.), Apolonio de Pérgamo (262-190 a.C.), Hiparco de Nicea (194-120 a.C.), Ptolomeo de Alejandría (85-165 d.C.) y que se fue acumulando durante varios siglos constituyó una auténtica revolución científica y tecnológica, pensemos por ejemplo en la precisión de los engranajes en el misterioso mecanismo de Anticitera [8], datado en esta época. El fin de este periodo y su olvido coincidiría con la muerte de Hypatia de Alejandría (370-415 d.C.) y la destrucción de la famosa biblioteca de su ciudad natal. Russo recoge la antorcha de Sagan y plantea que el nacimiento del pensamiento científico fue consecuencia de la encrucijada de culturas producida por la expansión del imperio de Alejandro Magno (356-323 a.C.), dominando las civilizaciones de Egipto y Mesopotamia que disponían de tecnologías y economías superiores a las de los propios conquistadores.

Referencias:

- [1] Sagan C., *Cosmos*, traducción de Miquel Muntaner i Pascual y Maria del Mar Moya Tasis, Editorial Planeta, Barcelona, 1980.
- [2] Martínez V.J. & Martínez Artero, A., «The Never-ending Story of the Infinite Cosmos», *Mediterranean Archaeology and Archaeometry*, Vol. **18**, No 4, pp. 327-334, 2018.
- [3] Peebles P.J.E., *The Large-Scale Structure*, Princeton University Press, Princeton, 1980.
- [4] Jones, B.J.T, Martínez, V.J., Saar, E. & Trimble, V., «Scaling Laws in The Distribution of Galaxies», *Reviews of Modern Physics*, **76**, pp. 1211-1266, 2005.
- [5] Akiyama, K. et al., «First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole», *The Astrophysical Journal Letters*, 875, 1, 2019.
- [6] Tully, R.B., Courtois, H., Hoffman, Y. & Pomarède, D. «The Laniakea supercluster of galaxies», *Nature***513** (7516), pp 71–3, 2014.
- [7] Russo, Lucio (2004), *The Forgotten Revolution. How Science Was Born in 300 BC and Why it Had to Be Reborn*, Springer-Verlag, Berlin.
- [8] Martínez-Artero, A., «El mecanismo de Anticitera», 2017, <http://www.conec.es/astrologia/el-mecanismo-de-anticitera/>

Vicent J. Martínez.

Catedrático de Astronomía y Astrofísica en la Universitat de València.

Capítulo 2

Una voz en la fuga cósmica

*Se me ordena que me rinda al Señor de los Mundos.
Es él quien te creó del polvo...
El Corán, sura 40*

*La más antigua de todas las filosofías, la de la evolución, estuvo maniatada de manos y de pies y relegada a la oscuridad más absoluta durante el milenio de escolasticismo teológico. Pero Darwin infundió nueva savia vital en la antigua estructura; las ataduras saltaron, y el pensamiento revivificado de la antigua Grecia ha demostrado ser una expresión más adecuada del orden universal de las cosas que cualquiera de los esquemas aceptados por la credulidad y bien recibidos por la superstición de setenta generaciones posteriores de hombres.
T. H. HUXLEY, 1887*

*Probablemente todos los seres orgánicos que hayan vivido nunca sobre esta tierra han descendido de alguna única forma primordial, a la que se infundió vida por primera vez... Esta opinión sobre el origen de la vida tiene su grandeza... porque mientras este planeta ha ido dando vueltas de acuerdo con la ley fija de la gravedad, a partir de un inicio tan sencillo han evolucionado y siguen evolucionando formas sin fin, las más bellas y las más maravillosas.
CHARLES DARWIN, El origen de las especies, 1859*

*Parece que existe una comunidad de materia a lo largo de todo el universo visible, porque las estrellas contienen muchos de los elementos que existen en el Sol y en la Tierra. Es notable que los elementos difundidos más ampliamente entre las huestes de estrellas sean algunos de los elementos más estrechamente relacionados con los organismos vivientes de nuestro globo, entre ellos el hidrógeno, el sodio, el magnesio y el hierro. ¿No podría ser que por lo menos las estrellas más brillantes fuesen como nuestro sol, centros que mantienen y dan energía a sistemas de mundos, adaptados para ser lugar de residencia de seres vivientes?
WILLIAM HUGGINS, 1865*

2.1

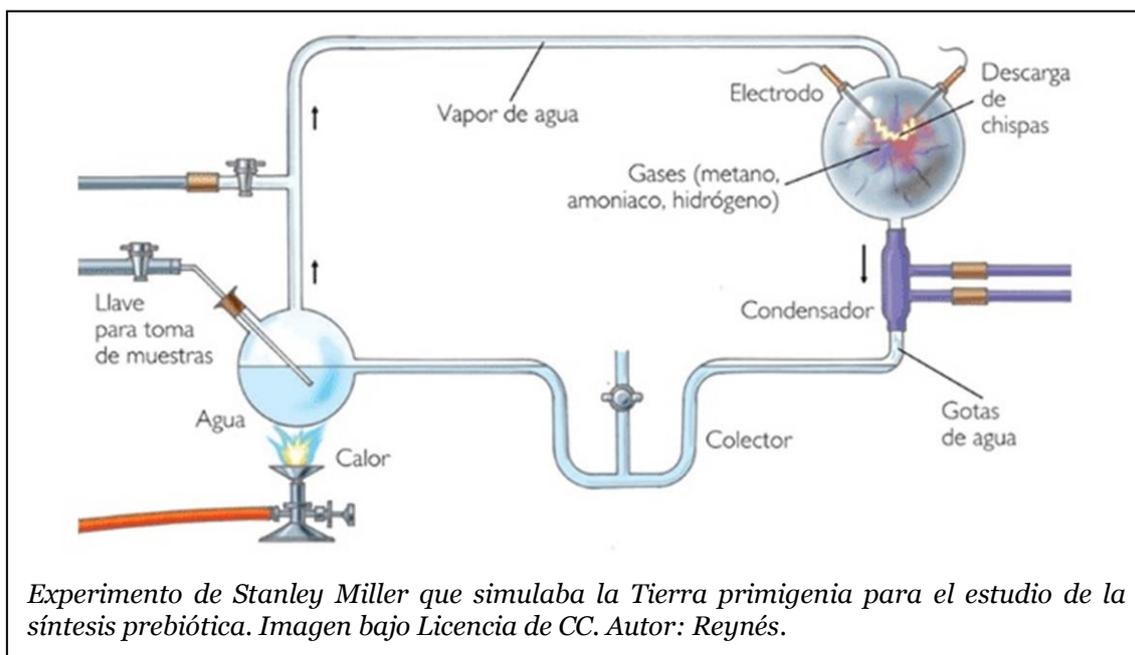
El origen de la música de la vida: polvo de estrellas.

“Somos polvo de estrellas” decía Carl Sagan cuando hablaba sobre las estrellas y el universo. Todo está hecho de átomos y esos átomos llevan en el universo desde tiempos inmemorables. Pero, ¿cómo unos átomos pueden ser esenciales para la vida? ¿Cómo se genera vida? ¿Qué es la vida?

Al igual que la música está compuesta por notas, la vida se compone de átomos que reaccionan entre sí para dar una melodía, la melodía de la vida. Pero ¿qué es la vida? Calderón de la Barca respondía a esta pregunta en su libro “La vida es sueño” y escribía que la vida es “*una ficción, una sombra, una ilusión, y el mayor bien es pequeño; que toda la vida es sueño, y los sueños, sueños son*”. Pero, dejando a un lado la parte poética y filosófica de qué es la vida, podemos decir que la vida tal cual la conocemos en La Tierra se compone principalmente de carbono, además de otras moléculas orgánicas. Todas estas moléculas vendrían de la muerte de estrellas del universo, puesto que son comunes en todas las especies de seres vivos que encontramos en la Tierra, incluidos los virus (sin entrar en disputas sobre si se les consideran seres vivos o no). Las estructuras de carbono que se observan son como las notas de esa música viva y que dan lugar a lo que se conoce como ADN y ARN. Estas moléculas son la base para dar parte de la estructura, la partitura que dará la melodía final y que conocemos como las proteínas. Las proteínas desempeñan la función final en los seres vivos y hacen que podamos oír esa música de la vida.

Pero, ¿cómo unas moléculas aisladas en el espacio interestelar dieron “vida”? ¿Cómo ocurrió? En el espacio, las moléculas orgánicas o bien se forman en la superficie de granos de hielo o polvo espacial, o bien entre la reacción de moléculas que se encuentran en fase gaseosa. Pese a la inmensidad del espacio, estas moléculas se encuentran de manera abundante entre las nubes de gas y polvo estelar, de tal forma que “esa sustancia de la vida” está en todas partes. ¿Cómo pudo surgir entonces la vida en la Tierra? Muchas han sido las teorías y especulaciones sobre este posible origen, pero la mayoría no aportaban pruebas que las respaldaran. El primero en proponer una teoría para el origen de la vida de forma no espontánea fue Aleksandr Oparin. Oparin describió el nacimiento de la vida como una sopa primigenia, en

donde se acumularon una serie de gases como metano, hidrógeno y amoniaco en el mar, el cual quedó altamente concentrado en compuestos orgánicos, a partir de los cuales surgió la vida. Posteriormente, en 1953 Stanley L. Miller y su director de tesis, Harold Clayton Urey, permitieron pasar del terreno de la especulación y la teoría de Oparin al ensayo en el laboratorio. Miller realizó un experimento en el que intentó imitar los océanos y la atmósfera primitivos de la Tierra en un recipiente de cristal, obteniendo mediante descargas eléctricas (simulando relámpagos) y luz UV (simulando los rayos solares), aminoácidos y moléculas orgánicas. De hecho, el propio Carl Sagan también realizó este mismo experimento en su laboratorio de Cornell. Al principio, el vaso era transparente, pero tras la reacción, un polvo marrón, similar al alquitrán, aparecía en su interior y contenía moléculas orgánicas que pudieron dar las primeras moléculas de la vida.



A pesar de que este pionero experimento de Miller-Urey fue una revolución en el mundo científico, esto no decía nada de cómo o dónde se fueron conjugando esas unidades simples hasta crear complejas estructuras moleculares y llegar así a LUCA, el primer antecesor común a todos los seres vivos de La Tierra o *Last Universal Common Ancestor* de sus siglas en inglés. Durante el último medio siglo, muchos autores han replicado estos experimentos y han llegado a obtener nucleótidos (bases del ADN y ARN) y aminoácidos en el laboratorio, pero ninguno ha conseguido que salga "reptando" del vaso de precipitados alguna criatura viva por muy microscópica que fuera. Esto es, se han conseguido en el laboratorio las notas esenciales y la partitura de la música de la vida por separado, pero no el conjunto de la melodía. Así pues, muchos investigadores han propuesto diversos escenarios

que promovieran el origen de la vida. De hecho, en los últimos años se ha descrito que el mismo origen de la vida pudo darse en pequeños recovecos dentro del hielo glacial o entre fluidos ricos en sodio y framboides de magnetita, como se ha descrito recientemente en la revista PNAS por White *et al.* 2020 [1]. Esto podría haber dado lugar a la formación de aminoácidos y la posterior racemización, necesaria para la vida, así como a la aparición de unas promembranas que darían lugar a la primera protocélula. Cabe destacar que estos compuestos alcalinos se encuentran en meteoritos como las condritas carbonáceas, indicando que estos compuestos se encuentran también en el medio interestelar, lo que permite plantear que podría haber vida en otros lugares si se dan las circunstancias. En todos esos vasos de laboratorio sólo están las notas de la música de la vida, no la música en sí. Pero, ¿cómo pasar de moléculas simples a moléculas más complejas capaces de ensamblarse en la posición correcta? ¿Qué fue primero, la síntesis de aminoácidos o de nucleótidos (ADN/ARN)?

Hoy en día la teoría más aceptada para el origen de la vida es la hipótesis del ARN, en donde en esa sopa primigenia pudo surgir una molécula de base nitrogenada basada en el carbono con capacidad autorreplicativa, muy similar al ARN actual. De hecho, se sabe que algunas formas de ARN, denominadas ribozimas, tienen actividad enzimática, esto es, actúan como catalizadores de reacciones químicas y además, tienen la capacidad de autorreplicarse. Estas ribozimas son un componente esencial en los ribosomas, la estructura celular encargada de formar las proteínas. En 2009, Ada Yonath, premio Nobel de Química 2009, identificó mediante cristalografía la estructura y función del ribosoma [2, 3]. Tanto ella como sus colaboradores identificaron una estructura común a todos los seres vivos de la Tierra y que se encuentra dentro del ribosoma. Esta estructura podría tener algo que ver con esas primeras ribozimas primigenias que fueron capaces de pasar de una simple molécula de ARN a un sistema más complejo (proteína). Este descubrimiento consiguió identificar el posible mecanismo de traducción de la vida prebiótica/abiótica dentro de los ribosomas, a una vida que fue evolucionando, mientras se reproducía y competía por buscar estructuras más complejas que le ayudasen a sobrevivir mejor. Así, esas moléculas primigenias evolucionaron en el tiempo dando organismos complejos. Organismos que se adaptaron al medio y sufrieron modificaciones en su genoma que les llevaron a sobrevivir, a ser esa melodía recurrente que aunque pasen los años, siempre está ahí y nunca pasa de moda por mucho que se modifique y evolucione. De esta forma *“la vida parece ser el comportamiento ordenado y reglamentado de la materia”* como decía Schrödinger, aunque la vida corresponde a un sistema químico autosuficiente, capaz de experimentar una evolución de tipo darwinista como establece la NASA.

Tanto estos gases y materia orgánica que se encontraban en la Tierra primigenia como las fuentes de energía que dieron lugar a la melodía de la vida terrestre y todas sus variantes, también se encuentran en todo el Cosmos. La

cuestión es cómo esa materia puede dar otras formas de vida distintas a las que conocemos en nuestro amado Planeta. Puede que, al igual que aquí en la Tierra y a lo largo de la evolución, exista una convergencia que haga que esas formas de vida, si las hubiera, tengan alguna característica similar a la que nosotros conocemos, puesto que es la única forma factible que permite la "vida". Por supuesto, esa vida estaría condicionada a las condiciones físicas y químicas del planeta en cuestión y debería estar adaptada a ellas, de tal forma que también evolucionarían. Un ejemplo hipotético serían los pequeños seres microscópicos "hundientes" que imaginaba Carl Sagan en un tipo de planeta gaseoso como Júpiter, y que evolucionaron a gigantes de hidrógeno "flotantes" para aumentar su supervivencia y alimentarse del hidrógeno de las capas superiores del planeta.

En resumen, cualquier partícula o materia orgánica que pueda dar vida tiene que evolucionar también para lograr perdurar en el tiempo, si no desaparecerá. La verdad es que la evolución en sí no es tan sólo la teoría de Darwin, si no que es un hecho, un hecho que hace que ahora mismo en La Tierra existan distintas formas de "vida", que comparten las mismas notas esenciales que dan voz a la melodía de la vida terrestre. Como bióloga (β io /bio/ = vida y λ ογία /logía/ = estudio) diré que sólo conozco un tipo de vida, la vida de la Tierra, aquella que es capaz de relacionarse y adaptarse al medio, evolucionar, reproducirse, crecer, tener metabolismo autosuficiente y autorregularse (homeostasis). Pero, con todas las moléculas orgánicas del universo creo que la "vida" que conocemos es tan sólo una pequeña voz en la fuga cósmica y estoy segura que hay más voces en el cosmos, esperando a ser escuchadas o identificadas. Al fin y al cabo *"la naturaleza de la vida en la Tierra y la búsqueda de vida en otras partes son dos aspectos de la misma cuestión: la búsqueda de lo que nosotros somos"* Carl Sagan.

Referencias:

- [1] White, LF *et al.*, (2020). Evidence for sodium-rich alkaline water in the Tagish Lake parent body and implications for amino acid synthesis and racemization. PNAS 117 (21): 11217-11219. <https://doi.org/10.1073/pnas.2003276117>
- [2] Agmon, I *et al.*, 2009. Identification of the prebiotic translation apparatus within the contemporary ribosome. Nature Precedings. 4. <https://doi.org/10.1038/npre.2009.2921.1>
- [3] Premio Nobel de Química 2009: <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2009/yonath/facts/>.

Patricia Sánchez Pérez.

Doctora en Biociencias Moleculares (UAM).

2.2

Una visión racional de la naturaleza: Cosmos frente a Caos.

En la introducción al capítulo 2 *Una voz en la fuga cósmica*, Carl Sagan nos presenta una cita de T. H. Huxley, en la que éste destaca la importancia de la obra de Darwin al rescatar lo mejor del pensamiento evolucionista de la antigua Grecia de la oscuridad del milenio de escolasticismo teológico. Como señala Sagan, los primitivos griegos denominaban Caos al primer ser: no tenía forma, y le atribuían la creación de un universo de naturaleza impredecible, bajo el dominio de dioses caprichosos. Pero el pensamiento racional de los filósofos jonios los llevó a plantear que se puede conocer el orden interno del universo, la regularidad de sus procesos, la necesidad reglada de sus fenómenos; y así pasaron de un universo caótico a un universo ordenado, predecible y experimentable: el Cosmos.

Sagan comenta en el capítulo 7, *El espinazo de la noche*, que Platón - quien creía que “todas las cosas están llenas de dioses”- propuso quemar todas las obras de Demócrito (y también de Homero), quizás porque Demócrito no aceptaba la existencia de almas inmortales, o porque creía en un número infinito de mundos, algunos habitados. Demócrito era un filósofo materialista, para él todo se podía entender, objetivamente, como propiedades de la materia en movimiento e interacción. No hay ningún movimiento inteligente, ni finalista; los movimientos de la materia y sus choques son resultado del azar y la necesidad.

Es inevitable que la mirada humana se eleve a querer entenderlo todo, y nos preguntamos: ¿quiénes somos? ¿De dónde venimos? ¿A dónde vamos? ¿Estamos solos? Somos Cosmos inteligente, Cosmos consciente del Cosmos.

Dado que los biólogos no hemos estudiado más vida que la terrestre “un tema solitario en la música de la vida”; Sagan nos plantea: “¿es este tono agudo y débil la única voz en miles de años luz? ¿O es más bien una especie de fuga cósmica... tocando la música de la vida en la galaxia?”

El origen común y la evolución de la vida lleva a Sagan a contarnos una historia que ilustra la “música” sobre la Tierra. En el mar interior del Japón existen unos cangrejos con curiosas formas en sus dorsos, parecidas a rostros de samurais. Son los cangrejos Heike, que llevan el nombre de un clan de samurais derrotado por otro clan rival en una terrible batalla naval. No quedó ni

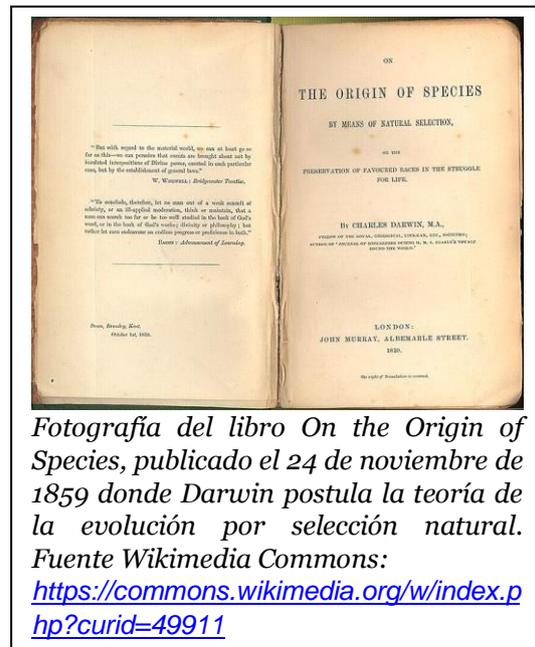
un barco Heike; los samurais que no murieron en el combate se arrojaron al mar y se ahogaron. Sólo sobrevivieron cuarenta y tres mujeres, que terminaron conviviendo con los pescadores de la zona. Los pescadores descendientes de los Heike dicen que sus ancestros se pasean por los fondos marinos en forma de cangrejos. Cuando pescan estos cangrejos, los más parecidos a los rostros de samurais son arrojados de nuevo al mar, como conmemoración de la batalla, teniendo por ello más posibilidades de reproducirse. Al margen de la interpretación mística, asociada a la leyenda y a la tradición, la explicación científica de la existencia de cangrejos con cara de samurai pasa por incluir los conceptos de herencia y de selección de las formas heredadas.

La mejor letra a esta música la ha puesto Darwin en *El origen de las especies por medio de la selección natural*, donde hace referencia a las diferencias dentro de la constancia entre las especies. En su teoría evolucionista, Darwin plantea tanto un concepto funcional de especie como la influencia del medio en la función y estructura del ser vivo. Pero ¿cómo se llega al concepto funcional de reproducción desde la medieval idea de generación divina? Veremos que todo se reduce a dos posturas que, con matices, se alternan en la historia de la biología: los partidarios de una continuidad estructural caprichosa y teleológica, prioritaria sobre la función; y los partidarios de una prioridad funcional que dé coherencia a estructuras discontinuas.

Desde la quema de la Biblioteca de Alejandría hasta finales del siglo XVI la naturaleza volvió a interpretarse caprichosa e impredecible, mero agente de la voluntad divina. No se distinguían bien los seres vivos entre todos los seres creados por Dios y representados en una cadena continua.

Linneo pudo describir y clasificar como vivos, mediante la comparación de sus partes visibles, a los seres que mantenían una continuidad estructural generación tras generación: los que tenían relaciones de parentesco por filiación.

En el siglo XVIII aparece un nuevo enfoque en autores como Lamarck y Cuvier en el que la función es prioritaria a la estructura. Esta visión orgánica funcional va a permitir pasar de la visión fijista y ahistórica de la idea de *generación* al concepto de reproducción, como función vital, y a la idea de filiación evolutiva de las especies que experimentan cambios en continua



Fotografía del libro *On the Origin of Species*, publicado el 24 de noviembre de 1859 donde Darwin postula la teoría de la evolución por selección natural. Fuente Wikimedia Commons: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=49911>

interacción con sus medios. Estos conceptos llevan a distinguir, en la antigua cadena continua de los seres, entre seres orgánicos e inorgánicos.

A diferencia de Lamarck, Cuvier ataca la idea de continuidad de los seres y la de su continua generación espontánea. Él ve saltos insalvables entre los organismos vivos y dentro del registro fósil, y los explica mediante la idea de contingencia en los sucesos (catástrofes naturales y nuevas creaciones biológicas) que llevan a una discontinuidad en la cadena de los seres. Pero su perspectiva funcional abre un mundo de semejanzas funcionales entre las diferencias estructurales: alas, patas y aletas para el movimiento; escamas, pelos o plumas para la protección; branquias o pulmones para respirar; etc. Para Cuvier existe una discontinuidad estructural, agrupada en cuatro tipos básicos, y una continuidad funcional debida a las condiciones de existencia en el entorno -lo que denominamos su nicho ecológico-, así en un herbívoro todas sus estructuras son acordes: dientes, estómago, pezuñas, etc.

Darwin se inspiró, entre otros hechos, en sus observaciones y experiencias acerca de la práctica de criadores de razas domésticas; y, en estos hechos le llamó especialmente la atención que el criador no se fije, de forma exclusiva y aislada, en el carácter que quiere seleccionar, sino que seleccione una constelación de variaciones, no una o unas pocas muy evidentes. Darwin subraya la importancia de la selección mantenida en el tiempo que actúa sobre la organización de un animal y lo modela como algo plástico. En la selección artificial el medio es el criador, mientras que en la selección natural es la propia naturaleza en evolución conjunta y coherente. La selección de los cangrejos Heike tiene un poco de las dos. La teoría de Darwin nacía, igual que la de Lamarck, con dos dimensiones de cambio: una en el espacio, de adaptación al medio; y otra en el tiempo, de formación de nuevas especies por reproducción diferencial de las más aptas. Algunas de las grandes diferencias con Lamarck no tienen que ver con la idea de herencia de los caracteres adquiridos -que, con matices, estaba en la teoría de la pangénesis de Darwin-, sino, fundamentalmente, en la orientación teleológica de Lamarck de tendencia a la perfección frente a la absoluta falta de dirección y propósito en la evolución temporal dentro de la teoría darwiniana.

En el siglo XVI y parte del XVII, desde la perspectiva creacionista, el determinismo sobre las partes y los caracteres aislados procedía del designio divino; pero a partir del siglo XX se instala un determinismo genético, que también propende a una visión parcial y aislada de los caracteres del organismo, sometido a pequeños cambios genéticos graduales. Tanto en el dogma central de la biología molecular como en la nueva síntesis neodarwinista, desaparece el organismo y reaparece el análisis reduccionista e incoherente de las partes; llegando al paroxismo del análisis de las frecuencias alélicas, en alelos que, frecuentemente, sólo son cambios en las secuencias del ADN sin cambio fenotípico alguno.

Los partidarios a ultranza del programa genético plantean una discontinuidad de los seres vivos respecto a los inorgánicos que no es material:

los átomos de los seres vivos son los mismos que los de la materia inorgánica, y muchas de las biomoléculas sencillas también. La singularidad está en concebir la estructura de los seres vivos sobre la base de combinaciones únicas de las bases nitrogenadas en los ácidos nucleicos, sin tener en cuenta la plasticidad funcional de los seres vivos. En los niveles de integración inorgánicos las estructuras resultan de las interacciones necesarias previas, mientras que, en el paradigma actual de la biología, las estructuras vivas surgen del encuentro, al azar, de la información genética adecuada, y de su paso posterior por el tamiz de la selección natural. En esta concepción de la vida la teleología no está en pensar en el ser humano como punto final de la evolución, sino en elevar lo molecular a una combinación informativa única y preconcebida que posibilite la formación de estructuras vivas. Es como si estuviéramos ante un sistema de búsqueda al azar de claves vitales.

En consonancia con la mejor tradición funcionalista, yo propongo un paradigma proteocéntrico donde la vida se elevaría de forma contingente sobre las interacciones químicas necesarias -mediadas por el agua líquida- que, así, producirían estructuras que permitirían un nuevo baile de interacciones necesarias que serían seleccionadas al tiempo que integrarían las prefunciones vitales y las nuevas estructuras que las permiten y mantienen. En el paradigma proteocéntrico la función es prioritaria a la estructura, y, en este juego funcional integrador, las nuevas estructuras aparecen como resultado de la plasticidad de las previas en su continua interacción funcional con un medio cambiante. Lo genético y lo epigenético respondería a la acumulación informativa de "cultura molecular" de las proteínas en su peripecia evolutiva, en la lógica de considerar a los ácidos nucleicos como un instrumento informativo de las proteínas. De esta manera, el código genético se hace, no se "acierta". Para el paradigma proteocéntrico, el código genético se haría en la interacción conformacional entre proteínas y ARN en la etapa prebiótica del origen de la vida. El posible encuentro de vida en otros lugares del Cosmos daría la razón a uno u otro enfoque según hubiese o no ácidos nucleicos, o el código fuese o no realmente universal. La presencia de aminoácidos y compuestos proteicos en los meteoritos es terca.

La vida surgiría así, no como una singularidad, sino como un resultado más de la evolución de la materia, con las mismas leyes que dan orden y coherencia al Cosmos.

Bibliografía:

- (1) Darwin, C. (1980). *El origen de las especies*. Ed. Bruguera. Barcelona.
- (2) Jacob, F. (2014). *La lógica de lo viviente*. Tusquets Editores. Barcelona.
- (3) Lamarck, J-B. (2017). *Filosofía zoológica*. La Oveja Roja. Madrid.
- (4) Mayr, E. (2016). *Así es la biología*. Ed. Debate. Barcelona.
- (5) estructuraeinformacionbiologica.blogspot.com

Alfonso Ogayar Serrano.

Licenciado en Ciencias Biológicas.

Profesor.

2.3

La música de la vida.

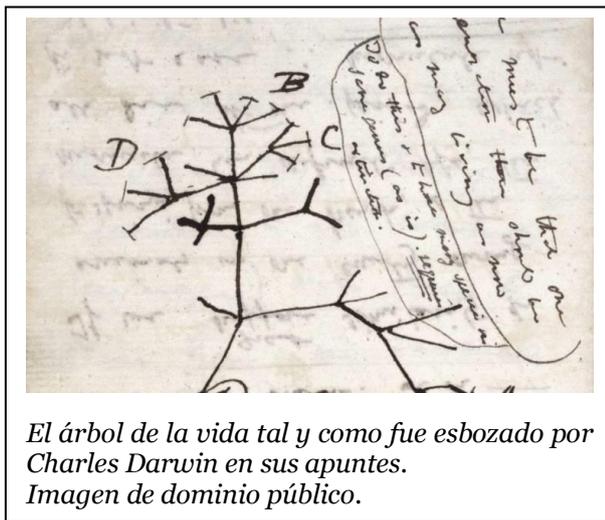
El Universo está lleno de sonidos. Cuando esos sonidos, combinados con los correspondientes silencios, se organizan de forma coherente se puede obtener algo tan maravilloso como la música, con sus infinitas posibilidades de ritmos y melodías. Un razonamiento similar expone Carl Sagan en el capítulo 2 "*Una voz en la fuga cósmica*" de su obra *Cosmos*, donde expone su anhelo de escuchar otras músicas de la vida, refiriéndose a las posibles manifestaciones que esta podría tener en otros mundos. De hecho, la vida en nuestro planeta ya es extraordinariamente diversa. Hay seres que viven en los tres grandes medios: la tierra, el mar y el aire, pero también hay otros que viven a cientos de metros bajo tierra o en las profundidades submarinas. Hay especies cuyos representantes miden varios metros y otras en las que apenas superan unas pocas micras. Las formas de obtener energía, de reproducirse o de relacionarse con el medio son otras diferencias que podríamos añadir a esa lista, aparentemente interminable, de las formas en que se manifiesta la vida.

Detengámonos en el metabolismo. La fotosíntesis es un proceso maravilloso mediante el cual las plantas y algunas bacterias transforman el CO₂ atmosférico y la energía luminosa del sol en moléculas orgánicas que contienen energía química aprovechable por la vida. Los animales herbívoros consumen esas plantas y utilizan sus compuestos para obtener energía y materia que, a su vez, alimentará a otros seres vivos. De este modo se establecen inmensas redes que conectan todas las especies presentes en los ecosistemas. Todo esto nos resulta más o menos familiar. Lo que ya es un poco más extraño es que haya bacterias "comedoras" de piedras, o hablando de forma un poco más científica, que se nutren de la energía desprendida en las reacciones químicas que ocurren entre los minerales que forman las rocas.

Respecto a la variedad de condiciones físico-químicas que la vida puede soportar, tampoco hemos dejado de llevarnos sorpresas. Hemos encontrado vida, fundamentalmente microscópica, en lugares insospechados, bajo los hielos de la Antártida, en fuentes hidrotermales donde las temperaturas son de más de 100 °C, en ríos ácidos o en desiertos donde la intensa radiación y la sequedad extrema parecen incompatibles con la vida.

A pesar de toda esa diversidad, cuando descendemos al nivel molecular, encontramos que todos los seres vivos son tremendamente parecidos. Desde la más humilde bacteria hasta el ídolo de masas que a todos nos atrae, todos están formados por las mismas moléculas entre las que hay dos fundamentales: el ADN que almacena la información genética –las instrucciones de la vida- y las proteínas que son las que ejecutan esa información. Pero aún hay más, y es que todos los organismos están organizados en células, en cuyo interior ocurren reacciones químicas asombrosamente parecidas. Quizás la más sorprendente de todas esas similitudes sea que la información genética se almacene siempre de la misma forma, de modo que las mismas combinaciones de nucleótidos en el ADN –que se denominan tripletes por ser grupos de tres- dan lugar a la incorporación de los mismos aminoácidos en las proteínas de todos los seres vivos. Ahora sabemos que tan elevado nivel de coincidencia solo es posible si toda la vida que existe en la Tierra tiene un antepasado común del cual hemos ido heredando sus características. Esto, que por un lado es maravilloso, ya que nos muestra que todos los seres vivos somos una gran familia, por otro complica extraordinariamente definir la vida y conocer cuál es su significado en el Universo.

Es lógico preguntarse cómo es posible que la vida se haya diversificado en tan extraordinario grado si todos procedemos del mismo ser ancestral. La respuesta ya nos la dio Charles Darwin hace más de siglo y medio: la vida evoluciona y se diversifica gracias a la selección natural actuando sobre poblaciones heterogéneas. La diversidad de las poblaciones se consigue gracias a las mutaciones, cambios en la secuencia de los nucleótidos que componen el ADN que, a su vez, dan lugar a otros cambios en la secuencia de aminoácidos de la proteína correspondiente, originando variaciones de la misma que pueden afectar a su función. Si tenemos en cuenta que el ADN de una de nuestras células contiene unos 3200 millones de nucleótidos que pueden dar lugar a aproximadamente 20000 proteínas –de las cuales en cada tipo celular solo se expresa una fracción- podemos hacernos una idea de la gran cantidad de variaciones que pueden existir.



El árbol de la vida tal y como fue esbozado por Charles Darwin en sus apuntes. Imagen de dominio público.

A pesar de las grandes posibilidades proporcionadas por la acción combinada de las mutaciones y la selección natural, surge el problema de que la evolución así planteada sería un proceso demasiado lento y no habría

podido dar cuenta de los grandes aumentos de complejidad que se han observado a lo largo de la historia. Una célula bacteriana ya es en sí misma un universo de moléculas interaccionando, pero eso no es nada si se compara con la complejidad de una célula eucariótica, como las que existen en nuestro cuerpo. Y de ahí a la aparición de órganos, o de sistemas tan complejos como el inmune o el nervioso, los saltos de complejidad son tan inmensos que son muy difíciles de explicar mediante un proceso evolutivo gradual, dirigido por la aparición de mutaciones de pequeño efecto. Carl Sagan ya apuntaba este problema cuando escribió *Cosmos* y señalaba que: *“gracias al invento del sexo dos organismos podían intercambiar párrafos, páginas y libros enteros de su código de ADN, produciendo nuevas variedades a punto para pasar por el cedazo de la selección”*. Quizás el sexo fuera el responsable de que *“después de la explosión del Cámbrico nuevas y exquisitas adaptaciones se fueron sucediendo con una rapidez relativamente vertiginosa”*.

En los últimos años hemos asistido a una revolución en el campo de la biología que es la posibilidad de secuenciar genomas completos. De este modo es posible comparar toda la información genética —esos millones de nucleótidos que forman el ADN— de distintas especies o de distintos individuos de la misma. Y eso nos ha mostrado que muchos de los cambios evolutivos son el resultado de procesos bruscos más que graduales, que a veces no afectan a la secuencia de nucleótidos en los genes, sino a la regulación de su expresión, es decir, al repertorio de genes que están funcionando en un momento dado en una célula concreta. Entre esos cambios están la simbiosis, los procesos de creación y modificación de genes y la transferencia de material genético entre organismos. Hagamos un breve repaso de ellos, con objeto de poder entender mejor cómo la vida se ha ido transformando desde sus orígenes.

Actualmente está totalmente demostrado que algunos orgánulos de las células eucarióticas derivan de asociaciones entre organismos más simples. Así, las mitocondrias parecen ser antiguas bacterias que fueron ingeridas por otras células y permanecieron en su interior formando una asociación simbiótica estable. Procesos similares dieron lugar a la aparición del núcleo, el orgánulo donde se encuentra localizado el material genético en las células eucarióticas, y de los cloroplastos en las células de las plantas.

Es difícil imaginar como una mutación puntual, que afecte solo a uno o unos pocos nucleótidos, puede dar lugar a la aparición de nuevas funciones génicas. En lugar de eso, existe un mecanismo basado en la mezcla o barajeo de las regiones codificantes que existen en los genes eucarióticos. Es como si tuviésemos un lego formado por un número limitado de piezas que pudiéramos mezclar de muchas formas diferentes obteniendo resultados distintos en cada una de ellas.

Por último, el intercambio de material genético entre organismos, bien de la misma especie bien de especies diferentes, permite que las innovaciones

evolutivas puedan ser compartidas. Este mecanismo que se conoce como transferencia génica horizontal es muy frecuente en procariontes y ha llevado a establecer el concepto de pangenoma, que representa el conjunto de genes que en un momento dado pueden estar disponibles para ser usados por cualquier miembro de una población. Los vehículos más utilizados para el transporte de genes son los denominados elementos móviles del genoma (plásmidos, virus, transposones y retrotransposones). La transferencia génica horizontal pudo ser fundamental en el propio origen de la vida si, como defienden algunos autores, el último ancestro común universal, el famoso LUCA, en realidad hubiera sido un consorcio de células primitivas que intercambiaban genes de forma muy promiscua.

En ocasiones, el movimiento de material genético entre organismos es capaz de promover grandes reorganizaciones en la expresión génica del individuo receptor, dando lugar a importantes cambios fenotípicos sin alterar la secuencia de los genes. Se ha documentado que el genoma humano contiene un 8% de genes de origen viral, resultado de virus que infectaron a nuestros ancestros en épocas pasadas y que nos dejaron como herencia su material genético insertado en nuestros genomas. Esos genes, además de inducir cambios en la expresión de nuestro genoma, en ocasiones han facilitado la aparición de nuevas funciones. Por ejemplo, la expresión en un entorno celular de un gen de un retrovirus insertado en nuestros genomas dio lugar a las sincitinas, las proteínas que hicieron posible la aparición de la placenta en mamíferos.

Ahora, al igual que hizo Carl Sagan en *Cosmos*, toca preguntarse: si partiendo del mismo ancestro, la vida en la Tierra ha podido diversificarse en tan amplia variedad de formas, ¿qué no podría ocurrir en otros mundos en los que las condiciones ambientales fueran diferentes y en los que la vida hubiera escogido para perpetuarse una bioquímica diferente que también estuviera basada en un sistema de almacenamiento de la información distinto del ADN? Y podemos ir más lejos aún, ¿qué pasará con la evolución de la propia vida terrestre ahora que estamos aprendiendo cómo manipular nuestros genomas?, ¿nos llevará eso a eliminar las limitaciones que afligen a algunas personas o, por el contrario, acentuará aún más las diferencias entre nosotros?

Concluyo este breve ensayo con otra cita de Carl Sagan: *"Hasta ahora hemos escuchado solamente la voz de la vida en un pequeño mundo. Pero al fin nos disponemos ya a captar otras voces en la fuga cósmica. ¡Ojalá que pronto encontremos otro ejemplo de vida y eso haga que, por fin, comencemos a entender cuál es nuestro lugar, no solo en la Tierra, sino en todo el Universo!*

Ester Lázaro Lázaro.

Doctora en Ciencias Biológicas.

Investigadora Científica en el Centro de Astrobiología (CSIC-INTA).

Capítulo 3

La armonía de los mundos

*¿Conoces las leyes del cielo?
¿Puedes establecer su función en la Tierra?
Libro de Job*

Todo el bienestar y la adversidad que acaecen al hombre y a otras criaturas llegan a través del Siete y del Doce. Los doce signos del Zodíaco, como dice la Religión, son los doce capitanes del bando de la luz; y se dice que los siete planetas son los siete capitanes del bando de la oscuridad. Y los siete planetas oprimen todo lo creado y lo entregan a la muerte y a toda clase de males: porque los doce signos del Zodíaco y los siete planetas gobiernan el destino del mundo.

Menok i Xrat, obra zoroástica tardía

Decir que cada especie de cosa está dotada de una cualidad específica oculta por la cual actúa y produce efectos manifiestos, equivale a no decir nada; pero derivar de los fenómenos dos o tres principios generales de movimiento, y acto seguido explicar de qué modo se deducen de estos principios manifiestos las propiedades y las acciones de todas las cosas corpóreas, sería dar un gran paso.

ISAAC NEWTON, Óptica, 1704

No nos preguntamos qué propósito útil hay en el canto de los pájaros, cantar es su deseo desde que fueron creados para cantar. Del mismo modo no debemos preguntarnos por qué la mente humana se preocupa por penetrar los secretos de los cielos... La diversidad de los fenómenos de la Naturaleza es tan grande y los tesoros que encierran los cielos tan ricos, precisamente para que la mente del hombre nunca se encuentre carente de su alimento básico.

JOHANNES KEPLER, Mysterium Cosmographicum, 1596

3.1 Los sonidos del Cosmos.

*Saw me climbing to the top of the hill
You saw me meeting with the fools on the hill
Learned my lesson and I had my fill
Learnt it all in vain
Went through it all again
Now I'm back on the top again*

Back On Top. Van Morrison

Hubo un tiempo en que los cielos eran perfectos. El mundo creado, según Platón, por el demiurgo usando triángulos (la escuadra y el cartabón) estaba formado por los cuatro elementos: los sólidos platónicos (cubo, tetraedro, icosaedro y octaedro) se correspondían con los cuatro elementos (la tierra, el fuego, el agua y el aire). Y los cielos se construían con la quintaesencia, el dodecaedro.

Ese cielo perfecto de los griegos veía como los cinco planetas entonces conocidos (Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno) describían sus órbitas circulares alrededor de la Tierra sobre el fondo de estrellas fijas. Pero esa perfección comenzó a resquebrajarse. ¿Cómo justificar los avances y retrocesos de los planetas? El modelo geocéntrico fallaba, y el parche fue el invento de los epiciclos, extraños movimientos circulares respecto a no menos extraños puntos en el espacio. A pesar de la cada vez mayor complejidad para explicar la armonía planetaria, el modelo de Ptolomeo se tambaleaba, aunque resistió siglos.

Nicolás Copérnico, en su obra *De revolutionibus orbium coelestium*, revolucionó el estado de los cielos, pero restauró el orden con su modelo heliocéntrico: el Sol, modelo del Dios creador como centro del universo, y los planetas orbitando como obedientes siervos a su alrededor. Estas eran las reglas del mundo:

- (1) Los movimientos de los planetas se realizan en órbitas circulares, eternas.
- (2) En el centro de estas órbitas se halla el sol.
- (3) Existe un fondo de estrellas fijas que no realizan ningún movimiento.

(4) Existen tres tipos de movimientos en la tierra: movimiento sobre sí misma (el movimiento de rotación), alrededor del Sol (la conocida traslación) y la inclinación anual del eje.

(5) La distancia Tierra-Sol es pequeña comparada a la distancia al firmamento de estrellas fijas.

El desafío de Copérnico era notable, contra una doctrina que sostenía la palabra escrita en la Biblia, en la que se cuenta cómo Josué había detenido el Sol sobre Gabaón para poder derrotar a sus enemigos luchando a la luz del día. "Eppur si muove", dicen que exclamó Galileo cuando osó dudar de la pureza de los cielos y se le obligó a retractarse.

La armonía de los mundos celestiales fue defendida siglos más tarde por Johannes Kepler en su obra, *Mysterium Cosmographicum*, publicada en 1596. Propuso su modelo de Sistema Solar basado en los cinco sólidos platónicos (de nuevo, la magia matemática). Se incluían unos en otros, separados por esferas. Eran seis esferas que se correspondían a los seis planetas conocidos: Mercurio, Venus, Tierra, Marte, Júpiter y Saturno. Para Kepler, la distancia entre los planetas -las denominadas esferas- eran proporcionales a los intervalos entre escalas musicales. Las esferas más cercanas producían los tonos más graves, mientras que las alejadas componían los agudos. Todas ellas, conformaban la armonía del universo.

A pesar de sus buenos deseos, Kepler, un devoto protestante, enunció sus tres leyes, que, por una parte, dictaban reglas sencillas para los movimientos de los cielos, pero que, a la vez, contenían el germen del caos que más tarde descubrieron los matemáticos, liderados por Henri Poincaré. Las tres reglas de Kepler eran estas:

1ª) Los planetas recorren órbitas elípticas. El sol se sitúa en uno de los focos de la elipse.

2ª) El área barrida por la recta imaginaria que une sol-planeta sobre la superficie de la elipse, es la misma en intervalos de tiempo iguales.

3ª) El cuadrado del período de la órbita de un planeta alrededor del sol, es proporcional al cubo del semieje mayor de la elipse, la denominada ley armónica.

A partir de estos postulados, Kepler redefinió al universo como instrumento musical. De forma semejante a la música de las esferas, ahora las velocidades angulares de cada planeta en la elipse, producían diferentes sonidos. En aquellas zonas de la elipse en que el movimiento es más rápido (es decir, en las inmediaciones del sol, si tenemos en cuenta la segunda ley de Kepler de barrido de áreas), se emiten los agudos. Existen intervalos musicales bien definidos atribuibles a diferentes planetas.

En su libro *Harmonices Mundi*, fue donde Kepler planteó que las velocidades angulares de cada planeta producían sonidos diferentes. Puesto que solo había seis planetas, seis melodías distintas eran generadas. Kepler representó las velocidades angulares en un pentagrama musical, en el que la

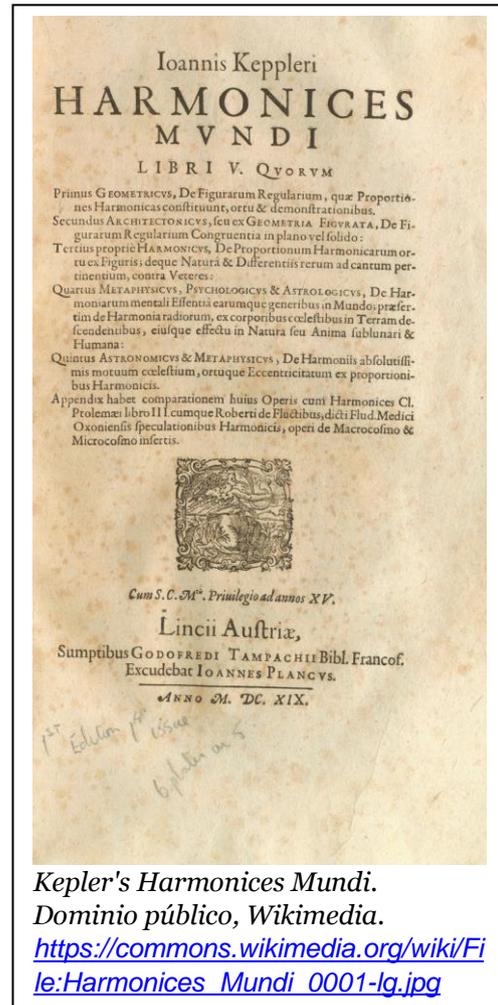
nota más baja se correspondía a la del planeta más alejado. La relación entre pares de velocidades angulares es muy parecida a la relación entre intervalos musicales. Las diferentes combinaciones de intervalos musicales o velocidades angulares, daban lugar a cuatro acordes primordiales, que relacionó con el primer acorde de la creación del universo, y el final y destructor del mismo.

En las propias palabras de Kepler: “El movimiento celeste no es otra cosa que una continua canción para varias voces, para ser percibida por el intelecto, no por el oído; una música que, a través de sus discordantes tensiones, a través de sus síncopas y cadencias, progresa hacia cierta predesignada cadencia para seis voces, y mientras tanto deja sus marcas en el inmensurable flujo del tiempo.”

La paradoja de esta historia es que los epiciclos habían sido una idea original de Apolonio de Pérgamo, el estudioso de las cónicas, hasta Kepler inútiles y bellos objetos matemáticos. Las cónicas (elipses, hipérbolas, parábolas) habían conocido una larga historia para librarse de su definición como secciones de un cono y convertirse en objetos algebraicos por la obra de Descartes, Jan de Witt y muchos otros matemáticos.

Los descubrimientos de Kepler pusieron los fundamentos para que el genio de Isaac Newton enunciara la ley de la gravitación universal, y juntamente con la mecánica apoyada en el cálculo diferencial, abriera nuevas perspectivas para apreciar el orden de un universo “escrito en lenguaje matemático”.

El universo pasó entonces a estar aparentemente controlado, y las leyes de la Mecánica Celeste fijadas, hasta el punto que cuando Napoleón, refiriéndose a su obra *Exposition du système du monde*, comentó a Pierre de Laplace: «Me cuentan que ha escrito usted este gran libro sobre el sistema del universo sin haber mencionado ni una sola vez a su creador», Laplace contestó: «Sire, nunca he necesitado esa hipótesis». El mundo era determinista y conocíamos sus ecuaciones: introducíamos los datos y ya sabíamos lo que iba a ocurrir en el futuro.



Kepler's *Harmonices Mundi*.
 Dominio público, Wikimedia.
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Harmonices_Mundi_0001-lg.jpg

Pero la soberbia nunca es buena compañera de la ciencia, y la mecánica celeste naufragó cuando el rey Oscar II de Suecia decidió celebrar su 60 cumpleaños con un desafío matemático: "¿podemos establecer matemáticamente si el Sistema Solar continuará girando como un reloj, o es posible que, en algún momento futuro, la Tierra se salga de órbita y desaparezca de nuestro sistema planetario?". Esta pregunta sobre la estabilidad de nuestro sistema solar intrigó a Poincaré. Su solución fue brillante, y ganó el premio, pero, desafortunadamente, contenía un error. Analizó este error una y otra vez y descubrió que pequeños cambios en las condiciones iniciales podían acabar en cambios enormes en la evolución dictada por las ecuaciones, a pesar de que estas fueran muy sencillas. Poincaré se había adelantado al descubrimiento del caos que haría años más tarde Edward Norton Lorenz. Si, el aleteo de una mariposa en Brasil puede provocar un tornado en Texas, o como decía Henry Miller, "el caos es la partitura en la que está escrita la realidad".

¿Y dónde queda entonces la armonía de los mundos? Como afirmaba Lord Robert May, que llevó el caos a la biología: "Las matemáticas no son en última instancia ni más ni menos que pensar muy claramente sobre algo. Me gustan los rompecabezas, así que soy un matemático. No soy matemático puro porque no me gustan los problemas abstractos, formales. Me gustan los trucos y dispositivos. Soy esencialmente un matemático, pero en el sentido de que me gusta pensar en cosas complicadas, preguntarme qué simplicidades hay ocultas en ellas y expresarlas en términos matemáticos y ver a dónde me llevan de modo que pueda siempre comprobar los resultados." Así que la armonía está en la simplicidad que enmascara lo complejo; las reglas son sencillas, las ecuaciones de las que partimos y que describen matemáticamente esa complejidad, también. Es exactamente lo que ocurre con la música, de una simple escala musical pueden salir las composiciones más bellas y complejas, desde la canción de Van Morrison que abre este artículo a las maravillosas sinfonías de Ludwig van Beethoven.

Cabe preguntarnos si habrá alguna manera experimental de escuchar la música celeste, porque ¿quién está seguro de que también la teoría musical del genial Kepler no pudiera ser corroborada? El reciente descubrimiento de las ondas gravitacionales nos indica que sí es posible escuchar al espacio, aunque quizás no sea tan armónico como nos gustaría.

Y aquí nos volvemos a subir a la colina, para reunirnos con los locos que buscamos un sitio elevado para contemplar la armonía de los cielos en una noche de verano. Y le digo al León de Belfast que no hay otro sitio mejor.

Manuel de León.

Doctor en Matemáticas.

ICMAT-CSIC y Real Academia de Ciencias.

3.2

A vueltas con los astros, todavía.

¿Qué son cuarenta años, cuarenta giros de la Tierra alrededor del Sol?

Casi nada medidos en la escala cósmica que tanto gustaba a Carl Sagan. Menos incluso que la duración del sonido emitido por el silbato de un árbitro, si usamos como referencia el nuevo sistema métrico deportivo instaurado por la prensa del siglo XXI, y que tan sumisamente hemos adoptado como propio, haciendo de los campos de fútbol áreas fácilmente reconocibles y longitudes inequívocamente mensurables. Cuarenta años no es nada. Sin embargo, es el tiempo transcurrido desde que el Maestro nos habló. ¿Maestro en sentido religioso? Nunca. No hubiera querido para sí esa denominación el añorado Carl Sagan, aunque se convirtiera para muchos de nosotros, adolescentes en aquella época, en faro y guía de nuestro destino. Hasta aquí hemos llegado, permítanos llamarle Maestro, convertidos en científicos. O en algo parecido. Y estamos para rendirle homenaje.

Muchos, no todos, ya no confundimos Ciencia y Fe. Y también sabemos distinguir Astronomía (con mayúscula), de astrología (con minúscula). Pero ¿qué queda de aquel capítulo de *Cosmos* en el que tan amargamente Sagan se quejaba de la *visibilidad* -palabra manoseada hasta el hastío en estos días- de los modernos horóscopos y otras seudociencias? Por desgracia, bastante. Toda nuestra vertiginosa y maravillosa revolución tecnológica, que ni Sagan ni nadie pudieron prever, no ha bastado para terminar con la superstición. Pruebe a teclear "Aries" en *Google* y obtendrá millones de resultados, obviamente diferentes. Porque en eso no ha cambiado nada. Ni en cuarenta años, desde Carl Sagan, ni en cuatrocientos, desde Tycho Brahe y Johannes Kepler, dos de los héroes del Renacimiento a cuyos formidables descubrimientos Sagan dedicó buena parte de su tercer capítulo en la inmarcesible obra *Cosmos*.

En mi propia aventura vital personal, Tycho y Kepler marcan un hito, puesto que ellos centran un par de novelas que he despachado, con desigual fortuna, dentro de mi modesta y poliédrica -valga la comparación kepleriana- actividad divulgadora. Recuerdo aquí haber leído un suceso al respecto atribuido al propio Tycho Brahe, extraído de una de sus múltiples biografías, y que reproduzco libremente. Cuentan las crónicas que, en cierta ocasión, el noble y famoso astrónomo -y astrólogo, entonces quehaceres casi

indistinguibles-, fue abordado por otro noble de la corte danesa, siendo reprochado por este a causa de los fallos de sus predicciones. Ni eran certeras, ni coincidían con las de los demás astrólogos, también dispares. Tycho Brahe, la mente matemática más brillante del siglo XVI en todo el norte de Europa, no tardó en replicar: «Si mis predicciones basadas en los astros del Cielo no son exactas es porque las posiciones de las estrellas y planetas tampoco lo son. Habría que medir mejor las cosas.» Con esto Brahe no solo consiguió cierta financiación económica para su proyecto, sino que además terminó dedicándose a lo que realmente le apasionaba. Ya antes, con solo dieciséis años y habiendo pasado por las mejores universidades europeas de la época, había tomado la decisión de volver a medir desde el principio las posiciones de todos los objetos estelares conocidos. Dedicó cuarenta años -otra vez el número mágico-, a esta tarea titánica, hasta su extraña muerte que, curiosamente, sigue de actualidad... cuatrocientos años después.

Tycho Brahe consiguió el apoyo incondicional del rey danés y de buena parte de la nobleza a la que pertenecía para sus investigaciones astronómicas. Se calcula que más del cinco por ciento de la riqueza danesa se invirtió en su causa. Un porcentaje tan elevado de gasto en un solo país para una cuestión científica tan específica es tan inusual antes como ahora, donde solo es comparable el programa *Apolo*, que en los Estados Unidos presididos por J.F. Kennedy dedicó una cantidad similar de recursos para llevar el hombre a la Luna. A la que, por cierto, seguimos sin volver, cincuenta años después. A estas alturas Sagan ya nos imaginaba, como mínimo, pisando Marte. ¡Ay, Maestro, qué mal lo hemos hecho!

Pero volvamos a Tycho y a su ilustre discípulo, el también enorme matemático alemán Johannes Kepler, padre de las leyes físicas que llevan su nombre y uno de los artífices de la ciencia moderna, de la cual el genio de Isaac Newton nos reveló sus principales secretos. Para no caer en la repetición de lo que tan bien nos explicó Sagan en *Cosmos*, abundaremos aquí en las novedades. Sí, novedades de hace cuatrocientos años tras cuarenta años. Y no es que hayan surgido cambios en los cálculos orbitales de Kepler o en las interacciones gravitatorias de Newton -de hecho, podemos ir perfectamente de un planeta a otro con nuestras modernas sondas, usando únicamente la mecánica clásica, tal es su precisión-, sino que, nuevamente, la malicia y superstición del ser humano han hecho de las suyas. Y vean cómo.

Hace unos pocos años, en 2004, un libro escrito por una pareja de periodistas estadounidenses fuertemente relacionados con movimientos anticientíficos de ese país extendió la teoría de que Johannes Kepler habría asesinado a Tycho Brahe para robarle sus datos astronómicos. La noticia corrió como la pólvora en esta sociedad sensacionalista, supersticiosa y amiga de bulos en la que nos toca vivir. Internet propaga toneladas de información por todo el mundo sin discriminar, pero los filtros, en ocasiones, brillan por su ausencia. Sagan leyó en su día horóscopos en la prensa escrita, pero nosotros podemos leer hoy en la red de redes las ocurrencias de terraplanistas

convencidos (sí, cuatrocientos años tras Copérnico, Kepler y Galileo y seguimos pensando que la Tierra es un plato de sopa), de colectivos antivacunas (incluso tras la pavorosa pandemia del virus Covid-19) y de numerosos conspiranoicos de variado pelaje al volver de cada web. Tan grande fue la sospecha de la opinión pública sobre los héroes del tercer capítulo de *Cosmos*, y tanta la desazón entre la comunidad científica, que no hubo más remedio que exhumar al astrónomo danés en el año 2010 para realizar los pertinentes estudios forenses. Que arrojaron el resultado, un par de años más tarde y tras un sinfín de comprobaciones, de la inexistencia de metales pesados como el tóxico mercurio en sus restos mortales, de que no había sido envenenado ni por Kepler ni por nadie, y de que la teoría de su fallecimiento prematuro a causa de una infección urinaria tras un extraño incidente protocolario era la más probable causa de su defunción.

Dejando atrás la triste anécdota mencionada, la singular pareja formada por Tycho Brahe y Johannes Kepler nos sigue deparando extraordinarias sorpresas a los astrofísicos. Si bien ambos son conocidos principalmente por sus contribuciones al modelo heliocéntrico -Tycho quedándose a medio camino con su concepto mixto, Kepler acertando de pleno en la formulación elíptica de las órbitas planetarias-

también son muy conocidas sus contribuciones en el campo de las supernovas, aunque este concepto sea mucho más moderno. Y es que el destino es caprichoso. Hasta la fecha, y a menos que la estrella supergigante roja Betelgeuse se adelante a los acontecimientos, o haga lo mismo la igualmente enorme e hipermasiva azul Eta Carinae, las dos últimas supernovas conocidas



Monumento a Tycho Brahe y Johannes Kepler en Praga. Imagen de dominio público.

que han estallado en nuestra galaxia, la Vía Láctea, son, precisamente, la «nova» observada por Tycho Brahe (en el año 1572) y la estudiada posteriormente por Johannes Kepler (en el 1604). Es una casi increíble casualidad que dos de los mejores astrónomos del Renacimiento, que vivieron y trabajaron juntos, reportaran este extrañísimo espectáculo celeste con sendas supernovas, y aún más que no se haya vuelto a repetir hasta nuestros días.

La nova observada por Tycho Brahe supuso un antes y un después en el inmóvil concepto aristotélico que se tenía del firmamento. Tan brillante que podía observarse incluso de día, Tycho trabajó en ella con fervor, comprobando que no podía determinar su paralaje, por lo que se debía encontrar mucho más allá de las esferas de los planetas y que, obviamente, tampoco se trataba de ningún cometa a los que ya Brahe había sacado con sus precisas mediciones de la esfera terrestre. Concluyó que se trataba, en efecto, de una nueva estrella. Esto no había ocurrido nunca, y rompía con el orden estricto de los cielos. Sus detalladísimas observaciones de la nueva estrella, aparecida en la constelación de Casiopea, le granjearon la admiración de los astrónomos europeos, que ya consideraban a Brahe, que solo tenía veintisiete años, como el mejor de ellos. Las observaciones de Kepler y su propia supernova fueron mucho más tardías, e igualmente Kepler -ya matemático imperial de Rodolfo II de Bohemia, habiendo sucedido en el cargo a su maestro y protector Tycho Brahe- era considerado el mejor entre los suyos. En este caso, Kepler observó una curiosa alineación de la nueva estrella -aparecida en la constelación de Ofiuco- con Marte y Júpiter, lo que desató en él de nuevo la duda de un posible significado astrológico, aunque en realidad lo que hizo finalmente fue alimentar la teoría de que un fenómeno semejante podía haber ocurrido con la estrella de Belén. De hecho, la teoría de Kepler acerca de la estrella sagrada, basada en alineaciones relativas de planetas, sigue siendo una de las explicaciones más plausibles al relato bíblico, dada la precisión de los cálculos realizados por el astrónomo alemán a partir de las efemérides calculadas con sus elaboradísimas tablas.

Hoy en día, la justamente llamada «estrella de Kepler», es la última supernova aparecida en nuestra galaxia, y fue visible a simple vista durante dieciocho meses. Es del tipo «Ia» y se encuentra a unos veinte mil años luz de la Tierra. Su origen parece ser un sistema estelar binario formado por una gigante roja y una enana blanca. En cuanto a la también llamada «supernova de Tycho» se creía que, debido a su espectro de rayos-X, fuera igualmente del tipo «Ia», lo que fue confirmado con recientes observaciones publicadas en el año 2008. Se calcula que puede estar a unos nueve mil años luz de distancia, siendo su origen un debate abierto entre la comunidad científica.

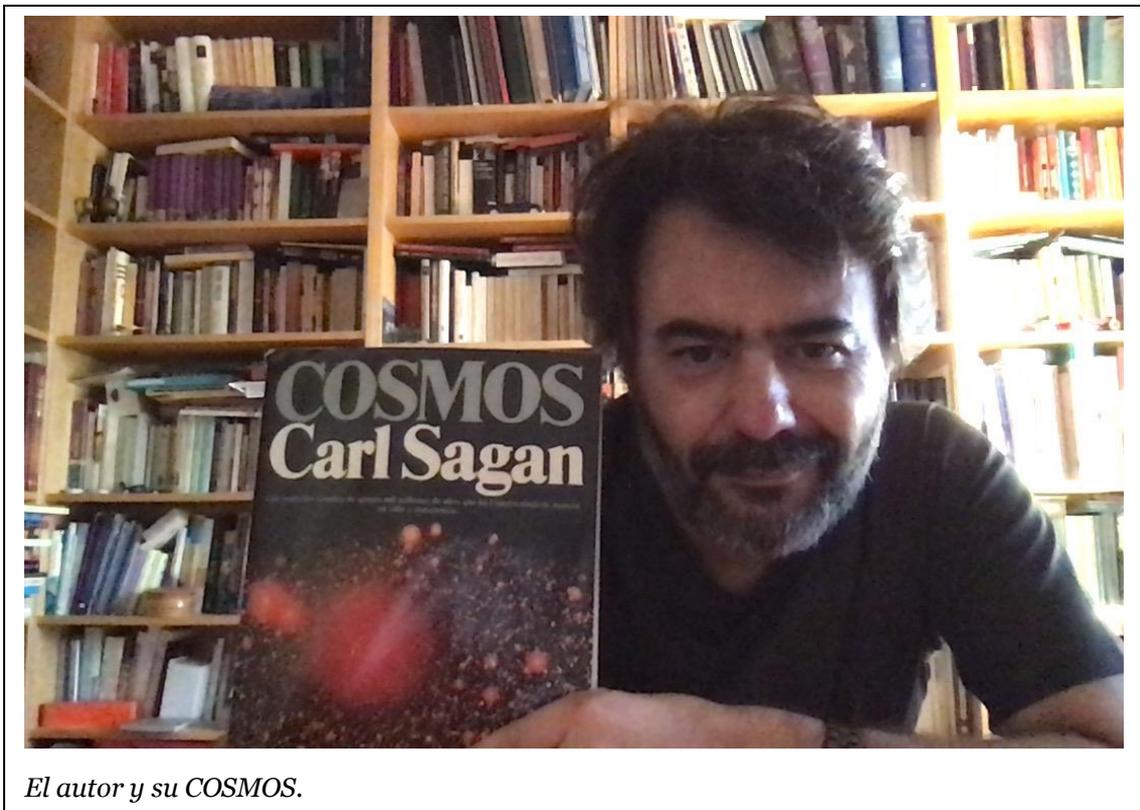
Enrique Joven Álvarez.

Doctor en Ciencias Físicas.

Ingeniero del Área de Instrumentación del Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC), Tenerife.

3.3 Kepler y la melancolía de los poliedros.

Recordar Cosmos significa volver al mito de Hypatia de Alejandría, las envolventes atmósferas musicales de Vangelis, tan setenteras como las chaquetas de pana de Carl Sagan. Para mí el legendario carisma de Sagan tenía mucho que ver con su hipnótica voz, con ese tono sostenido creciente, que elevaba cada frase a medio camino entre el verso y el eslogan. Me refiero por supuesto a la voz de José María del Río, el doblador español de la serie, tal vez la verdadera razón por la que me sigue emocionando ver una foto de Sagan.



El autor y su COSMOS.

No formo parte de los que fueron reclutados para la ciencia por aquella serie. Ya estaba infectado entonces, pero sí recuerdo que mis intereses estaban a la sazón poco definidos y me fascinaron un montón de ideas volcadas en aquellos capítulos, desde los aspectos puramente técnicos sobre las naves de exploración del sistema solar, hasta las cuestiones más antropológicas sobre el futuro de la especie humana. Pero cuarenta años después, con décadas de dedicación a la física teórica como profesión, son imágenes del episodio "La armonía de los mundos" las que me asaltan con más frecuencia. Sobre todo, las secuencias en las que un Kepler ensimismado da la espalda a los estudiantes y se hunde en sus ensoñaciones sobre la razón oculta tras el mecanismo del sistema solar.

Hay una dimensión mística en Kepler que lo caracteriza como un contraste brutal entre la protociencia de la antigüedad y la ciencia propiamente dicha, en un sentido moderno, la que se define como un estilo de pensamiento orientado a la adquisición de conocimiento fiable. Kepler sufrió "en sus carnes" este contraste. La que estaba llamada a ser la gran obra de su vida, el "Mysterium Cosmographicum", hubo de ser descartada por él mismo, bajo el peso inexorable de los detalles y, sobre todo, de los datos.

El modelo de Copérnico del sistema solar permitía estimar las distancias de los planetas al Sol, lo que planteaba una nueva pregunta que fascinaba al joven Kepler: ¿por qué estas distancias concretas?, ¿qué principio las determina? Para Kepler no podía existir otra respuesta a esta cuestión que la geometría. Y así alumbró su fantástica idea de que las órbitas de los planetas eran tales que las esferas quintaesenciales estaban inscritas y circunscritas progresivamente sobre los cinco sólidos platónicos: el tetraedro, el cubo, el octaedro, el dodecaedro y el icosaedro. Euclides había demostrado que estos son todos los poliedros regulares que pueden existir en el espacio tridimensional y, dado que solo se conocían entonces seis planetas, justamente existían los sólidos necesarios para determinar las razones de las distancias relativas de todos los planetas. Existen 120 ordenamientos posibles de los poliedros y 30 posibles distribuciones para los resultantes tamaños de las esferas. Kepler los probó todos para determinar cuál se ajustaba mejor a las medidas, y acabó colocando sobre la esfera de Mercurio un octaedro, sobre el que a su vez descansaba la esfera de Venus. Hacia afuera, colocaba entonces un icosaedro, la esfera de la Tierra, un dodecaedro, la esfera de Marte, un tetraedro, la esfera de Júpiter, y finalmente un cubo que soportaba la esfera de Saturno. Este armazón geométrico era la base de su "Mysterium Cosmographicum".

Lo cierto es que el esfuerzo de Kepler no funcionó, como pudo comprobar cuando dispuso de los datos precisos de Tycho Brahe. De hecho, pasaría el resto de su vida demoliendo esta estructura "platónica". Ni los planetas estaban rígidamente anclados en esferas giratorias, ni las órbitas eran circulares después de todo. En cierto modo, las famosas leyes de Kepler que

fueron esenciales para los posteriores descubrimientos de Newton sobre la gravitación, son el resultado de intentar rescatar cierta armonía geométrica entre las ruinas de su "Mysterium Cosmographicum".

Los descubrimientos de Newton explicarán por qué las órbitas son necesariamente elípticas, pero también sugerirán que sus tamaños no son más que accidentes históricos, tanto como el número de planetas, y que las preguntas que fascinaban a Kepler: ¿por qué esta distancia?, ¿por qué este número?, eran después de todo preguntas prematuras, y al final inadecuadas. Este episodio ilustra el aspecto más difícil de la ciencia fundamental: nunca se sabe cuál es la pregunta adecuada que abrirá nuevos caminos. La elección de los problemas sobre los que verter los esfuerzos es la parte más difícil.

Como en la época de Kepler, la física moderna se plantea dilemas parecidos. Los modelos estándar de la física de partículas y la cosmología dependen de unas dos docenas de números, constantes fundamentales, en función de los cuales podemos calcular, con éxito, todos los resultados de los experimentos realizados hasta el momento. Por ejemplo, la intensidad de la fuerza eléctrica está determinada por la llamada "constante de estructura fina", más o menos igual a $1/137$. La constante análoga para la gravitación es un número ridículamente pequeño, igual a cero coma, cuarenta ceros, uno. Esta diferencia tan grande es directamente responsable de la razón de tamaños entre el planeta Tierra y un átomo. Durante mucho tiempo, el progreso en la física teórica se podía entender en parte como una progresiva reducción del número de constantes fundamentales independientes. Cuando Maxwell unificó la electricidad y el magnetismo, demostró que las constantes fundamentales de intensidad eléctrica y magnética están relacionadas por la velocidad de la luz. Relaciones de este tipo siempre se consideran los más espectaculares indicios de progreso.

La cuestión es, ¿acaso el afán de calcular todas las constantes fundamentales es el problema correcto? Al igual que Kepler erró tratando de calcular los cocientes de los tamaños de las órbitas, ¿no podríamos errar nosotros en nuestro intento de calcular todos los cocientes de las constantes fundamentales? No lo sabemos, pero algunos sostienen que existen indicios en este sentido. Algunas de estas constantes parecen finamente ajustadas para permitir la vida, un fenómeno complejo que aparentemente funciona a escalas mucho mayores que las que caracterizan a las partículas elementales. Igual que la existencia de vida en la Tierra depende de accidentes históricos, que determinan en particular la distancia de los planetas al Sol, el hecho de que algunas constantes fundamentales parezcan "diseñadas" tal vez sea una indicación de que estas constantes son contingentes a una particular historia cosmológica. Si existen muchos sistemas planetarios ahí fuera, con todo tipo de distancias entre sus planetas, tal vez existan múltiples "universos", o regiones cosmológicamente grandes, que tengan diferentes valores de las constantes y nosotros simplemente evolucionamos en uno cuyas constantes

nos permiten vivir. Este tipo de idea se conoce como el "principio antrópico" y es la base de una tremenda controversia en la física de las últimas décadas. Existe controversia porque no está claro el estatus científico de estas ideas, ya que no parece posible que se puedan verificar experimentalmente en un sentido u otro. Pero eso es discusión para otro día...melancolía de las constantes fundamentales.

Se ha dicho que la historia no se repite, sino que rima. Como vacuna contra la melancolía por los años que han pasado, ver un capítulo de Cosmos sigue siendo una de las maneras más rápidas de experimentar el vértigo de los límites del conocimiento.

José L. Fernández Barbón.

Investigador Científico.

Instituto de Física Teórica IFT UAM/CSIC, Madrid.

Capítulo 4

Cielo e infierno

Recuerdo nueve mundos...

Edda islandés de SNORRI STURLUSON, 1200

Me he convertido en muerte, en el destructor de mundos.

Bhagavad Gita

Las puertas del cielo y del infierno son adyacentes e idénticas.

NIKOS KAZANTZAKLS, La última tentación de Cristo

4.1 Esculpiendo sistemas planetarios.

Durante miles de millones de años la Tierra ha evolucionado siguiendo las leyes de la física, la química y la biología según complejos patrones, muchos de los cuales probablemente quizás nunca seamos capaces de descifrar. Desde su formación ha sufrido bombardeos de cometas y asteroides, en ella surgió la vida después de miríadas de reacciones químicas fallidas, de las cuales solo unas pocas, y en unas circunstancias y entornos particulares, tuvieron éxito. Cambió su atmósfera, se desarrollaron millones de especies, animales y plantas fabulosos, una biodiversidad exuberante, y también se produjeron grandes extinciones.

En el último segundo del calendario cósmico apareció nuestra especie, capaz, como dice Carl Sagan en los primeros párrafos del capítulo 4 de COSMOS, de provocar nuestros propios desastres, por acción o por inacción: guerras, destrucción, odio al semejante, etnias aplastadas, contaminación, cambio climático, disputas nimias si comparamos nuestra pequeñez con la magnitud del Universo, todo ello contrapesado con altruismo, generosidad, solidaridad, avances en la cura de enfermedades, ansia por conocer, expediciones a lugares remotos, el salto a la Luna, la ciencia aplicada en beneficio de la sociedad, y los denodados esfuerzos por hacer que nuestro “punto azul perdido en el espacio” sea cada día un lugar mejor... permítidme esta pequeña digresión escrita en unos tiempos difíciles, en estos primeros meses de 2020 que nunca olvidaremos.

...Pero hablemos de astronomía. Una buena parte del capítulo 4 de COSMOS está dedicado al mundo de los cometas, y no puedo por menos que pensar en lo fascinante que hubiera sido para Carl Sagan contemplar las imágenes y estudiar los datos enviados por la misión *Rosetta*² de la Agencia Espacial Europea.

Rosetta fue lanzada el 2 de marzo de 2004 y terminó sus tareas el 30 de septiembre de 2016, “posándose” sobre el cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko, su objeto de estudio, en un periplo de más de 12 años que constituye una de las mayores hazañas en la exploración espacial del Sistema

² <http://rosetta.esa.int/>

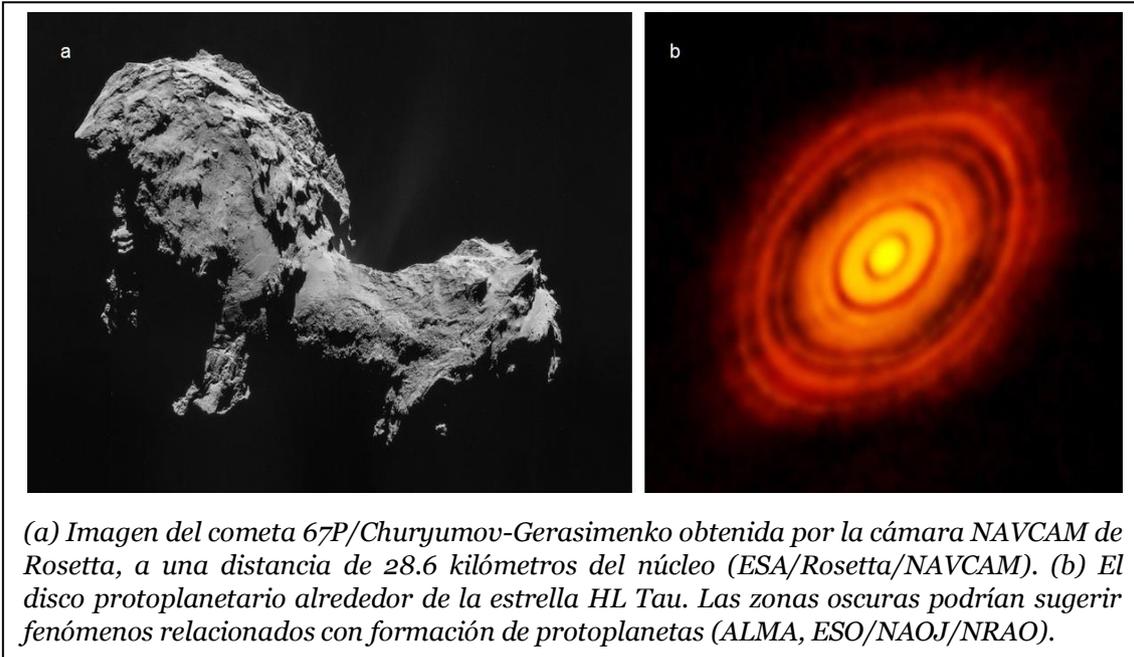
Solar. Después de tres asistencias gravitatorias con la Tierra, y una con Marte, ¡qué complicada es la dinámica de vuelo de las misiones espaciales!, de visitar dos asteroides -Steints y Lutetia- y de un periodo de hibernación de tres años y medio, desde junio de 2011 a enero de 2014, finalmente *Rosetta* se puso en órbita en torno al cometa 67P en agosto de 2014, aunque esta expresión, "se puso en órbita" es algo eufemística ya que la atracción gravitatoria entre cometa y sonda espacial no era tan fuerte como para permitir, sin complicadas maniobras de propulsión, mantenerlas unidas. Esa parte de la misión fue más bien una persecución controlada, una danza cósmica, entre el cometa y la nave. Es bien conocida la peripecia de *Philae*, la pequeña sonda destinada a posarse y anclarse sobre el cometa, que rebotó y quedó en una posición algo extraña, no la más adecuada para realizar la misión que tenía planeada, pero que aun así pudo completar bastantes tareas.

Este cometa tenía –no sabemos si la seguirá manteniendo- una forma peculiar, su núcleo distaba mucho de tener una apariencia similar a algo "esférico", y desde las primeras imágenes tomadas durante la aproximación, la morfología del objeto fue el primer problema encima de la mesa de los físicos cometarios. Colocado sobre Madrid, el núcleo se asentaría más o menos entre el Palacio Real y la Plaza de Toros de las Ventas, tenía una dimensión longitudinal máxima de unos 4 km. A pesar de que las miles de imágenes de que disponemos dan la impresión de que el núcleo del cometa era gris y que reflejaba bastante luz, la realidad es que su albedo era del orden del 4%, es decir, tan solo reflejaba esa mínima parte de la luz solar, con lo cual realmente tendría la apariencia de un pedazo de carbón.

Algunos de los resultados más importantes de *Rosetta* tienen que ver con la composición del agua de su núcleo, que, en un gráfico símil de una nota de prensa de ESA "tiene un sabor distinto" al agua de nuestros océanos. Esto parece implicar que cometas similares a 67P no habrían aportado tanta agua a la Tierra como se creía, aunque el descubrimiento de moléculas como la glicina, un aminoácido que se encuentra en las proteínas, y de fósforo, elemento fundamental del ADN y de las membranas celulares, deja una puerta abierta a la fascinante hipótesis de que algunos de los bloques básicos de los que surgió la vida pudieran proceder del espacio.

...Sí, ¡cómo hubiera disfrutado Carl Sagan con estos descubrimientos!, y cómo lo hubiera hecho, ampliando un poco el horizonte, con los miles de planetas extrasolares descubiertos –la "planetodiversidad"- o con las asombrosas imágenes de los discos en torno a estrellas jóvenes, que nos dan una imagen de lo que fue nuestro Sistema Solar en sus albores. Es a ellos a los que quiero dedicar la segunda parte de esta contribución, en parte porque entre ellos y los cometas existe una relación muy íntima.

A mediados de los años 80, observaciones con el satélite *IRAS*³, permitieron identificar por primera vez la presencia de material frío en torno a Vega (α Lyrae, 9600 K de temperatura, una edad de ~450 millones de años, situada a 25 años luz). Desde entonces, proyectos como *ISO*⁴, *Herschel*⁵, y observatorios en Tierra como *ALMA*⁶, operando en los rangos infrarrojo y milimétrico del espectro electromagnético, han permitido detectar multitud de discos circunestelares entre los que están los discos protoplanetarios y los discos de escombros, o discos *debris*, dos fases evolutivas del material que rodea a las estrellas en sus primeras etapas evolutivas.



Los discos protoplanetarios son discos de gas y polvo, en una proporción de aproximadamente 100/1 en masa, que rodean estrellas jóvenes, de tan solo unos pocos millones, o decenas de millones de años y que provienen de complejos procesos que llevan desde una nube de material interestelar que se contrae a la formación de una protoestrella y un disco en el que, si las condiciones son favorables, se podrían formar planetas. Cuando los discos protoplanetarios evolucionan, el gas va desapareciendo por distintos mecanismos -uno de ellos es el acrecimiento sobre la estrella en formación- mientras que los granos de polvo pueden fusionarse, creando cuerpos de distintos tamaños -planetesimales- que pueden ser núcleos de planetas, o que pueden colisionar entre ellos, nutriendo al disco de polvo procesado, o

³ <https://www.jpl.nasa.gov/missions/infrared-astronomical-satellite-iras/>

⁴ <https://www.cosmos.esa.int/web/iso>

⁵ <https://sci.esa.int/web/herschel/home>

⁶ <https://www.almaobservatory.org/es/inicio/>

permanecer en las zonas más externas de los discos en forma de cuerpos helados –exocometas- que en algunas ocasiones pueden viajar a las partes más internas del sistema protoplanetario, colisionando con los potenciales cuerpos allí formados. Esta compleja estructura sería un disco *debris*. Los modelos y las observaciones nos dicen que nuestro Sistema Solar sufrió hace unos 4000 millones de años lo que se conoce como el “bombardeo intenso tardío”; se piensa que la mayoría de los cráteres que se observan en Mercurio y la Luna datan de esa época. Nuestro cinturón de Kuiper de objetos transneptunianos y la nube de Oort serían las huellas de todo aquel proceso en nuestra propia casa, en el Sistema Solar.

De entre todas las estrellas con discos, β Pictoris (~8000 K de temperatura, 23 millones de años de edad, a una distancia de unos 60 años luz, y con dos planetas orbitándola), muestra una intensa actividad cometaria. La detección de cometas –y de otros cuerpos pequeños- en torno a estrellas distintas de nuestro Sol es todo un reto observacional, fundamentalmente debido a su reducido tamaño. La técnica más empleada es la búsqueda de pequeñas componentes de absorción variables, causadas por el gas que se produce cuando el cuerpo helado o “exocometas” se aproxima a la estrella y se sublima, superpuestas a las líneas de absorción del espectro estelar. En β Pictoris se han detectado centenares de estos eventos, confirmando de una manera extraordinaria el escenario que poco a poco vamos construyendo para entender la arquitectura de los sistemas exoplanetarios. En el momento de escribir esta contribución se conocen 26 estrellas que presentan fenómenos compatibles con la existencia de exocometas, curiosamente todas ellas son de tipo espectral A (temperaturas entre 7500 y 11000 K), salvo una de tipo F (algo más fría de 7500 K).

Estrellas en formación, de las frías nubes moleculares en contracción a los discos circunestelares, cunas de sistemas planetarios. Cometas, asteroides, planetesimales, gas, polvo, en una compleja danza en torno a su estrella. Planetas helados, habitables o mundos con temperaturas insostenibles. Universo violento a pequeña escala. Cielo e infierno... y quizás vida.

Benjamín Montesinos Comino.

Doctor en Ciencias Físicas.

Investigador Científico, Departamento de Astrofísica, Centro de Astrobiología (CAB, CSIC-INTA), Madrid.

4.2 La Tierra y Venus, ¿Cielos o Infiernos?

Heaven and Hell, Cielo e Infierno, o más bien Paraíso e Infierno, dado que el termino anglo *heaven* es bien distinto de *sky*, con unas connotaciones que la palabra castellana cielo no da en todas sus tonalidades: así titulaba Carl Sagan uno de sus capítulos de Cosmos más emblemáticos. Cuando se me propuso escribir un breve ensayo sobre él, se me ofrecieron distintas disyuntivas todas ellas relacionadas con la temática del capítulo. A mí en particular, dado mi trabajo en Exoplanetología y Arqueoastronomía, me llamaron la atención dos: el planeta Venus en la ficción y en la realidad, y Venus como ejemplo de efecto invernadero. Poco podía imaginar cuan relacionadas ambas temáticas están con uno de los mayores dilemas de nuestro tiempo, la emergencia climática. Y sobre eso es sobre lo que finalmente quiero hablarles.

Cuando Sagan escribió Cosmos vivíamos en la era en que todo era posible. La Unión Soviética aún existía y nuestros temores, nuestro particular infierno, era el invierno nuclear causado por una deflagración mundial que solo era evitado por el miedo, de sobras motivado, a una destrucción mutua asegurada. Aparentemente, nadie podía prever el colapso de la URSS solo unos años después. Uno de los motivos por los que la URSS resplandecía en apariencia era su ciencia. Y uno de los aspectos por los que la ciencia soviética parecía destacar era su carrera espacial que les había permitido, no solo poner al primer cosmonauta en órbita, sino mapear la cara oculta de la luna o poner sondas en la superficie del planeta Venus, las famosas "Venera".

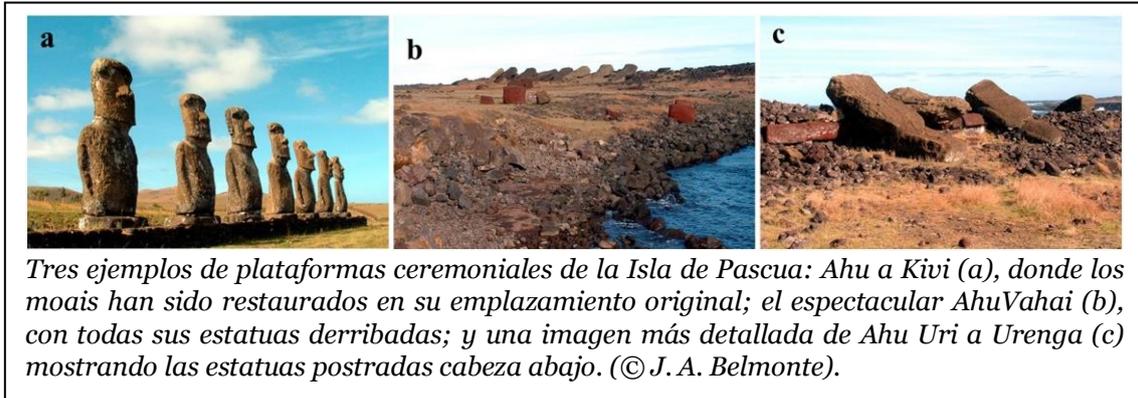
Una de las cosas que nos enseñaron las sondas Venera es que nuestro vecino en el sistema solar, icono de la belleza o de la prosperidad en la mente humana, era sin embargo lo más parecido al Infierno que cabría esperar. Pero no siempre fue así. Venus y la Tierra no eran tan diferentes en sus orígenes, ambos tenían tamaños y gravedades similares y podían haber seguido caminos paralelos pero... ¡ay! Venus estaba un poquito más cerca del Sol, era algo menos denso y algo enigmático había ocurrido en sus orígenes que había generado una rotación totalmente anómala, demasiado lenta y retrógrada. A pesar de encontrarse en la linde interna de la Zona de Habitabilidad dinámica de nuestra estrella, donde también se encuentran la Tierra y Marte, el planeta, carente de placas tectónicas, más seco que el nuestro, y con una atmósfera

muy densa de dióxido de carbono, se encaminó hacia el desastre a causa de lo que se conoce como *runaway greenhouse effect*, o efecto invernadero desbocado, que lo convertiría en el Infierno que es hoy en día. Un buen espejo en que mirarse en estos tiempos de quema desbocada de combustibles fósiles (y de los bosques), con el consiguiente aumento de la proporción de dióxido de carbono en el aire, y su consecuente aumento del efecto invernadero y de las temperaturas. Esto nos dice que nada es eterno, que no podemos confiar en que las cosas van a ser de una determinada manera porque siempre fueron de esa manera (el siempre humano es un tiempo muy breve en la historia de la Tierra), y que las cosas pueden cambiar de un momento a otro cuando menos te lo esperas. Arnold Toynbee dejó escrito que las civilizaciones mueren por suicidio, no por asesinato. ¡Parece profético! ¡Nuestra civilización, más que cualquier otra cosa, es con seguridad perecedera y tiene fecha de caducidad! ¿Cuándo?

Siguiendo el ejemplo de Jared Diamond, quien ya avisaba hace casi dos décadas en su "Colapso" de la que podía venírse nos encima, vamos a fijarnos, como paradigma pues lo conozco muy bien, en el ejemplo de la isla de Pascua. Durante más de treinta generaciones, los descendientes de *Hotu-Matu'a* y sus colonos polinesios habían vivido aislados en el rincón del planeta más alejado de cualquier tierra continental, al que sus habitantes habían pasado a denominar adecuadamente *Te-pito-o-te-nua*, el Ombligo del Mundo, pues creían que ésta era la única tierra emergida que quedaba sobre la faz del orbe (nosotros sabemos a ciencia cierta que la Tierra es el único planeta habitable de que disponemos). Sus gentes también denominaban a su isla como la Pequeña Rapa, o *Rapa Nui*, quizás como un recuerdo de su tierra ancestral situada según la leyenda mucho más hacia el oeste. La sorpresa de los navegantes holandeses que descubrieron la isla un domingo de Pascua a principios del siglo XVIII (1722) debió de ser mayúscula cuando se encontraron que una pequeña isla, no mucho mayor que la canaria de El Hierro, estaba densamente poblada por lo que parecía ser una cultura bastante avanzada que había, literalmente, cubierto las costas de la isla con cientos de plataformas ceremoniales, los *ahus*, sobre los que se erigían centenares de estatuas gigantescas, a las que llamaban *moais*. Una agricultura intensiva ligada a una severa deforestación y la construcción desaforada habían convertido un paraíso subtropical en una olla a presión a punto de explotar. La llegada de los europeos fue el detonante.

Desde su descubrimiento, la isla sufriría una devastadora guerra civil, ligada a la superpoblación y al colapso ecológico, en que todas las estatuas fueron salvajemente derribadas por los descendientes de las mismas personas que las habían erigido. Es por ello, que los *ahus* y los *moais* de la Isla de Pascua pueden servir de metáfora del futuro que espera a nuestra civilización si no se toman las medidas necesarias. La Figura es ilustrativa de esta idea. Los siete *moais* de Ahu a Kivi, reconstruidos, muestran cómo debían lucir las cientos de estatuas erigidas por toda la isla; sin embargo, cuando comenzó en

serio al exploración arqueológica y antropológica de Rapa Nui, a mediados del siglo XX, todas las plataformas lucían como las de AhuVahai, con las estatuas tumbadas boca abajo al pie de los ahu, mientras que los *pukao*, los sombreros de toba roja que las coronaban, habían rodado hacia adelante y se habían esparcido por el espacio circundante en un caos donde la entropía ejercía su dominio. Los supervivientes usarían el entorno de las estatuas caídas como cementerio en el colapso subsiguiente, como es el caso de Ahu Uri a Urenga te Mahina, una plataforma que en su día quizás había servido como “observatorio” lunar. Cielo frente a infierno.



Para rematar una situación ya de por sí desesperada, los asaltos de barcos esclavistas diezmaron la población. Luego llegó la cristianización y el dominio extranjero (primero, nominalmente, de España, luego de Chile) y la isla, con una población de pocos centenares de habitantes tras haber estado poblada por muchos millares (300 frente a casi 15.000, según las estimaciones, una reducción poblacional de en torno al 98%), sería gobernada como una finca ovejera arrendada por el gobierno chileno durante casi un siglo (la tierra esquilada no daba para más), con la población, en régimen de servidumbre limitada a un único núcleo poblacional en Hanga Roa. Por ello, es quizás sorprendente que los rapanuis se las ingeniasen para conservar parte de su cultura, guardando el recuerdo de sus tradiciones ancestrales. Sin embargo la mayoría de la información, incluida la técnica para transportar y erigir los moais se perderían para siempre. Mi colega y buen amigo Edmundo Edwards ilustra perfectamente la metáfora, o la moraleja, de todo esto en el título de un libro del que es autor, junto a su hija Alejandra. Esta obra singular se titula “Cuando el Universo era una Isla” y en ella podemos aprender como una civilización avanzada, capaz de prodigios constructivos y de ingeniería, y de desarrollar una cultura superior, escritura incluida, pudo ser a su vez capaz de acabar con su “Universo” reduciéndolo a polvo y ruinas. ¿Seremos capaces de aprender la lección?

La Tierra ha vivido antes cinco grandes extinciones masivas. La más famosa, la del final del Cretácico y la única causada por un agente exógeno, un

gran meteorito, fue la que provocó la extinción de los dinosaurios (salvo sus parientes cercanos las aves), junto a un sin fin de otras especies. Ésta fue la que permitió medrar a los mamíferos y sin ella es posible que yo no estuviese escribiendo estas líneas en este preciso momento. La del Pérmico, hace 250 millones de años, que dio lugar a la transición entre las Eras Primaria y Secundaria, fue la más masiva, pues se calcula que un 96% de las especies vivas sucumbieron. Ésta, y las otras tres, fueron causadas aparentemente por cambios climáticos asociados al efecto invernadero generado por los gases emitidos por los volcanes, la deriva continental y otros fenómenos, lo que provocó la escalada de las temperaturas y la acidificación de los océanos de la Tierra. Algo similar a lo que está ocurriendo ahora mismo aunque a menor escala, ¡por ahora! sino se pone cota a las emisiones, podemos acabar convirtiendo nuestro paraíso en nuestro particular infierno.

Es cierto que lo que plantean los peores agoreros: que estamos destruyendo el planeta, que estamos acabando con sus recursos, no es sino una exageración, quizás para ser más precisos, una simplificación. Pero lo que sí que es cierto, y en ello tienen razón muchos de los profetas de nuestro tiempo (el más reciente David Wallace-Wells y su "Planeta Inhóspito", pero también los científicos del IPCC), es que estamos destruyendo el sistema climático y ecológico que permitió ver nacer la especie humana y que ésta desarrollase la civilización tal y como la conocemos. Una civilización en que un servidor de Internet casero provoca la misma huella de carbono que un todoterreno y en que la minería de bitcoins genera la misma huella climática que el tráfico aéreo mundial, y que, si bien se lleva a cabo en teoría con energías renovables, impide que éstas se usen para contrarrestar las emisiones causadas por los combustibles fósiles, ¡tamaño estupidez! Una civilización así está irremisiblemente condenada. Es probable que en menos de un siglo, lo que hoy damos por descontado: energía barata, agua en los grifos, comida asequible, electricidad universal, transporte aéreo a cualquier rincón del planeta, incluso Internet puede que no sean sino vanos recuerdos del pasado, *songs of the distant Earth* como diría Clarke. Quizás en algunos lugares (pocos) la especie humana pervivirá y también su tecnología pero gran parte del planeta se habrá convertido en un lugar inhóspito y desagradable, para ella.

Probablemente estamos, y estaremos, solos en el universo. Hagámonos el favor de respetar el único planeta habitable por la especie humana que conocemos. Desafortunadamente no hay, ni habrá según parece, una Tierra 2.0 a la que emigrar esta vez, aunque los exoplanetólogos andemos locos buscándola.

Juan Antonio Belmonte Avilés.

Doctor en Astrofísica.

Profesor de Investigación del Instituto de Astrofísica de Canarias.

4.3 Cuentos de cometas.

En mi opinión, el mayor triunfo de Carl Sagan es que supo llegar al gran público. Es el divulgador por excelencia. Utilizaba potentes metáforas visuales y emotivas. Entrelazaba hechos científicos con historias, sabiendo que el ser humano se siente irremediamente atraído por ellas. Nos sentamos a escuchar un cuento y luego se lo contamos a otra persona. La narración nos ayuda a recordar los hechos. Y el aprendizaje perdura en el tiempo.

La Astronomía es una ciencia que surgió de las historias que contábamos sobre el cielo. Esas luces brillantes sobre nuestros antepasados provocaban muchas preguntas. ¿Qué eran?, ¿Qué significaban esos patrones que veíamos? ¿Por qué se repetían? Los ciclos resultaron la clave de nuestra supervivencia, una vez que supimos aprovecharnos de ellos. Aunque no todo se repetía. Ocurrían sucesos sorprendentes. Puntos brillantes con largas cabelleras que aparecían y desaparecían sin avisar. Los cometas. Sagan introduce a los cometas en su obra *Cosmos* como un elemento perturbador. Los seres humanos tememos lo desconocido y le achacamos todo lo malo. Catástrofes naturales, derrotas de ejércitos, enfermedades, muertes... Pero entonces descubrimos el patrón escondido. Y todo cambió. Dejadme acercaros a esta historia.

Edmond Halley fue el primero en predecir el retorno de un cometa. A partir de entonces, los astrónomos comenzaron a descubrir más. Algunos volvían cada poco tiempo, otros pasaban una vez y nunca volvían. Pero ese primer cometa siempre ocupó un lugar especial: lo llamamos 1P/Halley, el primero que supimos que volvía periódicamente. Su retorno al cielo en 1986 fue muy celebrado. La humanidad acababa de alcanzar las estrellas: doce hombres habían puesto los pies en la Luna, naves artificiales se habían posado en Marte y Venus. La carrera espacial era ahora una exploración de nuevos mundos. Cada vez más países se volcaban hacia el espacio, lanzando cohetes y diseminando satélites. Ese año, si aunaban esfuerzos, podrían tocar un cometa.

Mucho había avanzado nuestro conocimiento sobre estos viajeros con estela. Sus alargadas trayectorias ponían su origen lejos del Sol, descubrimos que era hielo lo que se derretía al acercarse a la estrella y formaba esas hermosas colas cometarias, aunque también había polvo. Pero aún quedaba

mucho por saber. Los materiales que forman parte de un cometa llevan inalterados desde la formación del Sistema Solar. Comprender de qué estaban hechos nos abriría una ventana al pasado más remoto, algo inalcanzable en un planeta que constantemente cambia y rehace su superficie.

De modo que surgió un programa de cooperación internacional. Una flota de cinco satélites perseguiría al cometa Halley cuando se acercara al Sol, es decir, en el perihelio. Primera dificultad, justo en ese momento el Sol se interpondría en nuestra visión del cometa. Segunda dificultad: el cometa Halley tiene un giro retrógrado, es decir, gira en sentido contrario al resto de planetas del Sistema Solar. Si miramos desde el polo norte, la Tierra gira en sentido contrario a las agujas del reloj tanto sobre sí misma como alrededor del Sol, mientras que el cometa lo hace en el sentido horario. Además, su órbita está ligeramente más elevada sobre el plano del Sistema Solar. Todo un reto para la época.

Las primeras en lanzarse a la persecución fueron las sondas Vega 1 y 2 del programa soviético, en diciembre de 1984. La suya era una ambiciosa misión múltiple: estudiar el planeta Venus y el cometa Halley. Herederas de las misiones Venera, las Vega se aprovecharon del anterior éxito en la exploración del planeta vecino. Los ingenieros soviéticos habían perfeccionado en sus diseños el arte de resistir las infernales temperaturas (470°C) y altísimas presiones (90 atmósferas) de la superficie de Venus. El viaje de Vega 1 comenzaba depositando un módulo aterrizador en Afrodita Terra y soltando un globo sonda que estudiaría la atmósfera entre nubes de ácido sulfúrico. Vega 2 repetiría el proceso, aterrizando unos kilómetros más lejos en la misma región. Superaría a su gemela consiguiendo tomar muestras del suelo. Después, en ambas misiones, la nave nodriza realizaba una maniobra denominada asistencia gravitacional para reorientarse e impulsarse hacia la órbita del cometa. Su objetivo era localizar el esquivo núcleo del cometa.

Pero para eso aún faltaba tiempo. Un mes más tarde del lanzamiento en Baikonur, la sonda Sakigake ("pionera") era lanzada por la agencia espacial japonesa: su primera nave interplanetaria. Apenas contaba con instrumentos científicos. Su papel era, esencialmente, comprobar la viabilidad de Suisei, la otra sonda japonesa, y servir de punto de referencia al resto de la flota. De hecho, fue la que menos se acercó al cometa, quedándose a unos 7 millones de kilómetros. La sonda Suisei, por el contrario, tomó una serie de imágenes con su cámara de ultravioleta, muy útiles para sus compañeros de viaje, observó el viento solar y la interacción de iones expulsados por el cometa con el campo magnético terrestre. La Armada de Halley estaba casi completa⁷.

Un mes antes que Suisei, en julio de 1985, la Agencia Espacial Europea (ESA) había lanzado a Giotto. El nombre hacía alusión a un pintor renacentista, Giotto di Bondone, quien, impresionado con el paso del cometa Halley, había

⁷"Suisei". Japan Aerospace Exploration Agency. 2008. Archived from [the original](#) on 14 January 2013. Retrieved 2 December 2009.

decidido plasmarlo en su famosa obra “Adoración de los Magos”, convirtiéndolo en la estrella de Belén. La misión de Giotto era crucial en la flota: tendría que acercarse todo lo posible al núcleo del cometa. En el perihelio, el calor del Sol derrite los elementos volátiles de la superficie del cometa, eyectando hielo y polvo a su alrededor a gran velocidad. Por eso el satélite iba equipado con un escudo de aluminio y Kevlar capaz de resistir un gran número de impactos. En realidad, había una sexta pieza en el tablero: el satélite estadounidense ICE (Explorador Cometario Internacional, por sus siglas en inglés), que llevaba en órbita desde 1978. Aunque a 28 millones de kilómetros, sumó sus esfuerzos proporcionando fotos durante el encuentro con el cometa.

El acontecimiento se produjo en marzo de 1986. La primera en llegar fue Vega 1, seguida de Vega 2. Volaron atravesando la cola del cometa, protegidas por escudos de aluminio. Entre otras muchas propiedades, estudiaron la distribución y composición de los diferentes granos de polvo y de los gases en la coma del cometa (lo que sería la “atmósfera” que rodea el núcleo), además de tomar miles de fotografías. Pasaron a unos 8000km, y sobrevivieron para atravesar de nuevo la cola del cometa un año después. Diez veces más lejos, sin atravesar la cola, pasó la sonda Suisei, y días más tarde, todavía más alejada, su compañera Sakigake. Pudieron determinar la rotación del núcleo y el ritmo al que expulsaba agua al espacio. Esas mediciones de larga distancia resultaron de gran importancia para la última sonda en llegar. Aunque sin la localización del núcleo por parte de las Vega 1 y 2, Giotto nunca habría podido ajustar bien su trayectoria. Fue un gran trabajo en equipo. Finalmente, el 14 de marzo, llegó el turno de Giotto. Con todos los datos a su disposición, su ruta quedó fijada: pasaría a 596km del núcleo. Conforme se acercaba, iba recibiendo múltiples impactos de polvo a gran velocidad. Y cuando estaba a unos segundos del objetivo, se perdió la conexión. Uno de los golpes la eyectó, y quedó girando sin control. El culpable fue un grano de polvo de 1mg. Por suerte, la sonda pudo volver a reposicionarse. Giotto contaba con una cámara de fotos a color, que quedó destruida, pero no sin antes tomar las imágenes más cercanas del núcleo del cometa Halley.



Antes de la aventura de la Armada de Halley, el modelo teórico más extendido ponía a los cometas como bolas de nieve sucia. Pero después de esa hazaña, los astrónomos se llevaron una sorpresa. Parecía que la bola de nieve sucia tenía "más suciedad que nieve", en palabras de Uwe Keller, del Instituto Max Planck de Astronomía (Alemania). Y es que el núcleo de Halley resultó ser muy oscuro. Tras el éxito de sus misiones principales, poco a poco, se fueron apagando los instrumentos de los satélites de la flota. Con la mayoría se perdió el contacto por radio al agotarse el combustible, aunque siguieron en órbita alrededor del Sol. Sólo Giotto pudo despertar tras años de hibernación, en 1990, para una segunda y última persecución a un cometa. En esta ocasión, un cometa más viejo (26P/Grigg-Skjellerup) que apenas contaba con material volátil. Gracias a eso, Giotto pudo acercarse el doble con mucho menos riesgo.

Con el paso de los años, hemos seguido estudiando y persiguiendo cometas. En 1999, la sonda Stardust (NASA) recogió muestras cerca del cometa 81P/Wild, atrapando partículas con un ingenioso colector de aerogel (cuya densidad es bajísima). La cápsula donde se guardaban las partículas recogidas volvió a la Tierra unos años más tarde, aprovechando un pase cercano. La gran noticia fue encontrar glicina, un aminoácido o, como se le conoce popularmente, un "ladrillo de la vida". Con esto se confirmaba lo comunes que podían ser en el espacio, y lo "libres que viajaban", en palabras de Carl Pilcher, director del Instituto de Astrobiología de la NASA. En 2004 y 2005, las misiones Rosetta (ESA) y Deep Impact (NASA) también salieron a perseguir sendos cometas, llevando a bordo pequeños compañeros de viaje. Pero con una diferencia importante. Una misión depositaría con cuidado el acompañante en la superficie del cometa, y la otra lo estrellaría a propósito. Además de provocar un cráter, en la segunda misión se aprovechó para estudiar el material eyectado. Y aparecieron arcilla y carbonatos: ¡necesitan formarse en presencia de agua líquida! El espacio volvía a dejarnos boquiabiertos. El enfoque sosegado de la misión Rosetta también dio sus frutos. A bordo del cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko viajaban también moléculas complejas, como propanal o formaldehído.

¡Cómo no vamos a estar fascinados por los cometas! Estos viajeros de las estrellas llevan agua y compuestos orgánicos por todo el espacio. Recorren inmensas distancias, a veces visitando otras estrellas. Guardan los secretos de la formación de los planetas y el Sol. Como decían Carl Sagan y Ann Druyan en su libro "Comet", cuando "el resto del Sistema Solar haya muerto y los descendientes de los humanos hayan emigrado o desaparecido hace tiempo, los cometas todavía seguirán aquí." Y es que esconden una historia que no tiene fin.

Elsa de Cea del Pozo.

Doctora en Astrofísica y divulgadora científica.

Universidad Autónoma de Madrid y Museo Nacional de Ciencia y Tecnología.

Capítulo 5

Blues para un planeta rojo

*En los huertos de los dioses contempla los canales...
Enuma Elish Sumer hacia 2500 a.C.*

Un hombre que opine como Copérnico, que esta Tierra nuestra es un planeta conducido alrededor del Sol y alumbrado por él como los demás, no podrá evitar que le asalte alguna vez la fantasía... de que el resto de los planetas tienen su propio vestido y su mobiliario, incluso unos habitantes, al igual que esta Tierra nuestra... Pero siempre podríamos concluir diciendo que no valía la pena examinar lo que la naturaleza se había complacido en hacer allí, ya que no había probabilidad alguna de llegar alguna vez al final del examen... Pero hace poco, estaba yo pensando bastante seriamente sobre este tema (y no es que me considere un observador más fino que aquellos grandes hombres [del pasado], sino que he tenido la suerte de vivir después que la mayoría de ellos), cuando pensé que este examen no era tan impracticable ni el camino tan lleno de dificultades, sino que dejaba un margen muy bueno para posibles conjeturas.

CHRISTIAAN HUYGENS, Nuevas conjeturas referentes a los mundos planetarios, sus habitantes y sus producciones, hacia 1690

Llegará un tiempo en que los hombres serán capaces de ampliar su mirada... y podrán ver los planetas como nuestra propia Tierra.

CHRISTOPHER WREN, Discurso inaugural, Gresham College, 1657

5.1 Rock and Roll para un planeta rojo.

El mejor libro es aquel que después de 40 años te sigue haciendo soñar, te transporta a otro planeta, y te hace revivir el entusiasmo que anteriores científicos pusieron para explorar el espacio que nos rodea. En concreto, el capítulo “*Blues para un planeta rojo*” dedicado a Marte es exquisito, y el entusiasmo mostrado por varias generaciones hacia la exploración de nuestro vecino rojo es absolutamente contagioso.

Aunque nos separen cuatro décadas desde que el capítulo fue escrito, Marte sigue siendo uno de los principales motores de la exploración planetaria tal y como Carl Sagan lo describió. La habitabilidad y posible vida microscópica pasada/presente bajo su superficie son los pilares de la exploración actual. Si en aquel entonces “Blues de un planeta rojo” evocaba la fantasía de existencia de vida en Marte o que el planeta pudiera haber sido azul como la Tierra en un tiempo pasado, creo que en la actualidad sería apropiado llamarlo “Rock and Roll para un planeta rojo” porque su superficie rocosa aún tiene mucho que enseñarnos y porque, en el momento actual, la exploración Marciana esta más de moda que nunca.

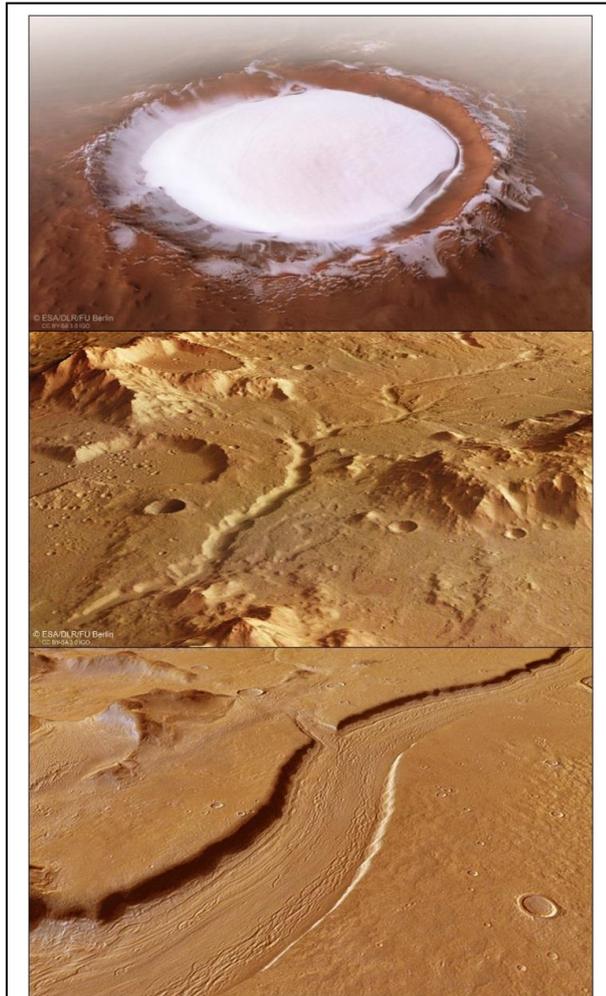
El momento en que las Vikings 1 y 2 se posaron en la superficie de Marte, no solo fue un hito en la historia de la exploración espacial, sino el punto de partida de la exploración planetaria tal y como la conocemos hoy en día. El legado fue tal, que hasta la llegada de la misión americana MAVEN (Mars Atmosphere and Volatile Evolution mission) en septiembre de 2014 (¡42 años después!), los únicos dos perfiles de densidad y temperatura que se tenían de la alta atmosfera de Marte eran los que se tomaron durante el descenso de los dos aterrizadores de las Vikings. Pero si hay algo en lo que la exploración de Marte ha sido constante desde los tiempos de Schiaparelli y de Lowell, ha sido en la búsqueda de evidencias de vida y la caracterización de la habitabilidad del planeta. Hasta la fecha, ninguna misión ha encontrado restos de vida presente o pasada en su superficie, aunque esto no quiere decir de ningún modo que no haya habido.

Existen numerosas pruebas que indican que Marte fue una vez mucho más cálido y húmedo, tuvo grandes ríos y el agua líquida corrió por su

superficie (Figura). Por lo tanto, Marte y la Tierra presentaron condiciones similares en sus primeros millones de años, haciendo la aparición de microbios viable también allí. Si a todo esto le añadimos la controversia actual sobre la presencia de metano en Marte, tenemos ante nosotros la explicación de por qué la exploración de nuestro vecino rojo sigue siendo uno de los principales objetivos en la búsqueda de signos de vida en el Sistema Solar.

En cuanto al tema del metano existe actualmente una interesante controversia sobre la presencia de trazas de este gas, ya que es un marcador de presencia de vida microbiana, aunque este, también se puede originar por procesos volcánicos o por actividades hidrotermales. Sabemos, sin embargo, que su presencia es inestable desapareciendo rápidamente por causas físicas que aún se desconocen. Por tanto, medir metano en Marte podría implicar la existencia de una fuente donde este gas se genera continuamente.

Todas las nuevas misiones mandadas a Marte durante la última década cuentan con instrumentación apropiada tanto para su medición como para la localización de sus posibles fuentes. Sin embargo, las observaciones que nos envían tanto desde la superficie como desde órbita son contradictorias. La primera evidencia de metano en la atmósfera de Marte se tuvo en 2004 gracias a la sonda europea Mars Express y fue al poco tiempo confirmada por telescopios terrestres. Mars Express nos ha mostrado que las concentraciones de este gas varían a lo largo de las estaciones y de los años. Sin embargo, en 2012 el rover Curiosity de la NASA aterrizó en Marte y al principio no encontró metano, generando más dudas sobre la existencia de este gas. Fue así hasta que, en 2014, detectó un pico en la producción de este



Tres imágenes de Marte tomadas por la misión europea Mars Express donde la presencia de agua presente o pasada es evidente. Imagen superior: Cráter Korolev cubierto de agua helada. Imágenes del medio e inferior: surcos de antiguos ríos de agua líquida. Imágenes de ESA/DLR/FU Berlin.

gas. Desde entonces, el metano se ha observado de forma intermitente en Marte llevándonos a la conclusión de que existe una variación estacional. Desafortunadamente, el rover Curiosity no tiene la capacidad de distinguir entre los isotopos de metano, y, por tanto, nos deja sin saber si el origen es geológico o biológico. En 2016, Europa y Rusia mandaron a Marte otra nave para orbitar el planeta, llamada ExoMars Trace Gas Orbiter, a la que le seguirá en 2022 un rover para la superficie llamado Rosalind Franklin. El orbitador Trace Gas Orbiter, que en principio es la nave con mejor tecnología para descifrar los enigmas del metano, no ha encontrado signo alguno de este gas en la atmosfera marciana aun, contribuyendo aún más si cabe al misterio de su origen y destrucción.

No obstante, no todo en Marte es metano. Las misiones actuales cuentan con la instrumentación precisa para determinar las condiciones de habitabilidad presente y pasada de Marte. En concreto, en los próximos dos años varias misiones de diferentes agencias espaciales serán lanzadas a Marte. En julio de 2020, serán tres entre las que se incluyen la agencia americana NASA con el rover Perseverance de la misión Mars2020, la misión Tianwen-1 de China (orbitador, aterrizador y rover), la misión "esperanza" (Hope en inglés) de los Emiratos Arabes Unidos. A estas les seguirá el rover Rosalind Franklin de la agencia espacial europea y rusa en 2022. España participa en varias de estas misiones proporcionándoles diferentes instrumentos, como por ejemplo, para el rover Rosalind Franklin. El objetivo principal de esta misión será resolver una de las preguntas pendientes de nuestro tiempo intentando esclarecer si la vida alguna vez existió o si todavía está activa en Marte hoy⁸. Para ello, el rover consta de un conjunto completo de instrumentos dedicados a la investigación en exobiología y geoquímica, así como un perforador de hasta 2 m para recolectar y analizar muestras del subsuelo.

Desde la época de las Vikings sabemos que no hay vida en la superficie de Marte (o al menos, ¡no la hemos encontrado aún!), pero conocemos muy poco sobre si podría existir vida bajo su superficie. De hecho, es sabido que la superficie de Marte es un medio muy malo para la conservación de biomarcadores debido a que la dosis de radiación ultravioleta es mayor en Marte que en la Tierra, y esta produce especies oxidantes reactivas que destruyen los biomarcadores. Esta radiación no solo afecta a la superficie, sino que también a los materiales que se encuentran por debajo de la superficie. Por todas estas razones, esta misión es muy prometedora ya que por primera vez se estudiará el subsuelo marciano hasta 2 m de profundidad, lo que implica que, por primera vez, materiales que han permanecido casi intactos y protegidos de la radiación solar serán analizados. De haber existido vida en Marte, esta sería la misión que podría encontrarla.

⁸ <https://exploration.esa.int/web/mars/-/45082-rover-scientific-objectives>

Marte sigue más vivo que nunca, y no solo debido a que recientemente la misión americana InSight haya medido "martemotos", sino porque a pesar de tener un aspecto árido y difícil, Marte está muy arraigado dentro de todos nosotros y su conquista humana cada vez se siente más cercana. Todos los países quieren ir a Marte tanto como quieren volver a la Luna, y sueñan con resolver las mismas preguntas que Carl Sagan sabiamente postuló hace 40 años en este libro. Pero no solo los países a través de sus agencias espaciales públicas quieren ir a Marte, sino también el sector privado. Existen compañías como SpaceX que ha marcado Marte como su preciado diamante a conseguir, con el lema "*Marte y más allá, el camino hacia la humanidad multiplanetaria*"⁹. Entre sus objetivos está ir y volver de Marte, así como llevar a humanos hasta allí. Quién sabe, ¿serán estos los próximos vuelos transplanetarios que cogeremos en unos años? Parece que pronto tendremos conocimiento de lo lejos que podemos ir.

Podríamos decir que la exploración de Marte es una carrera llena de obstáculos, pero que por más que mandamos sondas allí, más nos damos cuenta de nuestra ignorancia sobre el querido vecino rojo.

Aunque podríamos decir que en 40 años la vida da muchas vueltas, en este caso, al desconocer si hay o ha habido vida, necesitaremos al menos otros 40 años más para empezar a entender el porqué de esta fascinación por un planeta simplemente rojo.

Beatriz Sánchez-Cano.
Doctora en Ciencias Físicas.
Post-Doctoral Research Associate.
University of Leicester, Reino Unido.

⁹ <https://www.spacex.com/human-spaceflight/mars/>

5.2

El papel español en la exploración de Marte.

España cuenta con una historia de exploración espacial muy destacable, a la vez que desconocida. Con origen en el INTA, todo comienza a finales de los años cincuenta –con la NASA recién creada- mediante el acuerdo de colaboración hispano-estadounidense “*para una instalación para el seguimiento y comunicación con vehículos espaciales en la isla de Gran Canaria*”; la antigua estación de Maspalomas para el programa *Mercury* de viajes tripulados que posteriormente se ampliará con la de Fresnedillas para los Apolo [1].

Centrándonos en la exploración mediante sondas no tripuladas, el Laboratorio de Propulsión a Chorro (JPL) asumió por encargo de NASA la responsabilidad de la investigación del Sistema Solar. Para ello, en 1963, se aprovecharon las relaciones con el INTA para estudiar emplazamientos de nuevas estaciones espaciales en la España peninsular [2], con el objetivo de crear una red global para misiones de espacio profundo (DSIF entonces, DSN ahora). Por idoneidad técnica y logística se escogió el lugar del actual Complejo de Comunicaciones con el Espacio Profundo de Madrid (MDSCC). Y fue aquí, en Robledo de Chavela, donde el 15 de Julio de 1965 a las 00:18 UTC, se comenzaron a recibirlos datos de la **primera foto de proximidad**¹⁰ [3] de otro planeta del sistema solar transmitidas por una sonda interplanetaria, la *Mariner 4*, lanzada por los estadounidenses un año antes, mientras se comenzaba a construir la primera antena (DSS-61).

Posteriormente, la estación de Robledo se fue actualizando duplicándose con la DSS-62 de Cebreros



La primera imagen pintada a mano del Planeta Rojo fue recibida por la antena DSS-61 de 26m de diámetro en una época en la que aún no se usaban los electrodomésticos en una España rural en blanco y negro -estaba llegando el alumbrado público- como muestra la portada del Diario Arriba del 28/03/1965.

¹⁰ El *Mariner 4* enviaba datos a 8,33 bps y las fotos de escasa calidad (250kbits) tardaban 8h en bajar. Se transmitían a 10W desde unos 17000 km de Marte y se recibían con una señal menor que el propio ruido pero se amplificaban a 5W para enviarlos al JPL donde se convertirían a película fotográfica de 35mm. Por ello se aventuraron a pintar a mano la primera imagen [4].

en 1966 [4]. Esta estación fue la primera de todas las mencionadas transferida al INTA en 1969, justo antes de los encuentros de los *Mariner 6* y *7* con Marte y la *9*, que fue la primera en orbitarlo. Éxito histórico que meses después lo resumiría el visionario Sagan [5] editando los resultados del *15º COSPAR Meeting* de Madrid en 1972 [6]. Tras el exitoso servicio a NASA, la estación abulense estuvo operativa hasta 1983, se abandonó durante más de veinte años hasta que se rescató su ubicación para sumarse como segunda antena de la red de espacio profundo de la Agencia Espacial Europea (ESA) en 2005 para estrenarse como apoyo de comunicaciones para la *Mars Express Orbiter*.

Las dos estaciones de espacio profundo siguen operando hoy en día por lo que, desde el segmento terreno de comunicaciones, España **ha participado en todas las misiones que NASA y ESA han llevado a Marte** desde aquella década de los sesenta, de grandes éxitos tecnológicos gracias a la carrera espacial y en la que la escala *blues* también se convertía en un éxito popular por ser una de las influencias más importantes para el desarrollo de la música *pop*.

Tras el hito de los pases y puesta en órbita de las *Mariner*, la siguiente misión debería aterrizar; y así lo hizo la *Viking 1* también en Julio, pero del 76. Este aterrizador incorporó un mini laboratorio biológico con el objetivo de búsqueda de vida extraterrestre *in situ* con un equipo basado en el trabajo realizado en los EEUU por el español Juan Oró, pionero del estudio sobre el origen de la vida. Oró contribuyó a diseñar un experimento con el **cromatógrafo de gas y espectrómetro de masas** embarcado en ese laboratorio, el cual proporcionó supuestos indicios de actividad metabólica por producción de dióxido de carbono [7], sugiriendo que existían microorganismos en la superficie. Finalmente fue un falso positivo debido a una contaminación aunque ha sido motivo de controversia hasta hace escasos años [8].

Tras el gran éxito de las vikingas, la exploración del planeta rojo se interrumpió prácticamente durante más de dos décadas hasta que se retoma la exploración con la *Mars Pathfinder* dotada del robot *Sojourner*¹¹ y su aterrizador renombrado como *Carl Sagan Memorial Station*; con el que honraban a sus visionarias palabras que menciona en este mismo capítulo de la serie original Cosmos: [se deberá explorar Marte con,...] “vehículos autónomos que se trasladen por los lugares interesantes con un laboratorio interno y que pensara por sí mismo”.

España se incorporó al selecto club de enviar equipamiento de vuelo ya en 2003 para la *Mars Express* de la ESA. En el rover *Beagle-2*, se caracterizó un sensor ultravioleta por un equipo del Centro de Astrobiología (CAB) y la UCM, aunque desafortunadamente este vehículo “amartizado” no envió ningún dato. Respecto al orbitador, empresas españolas se encargaron de la antena de alta ganancia, varios componentes electrónicos de los instrumentos de navegación y participaron en el control de la misión. También desde el IAA-

¹¹ Primer rover en operar en el espacio profundo (fuera del sistema Tierra-Luna).

CSIC de Granada desarrollaron parte del espectrómetro de Fourier (**PFS**) embarcado, heredado de un modelo de reserva de la maltrecha *Mars-96* rusa. Actualmente cuenta aún con un equipo de investigadores españoles tratando datos en el archivo del *European Space Astronomy Centre* (ESAC), en Villafranca del Castillo.

En cuanto a las misiones NASA, en el *Curiosity* del *Mars Science Laboratory* (MSL) la Estación de Monitorización Ambiental del Rover (**REMS**) fue desarrollada por un grupo de científicos y tecnólogos del CAB (INTA-CSIC), la empresa CRISA y la UCM, entre otros. Esta estación meteorológica incluía una serie de sensores para medir viento, presión, humedad y la temperatura de la atmósfera y del suelo marciano, así como los niveles de radiación ultravioleta. Como ampliación de la colaboración de España en el instrumento REMS, la entonces EADS-CASA Espacio de Astrium lideró la Antena de Alta Ganancia (**HGAS**) que permitía comunicación directa con la Tierra sin satélite relé. SENER fue el responsable del mecanismo de apunte (**HGAG**) y el INTA colaboró en la realización de los ensayos ambientales simulando las condiciones de la atmósfera marciana.

REMS fue el germen de una serie de estaciones meteorológicas del CAB que nos reportan directamente el tiempo marciano¹². Continuó con **TWINS** en *Insight 2018* y seguirá con el *Mars Environmental Dynamics Analyzer* (**MEDA**) como principal contribución española en el *Perseverance* de *Mars 2020* (JPL-NASA) que cuenta también con el sensor de radiación y polvo (**RDS**) y el sistema de calibración del instrumento SuperCam de la Universidad de Valladolid (UVA); ensamblados todos en el INTA.

Pero antes, el INTA amplió su actividad en este campo con su participación en los *MEIGA/Met Net Lander*, pequeñas sondas espaciales con el objetivo de industrializarlas en serie para establecer una completa red meteorológica global del Planeta Rojo. Actualmente está pausado, pero gracias al diseño de diversos sensores miniaturizados junto con los programas de calificación de *MetSIS*, se complementó la idea de “*minisensorización*” del programa *InMars* dentro del Departamento de Cargas útiles y Ciencias del Espacio, orientado al desarrollo de instrumentación compacta para la investigación ambiental en la superficie de Marte. Con este trabajo se han desarrollado múltiples sensores como el sensor de irradiancia solar SIS [9] de **DREAMS** (*Dustcharacterisation, Riskassessment, and Environment Analyser on the Martian Surface*) integrado en el demostrador de aterrizaje de la misión ExoMars 2016, tristemente destruido.

El que sí cumplió su objetivo en esa misión europea del 2016 fue el *Trace Gas Orbiter* (TGO) con participación de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) en el control térmico y del IAA-CSIC de Andalucía mediante la electrónica y el software de la *Spacecraft INterface BoArD* (**SINBAD**) del espectrómetro **NOMAD** usado para identificar los componentes de la

¹² Se pueden ver estos datos en Twitter @MarsWxReport.

atmósfera. También esta institución de Granada junto la Complutense de Madrid (UCM) tuvieron presencia co-investigadora en el instrumento ruso *Atmospheric Chemistry Suite (ACS)*.

Llegamos a ExoMars 2020 (ahora 2022 por el retraso recién anunciado), y en su *rover Rosallind Franklin* se constituye la participación española más ambiciosa hasta la fecha, tanto por el liderazgo científico de la UVA como técnico desde el Dpto de Programas Espaciales y el de Óptica Espacial del INTA, de uno de los tres instrumentos principales del laboratorio analítico: el **espectrómetro Laser Raman** [10] que determinará la composición química de los minerales del subsuelo marciano con objeto de caracterizar el ambiente geoquímico y buscar indicios de actividad biológica pasada y/o presente.

En la plataforma de superficie se sitúa la estación meteorológica METEO y el INTA incorpora dos sensores: El **SIS’20**, un Sensor de Irradiancia Solar y el **DS’20**, un sensor de polvo. También en esta plataforma estará un sensor magnético (**AMR**) y otro conjunto de instrumentos dedicado exclusivamente al estudio detallado del polvo atmosférico “DUST SUITE” con el nefelómetro **MicroMED** español. Todo ello gracias a colaboraciones de la UC3M, UPC, UPM, Universidad del País Vasco, la Universidad de Sevilla, Centro Nacional de Microelectrónica, ... y una lista de organismos públicos a los que pido disculpas por olvidar [11].

En la parte industrial, existe un número relevante de empresas, coordinadas desde el CDTI, Centro de Desarrollo Tecnológico e Industrial [12], entre las que destacan Airbus Defence and Space (CRISA y la anterior CASA), RYMSA, TAS-E, Iberespacio, LIDAX, SENER, GMV o Elecnor Deimos con distinto grado y áreas de participación en la exploración de Marte [13]. Estas dos últimas lideran avanzadas propuestas en la parte de guiado para la captura de una muestra marciana (*Mars Sample Return, MSR*) en su parte de recuperación en órbita baja por misiones futuras – *Earth Return Orbiter (MSR-ERO)*.

Como vemos, la especialización actual dentro de la exploración marciana ha dado lugar a proyectos colaborativos entre decenas de universidades españolas, sus *spinoff*, empresas grandes y pequeñas del sector o pequeños talleres y/o proveedores que se han adaptado a proyectos con las exigencias del sector espacio. La mayor parte orquestados a través del personal del OPI INTA, y gracias a los trabajadores de sus “empresas hijas” INSA-ISDEFE, han permitido despegar el tejido aeroespacial industrial español en el campo de ciencias planetarias y del espacio.

Referencias y bibliografía:

[1, 2, 3,...] Consultar en: <https://cienciayelcosmosdelsigloxxi.blogspot.com/2020/01/el-papel-espanol-en-la-exploracion-de.html>

Juan F. Cabrero Gómez.

Licenciado en Física.

Asistencia Técnica ISDEFE en el Departamento de Óptica Espacial del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), Torrejón de Ardoz - Madrid.

5.3

Se anima la música en el planeta rojo.

En el capítulo “*Blues para un planeta rojo*”, Carl Sagan repasa nuestra historia hasta posarnos (robóticamente de momento) en Marte, un planeta que siempre ha despertado gran curiosidad a la humanidad. Una figura fundamental en el interés de Sagan y de la sociedad del siglo XX por el planeta rojo fue Percival Lowell¹³. Puede que los descubrimientos de Lowell no tuvieran gran repercusión científica, pero el legado que nos dejó fue incalculable, ya que alimentó una corriente de entusiasmo alrededor del planeta rojo durante décadas. Cuando tuve la suerte de trabajar en Estados Unidos en el rover *Curiosity* de NASA, aproveché una visita de mi padre para cruzar con él varios estados en coche y explorar el Observatorio Lowell en Flagstaff, Arizona. Sentía que se lo debía. Después de todo, fue mi padre quien supo transmitirme su pasión por el espacio a través de COSMOS; y COSMOS es la obra que me ha hecho ser científico. Los seres humanos somos seres sociales. Nos incomoda sentirnos solos. Tenemos la necesidad de estar acompañados y la posibilidad de vida extraterrestre nos perturba. Como Lowell, queremos creer que ha existido o existe vida en Marte, pero si buscamos la palabra creer en el diccionario veremos que su significado es dar por cierto algo que no está demostrado. Necesitamos evidencias y, lo que llama la atención, es que después de más de medio siglo de exploración robótica del planeta rojo, no hemos identificado en su superficie ni una sola pista de vida pasada o presente.

El optimismo generalizado alrededor de Marte de la primera mitad del siglo XX recibió un jarro de agua fría cuando en 1964 se recibieron las primera imágenes del planeta rojo, adquiridas por el orbitador *Mariner 4*, las cuales mostraban un paisaje tremendamente árido, desolado y sin indicios de actividad biológica. La decepción fue enorme. En 1969 se anunció a bombo y platillo en el New York Times que la sonda espacial de NASA *Mariner 7* había

¹³ Lowell estaba obsesionado con los estudios de Giovanni Schiaparelli, quien en 1877 observó en Marte lo que parecían ser finas líneas oscuras que atravesaban el planeta y que interpretó como canales fluviales naturales. Un error al traducir la palabra italiana “canali” (canales naturales) a la anglosajona “canals” (canales de riego artificiales), significaba la certeza para Lowell de que una civilización marciana avanzada era la responsable de tal obra de ingeniería, lo que le produjo una obsesiva búsqueda de vida en el planeta Marte. Lowell también observó las líneas de Schiaparelli, pero se sospecha que en realidad lo que veía eran los capilares de sus propios ojos, extenuados después de tantas horas seguidas de observación.

descubierto metano en la atmósfera marciana. De nuevo, una corriente de entusiasmo inusitado se instauró en la sociedad, ya que el metano en la Tierra es producido en un 95%, de forma directa o indirecta, por actividad biológica. Sin embargo, poco después se demostró que lo que realmente se había observado era hielo de CO₂. Este suceso sirve también como lección para resaltar lo importante que es no dejarse llevar por el entusiasmo. Se volvió a constatar, tal como pasó con los canales de Lowell, que somos seres emocionales, vulnerables a engañarnos a nosotros mismos. A veces vemos lo que queremos ver, por eso es tan importante la rigurosidad científica.

En 1976 llegó a Marte la misión de NASA *Viking*, compuesta de dos aterrizadores y dos orbitadores. Esta misión, aunque fue la segunda de la historia en aterrizar de forma controlada en Marte después de que la soviética *Mars3* lo hiciera en 1971, fue la primera en enviarnos imágenes nítidas de la superficie del planeta rojo. Ambos aterrizadores estaban dotados de experimentos biológicos, los cuales pretendían encontrar signos de actividad biológica en forma de microorganismos. Un brazo mecánico recogía muestras del suelo marciano para someterlas a pruebas biológicas. Los resultados de los experimentos fueron muy ambiguos y los que dieron positivo eran compatibles con procesos químicos abióticos. No se pudo concluir de forma inequívoca la presencia de vida en Marte. Como solía decir Sagan, afirmaciones extraordinarias requieren evidencias extraordinarias. Afirmar que existe vida en Marte es, sin lugar a dudas, algo extraordinario que no está sustentado –al menos a día de hoy- por evidencias extraordinarias. Después de las misiones *Mariner* y *Viking*, la imagen de Marte como planeta estéril y anodino ofrecía poco interés para el público general y parte de la comunidad científica. Utilizando la música como metáfora, Sagan pensó que se le estaba cantando blues (género musical cuyo significado es melancolía o tristeza) al planeta rojo, lo que dio título a este capítulo de COSMOS.

De forma rigurosa, Harold Klein, jefe de los experimentos biológicos de las *Viking*, recomendó que las primeras misiones a Marte no buscaran vida, sino que caracterizan el absolutamente desconocido ambiente físico-químico de la superficie marciana para poder así diseñar convenientemente los experimentos de detección de vida de las siguientes misiones. Sin embargo NASA, que estaba bajo mucha presión para buscar vida en el primer aterrizaje, hizo caso omiso. Los experimentos biológicos de las *Viking* estaban mal planteados debido al desconocimiento que se tenía sobre la química del suelo marciano. Después de los decepcionantes resultados, lo que vino después fue un paréntesis de veinte años sin misiones a Marte, ya que muchas fueron canceladas. Al menos aprendimos la lección, ya que la siguiente generación de robots en superficie marciana *Pathfinder*, *Sojourner*, *Spirit*, *Opportunity*, *Phoenix*, *Curiosity* e *InSight*, han estado estudiando las condiciones del suelo marciano para no volver a repetir el mismo error.

Nos encontramos ya en condiciones de extender los experimentos de detección de vida, realizados hasta ahora solo por las *Viking*, con técnicas más modernas. Como astrobiólogo, es imprescindible tener una mente muy abierta,

pero sin perder nunca la rigurosidad científica. La Tierra es el único lugar —de momento— donde conocemos vida y, con las debidas precauciones, sabemos las condiciones en las que podría haberse formado. Es pertinente comparar a la Tierra y a Marte en sus primeras etapas, pues si las condiciones marcianas eran similares a las terrestres, es posible que en Marte hubiera emergido también la vida. Lo realmente improbable, en mi opinión, es dar el salto evolutivo que tuvo lugar en la Tierra cuando emergió la multicelularidad. Es posible que la vida primitiva marciana no llegara nunca a ese estado, y tal vez solo llegaron a formarse pequeñas colonias biológicas. O tal vez el proceso se detuvo en un estado de evolución química prebiológica. O tal vez Marte se esterilizó cuando perdió su campo magnético y con él gran parte de su atmósfera y la posibilidad de agua líquida en su superficie. Mientras, la Tierra siguió su camino. En las últimas décadas hemos descubierto organismos en la Tierra capaces de adaptarse a condiciones extremas en las que pensábamos que la vida no podría resistir. Son los llamados extremófilos. Me pregunto si microorganismos similares podrían sobrevivir en el subsuelo marciano. Es cierto que la letal radiación ultravioleta solar y las sales con alto contenido en cloro —percloratos— presentes en el suelo de casi todo el planeta, no favorecen ni la presencia de vida, ni la preservación de restos de vida pasada en caso de haber existido. Notas de blues en el suelo marciano. Pero el subsuelo es algo muy distinto, ya que se ha demostrado que a solo unas decenas de centímetros por debajo del suelo se consigue un buen apantallamiento frente a la radiación. Podría estar sonando rock & roll en el subsuelo marciano. De hecho, si tenemos en la Tierra microorganismos viviendo en nichos con condiciones más extremas de las que se podrían producir en el subsuelo marciano, ¿por qué no soñar con que podría haber indicios de vida pasada o presente allí? Desde las misiones *Viking*, NASA no ha vuelto a buscar vida en Marte de forma directa. Como hemos mencionado anteriormente, necesitábamos entender mejor la química del suelo marciano para diseñar los instrumentos biológicos convenientemente, evitando así falsos positivos con otros procesos abióticos que producen una señal similar a la biológica.

Tal y como sentenció Sagan, el primer paso en la búsqueda de vida extraterrestre es buscar vida como la de nuestro planeta, porque es la única que, de momento, conocemos. Una condición *sine qua non* para que exista vida en nuestro planeta es la existencia de agua líquida, por eso durante estas décadas las misiones han estado buscando este preciado elemento en Marte. Una vez que se determinó que Marte posee enormes reservas de hielo de agua en los casquetes polares y en el subsuelo, la prioridad fue determinar si había existido agua líquida de forma estable en el pasado. Los rovers gemelos *Opportunity* y *Spirit* demostraron que, efectivamente, Marte había tenido en el pasado lagos y, además, con un pH neutro, pero no pudieron determinar si esas condiciones perduraron durante un periodo de tiempo prologando.

El rover *Curiosity*, en Marte desde 2012, ha confirmado sin embargo que en el cráter Gale existió un lago con un pH neutro y una concentración salina

no demasiado elevada durante al menos decenas de millones de años de forma continuada, cumpliendo así el objetivo principal de la misión, confirmar que Marte fue habitable en el pasado. Además del agua líquida, la vida en la Tierra está basada en el carbono, por eso un buen biomarcador son los compuestos orgánicos complejos como los aminoácidos, huellas químicas en las rocas que podrían haber dejado microorganismos en el pasado de Marte. Precisamente, otro de los grandes descubrimientos realizados por el rover *Curiosity* fue la identificación de sustancias orgánicas. Desafortunadamente, el método de calentamiento de muestras utilizado para buscar estos compuestos orgánicos, descompone las moléculas más complejas en otras más sencillas por culpa de las altísimas temperaturas, por lo que no podemos concluir que los compuestos orgánicos descubiertos sean de origen biológico. Una vez que el rover *Curiosity* ha confirmado que Marte fue habitable en el pasado, unos de los objetivos primordiales del rover *Perseverance*, cuyo lanzamiento está previsto para julio de 2020 (con la estación meteorológica española *MEDA* a bordo), será averiguar si Marte ha estado habitado. Nótese la diferencia entre habitable y habitado. Pongamos un sencillo ejemplo. Imaginemos que buscamos vivienda y contamos con la ayuda de un agente inmobiliario. El agente nos enseña dos viviendas. La primera está en buen estado, pero completamente vacía. No hay ningún indicio que nos pueda dar información de si alguna vez ha estado habitada. Podemos decir, eso sí, que es habitable. En la siguiente vivienda que visitamos vemos que quedan algunos recuerdos de los anteriores inquilinos. Podemos decir, no solo que se puede vivir en ella (habitable), sino también que alguien ha vivido en ella (habitada). Aunque el rover *Perseverance* no incorpore, por motivos presupuestarios, ningún instrumento para descubrir directamente formas de vida, uno de sus objetivos principales será buscar e intentar identificar de forma unívoca la naturaleza biológica de compuestos orgánicos complejos, en caso de existir.



Prueba de conducción del rover Perseverance en el JPL. Crédito: NASA

En mi opinión, el planeta rojo tiene todavía muchas sorpresas y maravillas que depararnos. Si algún día descubrimos vida en Marte, el blues dará paso al rock. Dejemos la música melancólica a un lado y empecemos a cantarle rock & roll al planeta rojo.

Jorge Pla-García.

Doctor en Astrofísica. Investigador Ciencias Planetarias (Centro de Astrobiología, CSIC-INTA y Space Science Institute, USA).

Miembro de las misiones NASA *Curiosity*, *InSight* y *Perseverance*.

Capítulo 6

Historias de viajeros

¿Existen muchos mundos o existe solo un único mundo? Ésta es una de las más nobles y elevadas cuestiones planteadas en el estudio de la Naturaleza.

ALBERTO MAGNO, siglo XIII

En las primeras edades del mundo, los habitantes de una isla cualquiera se consideraban los únicos habitantes de la Tierra, o en caso de que hubiera otros, no podían concebir que llegaran nunca a establecer comercio con ellos, porque estaban separados por el profundo y ancho mar, pero las épocas posteriores conocieron la invención del barco... Del mismo modo, quizás puedan inventarse otros medios de transporte para trasladarse a la Luna... Nos falta ahora un Drake o un Colón capaz de emprender este viaje, o un Dédalo que invente un transporte por el aire. Sin embargo, no dudo que el tiempo, que continúa siendo el padre de las verdades futuras y que nos ha revelado muchas cosas que nuestros antepasados ignoraban, también manifestará a nuestros sucesores lo que nosotros ahora deseamos saber y no podemos.

JOHN WILKINS, El descubrimiento de un mundo en la Luna, 1638

Podemos ascender por encima de esta Tierra insípida, y contemplándola desde lo alto considerar si la Naturaleza ha volcado sobre esta pequeña mota de polvo todas sus galas y riquezas. De este modo, al igual que los viajeros que visitan otros países lejanos, estaremos más capacitados para juzgar lo que se ha hecho en casa, para poderlo estimar de modo real, y dar su justo valor a cada cosa. Cuando sepamos que hay una multitud de Tierras tan habitadas y adornadas como la nuestra, estaremos menos dispuestos a admirar lo que este nuestro mundo llama grandeza y desdeñaremos generosamente las banalidades en las que deposita su afecto la generalidad de los hombres.

CHRISTIAAN HUYGENS, Los mundos celestiales descubiertos, hacia 1690

6.1

Viajeros espaciales, curiosidad innata y vocaciones STEAM.

Cuando la primera edición de *Cosmos* veía la luz en 1980, el árbol de la exploración espacial ya había dado interesantes frutos. Sin duda, una destacada rama de este árbol está ocupada por las sondas **Voyager** [1]. Lanzadas 3 años antes, apenas estaban en el inicio de su doble misión. En primer lugar, visitarían los grandes planetas exteriores del Sistema Solar y sus lunas, siendo *Voyager 2* la única nave hasta ahora que puede presumir de haber visitado los cuatro (siguiendo rutas diferentes, *Voyager 1* no visitó Urano y Neptuno); después continuarían su viaje más allá de las órbitas planetarias, aportando nueva información sobre los límites del Sistema Solar y el espacio interestelar, en el que ahora se encuentran. En segundo lugar, portarían sus famosos discos fonográficos de cobre bañados en oro, bautizados como “*Sonidos de la Tierra*”. En ellos, las *Voyager* cargan la prueba de la existencia de un pequeño planeta con millones de formas de vida diferentes¹⁴.

Movida por su capacidad de observación y un impulso por explorar lo desconocido, una de esas formas de vida miró hacia las estrellas y se preguntó qué había allí, más allá de su planeta, a la vez que soñaba con desentrañar los secretos de ese vasto Universo. Así, en nuestro afán por conocer más y mejor el Universo y nuestra pequeña porción a la que llamamos Sistema Solar, en estos últimos 40 años hemos enviado nuevos **viajeros espaciales** con objetivos tan dispares como realizar mediciones del viento solar, buscar indicios de agua presente o pasada en Marte, aterrizar en un cometa y analizar su composición, o explorar objetos más allá de la órbita de Neptuno.

Estas y otras misiones nos han permitido satisfacer parte de nuestra **curiosidad innata** por conocer otros mundos. Una curiosidad que **Carl Sagan** supo estimular, generando interés por la Ciencia¹⁵ y desarrollando el espíritu crítico en aquellos que le observaban y escuchaban (y aún hoy seguimos haciéndolo) con entusiasmo. Hace 40 años se diría que divulgaba Ciencia. Hoy diríamos que, como un adelantado a su tiempo, Carl Sagan despertaba **vocaciones STEAM**.

¹⁴ Se estima que su información durará más de mil millones de años antes de degradarse.

¹⁵ El lector me disculpará el afán personal de escribir siempre Ciencia con mayúscula inicial.

Acuñado en la década de los 90 por la Fundación Nacional para la Ciencia de Estados Unidos (NSF) [2], el término **STEM** es el acrónimo en inglés de *Science, Technology, Engineering and Mathematics* (en español: **Ciencia, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas**), disciplinas fundamentales para las sociedades tecnológicamente avanzadas como la nuestra. En el año 2006 **Georgette Yakman** introduce el **Arte** en la ecuación, dando forma al concepto **STEAM**: Ciencia y Tecnología, interpretadas a través de la Ingeniería y las Artes, todas basadas en un lenguaje de Matemáticas. Nace así una motivadora manera de educar, donde el trabajo colaborativo y el desarrollo de proyectos dan un nuevo enfoque al estudio de estas disciplinas. La educación STEAM es un proceso participativo en el que los estudiantes aprenden y desarrollan habilidades y capacidades que pueden aplicar en la vida diaria: pensamiento crítico, trabajo en equipo, comunicación, capacidad de razonamiento y análisis, concentración, creatividad, innovación, generación de ideas, resolución de problemas... Todo ello influirá positivamente en su desarrollo personal y social de pequeños, y en su vida profesional de adultos.

Tan sólo hay que echar un vistazo a nuestro alrededor para darse cuenta de que vivimos rodeados de STEAM. Son las áreas en las que se basa el desarrollo de las innovaciones que sustentan nuestra vida hoy en día. Tanto para el trabajo como para el ocio, usamos a diario productos y servicios generados a partir del conocimiento en Ciencia, Tecnología, Ingeniería, Arte y Matemáticas: desde un simple lápiz hasta un smartphone de ultimísima generación; desde esa cerveza fresquita que saboreamos ociosamente hasta el instrumental médico que salva nuestras vidas... Productos y servicios que evolucionan gracias a la I+D+i y que son un claro indicativo de la capacidad de un país para crecer y producir. En una sociedad globalizada, dependiente de la tecnología y basada en el conocimiento, la educación STEAM aporta mayor competitividad y productividad, siendo clave para el crecimiento y el desarrollo económico. Por ello, las profesiones relacionadas con las áreas STEAM responden ya al perfil de los profesionales más demandados, gracias a su directa vinculación con la innovación, la creatividad, el pensamiento crítico, la colaboración, la resolución de problemas y la aplicación del conocimiento a la vida real.

Carl Sagan era plenamente consciente de la importancia de tener cultura científica y tecnológica. Así lo manifestó con preocupación en *El mundo y sus demonios* (1995), dando lugar a una de sus citas más célebres: «*Hemos preparado una civilización global en la que los elementos más cruciales -el transporte, las comunicaciones y todas las demás industrias; la agricultura, la medicina, la educación, el ocio, la protección del medio ambiente, e incluso la institución democrática clave de las elecciones- dependen profundamente de la ciencia y la tecnología. También hemos dispuesto las cosas de modo que nadie entienda la ciencia y la tecnología. Eso es una garantía de desastre. Podríamos seguir así una temporada pero, antes o después, esta mezcla combustible de ignorancia y poder nos explotará en la cara*».

Como no podía ser de otra manera, las distintas agencias espaciales tampoco viven ajenas a la importancia de la educación STEAM. Realizan grandes esfuerzos para poner la Ciencia al alcance de todos los niños [3] y fomentar su interés por el ámbito científico a través de actividades participativas que les permiten conectar con el Universo e interpretar aquello que les rodea. Nuestra ya mencionada curiosidad innata es un punto a favor para el éxito de estas acciones.

Una forma de conseguir despertar aún más interés por la Ciencia en general y la astronomía en particular, es hacer que los ciudadanos nos sintamos partícipes de los grandes programas espaciales. Este sentimiento convierte el aprendizaje en una experiencia gratificante.

Así, en los últimos años la NASA no ha dudado en acudir a los niños para bautizar varias de sus misiones. 10.000 pequeños estudiantes participaron en 2003 para poner nombre a los integrantes de la misión *Mars Exploration Rovers* [4], una pareja de rovers gemelos que llegarían a Marte en enero de 2004. De nombre interno MER-A y MER-B, hoy los conocemos como **Spirit** y **Opportunity** (Figura, en una ilustración que realicé a modo de humilde homenaje) gracias a **Sofi Collis**, entonces una niña de 9 años nacida en Siberia y adoptada a los 2 años por una familia de Scottsdale (Arizona). La propuesta de Sofi no podía ser más cautivadora: *«Vivía en un orfanato. Era oscuro, frío y solitario. Por la noche miraba al cielo estrellado y me sentía mejor. Soñaba que podía volar allí. En Estados Unidos puedo hacer realidad todos mis sueños. Gracias por el “Espíritu” y la “Oportunidad”»*.



Aún más niños, hasta 28.000, participaron en el concurso para bautizar al rover de la misión *Mars 2020* [5], cuyo lanzamiento está programado para el 22 de julio de este año¹⁶. El ganador en esta ocasión sería el joven de 13 años **Alex Mather**, de Burke (Virginia). Su propuesta, **Perseverance**, captaba así el espíritu de la exploración espacial: *«Somos una especie de exploradores, y nos encontraremos con muchos obstáculos en el camino a Marte. Sin embargo, podemos perseverar. Nosotros, no como nación sino como humanos, no nos rendiremos. La raza humana siempre perseverará en el futuro»*.

Perseverance no estará solo en su viaje: bajo el título “*Envía tu nombre a Marte*”, la NASA activó una campaña en la que invitaba a ciudadanos de todo el mundo (y ahora también podíamos participar los adultos) a enviar su nombre al planeta rojo en un chip insertado en el rover. El resultado no pudo ser más

¹⁶ Escribo estas líneas cuando apenas quedan ocho semanas para tan señalada fecha.

exitoso: casi 11 millones de personas acompañaremos a *Perseverance* a través de nuestros nombres. Repito: ¡¡11 millones!! Una cifra que puede tomarse como una buena muestra del alcance popular de la astronomía.

Todas estas acciones van mucho más allá de ser un simple juego. Son una excelente forma de acercar los avances científicos a la sociedad. El conocimiento científico debe mostrarse para que los ciudadanos sean conscientes de la importancia que la Ciencia tiene en sus vidas y en su bienestar. Por ello, del mismo modo que la Ciencia debe ser un pilar de la sociedad, la divulgación debe ser un pilar de la Ciencia.

Carl Sagan fue, es y será un divulgador excepcional. Hablo también en presente y futuro porque aún hoy su legado sigue activo y a buen seguro continuará siendo así por mucho tiempo. Como un **Cid** de la divulgación, Carl Sagan sigue transmitiendo conocimiento apoyado por su indudable carisma y su eterna sonrisa. Pero lo más importante es que no solamente nos habla de planetas y estrellas: nos habla de nosotros mismos, nos hace ver que somos pequeños, nos invita a pensar, a reflexionar y a tener espíritu crítico. Por ello sigue siendo uno de los más grandes referentes para los que intentamos aportar nuestro granito de arena en esto que llamamos divulgación científica.

Referencias:

- [1] <https://voyager.jpl.nasa.gov/>
- [2] <https://www.nsf.gov/>
- [3] <https://www.esa.int/Education>, <https://www.esa.int/kids/es/Home>,
<https://www.nasa.gov/kidsclub/index.html>, <https://spaceplace.nasa.gov/sp/kids/>
- [4] <https://mars.nasa.gov/mer/>
- [5] <https://mars.nasa.gov/mars2020/>

Bibliografía:

- (1) D. Delgado Iglesias, 2016, *La importancia de educar en habilidades y conocimientos STEM*, Blog aluCIENCIAnte. <https://www.aluciencianante.com/index.php/blog/6-la-importancia-de-educar-en-habilidades-y-conocimientos-stem>
- (2) D. Delgado Iglesias, 2017, *Las sondas Voyager*, Blog aluCIENCIAnte. <https://www.aluciencianante.com/index.php/blog/18-la-sondas-voyager>
- (3) C. Sagan, 1980, *Cosmos*, Random House.
- (4) C. Sagan, 1995, *The Demon-Haunted World. Science as a Candle in the Dark*, Random House.
- (5) M. Sanders, 2009, *STEM, STEM Education, STEMmania*, The Technology Teacher. International Technology Education Association. December 2009, pp 20-26.
- (6) G. Yakman, 2008, *STEAM Education: an overview of creating a model of integrative education*, Pupil's Attitudes Toward Technology, Vol. 19, pp. 335-358, 2008.

David Delgado Iglesias.

Biólogo, Divulgador Científico, Diseñador e Ilustrador.

Diseño y Comunicación para la Ciencia en DavidDelgado.me

Talleres STEAM en aluCIENCIAnte.com

6.2 Exploradores del siglo XXI.

No me equivoco si afirmo que todo el mundo tiene un cierto grado de inquietud y de curiosidad hacia lo desconocido. Ese afán por descubrir, por llegar más allá o por conocer nuevos lugares, sobrepasa a veces lo imaginable. En el siglo XVII, una pequeña república europea tuvo esa inquietud. Por aquel entonces, la única motivación que existía en la tierra para movernos de un lado a otro era la de realizar actividades comerciales entre diferentes puntos del planeta, o por lo menos entre los puntos de nuestro mundo que se conocían hasta el momento.

Los Países Bajos, fueron unos pioneros en este sentido. Durante ese mismo siglo y el siguiente, la especie humana proveniente de dicha república comenzó a aventurarse a cualquier lugar de nuestro planeta, y lo más importante aún, no solo por intereses comerciales, sino por motivaciones de otra índole. Estas motivaciones fueron entre otras, numerosas inquietudes científicas, descubrimiento de nuevas tierras, conocimiento, en general evolución científica. Todo ello ocasionó que Holanda, aunque era un pequeño país, se convirtiera en un lugar con una gran libertad de pensamiento. Perfeccionaron barcos, avanzaron en su tecnología, e incluso se convirtieron en los principales editores y libreros de Europa, traduciendo escritos a otras lenguas.

Al igual que ocurrió en el siglo XVII, está sucediendo hoy día en nuestra sociedad. En el siglo XXI, lo que antes era Holanda, ahora es el mundo entero. Es cierto que todavía no hemos explorado la totalidad de nuestro globo terráqueo (nos queda lo más recóndito de nuestras profundidades marinas), pero seguimos teniendo curiosidad por lo desconocido más allá de nuestro mundo. Mantenemos la necesidad de saber más, de avanzar, de perfeccionarnos, de comunicarnos... ¿Con quién? o, ¿con qué?... Pero, dejémonos de rodeos. Está claro que hay vida ahí afuera, de eso estoy seguro. Sí, más allá de la estratosfera. Más allá de nuestra galaxia.

Parémonos a pensar un poquito ¿De verdad creemos que estamos solos? Sería de locos afirmar que todos pensamos lo mismo, eso es imposible. Pero hay personas, los nuevos "holandeses", que tienen sus propias motivaciones, sus propias inquietudes por saber más, por conocer, por

explorar... Creo que esa es la palabra que nos define: "explorar". Nos hemos convertido en auténticos exploradores de la galaxia, aunque todavía no hayamos sido capaces de viajar más allá de la Luna. Pero ahí están nuestras inquietudes. Ese motor que nos impulsa hacia lo desconocido.

Si en 1969 fuimos capaces de llegar hasta nuestro satélite, con una tecnología tan básica que, hasta nuestros propios hijos dudarían de ello, qué no podríamos hacer hoy en día. Tenemos tan solo en la palma de nuestra mano 100.000 veces más tecnología¹⁷ que la que utilizaron Armstrong, Collins y Aldrin para aterrizar en nuestro satélite natural, e incluso volvieron. Disculpad que tire de ironía, pero desde mi humilde posición, la de un profesor de Tecnología de un centro cualquiera de nuestra nación, me siento incapaz de creer que somos los únicos seres vivos que habitamos esta y otras galaxias. Y ahora es cuando estaréis pensando: "Otro loco de *Star Trek* [1], *StarWars* [2] y *E.T.* [3]". Es cierto que he crecido conociendo estas películas, aunque he de decir que nunca he sido un fanático de ellas. De hecho, todavía me hago un lío con las de *StarWars*, que si la cuarta es la primera, que si la quinta es la segunda... Lo único que sé seguro es que *Yoda* es el abuelete verde bajito con bastón de orejas puntiagudas que en una de esas secuelas pega más saltos que un rockero en un concierto de *Mago de Oz* [4]. Tampoco he visto todas las de *Star Trek*, disculpadme los seguidores de ambas sagas. Vale que *E.T.* y *Men in Black* [5] las he visto varias veces, pero lo que estoy intentando comunicar, es que no soy un fanático del mundo extraterrestre.

Lo que sí es cierto es que más de una vez me he parado a pensar que el universo es muy grande para que nosotros, el ser humano y todas las especies que compartimos este planeta, seamos los únicos seres vivos que coexistamos entre todas estas galaxias. No estoy hablando de naves tripuladas por alienígenas más avanzados que nosotros, ni de hombrecitos verdes de metro y medio, gran cabeza y ojos saltones que nos visitan de vez en cuando. Estoy hablando de vida en general. De microorganismos unicelulares, bicelulares o con las células que tengan, que puedan habitar otros planetas. Es este y otros motivos lo que nos impulsa a explorar lo desconocido.

Recientemente hemos estado conmemorando los cincuenta años de la llegada del hombre a la Luna. Este hecho ha motivado a potencias como la americana, no era de extrañar, o como la rusa, que siempre ha estado ahí, o como la china, que viene apostando fuerte, a preparar expediciones que, en un futuro, nos harán conocer más de lo ya conocido de nuestro universo. Hemos sido capaces de fotografiar Marte o los anillos de Saturno, tanto desde nuestros observatorios en tierra, como desde naves no tripuladas que se han perdido más allá de nuestro sistema solar. Tenemos tecnología terrestre posada en nuestro planeta vecino, enviándonos información, no solo de lo que es hoy en día, sino de lo que fue hace millones de años. Me cuesta creer que nos

¹⁷ Se sabe que la tecnología utilizada en la fabricación de un teléfono móvil es 100.000 veces superior al ordenador de a bordo que llevó la tripulación del Apolo 11. De ahí la importancia de su hazaña y la esperanza de que lleguemos aún más lejos.

quedemos solo con esto. Dicen que ya ha nacido la persona que caminará por Marte. Espero seguir vivo el día que lo haga. Aún no había nacido el día en el que Armstrong y Aldrin pisaron por primera vez la Luna, por lo que no pude vivir ese momento. Es por eso por lo que me gustaría presenciar en directo el día en que hagamos lo propio en nuestro planeta vecino. No sé si ese hombre o mujer, llegado el momento, será consciente de su hazaña, de que sus movimientos serán seguidos por millones de personas en la Tierra, de que marcará otro hito importante en nuestras exploraciones.

Sabemos que antes de todo eso, tendremos que construir en la Luna unas infraestructuras tales, que aseguren la supervivencia en nuestro satélite. No porque vayamos a irnos a vivir allí, sino para utilizarlo como campamento base. Es de lógica, porque la gravedad en la Luna es menor que en la Tierra, y necesitaríamos menos combustible para despegar, por lo que sería un



A Grazing Encounter Between Two Spiral Galaxies.

Fuente NASA on The Commons:

<https://www.flickr.com/photos/nasacommons/9467312978/in/photostream/>

buen lugar para colocar nuestra plataforma de lanzamiento. Una vez superado este punto importante, nos quedaría enviar una expedición hacia lo ya medianamente conocido, como es el planeta Marte. Tenemos vehículos Rovers¹⁸ recabando información en dicho planeta, además, durante este año 2020, está previsto enviar otras cuatro misiones espaciales, cuyo objetivo principal será evaluar si el planeta puede ser habitable. En caso afirmativo, imaginad cual sería el siguiente paso. Yo me quiero poner en esta posición, imaginando que Marte puede ser habitable. A partir de aquí nos veo enviando nuevas expediciones a otros planetas, a otros mundos. Es posible que en estas nuevas expediciones encontremos minerales u otros tipos de combustibles alternativos a los que ya conocemos, que aumenten nuestra capacidad de acción y nos hagan más eficientes. Solo estamos pensando en las personas que liderarán dichas expediciones, pero no podemos dejar a un lado a los y a las exploradoras que desde sus laboratorios crearán y facilitarán la posibilidad de que podamos viajar hacia otros lugares. Esos científicos, hombres y mujeres, que trabajarán en pos del futuro. Personas a las que, por casualidades de la vida, podría estar impartiendo clase hoy día. Para mí sería un orgullo enorme haber sido parte de la motivación de estas personas, sería algo indescriptible.

¹⁸ Este tipo de vehículos son los utilizados en las últimas misiones a Marte no tripuladas, ya que disponen de diferentes elementos que les proporcionan autonomía suficiente y equipos para la recogida de muestras. Durante la elaboración de este escrito se están realizando las pruebas del último Rover que la NASA enviará a Marte.

La Tecnología está avanzando de forma exponencial. Los ciudadanos de a pie no somos capaces de seguirle el ritmo. Hemos entrado en una fase en la que prácticamente es incontrolable con los conocimientos generales de que disponemos. Solo espero que, las personas que sí la controlan, lo hagan de forma fructífera y provechosa para la humanidad. No solo pensando en ellos mismos, sino pensando en todos, en el ser humano, y vean que es beneficiosa para todos. Que la utilicen para el bien, para instruirnos, para formarnos, y que evitemos conflictos entre nosotros. De momento solo tenemos un planeta, el que hemos ido explorando desde hace siglos, y no tenemos otro.

Somos los exploradores del siglo XXI. Nos mueve nuestro afán de conocer, de saber, de investigar. Este será el motor que impulsará nuestros viajes al espacio exterior. Será el motivo por el que construiremos naves que nos lleven a lugares recónditos. Será la estimulación que necesitaremos para crear nuevos equipos electrónicos de comunicación, de investigación, de navegación. Y la consecuencia de todo esto será la llegada del ser humano a otros mundos. No quiero llamarlo conquista, porque no tiene que ser ese nuestro fin principal, sino el arribo a otros lugares desconocidos, que quien sabe, podríamos llegar a comerciar con otros seres de la galaxia.

Vale, es cierto que esto último me ha quedado más cerca de un guion de película de ciencia ficción, pero como decían en la serie *Expediente X* [6]: "La verdad está ahí fuera". ¡¡Explorémosla!!

Referencias:

- [1] Star Trek. Franquicia de medios estadounidense creada por Gene Roddenberry. Primero nació como serie televisiva. Ya en este siglo se llevaron al cine cuatro películas más.
- [2] StarWars. Es otra franquicia estadounidense compuesta primordialmente de una serie de películas concebidas por el cineasta estadounidense George Lucas. Además del ámbito cinematográfico, la franquicia incluye una amplia variedad de productos de merchandising.
- [3] E.T. el extraterrestre. Película estadounidense de ciencia ficción de 1982 dirigida por Steven Spielberg.
- [4] Mago de Oz. Banda de rock española de Folk Metal fundada en 1988 por el baterista Txus di Fellatio en el barrio de Begoña en Madrid.
- [5] Men in Black. Película de ciencia ficción del año 1997 protagonizada por Tommy Lee Jones y Will Smith. La película es una adaptación de la historieta homónima de Lowell Cunningham. Le siguieron dos secuelas más.
- [6] Expediente X. serie de televisión estadounidense de ciencia ficción y misterio creada por Chris Carter.

Bibliografía:

- (1) C. Sagan, 1980, *Cosmos*, New York, Random House.

Antonio Huertas Peña.

Ingeniero Técnico Industrial. Grado en Ingeniería.

Profesor/Coordinador FP Dual Ciclos Formativos. Departamento Técnico en Escuelas Profesionales Sagrada Familia de Andújar, Jaén.

6.3

Los retos de los Voyager y los desarrollos tecnológicos.

Recuerdo mi inolvidable contacto con Carl Sagan en 1972. La estación NASA en Cebreros, y yo como director, asumimos la responsabilidad de la primera inyección en órbita en otro planeta, *Mariner 9* en Marte, éxito histórico que meses después presentaría Sagan en el *COSPAR Meeting* de Madrid.

Habiendo trabajado para NASA en la exploración del Sistema Solar desde casi el principio (1), resultaba difícil elegir entre tantas misiones, pero me centraré en *Voyager*, donde participé y pude aportar ideas. Teniendo en cuenta las limitaciones de texto y que esos descubrimientos en los cuatro planetas gigantes son de dominio público, en este artículo me limitaré a aspectos técnicos muy importantes, pero menos conocidos.

En los años 60, en plena exploración lunar y primeros intentos de visitar los planetas vecinos, alguien se planteó la posibilidad de viajar a los 4 planetas gigantes, pero los cohetes lanzadores solo podrían alcanzar la distancia de Júpiter. Esta aproximación cambió gracias a dos precursores: Michael Minovitch y Gary Flandro. Minovitch, matemático becario de JPL (Jet Propulsion Laboratory en Pasadena California, dependiente del Caltech y dedicado por NASA para la exploración del Sistema Solar) en 1961, planteó la "asistencia gravitatoria" por la que un objeto al pasar cerca de un astro, debido a la atracción gravitatoria, experimenta una desviación de su trayectoria, y un impulso en magnitud y dirección proporcional a la velocidad orbital de dicho astro. Aunque pasó desapercibido para la mayoría de los expertos de la época, otro becario de verano, Gary Flandro, ingeniero, retomó el trabajo de Michael, estudiando la viabilidad de visitar los planetas gigantes sin gastar combustible, mediante una "carambola gravitatoria" que podría realizarse a finales de los años 70 por un alineamiento planetario que solo se repite cada 176 años. Así nació el proyecto *Grand Tour*, finalmente nombrado proyecto *Voyager*. Dos naves gemelas se lanzarían en 1977 hacia Júpiter y Saturno; si la primera cumplía las expectativas, se intentaría que la segunda continuara a Urano y Neptuno. El reto parecía abordable, pero había que superar el gran cinturón de asteroides entre las órbitas de Marte y Júpiter. Para asegurar la misión, NASA lanzó en el 72 y 73, como avanzadilla, dos naves ligeras y rápidas, *Pioneer 10* y *11*, que cruzaron el cinturón en 7 meses de suspense. Los *Voyager* lo

hicieron años después, también con suspense, aunque se sabía que la posibilidad de impacto catastrófico era pequeña, pero no nula.

Explorar a esas inmensas distancias exige navegar con enorme precisión, y requiere conocer en todo momento la trayectoria real de la nave. Para determinarla se combinan la medición continua de la velocidad con la medida esporádica de la distancia. La primera se obtiene comparando la señal transmitida con la de vuelta, ya que la variación de frecuencia por efecto Doppler es proporcional a la velocidad radial. La segunda se consigue con un equipo, el *Planetary Ranging*, que mide el tiempo que tarda la señal en ir y volver, enviando unos códigos pseudoaleatorios y comparando con los que devuelve la nave. La tremenda resolución que se consigue, de 1mm/s a velocidades de unos 30km/s y 1m a miles de millones de km, es gracias a un equipo patrón de frecuencias y tiempo (vulgarmente conocido como reloj atómico), el Máser de Hidrógeno con una precisión y estabilidad, que no variaría un segundo en 30 millones de años, y sincronizado con el resto de la red en varios nanosegundos. Además, calibramos el medio de propagación atmosférico para compensar pequeñas perturbaciones. En la aproximación final al objetivo se emplean medios fotográficos de las naves para mejorar aún más la precisión.

Otro reto es la energía para la nave, ya que la iluminación solar se atenúa con el cuadrado de la distancia. En Saturno es una centésima de la que tenemos en la Tierra y necesitaríamos paneles solares 100 veces mayores que en órbita terrestre para alimentar las naves. Para el programa *Voyager* se desarrollaron unos generadores térmicos de radioisótopos (RTG), con plutonio 238, en que el calor producido en su lenta desintegración se convierte en electricidad mediante termopares. Aunque su capacidad va disminuyendo, ha permitido que los *Voyager*, 40 años después de su lanzamiento y ya en el medio interestelar, sigan en contacto con Tierra a unos 22.000 millones de Km.

Todo lo anterior sería inútil si las naves no comunican a Tierra, sus descubrimientos y el estado del equipo, y reciben las órdenes necesarias para programar sus actividades. Para ello NASA tiene 3 complejos de grandes antenas, en California, Australia y España (cerca de Madrid), que permiten mantener el contacto a pesar de la rotación terrestre. En el primer viaje a Marte, 1965, el *Mariner IV* enviaba datos a 8 bps y las fotos de poca calidad tardaban 8 horas en bajar, pero 14 años después, los *Voyager* desde Júpiter, mucho más lejos, transmitían gran cantidad de fantásticas imágenes a 120 Kbps (15000 veces más rápido). En primer lugar, se equipó las naves con grandes antenas parabólicas de 3,7 m de diámetro (limitadas por el tamaño del cohete lanzador Atlas Centauro) que concentran la señal hacia Tierra. Además, las estaciones receptoras pasaron de utilizar antenas de 26m a una nueva de 64m de diámetro con un área de captura seis veces mayor. Pero esto no sería suficiente, pues la señal recibida es extremadamente débil, unos 10^{-20} vatios, comparable con el nivel de ruido térmico, proporcional a la temperatura

absoluta del sistema receptor. Para reducir el ruido al mínimo se utilizan amplificadores *Maser* con helio líquido a 4K (-269°C). La relación Señal Ruido marca la capacidad o el límite de la comunicación. Reducir el ruido, también proporcional al ancho de banda necesario para pasar los datos, estrechando esa banda, implica limitar la cantidad de datos transmitidos. Al principio se utilizaban códigos detectores de error, añadiendo bits de paridad a los datos (lo mismo que la letra del DNI con respecto al número). Si el ruido produce algún error, la paridad no se cumple y se descarta el dato. Pero el enorme avance vino del mundo matemático, introduciendo códigos correctores de error, transmitiendo una serie mayor de símbolos que son función de los bits de entrada según un algoritmo lógico predeterminado. Los *Voyager* finalmente optaron por un código convolucional corto con decodificador de Viterbi (2), que supuso una importante mejora en la comunicación, multiplicando por 4 la velocidad de transmisión y por tanto la cantidad de datos. Las pruebas de evaluación las realizamos en Madrid, aportando algunas modificaciones para medir la calidad de los datos en tiempo real. A mediados de los 80, antes de llegar a Urano, se aplicó una naciente tecnología, la compresión de datos, que mediante algoritmos permite descartar información parcialmente redundante, transmitiendo solo parte significativa y mandar más datos por unidad de tiempo. Eso es hoy de uso generalizado en imágenes, sonido o video comprimidos (formatos JPG, MP3, MP4 y otros).

Dentro de los retos tecnológicos están los *Arrays* de antenas, que me honra haber planteado teóricamente y demostrado en 1969 (3). Cuando explorábamos Marte, la señal recibida en las antenas de 26m era escasa y planteé combinar dos antenas distantes (Robledo y Cebreros) para aumentar el

área de captura y poder llegar más lejos o recibir más datos (4, 5). La idea no fue de aplicación inmediata pues para Júpiter se construyeron las antenas gigantes de 64m, que fueron suficientes para los encuentros con dicho planeta. Para Saturno, la señal, 4 veces más débil, quedaría justa. Esto hizo recuperar,



con tecnología más moderna, la idea planteada 10 años antes. El *Array* se montó con las antenas de 64m y 34m. Para Urano, a doble distancia que Saturno, los *Arrays* fueron 64m con 2 de 34m y en Australia, otra más de 64m del observatorio astronómico de Parkes. Para Neptuno, aún más distante, se usó lo anterior, con las antenas de 64m ampliadas a 70m, y además Goldstone

se combinó con el VLA de Nuevo Méjico con 27 antenas de 25m. Todo esto me supone una satisfacción por haber contribuido a esta gran misión y a otras muchas que también hacen uso de los *Arrays* de antenas.

Finalizando ya el artículo de *Voyager* quiero mencionar a Edward Stone, científico jefe desde el comienzo de la misión, que aún sigue, 48 años después, atendiendo a sus naves en viaje interestelar. Además, fue director de JPL durante una década que celebro haber trabajado junto a él.

Y quiero cerrar mi aportación en este libro con Carl Sagan, famosísimo por su labor divulgadora, pero resaltando que fue miembro del equipo investigador de esta misión y nos dejó dos interesantes muestras de su visión del universo:

- El disco dorado acoplado a las sondas, es una enciclopedia para extraterrestres, que explica como leerlo, de donde procede y el tiempo transcurrido (un cronometro de U238 para 4500 millones de años), con sonidos, voces e imágenes terrestres para que en su larguísimo viaje entre las estrellas (pasarán 40.000 años hasta acercarse a otra estrella) dejar constancia que en tiempos remotos existió una civilización en un lejano planeta llamado Tierra.
- Superado Neptuno en 1989, Carl convenció a NASA para que girara la plataforma hacia el interior del sistema solar y a 6000 millones de Km tomara un montaje fotográfico de todos los planetas, que se llamó "la Foto de Familia". Sobre la lejana visión de la Tierra, "*the Pale Blue Dot*", desarrolló unas interesantes reflexiones sobre cómo solo somos un pequeño punto azul pálido en la inmensidad del espacio profundo.

Bibliografía:

- (1) J.M. Urech, 2011, Estaciones de NASA cerca de Madrid: ... INTA, ISBN: 978-84-930056-7-2
- (2) J. M. Urech, L. D. Vit, and B. D. L. Mulhall, «Preliminary Results of DSN Performance for Convolutional Codes with a Viterbi Decoder», DSN PR, nº42-32, January and February 1976, pp. 222-240, April 15, 1976.
- (3) D.J Mudgway, A History of the NASA Deep Space Network, (NASA SP; 2001-4227) (The NASA history series)
- (4) J.M. Urech: «Telemetry Improvement Proposal for the 85-ft Antenna Network», JPL Scientific Program Summary, nº 37-63, Vol. II, May 1970, pp.116-120.
- (5) J.M. Urech: «Processed Data Combination for Telemetry Improvement- DSS 62», JPL Technical Report, nº 32-1526, Vol. II, April 1971, pp. 169-176.

Jose Manuel Urech Ribera.

Doctor Ingeniero UPM - Ingénieur IPG (Francia).

Exdirector del Centro de Comunicaciones con el Espacio Profundo de NASA en Madrid.

Capítulo 7

El espinazo de la noche

*Llegaron a un agujero redondo en el cielo... que resplandecía como el fuego.
Esto, dijo el Cuervo, era una estrella.
Mito esquimal de la creación*

*Preferiría comprender una sola causa que ser Rey de Persia.
DEMÓCRITO DE ABDERA, siglo IV a.C.*

Pero Aristarco de Samos sacó un libro conteniendo algunas hipótesis, en el cual las premisas conducían al resultado de que el tamaño del universo es muchas veces superior a lo que ahora recibe este nombre. Sus hipótesis son que las estrellas fijas y el Sol se mantienen inmóviles, que la Tierra gira alrededor del Sol en la circunferencia de un círculo, con el Sol situado en el centro de la órbita, y que la esfera de las estrellas fijas, situada alrededor del mismo centro que el Sol, es tan grande que el círculo en el cual supone que gira la Tierra está en la misma proporción a la distancia de las estrellas fijas que el centro de la esfera a su superficie.

ARQUÍMEDES, El calculador de arena, siglo III a.C.

Si se diera una fiel relación de las ideas del Hombre sobre la Divinidad, se vería obligado a reconocer que la palabra dioses se ha utilizado casi siempre para expresar las causas ocultas, remotas, desconocidas, de los efectos que presenciaba; que aplica este término cuando la fuente de lo natural, la fuente de las causas conocidas, deja de ser visible: tan pronto como pierde el hilo de estas causas, o tan pronto como su mente se ve incapaz de seguir la cadena, resuelve la dificultad, da por terminada su investigación, y lo atribuye a sus dioses... Así pues, cuando atribuye a sus dioses la producción de algún fenómeno... ¿hace algo más, de hecho, que sustituir la oscuridad de su mente por un sonido que se ha acostumbrado a oír con un temor reverencial?

PAUL HEINRICH DIETRICH, barón de Von Holbach, Systéme de la Nature, Londres 1770

7.1

Curiosidad innata, niños y científicos.

La adaptación del ser humano a su entorno es lenta. La ventaja de nuestra especie frente a otras es su capacidad de readaptarse y enfrentarse a situaciones diferentes. Esta flexibilidad es en parte innata, y también en buena parte aprendida. El proceso de aprendizaje lleva muchos, muchos años, y, seguramente continúa durante toda nuestra vida. La fascinación y el atractivo que para los seres humanos tiene el descubrimiento de cosas nuevas se aprecia especialmente en los niños.

Este interés por lo nuevo, por aprender, es también lo que ha conducido al desarrollo de la ciencia. La actitud científica es similar a la de un niño. Lo óptimo es admitir la ignorancia propia, y el estar abierto a la existencia de fenómenos cuya explicación puede ser complicada, y cuya comprensión requiere mucho tiempo. De la misma manera que un niño pregunta el porqué de las cosas, esperando que exista una respuesta, el científico confía en que cualquier fenómeno de la naturaleza tendrá una explicación racional, por muy complicada que esta sea.

Esta esperanza en la comprensión total del universo es seguramente un comportamiento instintivo, muy relacionado con las reacciones que tenemos de niños. No es del todo consistente con el método científico desarrollado a partir del Renacimiento, que favorece la duda sistemática. En el fondo, casi todos los científicos confían en explicaciones comprensibles de lo que ocurre en el mundo que nos rodea. El estudio de los límites de la propia ciencia se deja a filósofos, no se hace por científicos.

El interés por la naturaleza no sólo ha llevado a la ciencia. También está en la base de la filosofía y la religión. Un niño, de la misma forma que la humanidad en sus comienzos, no tiene un conjunto de conocimientos acumulados que le permiten determinar con precisión la frontera entre los sentimientos individuales y los sucesos que ocurren independientemente de su propia existencia. Igual que la humanidad a sus comienzos, un niño a veces proyecta sentimientos humanos a los animales, las montañas, o los astros.

La ciencia moderna se separa de otras modalidades de explicación del mundo y se comienza a desarrollar en la Italia del Renacimiento. Galileo propone indagar los fenómenos naturales directamente, sin pasar por el filtro

de prejuicios subjetivos (algunos filósofos griegos ya habían iniciado este enfoque, pero sin hacer experimentos ellos mismos). Las observaciones de Galileo sobre el movimiento de los cuerpos terrestres, y también de los astros, inicia el estudio de la naturaleza sin hacer suposiciones previas, aceptando que nuestro conocimiento es limitado.

Investigaciones al estilo de las que comenzó Galileo, en el siglo XVII, se extendieron por muchos países, y las personas interesadas se asociaron en sociedades científicas. Los miembros de estas sociedades eran personas ilustradas con mucho tiempo libre, que consideraban el estudio de la naturaleza como un juego, un pasatiempo. Las sociedades científicas contribuían a la difusión de resultados considerados de interés, y aparecieron las primeras revistas científicas, que difundían los resultados más interesantes. Las sociedades más importantes, así como sus revistas, existen aún en la actualidad. La ciencia se convirtió, durante el siglo XVIII en una actividad muy internacionalizada, y los resultados se difundían, al menos por toda Europa, con bastante celeridad.

La actividad de los científicos del Renacimiento no se puede separar de los avances técnicos que ocurrieron simultáneamente. La comprensión del movimiento de los astros facilitó la navegación, y avances en mecánica cambiaron armas y herramientas. La ciencia llevó a aplicaciones prácticas, posiblemente muy por encima de lo que esperaban los científicos de la época.



Reunión en la Royal Society of London, fundada en 1660. Una de sus revistas, Philosophical Transactions of the Royal Society, fundada en 1665, se sigue publicando en la actualidad.

La Revolución Industrial, a principios del siglo XIX mostró de forma contundente la utilidad de la ciencia. También supuso el fin de la "ciencia recreativa", más próxima a las actividades de un niño que explora al azar el mundo que le rodea. Es interesante señalar, que el inicio de la Revolución Industrial fue realizado gracias al esfuerzo de artesanos con ingenio que trabajaban en sus propios talleres, al margen de las universidades y de las sociedades ilustradas. Los avances técnicos pronto llevaron a ser racionalizados de forma científica, y los avances científicos aceleraron los

desarrollos técnicos. La actividad en investigación pasó de las sociedades científicas a un nuevo tipo de universidades donde la ciencia y la técnica tenían un papel semejante a las disciplinas humanísticas más tradicionales.

La relación entre la ciencia básica y las aplicaciones industriales llevó a que la investigación científica se convirtiera en una parte importante de la actividad humana. Este cambio se ha comparado al comienzo del lenguaje, o a la revolución que supuso la agricultura.

Quizá el ejemplo más destacado de esta transición de la ciencia académica a la tecnología sea las ecuaciones de Maxwell, que describen los campos electromagnéticos. A mediados del siglo XIX, y partiendo de experimentos y observaciones realizados por un técnico muy inteligente sin formación especializada, Michael Faraday, un físico teórico y profesor universitario, James Maxwell, formuló una teoría matemática que describía la propagación de ondas (aún no observadas) en el vacío. Las consecuencias de este descubrimiento, inicialmente de interés puramente académico, son obvias. El conocimiento de las ondas electromagnéticas y de sus propiedades, ha afectado prácticamente todas las actividades cotidianas del ser humano. Aún no se han agotado las consecuencias del avance en el conocimiento básico iniciado por Faraday y Maxwell.

Un ejemplo parecido, pero inverso, es el de unos artesanos con unos conocimientos muy sólidos de física de fluidos, y de lo que luego se llamó aerodinámica, los hermanos Wright, que iniciaron la industria de la aviación en un taller de construcción y reparación de bicicletas.

Desde el final del siglo XIX la ciencia y la técnica han ido estrechamente unidas. Las grandes guerras del siglo XX demostraron la relevancia de la investigación en temas aparentemente muy alejados de nuestro mundo cotidiano, como la física nuclear. La ciencia lleva a nuevas técnicas y aparatos, desde los transistores a los satélites artificiales. A su vez, dispositivos basados en avances tecnológicos permiten fabricar nuevos instrumentos para la investigación científica, como el microscopio de barrido, que permitió visualizar átomos.

El papel de la investigación científica en los avances tecnológicos y en la economía en general no ha hecho que se abandonen temas considerados de interés más puramente intelectual, aunque la parte más importante de los fondos dedicados a la investigación van a temas con aplicaciones bien definidas. Descubrimientos que inicialmente no parecían tener una relación clara con el desarrollo de nuevas técnicas, como el láser, o más recientemente, la teoría de números, han tenido consecuencias inesperadas (por ejemplo, la teoría de números sirve de base a las técnicas de encriptación, y se usa en muchos temas relacionados con el "big data").

Quizá la prueba más clara de lo mucho que se ha avanzado en la comprensión del mundo que nos rodea es el hecho de que la ciencia actual

maneja conceptos y teorías muy alejados de la experiencia cotidiana, pero que se demostraron necesarios para explicar muchos fenómenos.

Los seres unicelulares, los virus, y el código genético, son temas muy alejados de la fauna y flora que comenzó estudiando la biología. La teoría de la relatividad de Einstein cambio los conceptos de tiempo y espacio. Aún más sorprendente, el mundo de los átomos (ya predichos en la antigua Grecia por Leucipo de Mileto y por Demócrito) requiere, para su descripción, de nuevas ideas, formuladas en la física cuántica. Estos conceptos se apartan e incluso contradicen nuestra intuición sobre los procesos naturales, formada a partir de experiencias con objetos muy diferentes a los átomos.

Como en otras actividades humanas, la aceptación de estos cambios radicales en nuestra concepción de la naturaleza lleva a fuertes polémicas y los cambios necesitan tiempo para asentarse. El hecho de que la ciencia esté basada en una crítica constante de los conocimientos establecidos, y el que las últimas pruebas sean la observación y el experimento, hacen que, finalmente, las discusiones se resuelvan sin ambigüedad.

Los avances científicos, por definición, son altamente imprevisibles (pese a lo que esperan las agencias que financian la investigación). La misma naturaleza de la ciencia, que implica un cuestionamiento continuo de las ideas aceptadas, implica el que los avances ya existentes no sirvan demasiado para prever los avances futuros.

Una proporción considerable de nuevos descubrimientos provienen de trabajos generalistas, y sin una meta estrechamente definida. Otros descubrimientos son consecuencias inesperadas de investigaciones con objetivos poco relacionados con el resultado final (por propia experiencia, el grafeno, y otros materiales bidimensionales, son un buen ejemplo de ello). La ciencia actual, además, no se separa en comportamientos estancos, y una parte considerable de resultados importantes provienen de la interacción entre varias disciplinas. Por ejemplo, el desarrollo de dispositivos superconductores para medidas de alta precisión, cuyo objetivo inicial fue la mejora de las técnicas de investigación en física y química, ha tenido consecuencias muy relevantes en biomedicina.

En la actualidad, la mayor parte de los investigadores en activo se concentran en temas de aplicación más o menos directa. Sin embargo, la investigación generalista, movida por la curiosidad innata en el ser humano, sigue siendo una parte crucial en el avance de la ciencia, además de enriquecer el acervo cultural de la humanidad.

Francisco Guinea.

Doctor en Física.

IMDEA Nanociencia, Madrid.

Donostia International Physics Center, San Sebastián.

7.2

Mitología de la Ciencia: evolución de las cosmovisiones.

A lo largo de la historia, el ser humano, ha destacado por su interés en conocer el Universo en el que vive a través de las herramientas de las que disponía en cada momento. A día de hoy, consigue hacerlo de manera metódica y cuantitativa desde las interacciones entre los elementos fundamentales (quarks, electrones, neutrinos, etc...) hasta la estructura a gran escala del propio Universo, pasando por la química y la biología en las escalas intermedias. Pero antes de que las ciencias se erigiesen como la punta de lanza del progreso intelectual, los pensadores y pensadoras sólo podían hacer uso de la Filosofía.

En el séptimo capítulo de *Cosmos, El espinazo de la noche*, Carl Sagan hace una revisión histórica del desarrollo de la ciencia y su relación con los mitos en la antigua Grecia. Esto es la **cosmovisión**, entendida como el conjunto de ideas sobre el Universo, así como toda interpretación de la realidad que comparten los habitantes de una misma civilización, cultura o sociedad. Por norma general, las cosmovisiones antiguas giran en torno al **mito**: una narrativa que asocia los fenómenos naturales que no pueden explicar a entidades divinas (dioses) para eludir las primeras cuestiones. De esta manera, para la sociedad nórdica, el paso de los días se debe a que los dioses Luna y Sol eran constantemente perseguidos por dos lobos, los hijos de Fenrir: Hati y Sköl.

La mitología griega desembocó en la filosofía de la naturaleza (paso del mito al logos). Como bien relata Sagan en su libro, las ciencias empezaron a apoyarse en los experimentos y las matemáticas eran el camino para conocer la verdad absoluta. Aunque es importante remarcar que no había un consenso en la manera de hacer ciencia porque aún no la habían separado de la filosofía. De hecho, muchas de sus explicaciones se sustentaban en ideas indemostrables que eran necesarias para la consistencia de su cosmovisión. El concepto de Dios seguía ligado a la ciencia, aunque no hicieran referencia a él directamente.

También en Grecia, uno de los mayores exponentes de la filosofía fue Aristóteles (siglo IV a.C.). En cuanto a su ciencia, una de las cuestiones que

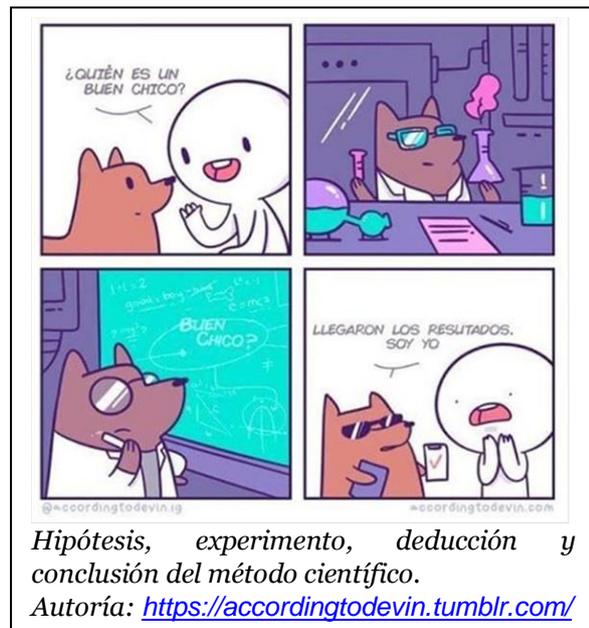
abordó trata sobre el origen del movimiento. Tanto fue la importancia de su análisis que el concepto de energía potencial de la física moderna es una definición aristotélica: la energía potencial es la energía que un cuerpo podría llegar a tener. Aristóteles llegó a la conclusión de que todo móvil es movido por otro, que a su vez es movido por otro motor y así sucesivamente. De manera completamente especulativa y sin un ápice de lógica científica, aludió a la existencia de un ser divino llamado Primer Motor Inmóvil, que ocasiona todo el movimiento del Universo. Esta manera de "hacer ciencia" continuó hasta la edad moderna, momento de separación entre las ciencias y el concepto de Dios, por lo menos, aparentemente.

El Renacimiento del siglo XV y XVI fue clave para reformular todo lo conocido y desligar la figura del ser humano del centro de la creación. En esta labor, los avances en astronomía llevaron a replantearse la cosmovisión heredada y sus dogmas, lo que acabó comportando la destrucción del cosmos antiguo. Copérnico ayudó a su destrucción postulando el modelo heliocéntrico. En términos físicos suponía que todos los astros girasen en torno al Sol, en cambio, en términos teológicos suponía que Dios no había creado el planeta Tierra en el centro absoluto del Universo. Años más tarde, Galileo Galilei, entre otros, demostró que el modelo heliocéntrico era correcto. Aplicó el método compositivo-resolutivo, sentando las bases del método científico actual. Este método se caracteriza por:

- La **observación** de los fenómenos.
- Elaboración de **hipótesis**, que expliquen la causa del fenómeno.
- Sobre la hipótesis se ha de hacer una **deducción** matemática.
- Las consecuencias deductivas han de ser medidas en un **experimento**.

A partir de Galileo, todos los dogmas del pasado dejaron de influir en el desarrollo de las ciencias. Esta nueva cosmovisión destacaba por la preferencia de las teorías más simples (Navaja de Ockham), el determinismo matemático derivado de las Leyes de Newton (conocidas las condiciones iniciales de un sistema físico, su futuro es completamente predecible), la desvinculación de Dios al estudio del Universo y el enaltecimiento de la razón y del empirismo.

A medida que pasaban los siglos mayores eran los logros de las ciencias. En el siglo XVIII, era tal la importancia que había adquirido el método científico que empezó a desarrollarse una corriente filosófica que



despreciaba las cuestiones del resto de campos del conocimiento, el **positivismo**. Bajo el criterio de los positivistas, el conocimiento verdadero es el que se puede obtener a partir del método científico, no tiene sentido responder las cuestiones que no puedan ser abordadas a partir de él, como la existencia de Dios.

Inmerso en esta cosmovisión, en el siglo XX, Karl Popper desarrolló su propia filosofía científica que no despreciaba el resto de campos. Su contribución más importante al método científico fue el **falsacionismo**. Para Popper, una teoría científica es válida si se puede realizar un experimento que contradiga las hipótesis iniciales. Toda teoría falsable está constantemente abierta a ser refutada. Así, la comunidad científica puede establecer límites en la validez de las teorías; la física clásica es válida hasta escalas muy pequeñas, donde las propiedades cuánticas dominan. Las observaciones confirman las teorías, pero estas son completamente indemostrables.

Todas las ideas que se han presentado anteriormente (mitos, cosmovisión y falsacionismo) tienen una relación directa con la cosmología actual. Como bien es sabido, la cosmovisión y la cosmología han evolucionado de manera univitelina. La cosmología siempre ha planteado preguntas sin respuesta experimental: ¿cuál es el origen del Todo?, ¿cuál es el final del Todo? No se pudo dar explicaciones ni si quiera parciales a estas preguntas hasta que Einstein desarrollase la teoría de la Relatividad General, en 1915. A partir de ella elaboramos el Modelo Cosmológico Estándar (MCE) para describir la evolución del espacio-tiempo en términos de la distribución de materia y energía existente en el mismo, desde los primeros instantes del Universo hasta hoy. La región de validez de la cosmología no es aplicable a tiempos muy pequeños, donde es necesaria una teoría cuántica de la gravedad que de cuenta del comportamiento del espacio-tiempo a esas escalas.

El mayor contratiempo es que muchas de las cuestiones cosmológicas se toman como científicas cuando son un sucedáneo filosófico, donde unos mitos se han sustituido por otros. Varias/os cosmólogas/os defienden que la cosmología ha de ser tratada únicamente en términos científicos, apostando por un positivismo que deje de lado todos los demás ámbitos del conocimiento. Esto es incompatible con reconocer la multiplicidad de las ciencias para el estudio del Cosmos, necesario para estudiar el problema completo y no una porción de este. Uno de los problemas de tratar la cosmología como una ciencia teórica reside en que las interpretaciones de las observaciones que la respaldan deben de hacerse de manera cautelosa, por ejemplo, el redshift galáctico. La Relatividad General explica de manera inequívoca las observaciones del redshift a partir de la expansión acelerada del Universo. Realmente, no hemos observado la expansión del Universo, hemos observado que toda la luz proveniente de las galaxias lejanas es más rojiza de lo que deberíamos medir, la expansión se infiere únicamente del modelo matemático.

Es más, la cosmología no es una ciencia de laboratorio, y si se nos apura, ni siquiera una ciencia observacional. En cosmología no caben los

experimentos más que en simulaciones computacionales y tampoco, observaciones estadísticas, pues Universo no hay más que uno (Uni-verso). A este problema se añade que el entendimiento del Cosmos como un todo no puede caber en una hoja de papel. A lo sumo, la cosmología estará abordando un recinto limitado suyo, algo mucho más modesto: el Universo observable, la física a las mayores escalas accesibles al ser humano.

En cuanto a las repercusiones teológicas del MCE, muchas/os cosmólogas/os han intentado borrar a Dios de la creación. En palabras de Stephen Hawking: "No es necesario invocar a Dios como el que encendió la mecha y creó el Universo". Por otro lado, en vistas de la incuestionabilidad de las observaciones, los representantes de la religión occidental lo tomaron como prueba de la existencia de Dios, tal y como recoge el siguiente extracto de Pío XIII: "La ciencia moderna nos ha provisto de la prueba del inicio del tiempo... por lo que la Creación tuvo lugar. Por lo tanto, tiene que haber un Creador; por tanto, Dios existe". Dios no habría creado el Universo, pero le convencía el Modelo Cosmológico Estándar.

Actualmente, la imposibilidad de obtener datos del Universo primitivo y el problema del diseño inteligente (el valor de las constantes de la naturaleza permite nuestra existencia, principio antrópico) ha resultado en una fauna de teorías sin respaldo experimental alguno; la Teoría de cuerdas y los Multiversos, entre otras. La primera trata de dar una explicación cuántica de la gravedad para explicar el punto cero del origen del Todo. La segunda, resuelve el diseño inteligente proponiendo que nuestro Universo no es el único, sino que es una burbuja entre una barahúnda de Universos, cada uno con unos valores de las constantes distinto de los demás. En decir, evitan el diseño inteligente con una explicación aleatorio-estadística. Estas, son pura mitología, pues no son falsables.

Concluyendo, la cosmología, aún siendo una teoría confirmada experimentalmente no puede separarse de la filosofía. Salvando las distancias con el mito del Cosmos, no podemos poner en duda que el desarrollo de las Ciencias es, en gran medida, lo que nos ha hecho prosperar, y, sus logros no han de ser menospreciados. Con el paso del tiempo aprendimos a desechar las cosmovisiones mitológicas para agarrarnos a otras más lógicas, el progreso nos indica que fue buena elección separar las Ciencias de los dioses, aunque los dioses no mueren (como diría Nietzsche), los dioses se reemplazan. Para romper el mito debemos reconocerlo y guiar a la humanidad desde todas las perspectivas hacia el progreso del saber y, por ende, al progreso de nuestra especie en este vasto Universo.

Tomás Sánchez Sánchez-Pastor.

Investigador joven en Inteligencia Artificial.

CIEMAT.

Capítulo 8

Viajes a través del espacio y del tiempo

Nadie ha vivido más tiempo que un niño muerto, y Matusalén (de hecho Peng Zi, el equivalente chino) murió joven.

El Cielo y la Tierra son tan viejos como yo, y las diez mil cosas son una sola.
ZHUANG ZI, hacia el 300 a.C.

Hemos amado con demasiado fervor a las estrellas para temer a la noche.
(Epitafio en la lápida mortuoria de dos astrónomos aficionados.)

*Las estrellas garabatean en nuestros ojos heladas epopeyas, cantos
resplandecientes del espacio inconquistado.*
HART CRANE, El puente, 1930

8.1

Un viaje virtual por el Universo observable.

Carl Sagan estimuló nuestra imaginación hablándonos de viajes a otras estrellas, tal vez incluso más allá, a otras galaxias, con naves que se desplazaran a velocidades próximas a las de la luz. Estos viajes están todavía muy lejanos en el tiempo, pero antes de pensar en viajar físicamente a lugares remotos del Universo, debemos aprender a movernos (¡mentalmente!) por él. Y para ello necesitamos un conocimiento preciso del Universo en que vivimos. La concepción del Cosmos en que habitamos ha evolucionado a medida que las civilizaciones mejoraban su tecnología y eran capaces de acceder a observaciones del Universo que nos rodea, y a interpretar su significado físico. Vivimos una era de grandes avances en el pensamiento, pero probablemente uno de los avances con mayor impacto filosófico lo constituye el hecho de que, por primera vez en la historia de la Humanidad, creemos haber alcanzado a explorar los límites del Universo observable.

El gran cambio de paradigma se produjo en 1929, hace poco menos de un siglo. Hasta entonces la idea que prevalecía era que el Universo se limitaba a nuestra Galaxia, que “flotaba” en un vacío ilimitado, infinito y eterno. La idea estaba tan arraigada que incluso forzó a Albert Einstein a incluir una “constante cosmológica” que evitara que un Universo de esas características colapsara, como preveían las ecuaciones de su Relatividad General. Gracias a una sucesión de pequeños avances, como la calibración de distancias a partir de las estrellas cefeidas que realizó Henrietta Levitt y la mejora de las observaciones astronómicas realizadas por diversos astrónomos, Edwin P. Hubble realizó dos descubrimientos sorprendentes: en primer lugar, nuestra Galaxia era tan sólo una más en un Universo compuesto por infinidad de ellas, y en segundo lugar, las galaxias se alejaban unas de otras, y cuanto más lejos estaban, más rápidamente se alejaban. Este resultado, combinado con los trabajos teóricos de Georges Lemaître basados en la Relatividad General, llevaron a la conclusión de que el Universo no era estático, sino que se encontraba en expansión. Einstein pudo eliminar su constante cosmológica, a la que calificó como “el peor error de su carrera” (aunque el reciente descubrimiento de la Energía Oscura nos haga pensar que en realidad no fue tal error).

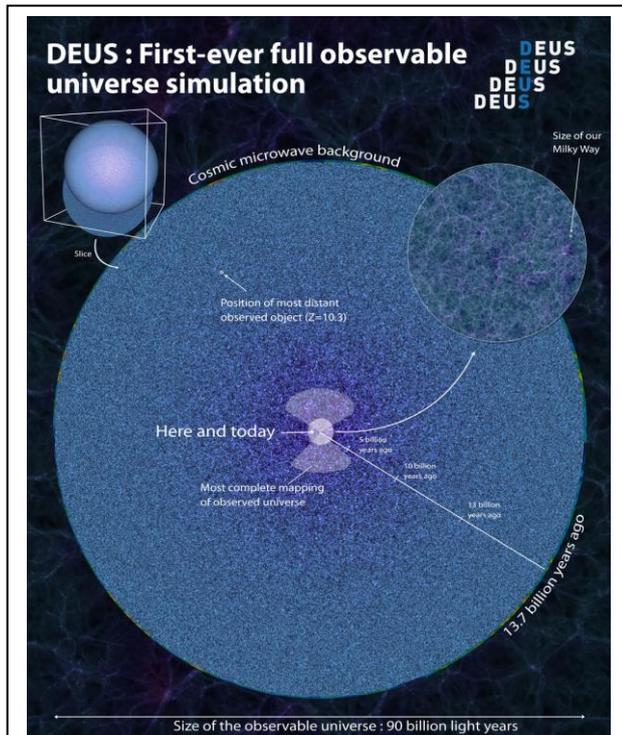
Este descubrimiento tuvo unas tremendas implicaciones filosóficas. Por una parte, un Universo en expansión no era eterno: una vez medida la velocidad a la que el Universo se expandía, era relativamente sencillo calcular cuánto tiempo lo llevaba haciendo. Con las medidas más precisas que tenemos hoy en día se estima que el Universo lleva 13.800 millones de años expandiéndose. La segunda implicación también tenía una enorme relevancia filosófica: dado que la luz tiene una velocidad finita, cuanto más lejos están las galaxias que observamos, su luz fue emitida más atrás en el tiempo. Como la edad del Universo es finita, no podremos observar ningún objeto que se encuentre a más de 13.800 millones de años luz. El Universo observable por lo tanto no es infinito, sino que tiene límites, y estos límites se encuentran muy lejanos en el Espacio, pero sobre todo, ¡muy lejanos en el Tiempo!

No podemos concebir el Universo observable en que vivimos sin tener en cuenta su estructura espacio-temporal. Realicemos una serie de experimentos mentales (*Gedankenexperiment*), como los que tanto le gustaban a Albert Einstein, y viajemos virtualmente por el Universo. Supongamos que observamos galaxias lejanas con el Gran Telescopio Canarias desde la isla de La Palma. Con sus 10 metros de diámetro (¡el mayor telescopio óptico-infrarrojo operativo en el mundo!) tiene capacidad de detectar la luz de estrellas que se formaron en los primeros 1.000 millones de años tras el Big Bang en que se formó el Universo que conocemos. Estamos viendo cómo era el Universo joven, cuando se empezaron a formar las primeras galaxias. Dentro de unos años, cuando nuevos telescopios como el *James Webb Space Telescope (JWST)* o el *Extremely Large Telescope (ELT)* se pongan en marcha, podremos llegar a analizar en detalle la luz de las primeras estrellas que se encendieron tan sólo unos 300 millones de años tras el Big Bang. Es sorprendente que nos podamos acercar tanto con nuestros sentidos (¡electrónicos!) al origen del Universo. Pero es que, sin salir de las Islas Canarias, podemos observar con el telescopio *Quijote* la luz que se emitió antes incluso, cuando el Universo tenía tan sólo unos 380.000 años de edad. Antes de ese momento, el Universo era muy denso y caliente, la materia estaba ionizada en forma de plasma, y era opaca a la radiación electromagnética. Pero la expansión del Universo enfrió ese gas cósmico, permitiendo que los protones y los electrones se ligaran de manera estable, dando lugar a átomos de hidrógeno (74%) helio (25%) y trazas de otros elementos, como el litio. Esta materia neutra apenas interactuaba con la luz, y los fotones comenzaron un largo viaje por un Universo casi vacío (a medida que la expansión progresaba, la densidad media de materia disminuía de manera constante). Y con instrumentos como *Quijote* podemos llegar a estudiar las propiedades de la luz emitida durante aquel cambio de fase, a la temprana edad de 380.000 años, cuando la temperatura era de unos 3.000 K. Mediante radiación electromagnética no podemos llegar más lejos en el espacio, ni más atrás en el tiempo, ya que el medio era opaco. Pero es posible que logremos extraer información de épocas anteriores por medio de las ondas gravitacionales que tuvieron que emitirse durante una etapa especialmente

convulsa del Universo. O, mejor dicho, midiendo los efectos que dichas ondas produjeron en el medio, generando patrones que buscan hoy en día instrumentos como *Quijote*.

Continuemos con nuestro experimento. Imaginemos ahora que nos vamos a observar con alguno de los telescopios instalados en Australia, casi en nuestras antípodas. De nuevo, observando objetos lo suficientemente alejados, llegaremos otra vez a los primeros tiempos de nuestro Universo, y de hecho llegaremos otra vez a la misma época en que se experimentó el cambio de fase que hizo el medio transparente a la luz. Y lo mismo ocurriría si nos vamos al polo Norte, o al polo Sur, o al Ecuador, miremos hacia donde miremos llegaremos siempre a la barrera que se formó a los 380.000 años. En realidad, si nuestros ojos fueran sensibles al rango de las microondas, el cielo nocturno no sería negro, sino que estaría dominado en todas direcciones por la radiación cósmica de fondo que se produjo tras el Big Bang. De hecho, así lo vemos observando con telescopios espaciales como *COBE*, *WMAP* o *Planck*.

Supongamos ahora que dicha barrera no existiera, y que el Cosmos fuera transparente desde su primer momento (o que encontráramos alguna tecnología que nos permitiera llegar más allá). Miráramos desde donde miráramos llegaríamos al mismo punto inicial, el mismo punto en el espacio y en el tiempo: un punto que, por efecto del Big Bang, se expandió hasta rodearnos como una burbuja. *Amazing!* como diría Carl Sagan. Es difícil imaginarse un Universo como el que acabo de describir. En realidad, vivimos en el centro de una burbuja de 4 dimensiones (3 espaciales y una temporal) tal que la capa más externa corresponde al origen del Universo, y por lo tanto al origen del Espacio y del Tiempo. Y esa capa más externa se aleja de nosotros a gran velocidad debido a la expansión del Universo, por lo que la burbuja es cada vez mayor. En la figura se trata de representar este concepto, y se muestran las regiones que hemos



Representación gráfica del concepto actual de Universo observable: una hipersfera de 3 dimensiones espaciales, con un radio de ~45.000 millones de años luz, y una dimensión temporal con un radio de 13.800 millones de años. El observador se encuentra en el centro de la hipersfera, cuya superficie se expande de manera continua. Cortesía del Consorcio DEUS.

podido explorar con nuestros telescopios. Con el conocimiento que tenemos hoy en día, esta hiperesfera tendría un radio espacial de unos 45.000 millones de años luz, y un radio temporal de unos 13.800 millones de años. Esta distancia, 45.000 millones de años luz, aparentemente muy grande para un Universo con sólo 13.800 millones de años de existencia, indica la distancia a la que en la actualidad se encontrarían las galaxias que se formaron en las regiones cuya radiación cósmica de fondo podemos ver ahora, pero por el efecto de regresión temporal no podemos recibir su luz *tal y como son ahora*.

No intentemos imaginarnos qué hay más allá de la "burbuja": en el límite, cuando nos acercamos a la escala de Planck (10^{-44} s, 10^{-35} m), los conceptos físicos de Espacio y de Tiempo pierden el sentido físico que tienen en nuestra realidad cotidiana. Entender qué pasó en aquellas condiciones requerirá el desarrollo de una teoría cuántica de la gravitación, en la que se afanan multitud de cosmólogos. El Prof. Pedro Naranjo Pérez nos cuenta en este volumen qué pudo pasar en aquellas condiciones, e incluso si la expansión que observamos hoy en día pudo haber estado precedida por un gran colapso de un Universo previo.

La idea del Universo observable como una hiperesfera centrada en el observador, con un tamaño finito y en continua expansión, plantea nuevos interrogantes. En primer lugar, si aplicamos el mismo razonamiento, veremos que el Universo observable para otro observador que estuviera en una remota galaxia sería una hiperesfera similar, pero *¡no sería la misma!* El Universo observable no es único, sino que depende de la posición del observador. *Amazing, indeed!* Lo que nos lleva a la segunda cuestión: ¿qué hay más allá del Universo observable? ¿Existe un Universo físico que sea mucho más grande, del que sólo podamos observar una pequeña fracción? Parece evidente que debería ser así, pero nos encontramos con un problema conceptual de gran profundidad. Debido a la expansión del Universo, y la velocidad finita de la luz (y de cualquier otro tipo de radiación, como la gravitacional, que pudiera transportar información), no puede llegarnos ningún bit de información de ninguna región que esté "fuera" de nuestro Universo observable (como hemos visto, ¡el concepto de "fuera" ni siquiera estaría bien definido!). ¿Qué realidad física tendría un Universo con el que no podemos interactuar, y del que no nos puede llegar ninguna información? Es una de las muchas paradojas que nos plantea la Cosmología moderna, y para la que tal vez lleguemos a encontrar una respuesta en el futuro. Una respuesta que aún desconocemos, pero que será sin duda fascinante.

Jose Miguel Mas Hesse.

Doctor en Astrofísica.

Investigador en el Centro de Astrobiología (CSIC-INTA), Madrid.

8.2

Los orígenes del Sistema Solar y otros mundos: la historia de la vida.

La vida, algo que va más allá de la existencia del ser humano y que en estos tiempos luchamos por preservar. No podemos entender el presente sin conocer el origen y la historia del Universo. Aún no tenemos todas las piezas del enorme rompecabezas de esa historia, y tampoco estamos seguros de como encajarlas, y lo más probable es que nunca lleguemos a resolver el misterio. Al fin y al cabo, solo somos unos pocos granos en las arenas del tiempo de las que hablaba Carl Sagan.

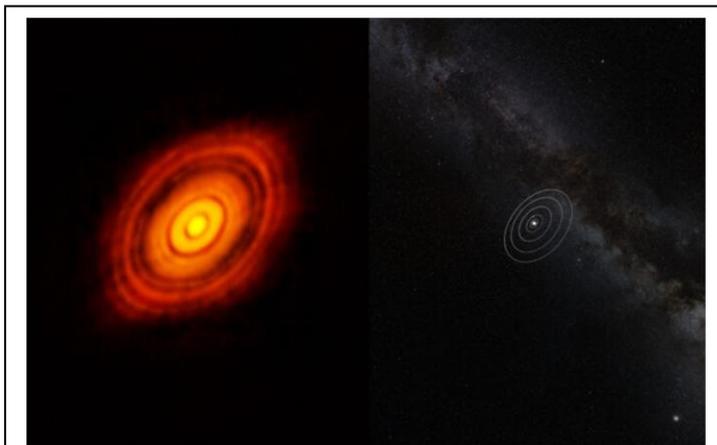
La revolución del estudio del Sistema Solar y de otros sistemas es relativamente una historia reciente, iniciada a finales del siglo XX. Sólo podemos explorar de manera tangible una región del Universo muy limitada, mediante sondas y misiones espaciales, o gracias al estudio de los meteoritos recogidos en la superficie terrestre y del material de nuestro propio planeta. Requeríamos de tecnología muy sofisticada para poder enviar con éxito una misión a un cometa o tomar muestras de la superficie de Marte. Apenas hemos explorado nuestro Sistema Solar y, sin embargo, ya sabemos de la existencia de otros mundos a través del estudio de la luz de dichos objetos. Hoy sería impensable realizar una misión espacial en un exoplaneta. Las escalas de distancia y tiempo son inasumibles con la tecnología que hemos sido capaces de desarrollar hasta el día de hoy. Pero esa tecnología nos permite observar con mayor precisión objetos tenues y lejanos, otros soles, otros planetas lejanos.

De acuerdo con nuestras teorías y experimentos, el Universo tiene una edad cercana a los 14000 millones de años. No tenemos explicación para todos los detalles de esa formación, particularmente sobre el origen del Universo y sus instantes iniciales, pero esa es otra historia. Vayamos unos 9000 millones de años hacia adelante, aproximadamente, el momento en el que se estima que se formó el Sistema Solar. Dicha edad aproximada se extrae del análisis de las rocas más antiguas de La Tierra e incluso del material lunar mediante técnicas de datación de radioisótopos. La teoría más aceptada indicaría que se formó a partir del colapso de una nube interestelar formada por gas y polvo, tanto de materia primordial como de materia de las primeras generaciones de estrellas, de las que algunas ya habrían muerto y devuelto su

materia y energía al medio. Hoy podemos observar grandes nubes en el espacio que podrían tener características similares a la que hubiera formado nuestro Sistema Solar, como la nube de Orión. Grandes nubes de gas y polvo donde nacen nuevas estrellas, algunas de las cuales, albergarán sistemas planetarios de distintos tipos, incluso similares al nuestro.

Una nube así conformada en el espacio, que cumpla unos requisitos de masa y tamaño, y tras millones de años de evolución, acabaría formando una protoestrella con un disco de gas y polvo. Con el tiempo y con las adecuadas condiciones físicas, los planetas y otros objetos menores acabarían formándose en el disco. La teoría más aceptada sobre la formación de discos protoplanetarios se basa en el colapso gravitacional. Las partículas de gas y polvo que forman la nube se ven atraídas entre sí por efecto de la gravedad, ayudadas inicialmente por una perturbación, alguna onda de choque de la explosión de una supernova u otros fenómenos a escala galáctica. La nube en colapso empezaría a tomar forma esférica tras cierto tiempo, e iría ganando velocidad de rotación al disminuir su tamaño, igual que lo hace un patinador rotando sobre sí mismo cuando pasa de tener sus brazos extendidos a recogerlos sobre el cuerpo. Esa rotación hará que en el ecuador (el plano perpendicular al eje de rotación que equidistaría del polo norte y el sur de la nube) exista una aceleración que contrarrestará el colapso en esa región. En

los polos, sin embargo, continuará el colapso sin otra fuerza que lo contrarreste, e iría achatándose por los polos. Con el tiempo tendríamos una nube mucho más pequeña, con una gran concentración de material en su centro y con una estructura alargada y aplanada en su ecuador, un disco. En el centro, esa densa concentración de material irá aumentando su temperatura hasta el punto en el que las reacciones de fusión del hidrógeno, el



*A la izquierda, disco protoplanetario alrededor de la estrella HL Tauri, utilizando imágenes de los telescopios ALMA y Hubble. A la derecha, montaje para comparar el tamaño del Sistema Solar con HL Tauri.
Créditos: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)*

elemento más abundante, pueden comenzar. Tendremos así una protoestrella en el centro y a su alrededor un disco de acreción en rotación, un disco protoplanetario.

Pasarán todavía millones de años hasta que el polvo y el gas en el disco se agreguen para formar planetas rocosos o los núcleos de gigantes gaseosos. Las partículas de polvo colisionarán y en algunas colisiones quedarán pegadas

y progresivamente irán formando rocas, luego planetesimales y así irán formando estructuras más grandes. En la última década, 2010-2020, hemos podido observar con gran detalle algunos discos protoplanetarios, en los que se observan secuencias de anillos a distintas distancias respecto de la estrella, con anillos que contendrían material y otros que no. Creemos que éstas son pruebas de las regiones donde se formarían los planetas y otros objetos menores. Las colisiones entre los objetos en el sistema son muy importantes. Inicialmente la comunidad científica creía que el proceso de colapso de la nube daba origen a los planetas, sin embargo, fue el estudio de La Luna, cubierta de cráteres, el que llevó a pensar en la teoría del crecimiento gradual en una época en la que las colisiones entre rocas del disco protoplanetario debían ser muy frecuentes. De hecho, se cree que la Luna se formó a partir de la colisión entre la proto-Tierra y otro planeta que podría haber tenido el tamaño de Marte. Además, las condiciones físicas en el disco no son iguales dependiendo de la distancia a la estrella. Por esta razón las características de los planetas que se formen serán distintas y esto determinará si la vida, tal y como la conocemos, puede darse o no. Un planeta que pueda albergar vida debe situarse en lo que llamamos zona de habitabilidad. Una región situada a cierta distancia de la estrella donde un planeta rocoso pueda tener agua.

¿Pero cómo comenzó la vida? Recordaba al inicio las palabras de Carl Sagan sobre las arenas del tiempo... granos de arena, que contienen sílice y otros elementos y que nos recuerdan que somos polvo de estrellas. En todas las etapas de la formación planetaria, existe una incesante actividad química, más rápida en algunas circunstancias que en otras. La nube original estaría compuesta de átomos de los elementos más abundantes (hidrógeno, helio, oxígeno, carbono...), y de algunas moléculas simples en forma de gas o condensadas en granos de polvo. Esas primeras moléculas se habrían formado por la recombinación de los átomos en la nube, en un proceso muy lento, pues la densidad es relativamente baja. Alguna de esas moléculas simples, como el hidrógeno molecular, requieren de la presencia de los granos de polvo para formarse eficientemente. Estos granos serán probablemente restos del material que una estrella dejó al morir. Así, la química irá haciendo más complejo el material. Otras moléculas se irán formando lentamente, unas directamente en la fase gas, otras sobre la superficie de los granos de polvo, algunas recubrirán los granos en una especie de manto de hielo. Cianuro de hidrógeno, formaldehído, vapor de agua, y otras moléculas relativamente simples, estarán presentes en el disco protoplanetario, junto con el material sólido en forma de granos que irán por agregación haciéndose más y más grandes (granos compuestos de silicatos, carbono amorfo y muchas otras especies). Aún habrá que formar moléculas más complejas como el metanol o el acetonitrilo, y eso ocurrirá mediante reacciones inducidas por la propia radiación de la estrella actuando sobre el material en el disco y los procesos sobre la superficie de los granos. Se irá construyendo esa complejidad química que sería necesaria para dar paso a la formación de moléculas prebióticas, esencialmente aminoácidos y azúcares simples que permitirían construir especies más complejas como las

proteínas. Hasta la fecha, sólo hemos sido capaces de detectar moléculas orgánicas complejas en el gas que se encuentra en las regiones de formación estelar. Complejas porque tienen más de seis átomos, pero no claras muestras de moléculas prebióticas tan complejas como los aminoácidos, con la excepción de la glicina cuya detección o no detección en el medio interestelar es tema de controversia y debe aún considerarse como no detectada. Sí se han detectado aminoácidos en algunos meteoritos, como el meteorito de Murchison.

La vida tardaría aproximadamente unos 500 millones de años más en aparecer desde la formación de La Tierra, si bien esta cifra es muy incierta. Inicialmente no era como la conocemos hoy. Necesitaría tiempo para formar la atmósfera mediante colisiones con otros objetos que activaron el interior del planeta, calentándolo y dándole actividad volcánica liberando así gases. Existen evidencias de que los primeros organismos simples existían hace 3500 millones de años, quizá antes, encontradas como fósiles en Australia y Sudáfrica y también en los respiraderos de las profundidades oceánicas. ¿Qué ocurrió para que se diera la vida en La Tierra con la química y energía disponible? Existen diferentes teorías para tratar de responder esta pregunta. La teoría de Oparin-Haldane, una de las primeras en aparecer, sostiene que la síntesis de moléculas complejas debió darse en los océanos gracias a la radiación solar en ausencia de oxígeno molecular para oxidarlas. Esta teoría de la "sopa" prebiótica ha sido apoyada por los experimentos de Miller-Urey. La teoría de los hiperciclos de Eigen, donde se producirían moléculas con capacidad de replicarse de manera auto-catalítica, o la teoría de la formación en los respiraderos hidrotermales, o la que apunta a que los primeros compuestos orgánicos simples podrían haber llegado a La Tierra en meteoritos, son otras posibilidades. No existen aún evidencias claras que nos permitan describir de manera exacta como se dio este importante paso del origen de la vida. Debemos seguir investigando estas cuestiones para conocer la historia, nuestra historia.

Luis Velilla Prieto.

Doctor en Ciencias Físicas.

Investigador postdoctoral en la Universidad Tecnológica de Chalmers (Suecia).

8.3 Teleportación Cuántica y Causalidad.

Pero la era de los entes-máquinas pasó... aprendieron a almacenar el conocimiento en la estructura del propio espacio, y a conservar sus pensamientos para siempre en heladas celosías de luz... Podían vagar a voluntad entre las estrellas, y sumirse como niebla sutil a través de los intersticios del espacio.

Arthur Clarke, 2001 una Odisea Espacial

En tiempos del coronavirus, la relación entre conocimiento y supervivencia se percibe dramática. Para cuando la vida, como la conocemos, sea inviable, deberíamos haber identificado el nuevo albergue de nuestra complejidad evolucionada, transformados en quién sabe qué forma intangible difícil de imaginar. ¿El espacio?... su naturaleza ha sido objeto de la reflexión de los más lúcidos en todas las épocas. Parece ser ese objeto irreductiblemente simple que queda cuando quitamos todo, a veces, por ello, confundido con la nada. Muy al contrario que la nada, el espacio vacío tiene estructura y, según parece, compleja.

El avance más sólido en el conocimiento de su estructura se produjo a principios del siglo XX cuando se nos revelaron dos detalles fundamentales de su engranaje interno. El primero es que está ligado íntimamente al tiempo, formando un bloque indisoluble, el espacio-tiempo. El segundo es que éste es, a su vez, un objeto dinámico cuya geometría se altera ante la presencia de materia. Tal acción y reacción constituye la base de la Gravitación según la Teoría General de la Relatividad. La prueba más espectacular de ese carácter dinámico fue la detección de las ondas gravitacionales: vibraciones de pura geometría que se propagan en el espacio vacío. El castillo conceptual de la Relatividad se soporta en varias claves de arco: una de ellas es la "causalidad". Descarta este principio la propagación a velocidades *superlumínicas*; el efecto que causa un agente no puede ocurrir en ningún punto del espacio antes de que lo alcance el emisario más rápido, la luz. Esto limita claramente nuestras posibilidades de actuar sobre el universo y también de conocerlo. Cualquier viaje interestelar, con naves necesariamente más lentas que la luz, se topa con esta barrera infranqueable que obliga a pensar en generaciones de tripulantes, tan sólo para afrontar décadas de travesía.

La idea de la teleportación surgió en argumentos de ciencia ficción incluso anteriores a "Transporter", la famosa máquina de Star Trek. Sus clarividentes autores preconizaron la idea de que lo que nos conforma como seres, más que materia, es información. Una idea arriesgada: prácticamente todas las moléculas que componen nuestros pesados y torpes cuerpos se renuevan a los pocos años, pero la ubicación relativa de las mismas permanece. Al límite, podríamos decir que somos reductibles a una secuencia de unos y ceros que codifican estructura. Pero incluso viajando convertidos en señales de luz, la causalidad nos confinaría a una porción insignificante del universo. La inexistencia de señales *acausales* que se propaguen a velocidades superiores a la de la luz es un axioma derivado, como todos, de la observación. Sin embargo, hay un consenso de que en el estudio de estructura íntima del espacio aún queda lana que cardar, y un mechón importante es, precisamente, el origen microscópico de la causalidad. Parte de dicha sospecha proviene de la dificultad que presenta encajarla Teoría de la Relatividad General y la Mecánica Cuántica, las dos catedrales conceptuales erigidas durante el siglo XX. El mundo es cuántico a todas las escalas y para todos los objetos -es importante enfatizar esto-. Para todos menos, todavía, para uno: el espacio-tiempo. Dado que, desde el punto de vista de la Relatividad General, el espacio-tiempo es *una cosa más*, parece lógico pensar que obedezca también a las leyes de la Mecánica Cuántica. En este punto encontramos un atolladero que mantiene encallada la Física Teórica desde hace décadas.

¿Viajar convertidos en información pura? La información parece algo liviano y abstracto, más cercano a las "heladas celosías de luz" que a las toneladas de metal del supercomputador que usamos para tratarla. En su carrera hacia la miniaturización, la informática trata de desasirse de las ligaduras de la torpe y pesada materia y, por ahí, está llegando a su límite. A las escalas actuales empieza a percibir la presencia de nuevas reglas. Más pronto que tarde, en esta aspiración por manipular información en estado puro, tendremos que comprender cómo implementarla en la estructura matemática de la Mecánica Cuántica. En la última década, la Teoría Cuántica de la Información ha experimentado un auge exponencial. Se enseña en todas las universidades y muchas empresas destinan grandes recursos a la carrera por el control de la Computación y las Comunicaciones Cuánticas.

La Mecánica Cuántica se asienta sobre varios axiomas. El primero de ellos es una afirmación acerca, no de la Naturaleza, sino de nuestra capacidad para conocerla: toda la información a la que podemos tener acceso sobre un sistema, se condensa en un objeto matemático denominado "vector de estado" o, a veces, "función de onda". Como su propio nombre indica, es un elemento de un espacio vectorial; un vector, que el lector puede imaginar pintando una flecha que sale de la esquina en una hoja de papel. El cambio de punto de vista es radical: el vector de estado es un elemento que no hace referencia a la posición. Vive en *otro* espacio, el espacio de estados, y tiene sentido en todo el

universo a la vez. Reconstruir la función de onda es aprender todo lo que se puede sobre el sistema, y por tanto, es información. Ocurre, sin embargo, que las preguntas con las que interrogamos al sistema para desvelar su estado reciben una respuesta probabilística. Si preparamos un electrón con velocidad cero, cada vez que midamos su posición obtendremos un valor distinto. Otro axioma de la Mecánica Cuántica afirma que, cada vez que medimos el estado original, éste se modifica irremisiblemente; por eso es necesario prepararlo de nuevo. Los múltiples resultados obtenidos sobre muestras preparadas sucesivamente de manera idéntica permiten reconstruir una distribución de probabilidad que nos desvelará el estado preparado.

Advirtamos cómo se ha colado sutilmente la variable temporal en el problema en la palabra *sucesivamente*. Imaginemos reconstruir una novela abriendo repetidamente al azar el libro por una página y apuntando cada vez una palabra y su ubicación. Ciertamente va a llevar tiempo. Podríamos hacer otra cosa: clonar el libro un gran número de veces y ordenar a otros tantos lectores que lo abran a la vez por una página aleatoria y reporten el resultado. En un segundo tendremos la novela completa. ¿Se podría hacer lo mismo con un electrón? ¿Tener un millón de electrones, preparar uno y *contagiar* su estado a los demás? Desgraciadamente con la función de onda esto es imposible: el denominado "Teorema de No Clonación" es uno de los resultados más sencillos de demostrar matemáticamente y cuya importancia, sin embargo, ha sido puesta de manifiesto más tardíamente.

¿Qué es la teleportación cuántica y qué tiene que ver con todo esto? La cosa se pone interesante cuando hablamos del estado de un sistema compuesto por, al menos, dos subsistemas -por ejemplo dos electrones, o dos átomos- que denominaremos A y B. Igualmente, la Mecánica Cuántica asigna al sistema conjunto, AB, un vector de estado que contiene toda la información accesible. Resulta que, en la mayoría de los casos, esta función de onda goza de una propiedad matemática denominada *entrelazamiento*. Cuando esto ocurre, medidas que un observador, Alice, efectúa sobre A, modifican el estado de AB en todo el universo a la vez. El subsistema B, no importa en qué galaxia esté, percibe la medición de A y su función de onda colapsa instantáneamente a otra, de una manera correlacionada. Dependiendo de qué resultado haya medido Alice en A, habrá respuestas que un observador, Bob, no podrá obtener nunca midiendo B. Esta correlación instantánea a distancia es un efecto claramente superlumínico, y es genuino de la Mecánica Cuántica.

¿Sería posible transferir información de forma *acausal* aprovechando el entrelazamiento? Una estrategia sencilla sería la siguiente: Alice asocia una cierta información a su selección de medida sobre A, de entre todas las posibles. Su esperanza es que Bob, al examinar su parte B, reconozca qué medida hizo Alice, y con ello adivine la información que le quiere mandar. Si esto fuera posible, la Mecánica Cuántica y la Relatividad Especial tendrían serios problemas de coexistencia. La imposibilidad de hacer esto nos refiere de

nuevo a la naturaleza probabilística de los resultados de medida. El estado B tendría que ser clonado por Bob y medido muchas veces para inferir su estado y, con ello, qué medida hizo Alice y, así, el aviso urgente que contiene dicha selección. Milagrosamente, o quizás no, el Teorema de No Clonación prohíbe esta estrategia, y protege el Principio de Causalidad en la transferencia de información.

La Teleportación Cuántica es una versión más sofisticada en la que, ahora sí, el estado cuántico de A es literalmente trasplantado a B a distancia. El entrelazamiento es, de nuevo, un ingrediente esencial. Pero ahora se necesita un tercer subsistema C, con el que ACB forme estado doblemente entrelazado de una forma muy concreta. En su laboratorio, Alice tiene una parte, AC, y mide sobre ella. Automáticamente, debido al entrelazamiento, el estado de B, en el laboratorio de Bob colapsa a un estado que aún no es el que tenía A. Si lo fuese tendríamos propagación *acausal* de información. Para completar el proceso, Bob necesita conocer el resultado de la medida de Alice sobre AC, que ésta le envía por métodos clásicos fiables (por ejemplo luz). Con este dato, Bob realiza una operación que actúa sobre el estado colapsado y... ¡bingo! el resultado es que B ahora está en mismo que tenía A originalmente. La necesidad de intercambiar una señal causal clásica, por un lado salva la causalidad y, por otro, protege el Teorema de No Clonación. En efecto, al medir A, Alice ha destruido el estado original. De lo contrario acabaríamos con dos copias del mismo estado, una en A y otra en B.

La teleportación cuántica sí que es verdadera transferencia de información y ya se lleva a cabo en el laboratorio. Las plusmarcas de distancia caen día a día y ya alcanzan satélites en órbita. El procedimiento de teleportación cuántica es uno de los "intersticios" que parece dejarnos la naturaleza para enviar información respetando a la vez, tanto la *causalidad* clásica del espacio tiempo como la *no clonación* cuántica. Si ambas propiedades saben una de la otra y se protegen mutuamente o no, es una entrada importante en la lista asuntos que quedan por comprender.



Cristales usados para almacenar fotones entrelazados. Crédito: Félix Bussières / Universidad de Ginebra. JPL-NASA
<https://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?feature=4384>

Javier Mas Solé.

Doctor en Física.

Dpto. de Física de Partículas y Materia Condensada e IGFAE.

Facultad de Física, Universidad de Santiago de Compostela.

8.4 La física hoy en los viajes temporales.

Pero lo que realmente quiero saber es... ¿quién ha estado jugando con las estrellas? Están todas en sitios equivocados para esta zona horaria, de cualquier manera. Sé que no viajé en el tiempo para llegar aquí. Puedo SENTIR el viaje en el tiempo. Si no lo supiera bien, diría que he viajado 7,000 años en el futuro. Pero lo sé bien. Así que, ¿quién ha movido las estrellas?

Dr. Who, episodio 11, temporada 9.

El 28 de junio de 2009, al mediodía, el profesor de la Universidad de Cambridge, Stephen Hawking, dio por iniciada la fiesta para los viajeros del tiempo. Al cabo de un rato, decidió terminar la fiesta y, posteriormente, enviar las invitaciones, que decían: "Está cordialmente invitado a un evento para Viajeros de Tiempo. Anfitrión: Profesor Stephen Hawking. Se llevará a cabo en la Universidad de Cambridge, Colegio Gonville y Caius, Calle Trinity, Cambridge. Lugar: 52° 12' 21" N, 0° 7' 4.7" E. Hora: 12:00 UT 06/28/2009. No es necesario confirmar." Nadie se presentó [1]. Para Hawking y otros, es una confirmación de que no existen ni los viajeros ni las máquinas del tiempo que viajen al pasado. Algunos más han mencionado que tal vez sí asistieron pero, para no afectar los eventos históricos, decidieron no entrar y mirarlo desde una prudente distancia, sonriendo. Entre los primeros podemos contar a Arthur C. Clarke, quien menciona: "El argumento más convincente contra los viajes temporales es la notable escasez de viajeros del tiempo." [2] Entre los segundos, al filósofo Roy Sorensen, quien rebate: "Claramente, el viajero del tiempo no puede persuadir a una persona razonable al decirle <Soy un viajero del tiempo>." [3]

Desde la formulación de la Teoría de la Relatividad de Albert Einstein [4], en 1905, se sabe que el tiempo y el espacio están unidos de una manera mucho más íntima que la esperada por la física de Newton. En palabras de Carl Sagan: "El espacio y el tiempo están conectados. Podemos viajar rápido en el espacio únicamente viajando rápido en el futuro. Pero, ¿y el pasado?, ¿podemos viajar hacia el pasado y cambiarlo?", se pregunta Sagan [5].

Han pasado más de 100 años desde el nacimiento de la Relatividad de Einstein y, aunque tenemos algunas pistas, realmente no tenemos una

respuesta clara al respecto. Como menciona el Profesor Gary T. Horowitz, de la Universidad de California en Santa Bárbara, ante la pregunta de si es posible a un humano viajar a través del tiempo: "No ha sido descartado por nuestras actuales leyes naturales. Investigaciones recientes han dado cierta evidencia de que la respuesta es no, pero aún no ha sido demostrado que sea imposible." [6]

El primer trabajo científico que habló de la posibilidad de viajes en el tiempo fue realizado por el filósofo y matemático Kurt Gödel en 1949, amigo cercano de Einstein, quien presentó un modelo de universo, dentro de la Teoría de Relatividad General, para celebrar los 70 años de vida de su amigo [7]. El modelo presentaba dos características extrañas: giraba sobre sí mismo y el tiempo era cíclico. El comportamiento del tiempo en el modelo de Gödel es similar a la noción de tiempo de antiguas civilizaciones como los Mayas, donde el tiempo se repite, similar a la visión de los Mapuche en Argentina, quienes dicen que el pasado está enfrente y el futuro a sus espaldas. Aunque la comunidad científica descartó el modelo de Gödel como un modelo viable de nuestro Universo, ese trabajo fue importante para mostrar que, dentro de la física de la teoría de Einstein, era posible encontrar escenarios donde pudiese haber una forma de viajar al pasado.

En 1974, 25 años después del trabajo de Gödel, Frank Tipler muestra que el trabajo de W. J. van Stockum de 1938 [8], es un cilindro material infinito que gira tan rápido que puede deformar al tiempo en su alrededor próximo. Tipler especula que si el cilindro fuera finito, también conservaría las propiedades de deformación del tiempo y que, de esta manera, sería posible construir una máquina del tiempo [9]. Con dicho cilindro, sólo necesitaríamos de una nave que se acerque a él y dirigirla alrededor del cilindro de forma adecuada para viajar al pasado. Debido a la incertidumbre sobre la posibilidad de construir una máquina del tiempo como la propuesta por Tipler, se quedó como una bonita especulación teórica.

La siguiente propuesta teórica para viajar en el tiempo surgió en diciembre de 1986, cuando Kip Thorne (Premio Nobel de Física en 2017), junto a su estudiante Mike Morris, se dieron cuenta de que podían utilizar agujeros de gusano, la especialidad de Morris, para viajar al pasado. Thorne comenta que Carl Sagan fue quien lo encaminó al estudio de los agujeros de gusano cuando éste le llamó por teléfono para pedirle ayuda y dotar a su nueva novela de respaldo científico [10]. Fue dos años después, en 1988, que finalmente presentan su trabajo (junto a Ulvi Yurtsever) sobre agujeros de gusano como máquinas del tiempo. En la introducción, los autores se preguntan: "¿Qué restricciones imponen las leyes de la física sobre las actividades de una civilización arbitrariamente avanzada?" [11]. En particular, se preguntan por la posibilidad de construir y mantener agujeros de gusano para viajes interestelares. A partir del trabajo de Morris, Thorne y Yurtsever, los agujeros de gusano han sido la apuesta más seria y más explotada para construir, de manera teórica, máquinas del tiempo que permitan viajar al humano hacia el pasado. Sin embargo, cabe preguntarse, aunque existan estos modelos, ¿existen condiciones que impidan su realización en el mundo real?

La pregunta obedece a la paradoja más famosa sobre los viajes temporales: la paradoja del abuelo, que se encuentra formulada por un chico de 17 años en una carta que le manda al editor de la revista de ciencia ficción *Astounding Stories* en 1931: "Supongamos una persona que tiene un fuerte resentimiento contra su abuelo, quien ya ha muerto para ese momento. Podría saltar a su máquina y regresar al año en que su abuelo era joven y matarlo. Y si lo hiciera, ¿cómo habría nacido el vengador?" [12] Esta paradoja, cuyo joven de 17 años fue capaz de pensar, plantea varios problemas en el escenario de la física: problemas de causalidad, de conservación de la materia y, por ende, de conservación de la energía, de la estructura dimensional del espacio-tiempo y, como se descubrió también, de la necesidad de existir materia exótica o de energía negativa. Para evitar esa y otras paradojas temporales, distintos autores han dado algunas propuestas. La primera fue hecha en 1980 por el astrofísico ruso Igor Dmitriyevich Novikov en una serie de libros y artículos donde enuncia el llamado *Principio de Auto-consistencia* el cual dice que, si acaso existieran los viajes al pasado, están prohibidas las historias (o viajes) donde se pueda asesinar a una versión joven de uno mismo, es decir, cambiar su pasado [13]. Posteriormente, en 1996, Novikov y sus colegas probaron que el Principio de Auto-consistencia se cumple siempre en sistemas físicos clásicos relativistas (es decir, sin mecánica cuántica involucrada) [14].

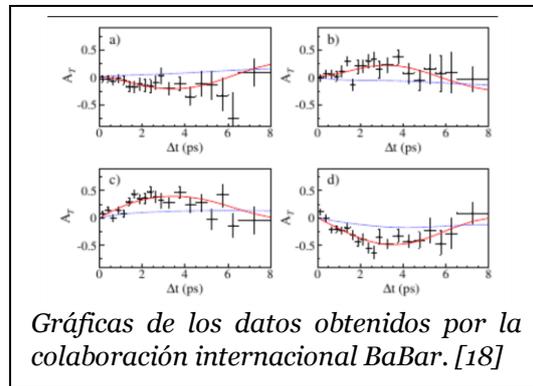
La otra viene de Hawking quien, en alguna ocasión dijo: "Lamento decepcionar a las personas como Kip que quieren regresar al pasado, ¡pero no puede hacerse con densidad de energía positiva en todas partes! Puedo demostrar que, para construir una máquina del tiempo finita, necesitas energía negativa." [15] Lo cual hizo en un artículo de 1992 donde presenta la llamada *Conjetura de Protección Cronológica*: "Las leyes de la física no permiten la aparición de curvas cerradas tipo tiempo" [16], lo que es lo mismo a decir a que la naturaleza no permite la existencia de máquinas del tiempo que viajen al pasado. ¿Hawking tendrá razón?

Afortunadamente la naturaleza ya nos ha sorprendido con el mundo microscópico de las partículas subatómicas y de alta energía que resulta tener su propia magia y sus propias reglas. Cuando los anteriores (Thorne, Novikov, Hawking, entre otros) se han cuestionado los viajes en el tiempo para el mundo cuántico, ninguno ha podido dar una respuesta clara al respecto. A la cuántica le gusta eludir las respuestas deterministas.

Desde 1964, con la observación sobre la descomposición de una partícula llamada Kaón, se tenía evidencia indirecta de que la física en el tiempo es diferente para este mundo. Los procesos que serían reversibles en el mundo clásico, no lo son en el mundo cuántico. En este mundo, si las partículas pudieran viajar al pasado, generarían un mundo diferente del que vinieron. Además del mundo cuántico existe el mundo estadístico, aquel compuesto de muchos pequeños elementos que en su conjunto dan un comportamiento macroscópico. En este mundo existe lo que el astrofísico Arthur Eddington llamó "la flecha del tiempo" en 1927 [17].

Al día de hoy, 40 años después de la creación de COSMOS, podemos mencionar los logros de la manipulación del tiempo en el mundo cuántico:

2012 – Se observa de manera directa en el laboratorio el rompimiento de simetría T. Es decir, se observó que las partículas, llamadas mesones B, se comportan diferente cuando van hacia adelante en el tiempo que cuando van hacia atrás. Un muy ingenioso experimento elaborado por la Colaboración internacional BaBar que, de facto, invirtió la dirección del tiempo para observar el experimento [18].



Gráficas de los datos obtenidos por la colaboración internacional BaBar. [18]

2013 – Se empiezan a realizar simulaciones experimentales de elementos cuánticos, llamados qbits, que tienen curvas temporales cerradas (maquinas del tiempo) y son un paso hacia la construcción futura de máquinas cuánticas que tengan mecanismos internos de viajes temporales cíclicos [19].

2017 – Investigadores empezaron a utilizar cristales y el proceso de termalización para estudiar mecanismos cuánticos que desafían la flecha del tiempo [20].

2019 – Se observa el flujo de calor de una fuente fría a una caliente a nivel cuántico. En el mundo clásico siempre pasa al revés. Lo anterior significa haber logrado invertir, en cierto sentido, la flecha del tiempo [21].

Además de los anteriores, hay mucho trabajo realizándose actualmente que tienen que ver con el mundo cuántico y la inversión del tiempo, tanto a nivel experimental como a nivel teórico y, todo esto, parece indicar lo que el profesor Horowitz comentaba al inicio de este trabajo respecto a la evidencia de que un humano no puede viajar al pasado, aunque parezca que el mundo cuántico sí puede.

El optimismo científico se demuestra con el proyecto ruso RadioAstron [22] que usó al telescopio espacial Spektr-R y al terrestre en Pushino, que estuvo tomando datos del universo desde 2011 hasta 2019 intentando, entre otras cosas, detectar agujeros de gusano, es decir, las más buscadas máquinas del tiempo.

Esperemos que pronto podamos ver en el periódico las noticias de pasado mañana.

Referencias y bibliografía:

[1,2,3,...] Consultar en: <https://cienciayelcosmosdelsigloxxi.blogspot.com/2020/01/la-fisica-hoy-en-los-viajes-temporales.html>

Gustavo Alfredo Arciniega Durán.

Doctor en Física.

Investigador Postdoctoral en la FES Aragón, UNAM.

8.5

La velocidad de la luz y la Teoría de la Relatividad de Einstein.

Navigare necesse est

En 1865 J.C. Maxwell presentó sus famosas ecuaciones que unificaban la descripción matemática de los fenómenos eléctricos y magnéticos y a la vez indicaban de forma muy clara la importancia física del concepto de campo. Una de las consecuencias más impresionantes de las ecuaciones de Maxwell era la predicción de que los campos electromagnéticos podían propagarse en el vacío en forma de ondas electromagnéticas a una velocidad $c = 299\,792\,458$ m/s que no es sino la velocidad de luz.

Como nos recuerda Carl Sagan en el capítulo VIII de *Cosmos*, algunos años después un jovencísimo Albert Einstein se preguntaba qué pasaría si alguien pudiera viajar al rebufo de una onda electromagnética, es decir, también a la velocidad de la luz (*Gedankenexperiment*). La conclusión a la que llegó es que el campo electromagnético que observaría no sería compatible con las ecuaciones de Maxwell. Al menos si uno aplicaba la famosa ley de composición (suma) de velocidades de Galileo para pasar de un sistema de referencia a otro.

Ya en 1905 Einstein presentó la solución del problema en el contexto de la Teoría de la Relatividad Especial (RE). Las consecuencias de dicha teoría incluían una revisión profunda de las nociones de espacio y tiempo, que pasaban a depender, de una manera objetiva¹⁹, del observador. Otra de las consecuencias era que el mantenimiento del postulado de causalidad (la causa debe preceder al efecto para todos los observadores), implicaba la imposibilidad de que ninguna onda, partícula o información pudiera propagarse de un punto a otro del espacio a una velocidad mayor que la velocidad de la luz c . En principio uno puede considerar una partícula que se desplazara a una velocidad V mayor que c (*taquiones*), pero en ese caso nunca podrían decelerarse por debajo de la velocidad de la luz. Y lo que es más importante, la

¹⁹ El nombre, *Teoría de la Relatividad*, tal vez no es muy apropiado porque sobre-enfatiza el papel de las características físicas dependientes del observador sobre las objetivas o invariantes, como la estructura causal de los diferentes eventos en el espacio-tiempo. Es muy importante no confundir *relatividad* con *subjetividad*.

existencia de estos *taquiones* (nunca observados en la naturaleza), permitiría la violación del principio de causalidad con las consecuencias filosóficas que esto acarrearía.

En este punto tal vez fuera conveniente recalcar que la imposibilidad de superar la velocidad de la luz no es un problema técnico que pueda ser resuelto en el futuro, o que haya podido ser resuelto ya por una supuesta civilización extraterrestre. No es como el problema de superar la velocidad del sonido, sino una imposibilidad fundamental, íntimamente conectada con el principio de causalidad.

A escala humana la velocidad de la luz parece enorme. Acostumbrados en la vida cotidiana a medir las velocidades en km/h, 300 000 km/s parece una velocidad descomunal. Sin embargo, ocurre que nuestro universo también es enorme. La luz tardaría 134 ms en recorrer una distancia igual a la longitud del Ecuador terrestre, la Luna se encuentra 1.28 segundos luz de la Tierra, la luz del Sol tarda 8.32 minutos (unidad astronómica) en llegar a nuestro planeta. El sistema estelar más próximo al Sistema Solar, Alfa Centauri, se encuentra a 4.37 años luz de nosotros. La Vía Láctea tiene un tamaño del orden de 100 mil años luz. Su vecina la galaxia Andrómeda se encuentra a 2.6 millones años luz. Finalmente, los límites del universo observable se hallan a 46.5 mil millones de años luz, a comparar con los 13.8 mil millones de años, que es la distancia que ha podido recorrer la luz desde el *Big Bang* hasta el momento presente.

Resulta evidente entonces que el límite de la velocidad de la luz, unido a estas enormes distancias, parecen complicar enormemente la posibilidad de viajar por el cosmos en una vida humana, aún suponiendo una tecnología de naves espaciales lo suficientemente avanzada como para permitir alcanzar velocidades próximas a las de la luz. En realidad, la propia RE alivia un poco el problema. Resulta que hay un efecto relativista que hace que el tiempo transcurrido en el interior de una nave que se moviera a velocidades próximas a c , y que partiendo de la Tierra visitara una estrella más o menos cercana y retornara a nuestro planeta, sería significativamente menor que el tiempo transcurrido en la Tierra. Así, en el mejor de los casos, los valientes cosmonautas podrían encontrarse con un mundo inexistente o al menos distópico, como le ocurrió a Hal Bregg, el inolvidable personaje de Stanislaw Lem, que, tras una aventura espacial de 10 años en tiempo propio, se encuentra con una extraña civilización humana para la que han transcurrido 127 años desde su partida. De esta forma parece que la RE impone serias limitaciones a los viajes a otros sistemas interestelares, al menos si uno tiene la intención de regresar alguna vez a nuestro querido planeta azul y encontrarlo más o menos como lo dejó.

Sin embargo, no está todo perdido todavía. El mismo Einstein, en su intento por incorporar la gravitación a su teoría, introdujo en 1915 la Teoría General de la Relatividad (RG). Como es bien sabido, en dicha teoría el campo

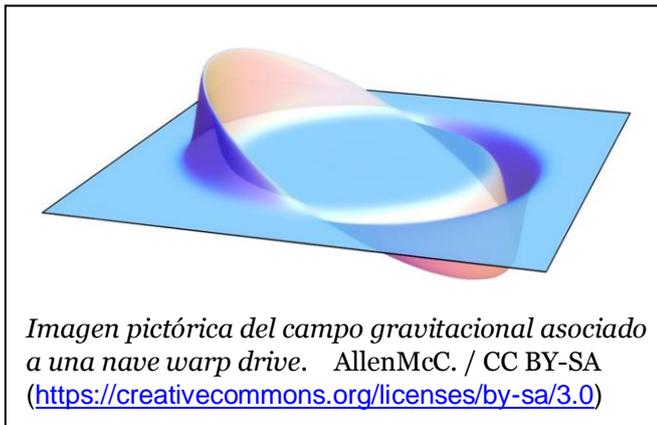
gravitatorio se interpreta como una deformación geométrica del continuo espacio-temporal inducida por la acumulación de materia a través de las famosas ecuaciones de campo de Einstein. Aquí de nuevo nos encontramos el límite de la velocidad de la luz pero solamente a nivel local. A nivel global el espacio-tiempo puede en principio presentar propiedades emergentes exóticas (topológicas).

Una de las muchas puertas que abrió la RG es la posibilidad de una descripción teórica de la evolución del universo. Hoy por hoy (2020) pensamos que el universo se encuentra en una expansión acelerada, más o menos isotrópica, de tal manera que desde cualquier punto se observa una recesión galáctica creciente con la distancia (Ley de Hubble). De hecho, a partir de cierta distancia del orden de decenas de miles de millones años luz, la velocidad a la que se alejarían de nosotros las galaxias sería mayor que c . ¿Contradice esto el límite de la velocidad de la luz? En realidad no, la interpretación moderna es que las galaxias lejanas no se alejan de nosotros a esas enormes velocidades desplazándose sobre el espacio sino más bien es el propio espacio el que se está expandiendo, encontrándose las galaxias, salvo por relativamente menores movimientos peculiares, en reposo con respecto al espacio-tiempo cosmológico.

La posibilidad de topologías exóticas en el continuo espacio-temporal de la RG permite, al menos en principio, solventar globalmente el límite (local) de la velocidad de la luz mediante la introducción de configuraciones tales como los *Wormholes* (agujeros de gusano o puentes Einstein-Rosen) que conectarían diferentes universos o tal vez, formando una especie de atajo, diferentes partes del mismo universo. De cara a escribir su famosa novela *Contact*, Carl Sagan se puso en contacto con Kip S. Thorne (premio Nobel de Física 2017 por sus contribuciones al descubrimiento de las ondas gravitacionales en los detectores LIGO) para que estudiara seriamente la posibilidad de utilizar agujeros de gusano para realizar viajes espaciales. Thorne y otros científicos se tomaron el asunto en serio y encontraron importantes resultados basados en la RG sobre este asunto. Aunque todavía hay debate al respecto, la existencia de dichos puentes utilizables para viajar (*atravesables*) parece requerir la existencia de materia exótica (con condiciones sobre su energía poco habituales). Más recientemente Thorne asesoró, con el exquisito detalle técnico que le caracteriza, al director de cine Christopher Nolan para la realización de su famosa película *Interstellar* basada en una idea similar.

Otra interesante posibilidad para batir el límite de la velocidad de la luz son los llamados *Warp Bubbles* o *Warp Drives*. Aunque introducidos previamente en el contexto de ficción científica, en 1994 Miguel Alcubierre consideró seriamente la idea de velocidad hiper-rápida en el contexto de la RG. De hecho encontró métricas (campos gravitacionales) que permitían aparentemente desplazar una nave a velocidades arbitrariamente altas. Sin

embargo, un análisis detallado de estas soluciones demuestra que en realidad el objeto se encontraría en reposo con respecto al espacio. Mediante una ingeniosa expansión del espacio detrás de la nave (similar a lo que ocurría con las galaxias lejanas en la expansión del universo) y una contracción justo delante de la nave, el resultado neto es un movimiento a velocidad mayor que c . Lamentablemente, como en el caso de los *Wormholes*, la distribución material que conduciría a este tipo de campo gravitacional según las ecuaciones de campo de Einstein debería tener unas características energéticas muy ajenas a las formas de materia conocidas.



Finalmente cabe mencionar que la RE y la RG permiten los viajes en el tiempo pero sólo hacia el futuro (¡véase el caso de Hal Bregg!). La RG permite también en principio la existencia de espacios-tiempos con topologías no triviales en la dirección temporal (bucles temporales) que harían posible los viajes al pasado. Sin embargo estos espacios conducen a violaciones (globales) del principio de causalidad y dan lugar a infinidad de paradojas que hacen inconsistente la elaboración de un relato (historia) coherente sin introducir otros elementos más allá de la RG.

En todo caso, como seguramente haría el gran Carl Sagan, lo mejor será mantener el corazón caliente y el cerebro frío para disfrutar de las maravillas que la naturaleza y el ingenio humano puedan ofrecernos en el futuro.

Referencias:

[1] *Interstellar*, directed by Christopher Nolan, screenplay by J. Nolan and C. Nolan. © Warner Bros, 2014.

Bibliografía:

- (1) Carl. Sagan, 1980, *Cosmos*, New York, Random House.
- (2) C.W. Misner, K.S. Thorne and J.A. Wheeler, 1973, *Gravitation*, W.H. Freeman, San Francisco.
- (3) Carl Sagan, 1985, *Contact*, Simon and Schuster, New York
- (4) Stanislaw Lem, *Retorno de las estrellas*, 1978. Bruguera.
- (5) Kip. S. Thorne, *The Science of Interstellar*, 2014, W.W. Norton and Company, New York.
- (6) Miguel Alcubierre and Francisco S. N. Lobo, 2017, *Wormholes, Warp Drives and Energy Conditions*. *Fundamental Theories of Physics*, vol 189. Springer.

Antonio Dobado González.

Catedrático del Departamento de Física Teórica.
Universidad Complutense de Madrid.

8.6

Reflexiones sobre la velocidad de la luz durante el confinamiento.

Ángela Valdés; algún momento entre el 15 de marzo y el 15 mayo 2020.

¿Cómo determinar que un reloj es más preciso que otro?, ¿cómo saber si los tic-tac de un reloj son regulares?, ¿y cuánto de regulares? Mis preguntas ya tienen implícito que existe cambio en la naturaleza y que el ritmo de este cambio puede medirse. Por algo hay que empezar; además esta manera de pensar encaja bien con la noción intuitiva de tiempo que nuestra civilización tecnológica ha ido adquiriendo.

Según el profeta Newton, existe un reloj divino que marca el transcurso del tiempo para todos los fenómenos y seres del universo. Para saber si un reloj real es perfectamente preciso solamente tenemos que compararlo con el reloj divino. Ahora, el reloj divino es inasible, solamente comportamientos idealizados seguirían ese ritmo. Con un reloj real –y por reloj real entiendo cualquier fenómeno que dé lugar a un comportamiento que se nos antoje bastante regular– lo máximo que puedo hacer es compararlo con otros relojes reales. Si veo que un reloj real se comporta muy parecido a otros relojes reales del mismo tipo (pensemos por ejemplo en distintos relojes de cuarzo), nos empieza a gustar ese tipo de reloj. Si basándonos en ellos resulta además relativamente simple entender por qué otros tipos de relojes no son tan regulares como ellos, pues más se acerca nuestro tipo de reloj real al ideal buscado. El reloj divino se vería como el último peldaño (inalcanzable) de una escalera infinita de relojes reales cada vez más precisos. Así, la descripción Newtoniana del mundo se basa en un elemento, el reloj divino, cuya existencia real nunca podré conocer... ¡un poco desasosegante!

Un momento, ¿y si transliterara los tic-tacs de mis relojes en longitudes? Para cada tic-tac de cada reloj real podría construir una varilla de longitud precisa las cuales podría comparar poniéndolas juntas. Para hacer esa transliteración solamente necesito encontrar un objeto que cuando lo empuje viaje siempre a la misma velocidad; haciéndolo viajar el tiempo de un tic-tac podría usarlo para construir su correspondiente varilla. Pero, vuelvo a tener problemas. ¿Cómo me aseguro de que el objeto viaja siempre a una velocidad fija?, ¿con qué la mido?, ¿y qué tipo de objeto podría ser? Volvemos a

enfrentarnos a un problema similar al anterior, ahora con la medida de la velocidad en lugar de la medida del tiempo. Ahora bien, según el profeta Einstein un objeto tal parece existir. En una descripción abstracta, el objeto es la propia "causalidad" cuando esta se hace extrema: cuando intentamos enviar información de un lugar a otro en la forma más rápida posible encontramos que hay una velocidad máxima insuperable; esta velocidad es a la que se mueve la luz y las ondas gravitatorias (también los neutrinos si no tuvieran masa), es lo que se conoce como *la velocidad de la luz*. Simplificando la descripción, podemos decir que ese objeto milagroso es la luz (o los fotones de los que se compone). Pero en mi búsqueda de precisión objetiva, demostrable, ¿cómo puedo saber que la luz se mueve siempre y de forma exacta a la velocidad de la luz? ¡Pues no parece que lo podamos saber! ¿Al final, el profeta Einstein solo nos ofreció unos Dioses distintos? La visión de Einstein del mundo nos invita sin embargo a un giro inesperado. Dado que la causalidad y la luz juegan un papel tan determinante en la física (casi todo lo que observamos son fenómenos electromagnéticos), se puede tomar a la velocidad de la luz como definitoria del ritmo del tiempo. Podemos pensar que si cambiara la velocidad de la luz cambiarían de forma acorde todos los ritmos del cosmos, incluidos nuestros bioritmos, incluso la velocidad de nuestros pensamientos. Así, se puede tener la tranquilidad de que la velocidad de la luz será siempre exactamente igual, sin sufrir por no poderla medir con seguridad: aunque nuestra regla se estire siempre tendrá las marcas 0 y 1 metros en sus extremos.

La física moderna ha sintetizado el comportamiento del cosmos en una serie de ecuaciones dinámicas para campos abstractos con comportamientos causales, es decir, que tienen un parámetro con sabor a tiempo y unas velocidades máximas de propagación. Sin embargo, el tiempo que miden los relojes reales no es directamente ese parámetro temporal sino una cantidad que tiene que desentrañarse de las ecuaciones dinámicas y cuyo comportamiento sigue las reglas de la relatividad (1, 2).

Julio López; algún momento entre el 15 de marzo y el 15 mayo 2020.

Tras años de investigación y observación la humanidad ha deducido que una gran parte de las estructuras y fenómenos que vemos son debidas al hecho electromagnético: la existencia de cargas y campos electromagnéticos relacionados según las sintéticas leyes de Maxwell. Una carga en movimiento (p. ej. un electrón o protón) genera a su alrededor un campo electromagnético, el cual es percibido por otras partículas cargadas. Según las ecuaciones de Maxwell si una carga se desplazara a la velocidad de la luz esta generaría un campo electromagnético singular (infinito). Armados solamente de las ecuaciones de Maxwell podemos llegar a la conclusión de que las partículas cargadas tienen como límite viajar a la velocidad de la luz (la velocidad de la luz aparece en las ecuaciones de Maxwell como la velocidad de propagación de las ondulaciones electromagnéticas en el vacío).

Pero, ¿por qué los neutrinos –partículas elementales sin carga eléctrica– tampoco parece que puedan viajar a velocidades mayores que la luz? (de hecho se observa que los neutrinos viajan siempre a una velocidad indistinguible de la velocidad de la luz, lo cual se entiende que es debido a su pequeñísima masa). Recientemente también se ha comprobado que las ondas gravitatorias viajan también a la velocidad de la luz (como propuso Einstein). ¿Por qué estas entidades tan distintas de la luz viajan a la velocidad de la luz? Parece haber una sola causalidad universal (es decir, una velocidad máxima para toda entidad física), ¿pero por qué? Para poder dar una explicación es necesario ponerse primeramente en un marco en el que las cosas puedan funcionar de otra forma. Por ejemplo, imaginemos que el mundo fuese como nos decía Newton, un mundo donde las partículas pueden viajar a cualquier velocidad. Se puede demostrar que a partir de partículas elementales a la Newton se pueden construir cuasi-partículas cuya velocidad de propagación es finita y con límites infranqueables. Es como construir una onda solitaria en el océano: las moléculas de agua no viajan con la onda, solamente oscilan en un pequeño entorno y transmiten su oscilación a partículas contiguas; la transmisión de la oscilación de entorno en entorno se materializa en el movimiento de la onda. La onda es un fenómeno colectivo que tiene una velocidad de propagación finita porque involucra muchos elementos que tienen que hablarse entre sí y eso tarda un tiempo característico. La onda no puede viajar más rápido que su velocidad característica pues perdería su propia esencia.

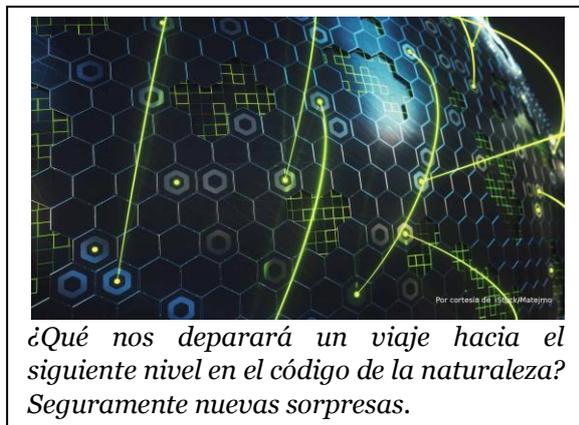
Aunque ahora mismo no seamos capaces de discernir ninguna estructura en lo que llamamos partículas elementales (de ahí que las llamemos elementales), no deja de ser curioso que estas se comporten de forma asimilable a cuasi-partículas de un mundo Newtoniano (de hecho todas las partículas elementales exhiben propiedades ondulatorias y se las describe como excitaciones de campos abstractos, los cuales podrían ser perfectamente efectivos y no fundamentales). Para que de un mundo Newtoniano pueda surgir un cuasi-mundo efectivo como el que observamos, es probable que se necesite que exista una excitación (o cuasi-partícula) primaria de tal forma que el resto de las excitaciones que conforman nuestro mundo efectivo hereden su causalidad. Hablando en un modo ilustrativo no literal, imaginemos que los neutrinos fueran nuestras cuasi-partículas primarias. Los fotones que componen la luz podrían ser cuasi-partículas compuestas a su vez por un estado ligado de un neutrino con un anti-neutrino. Lo mismo podría suceder con la propia gravedad y ser generada por otro tipo de ligazón entre neutrinos y anti-neutrinos. De hecho, en principio a partir de partículas de espín $\frac{1}{2}$, como son los neutrinos, se pueden construir agregados de espín 1 como los fotones y de espín 2 como los gravitones (el espín de una partícula es asimilable a la rotación intrínseca que posee y ser entero o semientero cambia por completo la forma en que se comporta para formar agregados). Es interesante estudiar en detalle si el mundo en el que vivimos podría ser así. Un tiempo Newtoniano y un espacio absoluto serían simplemente un andamiaje para codificar la

existencia de cambio y extensión espacial en la naturaleza. El tiempo que medirían los relojes reales, sistemas complejos compuestos de cuasi-partículas y sometidos a la causalidad efectiva, se regiría por leyes relativistas. De hecho, el experimento de Michelson-Morley no demuestra que el éter es inexistente, como se puede leer hasta en el maravilloso "Cosmos" de Carl Sagan. Un interferómetro constituido de cuasi-partículas no sería capaz de discernir si se mueve o no con respecto a un referencial absoluto Newtoniano (3). Al contrario que la interpretación tradicional, el experimento de Michelson-Morley se puede tomar como evidencia de que la luz que usa y el entramado de partículas que constituyen los brazos del interferómetro siguen una misma física efectiva que ya no ve el andamiaje subyacente.

Quizá sí se pueda viajar a velocidades mayores que la luz, pero solo aquellos cuerpos cuya corporeidad no sea de nuestro mundo efectivo, sino de un mundo subyacente del que todavía sabemos muy poco. Además de viajes a otros lugares del cosmos, tenemos pendiente un viaje, quizá todavía más difícil pero tremendamente atractivo, al código fundamental de la naturaleza, tal vez hecho tan solo de ceros y unos.

Arturo Quintana; en algún momento después del 15 mayo 2020.

Mis queridos Ángela y Julio. Gracias por mandarme vuestras reflexiones de estos días. Su lectura me ha generado una amplia sonrisa ¡os parecéis mucho más de lo que os gustaría reconocer! Finalmente no coincidimos durante el rodaje de Territorio gravedad (4), mía culpa, pero me han dicho que interaccionamos bastante en la gran pantalla. Ya sea en la realidad o en la ficción, ¡hasta pronto amigos!



Lecturas adicionales:

- (1) La gravedad, Carlos Barceló, Edt. Catarata, 2018.
- (2) The arguments of time, Ed. Jeremy Butterfield, OUP/British Academy 2006 (publicación técnica en inglés)
- (3) C. Barceló y G. Jannes, A real Lorentz-Fitzgerald contraction, Found. Phys. 38, 191 (2008) (publicación técnica en inglés).
- (4) Territorio gravedad, Serie de divulgación científica para televisión de próximo estreno (siguenos en nuestro facebook www.facebook.com/territoriogravedad o instagram www.instagram.com/territoriogravedad/)

Carlos Barceló.

Científico Titular del CSIC, Instituto de Astrofísica de Andalucía.
Director Científico de Territorio gravedad.

8.7

Sueños de viajes espaciales a velocidad infinita.

Viajar por el espacio, más que viajar en el tiempo, es viajar al futuro.

Cuando era niño jugaba a que venía de otro planeta donde una civilización más avanzada que la terrestre tenía la capacidad de viajar sobre un rayo de luz. No a la velocidad de la luz sino infinitamente más rápido. Era tan fácil como señalar a Sirio con una linterna y de pronto señalar Antares. En el extremo de ese rayo de luz viajaba nuestra nave imaginaria. Así de rápido, cruzando miles de años luz de un rincón a otro de la galaxia. Sueños de niños. ¿Quién no ha soñado con viajes extraordinarios? Soñar



Visión artística del espíritu de la misión Voyager de la NASA. Los Voyager están actualmente explorando una región inexplorada ubicada mucho más allá de los planetas que ahora conocemos ..., una región que forma el límite exterior de la burbuja solar. Están en un viaje que finalmente pasará al espacio interestelar. Crédito Imagen: NASA

con levantar vuelo, como Leonardo Da Vinci, o con llegar a la Luna en un cohete, como lo soñaron Robert Goddard y Konstantin Tsiolkovsky, o viajar a las estrellas, como soñaba Carl Sagan. Un joven Albert Einstein soñaba con algo más extraordinario que un viaje interestelar. Siendo adolescente se imaginaba cómo se vería una onda de luz si pudiéramos viajar junto a ella. Estos "experimentos mentales" (en alemán, "Gedankenexperiment"), serían práctica habitual en el fecundo trabajo intelectual de Einstein. La respuesta a este experimento en particular lo llevaría hacia una de las mayores revoluciones científicas de todos los tiempos, transformando las viejas nociones absolutas de tiempo y espacio.

La relatividad de Einstein.

Einstein descubrió que el tiempo y el espacio se encuentran íntimamente ligados, formando el tejido del universo, el continuo espacio-tiempo. Esta visión de la naturaleza surge de la Teoría de la Relatividad Especial (R.E.), a partir de solo dos postulados muy simples que tienen profundas consecuencias:

- 1) las leyes de la física son las mismas en cualquier sistema de referencia;
- 2) la velocidad de la luz en el vacío es una constante que no depende del movimiento de la fuente de luz ni del movimiento del observador.

Una consecuencia de los postulados de la R.E. es que el espacio-tiempo es flexible. Que tiempo y espacio dependen de la velocidad del observador y que nada puede viajar más rápido que la luz. Para un viajero las distancias se contraen y su reloj avanza más lento. Estos cambios de tiempo y espacio son extremadamente pequeños cuando nos movemos a velocidades mucho menores que la velocidad de la luz. Para apreciarlo se necesitan instrumentos muy sensibles. En 1971, Hafele y Keating utilizaron relojes atómicos gemelos, uno en tierra y otro montado sobre un avión, y confirmaron que el reloj que había viajado en el avión era algunos nanosegundos más "joven" que su gemelo que había permanecido en reposo en tierra²⁰. Carl Sagan ilustró esta célebre "paradoja de los gemelos" en el episodio 8 de su serie de televisión Cosmos (no así en el libro), con dos hermanos gemelos situados en la villa Da Vinci. Mientras un hermano permanece sentado en una plaza, el otro hace un viaje fantástico en su moto, moviéndose a una velocidad cercana a la velocidad de la luz. Cuando el hermano viajero regresa después de pocos minutos, encuentra que su hermano envejeció varios años. Viajar por el espacio, más que viajar en el tiempo, es viajar al futuro.

El GPS.

Carl Sagan se hubiera deleitado de saber que en nuestros bolsillos llevaríamos un testigo permanente de la genialidad de Einstein. El GPS sería inútil sin la R.E. Cuando enciendes el teléfono y activas tu ubicación, el aparato empieza a recibir las señales de algunos satélites de GPS. Cada señal llega con diferentes retrasos de tiempo, a partir de los cuales se determina la distancia a cada satélite y a partir de allí se obtiene la ubicación exacta. Pero los satélites se están moviendo con respecto a la Tierra, por lo que los relojes de los satélites atrasan con respecto a los relojes en la Tierra. Si esto no se tuviera en cuenta para diseñar el GPS, la posición tendría errores de varios kilómetros¹.

Un viaje a Sirio.

Alcanzar la velocidad de la luz requiere una energía infinita. Esta es otra consecuencia de la R.E. para los objetos con masa, la cual impone un límite

²⁰ El experimento de Hafele y Keating, así como el sistema GPS, tienen en cuenta la Teoría de la Relatividad General de Einstein, de la cual no hablamos en este artículo.

para los viajes espaciales. Un límite a tantos sueños de alcanzar las estrellas. Imagínate que pudieras viajar a una velocidad similar a la velocidad de la luz, que tuviéramos a disposición alguna de las fantásticas naves de fusión que describe Carl Sagan en el capítulo 8 de Cosmos. Naves que con enormes cantidades de energía nuclear logran alcanzar velocidades cercanas a la de la luz. Aún con esa tecnología (por ahora imposible), un viaje a las estrellas más cercanas podría requerir siglos.

Consideremos a modo de ejemplo un viaje a la estrella Sirio, que se encuentra a la modesta distancia de 8,61 años-luz. Esto significa que nada pueda viajar hasta Sirio en menos de 8,61 años. Supongamos que puedes viajar en una de las fantásticas naves de fusión a una velocidad que es tan alta como el 99,5% de la velocidad de la luz (se anota 0,995c). Para simplificar dejaremos a un lado el tiempo que la nave demora en acelerar para alcanzar esa velocidad, entonces el tiempo que demora en llegar a Sirio es simplemente $8,61/0,995 = 8,65$ años. Es casi el mismo tiempo que demora la luz porque tu nave se mueve casi a la velocidad de la luz. De todos modos es mucho tiempo para un viaje. Pero esto solo es cierto desde la perspectiva de las personas que se quedan en la Tierra. Para ellos ciertamente tu viaje hasta Sirio demora 8,65 años. Sin embargo desde tu perspectiva el viaje es mucho más corto. De acuerdo con la R.E., a la velocidad que estás viajando, el tiempo en tu nave transcurre 10 veces más lento que en la Tierra, de modo que para ti el viaje demora apenas 0,865 años (solo 316 días). El espacio también se ve alterado. Con respecto a la nave en movimiento, la distancia de la Tierra a Sirio se ve reducida en el mismo factor de 10. Es decir que desde la nave, la distancia de la Tierra a Sirio es apenas 0,861 años-luz. Todo esto es muy real y lo sorprendente es que para el viajero pasaron realmente 316 días, no solamente en sus relojes y en todos los sistemas de su nave, sino también en su tiempo biológico. Él ha envejecido solamente 316 días. Sin embargo en la Tierra realmente han pasado 8,65 años. Mientras estuvo viajando esos 316 días, sus amigos en la Tierra celebraron 8 años nuevos, envejecieron 8,65 años y algunos tuvieron hijos que ya están en la escuela. Ese es el precio a pagar para un viajero estelar, tal como ocurre en la paradoja de los gemelos, viajar muy rápido hace que el resto del universo envejezca muy rápido. Viajar por el espacio es viajar al futuro, no nuestro futuro, sino el futuro del resto del universo.

Un viaje al infinito.

Cuando todavía estás en la Tierra, antes de poner en marcha tu nave, haces algunos cálculos sencillos. Sabes que Sirio está a 8,61 años-luz de la Tierra. Es lo que se denomina la distancia propia, es decir, la distancia medida en un sistema de referencia fijo a la Tierra. También sabes que la duración real de tu viaje, para ti y todo lo que viaje contigo en la nave, será de apenas 0,865 años. Es lo que se denomina el tiempo propio. Entonces piensas que tiene mucho sentido calcular la velocidad propia, también llamada celeridad, que es el

cociente entre la distancia propia y el tiempo propio. Entonces sorprendentemente la celeridad para tu viaje a Sirio resulta ser 10 veces la velocidad de la luz (es decir $8,61/0,865$). Increíble. Pero por supuesto que no estamos rompiendo ninguna ley física, por el contrario, todo esto es consecuencia de la misma R.E. La celeridad no tiene límite, puede ser mucho mayor que la velocidad de la luz y esto nos está diciendo que si lográramos viajar a casi la velocidad de la luz, podríamos llegar a cualquier rincón del universo en un tiempo muy breve, casi como si viajáramos a velocidades infinitamente altas.

El valor de la celeridad es casi indistinguible del valor de la velocidad cuando esta es mucho menor que la velocidad de la luz. Incluso para un cohete la celeridad coincide con la velocidad hasta la décima cifra. En cambio a velocidades cercanas a la velocidad de la luz, la celeridad se hace infinitamente grande. Los fotones (las partículas de luz) son de las pocas cosas que se mueven a la velocidad de la luz. Esto significa que la celeridad de un fotón es infinita. Y es así porque a la velocidad de la luz el tiempo propio del fotón fluye tan lento que simplemente no transcurre. Se podría decir que el "reloj interno" de un fotón está "paralizado". De este modo los fotones viajan de un rincón a otro del universo sin haber envejecido ni siquiera una fracción de segundo.

La genial R.E. de Einstein, la misma que nos impone la velocidad de la luz como un límite infranqueable, es la misma que nos ofrece la libertad de viajar por el universo con celeridad casi infinita. Lejos de ser vencido por la R.E., el sueño de viajes interestelares sigue vigente gracias a la R.E. Eso sí, el precio a pagar por esos viajes (además de la energía casi infinita requerida) es que el resto del universo envejece muchísimo más rápido que nosotros, incluyendo a toda la humanidad que dejamos en la Tierra. Pero podemos imaginar un futuro en el que no debemos dejar atrás a la humanidad. Un futuro en el que una colonia humana tenga la posibilidad de viajar en una flota estelar a velocidades cercanas a la de la luz. Esa colonia podrá navegar por el espacio interestelar con una celeridad de miles de veces la velocidad de la luz, llevando a la humanidad en un suspiro, a los mundos más fantásticos del cosmos.

Martín Monteiro.

Profesor de Física.

Coordinador del Laboratorio de Física.

Facultad de Ingeniería, Universidad ORT Uruguay.

8.8 Otros mundos.

Carl Sagan explicó en la introducción de su libro *Cosmos* [1] que «esta obra y la serie televisiva evolucionaron conjuntamente. Pero los libros y las series televisivas tienen públicos algo diferentes y permiten enfoques distintos». Este hecho se pone de manifiesto en multitud de ocasiones, con contenidos ausentes en un producto pero presentes en el otro, o cambios en la narrativa e incluso en la distribución del material entre los distintos capítulos. Uno de los capítulos más celebrados de la serie es el VII, «La espina dorsal de la noche» («El espinazo de la noche» en el libro), en el que Sagan ejecuta el salto desde el espacio cercano, el Sistema Solar, hasta el reino interestelar, y lo hace estableciendo un paralelismo entre ese espacio cercano y su barrio de Nueva York. Son especialmente memorables las escenas en las que Sagan regresa a la escuela en la que estudió primaria y explica al alumnado del año 1979 lo que se sabía entonces, y lo que se esperaba descubrir más adelante, sobre la existencia real de otros mundos, de otros planetas, alrededor de otras estrellas. La visita al colegio de primaria brinda un ejemplo del tipo de materiales que no tenían cabida en el libro, aunque una parte de sus contenidos (incluida alguna imagen tomada de la serie) se trasladaron al capítulo VIII de la obra impresa, «Viajes a través del espacio y del tiempo».

Sagan plantea con gran énfasis y con mucha eficacia el interés por descubrir otros mundos planetarios en el universo, el estado del campo de investigación en su momento y las perspectivas de futuro. La explicación se prolonga en el capítulo VII de la serie entre los minutos 48 y 52, aproximadamente, y se centra en métodos coronográficos (ocultación de la luz estelar mediante un dispositivo artificial para revelar planetas débiles cercanos) o astrométricos (oscilación de la estrella en el plano del firmamento debido a la atracción gravitatoria de los planetas). El autor no podía imaginar entonces que la tecnología avanzaría hasta el extremo de permitir la medida de velocidades radiales estelares con precisiones de pocos metros por segundo, lo que ha convertido este método en uno de los recursos principales para el estudio de planetas extrasolares. Tampoco llegó a prever que los planetas son tan abundantes que producen tránsitos detectables por medio de fotometría de precisión. Pero Sagan sí tenía claro el fondo del asunto y, con firmeza, anunció lo siguiente ante aquel público escolar:

"Para cuando seáis vosotros tan viejos como yo se sabrá si hay planetas girando alrededor de las estrellas o no. Podemos llegar a conocer decenas, o incluso cientos de otros sistemas planetarios y ver si son como el nuestro o muy diferentes, o tal vez encontremos que no hay otros planetas en absoluto alrededor de las estrellas. Eso ocurrirá a lo largo de vuestras vidas y será la primera vez en la historia de la humanidad que alguien descubra si realmente hay planetas alrededor de las estrellas."

Como es bien sabido, el primero de tales hallazgos se produjo en 1993 con el descubrimiento de planetas alrededor de una estrella de neutrones, aunque fue mucho más relevante el descubrimiento, en 1995, del primer planeta alrededor de una estrella de la secuencia principal. Aquel público escolar que en 1979 tendría unos trece años, contaba en la época de esos descubrimientos con 27 o 30 años. En diez años más, cuando el público contaba con los aproximadamente cuarenta años de Sagan al grabar la serie, en efecto, ya se conocían «decenas, o incluso cientos de otros sistemas planetarios». Ya se han superado varios miles y los resultados no solo confirman la previsión profética de Sagan en el sentido de que estos descubrimientos se iban a producir dentro de ese plazo, sino que verifican al pie de la letra la descripción que de ellos hizo en el libro (Sagan 1980, página 212 de la edición en lengua castellana):

"Todavía es demasiado pronto para estar seguros, pero parece que podremos encontrar una espléndida variedad de sistemas planetarios en toda la Galaxia, y con una frecuencia elevada, porque creemos que todas las estrellas deben de proceder de estas nubes de gas y polvo. Puede haber un centenar de miles de millones de sistemas planetarios en la Galaxia esperando que los exploren. Ninguno de estos mundos será idéntico a la Tierra. Unos cuantos serán acogedores; la mayoría nos parecerán hostiles. Muchos serán maravillosamente bellos. En algunos mundos habrá muchos soles en el cielo diurno, muchas lunas en los cielos de la noche, o tendrán grandes sistemas de anillos de partículas cruzando de horizonte a horizonte. Algunas lunas estarán tan próximas a su planeta que surgirán en lo alto de los cielos cubriendo la mitad del firmamento. Y algunos mundos tendrán como panorámica una vasta nebulosa gaseosa, los restos de una estrella que fue normal y ya no lo es."

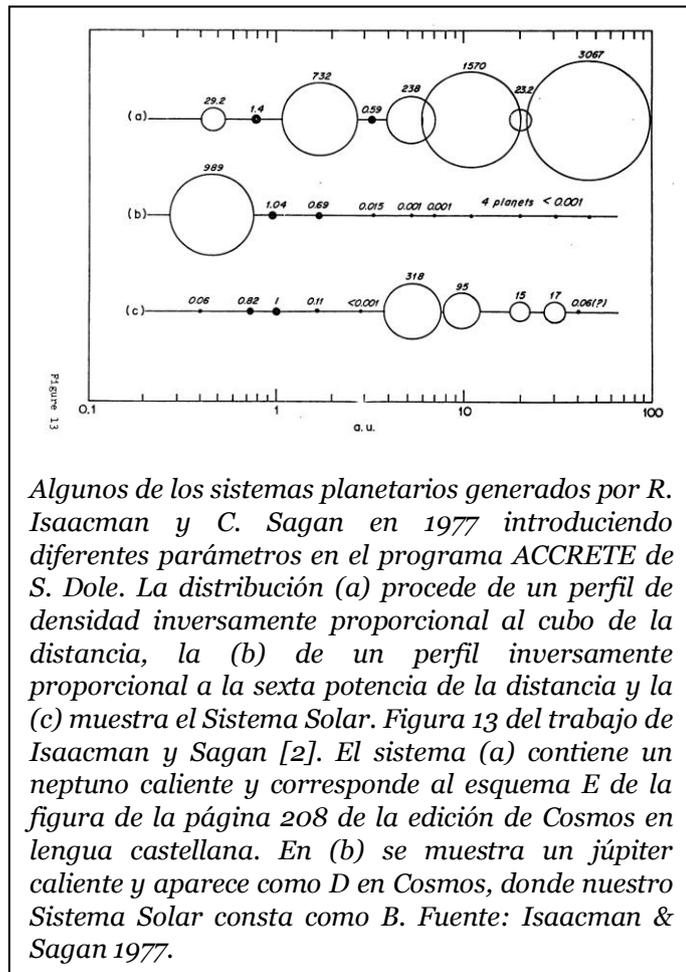
Estas afirmaciones no surgían de la meditación filosófica en el vacío, sino que se basaban en resultados científicos publicados en revistas especializadas. Sagan, con Richard Isaacman, habían sometido a pruebas un programa rudimentario pero original creado por Stephen Dole, ACCRETE. Los resultados aparecen en el libro *Cosmos* (Sagan 1980, edición en castellano) en la página 208 y formaron parte de la disertación en la escuela de primaria en Nueva York (se aprecian en las imágenes), y predicen una gran diversidad de sistemas planetarios, cada uno de ellos con unos diez planetas y que verifican de manera muy aproximada leyes de distribución del tipo de la ley de Titius-Bode. Los hallazgos actuales confirman esta diversidad y muchos indicios

apuntan a la preeminencia de estas leyes de manera general. Llama la atención el sistema etiquetado como D en *Cosmos*, que predice un júpiter caliente, de tres masas jovianas, a una distancia de su estrella intermedia entre las de Mercurio y Venus al Sol. Este mismo sistema se etiqueta como (b) en la figura 13 del artículo original de Isaacman y Sagan [2], hoy accesible de manera libre. Ante la diversidad de sistemas planetarios que resultaban de sus simulaciones, muchos de ellos totalmente distintos a nuestro Sistema Solar, los autores dejaron escrito en el año 1977:

“O bien faltan en ACRETE algunos ingredientes físicos esenciales para la cosmogonía de sistemas planetarios, o bien los sistemas planetarios como el nuestro son solo un ejemplo entre un rico abanico de variedades alternativas de sistemas. Parece probable que cambios de carácter más fundamental en la morfología

nebular (por ejemplo, pasar de una función de distribución de densidad exponencial a otra en ley de potencias) conducirían a generar sistemas planetarios algunos de los cuales no se parecerían mucho al nuestro, pero a los que no cabría plantear objeciones de fondo (figuras 12 y 13).”

La astronomía de vanguardia confirma las expectativas de Sagan e Isaacman en cuanto a diversidad de mundos, incluso se ha logrado cerrar los debates (por equipos con participación española, en parte con datos del instrumento *Cármes*, de Calar Alto) sobre la existencia de planetas en torno al sistema de alfa Centauri y de la estrella de Barnard (Anglada-Escudé *et al.* 2016 [3] y Ribas *et al.* 2018 [4]), tratados en la edición en castellano de *Cosmos* en las páginas 210 y 211. El desafío actual radica en el hallazgo y estudio de planetas habitables, es decir, aquellos que potencialmente reúnen condiciones que nos parecen acogedoras para la vida. Y en la agenda de la investigación para años venideros figura ya, de manera digna y con toda firmeza, el proyecto de detectar actividad biológica. Ya contamos con algunas



Algunos de los sistemas planetarios generados por R. Isaacman y C. Sagan en 1977 introduciendo diferentes parámetros en el programa ACCRETE de S. Dole. La distribución (a) procede de un perfil de densidad inversamente proporcional al cubo de la distancia, la (b) de un perfil inversamente proporcional a la sexta potencia de la distancia y la (c) muestra el Sistema Solar. Figura 13 del trabajo de Isaacman y Sagan [2]. El sistema (a) contiene un neptuno caliente y corresponde al esquema E de la figura de la página 208 de la edición de *Cosmos* en lengua castellana. En (b) se muestra un júpiter caliente y aparece como D en *Cosmos*, donde nuestro Sistema Solar consta como B. Fuente: Isaacman & Sagan 1977.

ideas acerca de qué medios técnicos podrían utilizarse para estos fines pero, como le sucedió a Sagan en torno al año 1980, probablemente se nos escapen tecnologías maravillosas aún por desarrollar. Parafraseando a Sagan, podríamos afirmar que todavía es demasiado pronto para contar con la certeza, pero parece que podremos encontrar una espléndida variedad de sistemas planetarios habitados en toda la Galaxia, y con una frecuencia elevada.

Y no debemos descartar que el hallazgo de vida extraterrestre en algún mundo entre esta gran diversidad se produzca durante la vida de quienes ahora son estudiantes ni, incluso, que sea usted, que ahora lee esto, quien realice ese descubrimiento llamado a cambiar el modo en que el ser humano contempla el cosmos y su lugar dentro de él.

Referencias:

- [1] Sagan C., *Cosmos*, traducción de Miquel Muntaner i Pascual y Maria del Mar Moya Tasis, Editorial Planeta, Barcelona, 1980.
- [2] Isaacman R. & Sagan C., «Computer simulations of planetary accretion dynamics: Sensitivity to initial conditions», NASA Tech. Memo., NASA-TM—X-3511 (NASA-CR-149214), October 1977, <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19770006045.pdf>
- [3] Anglada-Escudé G. *et al.*, «A terrestrial planet candidate in a temperate orbit around Proxima Centauri», *Nature*, 536, 437-440, 2016.
- [4] Ribas I. *et al.*, «A candidate super-Earth planet orbiting near the snow line of Barnard's star», *Nature*, 563, 365-368, 2018.

David Galadí Enríquez.

Doctor en astrofísica.

Astrónomo residente en el Observatorio de Calar Alto, Almería.

Capítulo 9

Las vidas de las estrellas

Ra, el dios Sol, abrió sus dos ojos y proyectó luz sobre Egipto, separó la noche del día. Los dioses salieron de su boca y la humanidad de sus ojos. Todas las cosas nacieron de él, el niño que brilla en el loto y cuyos rayos dan vida a todos los seres.

Conjuro del Egipto tolemaico

Dios es capaz de crear partículas de materia de distintos tamaños y formas... y quizás de densidades y fuerzas distintas, y de este modo puede variar las leyes de la naturaleza, y hacer mundos de tipos diferentes en partes diferentes del universo. Yo por lo menos no veo en esto nada contradictorio.

ISAAC NEWTON, Óptica, 1704

Teníamos el cielo allá arriba, todo tachonado de estrellas, y solíamos tumbarnos en el suelo y mirar hacia arriba, y discutir si las hicieron o si acontecieron sin más.

MARK TWAIN, Huckleberry Finn, 1884

Tengo... una terrible necesidad... ¿diré la palabra?... de religión. Entonces salgo por la noche y pinto las estrellas.

VINCENT VAN GOGH, siglo XIX

9.1

Una tabla para ordenarlos a todos...

*If you want to make an apple pie from the scratch,
must you first invent the universe,...*

(Carl Sagan, párrafo inicial del capítulo IX de *Cosmos*)

Afortunadamente, tenemos a nuestra disposición una buena colección de elementos químicos, compuestos por átomos, con los que podemos crear sustancias químicas (algunas proporcionadas por la naturaleza) con las que fabricamos objetos, desde una sencilla —aunque compleja químicamente— tarta de manzana al más sofisticado artilugio que podamos imaginar, a partir de materiales ya existentes (harina, manzanas, azúcar para la tarta), que están formados por sustancias químicas, que, a su vez, están constituidas por átomos, que son los constituyentes fundamentales de la materia [1].

Toda la materia ordinaria está formada por átomos, que se unen entre sí a través de enlaces químicos. Estos son los responsables de que exista la materia (incluidos los seres vivos), pues sin los enlaces químicos, el universo sería ‘simplemente’ una sopa de átomos.

¿Qué son los átomos? Un átomo es la unidad más pequeña de materia que mantiene su identidad y que no es posible dividir mediante procesos químicos.

Su origen se remonta a la Grecia del siglo V a. C., dónde a algunos filósofos les dio por pensar sobre la constitución de la materia. Ésta puede ser continua o discreta. En el caso de que la materia fuese continua, no había más discusión. Si es discreta, significa que se podía dividir. ¿Hasta qué punto? Hasta llegar a una partícula indivisible, el *átomo*. El principal impulsor de esta teoría fue Demócrito de Abdera (ca. 460-370 a. C.). Sus ideas no calaron en la comunidad científica-filosófica durante bastantes siglos, aunque algunos destacados filósofos-científicos —Gassendi (1592-1655), Descartes (1596-1650) y Newton (1642-1727), entre otros— eran atomistas convencidos. Sin embargo, todas las teorías atomísticas eran más ideas filosóficas especulativas que hechos científicos probados.

No fue hasta 1803 cuando Dalton (1766-1844), influido por ideas newtonianas, rescató el concepto de átomo y elaboró la primera teoría atómica con cierto fundamento científico, estableciendo uno de los pilares de la química moderna. Su teoría se basó en las leyes cuantitativas de la química que se estaban deduciendo empíricamente desde finales del siglo XVIII, a partir del trabajo riguroso y metódico del gran Lavoisier (1743-1794) [2].

Una de las principales aportaciones de Lavoisier fue la de clarificar el concepto de elemento químico y su distinción de las sustancias químicas compuestas (actualmente, compuestos químicos). Un elemento químico es una sustancia química formada por una única clase de átomos, a diferencia de un compuesto químico, que está formado por más de una única clase de átomos [3].

Pero ¿qué significa 'clase de átomos'? Esta es una idea fundamental para entender lo que es realmente un elemento químico; pero antes de contestar a esta pregunta, hablaremos un poco de la estructura del átomo.

Aunque la teoría atómica de Dalton tuvo una cierta repercusión, no fue unánimemente aceptada por toda la comunidad científica. El concepto de átomo y cómo estos se unen formando moléculas o especies iónicas, no pudo ser establecido firmemente a lo largo del siglo XIX, debido principalmente a dificultades experimentales.

Los científicos que aceptaban la existencia de átomos, consideraban éstos indivisibles; aunque hubo alguno clarividente, como Helmholtz (1821-1894), que postuló la naturaleza eléctrica de la materia y la 'atomización de la carga eléctrica'. Para llegar a esta hipótesis, se basó en los brillantes experimentos electroquímicos de Davy (1770-1829) y Faraday (1791-1867), que demostraban la relación entre la materia y la electricidad.

Un hito de la ciencia se produjo en 1895, cuando Thomson (1856-1940), trabajando en el Laboratorio Cavendish de la Universidad de Cambridge, encontró una partícula cargada negativamente. Esta era más ligera que el átomo más ligero (con una masa unas 2.000 veces menor que la del hidrógeno) y era generada por átomos de distintas clases. Por lo tanto, era una partícula presente en toda la materia. Thomson había dividido el átomo por primera vez y había encontrado el electrón (aunque le llamó 'corpúsculo').

En 1911, un discípulo de Thomson, Rutherford (1871-1937), trabajando también en el laboratorio Cavendish supervisó los experimentos que sus colaboradores Geiger (1882-1945) y Marsden (1889-1970) realizaron. Estos experimentos —de los más bellos de la ciencia— consistieron en bombardear una fina lámina de oro con partículas alfa (que son núcleos de helio, cargados positivamente) [4]. Los resultados encontrados demostraron que la mayor parte del átomo es espacio vacío y que prácticamente toda la masa y la carga

positiva están concentradas en el núcleo, que es entre 10.000 y 100.000 veces más pequeño que el átomo²¹.

Con los resultados de Rutherford se pudo plantear el primer modelo atómico con cierto parecido a la realidad. La estructura del átomo es similar a la de un pequeño sistema solar. Está constituido por un núcleo central formado por nucleones, que pueden ser protones (con carga positiva) y neutrones (eléctricamente neutro)²². Alrededor de ellos se mueven (muy rápidamente) los electrones, que son partículas de masa muy pequeña (alrededor de 10^{-28} gramos) con carga eléctrica negativa (denominada elemental, que es alrededor de $1,6 \times 10^{-16}$ culombios). La masa del protón y neutrón es similar y bastante mayor que el del electrón (alrededor de 1836 veces).

El número de protones caracteriza a un elemento químico, y define el número atómico de dicho elemento químico. Un elemento químico es una sustancia química que contiene átomos con el mismo número atómico.

Un átomo es eléctricamente neutro, lo que significa que el número de electrones que rodean al núcleo es igual al número de protones. Los núcleos y los electrones se atraen debido a la interacción entre las cargas positivas y negativas. Este hecho contribuye a estabilizar el átomo. Salvo excepciones y en condiciones específicas de laboratorio, los átomos no están aislados, sino que se combinan, a través de enlaces químicos, formando moléculas y especies iónicas. La formación de enlace se hace a través de la donación de electrones o compartiendo electrones. La estabilidad energética del enlace químico es la responsable de que exista la materia.

Toda la materia que nos rodea está formada por átomos, que se puede decir que son los ladrillos con los que se construye la materia. En nuestro planeta, sólo existen 90 clases de átomos (90 elementos químicos), que se ordenan en la tabla periódica de los elementos (ver Figura). Aunque la tabla periódica contiene 118 elementos químicos, los elementos número 43 (tecnecio), 59 (promedio) y todos a partir del 92 (uranio) no se encuentran de forma natural en la Tierra, sino que se han preparado de manera artificial.

La tabla periódica es la mayor aportación de la química a la cultura universal. Es un icono cultural que, incluso, va más allá de la ciencia. Científicamente, *la tabla periódica ordena todos los elementos químicos en base a su número atómico* (ver Figura). Esta ordenación se realiza en filas o periodos y en columnas o grupos. La tabla es periódica porque las propiedades

²¹ Los átomos son muy pequeños (del orden del Angstrom, Å, que es 10^{-10} metros) y ligeros (del orden de 10^{-24} gramos).

²² La existencia del protón fue demostrada en el grupo de Rutherford en experimentos realizados entre 1917 y 1920. En este año, Rutherford propuso la existencia de una segunda partícula (neutra) en el núcleo, a la que se denominó neutrón, que finalmente fue descubierto por Chadwick (1891-1974) en 1932. Chadwick era discípulo de Rutherford y también realizó los experimentos en el Laboratorio Cavendish.

de los elementos van variando progresivamente y de manera periódica según nos movemos por los las filas y las columnas. De esta manera, podemos predecir las propiedades de las sustancias químicas en base al conocimiento previo de sustancias relacionadas. La tabla periódica proporciona información fundamental para entender el comportamiento de la materia, por eso se ha calificado como la *Piedra Rosetta de la Naturaleza* [5].

Tabla Periódica de los Elementos

Real Sociedad Española de Química

Editorial Tébar Flores

Tabla periódica de los elementos químicos, elaborada en la Real Sociedad Española de Química (RSEQ). En ella se recogen los 118 elementos, cuya existencia se ha probado y asignado nombres y los elementos 119 y 120, que ya se han obtenido en los grandes aceleradores de partículas en los que se generan los elementos super-pesados, estos resultados deben ser confirmados en otros laboratorios.

Referencias:

- [1] B. Herradón, 2011, *Los avances de la química*, Los libros de la catarata.
- [2] I. Asimov, 1985, *Breve historia de la química*, Alianza editorial.
- [3] A. L. Lavosier, 2007, *Tratado elemental de química*, Crítica.
- [4] P. Ball, 2005, *Elegant Solutions. Ten Beautiful Experiments in Chemistry*, RSC.
- [5] E. J. Fernández Garbayo, J. Fernández Cestau, 2019, *El alfabeto del universo. La tabla periódica de los elementos*, Editorial Tébar Flores.

Bernardo Herradón García.

Doctor en Ciencias Químicas.

Investigador Científico. Instituto de Química Orgánica General, CSIC, Madrid.

9.2

Química en estado puro durante la muerte de una estrella.

El título del capítulo de Cosmos "Las vidas de las estrellas" es ciertamente afortunado. Las estrellas tienen realmente una vida propia. Al igual que los seres vivos, nacen, viven, y mueren. Bien, obviamente una estrella no responde a los estándares de vida que conocemos. Las estrellas habitualmente no se reproducen durante su vida. Sin embargo, incluso en esto, el zoo del Cosmos es tan ocurrente que se ha sugerido que la colisión de dos estrellas enanas blancas poco masivas podría dar lugar al nacimiento de una nueva estrella [1].

¿Qué ocurre con las estrellas cuando mueren? Cantaba el poeta Joan Manuel Serrat "Mi cuerpo será camino, le daré verde a los pinos y amarillo a la genista". A las estrellas les ocurre algo parecido. Al final de su vida, devolverán gran parte de la materia de la que están formadas al medio que las vio nacer, que no es otro que el medio interestelar. Y esa materia servirá para que una nueva generación de estrellas, con sus planetas y otros cuerpos menores rocosos, pueda formarse. Una particularidad que solo atañe a las estrellas es que los átomos devueltos al medio interestelar no son los mismos que estaban inicialmente presentes cuando la estrella nació. Durante la vida de una estrella, los procesos de fusión nuclear que ocurren en su interior van convirtiendo átomos de hidrógeno y helio en átomos más pesados como carbono, nitrógeno, oxígeno, magnesio, o hierro. ¡La transmutación de los elementos químicos, el sueño de los alquimistas! De esta forma, las estrellas van progresivamente enriqueciendo el Cosmos en metales²³ generación tras generación. Se estima que al Sol aún le quedan unos 5000 millones de años de vida. Tras este tiempo, Carl Sagan nos contaba en el capítulo 9 de Cosmos que existirá un último día perfecto en la Tierra. Tras ese día el Sol comenzará a convertirse en una estrella gigante roja, engullendo probablemente a la Tierra, y en cualquier caso haciendo imposible la vida en nuestro querido planeta. Triste, pero todo tiene su fin. Durante la fase de gigante roja, el Sol devolverá al medio interestelar gran parte de la materia que en su día tomó, ahora enriquecida en metales, para que nuevas estrellas puedan formarse.

²³ En astronomía, el término *metal* se refiere a cualquier elemento químico más pesado que el helio.

Las estrellas masivas terminan su vida como supernovas, expulsando materia mediante una violenta explosión. Las estrellas como el Sol, que son la mayor parte, se convierten en gigantes rojas tras agotar el hidrógeno en el núcleo. El cambio más espectacular concierne al tamaño, que aumenta unas mil veces. La superficie del Sol durante esta fase se situará seguramente en algún lugar entre las órbitas actuales de la Tierra y Júpiter. Durante esta fase de gigante roja, las estrellas desarrollan un suave viento que va vertiendo poco a poco materia de la estrella al medio interestelar. Tras unos



*Imagen de la emisión del polvo de la envoltura circunestelar IRC+10216.
(Crédito: Izan Leão, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brasil).*

pocos miles de años, el viento estelar isótropo habrá dado lugar a una envoltura esférica en torno a la gigante roja (véase la Figura). Esta fase puede durar algunos miles de años, tras los cuales la estrella habrá devuelto una importante fracción de su masa al medio interestelar. Esta es la principal forma en que el medio interestelar se recicla con nuevo material.

¿En qué estado devuelven las estrellas la materia al medio interestelar? Las envolturas circunestelares en torno a gigantes rojas están formadas por moléculas en fase gas y por diminutos granos de polvo con tamaños del orden de $0.1 \mu\text{m}$. En realidad, estas regiones son auténticos laboratorios químicos donde se forman in situ todo tipo de moléculas de complejidad dispar. Algunas de ellas son realmente exóticas para los estándares terrestres. De hecho, son varias las moléculas que se han descubierto antes en envolturas de gigantes rojas que en la Tierra [2]. Algo parecido a lo ocurrido con el helio, descubierto en el Sol antes que en la Tierra allá por el año 1868. Realmente, el Cosmos es un inmenso laboratorio químico que nos permite trascender la química que conocemos en La Tierra. Los granos de polvo, compuestos por silicatos y material carbonáceo, tan solo constituyen el 1 % en masa, pero su presencia tiene consecuencias muy importantes para la evolución física y química del medio interestelar. Por una parte, los granos de polvo absorben de forma muy eficiente la radiación ultravioleta, lo que permite que las moléculas sobrevivan sin ser fotodisociadas en nubes interestelares densas. Por otra, la superficie de los granos de polvo es un excelente catalizador que permite la síntesis

interestelar de moléculas que van desde el hidrógeno molecular (H_2), la molécula más abundante en el Universo y cuya formación en fase gas es extremadamente ineficiente, hasta complejas moléculas orgánicas con interés prebiótico.

En el gran laboratorio químico que es una envoltura circunestelar, todo comienza en las inmediaciones de la estrella gigante roja, donde las primeras moléculas se forman in situ a partir de la recombinación de átomos. Aquí comienza realmente la Química en mayúsculas, con la formación de los primeros enlaces químicos. Las condiciones físicas en estas regiones, con temperaturas de 2000-3000 °C y presiones unas 10,000 veces menores que en nuestra atmósfera, hacen que las reacciones químicas, incluso aquellas que son endotérmicas o poseen barreras de activación, ocurran muy rápidamente. Esto hace que la composición química tienda rápidamente a una situación de equilibrio termodinámico o termoquímico, en la que dominan las moléculas más estables. Observaciones radioastronómicas confirman que efectivamente la composición química en las zonas internas de envolturas circunestelares está regulada en gran medida por el equilibrio termoquímico. En los últimos años, sin embargo, se han encontrado discrepancias muy serias entre predicciones y observaciones. Por ejemplo, se ha observado vapor de agua en torno a estrellas ricas en carbono (en las que la relación C/O es superior a uno) con abundancias varios órdenes de magnitud por encima de lo esperado [3]. Aún no comprendemos bien qué procesos químicos tienen lugar en las inmediaciones de las gigantes rojas que producen de forma selectiva ciertas moléculas con abundancias muy superiores a las que se esperarían en condiciones de equilibrio termoquímico. Las inmediaciones de estrellas gigantes rojas son también la principal fábrica de granos de polvo que existe en el Cosmos. Esto es, la mayor parte de los granos de polvo presentes en el medio interestelar de cualquier galaxia se ha formado en algún momento alrededor de una estrella gigante roja. Al alejarnos un poco de la estrella, cuando la temperatura disminuye por debajo de unos 1000 °C, los elementos con mayor carácter refractario comienzan a condensar en forma sólida dando lugar a los primeros granos de polvo. El proceso que va desde moléculas de unos pocos átomos hasta granos de polvo compuestos por unos 1000 millones de átomos es enormemente complejo, aunque los primeros pasos deberían consistir en el ensamblaje de moléculas sencillas para formar clústeres de tamaño intermedio. A día de hoy desconocemos cómo ocurre el proceso de ensamblaje que inicia la formación de los granos de polvo.

El desconocimiento de los procesos químicos que ocurren en las inmediaciones de las gigantes rojas ha estado limitado en gran medida por la falta de instrumentos con la resolución angular necesaria. Recientemente se ha puesto en marcha un instrumento que va a cambiar esto. Se trata de ALMA, un conjunto de 66 radiotelescopios situado en el desierto de Atacama, en Chile, que utiliza técnicas de interferometría que permiten resolver estrellas gigantes rojas y acceder a los procesos que ocurren en sus inmediaciones. Las primeras

observaciones ya han permitido observar una gran cantidad de líneas espectrales que no ha sido posible identificar y que seguramente sean debidas a moléculas que intervienen en la formación de los granos de polvo [4].

La materia que una gigante roja expulsa se embarcará en un aventurado viaje por el medio interestelar para eventualmente incorporarse a una estrella o a un planeta en un nuevo sistema solar. En este viaje, gran parte de la materia será fuertemente procesada químicamente mediante rayos cósmicos y fotones ultravioletas. Moléculas de gran tamaño, como fulerenos e hidrocarburos policíclicos aromáticos, y granos de polvo son más resistentes a la radiación ultravioleta, y podrán resistir mejor el viaje. De hecho, se han encontrado granos cuyo origen se remonta a una estrella gigante roja en meteoritos de nuestro sistema solar, lo que indica que estos granos han sobrevivido intactos su viaje interestelar. El destino de la materia vertida por estrellas moribundas no es otro que construir nuevas estrellas y planetas, cerrando así el ciclo de vida de la materia en el Cosmos.

Referencias:

- [1] M. Kilic, W. R. Brown, J. J. Hermes, C. Allende Prieto, S. J. Kenyon, D. E. Winget, K. I. Winget, 2011, *SDSS J163030.58+423305.8: a 40-min orbital period detached White dwarf binary*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, **418**, L157. doi:10.1111/j.1745-3933.2011.01165.x. Ver reseña en <https://www.space.com/11630-dying-stars-collision-baby-star.html>.
- [2] J. Cernicharo, C. Cabezas, J. R. Pardo, M. Agúndez, C. Bermúdez, y 8 coautores más, 2019, *Discovery of two new magnesium-bearing species in IRC+10216: MgC₃N and MgC₄H*, Astronomy and Astrophysics, **630**, L2. doi:10.1051/0004-6361/201936372.
- [3] L. Decin, M. Agúndez, M. J. Barlow, F. Daniel, J. Cernicharo, y 32 coautores más, 2010, *Warm water vapour in the sooty outflow from a luminous carbon star*, Nature, **467**, 64. doi:10.1038/nature09344.
- [4] J. Cernicharo, F. Daniel, A. Castro-Carrizo, M. Agúndez, N. Marcelino, C. Joblin, J. R. Goicoechea, M. Guélin, 2013, *Unveiling the dust nucleation zone of IRC+10216 with ALMA*, The Astrophysical Journal Letters, **778**, L25. doi:10.1088/2041-8205/778/2/L25.

Marcelino Agúndez Chico.

Doctor en Astrofísica.

Investigador Ramón y Cajal. Instituto de Física Fundamental, CSIC, Madrid.

9.3

La Química como Origen del Universo Molecular.

A parte de la connotación poética que tiene hablar del “*cielo estrellado*”, el firmamento ha sido observado por el Hombre, desde que se hizo sedentario, como herramienta para determinar los periodos de abundancia para la caza y la recolección, entre otros. En una noche clara, uno puede ver la infinidad de estrellas que se distinguen desde un punto tan remoto del Universo como es nuestro planeta. Esta perspectiva es muy limitada, ya que vemos una parte increíblemente reducida del Universo. Solo en la Vía Láctea, los astrónomos estiman que pueden existir unos 300.000 millones de estrellas. Si el Universo cuenta con más de 100 billones de galaxias... ¡el número de estrellas es “astronómico”! 10.000.000.000.000.000.000.000 (10^{22}). ¿Hay realmente más estrellas en el Universo que granos de arena en todas las playas del mundo, como dijo **Carl Sagan** (1934-1996)? Pues sí, con un simple cálculo se llega a que en todas las playas del mundo hay 4.000.000.000.000.000.000.000 (4×10^{21}) granos de arena²⁴. Así que Carl Sagan tenía razón y hay más estrellas en el Universo que granos de arena en las playas de nuestro planeta. Pocas figuras en la comunidad científica han resultado tan inspiradoras y empáticas en relación con la opinión pública como lo ha hecho Carl Sagan, especialmente entre *millennials* y todas aquellas personas que vivimos motivadas por la curiosidad y el amor por el conocimiento.

Desde la revolución de la astronomía observacional, cada vez conocemos mejor nuestro cielo y los objetos “observables” en él. En particular, el espacio existente entre dos estrellas, es decir, el **medio interestelar**, aunque podría pensarse que está “vacío”, no lo está y está formado por, aproximadamente, un 99% de gas (hidrógeno y helio, principalmente) y un 1% de granos de polvo y hielo. Aunque H_2 es el gas más abundante, en el medio interestelar también se han identificado, hasta el momento, alrededor de 200 moléculas [1,2]. Entre ellas se encuentran desde moléculas simples como H_2O , esenciales para la vida tal y como la conocemos, a moléculas complejas como los fulerenos (C_{60} o C_{70}), tercera forma molecular estable conocida del carbono, tras el grafito y el diamante.

²⁴ En esta página de la BBC se puede ver el cálculo del número de granos de arena en las playas de la Tierra: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-44943002>.

La gran mayoría de las moléculas orgánicas detectadas contienen, además de átomos de C e H, átomos de O y/o N, y en menor número S, P y Si. Encontramos compuestos orgánicos tan familiares en la Tierra y en nuestra vida cotidiana como el alcohol presente en las bebidas alcohólicas (etanol, $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$) o la acetona ($\text{CH}_3\text{C}(\text{O})\text{CH}_3$) de los quitaesmaltes de uñas.



Algunas de estas moléculas orgánicas simples se consideran precursoras de moléculas biológicas como los **azúcares** (contienen C, H y O, por ejemplo, la sacarosa $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$ conocido como el *azúcar de mesa*) o los **aminoácidos** (contienen C, H, O y N a través de grupos amino ($-\text{NH}_2$) y carboxilo ($-\text{C}(\text{O})\text{OH}$)). Una de ellas es el glicolaldehído ($\text{HOCH}_2\text{C}(\text{O})\text{H}$) que puede reaccionar con un azúcar de 3 carbonos para producir la ribosa y desoxirribosa, componentes importantes de los nucleótidos, y se encuentran en el ARN y ADN, respectivamente. El glicolaldehído se detectó, por primera vez en el año 2000, en la constelación de Sagitario situada en el centro de nuestra galaxia [3]. Más recientemente, el glicolaldehído se ha detectado con el radiotelescopio ALMA (*Atacama Large Millimeter Array*) en el gas que rodea a una estrella binaria joven como IRAS 16293-2422 en 2012 [4] o NGC 1333 IRAS2A en 2015 [5]. Este descubrimiento prueba, pues, que estas moléculas precursoras de biomoléculas necesarias para la vida, ya existían en el medio interestelar en el momento de la formación de los planetas.

El conocimiento de la Química en estos entornos es, pues, esencial para entender cómo se forman nuevas moléculas en el Espacio. Pero, ¿cómo se forman estas moléculas prebióticas en el medio interestelar, donde la temperatura del gas es ultrabaja y oscila entre 10 K (~ 263 °C bajo cero) y 100 K (~ 173 °C bajo cero)? Existen dos mecanismos aceptados por la comunidad

astrofísica por los que se forman moléculas orgánicas en el medio interestelar: reacciones químicas en la superficie de granos de polvo o hielo interestelar o reacciones entre dos moléculas (iones, radicales o moléculas no cargadas) en fase gaseosa. Por ejemplo, metanol (CH_3OH) se forma por hidrogenación sucesiva de monóxido de carbono (CO) en la superficie de los granos a temperaturas inferiores a 30 K (~ 243 °C bajo cero).

N. Balucani y colaboradores propusieron que algunas moléculas orgánicas, como formiato de metilo (HC(O)OCH_3) o dimetil éter (DME, CH_3OCH_3), podían formarse en fase gaseosa a partir de la reacción del radical hidroxilo (OH), presente en el medio interestelar, con metanol [6]. Para poder interpretar las abundancias de las moléculas orgánicas observadas en el medio interestelar, el conocimiento de la velocidad de las reacciones a las temperaturas típicas de este medio en las que están involucradas es esencial. Esta información cinética se incorpora en modelos astroquímicos que consideran lo que ocurre tanto en la superficie de los granos como en fase gaseosa y se simula cómo se forman y en qué cantidad estas moléculas orgánicas. Dado que estos modelos están constituidos por cientos de reacciones, existen muchas incógnitas especialmente a temperaturas entre 10 y 100 K. A estas temperaturas, la mayoría de las constantes de velocidad, k , (parámetro cinético a medir experimentalmente) de las reacciones del tipo $A + B$ (donde normalmente, A es un ion o un radical y B es un ion/radical o una molécula) no se conoce, dada la enorme dificultad experimental que supone obtener en un reactor químico un flujo de gas uniforme a esas temperaturas ultrafrías, donde por métodos convencionales de enfriamiento las moléculas orgánicas se encuentran en estado sólido. De ahí que muchas de las constantes de velocidad que se emplean en ese tipo de simulaciones sean las obtenidas a temperatura ambiente (25° C) o las extrapoladas de expresiones de k en función de la temperatura (a $T > 200$ K) donde existen más estudios. Estas constantes de velocidad se obtienen experimentalmente en estudios sobre la reactividad química en fase gaseosa de reacciones de interés para la atmósfera de nuestro planeta o en Química de la Combustión y que han sido llevados a cabo, en su gran mayoría, en el siglo XX. Aunque la Química de nuestra atmósfera es similar a la que ocurre en las nubes interestelares, existen diferencias importantes como las condiciones físicas del medio (temperatura y presión) o la composición del mismo. Para simular en el laboratorio las condiciones de temperatura del medio interestelar, en las últimas décadas, se ha empleado un método de enfriamiento no convencional (la técnica de *expansión supersónica uniforme*) que se basa en la expansión del gas a velocidades supersónicas para obtener un chorro uniforme. Con esta técnica, se han conseguido obtener gases a temperaturas de hasta 11 K [7-9], que acoplada a técnicas cinéticas ha permitido extender la base de datos, en particular, para reacciones radical-molécula.

Recientemente el grupo del Prof. Dwayne E. Heard de la Universidad de Leeds (Reino Unido) observó que la constante de velocidad de la reacción del

radical OH con metanol se *aceleraba* muchísimo a temperaturas entre 79 y 63 K [10], lo que implicaba una formación del intermedio CH₃O mucho más rápida de lo que se pensaba la comunidad astrofísica, pudiéndose explicar su formación exclusivamente por esta reacción en fase gaseosa. Estas observaciones se corroboraron por nuestro grupo de investigación en la Universidad de Castilla-La Mancha realizando estudios cinéticos a temperaturas de hasta 11.7 K [9,11]. El gran hándicap es realizar estudios en las condiciones de vacío del medio interestelar, donde la presión es tan extremadamente baja que no se alcanzaría ni con el mejor vacío obtenido en la Tierra. De ahí, que se requieran estudios teórico computacionales para simular estas condiciones y se indague sobre el mecanismo de estas reacciones en fase gaseosa.

Lo que es cierto, es que la comunidad química y física tanto experimental como teórica debemos aunar esfuerzos para que el estudio de la velocidad de los procesos de formación y desaparición de moléculas interestelares y el mecanismo por el cual transcurren estas reacciones pueda contribuir al conocimiento del origen del Universo molecular. Citando a Carl Sagan *somos polvo de estrellas que piensa acerca de las estrellas. Somos la forma en la que el Universo se piensa a sí mismo.*

Referencias:

- [1] http://www.astrochymist.org/astrochymist_ism.html, visitado en 2020.
- [2] <https://zeus.ph1.uni-koeln.de/cdms/molecules>, visitado en 2020.
- [3] J. M. Hollis, F. J. Lovas, P. R. Jewell, *Astrophysical Journal*, 540:L107-L110 (2000).
- [4] J. K. Jørgensen, C. Favre, S. E. Bisschop, T. L. Bourke, E. F. van Dishoeck, M. Schmalzl. *The Astrophysical Journal Letters*, 757: L4 (2012).
- [5] A. Coutens, M. V. Persson, J. K. Jørgensen, S. F. Wampfler, J. M. Lykke. *Astronomy and Astrophysics*, 576: A5 (2015).
- [6] N. Balucani, C. Ceccarelli, V. Taquet. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1-5 (2014).
- [7] A. Potapov, A. Canosa, E. Jiménez, B. Rowe. *Angewandte Chemie-International Edition*, 56 (2017) 8618-8640.
- [8] M. Tizniti, S. D. Le Picard, F. Lique, C. Bertelote, A. Canosa, M. H. Alexander, I. R. Sims, *Nature Chemistry*, 6 (2014) 141–145.
- [9] A. J. Ocaña, S. Blázquez, A. Potapov, B. Ballesteros, A. Canosa, M. Antiñolo, L. Vereecken, J. Albaladejo, E. Jiménez. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 21 (2019) 6942-6957.
- [10] R.J. Shannon, M. A. Blitz, A. Goddard and D. E. Heard, *Nature Chemistry*, 5 (2013) 745–749.
- [11] M. Antiñolo, M. Agúndez, E. Jiménez, B. Ballesteros, A. Canosa, J. Albaladejo, J. Cernicharo. *Astrophysical Journal*, 823:25 (2016) 1-8.

Elena Jiménez Martínez.

Doctora en Ciencias Químicas.

Catedrática de Universidad, Departamento de Química Física.

Universidad de Castilla-La Mancha. Facultad de Ciencias y Tecnologías Químicas, Ciudad Real.

9.4 La muerte del Sol y de la Tierra.

"Erase una vez, una estrella absolutamente común...²⁵".

Las estrellas han sido guardianas de nuestros sueños y nuestros anhelos como especie y sin darnos cuenta, todos los años nace una nueva estrella en algún rincón de nuestra galaxia. Sería muy difícil, casi imposible, saber cuántas están naciendo en todo el universo mientras escribo estos párrafos, o cuantas han podido nacer desde que Carl Sagan nos habló de ellas en Cosmos. Tenemos que emprender un viaje al pasado para encontrarnos en un día cualquiera, hace aproximadamente 4.600 millones de años [4], en que nació nuestra estrella.

En apenas unas décadas, comenzado el siglo XX, la ciencia humana ha podido descifrar el más profundo secreto de las estrellas y en consecuencia de nuestro Sol, un enigma que nos acompañaba desde hacía milenios. Comprendemos muchas cosas sobre ellas mismas; cómo fue su nacimiento, cómo pre-visiblemente se desarrollará su vida, en el caso de nuestro Sol y en su última fase activa, se extinguirá apagándose muy lentamente (a lo largo de períodos de tiempo inimaginablemente largos), dejando en el camino (la estrella pulsará y expulsará sus capas exteriores al espacio) uno de los objetos cósmicos más bonitos que se pueden observar; una nebulosa planetaria [5], el fantasma de una estrella rumbo al exterior. En el centro quedará una bolita de cenizas muy densa (el núcleo del viejo Sol), esta enana blanca ya no puede hacer otra cosa que enfriarse.

²⁵ "Erase una vez, una estrella absolutamente común; ni muy caliente ni muy fría, pequeña y amarilla. Perdida en un rincón de un pequeño y tranquilo brazo [1] de la Vía Láctea, más cerca del borde que del centro. Una estrella entre las más de 200 mil millones que se puedan encontrar en la galaxia.

Nadie le prestaba la más mínima atención, aislada de sus hermanas y de las otras estrellas que habían nacido en la misma gran nube oscura de polvo y gas [2].

Ella pensaba que nunca sería conocida, que nada ni nadie sabrían cómo se había desarrollado su vida. Su existencia se reduciría a fabricar elementos químicos que expulsara al morir, cómo sólo saben hacer las estrellas y que terminarán uniéndose como un puzle cósmico.

Aun así, ella seguiría viviendo su larga vida de la manera que sabía hacerlo; liberando la materia de su interior (un gigantesco horno termonuclear por corazón) transformada en chorros de energía, bañando de luz y calor todo lo que se encuentre a su alrededor. Permitiendo, entre otras cosas, la vida sobre un punto azul pálido [3]".

Hemos descubierto cómo funcionan sus abrasadores núcleos, las fraguas en donde se forja la materia y que, en el caso de algunas estrellas, serán expulsados al medio interestelar (por medio de una colosal explosión de supernova) [6] en donde volverán a formar parte de futuras estrellas o del material que orbitará alrededor de las mismas. Se formarán nuevos planetas y si logran tener la misma suerte que tuvo el nuestro, posiblemente puedan generar algún tipo de vida, parecida o no, a la nuestra. Sabemos que en el interior de nuestra estrella (desde su nacimiento) se mantiene un duro equilibrio (denominado equilibrio hidrostático) entre dos fuerzas, un pulso entre la gravedad (generada por su propia masa) y la fusión nuclear o visto de otra manera, una lucha colosal entre los resultados de estas dos fuerzas; contracción y expansión. Esta lucha entre la gravedad que tiende a contraer la estrella y la presión de su interior, producto del calor generado en las fusiones nucleares (calcinando Hidrógeno, para transformarlo en cenizas de Helio), son el principal factor que determinará la evolución de la estrella. En constante batalla de supervivencia con las fuerzas que componen su estructura, latirá lentamente y su núcleo estará tan caliente que durante un tiempo transformará el Helio (el subproducto de la fusión del hidrógeno) en Carbono, la ceniza de la fusión nuclear desde su nacimiento, que le servirá de combustible, para luchar a "muerte" contra la gravedad generada por sus propios átomos y en un intento de reescribir su destino, su vida será gobernada por el equilibrio entre estas dos fuerzas.



Nebulosa planetaria NGC 6543, observada en 2004 por el telescopio espacial Hubble, presenta al menos 11 capas concéntricas de materia expulsada.

Crédito: [NASA/ESA/HEIC/STScI/AURA](#)

El Sol es una máquina que se autorregula y el camino que seguirá dependerá de cómo reacciona ante los cambios que en ella se producen al variar su masa, temperatura y composición internas, de tal forma que puede permanecer estable varios miles de millones de años, convirtiendo a cada segundo toneladas y toneladas de materia en energía (luz y calor principalmente), liberada gracias a complicados procesos subatómicos; un proceso que tiene lugar en cada rincón del universo. Todos nuestros días están gobernados por el Sol, ha sido la luz, el calor y el bálsamo en las noches oscuras y amenazantes para los primeros humanos (en el África de hace unos 150 mil años), forma parte de nuestro pasado, presente y futuro. Siempre atraídos por la esencia de su brillo y de su luz que nuestros antepasados observaron y confundieron con los dioses (fue Ra, Shamash, Inti o Helios entre otros) de su tiempo. Adorado, celebrado y a la vez temido. En cuanto a lo concerniente a nuestra estrella ninguno de sus días se hace aburrido, amanece otra vez como todo el mundo espera que suceda, siendo la señal del comienzo de cada uno de nuestros días. Esta sencilla y aparente rutina y quizás sumado también a nuestra arrogancia e indiferencia, el Sol, que se muestra constante a

nuestros ojos, pareciendo como una ilusión, invariable y duradera. Los habitantes de este planeta dependemos de sus caprichos, la misma Tierra tiembla en respuesta a la fuerza que el Sol es capaz de liberar; los más pequeños cambios en su aparente rutina, hacen que nuestro planeta se caliente o se enfríe y, en definitiva, que se modifique el clima y así modificando el destino de las civilizaciones, incluida la nuestra.

Hay mecanismos de la física (gravedad contra radiación) que rigen su evolución y su envejecimiento (su línea temporal), una lucha constante y sin descanso, un delicado empate de fuerzas que se ha mantenido desde que la primera fusión encendiera el núcleo del Sol. Pero un día, inevitablemente, ese empate llegara a su fin. Según las múltiples formas de alcanzar el fin de la Tierra antes de tiempo, tan presentes en los medios de comunicación (situaciones mayoritariamente apocalípticas), pero la vida de nuestro planeta tampoco será eterna y su destino está marcado de forma indeleble por los mecanismos internos, que rigen la lenta transformación de nuestro Sol y de su inevitable final. A lo largo de la existencia del Sol y como resultado de la continua fusión, su núcleo se ha ido calentando de manera lenta a medida que el helio se ha ido acumulando y comprimiendo. Estas fusiones termonucleares se han ido acelerando y actualmente es un 40% más luminoso y energético que cuando era un recién nacido, hace 4.600 millones de años, obviamente la intensidad de energía (luz y calor) que llegará a la Tierra continuará aumentando, mientras siga acumulando helio en su centro y esta tendencia continuará hasta el final. Pero los problemas habrán empezado mucho antes de ese final, la agonía del Sol afectara de manera dramática a la suerte de la Tierra. Dentro de unos 600 millones de años, la luminosidad solar habrá aumentado en un 10% y activara una serie de mecanismos que afectaran directamente al planeta (afectara directamente al clima y al normal funcionamiento de la vida), el principal problema sería un ultra efecto invernadero, provocando que se fundan todas las masas de hielo (dejara de existir el agua en estado sólido) sobre el planeta. Al tiempo, los océanos se calentarán, aumentando la evaporación del agua. La atmósfera terrestre se llenará de vapor, que contribuirá a retener aún más calor (independientemente del Sol) y a más calor, más evaporación de agua. En ese punto, la temperatura media de la Tierra se encontrará cercana de los 50°C y evaporará por completo los océanos [7] y en un plazo de 1.300 millones de años, el planeta podría quedar libre de vida compleja. La dramática situación terrestre seguirá, dentro de 3.500 millones de años, la influencia del Sol volverá a sentirse sobre la Tierra, su brillo aumentará un 40% más que en la actualidad y será capaz de fundir la roca de la superficie terrestre. El Sol, completamente indiferente al desastre terrestre (sin mencionar a Mercurio y Venus), continuara con su evolución física (comienza la fase de supergigante roja), en unos 4.800 millones de años. Brillará un 67% más que ahora, después esta cifra aumentará hasta el 120%, también perderá mucha masa a través del viento solar, provocando una alteración en las órbitas de los planetas. La Tierra, se desplazará a una distancia de unos 225 millones de kilómetros, esto quizá la

"salvará" temporalmente, ya que el Sol aumentará su tamaño de forma radical hasta los 180 millones de kilómetros de radio y su atmósfera se tragará las órbitas de Mercurio y Venus, en un plazo de unos 7.500 millones de años. La Tierra, estando tan cerca de la agonía final del Sol y afectada su órbita (que se reducirá) por el fenómeno de las mareas gravitatorias, las mismas que perturbarán a la Luna, cuya órbita se acercará a menos de 20.000 kilómetros, momento en que será destruida y desmenuzada, cayendo sus restos sobre el planeta. En este punto, algunos científicos opinan que la infernal Tierra acabará siendo devorada por la atmósfera solar, pero otros piensan que podría aún aguantar en su precaria órbita. De todas maneras, antes de eso, el planeta habrá perdido su atmósfera de forma rápida y su superficie será magma líquido en torno a 1.500°C.

El Sol aún vivirá varios miles de millones de años más como una enana blanca, pero estará tan débil que su gravedad no tendrá fuerza para mantener unido al Sistema Solar. Sin su poder, los restos del Sistema Solar estarán expuestos, no sólo a las últimas oleadas de radiación del Sol, sino a los potentes rayos interestelares. Los átomos de lo que un día fue el Sistema Solar (incluidos nosotros) se esparcirán por toda la galaxia.

Referencias:

- [1] Nuestra galaxia tiene una serie de brazos espirales, y el Sol se encuentra actualmente en el pequeño brazo espiral que llamamos el "brazo de Orión" (o brazo local), que es una conexión entre dos brazos espirales mayores que están cerca de nosotros: el de Sagitario y el de Perseo.
- [2] (Nube molecular gigante) compuesta principalmente de hidrógeno molecular y helio, con cantidades pequeñas de gases más pesados, ellas son las cunas del nacimiento de nuevas estrellas y planetas. <http://legacy.spitzer.caltech.edu/espanol/edu/ask/nebula.html>
- [3] Un punto azul pálido (Pale Blue Dot), es una fotografía de la Tierra tomada por la sonda espacial Voyager 1 desde una distancia de 6000 millones de kilómetros. La imagen muestra la Tierra como una mota o punto de luz casi imperceptible debido al fulgor del Sol. Wikipedia
- [4] El Sol es una estrella de segunda generación, pues se formó hace 4.600 millones de años, en una época en que la galaxia tenía más de 10.000 millones de años. (Pag.150. Soles en Explosión.)
- [5] <https://www.bbc.com/mundo/noticias-44041257>
- [6] Una supernova es la explosión más grande que podemos imaginarnos, el brillante y último suspiro de una estrella que tiene al menos cinco veces más masa que nuestro Sol. <https://spaceplace.nasa.gov/review/dr-marc-space/supernovas.sp.html>
- [7] Los modelos de temperaturas, indican la ausencia total de agua líquida en un plazo de 1.100 millones de años, y una situación similar a la existente hoy en día en Venus. (Pag.223. La muerte llega desde el cielo).

Bibliografía:

- (1) David Whitehouse, 2006, El Sol. Una Biografía, Madrid, Kailas Editorial.
- (2) Philip Plait, 2010, La muerte llega desde el cielo, Madrid, Ma Non Troppo.
- (3) Mariano Ribas Bertrán, 2010, Historia de las Estrellas, Buenos Aires, Capital Intelectual.
- (4) Isaac Asimov, 1994, Soles en Explosión, Barcelona, RBA Editores.
- (5) Carl Sagan, 1980, *Cosmos*, New York, Random House.

Joaquín Manuel Ramírez Rodríguez.

Ingeniero Técnico Industrial. Grado en Ingeniería.

9.5 El ciclo de las estrellas.

Para comenzar a hablar sobre las vidas de las estrellas, sobre cómo es el ciclo de sus vidas, debemos saber cuáles son las ecuaciones y condiciones que gobiernan o regulan el interior de las mismas. Antes que nada, se deben realizar las siguientes suposiciones, solo válidas en una primera aproximación: (i) Todas las estrellas presentan simetría esférica, (ii) no sufren la presencia de fuerzas externas, y los efectos producidos por los campos magnéticos y/o de la rotación son despreciables, (iii) la composición química inicial es uniforme en toda la esfera, y (iv) se encuentran en estado estacionario, es decir que los cambios que en ellas se producen son muy lentos.

Hechas estas suposiciones, hay cinco ecuaciones fundamentales que regulan los interiores estelares:

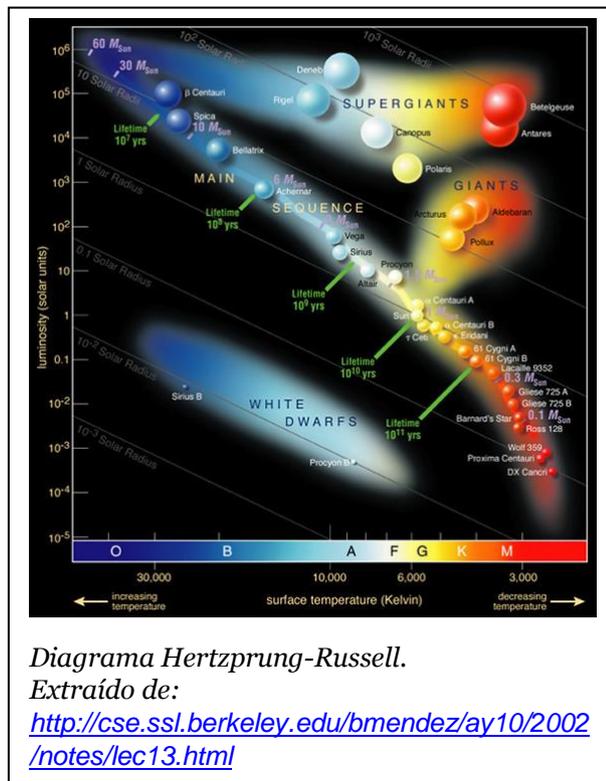
- La ecuación de equilibrio hidrostático, la cual indica que existe un balance entre la gravedad que empuja hacia el centro (el peso de cada elemento de volumen) y la presión de los gases (que empujan hacia afuera). Es decir, que esta ecuación balancea la fuerza gravitatoria que hace que se contraiga la masa con la fuerza de presión de los gases. Este balance es fundamental para que la estrella se mantenga estable, es decir ni se contraiga ni se expanda.
- La ecuación de conservación de la masa indica cómo la masa en el interior de la estrella, que se encuentra a una cierta distancia, cambia con la distancia al centro de la misma.
- La ecuación de estado señala que el gas que compone la estrella se comporta como un gas ideal.
- La ecuación del equilibrio térmico muestra que la energía total que pierde la estrella por unidad de tiempo es compensada por la energía nuclear generada por unidad de tiempo en el interior de la estrella.
- La quinta ecuación hace referencia a la manera en que se transporta la energía generada en el centro de la estrella hacia su superficie. Si bien existen tres mecanismos de transporte de energía: radiación, convección y conducción, el que prevalece, en general, es el transporte radiativo. Este mecanismo permite que la energía sea transmitida por fotones.

A partir de estas ecuaciones se puede obtener la denominada "relación masa-luminosidad", la cual indica que la luminosidad de una estrella es

directamente proporcional al cubo de su masa. Sumado a esto, el enunciado de Vogt-Russell establece que son la masa y la composición química de una estrella las que determinan su radio, luminosidad y estructura interna, como así también su evolución posterior. Es decir que la masa, en primer lugar, y la composición química en menor medida, son las que determinan el resto de las propiedades estelares.

Para referirnos al ciclo de las estrellas, debemos comenzar mencionando cómo nacen las mismas, y qué es lo que las lleva a convertirse en estrellas. Las estrellas nacen de enormes nubes moleculares de muy baja temperatura (por lo que abundan las moléculas) que se encuentran en el medio interestelar, junto con H y He. Por alguna razón ésta se comienza a comprimir en una zona en particular, formando un centro de condensación de gas y polvo, hacia el cual colapsan las porciones circundantes de la nube molecular. De esta manera se genera un objeto denso llamado protoestrella. La protoestrella continúa contrayéndose y la energía potencial gravitatoria se convierte en energía térmica, hasta que la temperatura en el interior es tan alta que da comienzo a la fusión nuclear; la presión y la temperatura en el interior estelar se estabilizan y se detiene la contracción gravitatoria. Ha nacido una estrella. A veces, la masa inicial no es la suficientemente alta, y estamos en presencia de una estrella fallida, denominada "enana marrón" (o enana café), con masas que oscilan entre las 10 y las 80 masas de Júpiter, es decir con masas entre 0.01 y 0.08 masas solares, aproximadamente.

Las estrellas pasarán la mayor parte de su vida, sea larga o corta, en un estado de equilibrio termonuclear, fusionando el H de sus núcleos en He. El proceso por el cual harán esta transformación, dependerá de la temperatura que tengan en sus núcleos. De esta manera, la composición química del centro de la estrella irá cambiando muy lentamente, lo que implica un cambio en la estructura estelar. Para una estrella como el Sol, su tiempo en este estadio, denominado "secuencia principal" (en el Diagrama de Hertzsprung-Russell, ver figura) es de alrededor de 10.000 millones de años, en tanto que para una estrella con una masa de un tercio de la solar será de 100.000 millones de años, y para una estrella 15 veces más



masiva que el Sol será de solo un millón de años. Es decir que dependerá de su masa inicial: las más masivas evolucionarán más rápido, en tanto que las menos masivas lo harán más lento. Y de ésta dependerá cómo será su posterior evolución.

Las estrellas de baja masa, es decir con masas inferiores a ~ 5-8 masas solares, como es el caso de nuestro Sol, comenzarán a acumular He en su núcleo, que por ser más pesado, se contrae aún más, en tanto que las regiones exteriores se comienzan a expandir, aumentando así su tamaño y su luminosidad, aunque la temperatura de las capas exteriores disminuye, debido a que se encuentran alejadas del centro. De esta manera, la estrella se ha convertido en una "gigante roja". Para estrellas de masas superiores a las indicadas, sus tamaños y luminosidades serán aún mayores, por lo que se convertirán en "supergigantes rojas". Una vez que el núcleo ha fusionado aproximadamente la mitad de H en He, el núcleo, ahora de He, se contrae aumentando su temperatura, fusionando partículas aún más pesadas, tal como el He en Be, y luego en C. Este proceso se denomina: "proceso triple alfa". Así la estrella se podría comparar con una cebolla, ya que en cada capa van apareciendo diferentes elementos químicos.

Una vez que el He de su núcleo se ha agotado, el núcleo estelar, ahora más pesado, se contraerá, por lo que aumentará la temperatura. Iniciando nuevamente la fusión del H en las capas subsiguientes. Por este motivo, las regiones externas volverán a expandirse, disminuyendo nuevamente la temperatura en las capas superiores. Este proceso puede continuar de acuerdo a la temperatura, para obtener elementos químicos cada vez más pesados, como el Al, Si, etc. De esta manera, se puede pensar una estrella con un núcleo muy pesado, en la que en cada capa se están generando nuevos elementos. En el caso de estrellas de baja masa, el núcleo de C no se puede transformar en elementos más pesados, por lo que el núcleo se contraerá rápidamente, y aumenta la temperatura que le permitirá al He que rodea al núcleo, fusionarse en elementos más pesados. Las capas externas se expanden y enfrían, por lo que ahora la estrella consta de dos partes, por un lado, un pequeño núcleo extremadamente denso de C, denominado "enana blanca", y por el otro, una envoltura que tiene el tamaño del Sistema Solar, la denominada "nebulosa planetaria". Vale aclarar que las nebulosas planetarias deben su nombre a que cuando fueran descubiertas con los instrumentos que había disponibles, presentaban una apariencia borrosa, tal como la de Urano.

Una enana blanca brilla solo por su elevada temperatura. A medida que se enfría, su tamaño no cambia significativamente, simplemente se hace cada vez más débil y finalmente cesa de brillar, transformándose en lo que se denomina una "enana negra", aún un objeto teórico. Las enanas blancas presentan radios muy similares al de la Tierra y masas del orden de la mitad de la masa solar, es decir una masa del orden de 150.000 masas de la Tierra, contenida en el mismo radio, por lo que son objetos extremadamente densos.

El motivo por el cual existen densidades tan elevadas en las enanas blancas se debe a que toda la energía nuclear ha sido consumida y la estrella se contrae gravitacionalmente hasta que la presión del gas degenerado de electrones la detiene. Existe un límite de masa más allá del cual no pueden existir enanas blancas estables. Dicha masa límite es conocida como "límite de Chandrasekhar", que es aproximadamente 1.4 masas solares. Si la masa de la estrella central es mayor que 1.4 masas solares, entonces se producirá un colapso del núcleo que liberará una enorme cantidad de energía. Este fenómeno de explosión y eyección de materia se denomina "supernova". Durante este colapso se producen numerosos elementos pesados que son liberados al medio interestelar, enriqueciéndolo. Durante el fenómeno de supernova, la radiación emitida es tan grande que el brillo de la estrella puede ser del orden de la galaxia que la alberga. La estrella central se transformará en una "estrella de neutrones", en tanto que si el remanente es mayor a 4 masas solares, se formará "agujero negro". Hay dos capítulos dedicados a estos dos particulares objetos.

Hace más de cuatro siglos que no se observa una supernova en nuestra Galaxia, aunque sí en otras galaxias. Las supernovas producen destellos de luz muy intensos que pueden durar desde varias semanas a varios meses. Se caracterizan por un rápido aumento de la intensidad hasta alcanzar un máximo, para luego decrecer en brillo de forma más o menos suave hasta desaparecer completamente. Vale mencionar dos casos particulares relacionados con este fenómeno: por un lado el registro de la supernova que se observara en la Nube Mayor de Magallanes (1987A), que los conocedores, pudieron registrarla a simple vista prácticamente, permitiendo tener un registro preciso de este fenómeno desde su comienzo, y por otro lado, el estudio de supernovas realizada en Chile entre los años 1989 y 1996 (Proyecto Calán-Tololo – C&T) que permitiera contribuir a determinar la expansión acelerada del Universo. Respecto a nuestra Galaxia, se espera que en los próximos años (en uno o 1000 más) se pueda disfrutar de una supernova. Todos los ojos están puestos en Betelgeuse y en Eta-Carinae... ¿Lo veremos?

La última línea de esta contribución va dedicada a Carl Sagan, mi primer Maestro Astronómico, gracias a quien pude descubrir el firmamento y saber que estaba a mi alcance²⁶.

Andrea Verónica Ahumada.

Doctora en Astronomía.

Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

²⁶ Nota de los coordinadores. Texto maravilloso de Andrea en el libro *CIENCIA, y yo quiero ser científico!!!* Este texto se titula "Y yo quiero ser... Astrónoma Observacional" y está disponible: <https://yoquierosercientifico.blogspot.com/2018/01/yo-quiero-ser-astronoma-observacional.html>

9.6 Agujeros negros.

Leí *Cosmos* cuando estaba en la EGB. Me lo regalaron Antonia y Mari Cruz, dos amigas de mi madre que a su vez eran madres de varios amigos míos del colegio. Un año, al acabar el curso, me trajeron *Cosmos* y otro libro menos conocido de Carl Sagan, *Cometa*. Me los leí casi enteros ese mismo verano.

Lo que más me impactó de *Cosmos* fue una demostración que había al final, en un apéndice, sobre la irracionalidad de raíz de 2. Era por reducción al absurdo: suponer que la raíz cuadrada de 2 puede escribirse como un cociente de enteros y, a partir de ahí, llegar a una contradicción evidente, algo del tipo $2=1$. Aquella debió ser una de las primeras demostraciones matemáticas «serias» que yo veía en mi vida, y el hecho de que unas pocas líneas de cálculo bastasen para probar algo tan general (que, de *todas* las infinitas fracciones posibles de enteros, ninguna podría ser nunca igual a raíz de 2) fue algo que me causó una profunda fascinación (Emilio Tejera ha dedicado a ese apéndice el capítulo 14.1 de este libro).

Lo segundo que más me impactó fueron unas ilustraciones que había en el capítulo «Las vidas de las estrellas». En ellas se representaba un futuro inimaginablemente lejano: la muerte del Sol según se vería desde una isla en la Tierra. La primera —la que más me impresionó— mostraba un amanecer idílico que el pie de figura describía como «el último día perfecto»: el último día normal que habría en la Tierra antes de que el Sol comenzara a hincharse para transformarse en una gigante roja y abrasar nuestro planeta. Mucho después, el Sol se haría pequeño de nuevo y acabaría convertido para siempre en una enana blanca, un cadáver estelar con aproximadamente la misma masa que el Sol pero del tamaño de la Tierra.

En aquel capítulo, sin embargo, también se explicaba que no todas las estrellas sufren el mismo destino. Aquellas considerablemente mayores que el Sol explotan y acaban convertidas en agujeros negros: regiones del espaciotiempo en las que, si uno entra, no podrá salir jamás. Aquella idea me produjo entre escepticismo y miedo. Lo que yo no sabía aquel verano en que me leí *Cosmos* era que la combinación de esas dos cosas, las matemáticas y

los agujeros negros, estaba relacionada con uno de los mayores rompecabezas conocidos sobre nuestra comprensión del universo.

Agujeros negros con lápiz y papel.

Los agujeros negros fueron descubiertos en 1915, aunque no con ayuda de ningún telescopio, sino con lápiz y papel. Aparecieron en los cálculos del astrónomo alemán Karl Schwarzschild muy poco después de que Albert Einstein presentara las ecuaciones de la relatividad general, la flamante teoría del campo gravitatorio que habría de reemplazar a la de Newton. Dado que Einstein había dado con una nueva manera de describir la atracción gravitatoria entre los cuerpos, Schwarzschild se propuso resolver el problema más sencillo posible: cuál sería, según las nuevas ecuaciones, el campo gravitatorio creado por una masa puntual.

Schwarzschild (cuyo apellido curiosamente significa «escudo negro» en alemán, aunque eso no parece haber desempeñado ningún papel en el nombre que mucho más tarde acabarían recibiendo estos objetos) no vivió lo suficiente para verlo, pues murió unos meses más tarde en el frente ruso de la Primera Guerra Mundial. Sin embargo, poco después se descubrió que su solución implicaba la existencia de un «horizonte de sucesos»: una frontera más allá de la cual nada, ni siquiera la luz, puede escapar.

Semejante fenómeno no aparece nunca en los objetos ordinarios. En el caso del Sol, por ejemplo, habría que concentrar toda su masa (unos dos quintillones de kilos, $2 \cdot 10^{30}$ kg) en una esfera de menos de 3 kilómetros de radio para que se formase un horizonte de sucesos. Pero, bajo tales condiciones extremas, la relatividad general de Einstein predice la formación de un agujero negro.

Las propiedades matemáticas de los horizontes de sucesos son tan complejas que no llegaron a conocerse bien hasta los años sesenta. Fue entonces cuando John Wheeler, uno de los grandes físicos teóricos del siglo XX, popularizó el término *agujero negro*. Es un buen nombre: al igual que ocurre con un agujero en el suelo, las cosas que se acercan demasiado tienden a caer hacia ellos. Y son —literalmente— negros, ya que no permiten que la luz (ni, por tanto, nada más) escape de su interior.

El nacimiento de una paradoja.

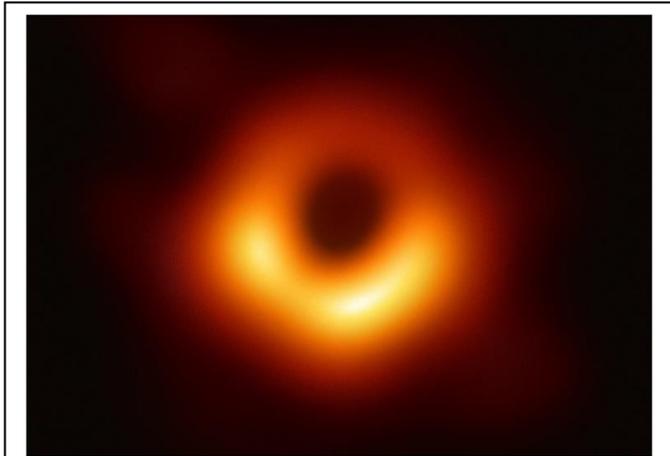
Un avance fundamental llegó en 1974, seis años antes de que Sagan publicara *Cosmos*. Aquel año, Stephen Hawking analizó por primera vez qué ocurriría al considerar los efectos de la mecánica cuántica en la vecindad de un horizonte de sucesos. Al hacerlo, halló algo sorprendente: que los efectos cuánticos permiten que algunas partículas *sí* escapen de un agujero negro. En otras palabras, los agujeros negros no son realmente negros, sino que emiten una

tenue radiación. Este descubrimiento dio lugar a una de las mayores paradojas de la física matemática moderna; una que, hasta hoy, sigue sin respuesta.

La paradoja es la siguiente. Que un agujero negro emita partículas implica que, poco a poco, va perdiendo masa. Ese proceso continúa hasta que el agujero negro desaparece por completo y solo deja tras de sí una nube informe de partículas. Sin embargo, Hawking demostró que esas partículas tienen siempre las mismas propiedades, con independencia de lo que antes haya caído en el agujero negro. Por tanto, si lanzamos un ejemplar de *Cosmos* a un agujero negro, cuando este desaparezca quedará una nube de partículas. Pero si en lugar de *Cosmos* arrojamos un ejemplar de *Cometa* (el otro libro que me regalaron Antonia y Mari Cruz aquel verano), el resultado final será una nube de partículas exactamente idéntica a la anterior.

Como consecuencia, a partir de la nube de partículas que queda cuando el agujero negro ha desaparecido no podremos saber nunca cuál fue el libro que cayó en él. Eso implica que la información del libro se habrá perdido para siempre. Y esto plantea una paradoja porque uno de los pilares de la mecánica cuántica establece que la información es como la energía: puede transformarse, pero nunca perderse del todo.

Hoy, más de cuarenta años después de que Hawking hiciera su descubrimiento, los físicos siguen sin saber cuál es el destino de la información que cae en un agujero negro. Pero la respuesta es importante, ya que guarda relación con las propiedades cuánticas de la fuerza más misteriosa de la naturaleza: la gravedad.



La primera fotografía de un agujero negro, publicada en abril de 2019.

Crédito: EHT Collaboration:

<https://eventhorizontelescope.org/press-release-april-10-2019-astronomers-capture-first-image-black-hole>

De *Cosmos* a hoy.

Todo esto es anterior a *Cosmos* y, en principio, solo tiene que ver con las propiedades matemáticas de una solución de las ecuaciones de Einstein. Pero ¿existen realmente los agujeros negros? Y de ser el caso, ¿qué relación tienen con la solución de Schwarzschild y la paradoja de Hawking?

De hecho, y aunque a veces una y otra se confunden, hasta hoy la investigación sobre agujeros negros ha transcurrido por dos sendas largamente

independientes: la matemática y la astrofísica. Por «astrofísica» me refiero a la que hacen los astrónomos; que, además de con lápiz y papel, tienen la buena costumbre de trabajar con telescopios.

Los primeros indicios sólidos de que los agujeros negros efectivamente pueblan el universo llegaron en los años setenta. Hoy, las pruebas al respecto son tan abrumadoras (Luis J. Goicoechea ha repasado algunas en el capítulo 9.5) que la inmensa mayoría de los científicos creen firmemente en su existencia. Las observaciones con telescopios no muestran los agujeros negros en sí, sino la materia que cae hacia ellos. A pesar de ello, tales observaciones han revelado la existencia de astros tan masivos y compactos que solo pueden ser agujeros negros. La primera imagen «en primer plano» de uno de estos objetos se logró en 2019 (véase *la fotografía*), y sus propiedades cuadran a la perfección con las predichas por la teoría de Einstein.

Con todo, el mayor avance en este campo desde que Sagan publicara su libro probablemente ocurriera en 2015, justo cien años después de que Schwarzschild encontrara su solución. Aquel año, el experimento LIGO logró la primera detección directa de ondas gravitacionales, perturbaciones del espaciotiempo causadas por grandes cataclismos astrofísicos. Según todos los datos, corroborados en numerosas observaciones posteriores, aquellas ondas procedían de la colisión de dos agujeros negros en una galaxia distante.

¿Por qué es tan importante todo esto? Al igual que el átomo de hidrógeno fue la pieza que ayudó a revelar los secretos de la teoría cuántica, hace tiempo que los físicos teóricos creen que los agujeros negros serán la pieza que les ayude a entender el funcionamiento cuántico de la gravedad. Hasta hoy, las observaciones astrofísicas no han bastado para estudiar con detalle las propiedades de los horizontes de sucesos. Pero puede que, gracias a las ondas gravitacionales y otros experimentos, en un futuro estas dos grandes líneas de investigación comiencen por fin a converger, aunque sea tímidamente. Estoy convencido de que a Sagan le hubiese encantado verlo.

Bibliografía

- (1) Stephen Hawking, 2013. *Historia del tiempo: Del big bang a los agujeros negros*. Crítica (edición especial 25º aniversario).
- (2) José Luis Fernández Barbón, 2014. *Los agujeros negros*. Catarata/CSIC, colección *¿Qué sabemos de?*
- (3) Roberto Emparan, 2018. *Iluminando el lado oscuro del universo: Agujeros negros, ondas gravitatorias y otras melodías de Einstein*. Ariel.
- (4) Steven S. Gubser y Frans Pretorius, 2019. *El pequeño libro de los agujeros negros*. Crítica.

Ernesto Lozano.

Doctor en física teórica.

Editor de *Investigación y Ciencia*.

9.7 La gravedad y sus efectos.

En el Cosmos de 1980, Carl Sagan nos explica como la gravedad determina la formación y evolución de las estrellas. También es responsable de que cuerpos gaseosos o rocosos orbiten en torno a ellas, y así puedan recibir su luz de forma ininterrumpida. Una luz que pudiera sustentar formas de vida. En realidad, el milagro de la vida en un planeta está asociado al misterioso comportamiento de la fuerza que le une a su estrella compañera. La fuerza de gravedad del Sol disminuye a medida que nos alejamos del mismo, y de una forma más rigurosa, la ley de gravitación universal nos dice que dicha fuerza es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. Este comportamiento espacial juega un papel crítico. En el siglo XIX, el matemático Joseph Bertrand demostró que la única fuerza central atractiva que disminuye con la distancia r y produce órbitas cerradas estables es aquella que varía como $1/r^2$ [1].

Carl Sagan también describió una "máquina mágica de gravedad" que nos permitió intuir el aspecto de edificios y seres vivos en planetas con campos gravitatorios diferentes al terrestre, o como nos afectaría un indeseable cambio en la gravedad sobre la superficie de nuestro planeta. Acompañados por el gato de Cheshire²⁷, descubrimos que la gravedad no solo afecta a las personas, a nuestros objetos cotidianos, a los planetas y a las estrellas. Por ejemplo, los rayos de luz no se propagan en línea recta en presencia de un campo gravitatorio. La luz describe trayectorias curvas, y un campo muy intenso es incluso capaz de detener completamente el movimiento de las partículas (fotones) que la forman. Entonces, ¿podemos usar la gravedad para "congelar" la luz? Imaginemos que el gato de Cheshire ha viajado hasta el Sol y pretende regresar al País de las Maravillas. Para abandonar la superficie solar, necesita dar un salto a una velocidad que le permita escapar de la gravedad de la estrella. Esta velocidad de escape es $(2GM_{\odot}/R_{\odot})^{1/2}$, donde G es la constante de gravitación universal, y M_{\odot} y R_{\odot} son la masa y el radio del Sol, respectivamente. Haciendo cálculos, comprobamos que el gato mágico debe viajar a más de 600 kilómetros por segundo para encontrarse de nuevo con Alicia. Aunque necesita un gran impulso y un traje especial que le proteja en un

²⁷ Gato sonriente que aparece (y desaparece) en las Aventuras de Alicia en el País de las Maravillas (Lewis Carroll, 1865).

ambiente tan hostil para la vida, la gravedad no le impide regresar a casa. Sin embargo, su situación se complica si el Sol sufre un colapso y adquiere un radio de unos 3 km. Entonces, la velocidad de escape sería de unos 300.000 kilómetros por segundo e incluso la luz quedaría congelada en su superficie²⁸. Para un observador lejano, la estrella se apagaría, convirtiéndose en un agujero negro.

A pesar de obtener conclusiones básicamente correctas, hemos discutido el efecto de la gravedad sobre la radiación haciendo "trampa", considerando fotones con masa sometidos a las leyes de Newton. Sin embargo, sabemos que los fotones que forman un rayo de luz no tienen masa, aunque si una cierta cantidad de energía proporcional a la frecuencia luminosa. Asimismo, en la mecánica newtoniana, una partícula con masa cero ($m = 0$) no sufre la atracción gravitatoria de otro objeto con masa M , ya que la fuerza es proporcional al producto de sus masas $m \times M = 0$. Albert Einstein desarrolló una perspectiva más general al suponer la equivalencia entre masa y energía, que nos permite entender la desviación y frenado de fotones en presencia de un objeto masivo. Por ejemplo, si un cuerpo emite luz azul y esta progresivamente colapsando, un observador lejano verá inicialmente un punto azul en el cielo, que de modo camaleónico se transforma en rojo, posteriormente se hace invisible al ojo humano, aunque potencialmente detectable mediante una antena de radio, y finalmente se incorpora al inmenso cielo oscuro. Es decir, los fotones pierden progresivamente energía (son frenados), disminuyendo paulatinamente la frecuencia de la luz observada. Actualmente hay pruebas convincentes de la existencia de agujeros negros que son fósiles de estrellas masivas que han sufrido un enorme colapso durante su evolución.

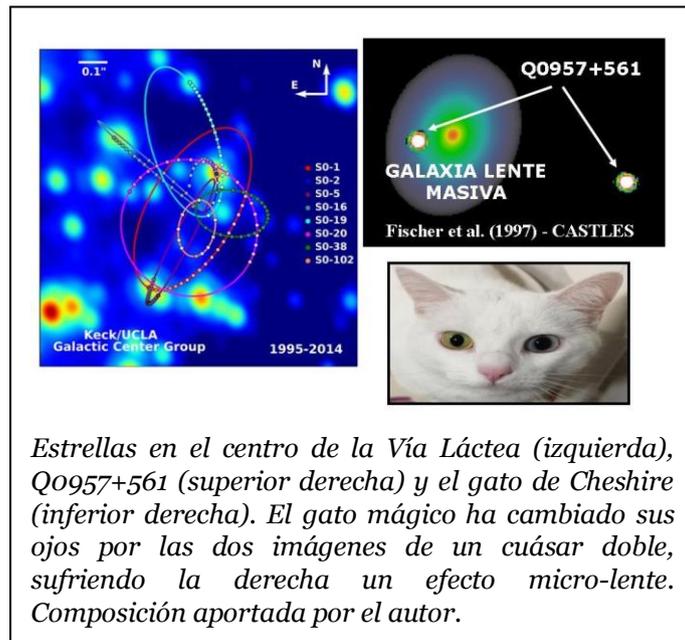
Pero Einstein fue más lejos, al suponer que la gravedad es una distorsión del espacio y del tiempo causada por el contenido de materia/energía. Para comprobar la validez de esta teoría de la Relatividad General (RG), se han realizado multitud de observaciones astronómicas durante los últimos 100 años. En 1919, Arthur Eddington y sus colaboradores compararon la posición aparente de estrellas cercanas al Sol durante un eclipse total con su posición real. Los datos fueron razonablemente consistentes con la desviación de la luz que predice la RG: $4GM_{\odot}/R_{\odot}c^2 = 1.75$ segundos de arco. Observaciones recientes durante el eclipse total de 2017 han permitido medir una desviación de 1.75 segundos de arco, con un error de solo un 3% (una cienmilésima de grado!) y en excelente concordancia con la RG [2]. Por otro lado, astrónomos de la Universidad de California-Los Ángeles han observado en el infrarrojo la posición de miles de estrellas en la región central de la Vía Láctea durante más de 20 años, lo que les ha permitido estudiar sus movimientos. Algunas de estas estrellas parecen orbitar el centro galáctico como lo hacen los planetas en torno al Sol (ver panel izquierdo de la

²⁸ La velocidad de la luz en el vacío vale $c = 299.792$ km/s.

Figura), y sus órbitas sugieren la presencia de un agujero negro de unos cuatro millones de masas solares en el corazón de la Vía Láctea. La estrella S0-2 es particularmente relevante, ya que cuando pasa por su pericentro²⁹ se sitúa a solo 17 horas luz del agujero negro supermasivo (unas cuatro veces la distancia que separa Neptuno del Sol), por lo que debe sufrir efectos gravitatorios relativamente fuertes. La RG predice un significativo desplazamiento al rojo (enrojecimiento espectral) gravitacional, así como una precesión orbital de unos 12 minutos de arco. Tales efectos han sido finalmente detectados por la colaboración GRAVITY [3].

Se cree que existen monstruos oscuros supermasivos en el centro de prácticamente todas las galaxias. En Abril de 2019, el Telescopio Horizonte de Sucesos (EHT por sus siglas en inglés), combinando las señales de ocho radiotelescopios repartidos por todo el planeta, obtuvo la primera imagen de un agujero negro almacenando más de 6.000 millones de masas solares en el centro de la galaxia cercana M87. Dicha imagen, así como nociones de gravedad cuántica y ondas gravitatorias se incluyen en la contribución 9.6 (*Agujeros Negros* por Ernesto Lozano) de este libro. La foto que tomó la colaboración EHT muestra un anillo brillante asimétrico con un diámetro de aproximadamente 40 microsegundos de arco y rodeando una región oscura. Esta imagen es consistente con emisión sincrotrón de un plasma caliente alrededor del agujero negro, que ha sufrido los efectos gravitatorios predichos por la RG. Las ideas de Einstein parecen haber superado un siglo de “exámenes exigentes” realizados en sistemas estelares y núcleos galácticos, y como veremos a continuación, también sobre escalas galácticas.

Cuando Carl Sagan publicaba *Cosmos*, se producía un descubrimiento que confirmaba la RG a escalas galácticas y que iba a tener profundas repercusiones. En la constelación de la Osa Mayor, se encontraron dos imágenes muy próximas y casi idénticas del mismo objeto lejano Q0957+561 (ver panel superior derecho de la Figura). Se trataba de un núcleo galáctico a nueve mil millones de años luz de nosotros que sufría el efecto lente gravitatoria de una



Estrellas en el centro de la Vía Láctea (izquierda), Q0957+561 (superior derecha) y el gato de Cheshire (inferior derecha). El gato mágico ha cambiado sus ojos por las dos imágenes de un cuásar doble, sufriendo la derecha un efecto micro-lente. Composición aportada por el autor.

²⁹ En una órbita elíptica es el punto más cercano al foco.

galaxia masiva y un cúmulo galáctico situados entre la fuente lejana y la Tierra. En este caso, la gravedad del monstruo masivo no desvía tímidamente la luz de la fuente remota (como hace el Sol con las estrellas próximas). La galaxia y el cúmulo que la acompaña actúan como una lente convergente: dos rayos divergentes pasando a ambos lados del sistema galaxia+cúmulo son desviados hacia la Tierra para formar dos imágenes separadas por seis segundos de arco.

Muchos núcleos galácticos lejanos son activos, incluyendo a Q0957+561. Esto quiere decir que su agujero negro central tiene una envoltura formada por varias estructuras con gas y polvo, cuya emisión es variable. Usualmente se les llama cuásares, y a veces, como consecuencia de efectos lente gravitatoria, encontramos cuásares con varias imágenes o cuásares múltiples. Los cuásares múltiples son una piedra de Rosetta para descifrar los misterios del Cosmos [4]. Por ejemplo, cuando se detecta una variación en el brillo de una imagen de un cuásar múltiple, hay que esperar algunos días, meses o incluso años para observar la misma variación en otra imagen. Estos retardos predichos por la RG, se han convertido en una pieza fundamental para determinar con precisión la expansión actual del Universo. Por otro lado, cuando la luz de una imagen penetra en una galaxia actuando como lente gravitatoria, puede sufrir un efecto lente adicional debido a la población de estrellas en la región atravesada. Superpuesto al efecto macro-lente de la galaxia como un todo, aparece así un efecto micro-lente de estrellas. El estudio de este fenómeno físico está permitiendo conocer las poblaciones estelares de galaxias relativamente distantes, y la estructura interna de cuásares. Las microlentes (estrellas) producen una magnificación selectiva. Amplifican más el brillo de las regiones más compactas y calientes en la vecindad del agujero negro, dando lugar a un azulamiento espectral (ver panel inferior derecho de la Figura).

Referencias:

- [1] H. Goldstein, 1987, *Mecánica Clásica*, Editorial Reverté, pág. 112. [versión papel: ISBN 978-84-291-4306-5; versión electrónica (PDF): ISBN 978-84-291-9457-9]
- [2] D. G. Bruns, 2018, *Gravitational starlight deflection measurements during the 21 August 2017 total solar eclipse*, *Classical and Quantum Gravity*, **35**, ID 075009
- [3] GRAVITY Collaboration, 2018, *Detection of the gravitational redshift in the orbit of the star S2 near the Galactic centre massive black hole*, *Astronomy & Astrophysics*, **615**, L15; 2020, *Detection of the Schwarzschild precession in the orbit of the star S2 near the Galactic centre massive black hole*, *Astronomy & Astrophysics*, **636**, L5
- [4] T. Treu, 2010, *Strong lensing by galaxies*, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, **48**, 87

Luis J. Goicoechea Santamaría.

Doctor en Ciencias Físicas.

Catedrático de Astronomía y Astrofísica, Universidad de Cantabria.

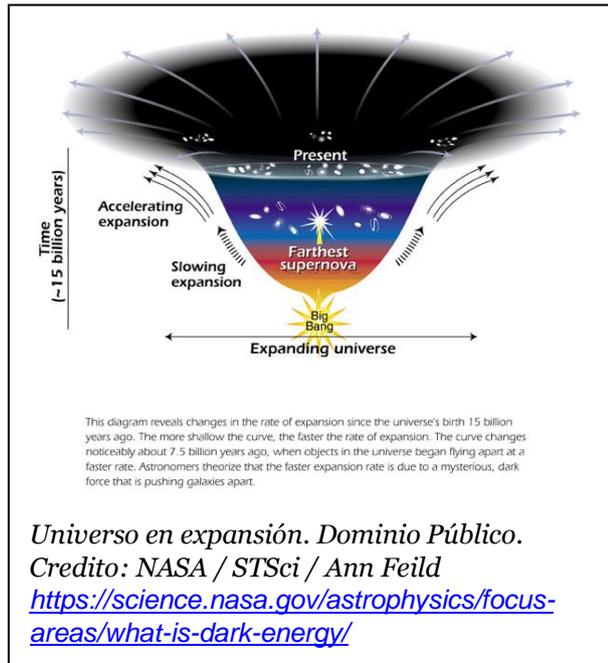
9.8

Un universo en constante cambio.

Mi recuerdo personal de la serie Cosmos fue un verano en Asturias, siguiendo la serie después de cenar en un restaurante de playa en mi querida villa de Llanes. Recuerdo especialmente la ciudad de Vinci (no me puedo imaginar por qué), como ejemplo de lo que podría ser viajar a la velocidad de la luz, después de rebajarle unos cuantos céros, para que fuera perceptible para un ciclista. Lo que no podía imaginar es que, diez años después, iba a ser yo quien fuera a trabajar en Relatividad General.

La idea que teníamos del universo en los años ochenta, básicamente la que prevalecía desde los años veinte, era la de un universo homogéneo a gran escala que, dependiendo de la cantidad de materia que contuviera, podría expandirse indefinidamente (muerte fría) o acabar reconcentrándose en una nueva singularidad, contrapartida del Big Bang inicial. Por aquella época, las observaciones daban a entender que estábamos próximos a la divisoria entre ambas posibilidades, lo que suscitó el problema de la "materia oscura", ya que la cantidad de materia observable no permitía aproximarse ni de lejos a dicho límite. Tenía que haber materia oculta en forma de estrellas apagadas, planetas inobservados, neutrinos con masa... Discusiones que, por cierto, siguen aún en pie. El cambio de paradigma se dio a finales de siglo cuando las observaciones basadas en supernovas daban a entender que nuestro universo se estaba expandiendo, pero aceleradamente, lo que no cuadraba con los modelos que acabo de mencionar. Desde entonces este dato se ha ido corroborando con otros tipos de observaciones, lo que ha complicado aún más el problema de nuestro desconocimiento del universo. Con las observaciones del satélite Planck, se estima que el 4.9% del contenido del universo es materia ordinaria, un 26.8% es materia oscura y nada menos que un 68.3% es la "energía oscura" que alimenta la expansión acelerada del universo. ¡Una buena dosis de humildad admitir que nuestro conocimiento apenas alcanza el 5% del universo! Habrá que esperar a la siguiente actualización, al menos, de este enigma, ya que a fecha de hoy no tenemos la solución definitiva. Hay científicos que proponen una modificación de la teoría de la gravedad, más allá de la relatividad general, frente a quienes mantienen que se puede mantener la teoría añadiendo algún campo nuevo más, que explique la energía oscura.

De momento, el modelo más simple que responde correctamente a más preguntas es el modelo Λ CDM: este modelo propone un universo sin curvatura espacial dentro de la teoría de la relatividad general, en el que la materia oscura es "fría" (de ahí las siglas CDM, Cold Dark Matter), en el sentido de que se mueve a velocidades muy inferiores a la de la luz, y la energía oscura viene descrita por una constante cosmológica Λ . Sí, amigos, esto es un bonito ejemplo de la retranca de la historia: Einstein propuso la constante cosmológica para mantener el universo estático, hasta que tuvo que aceptar el universo en expansión y admitió que la constante cosmológica había sido su mayor error. Parece que la constante cosmológica se resistía a morir, como por otro lado apuntaban las teorías cuánticas de campos, que predecían constantes cosmológicas grandes. Otras propuestas sustituyen la constante cosmológica por un campo, como la "quintaesencia" (los físicos tenemos un sentido del humor muy fino escogiendo nombres). No es una cuestión menor, ya que, dependiendo de la naturaleza de este campo el universo podría no expandirse indefinidamente, como cabría suponer, sino acabar en un Gran Desgarro (Big Rip en inglés), otro tipo de singularidad, distinta de la inicial, en la que todas las estructuras, galaxias, sistemas solares... se irían desgarrando al aproximarse al tiempo final.



Nos estamos poniendo un poco apocalípticos. Por eso, vayamos a las buenas noticias. Más allá de la constante cosmológica, una de las grandes predicciones de la teoría de la relatividad general, pendiente desde su publicación, era la existencia de ondas gravitacionales.

Nos estamos poniendo un poco apocalípticos. Por eso, vayamos a las buenas noticias. Más allá de la constante cosmológica, una de las grandes predicciones de la teoría de la relatividad general, pendiente desde su publicación, era la existencia de ondas gravitacionales.

Para situarnos, hasta el siglo XIX eran conocidas las ondas materiales (olas en la superficie del agua, sonido en el aire, ondas sísmicas en la corteza terrestre...) y la publicación de las leyes de Maxwell del electromagnetismo vino a poner patas arriba nuestras ideas sobre ondas, ya que describían un nuevo tipo de ondas, las electromagnéticas, que se propagaban en el vacío, sin necesidad de soporte material. Esto causó mucha controversia en su momento, invocando la existencia (¿nos suena esta historia?) de un fluido, el éter, que permeaba el universo. Pero hoy en día está plenamente aceptada la propagación de la luz, de las ondas de radio, de los rayos X, de las microondas, en el vacío. Pero la relatividad general iba un paso más allá, ya

que una de sus consecuencias es que el propio espaciotiempo puede fluctuar, dando lugar a ondas gravitacionales. ¿Por qué no se habían detectado las ondas gravitacionales? Por su extrema debilidad. A la escala de los protones la fuerza gravitatoria es 10^{-36} veces más débil que la fuerza electromagnética. Pero, no solo eso, la radiación electromagnética es fundamentalmente dipolar (la antena más sencilla es el dipolo, formado por una carga positiva y otra negativa oscilantes). Pero en la gravitación no hay masas negativas, por lo que tenemos que bajar un orden para hallar la radiación cuadrupolar (debida a objetos cuya densidad varía y que no son esféricos). Esto supone que la radiación gravitatoria se diluye con la distancia mucho más rápidamente que la radiación electromagnética, lo cual, unido a su debilidad, ha supuesto un quebradero de cabeza para su detección. Por la debilidad de la fuerza gravitatoria, no podemos esperar la emisión de una antena gravitatoria, del tipo de las habituales de radio, con experimentos en la superficie terrestre. Nos vemos abocados a esperar acontecimientos muy energéticos, aunque distantes, del tipo de explosiones de supernovas, colapso de sistemas binarios formados por agujeros negros o estrellas de neutrones, rotando en torno a su centro de masa a velocidades de vértigo. Como el efecto del paso de una onda gravitacional altera el espaciotiempo, se esperaba que medidas ultraprecisas de longitudes pudieran detectar el paso de dichas ondas. De hecho, aunque no se hubieran detectado directamente dichas ondas gravitacionales, sí que teníamos pruebas indirectas de su existencia: en 1974 Hulse y Taylor detectaron ondas de radio provenientes de un púlsar binario, PSR B1913+16, formado por dos estrellas de neutrones rotando en torno a su centro de masas, con un periodo cada vez más corto y órbitas cada vez más cerradas, lo que implicaba una pérdida de energía. Esta disipación de energía se puede explicar con notable precisión teniendo en cuenta la energía de las ondas gravitacionales emitidas por el sistema, aunque no detectadas. Así pues, para la confirmación definitiva de la existencia de las ondas gravitacionales solo faltaba su detección directa.

El funcionamiento de un detector es fácil de entender, ya que es el mismo de la interferometría láser: se basa en dividir un haz láser en dos haces con direcciones perpendiculares, que se vuelven a reunir mediante espejos, pudiendo observarse los patrones de interferencia entre los dos haces. La idea es que la llegada de ondas gravitacionales del espacio causaría una distorsión del espaciotiempo, que acortaría o alargaría el recorrido de los haces del interferómetro, alterando el patrón de interferencia. En el observatorio LIGO (Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory), los brazos del interferómetro tienen cuatro kilómetros de longitud y permite detectar variaciones de 10^{-18} metros. Obviamente, para evitar observaciones espúreas y ampliar las posibilidades de detección, estas instalaciones están repartidas por el mundo para evitar posibles fuentes de error locales. El 14 de septiembre de 2015 se detectó por primera vez la señal del colapso de un sistema formado por dos agujeros negros. Desde entonces, entre LIGO y Virgo (una instalación europea similar ubicada en Italia) se ha incrementado el número de

detecciones de ondas gravitacionales, provenientes de sistemas binarios de agujeros negros, estrellas de neutrones y mixtos. ¡La era de la astronomía de ondas gravitacionales ha comenzado! De cara al futuro, está previsto llevar la detección al espacio, con proyectos como LISA (Laser Interferometer Space Antenna) con tres satélites enlazados con haces láser.

Aunque los dos fenómenos anteriores parecen eclipsar todo lo demás, no quisiera terminar esta reseña sin mencionar un tercero, el más antiguo de todos: la detección de inhomogeneidades en la radiación de fondo del universo.

En sus primeros instantes, el universo era un plasma formado por electrones, protones, neutrones y fotones que no podían formar átomos por su elevada energía. Solo cuando su temperatura bajó de los 3000 K, cuando el universo tenía una edad de 380.000 años, la energía de los fotones dejó de ionizar los nacientes átomos y la luz pudo viajar sin ser dispersada. Por la expansión del universo, en la actualidad la temperatura de estos fotones es de 2,7 K. Dicha radiación fue detectada por primera vez en 1965 por Penzias y Wilson de manera fortuita, ya que apareció como ruido de fondo en su instrumental. De hecho, ¡la "nieve" que observábamos en nuestros antiguos televisores analógicos se debía en parte a la recepción de la radiación de fondo! En su momento la detección de la CMB se consideró una prueba de la teoría del Big Bang frente a teorías hoy ya descartadas como la del universo estacionario. Sin embargo, su éxito planteaba ciertos problemas, ya que la radiación presentaba una notable isotropía, aunque debía presentar inhomogeneidades que dieran cuenta de la irregular distribución de materia del universo actual. Fue el satélite COBE el que en 1992 detectó por vez primera estas inhomogeneidades. Desde entonces otras misiones espaciales como WMAP y Planck, así como otras observaciones en la superficie terrestre, han completado el mapa de las inhomogeneidades, tanto en intensidad como en polarización, de la radiación de fondo del universo, confirmando detalles como la existencia de una etapa de expansión inflacionaria en los primeros instantes del universo.

Como curiosidad personal, la publicación de los primeros resultados del COBE coincidió prácticamente en el tiempo con la de mi primer trabajo sobre cosmologías no singulares. ¡A eso se le llama tener ojo clínico! En mi descargo he de decir que a fecha de hoy el papel de la singularidad inicial está lejos de estar claro, algo que solo una teoría de la gravedad cuántica acabará por dilucidar. Pero, eso, ¡tal vez en la próxima edición de este libro!

Leonardo Fernández Jambrina.

Doctor en Ciencias Físicas, Licenciado en Ciencias Físicas y en Ciencias Matemáticas.

Catedrático de Matemática Aplicada, Universidad Politécnica de Madrid.

9.9

El amanecer de la astronomía de neutrinos.

Es una feliz casualidad que Carl Sagan, en la introducción a su libro *Cosmos* en 1980, mencionase la Física de Neutrinos para ilustrar el continuo progreso científico. Por ello, parece especialmente apropiado que revisitemos su estado actual en este 40^o aniversario. Empecemos recordando que los neutrinos son unas de las partículas elementales, es decir, componentes fundamentales de la materia al igual que otras quizás más conocidas como los electrones o los quarks. En el *Cosmos* de 1980 se menciona "El Problema de Los Neutrinos Solares", esto es, la observación de un número de neutrinos procedentes del Sol menor que el esperado. Los neutrinos se producen en el Sol como productos secundarios de las reacciones nucleares de fusión que ocurren en su interior, y logran escapar gracias a su escasa probabilidad de interactuar con otras partículas. Desde mediados de los años 60, físicos de partículas se propusieron detectar estos neutrinos usando gigantescos detectores para lograr atrapar algunos, y una vez tras otra obtuvieron resultados mucho más bajos que los esperados. Sagan menciona posibles explicaciones consideradas en aquella época como que los neutrinos se desintegraban en su viaje entre el Sol y la Tierra, o aun más dramática, que vivíamos en una época en la que el Sol había dejado de fusionar hidrógeno en su núcleo. También menciona brevemente las propiedades de los neutrinos que a la postre conducirían a la explicación correcta: la existencia de tres tipos o "sabores" de neutrinos – electrónico, muónico y tauónico– de los cuales sólo uno de ellos –el electrónico– podía medirse en los detectores de neutrinos solares de la Tierra, y que los neutrinos, a diferencia de los fotones, tienen masa.

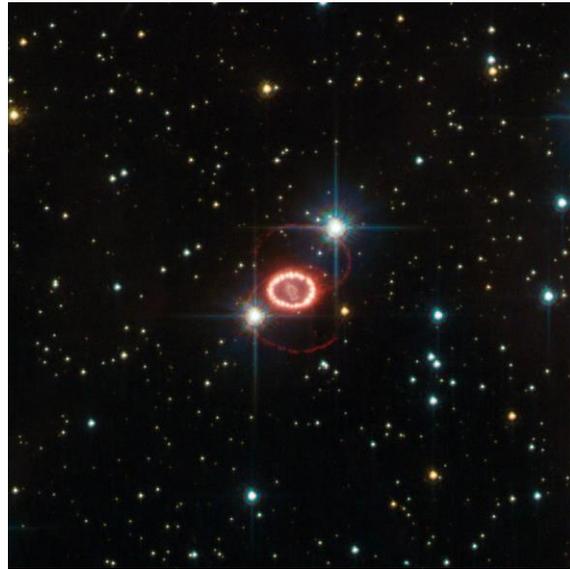
Hoy en día sabemos que la solución al Problema de los Neutrinos Solares es un fenómeno conocido como oscilaciones de neutrinos. El origen de este fenómeno se debe a que los tipos de neutrinos que se producen son diferentes a los tipos de neutrinos que se propagan. Esto provoca que neutrinos que se producen con un cierto "sabor" al cabo de un tiempo se encuentren en una mezcla de varios "sabores". Esto es algo chocante de acuerdo a nuestra experiencia cotidiana pero es algo muy común en Física Cuántica, la física que describe lo muy pequeño. De hecho, es similar a lo que ocurre en el famoso experimento imaginario del gato de Schrödinger, en el que el estado de un gato encerrado en una caja opaca con un dispensador de

veneno que depende de la desintegración de un átomo se encuentra en una superposición del gato vivo y el gato muerto. En el caso de los neutrinos solares, las reacciones nucleares en el interior del Sol producen neutrinos electrónicos, pero en su camino hasta la Tierra los neutrinos se convierten en una mezcla que contiene los tres "sabores" de neutrinos aproximadamente en partes iguales. Por ello, los detectores que sólo eran sensibles a neutrinos electrónicos medían números menores a los predichos por modelos teóricos. Fue necesario aguardar hasta 2002, para que el Sudbury Neutrino Observatory (SNO) [1], un experimento capaz de detectar los tres sabores de neutrinos, confirmase que, efectivamente, el número de neutrinos total coincidía con el valor esperado.

Una importante consecuencia de la observación de las oscilaciones de neutrinos es que revela que los neutrinos tienen masa, a diferencia de lo considerado cuando se estableció el Modelo Estándar, la exitosa teoría que describe las partículas elementales y sus interacciones. Las oscilaciones de neutrinos sólo pueden darse si las masas de los neutrinos no son nulas. Este descubrimiento fue galardonado con el Premio Nobel en Física de 2015, concedido a Arthur McDonald como líder del experimento SNO, y a Takaaki Kajita, como líder del experimento Super-Kamiokande [2], otro detector con el que se observó la oscilación de neutrinos usando neutrinos producidos en la atmósfera por rayos cósmicos.

Podemos decir que la astronomía de neutrinos nació con la detección de los neutrinos solares. En 1980, Sagan especulaba con la posibilidad de que en el futuro seríamos capaces de detectar neutrinos de los hornos nucleares en el interior de estrellas cercanas. Sin embargo, esto todavía es algo muy lejano debido a las grandes distancias que nos separan de nuestras estrellas vecinas. No obstante, la astronomía de neutrinos experimentaría una revolución unos años después, en 1987, cuando se detectaron neutrinos producidos en la supernova SN1987A. Estos neutrinos fueron producidos cuando Sanduleak - 69 202, una estrella supergigante azul en la Gran Nube de Magallanes –una de las galaxias satélites de la Vía Láctea a 168000 años-luz de la Tierra–, colapsó sobre sí misma. Este tipo de tipo de supernova es conocido como supernova de tipo II, y ocurre cuando una estrella masiva agota su combustible nuclear de manera que la presión generada en el núcleo de la estrella es incapaz de contrarrestar el peso de las capas exteriores. Esto provoca que caigan sobre el núcleo, comprimiéndolo hasta tal punto que los electrones se combinan con los protones de los núcleos atómicos, produciendo una gran cantidad de neutrones y neutrinos electrónicos en forma de estallido. Después del estallido, neutrinos y antineutrinos de todos los sabores continúan siendo emitidos por la supernova como modo de enfriamiento. De hecho, el 99% de la energía liberada en la supernova se emite en forma de neutrinos durante unos diez segundos. La fase final de la supernova es la creación de una estrella de neutrones o un agujero negro, en cuyo caso se espera un cese abrupto en la producción de neutrinos.

SN1987A fue la supernova más cercana desde 1604, y la única por el momento en la que se han detectados neutrinos en la Tierra. En concreto, se detectaron 25 neutrinos repartidos en 3 experimentos diferentes. Kamiokande-II e IMB, dos detectores subterráneos, uno en la mina de Kamioka en Japón y el otro en la mina Fairport en Estados Unidos, llenos de miles de toneladas de agua e inicialmente contruidos para investigar la posible desintegración de los protones, detectaron 12 y 8 neutrinos, respectivamente. Otros 5 neutrinos fueron detectados en Baksan, Rusia, con un detector lleno de centellador orgánico. La detección de estos neutrinos confirmó la teoría general que describe cómo una supernova se produce. Desde entonces, los físicos de neutrinos esperan con expectación la próxima supernova. De hecho, actualmente existe una red de detectores de neutrinos conocida como Supernova Early Warning System (SNEWS) [3] que vigila los cielos en espera de la próxima supernova. Debido a la poca probabilidad de interacción de los neutrinos, se espera que éstos escapen de la estrella moribunda y alcancen la Tierra antes de que los fotones emitidos por la supernova lo hagan, en una persecución sobre distancias cósmicas. Esto fue así en 1987, cuando el pulso de neutrinos atravesó la Tierra unas horas antes de que los primeros fotones de la explosión fueran visibles.



El remanente de la supernova 1987A capturado por el Telescopio Espacial Hubble en 2011. Se observan dos anillos débiles producidos por material estelar y un anillo central muy brillante rodeando la difunta estrella. Crédito: ESA/Hubble & NASA.

El logro más reciente en la astronomía de neutrinos es la detección de neutrinos procedentes del cuásar TXS 0506+056 situado a 5700 millones de años-luz de la Tierra. Un cuásar es un núcleo activo de galaxia en el que un agujero negro supermasivo, cuya masa está en el rango de millones o miles de millones veces la masa del Sol, está devorando materia. Algunos de estos objetos producen chorros de partículas, y en ocasiones este chorro apunta en dirección a la Tierra, lo que se conoce como blázar. Este es el caso de TXS 0506+056. El 22 de septiembre de 2017, el observatorio de neutrinos IceCube [4], un volumen de hielo de un kilómetro cúbico instrumentado en la Antártida, detectó un neutrino muónico con una energía veinte veces mayor que la alcanzada en el LHC, el acelerador de partículas más potente de la Tierra. Tras reconstruir la dirección del neutrino, se comprobó que apuntaba hacia TXS 0506+056, que además estaba particularmente activo, emitiendo también en el espectro electromagnético. A posteriori se encontraron otros

neutrinos con menores energías pero mismo origen en los datos de IceCube de 2014 – 2015.

El futuro de la astronomía de neutrinos es brillante. La investigación con neutrinos solares continúa progresando, arrojando más información sobre las reacciones nucleares en el interior de nuestro Sol y revelando propiedades de los neutrinos. En la próxima década esperamos contar con dos nuevos detectores, Hyper-Kamiokande [5] en Japón y DUNE [6] en Estados Unidos, con capacidad para detectar neutrinos de la próxima supernova cercana con una precisión sin precedentes, e incluso detectar el fondo de neutrinos producidos por supernovas pasadas. El detector IceCube continúa operando y hay planes para aumentar sus capacidades, y detectores similares están siendo instalados en el Mar Mediterráneo para el proyecto KM3NeT [7]. Quizás el desafío final de la astronomía de neutrinos sea la detección de los neutrinos generados en el Big Bang. Al igual que existe un fondo cósmico de fotones que fue emitido cuando el Universo se volvió transparente a la radiación electromagnética unos 380000 años después del Big Bang, y que debido a la expansión del Universo hoy en día se observa en el espectro de microondas, existe un fondo cósmico de neutrinos. Sin embargo, el fondo de neutrinos cósmico es una reliquia mucho más cercana al propio Big Bang, creado tan sólo un segundo después. La muy baja energía de estos neutrinos hace su detección extremadamente difícil pero no imposible, y retornando a la idea inicial: la ciencia no deja de progresar.

Referencias:

- [1] <https://falcon.phy.queensu.ca/SNO/>
- [2] <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/index-e.html>
- [3] <https://snews.bnl.gov/>
- [4] <https://icecube.wisc.edu>
- [5] <https://www.hyperk.org/>
- [6] <https://www.dunescience.org/>
- [7] <https://www.km3net.org/>

Bibliografía:

- (1) F. Close, 2010, *Neutrino*, Oxford, Oxford University Press.

José I. Crespo-Anadón.

Doctor en Física.

Investigador del Programa de Atracción de Talento de la Comunidad de Madrid, Departamento de Investigación Básica, División de Física Experimental de Altas Energías del Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), Madrid.

9.10

Estrellas de neutrones, estrellas de récords.

En 1967 Jocelyn Bell se encontraba realizando su tesis doctoral en la Universidad de Cambridge sobre la detección de señales de radio emitidas por cuerpos celestes. Desde el mes de agosto había estado observando una señal en los registros que llamó su atención, y decidió medirla con mayor precisión. Lo consiguió el 27 de noviembre, y los datos mostraron claramente que la señal llegaba periódicamente cada 1.33 segundos. Un pulso tan regular parecía ser de origen artificial, pero estaba claro que provenía del espacio. ¿Se trataba de señales emitidas por una civilización extraterrestre? En broma, Bell denominó el objeto que emitía la señal como "LGM-1", por las iniciales de *Little Green Men* (hombrecillos verdes), en referencia a la típica imagen que la ciencia ficción ofrece de los extraterrestres.

Si la broma se hubiera convertido en una realidad, nos encontraríamos probablemente ante el descubrimiento más importante de la historia de la humanidad: vida inteligente en otro lugar del universo. Lo cierto es que meses después de ese hallazgo, y de otros similares, se ofreció una explicación más sensata acerca del origen de las señales pulsantes: las estrellas de neutrones, y, en particular, las que presentan un intenso campo magnético y además rotan rápidamente sobre sí mismas, que reciben el nombre de púlsares. Las estrellas de neutrones no son estrellas como las demás. En el interior de una estrella usual se liberan continuamente grandes cantidades de energía procedentes de fusiones nucleares, es decir, de la unión de núcleos atómicos pequeños (como el del hidrógeno, que consta de un solo protón) para formar otros mayores (como el de helio, que contiene dos protones y dos neutrones). Pero en el interior de una estrella de neutrones no tiene lugar este proceso. En realidad, se trata del objeto celeste que queda cuando dejan de producirse fusiones nucleares en el interior de estrellas usuales masivas, que entonces se comprimen bajo su propia atracción gravitatoria y explotan por efecto rebote. Las capas externas de la estrella original salen despedidas, y la parte más interna queda como estrella de neutrones. Esta drástica explosión estelar se llama supernova, y puede resultar tan luminosa como todas las estrellas de una galaxia juntas.

Para ser objetos llamados estrellas, las de neutrones no son muy grandes. Con un radio de poco más de diez kilómetros, su tamaño es

comparable a una gran ciudad. En una estrella usual de tamaño medio como el Sol cabrían cientos de billones (10^{14}) de estrellas de neutrones. A pesar de su relativamente pequeño tamaño, las estrellas de neutrones tienen masas algo mayores que la del Sol. En consecuencia, en su interior se alcanzan densidades de récord, de cientos de billones de kilogramos por centímetro cúbico (10^{14} kg/cm³), y aún mayores en la región central. Como describe Carl Sagan en su obra *Cosmos*, una cucharadita de estrella de neutrones se hundiría hacia el centro de la Tierra sin que nada la detuviese, y saldría por el lado opuesto en línea recta, para volver a caer siguiendo un movimiento oscilatorio hasta que se frenase por rozamiento, dejando el planeta lleno de agujeros a causa de su rotación. Debido a su enorme densidad, la teoría de la relatividad de Einstein predice que el espacio-tiempo se curva considerablemente en el entorno de las estrellas de neutrones. Por ejemplo, en una estación espacial en órbita estable en torno a una estrella de neutrones de dos veces la masa solar, cada año transcurrido equivaldría a casi 13 meses en la Tierra, es decir, un desfase de un mes por año.

La materia que forma una estrella de neutrones se mantiene unida por atracción gravitatoria, como ocurre con las estrellas usuales o los planetas. A pesar de su nombre, esa materia no contiene únicamente neutrones, sino también, aunque en menor proporción, otras partículas subatómicas. En la región externa se encuentra una corteza de entre 1 y 2 kilómetros de profundidad que consiste en una especie de sólido metálico formado por núcleos atómicos ricos en neutrones, pero que también contienen protones, dispuestos regularmente en una retícula, y con los electrones formando una especie de gas que permea esa retícula de núcleos. Conforme nos adentramos en la estrella, la interacción gravitatoria hace que la densidad aumente, y llega un momento en que es energéticamente más favorable destruir los núcleos y formar una sustancia homogénea, como una sopa de neutrones, pero con una cierta proporción (alrededor de un 10 %) de partículas cargadas: protones, electrones, e incluso muones, que son partículas similares a los electrones, pero de mayor masa.

Entre la retícula de núcleos de la corteza y la sopa de partículas del interior, existe una región de transición con configuraciones muy variadas de núcleos y huecos vacíos. A estas insólitas estructuras, que de momento son solamente especulaciones teóricas, se les ha dado el nombre de pasta nuclear, que incluye espaguetis (núcleos muy alargados), lasaña (capas de núcleos alternándose con capas vacías), ravioli (estructuras ordenadas de huecos), etc. En la región más interna de la estrella, con densidades aún mayores, podrían existir partículas y configuraciones mucho más exóticas, como hiperones (partículas análogas a los protones y neutrones, pero más pesadas) o condensados de mesones. Estas partículas compuestas están formadas por partículas elementales denominadas quarks, que podrían incluso pasar a formar una nueva fase homogénea, denominada materia de quarks, o materia extraña (ya que incluiría quarks de tipo 'extraño'). Se especula con que puedan existir en el universo objetos formados enteramente por este tipo de materia,

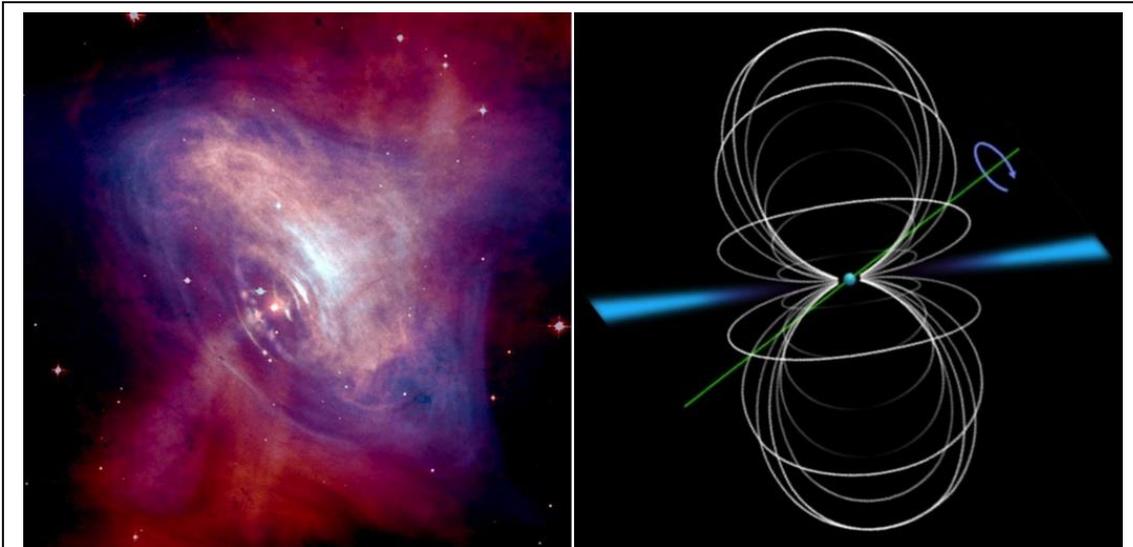
que se llamarían estrellas de quarks o estrellas extrañas. La compresión gravitatoria de la estrella, que acabaría colapsándola y formando un agujero negro, es contrarrestada por la acción de la misma presión que existe en los núcleos atómicos, y que determina su densidad. De hecho, esa densidad es muy similar a la de las estrellas de neutrones, al menos en ciertas regiones. Resulta muy sorprendente esta relación tan estrecha entre las propiedades de sistemas físicos con tamaños tan extraordinariamente dispares: una estrella de neutrones es 10^{55} (un uno seguido de 55 ceros) veces más grande que un núcleo atómico.

Las estrellas de neutrones suelen rotar a grandes velocidades. La que descubrió Jocelyn Bell, como dijimos, da una vuelta completa sobre su eje de rotación cada 1.33 segundos. La estrella de neutrones con la rotación más rápida confirmada fue descubierta en 2004 y da una vuelta completa cada 1.4 milésimas de segundo, o lo que es lo mismo, gira 716 veces por segundo. Resulta difícil imaginar que un objeto que gira cientos de veces en un solo segundo tenga un radio de varios kilómetros y una masa mayor que la del Sol. Esa rotación tan rápida implica que la materia de su superficie en la zona ecuatorial se mueve a una cuarta parte de la velocidad de la luz.

Las estrellas de neutrones crean campos magnéticos de millones de teslas, que es una unidad de intensidad del campo magnético. Algunas de ellas, que se denominan magnetares, alcanzan miles de millones de teslas. Estos son valores astronómicos, nunca mejor dicho, si se comparan con los campos magnéticos más potentes creados artificialmente, que apenas llegan a cien teslas de manera continua o a pocos miles de manera instantánea; más pequeño aún es el campo magnético terrestre, responsable de la orientación de las brújulas, que es menor de una diezmilésima de tesla.

El origen de esos intensísimos campos magnéticos sigue siendo hoy día desconocido en sus detalles, pero sí existe una explicación en términos generales. Muchos objetos celestes, como la Tierra o las estrellas usuales, poseen campos magnéticos creados por efecto dinamo, es decir, debido al movimiento de cargas eléctricas en una región interna fluida y conductora. Ese movimiento se origina en las corrientes de convección, que surgen para equilibrar las temperaturas de diferentes regiones del fluido, y adquieren patrones ordenados por efecto de la rotación del cuerpo. El movimiento de cargas genera un campo magnético, que da lugar a corrientes de cargas, que contribuyen a su vez al campo magnético, y así sucesivamente hasta producir un campo autosostenido a escalas temporales cósmicas. Ese campo magnético es responsable de la aceleración de partículas cargadas, que da lugar a la emisión de radiación electromagnética, especialmente ondas de radio. También se emiten las propias partículas cargadas, que constituyen el viento de púlsar, particularmente en forma de chorros en la dirección del eje de rotación. Como cualquier imán, una estrella de neutrones magnética tiene dos polos, y en ellos es más intensa la aceleración de cargas y por tanto concentran la emisión de radiación electromagnética. Si el eje de rotación de la estrella no coincide con la recta que une los dos polos, el haz de radiación

emitido desde cada uno de ellos barre una cierta región del universo. Si la Tierra se encuentra en esa región, recibimos periódicamente la señal de la estrella, como si fuera emitida por un faro, y así es como Jocelyn Bell descubrió su existencia.



Izquierda: imagen óptica y de rayos X de la estrella de neutrones y el viento de púlsar circundante (con chorros en la dirección del eje de rotación) situados en el centro de la Nebulosa del Cangrejo, formada por los restos de la supernova que dio lugar a la estrella de neutrones y que fue observada en la Tierra en 1540 d.C. (Licencia: dominio público. Autoría: NASA/HST/ASU/J. Hester et al.). Derecha: esquema de una estrella de neutrones (esfera central) que muestra las líneas de campo magnético (en blanco), el eje de giro (en verde) y los haces de radiación electromagnética emitidos desde los polos magnéticos (en azul). (Licencia: CC BY-SA 3.0. Autoría: User:Mysid - Wikimedia Commons).

Este importantísimo hallazgo mereció el reconocimiento del premio Nobel, que fue otorgado en 1974 al supervisor de Jocelyn Bell y a otro astrónomo, pero no a ella. Humildemente, Bell afirmó años más tarde que entendió perfectamente que no le concedieran el premio Nobel a una estudiante como ella, ya que el responsable final del proyecto es el supervisor, pero muchos piensan que se trató de un grave error. Con ese mismo carácter humilde, a la vez que brillante, tuvo también palabras de reconocimiento para uno de sus profesores: *“Tuve un profesor de física muy bueno durante la escuela secundaria [...]. Era un profesor realmente bueno y en realidad me enseñó cómo de fácil era la física, y creo que esa fue la clave. De otro modo me habría inclinado por otro camino.”* Sirva este comentario como punto final para esta historia, y como homenaje a los profesores y divulgadores que, como Carl Sagan, son capaces de transmitir no solo sus conocimientos, sino también su pasión por la ciencia.

Óscar Moreno Díaz.

Doctor en Física. Departamento de Estructura de la Materia e Instituto de Física de Partículas y del Cosmos (IPARCOS), Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Complutense de Madrid.

Capítulo 10

El filo de la eternidad

*Hay una cosa formada confusamente.
Nacida antes que el Cielo y la Tierra.
Silenciosa y vacía.
Está sola y no cambia, gira y no se cansa.
Es capaz de ser la madre del mundo.
No conozco su nombre y por lo tanto le llamo El Camino.
Le doy el nombre improvisado de Lo Grande.
Siendo grande se le puede describir también como retrocediendo, si retrocede
se le puede describir como remoto, si es remoto se le puede describir
retornando.*

LAO TSE, TAO TE-CHING, China, hacia el 600 a.C.

Hay un camino en lo alto, visible en los cielos transparentes, llamado la Vía Láctea, que resplandece con brillo propio. Los dioses van por ella a la morada del gran Tonante y su residencia real... Allí los famosos y poderosos habitantes del cielo han sentado sus reales. Ésta es la región que podría atreverme a llamar la (Vía) palatina del Gran Cielo.

OVIDIO, Metamorfosis, Roma, siglo I

*Algunos necios declaran que un Creador hizo el mundo. La doctrina de que el mundo fue creado es equivocada y hay que rechazarla.
Si Dios creó el mundo, ¿dónde estaba Él antes de la creación?... ¿Cómo pudo haber hecho Dios el mundo sin materiales? Si dices que los hizo primero y luego hizo el mundo te enfrentas a una regresión infinita...
Has de saber que el mundo es increado, como el mismo tiempo, sin principio ni fin. Y que se basa en los principios...*

JINASENA, Mahapurana (La Gran Leyenda), India, siglo IX

10.1

La eterna danza en la historia del Universo.

En su influyente libro *Cosmos* hace cuatro décadas, Carl Sagan nos describe, en su inconfundible manera apasionada, el origen del Universo como fruto de una explosión cataclísmica, el famoso *Big Bang*. El razonamiento para deducir que dicha explosión realmente sucedió es el defendido por los cosmólogos del siglo XX: el corrimiento hacia el rojo observado de manera abrumadora indica la expansión del Universo, de modo que, si "rebobinamos la película hacia atrás", en algún instante pasado toda la materia del Universo tuvo que concentrarse en una región de tamaño nulo. Y ese instante se asocia con el momento del Big Bang. Además, se puede añadir otro hecho que parece corroborar el análisis, a saber, la existencia de la radiación cósmica de microondas, cuya temperatura permanece constante independientemente de la dirección en la que apuntemos los telescopios. Si en un instante toda la materia estuvo unida, compartiendo temperatura, es natural suponer que la evolución posterior del Universo mantenga la misma temperatura, en un instante dado, para todas las regiones (únicamente que el valor concreto de la temperatura disminuye por la expansión).

Brevemente, éstos son los dos motivos por los que la mayoría de los cosmólogos en tiempos de Sagan consideraba que el Big Bang es un hecho, y no simplemente una hipótesis compatible con las observaciones. Cuarenta años después, probablemente la mayoría siga compartiendo la idea, pero ahora ya tenemos muchas voces críticas. Aunque hay variantes, el razonamiento que subyace la crítica al Big Bang es el siguiente: cuando "rebobinamos la película hacia atrás", damos por hecho que la física clásica (en concreto, la relatividad general de Einstein) domina la descripción del Universo indefinidamente, incluso cuando alcanza tamaños de escala molecular/atómica. Sin embargo, sabemos desde inicios del siglo XX (es decir, ¡incluso *antes* del desarrollo de la teoría del Big Bang!) que las escalas molecular y atómica ya no pertenecen al dominio clásico, sino al cuántico. Por tanto, resulta algo incoherente seguir usando la física clásica en la descripción del Universo cuando éste ha alcanzado escalas propias de la física cuántica. Hoy día, varios grupos de investigación estudian cómo la incorporación de la física cuántica modifica la historia convencional: el resultado común es que los efectos cuánticos generan un *Big Bounce* (Gran Rebote) de forma que el tamaño del

Universo nunca llega a cero, sino que alcanza un tamaño mínimo y, a partir de ahí, empieza a expandirse de nuevo. Resaltar que la evidencia observacional actual es compatible con *ambos* modelos: en la película hacia atrás, hay un instante anterior al cual no tenemos evidencia observacional de nada. Pues bien, los efectos cuánticos son relevantes antes (de hecho, ¡mucho antes!) de dicho instante. Por tanto, aunque hasta este instante la descripción convencional con el Big Bang y la que introduce el Big Bounce son diferentes, ambas coinciden a partir de tal instante, así que ambas predicen correctamente la estructura del Universo para la cual sí tenemos evidencia observacional. Ahora bien, con el desarrollo de métodos cada vez más precisos, se espera que se manifiesten discrepancias con la teoría del Big Bang, ya que ésta, por muy exitosa que haya sido hasta la fecha, no deja de ser una teoría clásica. Actualmente, existe un esfuerzo experimental por todo el mundo para tratar de detectar la más mínima evidencia a favor de escenarios alternativos al Big Bang. Si uno toma en serio la idea del Big Bounce, de repente se abre un abanico de posibilidades para la historia del Universo. Para empezar, ya no se puede hablar *del* origen del Universo, ya que no está claro si el Big Bounce es único: sólo sabemos que este fenómeno marca la transición entre una fase de contracción y una posterior de expansión (que puede ser la nuestra actualmente). En principio, nada prohíbe una concatenación eterna de fases de expansión y contracción. Ésta es la idea de los llamados *Universos oscilantes*. El propio Sagan ya mencionaba este sinfín de ciclos cósmicos, pero lo hacía en el contexto de distintas mitologías. Cuatro décadas después, son muchos los cosmólogos que proponen el modelo oscilante para la descripción de la evolución del Universo.

Desgraciadamente, la idea de los Universos oscilantes no deja de ser una hipótesis, muy razonable, pero una hipótesis. Como ya hemos dicho, la tecnología actual no es capaz de detectar los momentos justo después del supuesto Big Bounce (ni del Big Bang). ¡Mucho menos observar lo que pasó *antes* de tal Big Bounce! En principio, para tener evidencia de la existencia de una fase antes del Big Bounce, no es necesario observar tal fase directamente (suponiendo que eso sea posible incluso con la tecnología de un futuro bien lejano), sino detectar efectos justo después del Big Bounce cuya explicación sea compatible con la existencia de una fase previa (si la explicación no es única, entonces sería un indicio, no una prueba irrefutable). En este sentido, hay modelos que suponen que la transición entre fases de contracción y expansión tiene lugar en la transición entre agujeros negros y blancos. Recordemos que un agujero negro³⁰ es una región del Universo donde el espacio se curva de manera tan intensa que el agujero tiene una profundidad infinita, cuyo fondo es una región de tamaño nulo (singularidad), de modo que

³⁰ Esta descripción de un agujero negro es según la relatividad general de Einstein, una teoría clásica. Si se considera la materia de forma cuántica, pero la gravedad aún de modo clásico, teóricamente es posible para la luz escapar de las inmediaciones del agujero negro (radiación de Hawking). Las transiciones entre agujeros blancos y negros requieren que tanto la materia como la gravedad se describan de manera cuántica.

cualquier cosa que "caiga" en él se pierde para siempre. De manera algo coloquial, un agujero negro es un sumidero donde se destruye parte del Universo. Pues bien, un agujero blanco es lo contrario, una especie de fuente de la que emanan materia y radiación nuevas. Según algunos modelos de gravedad cuántica, un agujero negro y otro blanco pueden estar conectados por un agujero de gusano, algo así como un túnel conectando regiones del Universo, de modo que lo que cae en el agujero negro por un lado sale por el agujero blanco por el otro extremo [1, 2]. Así, por ejemplo, si algún agujero negro, de los que se piensa que se hallan en el centro de muchas galaxias, está conectado mediante un agujero de gusano a un agujero blanco, tenemos destrucción de materia y radiación por un extremo y creación por el otro. Yendo al caso cósmico extremo, estos modelos sugieren que en su fase de contracción el Universo acaba en un agujero negro, atraviesa un agujero de gusano y renace por el extremo del agujero blanco, dando lugar a una nueva fase de expansión. En principio, este ciclo puede ser eterno. Los mitos de los ciclos de creación y destrucción cósmica que narra Sagan han pasado al campo de la cosmología, aunque, insistimos, de momento no son más que predicciones teóricas.

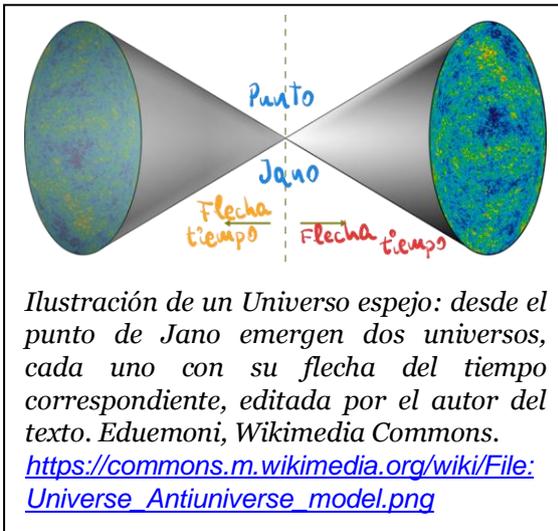
Aparte de los Universos oscilantes, existe otro tipo de modelos teóricos alternativos a la teoría convencional del Big Bang. La idea es la siguiente: hemos dicho que resulta algo incoherente describir toda la evolución del Universo, independientemente de su tamaño, según una teoría clásica como la relatividad general de Einstein, y que la introducción de efectos cuánticos sustituye el Big Bang por el Big Bounce. Pues bien, el punto de partida de este segundo tipo de modelos es eliminar el Big Bang dentro de la física clásica, sin necesidad de incorporar descripción cuántica alguna. Para ello, consideran que la gravedad clásica y, por tanto, la cosmología, se describe mejor según una variante de la relatividad general. Sin entrar en detalles, lo importante es que esta reformulación ya no predice Big Bang alguno, sino que se puede transitar por la región donde la relatividad general identificaría tal Big Bang³¹. Lo más curioso de este nuevo enfoque es la predicción de que esta región de transición equivale a una imagen especular de dos Universos enfrentados: hacia un lado de este "espejo cósmico", el derecho, por ejemplo, tenemos un Universo tal como conocemos, con su *flecha del tiempo* yendo en el sentido de mayor complejidad (formación de galaxias, etc.), de acuerdo con la experiencia de los habitantes de dicho Universo (nosotros, digamos); por el contrario, hacia el otro lado del espejo cósmico, el izquierdo, tenemos un Universo cuya flecha del tiempo apunta hacia la izquierda del espejo, pero los habitantes de dicho Universo experimentan dicha flecha igual que sus vecinos especulares, es

³¹ No es posible entrar en detalles, pero quisiéramos enfatizar que tal transición por la región donde la relatividad general predice el Big Bang *no* se realiza a través de ningún agujero de gusano (caso de los Universos oscilantes). La clave estriba en una nueva lectura del concepto de "escala/tamaño" del Universo completo, de modo que las ecuaciones ya no predicen soluciones de curvatura infinita (tanto el Big Bang como la singularidad en el interior de un agujero negro son ejemplos de regiones con curvatura infinita).

decir, en el sentido de mayor complejidad *para ellos*. En otras palabras, desde el punto de vista de un habitante de cualquiera de los Universos a uno u otro lado del espejo cósmico, la experiencia de la flecha del tiempo coincide con el aumento de complejidad del Universo de dicho habitante. Los autores de este modelo, evocando la mitología griega, han acuñado el término de *punto de Jano*, en honor del dios griego de dos caras enfrentadas, cada una perdiendo su vista en el infinito.

Cabe reseñar que es concebible un modelo híbrido entre los dos tipos de modelos alternativos al Big Bang convencional: a cada lado del punto de Jano puede haber Universos oscilantes en un ciclo eterno de contracción y expansión, donde los sucesivos puntos de Jano vayan evolucionando, generando Universos espejo a cada lado, con leyes diferentes a las de sus antecesores.

¡Seguro que la investigación ya en marcha, tanto teórica como observacional, nos deparará grandes sorpresas, tanto o más revolucionarias que las que se llevaría Carl Sagan si siguiese entre nosotros!



Referencias:

[1] A. Retter and S. Heller, 2012, *The revival of white holes as small bangs*, New Astron. **17**, 73 <https://doi.org/10.1016/j.newast.2011.07.003> [arXiv:1105.2776v2 [physics.gen-ph]].
 [2] C. Rovelli, 2018, *Viewpoint: Black Hole Evolution Traced Out with Loop Quantum Gravity*, Physics, **11**, 127 [arXiv:1901.04732v1 [gr-qc]].
 [3] J. Barbour, T. Koslowski and F. Mercati, 2014, *Identification of a gravitational arrow of time*, Phys. Rev. Lett. **113**, 181101 <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.113.181101> [arXiv:1409.0917 [gr-qc]].
 [4] T. Koslowski, F. Mercati and D. Sloan, 2018, *Through the big bang: Continuing Einstein's equations beyond a cosmological singularity*, Phys. Lett. **B**, 778, 339 <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2018.01.055> [arXiv:1607.02460v2 [gr-qc]].

Bibliografía:

(1) P. J. Steinhardt, N. Turok, 2007, *Endless Universe*, New York, Doubleday.
 (2) R. Penrose, 2010, *Cycles of Time: an extraordinary new view of the universe*, London, The Bodley Head.
 (3) J. Barbour, 2020, *The Janus Point: A New Theory of Time*, New York, Vintage Digital.

Pedro Naranjo Pérez.

Doctor en Física Teórica.

Investigador científico, International Centre for Formal Ontology, Varsovia.

10.2

Multiverso: ¿existen otros universos?

*Hay una idea extraña, atrayente, evocativa,
una de las conjeturas más exquisitas de la ciencia o de la religión.
Es una idea totalmente indemostrada; quizás no llegue a demostrarse nunca.
Pero excita enormemente.*

Se nos dice que existe una jerarquía infinita de universos.

Carl Sagan, Cosmos, 1980.

¿Existen otros universos? Si la palabra "universo" significa necesariamente *todo* lo que existe, entonces por definición no puede haber más de uno. Pero en la frontera de la física actual, por varias direcciones hemos llegado a sospechar que la realidad pudiera ser mucho más amplia que lo que hasta ahora habíamos concebido como nuestro universo. Al menos para algunos físicos, se vuelve entonces útil hablar de muchos universos paralelos, y emplear el término "multiverso" para describir todo lo que existe.

Cuando estudiamos el universo a escalas astronómicas, la gravedad es la influencia dominante. Gracias a la Relatividad General, sabemos que la gravedad se produce porque el espacio y el tiempo se distorsionan en respuesta a los objetos que se ubican sobre ellos, tal como si fueran un inmenso trampolín. Las mediciones nos revelan que, contemplada a gran escala, la forma del espacio que habitamos es análoga no a la superficie de una pelota o de una silla de montar, sino a la de una gigantesca hoja de papel (sin que imaginemos que existe algo fuera de esa hoja). Durante toda la historia conocida, este espacio "plano" se ha ido estirando, de tal forma que la distancia entre las galaxias crece cada segundo. Corriendo la película hacia atrás, llegamos a la época que llamamos el Big Bang, hace 13,800 millones de años, cuando el universo era increíblemente denso y caliente. Tenemos mucha evidencia de que esa época en verdad ocurrió, incluyendo un baño de luz tenue que recibimos constantemente del espacio, conocido como fondo cósmico de microondas. Esta luz invisible nos llueve de forma casi idéntica desde todas las direcciones, y nos trae noticias de las condiciones del universo cuando era bebé, apenas 380,000 años después del Big Bang.

Un hecho muy hermoso es que, en nuestro afán por entender el cosmos a distancias gigantescas, hacemos contacto también con lo que ocurre a distancias minúsculas. En los primeros minutos después del Big Bang, es

indispensable echar mano de nuestros conocimientos sobre las partículas elementales que conforman la materia. Todo lo que tenemos bien entendido sobre este tema se resume en la teoría que llamamos el Modelo Estándar, que explica en exquisito detalle de qué estamos hechos nosotros y todos los objetos que vemos, incluyendo las estrellas más lejanas. Pero desde hace más de dos décadas sabemos que el contenido del universo involucra mayoritariamente sustancias que *no* vemos: un 68% que llamamos "energía oscura", responsable de que la expansión del universo se esté acelerando en lugar de frenarse, y un 27% de "materia oscura", indispensable para explicar la estructura, distribución y formación de las galaxias. El Modelo Estándar describe solo a la materia ordinaria, que constituye el 5% restante.

Es muchísimo lo que podemos explicar con éxito al conjuntar a la Relatividad General con el Modelo Estándar y los conceptos de materia y energía oscuras. Existen, sin embargo, varias interrogantes pendientes. Por ejemplo, no tenemos claro todavía cuál es el origen de la gravedad a nivel microscópico, reto que en esencia equivale a preguntarnos de qué están hechos el espacio y el tiempo. También nos falta identificar la composición precisa de la materia oscura y la energía oscura. En nuestros intentos por avanzar más en estas y otras preguntas, nos hemos topado con varios sentidos en los que podrían existir universos paralelos, todos ellos especulativos y no mutuamente excluyentes:

1) La región del universo que alcanzamos a observar tiene actualmente un diámetro de poco más de 90 mil millones de años luz. Este es un tamaño enorme, pero finito. Está acotado por lo que llamamos nuestro "horizonte" (en analogía directa con el horizonte en la Tierra), que delimita la región de la cual no ha habido tiempo todavía para que recibamos señal alguna. Conforme pasa el tiempo alcanzamos a ver más lejos, pero al encontrarnos en una época de expansión cósmica acelerada, hay una distancia más allá de la cual *nunca* podremos observar. A pesar de ello, creemos que existen regiones mucho más distantes, así que el primer sentido en el cual podemos hablar de universos paralelos es simplemente como estas regiones mutuamente inobservables entre sí.

2) Nuestras mediciones muestran que el espacio a gran escala es *extremadamente* plano, y el fondo cósmico de microondas es *extremadamente* uniforme. Estas características podrían ser simplemente accidentales, pero nos parecen poco naturales. La mayor parte de los cosmólogos piensa que se deben a que, en sus primeros instantes, nuestro universo experimentó lo que llamamos "inflación": una época de expansión brutalmente acelerada, que hizo que en menos de una quintillonésima de segundo su tamaño creciera más de cien cuatrillones de veces. Esta idea tiene cierto respaldo de las mediciones cosmológicas. La inflación provoca que el espacio completo sea muchísimo más grande que el universo observable, reforzando lo que mencionamos en el punto anterior. Pero otra consecuencia es aún más notable. Si bien hay muchas maneras distintas de implementar la fase de expansión acelerada en un modelo concreto, en la mayor parte de ellas se encuentra que, una vez que

la inflación ha comenzado, ¡nunca termina! En todos los modelos que tienen “inflación eterna”, nuestro universo (incluso tomando en cuenta mucho más que la parte que podemos observar) sería apenas una entre muchísimas “burbujas” donde la inflación ya se detuvo, inmersas en un espacio más amplio que se sigue estirando aceleradamente, dando lugar constantemente a nuevas burbujas, cuyos posibles habitantes considerarían universos por derecho propio.

3) Es posible que algunos de los números que determinan las propiedades más básicas de nuestro universo, como la cantidad de energía oscura, o la masa o carga del electrón, o la intensidad de las cuatro fuerzas fundamentales, no sean en realidad números con un valor fijo, sino que sean consecuencia de las condiciones del entorno. Podrían variar entonces de una región a otra, tal como la temperatura y la presión varían en los distintos rincones de la superficie terrestre. Esta posibilidad es sugerida naturalmente por la Teoría de Cuerdas, considerada por muchos físicos como el camino más prometedor para obtener una explicación del origen microscópico de la gravedad. Esta teoría propone que todos los distintos tipos de partículas conocidas son en realidad diminutas cuerdas vibrantes, todas idénticas. Conduce a implicaciones atractivas desde el punto de vista de la física teórica, pero todavía no



Imagen de burbujas, sugerente de un multiverso, en las variantes 2 o 3 descritas en el texto. (Crédito: Fotografía de Karen46 en FreeImages <https://es.freeimages.com/photo/discobubbles-1144841>)

tiene evidencia experimental alguna a su favor. Independientemente de la Teoría de Cuerdas, si acaso es verdad que los números básicos del universo pueden variar, entonces en los distintos “universos burbuja” mencionados en el punto anterior esperaríamos distintos valores para ellos, de tal modo que tendría aún más sentido considerar a cada burbuja como un universo distinto.

4) La Teoría de Cuerdas requiere que el espacio tenga seis o siete dimensiones adicionales a las tres que nos son obvias. Por separado de esta teoría, otras propuestas recientes contemplan también la posible existencia de dimensiones adicionales. El método más tradicional de esconder las dimensiones extra es hacerlas pequeñísimas. Pero también pudieran resultar ser tan grandes como una décima de milímetro, o quizás incluso infinitas, si están distorsionadas de cierta manera particular. En este escenario, no las habríamos detectado si las partículas de las que estamos hechos, y todas aquellas que son descritas por el Modelo Estándar, estuvieran atrapadas dentro de un objeto extendido en tres dimensiones, una “brana”, que flota en un espacio con más dimensiones, como una sábana que flota en una habitación. Si esto resulta ser cierto, entonces es natural considerar la posibilidad de que existan otras branas flotando por ahí, que serían literalmente universos paralelos al nuestro. Si en verdad vivimos en una brana, en los próximos años

el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) podría quizás darnos las primeras evidencias de ello.

5) El Modelo Estándar incorpora las peculiares reglas de la física cuántica, que les permiten a los habitantes del mundo subatómico estar de cierta forma 'indecisos' respecto a su posición u otras propiedades. Un electrón dentro de un átomo, por ejemplo, típicamente se encuentra en muchos sitios a la vez. Dado que los objetos de la vida cotidiana no son otra cosa que colecciones de un número enorme de partículas subatómicas, las reglas cuánticas les permitirían también estar 'indecisos', cosa que por supuesto nunca vemos. Esta aparente contradicción fue ilustrada vívidamente por Schrödinger, quien nos invitó a imaginar a un gato en circunstancias que, según la física cuántica, ocasionarían que se encuentre 'indeciso' entre estar vivo o muerto. Se han planteado esencialmente tres propuestas distintas para resolver este problema, todas ellas con defectos. Una afirma que los gatos y demás objetos macroscópicos *nunca* pierden su indeterminación cuántica, nunca se 'deciden', solo *parecen* hacerlo por la interacción con su entorno. Este escenario implicaría la existencia de universos paralelos presentes siempre a nuestro alrededor, que involucran las diversas alternativas entre las cuales estarían en general 'indecisos' los electrones, las personas y los planetas. Por esta razón, la propuesta se conoce como la "interpretación de muchos mundos". Su mayor defecto es que, dado que todos los resultados posibles ocurren simultáneamente, es difícil definir una noción de probabilidad adecuada, para explicar el éxito que tiene la cuántica al predecir probabilidades para nuestras mediciones.

Las cinco variantes de multiverso aquí descritas son especulaciones científicas, cuya veracidad solo podrá ser establecida por corroboración experimental. Esta podría ser mucho más accesible en unas variantes que en otras. Como quiera, no deja de ser interesante que hemos sido llevados a considerar estas exóticas posibilidades por algunas de las mejores teorías actualmente en construcción en la frontera de la física. Tal como antes nos sorprendió descubrir que la Tierra no es el centro del Sistema Solar, que el Sistema Solar es apenas una parte minúscula de la Vía Láctea, y que la Vía Láctea es solo una entre cientos de miles de millones de galaxias en el universo observable, quizás estemos actualmente al borde de descubrir que nuestro universo es apenas un pequeñísimo rincón del multiverso.

Bibliografía adicional:

- (1) B. Greene, 2016, *La Realidad Oculta*, Barcelona, Ed. Crítica.
- (2) L. Susskind, 2010, *El Paisaje Cósmico*, Barcelona, Ed. Crítica, Drakontos.

Alberto Güijosa Hidalgo.

Doctor (Ph.D.) en Física.

Investigador Titular, Instituto de Ciencias Nucleares,

Universidad Nacional Autónoma de México (ICN-UNAM), Ciudad de México.

10.3 Elogio a la pequeñez.

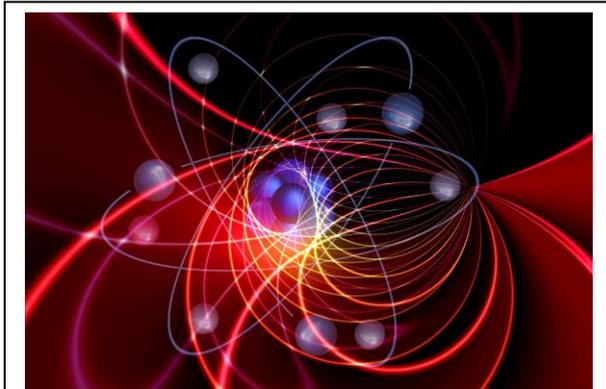
Las primeras notas del tercer movimiento de la *Symphony to the powers B*, del compositor griego Vangelis, no dejan indiferente a ningún científico de mi generación. Al menos a los físicos y astrofísicos que fuimos niños en los 80s. Durante los primeros años de esa década se estrenaba la serie de TV cosmos en los distintos países de habla hispana, y éramos muchos los que semana a semana esperábamos impacientes frente al televisor que las delicadas notas de piano comenzaran a flotar sobre esos etéreos paisajes sintetizados, mientras efectos especiales de vanguardia para la época nos sumergían en un viaje entre brillantes y anaranjadas galaxias. Los créditos en gruesas letras blancas mostraban un curioso subtítulo: “un viaje personal”. ¿Cómo podía ser personal el viaje que Carl Sagan nos proponía?, ¿no era justamente la ciencia la menos personal de las experiencias humanas?, ¿no se trataba de conocimiento objetivo y consensuado, fuente de tecnología y bienestar público? Los comienzos de los 80 fueron años de importantes innovaciones tecnológicas que cambiaban nuestras vidas: los ordenadores comenzaban rápidamente a popularizarse, los discos de vinilo se reemplazaban por pequeños y opalescentes CD, y en la TV veíamos el lanzamiento de los primeros transbordadores espaciales. No parecía haber límites para la especie humana, y eso se reflejaba en la cultura televisiva de esos años, en donde la ciencia era invariablemente asociada a desarrollos tecnológicos, a delantales blancos, a desgarrados e incomprensibles “científicos locos”.

El viaje de Carl Sagan era personal porque era hacia el interior. Allí no veríamos ningún dispositivo electrónico y la única nave espacial era la “nave de la imaginación”, que nos llevaba a recorrer el universo y a emocionarnos con sus misterios y con el rol que los humanos jugamos en él. La clave de Sagan era, precisamente, la emoción: el profundo recogimiento que provoca en nosotros el acercarnos a la naturaleza. La ciencia no era otra cosa que esa nave de la imaginación. Una herramienta para conectarnos con el universo y vivir la más personal de las experiencias humanas. La invitación, además, no venía de un personaje extravagante, *nerd*, lejano. Venía de un hombre preocupado de su aspecto, de gran oratoria y magnetismo. Uno que quizás incluso escuchaba a The Cure en su *personal stereo* y miraba partidos de fútbol los domingos bebiendo cervezas.

gravedad. La propuesta de Einstein era que la gravedad misma proveía esta fuerza a grandes distancias, permitiendo un universo estático como el que vemos a simple vista. Pero el universo estático de Einstein tenía muchos problemas que lo invalidaban. El más importante llegó en 1925, cuando Edwin Hubble confirmó que las galaxias se alejan de nosotros a velocidades proporcionales a su distancia. El universo se estaba expandiendo. La constante cosmológica dejaba de ser necesaria.

Por otra parte, ya bien establecida la mecánica cuántica no había ninguna duda para los físicos teóricos de que el vacío absoluto no podía existir: pequeñas fluctuaciones en forma de pares de partículas que se creaban y se aniquilaban, o una energía potencial no nula almacenada en los campos de materia, siempre lo contaminaban.

El campo gravitacional interactúa con cualquier forma de energía, por lo que esta "energía del vacío" ejerce una influencia gravitacional. Más aún, las teorías implican que su efecto es idéntico al de la constante cosmológica. La magnitud de esta no la podemos calcular de manera precisa, ya que no conocemos el comportamiento de la gravedad a escalas muy pequeñas, esto es, la mecánica cuántica del campo gravitacional, pero podemos hacer una estimación gruesa. Y allí es donde llegamos a ese número inabarcable: La constante cosmológica debe ser muchísimo más pequeña. Al menos cien trillones de gúgolos más pequeña para ser compatible con el universo que observamos.



¡Energía del vacío! Credit: CCo Public Domain

El campo gravitacional interactúa con cualquier forma de energía, por lo que esta "energía del vacío" ejerce una influencia gravitacional. Más aún, las teorías implican que su efecto es idéntico al de la constante cosmológica. La magnitud de esta no la podemos calcular de manera precisa, ya que no conocemos el comportamiento de la gravedad a escalas muy pequeñas, esto es, la mecánica cuántica del campo gravitacional, pero podemos hacer una estimación gruesa. Y allí es donde llegamos a ese número inabarcable: La constante cosmológica debe ser muchísimo más pequeña. Al menos cien trillones de gúgolos más pequeña para ser compatible con el universo que observamos.

A pesar de la discrepancia, los físicos de los años 80 no estaban demasiado preocupados. Si las observaciones eran compatibles con un universo sin constante cosmológica, entonces debía existir algún mecanismo, aún por descubrir, que obligara a la energía del vacío a anularse. Este tipo de mecanismo es común en física, y suele asociarse a simetrías: cambios que podemos hacer sobre los protagonistas de una teoría sin que esta lo note, como cuando giramos un cuadrado perfecto en 90 grados en torno a su centro. Es precisamente una simetría de la teoría electromagnética, por ejemplo, la que predice que la masa del fotón debe ser exactamente igual a cero.

Pero en 1998 cae un gran balde de agua fría. Dos grupos de astrofísicos publican un descubrimiento asombroso: observando supernovas lejanas encuentran que la velocidad de expansión del universo no está disminuyendo, sino que, por el contrario, está aumentando. Saul Perlmutter, Brian Schmidt y Adam Riess ganan el premio Nobel de física en 2011 por esta hazaña. Este

fenómeno puede ser explicado asumiendo la existencia de una constante cosmológica que otorgue a la gravitación ese carácter repulsivo que Einstein deseaba. Pero si la constante cosmológica no es igual a cero, entonces el mecanismo de relojería que los físicos estaban buscando debía ser mucho más intrincado. Ya no era suficiente explicar el porqué la constante cosmológica era tan pequeña, había que explicar además por qué era tan grande. De hecho, aunque gúgolos más pequeña que aquella que predecía una estimación ingenua, aún es suficientemente grande como para representar nada menos que el 70% del contenido energético del universo. Hoy la llamamos energía oscura y sigue siendo uno de los enigmas fundamentales de la ciencia. El destino del universo depende de su comportamiento. Si la densidad de energía oscura se mantiene constante –caso en que sería indistinguible de la constante cosmológica original de Einstein- la expansión acelerada seguiría adelante hasta que las galaxias se pierdan de vista unas de otras, mientras el combustible de las estrellas se consume y el universo se va apagando en un frío, oscuro y eterno invierno final. Pero es difícil hacer predicciones sin entender mejor la naturaleza de esta energía oscura. Menos aún cuando del 30% restante de energía, solo un sexto corresponde a la materia que conocemos y que describe el modelo standard de las partículas elementales. El resto es la "materia oscura", otra extraña forma de energía que postuló la astrónoma Vera Rubin en los años 70 y cuya existencia ha sido confirmada en distintas observaciones independientes a lo largo de las décadas que siguieron. De este modo, las últimas 5 décadas han ido confirmando el hecho de que el 95% del contenido del cosmos no lo entendemos en absoluto. Peor aún, nuestras teorías dan origen a estimaciones erradas en trillones de gúgolos. Parece entonces que la más profunda lección que nos ha dado el cosmos desde aquel día en que escuchamos los créditos finales del decimotercer y último episodio de la serie de Sagan es una sola. Nuestra descomunal pequeñez no es solo espacial y temporal. Más abrumadora aún es la pequeñez de nuestra capacidad de entendimiento. Al igual que el universo, el océano de nuestra ignorancia parece crecer aceleradamente ante nuestros ojos, a menudo dejándonos en ridículo. A pesar de eso, es precisamente ese el océano que nos atrae, que nos emociona, que estimula la empresa científica. Un océano al que muchos de nosotros, después de ver la serie Cosmos, no pudimos sacarle los ojos de encima jamás.

Andrés Gomberoff.

Doctor en Física.

Profesor de la Universidad Adolfo Ibáñez, Santiago de Chile.

Investigador del Centro de Estudios Científicos, Valdivia.

Capítulo 11

La persistencia de la memoria

*Una vez determinados los destinos de Cielo y Tierra, habiendo recibido zanjas y canales su curso adecuado, establecidas ya las orillas del Tigris y del Éufrates, ¿qué nos queda por hacer?, ¿qué más tenemos que crear?
Oh Anunaki, grandes dioses del cielo, ¿qué nos queda por hacer?
Narración asiria de la creación del hombre, 800 a.C.*

Cuando él, sea cual fuere de los dioses, hubo dispuesto ordenadamente de este modo y resuelto aquella masa caótica, y la hubo reducido, resuelta de este modo, a partes cósmicas, empezó moldeando la Tierra como una bola poderosa para que su forma fuera la misma por todos lados... Y para que ninguna región careciera de sus formas propias de vida animada, las estrellas y las formas divinas ocuparon el suelo del cielo, el mar correspondió a los peces relucientes para que fuera su hogar, la Tierra recibió a los animales y el aire móvil a los pájaros... Luego nació el Hombre:... todos los animales van con la cabeza baja y fijan su mirada en el suelo, pero él dio al Hombre un rostro levantado y le ordenó que estuviera erecto y que elevara sus ojos al cielo.

OVIDIO, Metamorfosis, siglo I

11.1

Más ancho que el cielo, más profundo que el mar.

Ya casi hemos terminado. Solo falta cerrar con cuidado y pasar a la sala de tallado, donde nos centraremos en el procesamiento del tejido fresco. Mientras tanto, el técnico terminará de cerrar la cavidad craneal, y el cuerpo podrá ser retirado de la sala de autopsias. Se trata de un donante de cerebro, una persona generosa y solidaria que decidió hace años donar su cerebro a nuestro banco cuando falleciera. Solo así es posible avanzar en el conocimiento de las enfermedades neurológicas y en el del cerebro humano.

Lo hemos extraído en bloque, después de abrir la cavidad craneal mediante un corte circular de sus paredes óseas. Después de separar la calota, hemos seccionado la tienda del cerebelo, los nervios craneales, los vasos superficiales y finalmente la médula cervical. Con mucho cuidado -el cerebro fresco, no fijado, es blando y difícil de manejar-, he dejado caer el cerebro en mis manos, lo he extraído cuidadosamente de la cavidad craneal y lo he depositado en una bandeja amplia que nos permitirá realizar algunos procedimientos (corte, toma de muestras, congelación) antes de continuar su procesamiento. Pasamos a la sala contigua y dejo la bandeja en el interior de una cabina de bioseguridad.

El cerebro humano, el órgano que mejor puede explicar lo que significa ser humano y cómo llegamos a serlo. Décadas, siglos de investigación nos permiten contemplar su morfología macroscópica interpretando funcionalmente, y también evolutivamente, cada uno de sus rincones. Las muestras que tomemos servirán después para estudiarlo histológicamente y observar cambios en sus poblaciones celulares (neuronas, astrocitos, oligodendrocitos, microglía) y en los vasos, el neuropilo, las fibras, etc. Así diagnosticaremos la enfermedad neurológica del donante, haremos el diagnóstico neuropatológico. Otras muestras irán a parar a laboratorios de neurociencia básica donde se estudia estas enfermedades en el nivel histológico, celular, subcelular o molecular mediante una gran variedad de técnicas, y se comparará los hallazgos con modelos experimentales en cultivos celulares o en animales transgénicos. Algunas muestras de tejido podrán ir también a laboratorios de neuroanatomía, donde se estudiarán tipos y morfologías celulares, marcadores moleculares, proteínas, genes, ARN de diferentes tipos. Mientras observamos

macroscópicamente el cerebro no podemos dejar de tener en cuenta todo este conocimiento acumulado. Así entendemos lo que vemos. Veamos qué nos dice el cerebro.

Sobre la bandeja, el cerebro fresco se expande, se abre un poco, está apoyado sobre los hemisferios cerebrales y podemos observarlo por su base. Recordemos que, en el hombre, bípedo, el eje superior-inferior coincide con el rostro-caudal, que en nuestros parientes cuadrúpedos corresponde al eje ántero-posterior. Esto nos permite comparar mejor nuestra morfología cerebral, y la de los primates no humanos, especialmente los grandes simios, con la de otros mamíferos. No debemos perder esta perspectiva comparada, y de hecho en el almacén de tejido fijado, a pocos metros de la sala de tallado, junto a cientos de cerebros humanos, se alinean decenas de cerebros de mamíferos del zoo. Resulta más fácil preguntarse por lo específico del cerebro humano si se compara directamente con lo no humano.

Lo primero es pesarlo: 1350 g. Se trata de un cerebro presumiblemente normal de un varón adulto. Un cerebro "de control", decimos, para indicar que servirá para "controlar" los estudios que se realicen con muestras de cerebros patológicos, mucho más abundantes en los bancos de cerebros. ¿Qué tienen de especial el peso y el tamaño del cerebro humano? Es el cerebro más grande de todos los primates actualmente existentes, y encontramos cerebros de mayor tamaño solo en algunas especies de cetáceos y en el elefante. En el proceso filogénico de la hominización, que llevó al origen del género *Homo*, la encefalización, el desarrollo de cerebros cada vez más grandes en proporción al tamaño corporal, fue una línea evolutiva determinante. Pero este proceso dio lugar a un crecimiento alométrico, no isométrico, del cerebro, donde algunas regiones, como veremos, crecieron mucho más que otras.

Observamos su conformación global. Distinguimos claramente tres estructuras macroscópicas: el tronco cerebral, el cerebelo y los dos grandes hemisferios cerebrales. El tronco, relativamente pequeño, compacto, con sus partes bien conservadas filogénicamente (mesencéfalo, protuberancia y bulbo raquídeo), donde vemos también la huella de su desarrollo ontogénico (el tubo neural). Tractos longitudinales de fibras miélicas que conectan el cerebro y el cerebelo con la médula espinal, y numerosos núcleos, grupos de neuronas interconectadas, de los que dependen funciones homeostáticas del organismo, la motilidad de la cabeza y algunos órganos sensoriales. Nada hay en el tronco cerebral que sea distintivo del cerebro humano, salvo, misteriosamente, la intensa pigmentación de la sustancia nigra. Un núcleo que participa en el circuito de los ganglios basales (control del movimiento), y cuya degeneración selectiva produce, entre otras, la enfermedad de Parkinson. En ninguna especie animal, ni siquiera en los grandes simios, se han encontrado lesiones histológicas de Parkinson. Una enfermedad específicamente humana; hasta ahí llega el misterio.

Los hemisferios cerebelosos se expanden a ambos lados del tronco cerebral. Han crecido filogénicamente a la vez que los hemisferios cerebrales, en correspondencia con ellos, y bajo una misma ley de desarrollo: el aumento de la superficie de la corteza, de la capacidad de integración cortical. Su misterio es el de los grandes números, los números astronómicos del cerebro humano. La superficie del cerebelo está recorrida por numerosos surcos paralelos que delimitan los extremos apicales de las folias, expansiones arborescentes de la corteza que la expanden asombrosamente. Si pudiéramos extender todas las folias cerebelosas de un cerebelo humano obtendríamos una superficie de 50.000 cm², equivalente a la de una mesa de ping-pong. Una virtual mirada microscópica nos revelaría dos tipos de neurona, principalmente: una capa de grandes células de Purkinje (inhibitorias) con un enorme árbol dendrítico dispuesto en un solo plano (hasta 200.000 sinapsis por neurona), situada sobre una gruesa y densa capa de pequeñas células granulares (excitatorias). El cerebelo, que representa el 10% de la masa cerebral, contiene el 80% de las neuronas existentes en el sistema nervioso central humano, y esta proporción es comparable a la que se observa en otros primates.

Continuemos. Queremos examinar ahora detenidamente los hemisferios cerebrales, la parte principal del cerebro humano, y también del de todos los mamíferos. Sin mover el cerebro, seccionamos el extremo rostral del tronco, el mesencéfalo, para separarlo, junto con el cerebelo, de los hemisferios cerebrales. Nuestro objetivo ahora es examinar la convexidad cerebral y la cara interna, medial, del hemisferio, que nos ayudará a entender su estructura. Primero separamos ambos hemisferios mediante un corte sagital que recorre la línea media, en la base el quiasma óptico, el hipotálamo, el tálamo, y en la convexidad el cuerpo calloso (un haz de 25×10^7 fibras nerviosas que conectan ambos hemisferios). Nos quedaremos ahora con el hemisferio izquierdo, el dominante en la mayoría de las personas. El hemisferio derecho lo congelaremos para conservarlo a largo plazo a -80°C. Si contemplamos el hemisferio por su cara interna podemos situar sus estructuras a lo largo de una "C", comenzando en el polo anterior por el lóbulo frontal, continuando con el cuerpo calloso, girando en el lóbulo parietal y completando el brazo inferior de la "C" con el lóbulo temporal hasta el polo de ese lóbulo. De nuevo hay aquí una ley de desarrollo filogénico del cerebro humano, la expansión de los hemisferios cerebrales, más acusada en los lóbulos frontal y temporal, los extremos de la "C". Toda la estructura del hemisferio, la sustancia blanca y los núcleos de la base, está condicionada por este patrón de desarrollo. En



La superficie interna del cerebro humano revela su patrón básico de organización.

Imagen cedida por el autor.

la capa más interna de esa "C", se encuentran la circunvolución pericallosa, el hipocampo (un "caballito de mar" tendido sobre el lóbulo temporal), sus cortezas asociadas, y la amígdala. Estas estructuras forman una interfase entre

los sistemas más primitivos y automatizados del cerebro y el sistema más integrador, previsor y creativo, la corteza cerebral. Una interfase, un límite, un borde, un limbo, el sistema límbico (MacLean, 1952), un sistema multifuncional directamente conectado con las sensibilidades olfatoria y gustativa, que interviene en las emociones, la conducta instintiva, la navegación y la memoria.

Más allá de ese límite se encuentra la inmensa superficie de la corteza cerebral. Junto a la sustancia blanca hemisférica, que contiene en gran medida los axones de sus neuronas, representa el 82% de la masa cerebral, y si la pudiéramos extender en un plano obtendríamos una superficie de 2.500 cm². Los giros y surcos de la corteza dibujan el mapa de su diversidad funcional: áreas sensitivas primarias (somatosensorial, auditiva, visual y gustativa), motora primaria, áreas asociativas de diferentes órdenes, la marca distintiva del neocórtex humano, y áreas asociadas al lenguaje. A diferencia de la corteza primitiva, limitada a regiones del sistema límbico, el neocórtex, formado por seis capas de neuronas, con su inmensa expansión en el cerebro humano, es la sede de nuestra actividad cognitiva superior. De nuevo, un rico entramado de neuronas excitatorias (piramidales) e inhibitorias (interneuronas) dispuestas en capas y columnas que determinan su extraordinaria conectividad intra, inter y extracortical. Si tomamos uno a uno todos los elementos que venimos mencionando (estructuras cerebrales, núcleos, cortezas, tipos neuronales) no hay ninguno que sea por sí mismo distintivo del ser humano. Lo realmente diferente es el grado, el orden de complejidad que todos ellos, integrados, alcanzan en el género *Homo*. Cerebros más grandes, un mayor número absoluto de neuronas (10^{11}) con un mayor número de sinapsis (6×10^{13} solo en la corteza), un altísimo grado de conectividad entre los elementos, y un especial desarrollo de las vías (hasta 180.000 km de fibras nerviosas en un solo cerebro), con cientos de miles de sistemas de proyección entre diferentes áreas corticales y regiones subcorticales, ahí debemos buscar el origen de los rasgos conductuales y cognitivos propiamente humanos: el lenguaje sintáctico-gramatical, el pensamiento simbólico, la autorreflexión, la capacidad de planificación a largo plazo, la memoria autobiográfica, la teoría de la mente y la capacidad para crear arte.

Ya terminamos. Tomamos cuidadosamente el hemiocéfalo y lo sumergimos en formol. Allí permanecerá al menos tres semanas antes de que lo cortemos para hacer el estudio histológico completo. Parece un órgano más cuando lo dejamos caer en el fijador, pero sabemos, aunque solo sea en parte, de su inconcebible complejidad, que lo hace "más ancho que el cielo" y "más profundo que el mar".

Alberto Rábano Gutiérrez.

Neuropatólogo.

Director, Banco de Tejidos de la Fundación CIEN.

Instituto de Salud Carlos III, Madrid.

11.2

ADN, cerebro y bibliotecas. Todo forma parte de nosotros. Todo forma parte del Cosmos.

Nací poco más de una década después de la publicación del libro *Cosmos* y debo admitir, con algo de vergüenza, que nunca antes había reparado en esta fascinante obra. A lo largo del capítulo 11, las palabras de Carl Sagan fluyen pasando por diferentes conocimientos científicos mezclados con reflexiones filosóficas sobre los mismos. Inevitablemente te llevan a pensar y a querer saber más. El texto que sigue estas líneas es una mezcla de reflexiones y sensaciones propias, de lo que se conocía y conocemos.

Una sensación de grandeza y pequeñez a la vez. El cosmos es definido por la RAE como universo, y el universo es el conjunto de todo lo existente. Sagan expresa: el cosmos es grande y vertiginoso, y nosotros solo somos un elemento de infinitos. Somos pequeños. No obstante, formamos parte de esa inmensidad tan bella. No solo nacemos y dependemos de él, sino que él, depende de nosotros. De hecho, tenemos al alcance su comprensión o al menos el intento de comprenderlo. Tenemos la habilidad de pensar y comprender, indispensables para sobrevivir e íntimamente ligadas a la ciencia. Sagan dice: “Nuestra pasión por aprender es la herramienta de nuestra supervivencia”.

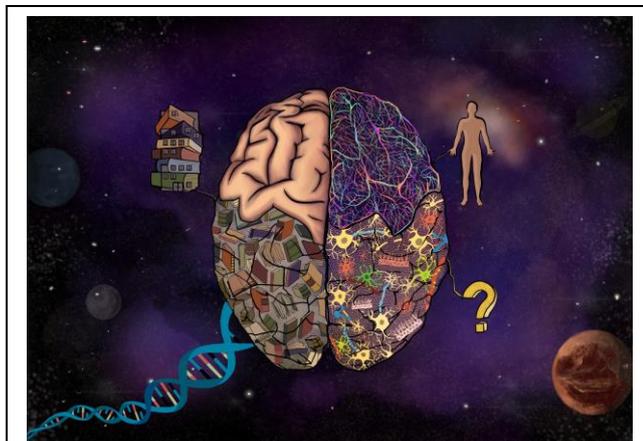
Por otro lado, y en contrapunto a las habilidades y logros extraordinarios de nuestra especie (que nos hacen sentir grandes), Sagan razona que somos fruto de meras aleatoriedades del cosmos. Un simple cambio en la evolución, que puede ser considerado insignificante si lo miramos de manera aislada, podría haber desencadenado un ser humano totalmente diferente y con él, todo lo que conocemos. Posiblemente, no pensaríamos de la misma manera y no habríamos establecido las mismas reglas. Sagan enuncia que “somos el producto de 15 mil millones de años de evolución cósmica”, que “el proceso evolutivo se caracteriza por una poderosa aleatoriedad” y que “la incompreensión de la causalidad evolutiva nos hace humildes”. A mi modo de ver, la aleatoriedad cósmica nos empequeñece y en cambio, nuestras peculiaridades como especie nos engrandecen.

Todo está conectado. Cuando leo las líneas del capítulo reflexiono sobre que todos los elementos del universo estamos conectados de una manera más

o menos directa. Nuestro origen, aunque nos tengamos que remontar a los inicios de los inicios, es común. Somos influidos e influimos en el resto de elementos. Nuestro caso más próximo y visual es la Tierra. Sagan afirma que todos los inquilinos del planeta estamos relacionados por la herencia evolutiva común. Y da como ejemplo nuestro material genético o el propio cerebro, que comparte muchas cosas con otras especies.

En el capítulo *La persistencia de la memoria* el autor cavila, entre otras cosas, sobre el ADN, el cerebro humano y sus evoluciones. Utiliza analogías con elementos más cercanos para todos, para un mayor entendimiento de estos. Es más, los conceptos se van entrelazando, formando una extraordinaria imagen final y global. De esta manera, se vale de la construcción de las ciudades, de la idea de las bibliotecas y de los libros.

El concepto de ciudad ha ido cambiando a lo largo de la historia. Actualmente, no hay una definición única, según el país o el territorio puede variar. No obstante, creo que todos estaremos de acuerdo en que una ciudad es un conjunto de edificaciones dedicadas a la



ADN, cerebro y bibliotecas; todo forma parte de nosotros; nosotros formamos parte del cosmos. Imagen diseñada en exclusiva para este proyecto por Raquel García Mena.

habitabilidad de la población o a actividades específicas. Sagan explica que todas las ciudades empiezan a partir de un pequeño núcleo de casas o construcciones que responden a las necesidades del momento, y que poco a poco se van desarrollando, expandiendo y cambiando, dando respuesta a las nuevas necesidades. También que, en la mayoría de ciudades, al empezar no se especuló con el destino de la misma; se construye para abastecer las necesidades y el modo de vida del momento. Así, el desarrollo de una ciudad se hace de dentro hacia afuera y las partes antiguas pueden continuar funcionando. Sagan hace una semejanza encantadora entre la evolución de las ciudades y la evolución de nuestro cerebro. Donde expresa que nuestro cerebro se ha ido adaptando a cada momento de nuestra historia, ha ido añadiendo o desarrollando partes y las antiguas no han dejado de funcionar, aunque a veces eso suponga un freno. Es verdad, la mayoría de las ciudades actuales empezaron con lo que solemos llamar: casco histórico, y a medida que la tecnología, la ciencia y las necesidades han cambiado, también lo ha hecho el aspecto y la distribución de la ciudad (asfaltado, alcantarillado...). Y en cierto modo nuestro cerebro ha seguido el mismo camino. Creo que, si actualmente se empezará una ciudad de cero, se realizaría un estudio previo y se intentaría imaginar el porvenir; y construir no solo en base del presente, sino

también del futuro. La planeáramos en función de los conocimientos que hemos ido adquiriendo. No hemos de obviar, que la evolución de las ciudades ha ido de la mano de la evolución de la arquitectura, de la ingeniería y del conocimiento en general. Es curioso pensar, que antiguamente las ciudades se expandían mayoritariamente en el eje horizontal y que ahora lo hacen hacia arriba, en el eje vertical (hay ciudades que colindan con otras). También, que muchas partes antiguas no funcionan con el mismo fin de sus orígenes, se han reinventado, no se han destruido. Todo lo contrario, se intentan preservar y proteger porque forman parte de nuestro pasado y hablan de nuestra historia.

Nuestro cerebro es un pequeño cosmos y como postula Sagan, es primordial que entendamos el cosmos y todos sus elementos. Lo que nos hace diferentes al resto de especies es nuestro cerebro, no nuestros sentimientos. En las últimas décadas, la ciencia ha avanzado mucho en cuestiones de cerebro, pero aún es un mundo a medio comprender. Necesitaríamos un libro entero, y sería grueso, para explicar todos los avances que se han hecho desde que Sagan publicó su libro. Cada pequeño descubrimiento como la implicación de una proteína en una enfermedad neurodegenerativa o una nueva función de una célula cerebral conocida; es un gran avance para la comprensión de nuestro cosmos particular. Cuando Sagan escribió su libro, la estructura del cerebro ya era conocida (Sagan habla de ella y sus partes). Y las enfermedades neurodegenerativas ya habían hecho su aparición. También se conocía la mielina, el concepto de sinapsis y plasticidad. Evidentemente, hoy conocemos más detalles sobre todo esto. Las células características de nuestro cerebro ya tenían nombre y algunas funciones y características asignadas. Solo las neuronas aparecen en el capítulo, pero también se conocían todas las células que forman el grupo de glía y microglía. Es cierto, que en aquella época la neurona era la protagonista. Ahora, la glía y la microglía ocupan un espacio importante en la investigación por su rol clave en el correcto funcionamiento del cerebro, su comprensión es fundamental. Dos décadas antes de la publicación, se hallaron las células madre y en 1990 se descubrieron células madre en el cerebro capaces de generar los principales tipos de células cerebrales. La neurogénesis como el nacimiento de neuronas durante el desarrollo ya se conocía, pero en 1998 se demostró la neurogénesis en adultos humanos³². Con todo ello se abrió un mundo de posibilidades y de respuestas, este es un campo muy estudiado actualmente debido a su gran potencial. En 2013 se inició el proyecto *Cerebro Humano* que tiene como objetivo realizar simulaciones minuciosas de la biología que se produce en el cerebro humano, y a la vez desarrollar la tecnología precisa para llevarlo a cabo (supercomputación, modelización, informática...)³³. Como dice Sagan: "El cerebro es la máquina más maravillosa, por encima de todo lo que han inventado los hombres".

³² Peter S. Eriksson et al., 1998, Neurogenesis in the adult human hippocampus, *Nature Medicine* **4**, 1313-1317.

³³ <http://www.upm.es/sfs/Rectorado/Gabinete%20del%20Rector/Notas%20de%20Prensa/2011/2011-05/documentos/DossierTheHumanBrainProject.pdf>

Así mismo formula que el cerebro es una consecuencia de la limitada información que contienen nuestros genes y nuestro afán por sobrevivir. Los genes forman parte de la molécula de la vida, el ADN. Desde su descubrimiento, no se ha dejado de estudiar y se han hecho muchos avances. Cuando se escribió el libro ya se conocía el ADN, el ARN, su estructura molecular y su composición química. Sagan escribió en el capítulo sobre todo ello: ácidos nucleicos, información hereditaria, nucleótidos y doble hélice. Pocos años antes de la publicación se realizaron las primeras secuencias de moléculas de ADN y las primeras modificaciones genéticas. En los años siguientes, se publicó por primera vez la reacción en cadena de la polimerasa y se realizaron los primeros experimentos de terapia génica. En 1984 se inició el proyecto *Genoma Humano*, llegando a su fin en 2003 con el 99% del genoma secuenciado. Y en 1996 el primer mamífero fue clonado a partir de células de un animal adulto (Oveja Dolly)^{34,35}. Hoy en día, seguimos estudiando todo lo relacionado con el ADN. Con la expresión: "la información genética contiene todo lo que nuestro cuerpo sabe hacer por sí mismo y sin haberlo aprendido", el autor deja reflejada la importancia del ADN.

Sagan comenta que la información contenida en el ADN se quedó corta y por ello, desarrollamos el cerebro. Y cuándo el cerebro no fue suficiente para almacenar todo lo que necesitamos, inventamos las bibliotecas. Las bibliotecas son una prolongación de nuestro cuerpo, que poético. Conocemos diversos tipos de biblioteca: la cerebral, la genética, la física y la virtual. Todas ellas importantes, todas con diferentes maneras de almacenar la información, con distintos lenguajes y con diferente vida a través del tiempo. Tal vez la física-virtual sea única de la humanidad, pero la genética y la cerebral la tienen todos los animales del planeta.

No podía terminar de otra manera que no fuera con una reflexión de Sagan: "un libro nos permite oír la voz de otra persona. El autor habla a través de los milenios, directamente a nosotros". Y esto es posible gracias a la escritura, según Sagan, quizá es el mayor invento de la humanidad. Gracias Carl Sagan por dejarnos oír tus pensamientos a través de este libro. Donde, a mi modo de ver, se expresan conocimientos científicos vestidos de una belleza y un romanticismo impresionantes. El libro *Cosmos* debería ser lectura obligatoria.

Judith Estengre Pérez.

Grado en Física. Doctorando en Biociencias Moleculares.
Centro de Biología Molecular Severo Ochoa-CSIC, Madrid.

³⁴ <https://aeomc.blogspot.com/2019/10/>

³⁵ https://elpais.com/diario/2003/04/15/sociedad/1050357601_850215.html

11.3 Computación cuántica.

La computación cuántica es uno de los grandes retos intelectuales y tecnológicos de la actualidad. Por un lado, atañe a cuestiones de hondo calado filosófico; por otro, la promesa de una nueva computación, exponencialmente más eficiente en ciertos casos que la posibilitada por los ordenadores clásicos, alberga un gran potencial disruptivo para la Ciencia, la industria (en sentido amplio), y para otros ámbitos de la sociedad. En este capítulo, se revisarán muy brevemente el concepto y la historia de la computación cuántica; se pretende dar así una visión cercana del campo, el cual ha experimentado un desarrollo espectacular durante las últimas décadas.

La computación cuántica se fundamenta en la utilización de ciertos efectos (cuánticos) que aparecen a escalas microscópicas a la hora de definir cuál es la unidad básica de información, el denominado qubit. Esto tiene increíbles consecuencias. La naturaleza intrínsecamente cuántica de los qubits hace que su comportamiento siga unas reglas diferentes de las que sigue la lógica binaria basada en bits clásicos (ceros y unos), en la cual por otra parte están basados todos los dispositivos electrónicos digitales tales como ordenadores, teléfonos móviles, etc. Propiedades tales como la superposición, el entrelazamiento y la interferencia proporcionan las herramientas para manipular (¡y entender!) la información de un modo totalmente novedoso, que trae consigo algoritmos cuánticos que resuelven algunos problemas de manera exponencialmente más rápida que los mejores algoritmos clásicos conocidos. Una consecuencia directa es que numerosos métodos de encriptado ampliamente utilizados en la actualidad quedarán obsoletos cuando exista un ordenador cuántico con corrección de errores. Esto significa que la privacidad y seguridad de las comunicaciones (transacciones bancarias, correos electrónicos, etc.) a nivel global se verán comprometidas. Por lo tanto, en unos años habrá que cambiar estos sistemas de encriptación por otros protocolos resistentes a ordenadores cuánticos, a escala planetaria. Debido a éste y a otros motivos, las implicaciones de los ordenadores cuánticos trascienden el ámbito puramente académico y científico, y mantienen a las grandes potencias con un ojo (y un fajo de billetes) sobre esta potencialmente disruptiva nueva tecnología.

Para entender la historia y los fundamentos de la computación cuántica, es necesario adentrarse en las raíces de la Ciencia de la Computación. En 1936, mientras en España estallaba la guerra civil, Alan Turing (o como se refería a él nada menos que el genial físico Richard Feynman, el “señor Turing”) publicaba un artículo que a la postre cambiaría el rumbo del mundo. Y no sólo porque sus ideas le permitirían a él y a sus colaboradores construir una máquina que acabó descifrando Enigma, el código secreto utilizado por los nazis para encriptar sus comunicaciones durante la segunda guerra mundial; sino porque además sentó, de manera decisiva, las bases matemáticas rigurosas de lo que hoy en día entendemos por “computación”. En dicho artículo se introducía la denominada máquina de Turing, que en realidad es un dispositivo abstracto. ¿Qué hace tan especial a una máquina de Turing? Alan Turing demostró en su artículo que existe lo que se denomina una máquina de Turing universal. Es decir, una máquina de Turing que es capaz de imitar el comportamiento de cualquier otra máquina de Turing. Esto significa, por un lado, que no necesitamos construir una máquina para leer el correo, otra para reproducir vídeo y otra para jugar al ajedrez. Es posible tener una sola máquina que haga todo esto. No obstante, el verdadero alcance del resultado de Turing se debe a la denominada hipótesis de Church-Turing. Ésta afirma que *cualquier* aparato de computación *posible* es emulable por una máquina universal de Turing. Esto significa, de ser cierto, que no necesitamos preocuparnos por las características particulares del ordenador que queramos construir (ahora o en el futuro), ya que si estudiamos las máquinas de Turing, entonces podremos derivar resultados que son aplicables a *cualquier* aparato de computación imaginable. Vemos por lo tanto la potencia y utilidad de esta hipótesis. La hipótesis de Church-Turing es considerada verdadera por la mayoría de expertos en el tema, si bien no ha sido demostrada.

Los ordenadores clásicos son, en esencia, un montón de ceros y unos sobre los que se aplican operaciones (puertas) que siguen la lógica binaria. Existe un resultado de universalidad que dice que absolutamente todo lo que hacen los ordenadores hoy en día puede reducirse en principio a montones de operaciones NAND, COPY y SWAP sobre miles de millones de bits. Esto incluye desde navegar por internet, reproducir música, etc. hasta generar exquisitos “nuevos cuadros de Rembrandt” digitalizados o ganar al ajedrez a los mejores y más brillantes jugadores del mundo. Los ordenadores muestran de forma espectacular cómo algo tremendamente complejo puede emerger a partir de unas unidades constituyentes tremendamente sencillas, cuando juntas muchísimas de ellas de la manera apropiada. También demuestran las inquietantes capacidades “humanas” que pueden adquirir las máquinas, tales como aprender la técnica de un maestro de la pintura y reproducir su estilo en nuevas obras originales. Crear arte. Muchos estarán de acuerdo en que el arte es algo genuino y exclusivamente humano... ¿pero es así realmente? ¿O tal vez es que nosotros mismos no somos sino meros ordenadores, sofisticados, pero emulables al fin y al cabo por una máquina universal de Turing? Sea como fuere, cuando se discuten éste y otros temas similares, es interesante también

tener presente la reflexión de Feynman, que nos recuerda que los aviones pueden volar, pero tal vez sean de limitado uso para intentar comprender la naturaleza última de las aves.

Volviendo a la computación cuántica, la idea surgió inicialmente a raíz de dos cuestiones fundamentales. Por un lado, la consideración de cuáles son las limitaciones últimas que imponen las leyes de la Física a la computación. En particular, fue el físico Charles Bennett quien le sugirió a Feynman esta pregunta con respecto de la Mecánica Cuántica. El propio Bennet había demostrado ya que la computación reversible, es decir, aquella que hace uso de puertas lógicas reversibles (a diferencia del NAND, que es irreversible), también es universal. Las leyes cuánticas son reversibles en el tiempo; por lo tanto, las puertas cuánticas son también reversibles, y el resultado de Bennet implica que la computación cuántica puede ser universal. Por otro lado, el segundo motivo que llevó a la idea de la computación cuántica fue la comprensión de que la descripción clásica de los sistemas cuánticos necesita en general de un número de parámetros que crece exponencialmente con el tamaño del sistema (por ejemplo, con el número de partículas), y por lo tanto, no es eficiente. Feynman se dio cuenta de que un sistema (un ordenador) cuántico, en cambio, sí podría emular a otro sistema cuántico de forma más eficiente, pues ambos están regidos por las mismas leyes. La ineficiencia de los ordenadores clásicos para describir sistemas cuánticos había sido observada también por el matemático Yuri Manin. Feynman propuso un simulador cuántico, expandiendo las ideas de Paul Benioff a este respecto. El siguiente gran avance teórico lo introdujo el físico David Deutsch al definir por primera vez una máquina de Turing cuántica. La máquina de Turing cuántica es a los ordenadores cuánticos lo que la máquina de Turing a los ordenadores clásicos. Fundamental.

Otro resultado importantísimo en computación cuántica, análogo al de la universalidad de la puerta NAND en computación clásica, es la universalidad de las puertas de dos qubits. Esto significa que sólo es necesario un conjunto apropiado (y reducido) de puertas lógicas cuánticas que actúen sobre un qubit y de puertas que actúen sobre dos qubits conjuntamente para aproximar tanto como se quiera cualquier otra transformación cuántica posible. Considero estos dos resultados de universalidad (clásico y cuántico) tremendamente sugerentes. Es como si la Naturaleza y las leyes de la Física nos quisieran regalar esta enorme simplificación en términos tanto conceptuales como prácticos a la hora de construir ordenadores. Otro resultado crucial que nos brinda la Naturaleza, descubierto en la década de los 90, es la posibilidad de incorporar esquemas de corrección de errores a los ordenadores cuánticos. Esto parece casi un milagro, teniendo en cuenta que los sistemas cuánticos no pueden ser observados, por ejemplo para comprobar si se ha producido un error, sin destruir su estado previo a la medida. Y teniendo en cuenta también que los qubits tampoco pueden ser clonados o copiados, lo cual constituye por su parte otro resultado sorprendente y fundamental. Muchos de los algoritmos cuánticos conocidos más importantes necesitarán de corrección de errores

para poder resolver problemas. Esto tardará todavía un tiempo en llegar. Mientras tanto, se han propuesto toda una serie de algoritmos híbridos cuánticos-clásicos que son más robustos a los errores sistemáticos presentes en los ordenadores cuánticos, y que no requieren necesariamente de corrección de errores. Estos algoritmos acercarán las primeras aplicaciones útiles de la computación cuántica en el tiempo, y hoy en día se ha desarrollado todo un campo de investigación en torno a ellos. Las futuras aplicaciones de los ordenadores cuánticos incluyen la ciencia de materiales, la ciberseguridad, la bioinformática, el análisis financiero, la industria militar, la logística, la inteligencia artificial y un largo etcétera³⁶. Esto puede dar una idea del gran impacto que puede suponer la computación cuántica. No en vano, es un potencial factor diferencial, y como tal, un elemento de competición geopolítica. Esto es aplicable también a la supercomputación clásica. Basta observar cuáles son los países con mayor poder de supercomputación hoy en día: EEUU y China.



Prototipo de ordenador cuántico.

En definitiva, la computación cuántica alberga un gran potencial disruptivo. La mejora de los ordenadores clásicos basada en la continua miniaturización de los transistores al ritmo marcado por la ley de Moore³⁷ se acerca a su fin. Los transistores no pueden hacerse infinitamente pequeños, ya que a cierta escala empiezan a aparecer los efectos cuánticos. Todavía no sabemos cuál será el soporte físico definitivo de los ordenadores cuánticos del futuro, pero el objetivo de su construcción está suponiendo un gran esfuerzo de investigación experimental en multitud de sistemas físicos distintos, desde materiales superconductores o semiconductores hasta sistemas de unos pocos átomos o fotones. Esto es muy bueno en sí mismo, aunque algunas de estas tecnologías no lleguen a alcanzar el objetivo final. Asimismo, la Teoría de la Información Cuántica nos ha posibilitado una comprensión muchísimo más amplia de la propia Mecánica Cuántica. Así pues, en el peor de los casos, en el supuesto escenario en el que la construcción de un ordenador cuántico no fuera viable, el camino recorrido habría merecido la pena con creces. No obstante, lo increíble es que nada parece indicar que ése vaya a ser el caso.

Diego García-Martín.

Estudiante de doctorado en computación cuántica en el Barcelona Supercomputing Center y el Instituto de Física Teórica UAM-CSIC.

³⁶ Nota de los coordinadores. Extracto de la conferencia de D. Ignacio Cirac en la Fundación Ramón Areces el 26/09/2019: https://youtu.be/n9YLhLb_wl0

³⁷ La ley de Moore es una ley empírica, formulada en 1965 por Gordon Moore, cofundador de Intel. Afirma que el poder computacional de los ordenadores desarrollados por la humanidad se duplica aproximadamente cada dos años; es decir, crece exponencialmente.

11.4

Supremacía cuántica: recibiendo con los brazos abiertos a nuestros nuevos señores cuánticos.

El anuncio de que Google había alcanzado la supremacía cuántica³⁸ fue noticia no una, sino dos veces. La primera, cuando el artículo que detallaba el portentoso avance se filtró, no se sabe cómo, allá por septiembre de 2019. La segunda, un mes después, cuando fue finalmente publicado en Nature. Y ni siquiera estoy contando la que sería la tercera, cuando IBM difundió una nota de prensa intentado rebatir los resultados de Google. Como se puede ver, este no es un descubrimiento típico. Va más allá de los círculos científicos y académicos para capturar la imaginación del público. De hecho, ha sido comparado por Scott Aaronson, uno de los investigadores en computación cuántica más importantes del mundo, con aquel momento histórico del primer vuelo de los hermanos Wright. Intrigante, ¿verdad? En esta breve nota, trataré de explicar qué es esa tan nombrada supremacía cuántica, cómo la han conseguido los investigadores de Google, por qué IBM le pone pegas y, sobre todo, por qué es potencialmente uno de los desarrollos científicos y tecnológicos más importantes del siglo XXI. Para ello, necesitamos comenzar por el principio, respondiendo a una pregunta fundamental...

¿Qué es la computación cuántica?

El funcionamiento interno de los ordenadores cuánticos es el tema del (excelente) capítulo de Diego García-Martín que se encuentra en este mismo volumen y, de hecho, hace poco yo mismo tuve el honor de escribir sobre ello para otro libro³⁹. Sin embargo, para hacer este artículo tan autocontenido como sea posible, mencionaré algunos detalles a los que me referiré más adelante.

³⁸ El término “supremacía cuántica”, a causa de sus connotaciones políticas, ha sido considerado inadecuado por algunos investigadores en computación cuántica. Se han propuesto alternativas, incluida “ventaja cuántica”, pero como ha señalado John Preskill, estos nuevos términos no reflejan completamente la diferencia real entre ordenadores clásicos y cuánticos. Por esta razón, y dado el extendido uso de “supremacía”, he decidido conservarlo en este texto.

³⁹ “Y un gran paso para la humanidad”, editado por Ana Casalvilla Dueñas y Quintín Garrido, que se puede descargar en:

<https://yungranpasoparalahumanidad.blogspot.com/2019/02/computacion-cuantica-elias-fernandez.html>

En mi opinión, lo más importante que se debe comprender es que un ordenador cuántico no es simplemente un ordenador más rápido. De hecho, ni siquiera es cierto que los ordenadores cuánticos sean más rápidos en todas las tareas (¡y hasta podrían ser más lentos en algunas!). Entonces, ¿por qué tanto revuelo? Lo que hace especiales a los ordenadores cuánticos es que pueden aprovechar algunas propiedades "extrañas" de las partículas subatómicas (como la superposición, el entrelazamiento o la interferencia) para abordar ciertos problemas de forma diferente. Esto hace posible desarrollar algoritmos cuánticos que resuelven problemas de forma mucho más rápida que cualquier algoritmo clásico conocido⁴⁰.

El ejemplo más notorio se debe a Peter Shor, que en 1994 descubrió una manera rápida de factorizar números con la ayuda de un ordenador cuántico. Encontrar los factores primos de un entero podría parecer un juego de niños, y lo es para números pequeños como el 15, el 21 o el 49. Pero, ¿resulta tan sencillo, por ejemplo, cuando tenemos algo como 3442236437844890848962691120256523872456444051997010354874932020517692086113259539755530138240613932133436429030725281214457504205876121500455522122021956828989679539799089428606069211781714466580121376966304852290646741335767985832244563863256968923004470022322683044576929476947120638879022104852435535246204194655452192106910647827239222132389476473637854580838107932559200658278001280804572498177? Ya no lo parece, ¿verdad⁴¹? El mejor algoritmo clásico del que disponemos para resolver este tipo de problema tardaría un tiempo desorbitado en factorizar un número de, digamos, 1000 cifras. Esta dificultad es, de hecho, la base de algunos protocolos criptográficos muy usados, como el famoso RSA. Pero el algoritmo de Shor nos muestra que, con un ordenador cuántico, factorizar esos números y, por tanto, romper la seguridad de casi todo Internet, sería mucho, mucho más fácil.

¿Qué es, entonces, la supremacía cuántica?

Demostrar matemáticamente que un ordenador cuántico es capaz de hazañas como factorizar un número grande es una cosa; ejecutar el algoritmo de Shor en un dispositivo real, otra bien diferente. El reto tecnológico de construir un ordenador cuántico suficientemente grande se ha convertido en uno de los más difíciles que la humanidad ha afrontado. Sin embargo, en los últimos años se han producido notables avances en las técnicas usadas para construir

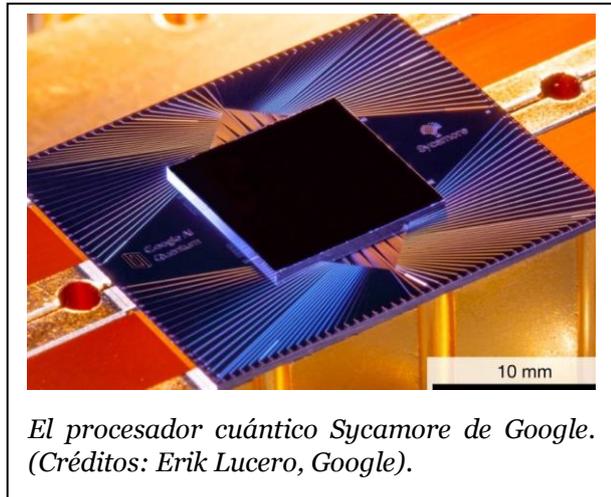
⁴⁰ Y tenemos buenas razones para pensar que se trata de una limitación fundamental de los ordenadores clásicos, no solo que no hayamos buscado con suficiente ahínco.

⁴¹ Sus factores son, por cierto, 38446987513619644955815324662957851615740204558929741701011236593747201243473865651109495096257976848140931686246832118997178441313186890031551687408532105122099332172678260860632442477936678431268763 y 89532019553560510572280382084216577436370480412820899579066689247911167282144485321539000856903001904683556540913581333554678296618564366005378732821281475596193803322477850929715108931267459260799379.

ordenadores cuánticos de propósito general y algunos aparatos han pasado de ser prototipos de laboratorio a dispositivos que, con sus limitaciones, se pueden incluso usar gratuitamente a través de Internet. Esto condujo a John Preskill a definir, en 2012, la *supremacía cuántica* como el momento en el que un ordenador cuántico real “superara claramente” en alguna tarea al ordenador clásico más potente. Nótese que esta tarea no tiene por qué ser útil. Algunos grupos de investigación aceptaron, de distintas formas, este desafío, entre ellos el Google Quantum AI Lab liderado por John Martinis. Este equipo sacudiría el mundo años más tarde al anunciar su éxito.

¿Cómo ha logrado Google la supremacía cuántica?

Es natural pensar que el candidato ideal para un experimento de supremacía cuántica sería encontrar los factores de un número grande. No conocemos ningún algoritmo clásico que pueda resolver el problema eficientemente (y sospechamos que no existe tal método), pero podríamos usar el algoritmo de Shor para factorizarlo en un ordenador cuántico y, después, comprobar la respuesta en un ordenador de escritorio (multiplicar sí que se puede hacer de forma eficiente en ordenadores clásicos, claro). El problema es que para ejecutar el algoritmo de Shor necesitaríamos construir un ordenador mucho más grande que los que tenemos hasta ahora. Uno de los parámetros más importantes en la arquitectura de un ordenador cuántico es la cantidad de *qubits* (comparable a la RAM de un ordenador convencional). Sycamore, el procesador usado por Google para alcanzar la supremacía cuántica, tiene 54 (de los que se pueden usar 53). Se ha estimado que con un número que un ordenador clásico no pueda factorizar, se necesitarían *millones* de qubits.



El procesador cuántico Sycamore de Google. (Créditos: Erik Lucero, Google).

Sin embargo, hay una tarea que resulta sencilla para los ordenadores cuánticos pero parece ser muy difícil para los clásicos: ejecutar *circuitos cuánticos*. Estos circuitos son análogos a los *programas* de los ordenadores clásicos. Así que, en esencia, lo único que hace un ordenador cuántico es ejecutar circuitos cuánticos⁴². Los ordenadores clásicos también lo pueden hacer (se suele llamar *simulación* a esta tarea), pero el tiempo necesario crece exponencialmente con el número de qubits. Esto significa que simular un circuito de 100 qubits en un ordenador clásico podría llevar más tiempo que el

⁴² Existen otros paradigmas de computación cuántica, pero el de los circuitos cuánticos es el más usado.

transcurrido desde el Big Bang hasta ahora. Lo que el equipo de Martinis consiguió fue generar circuitos aleatorios de 53 qubits, ejecutarlos en su procesador cuántico y muestrear los resultados. Esto le llevó unos 300 segundos al ordenador cuántico. Con sus estimaciones, a un ordenador tradicional le costaría 10.000 años. ¡Supremacía cuántica alcanzada!

¿O no?

Como he mencionado en la introducción, algunos investigadores de IBM han puesto objeciones al anuncio de Google. Su justificación es que Google no ha considerado todas las posibilidades. Simplificando mucho, el problema es que existe un algoritmo para simular circuitos cuánticos que usa mucha memoria. *Mucha*. Tanta, que ningún ordenador existente tiene la suficiente para ejecutarlo con circuitos de 53 qubits. Así que Google hizo sus cálculos considerando otro método que es más lento pero usa mucha menos memoria. De ahí los 10.000 años. IBM argumenta que el algoritmo rápido se podría usar si no se utilizase solo RAM sino también discos duros para almacenar los datos necesarios para la computación. Con este enfoque, calculan que el tiempo necesario para simular los circuitos de Google sería "solo" de dos días y medio.

Y al final, ¿quién tiene razón?

La definición de supremacía cuántica es un tanto ambigua. No establece una meta clara, y podría cambiar si se descubren nuevos algoritmos o si hay avances en el *hardware*. Pero, incluso así, el logro de Google es extremadamente relevante. Trescientos segundos es, desde luego, mucho menos que dos días y medio e incluso IBM acepta que con unos pocos qubits más su enfoque no sería viable. Aún mejor. Lo conseguido por el equipo de John Martinis, esa supremacía cuántica, es solo el comienzo de una nueva era en la que los ordenadores cuánticos nos pueden ayudar a alcanzar cumbres todavía más altas. La era de la computación cuántica. ¡Carl Sagan estaría, seguramente, muy orgulloso!

Bibliografía:

- (1) Arute, F., Arya, K., Babbush, R. et al., 2019, *Quantum supremacy using a programmable superconducting processor*. *Nature* **574**, 505–510 <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1666-5>
- (2) Pednault E., Gunnels J., Maslov D., Gambetta J., 2019, *On "Quantum Supremacy"*, IBM Research blog, <https://www.ibm.com/blogs/research/2019/10/on-quantum-supremacy/>
- (3) Preskill, J., 2019, *Why I Called It 'Quantum Supremacy'*, Quanta Magazine, <https://www.quantamagazine.org/john-preskill-explains-quantum-supremacy-20191002/>

Elías Fernández-Combarro Álvarez

Licenciado en matemáticas. Ingeniero técnico en informática. Doctor en matemáticas.

Profesor asociado – Departamento de informática – Universidad de Oviedo.

Capítulo 12

Enciclopedia galáctica

“¿Tú qué eres? ¿De dónde viniste? Nunca vi nada semejante a ti.” El Cuervo Creador miró al Hombre y... se sorprendió de que este extraño y nuevo ser fuera tan parecido a él.

Mito esquimal de la creación

El cielo ha sido fundado, la Tierra ha sido fundada. ¿Quién ha de vivir ahora, oh dioses?

Crónica azteca, La historia de los Reinos

Sé que algunos dirán que soy demasiado atrevido con estas afirmaciones sobre los planetas, y que subimos allí a través de muchas posibilidades, y si por casualidad una de ellas es falsa y contraria a lo supuesto, arruinaría como un mal fundamento todo el edificio, y lo haría caer por los suelos. Pero... si suponemos, tal como hicimos, que la Tierra es uno de los planetas, de dignidad y honor igual al resto, ¿quién se atrevería a decir que no puede encontrarse en otro lugar nadie que disfrute del glorioso espectáculo de las obras de la naturaleza? ¿O qué si hubiese otros espectadores que nos acompañan, nosotros deberíamos ser los únicos que han entrado a fondo en sus secretos y su conocimiento?

CHRISTIAAN HUYGENS. Nuevas conjeturas referentes a los mundos planetarios, sus habitantes y sus producciones, hacia 1690

El autor de la Naturaleza ha hecho imposible que en nuestro estado actual tengamos alguna comunicación desde esta tierra con los demás grandes cuerpos del universo; y es posible que haya cortado de igual modo toda comunicación entre los demás planetas, y entre los diferentes sistemas... Observamos en todos ellos cosas suficientes para provocar nuestra curiosidad, pero no para satisfacerla... No parece conforme con la sabiduría que resplandece a través de toda la naturaleza suponer que deberíamos ver tan lejos y que nuestra curiosidad debería ser excitada hasta tal punto... solo para quedar defraudado al final... Esto nos conduce, pues, de modo natural a considerar nuestro estado actual solo como el alba o inicio de nuestra existencia, como un estado de preparación o de examen para futuros avances...

COLIN MACLAURIN, 1748

No puede haber un lenguaje más universal y más simple, más libre de errores y de oscuridades... más digno de expresar las relaciones invariables de las cosas naturales [que las matemáticas]. Interpreta [todos los fenómenos] con el mismo lenguaje, como si quisiera atestiguar la unidad y simplicidad del plan del universo, y hacer aún más evidente este orden inalterable que preside todas las cosas naturales.

JOSEPH FOURIER, Teoría analítica del color, 1822

12.1

Una Solución a la Paradoja de Fermi: el Principio Subantrópico y la Conjetura de Indetectabilidad.

La Paradoja de Fermi.

En el verano de 1950, en Los Alamos, los físicos nucleares Enrico Fermi, Edward Teller y otros colegas sacaron el tema de los objetos volantes no identificados (OVNIS), muy popular en aquella época, mientras conversaban durante una comida. Al cabo de un rato, cuando ya habían pasado a otro tema, Fermi de repente preguntó: Pero, ¿dónde se han metido todos? (*Where is everybody?*) Haciendo rápidos cálculos mentales, Fermi había llegado a la conclusión de que numerosas civilizaciones alienígenas deberían haber estado por aquí, visitando la Tierra, desde hace muchos miles o millones de años. Por tanto, ¿por qué no vemos alienígenas a nuestro alrededor? Esta cuestión constituye la Paradoja de Fermi.

Ocurre que en nuestra galaxia hay miles de millones de estrellas mucho más antiguas que el Sol, muchas de ellas miles de millones de años más antiguas (en la 'zona de habitabilidad' de la galaxia son en promedio mil millones de años más antiguas). Por consiguiente, en nuestra galaxia tienen que haber surgido muchas civilizaciones antes que la nuestra, y una fracción de ellas podría haberse expandido a través de vastas regiones e incluso a través de toda la galaxia. Otros argumentos apuntando en la misma dirección incluyen estimaciones sobre el tiempo de vida de las estrellas de segunda generación, dentro de las cuales se crean los elementos químicos de la materia orgánica, y también estimaciones sobre el tiempo total que necesitaría una civilización tecnológica para colonizar, o explorar, toda la galaxia. En lo que respecta a las estrellas de segunda generación, resulta que se forman sólo dos millones de años después de las estrellas supermasivas de primera generación (estas agotan su combustible explotando como supernovas en un millón de años sólomente y se requiere otro millón de años para que la materia residual forme nuevas estrellas). Así pues, la aparición de materia orgánica en nuestra galaxia podría remontarse a varios miles de millones de años antes de que el Sol existiera. En cuanto al tiempo total necesario para que una civilización tecnológica pudiera colonizar, o explorar, toda la galaxia, cálculos conservadores de modelos de difusión dan estimaciones de entre 5 y 50 millones de años, que es una escala de tiempo corta a nivel cosmológico. Además de estas consideraciones, el hecho de que la vida en la Tierra

apareciera en época muy temprana apoya la tesis, mantenida por muchos científicos, de que la vida debe de ser abundante en el Universo.

Se han propuesto muchas soluciones a la Paradoja de Fermi, que podríamos clasificar como expansionistas y no-expansionistas dependiendo de si parten del supuesto de que las civilizaciones tecnológicas se expanden, de forma genérica, a través de grandes regiones de su galaxia; o al contrario, no se expanden más allá de una pequeña vecindad. Entre estas últimas, las soluciones más populares sostienen que el viaje interestelar es imposible, sin importar el nivel científico y tecnológico alcanzado por una civilización, o que las civilizaciones avanzadas no tienen ningún interés en expandirse a través de grandes regiones de su galaxia, e incluso que las civilizaciones tecnológicas se aniquilan a sí mismas, o desaparecen debido a catástrofes naturales, antes de poder extenderse por su galaxia. A su vez, las soluciones expansionistas más populares presentan dos posturas irreconciliables. Por una parte, están aquellos que propugnan que es muy improbable que emerja vida inteligente en el Universo y que estamos prácticamente solos en nuestra galaxia, ya que, de no ser así, tendrían que habernos visitado algunas civilizaciones alienígenas necesariamente. En las antípodas de los anteriores, por otra parte, están los que sostienen que las civilizaciones avanzadas abundan en el Universo, que visitan la Tierra en el presente, por diferentes motivos, y también la han visitado en el pasado. A este respecto, cabe señalar que algunos científicos, militares y pilotos de varios países, así como muchos autores de libros populares, llevan décadas proponiendo que algunos OVNIS pudieran ser naves extraterrestres y algunos de los 'dioses de los cielos', que proliferan en muchas tradiciones ancestrales, podrían haber sido astronautas alienígenas. Las razones de que tales civilizaciones no contacten abiertamente con la nuestra podrían ser varias. Por ejemplo, las civilizaciones avanzadas podrían tener códigos éticos que les impidieran interferir con civilizaciones primitivas, tal como sugirió Carl Sagan en su obra COSMOS. Y también podría suceder que nos ignorasen por falta de interés, debido a nuestro nivel tan primitivo, entre otras posibilidades.

El Principio Subtrópico y la Conjetura de Indetectabilidad.

En el verano de 2003, hice una propuesta para resolver la Paradoja de Fermi [1,2], tras una sencilla reflexión sobre las relaciones entre las diferentes civilizaciones puestas en contacto en el proceso de expansión. Aquí es crucial diferenciar entre civilizaciones avanzadas agresivas y no agresivas. Las civilizaciones avanzadas agresivas explotarían y perjudicarían a las menos avanzadas tanto como les conviniese, e incluso las aniquilarían para arrebatarnos su planeta. Las civilizaciones avanzadas no agresivas, por su parte, intentarían integrar a las menos avanzadas, tirando de ellas hacia su propio nivel, siempre que el salto evolutivo entre las dos no fuera muy pronunciado. En algunos casos, sin embargo, tales civilizaciones avanzadas encontrarían planetas habitados por civilizaciones primitivas con una enorme distancia (tecnológica, científica y genética) entre ellas. En particular, en lo que se refiere a las capacidades cerebrales, las diferencias entre los individuos

avanzados y los individuos primitivos podrían ser patéticas. En estas circunstancias, lo que sería de esperar es que los individuos avanzados se comportasen de forma 'ecológica' hacia los primitivos, interfiriendo lo mínimo posible y muy discretamente con su evolución social y cultural, teniendo en cuenta que el contacto abierto destruiría esa civilización. Con esta percepción se hace menos difícil aceptar la posibilidad de que el Sistema Solar pudiera haber sido explorado o colonizado hace muchos miles, o incluso millones de años, por al menos una civilización avanzada no agresiva que hubiera tratado, y pudiera que todavía tratase, a nuestro planeta como una reserva natural y a nosotros como a una especie protegida.

Mi solución a la Paradoja de Fermi resulta de este escenario y consiste en dos hipótesis. La primera es *El Principio Subantrópico: Nosotros no somos típicos entre los observadores inteligentes del Universo. Las civilizaciones típicas de las galaxias típicas estarían cientos de miles, o millones, de años más evolucionadas que nuestra civilización terrestre.* La segunda hipótesis es *La Conjetura de Indetectabilidad: Todas las civilizaciones suficientemente avanzadas camuflan sus planetas por motivos de seguridad, debido a la existencia de civilizaciones avanzadas agresivas, de manera que ninguna señal de civilización (ni de vida) pueda ser detectada por observadores externos, quienes sólo obtendrían datos distorsionados con el propósito de disuasión.* Esta hipótesis explicaría por qué no detectaríamos ninguna señal de inteligencia proveniente del espacio exterior, aunque el Sistema Solar formase parte de una extensa hipercivilización. Además, de esta solución se desprende que: *En el presente, muy probablemente, todas las galaxias típicas del Universo están ya colonizadas (o grandes regiones de las mismas) por civilizaciones avanzadas. En el vasto territorio de estas hipercivilizaciones, una pequeña proporción de sus individuos pertenece a subcivilizaciones primitivas.* Las civilizaciones avanzadas tendrían bases subterráneas y submarinas en los planetas primitivos de su territorio, por motivos militares y científicos. De hecho, el que nuestra civilización no haya sido nunca atacada por alienígenas agresivos, hasta donde conocemos, podría ser indicio de que estamos inmersos en una civilización avanzada que protege nuestro planeta como parte de su territorio. Curiosamente, en uno de los vídeos de *El Universo de Stephen Hawking*, el autor comenta: "Varios de mis colegas piensan que puede que nos visiten extraterrestres a bordo de algunos OVNIS. Yo no lo creo porque si vinieran extraterrestres la interacción con nosotros sería mucho más desagradable, ...". Así que Hawking no contemplaba la posibilidad de civilizaciones extraterrestres benévolas, que no nos atacarían e incluso podrían evitar que otras civilizaciones extraterrestres lo hiciesen.

La Conjetura de Indetectabilidad predice una probabilidad muy baja de éxito para el proyecto SETI, de búsqueda de inteligencia extraterrestre, ya que sus antenas sólo podrían detectar civilizaciones primitivas capaces de producir emisiones electromagnéticas. Pero después de alcanzado este nivel, cualquier civilización tardaría solo unos pocos cientos de años en aprender a ocultarse de observadores externos, haciéndose indetectable. Como resultado, el

período de detectabilidad de una civilización promedio podría resultar muy corto y la probabilidad de que una civilización primitiva, como la nuestra, detectara otra sería insignificante. Por ejemplo, podría haber ocurrido que el planeta Tierra hubiera recibido los últimos programas de radio o TV de otro planeta hace 200.000 años y por un período de unos 500 años. *Este efecto debería añadirse como otro factor más a la ecuación de Drake.*

Por otro lado, esta solución a la Paradoja de Fermi es obviamente compatible con que algunos OVNIS pudieran ser naves extraterrestres (o intraterrestres, de colonias subterráneas), mientras que algunos 'dioses descendiendo de los cielos', podrían corresponderse con equipos varios de científicos y tecnólogos asistidos por personal militar, enviados para ayudar al desarrollo de la civilización terrestre. Esta solución también es compatible con la posibilidad de contactos entre individuos de civilizaciones avanzadas y algunos individuos de civilizaciones primitivas. De hecho, en [1] he



La sonda soviética Fobos 2 envió 38 fotografías de la superficie de Marte, algunas mostrando extrañas sombras. El 25 de Marzo de 1989, apuntando al satélite Fobos sacó una última instantánea (izqda), en la que puede apreciarse el satélite junto con un objeto cilíndrico muy alargado, cuya forma coincide con una de las sombras. Marina Popovich, coronel de las Fuerzas Aéreas Soviéticas, mostró esta fotografía en una rueda de prensa (dcha) en el consulado de la URSS en San Francisco, en 1991. (Associated Press – The New York Times)

identificado tres causas o razones principales que podrían motivar tales contactos: objetivos científicos en general, entretenimiento y/o afecto, y propósitos delictivos de todo tipo (abducciones y secuestros incluidos).

Para terminar, sospecho que la característica principal del escenario que propongo - la existencia de subcivilizaciones primitivas inmersas en grandes hipercivilizaciones - es muy probablemente verídica en el presente, o bien ocurrirá en el futuro, en la mayoría de las galaxias. La respuesta a la cuestión de si nuestra civilización es, en efecto, una tal subcivilización ignorante de la existencia de la gran hipercivilización, vendrá, o bien a través de tecnología avanzada que nos permita descartar tal posibilidad, o bien por la decisión de nuestros anfitriones, si es que existen, de mostrarnos sus caras abiertamente, lo cual podría suceder mucho antes.

Referencias:

- [1] B. Gato-Rivera, (2003), arxiv: physics/0308078 (Inglés y español).
- [2] B. Gato-Rivera, (2005), arxiv: physics/0512062 (Inglés y español).

Beatriz Gato Rivera.

Científica Titular.

Instituto de Física Fundamental, CSIC, Madrid.

12.2

Estamos solos.

El libro "Cosmos" fue publicado en el año 1980. Fue uno de esos fenómenos editoriales poco corrientes, pues estuvo durante mucho tiempo en las listas semanales de los libros más vendidos. Su autor, Carl Sagan, se convirtió en el más famoso divulgador científico durante las dos décadas siguientes. Sagan era un científico en los campos de la astrofísica y de la astrobiología. Desarrolló su carrera en las universidades de Harvard y Cornell en Estados Unidos y participó en las misiones espaciales de las sondas Voyager para el estudio de planetas del Sistema Solar. Por ellas sabemos acerca del volcanismo en la luna lo de Júpiter, de la composición de la atmósfera de Saturno a base de hidrógeno y helio, del gran campo magnético de Urano o de la actividad geológica del satélite Tritón de Neptuno. Las Voyager, lanzadas en los años 70, están alejándose de nosotros por el espacio interestelar y, al menos hasta 2025, continuarán enviándonos datos de su viaje. Las sondas Voyager transportan unos discos con música e información como presentación, por si son encontradas por civilizaciones extraterrestres. Sagan, que era un entusiasta de la exobiología, disciplina que incluye el estudio de la habitabilidad de planetas diferentes al nuestro y de la búsqueda de vida en otros sistemas planetarios, presidió el comité para la realización de estos discos.

A los astrónomos nos gusta pensar que una de las primeras actividades del ser humano como *sapiens* es la de ordenar el firmamento en su cabeza. Conocer el firmamento implica comprender los ciclos climáticos del año, para tener un calendario que le oriente en sus actividades agrícolas y ganaderas. Pero ese conocimiento implica algo más trascendental: en el firmamento sitúa a sus dioses, seres sempiternos, omnipresentes y todopoderosos a los que se unirá a través de la puerta de la muerte. De alguna manera, la aparición de ritos funerarios en yacimientos arqueológicos son pruebas del grado de humanización de la especie. El firmamento se utiliza para proyectar nuestra existencia más allá de lo terrenal.

En el siglo XXI la especie humana mira al cielo de otra manera. Quizá debido a nuestra antigua costumbre de situar a nuestros dioses en el cielo, ahora nos proyectamos a nosotros mismos sobre el firmamento. Y no solo nos vemos colonizando la Luna, Marte y otros planetas y sistemas planetarios, sino

que racionalizamos nuestra querencia ancestral de socialización hasta convertir ese deseo en una fórmula matemática: la ecuación de Drake.

La ecuación de Drake es una de las más famosas en astronomía en particular y en Ciencia en general. Fue propuesta por el astrónomo americano Frank Drake en 1961 y trata de estimar el número de civilizaciones avanzadas tecnológicamente que podría haber en nuestra galaxia, aunque bien puede extrapolarse más allá de nuestra Vía Láctea. Los factores que la ecuación tiene en cuenta son varios: ritmo de formación de estrellas, fracción de estrellas con planetas, fracción de planetas orbitando alrededor de su estrella a distancias compatibles con la vida, fracción de planetas donde podría haberse desarrollado vida y la fracción de planetas en los que se ha podido desarrollar vida inteligente, tecnológicamente avanzada y con posibilidades de comunicación. El propio Drake estimó que podría haber unas diez civilizaciones como la nuestra en nuestra galaxia. En realidad la ecuación de Drake evoluciona con el tiempo, ya que a medida que conocemos mejor aspectos como la evolución de las estrellas, el número de planetas alrededor de éstas y su composición, podemos ser más precisos a la hora de introducir esos valores en la ecuación. Por supuesto, la ecuación también está abierta a introducir nuevos parámetros que tengan en cuenta otros factores importantes antes no contemplados: aspectos propios del planeta, como actividad volcánica, tectónica de placas o las relaciones de un planeta con otros dentro de un mismo sistema o con sus lunas.

La ecuación de Drake tiene algunas críticas, entre las que destaca el hecho de que incluye factores tan diversos, y algunos de ellos tan complejos, que su conocimiento está más allá de nuestras posibilidades, y quizá siempre lo esté. Para mí ésta no es la mayor debilidad de la ecuación. El problema está en la concepción en sí misma de la ecuación: a pesar de que se propone para responder a la pregunta de cuántas civilizaciones, aparte de la nuestra, pueden existir en nuestra galaxia, está construida de tal manera que la respuesta prácticamente no puede ser cero, a pesar de que no hay ninguna evidencia para pensar que debe ser así. Cuando extendemos esta falta de evidencia a la búsqueda de civilizaciones extraterrestres, nos encontramos con la paradoja de Fermi: si el universo está lleno de vida, ¿dónde está todo el mundo? Hay muchas y muy variadas propuestas para responder a la pregunta anterior, pero la verdad es que no hay ni una sola evidencia que nos invite a admitir siquiera el punto de partida.

Sabemos que en el espacio hay moléculas orgánicas de todo tipo. Esto no es extraño, ya que la base de toda la química orgánica que conocemos, el carbono, es uno de los productos que se obtienen a partir de las reacciones nucleares del interior de las estrellas y que, a su muerte, pasan al medio interestelar. Sin embargo, aun con esta aparente abundancia de material orgánico, no hemos detectado aún organismos vivos, ni siquiera uno sencillo. Podría muy bien suceder que la vida fuera un fenómeno muy común, pero

altamente inestable, y que aunque pueda aparecer con cierta frecuencia, está condenada a desaparecer una y otra vez, sin posibilidad de solapamiento. También podría darse el caso exactamente contrario: que la vida sea un proceso altamente extraño e improbable, pero estable una vez que aparece, y que solo pudiera darse una vez por universo. Esto último permitiría que se diera cierto grado de evolución, pero nos condenaría a la soledad estelar.



"Hydra, Ophiucus, Cetus", seriegrafías realizadas a propósito del texto por la ilustradora y artista de grabados ©Lea Dalissier (<http://www.leadalissier.com>)

Hacia el año 1518, después de entregar al emperador mexica Moctezuma unos pergaminos a modo de fotografías describiendo a unos hombres barbudos y pálidos, recién llegados procedentes de Oriente en casas flotantes, que cabalgaban sobre unos monstruos aterradores, los consejeros del emperador se reunieron. Sus conclusiones fueron claras: son los hijos del dios de la vida, la serpiente emplumada Quetzalcóatl. Fueron a consultar a los máximos sacerdotes si sus antiguas profecías se estaban cumpliendo. Algo similar ocurrió cuando los hombres de Francisco Pizarro se acercaban a tierras incas, Atahualpa, su jefe, fue inmediatamente alertado por uno de sus sacerdotes: "Viracocha ha vuelto". Los incas creían en el dios Viracocha, su dios creador, que partió con sus criados por mar hacia el sol poniente y que de esa dirección retornaría. Los españoles eran sin duda los *viracochas*. A buen seguro no son éstas las dos únicas veces en las que el encuentro entre dos culturas termina en cónclave de sacerdotes, pero me bastan para ilustrar una idea: la primera vez que veamos aterrizar naves extraterrestres con formas antropomórficas saliendo de ellas, serán sin duda generaciones descendientes

de los primeros grupos de personas que desde la Tierra colonizaran el espacio exterior. Eso sí primero evolucionamos a seres inteligentes. Sin haber conocido a Sagan personalmente y aún sabiendo de su entusiasmo por la exobiología, creo que estaríamos de acuerdo en esto.

Notas bibliográficas:

- (1) Sobre las sondas Voyager, los resultados obtenidos y los discos incluidos en ellas, se puede encontrar toda la información en la web de NASA: <https://voyager.jpl.nasa.gov>
- (2) Una obra amena para adentrarse en la evolución de la especie humana es la obra de los autores del Proyecto Atapuerca J.L. Arsuaga e I. Martínez "La especie elegida", Ed. Temas de Hoy, 1998.
- (3) Muchos aspectos que la Astrobiología estudia y que aquí solo se mencionan sucintamente pueden estudiarse en la obra editada (en inglés) por G. Horneck y C. Baumstark-Khan "Astrobiology. The Quest for the Conditions of Life", Ed. Springer, 2002. La obra ha podido quedarse algo rezagada respecto a algunas misiones espaciales (aunque hay ediciones posteriores a la utilizada), pero sigue siendo un buen referente para analizar el origen de la vida y sus condiciones en el Sistema Solar.
- (4) Sobre mitología y constelaciones, tanto en Occidente como en Oriente, puede consultarse la colección de seis pequeños tomos de A. Martos Rubio "Historia de las Constelaciones", Ed. Equipo Sirius.
- (5) La ecuación de Drake puede consultarse en la página web de SETI: <https://www.seti.org/drake-equation-index>
- (6) Argumentos sobre por qué no encontramos civilizaciones extraterrestres en respuesta a la paradoja de Fermi hay para todos los gustos. La recopilación más extensa se puede consultar en el libro en español de S. Webb "Si el universo está lleno de extraterrestres... ¿dónde está todo el mundo?", Ed. Akal, 2018.
- (7) Las anécdotas sobre los indígenas mesoamericanos pueden ampliarse a partir de la obra de Juan Eslava Galán "La Conquista de América para Escépticos", Ed. Planeta, 2019.

Rodrigo Gil-Merino y Rubio.
Doctor en Astrofísica.

12.3 Los otros mundos.

A Bárbara.

Michel Mayor estaba esperando su vuelo en el aeropuerto de San Sebastián en España, cuando, al revisar su correo electrónico una avalancha de mensajes llenaba su bandeja. Algunos mensajes le solicitaban entrevistas y otros le anunciaban que, finalmente, había recibido el Premio Nobel de Física. Digo finalmente porque era bien sabido por la comunidad que el descubrimiento que realizó, junto con Didier Queloz, valía tal reconocimiento. Ellos habían encontrado el primer exoplaneta alrededor de una estrella similar al Sol. El premio lo compartieron con James Peebles cuyo trabajo ha brindado grandes avances en el estudio de la evolución de las galaxias en el Universo a partir de las semillas que se observan en la radiación cósmica de fondo.

El motivo del premio a estos tres astrofísicos a la letra dice: *“por sus contribuciones a nuestro entendimiento de la evolución del Universo y el lugar de la Tierra en el cosmos”* [1]. Las dos contribuciones premiadas ese año son, sin lugar a dudas, parte de la respuesta que buscamos en ciencia a dos de las preguntas que se ha planteado la humanidad desde siempre: de dónde venimos y hacia dónde vamos. Como nos lo recuerda Carl Sagan en diferentes partes de su libro “Cosmos” [2], Giordano Bruno ya imaginaba otros mundos en otras estrellas, con sociedades más o menos parecidas a la nuestra y donde, también, se podrían estar planteando estas mismas preguntas. Mucho conocimiento se construyó desde que Giordano fuera quemado en la hoguera por sus afirmaciones hasta que el libro de Sagan vio la luz en 1980. Quince años después, en 1995, Mayor y Queloz, publican en la prestigiosa revista “Nature” la anhelada confirmación. Han medido la presencia de un planeta orbitando una estrella como el Sol [3]. Gracias a los avances científicos y tecnológicos en la instrumentación astronómica encuentran que la velocidad de la estrella Pegaso 51 presenta un periodo de 4 días, con base en esta información se calcula que tal variación se debe a la presencia de un planeta gigante, tipo Júpiter, que se encuentra orbitando muy cerca de ella. A este planeta primero lo llamaron Belerofonte, el jinete de Pegaso, la alada criatura mitológica. Actualmente este exoplaneta es conocido como Pegaso 51 b, obedeciendo a la convención adoptada para nombrar a los exoplanetas.

Con base en cálculos matemáticos se pudo encontrar a este planeta sin necesidad de observarlo directamente pero aún así marcó un antes y un después en la astrofísica planetaria, pues además de confirmar el sueño de Giordano rompió el de muchos astrónomos. Los modelos que se tenían en ese momento para la formación de planetas buscaban algo que nos parecía natural, que los planetas gigantes y gaseosos se encontraran en las órbitas externas mientras que los pequeños y rocosos estuvieran más cerca a su estrella. Y esto era natural porque buscábamos algo similar a lo que observábamos en nuestro propio Sistema Solar, el mismo Sagan menciona que lo contrario sería poco probable.

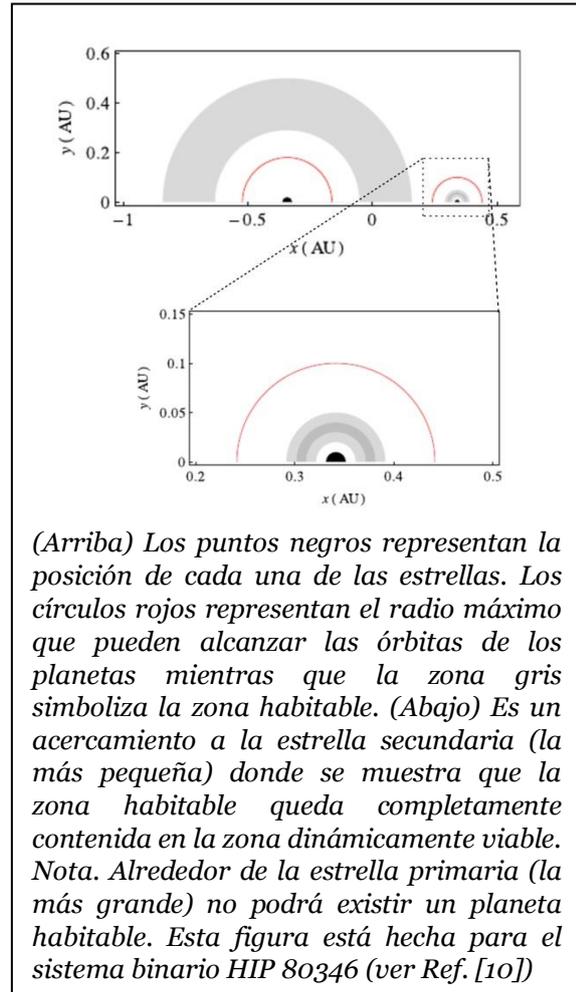
Muchas investigaciones se han llevado a cabo desde ese descubrimiento y una pregunta en particular es la que nos llama a escribir este pequeño artículo: Cómo cambia la estimación en la ecuación de Drake [4] al considerar que un 70% de las estrellas se encuentran en sistemas múltiples, la mayoría de ellos, dobles [5]. Los cálculos que hace Sagan en la edición de 1980 de Cosmos, considera que un tercio de las estrellas de La Vía Láctea tendrían planetas, que cada uno de los hipotéticos sistemas planetarios sería conformado por diez planetas y que, al menos, dos de ellos serían habitables. Estos números resultan esperanzadores.

Cuando nos referimos a sistemas estelares binarios, es muy restringida la zona en la que puede moverse un planeta pues la fuerza de dos estrellas se encuentra en una constante lucha, jalando de allá para acá a las partículas que eventualmente lograrán construir un planeta. Encontrar las condiciones de movimiento adecuadas no es un problema trivial, de hecho, es una variación del famoso problema de los tres cuerpos, el cual no tiene una solución analítica. Una de las estrategias que podemos emplear para resolverlo es suponer que la masa de las estrellas es mucho más grande que la masa de, digamos, una partícula que se mueva bajo la influencia de ellas. A partir de esa suposición podemos construir un programa de computadora que nos ayude a encontrar las zonas en las que un planeta pudiera vivir por mucho tiempo [6, 7]. A la zona que se dibuja después de miles y miles de evoluciones le llamamos zona dinámicamente viable. La siguiente restricción a la ecuación de Drake vendrá de la zona en la que un planeta tipo Tierra pueda mantener agua en estado líquido [8], esta condición puede ser muy diferente a la que se tiene cuando consideramos sólo una estrella que ilumina al planeta. Al tener dos estrellas, la temperatura podrá subir mucho cuando los astros se encuentren muy cerca del planeta y, por otro lado, bajar demasiado al alejarse de ambas estrellas. A la zona que mantiene un equilibrio entre caliente y frío, permitiendo que el agua se mantenga líquida, se le llama zona habitable. La condición de viabilidad dinámica y de habitabilidad debe satisfacerse simultáneamente para considerar que un hipotético planeta tipo Tierra pudiera ser considerado como un candidato a desarrollar vida (Ver figura).

En una muestra de 161 binarias de la vecindad Solar de las que conocemos características como la masa de cada estrella, su periodo y la excentricidad de su órbita [9] solamente 64 (40%) tienen masas similares a la del Sol. Haciendo el análisis de viabilidad dinámica y habitabilidad cerca del 60% de esta muestra de 64 estrellas cumplen con tener una zona completamente viable [10]. Sobre la cantidad de planetas alrededor de cada una de las estrellas (o de ambas), aún no podemos dar una estimación. Lo que sabemos es que de los 4268 exoplanetas que aparecen en la página exoplanet.eu [11], solamente una parte muy pequeña pertenece a sistemas de más de un planeta, sin embargo esto es muy probable que sea solamente un sesgo observacional y que en efecto, lo común sea que se formen conjuntos de varios planetas alrededor de una estrella.

La estimación de Sagan sobre planetas habitables se verá modificada. De 161 sistemas dobles (es decir 322 estrellas), Sagan esperaba que $\frac{1}{3}$ tuvieran planetas y que cada una albergara dos planetas habitables. Mantengamos ese dos ante la falta de evidencia contundente que nos revele si es una buena estimación o no. Con las cuentas de Sagan esperaríamos 214 planetas habitables. A pesar de que hay muchos otros componentes en la ecuación de Drake, con base en el análisis que hemos presentado (conservando el factor de 2) serían 76 los planetas habitables esperados, 65% menos mundos que en la estimación de Sagan. Sin embargo hemos ganado mucho en cuanto a la posibilidad de planear las observaciones pues con esto lograríamos estimar si vale la pena utilizar el valioso tiempo de los telescopios en busca de planetas alrededor de un sistema binario particular.

La ciencia se encuentra en constante evolución. El martes pasado (26 de mayo 2020) se anunció la confirmación de que hay un planeta similar a la Tierra, de aproximadamente unas 1.3 masas terrestres, orbitando a Próxima Centauri, la estrella más cercana a nosotros [12]. A pesar de encontrarse en una órbita muy cercana a su estrella, ésta es mucho menos luminosa que



nuestro Sol lo que le permitiría mantenerse en una zona habitable. 4.2 años luz nos separan de ese planeta. Si bien la posibilidad de vida en Próxima Centauri b es más bien remota, su cercanía pone sobre la mesa la discusión de los posibles viajes interestelares no tripulados que serían posibles con una tecnología no mucho más sofisticada de la que tenemos hoy en día. Ayer (31 de mayo 2020), Space-X en colaboración con la NASA [13], envió dos personas a la estación espacial en una nave que está siendo desarrollada para, eventualmente, enviar humanos a nuestro vecino Marte. Los viajes a otros mundos ya no son ciencia ficción. Sagan cuestiona continuamente la condición humana y se pregunta si seremos capaces de sobrevivir nuestra adolescencia como especie, sin destruirnos unos a otros. Hoy, estamos en medio de una pandemia que ha detenido al planeta entero [14], los escenarios económicos no pintan nada bien y marcan de manera muy dolorosa las enormes desigualdades de la sociedad que hemos construido. Las calles del país de Sagan arden en este momento en protesta contra la violencia racista [15].

Nuestro cotidiano tampoco es ciencia ficción... aunque parece.

Referencias:

- [1] The Nobel Prize in Physics 2019. NobelPrize.org. Nobel Media AB 2020. Mon. 1 Jun 2020.
- [2] Sagan, C. (1980), *Cosmos*, Random House. EEUU.
- [3] M. Mayor & D. Queloz, *Nature*, volumen 378, página 355, 1995.
- [4] Sagan, C & Drake, F (1975). *The Search for Extraterrestrial Intelligence*. *Scientific American* Volumen 232. pp.80-89.
- [5] Duquennoy, A. & Mayor, M. (1991) Multiplicity among solar-type stars in the solar neighbourhood. II - Distribution of the orbital elements in an unbiased sample. *Astronomy and Astrophysics*, Volumen 248, p. 485.
- [6] Pichardo, B., Sparke, L. & Aguilar, L. (2008) Geometrical and physical properties of circumbinary discs in eccentric stellar binaries. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* Volumen 391, 815–824
- [7] Pichardo, B., Sparke, L. & Aguilar, L. (2008), Circumstellar and circumbinary discs in eccentric stellar binaries. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volumen 359, Issue 2, pp. 521-530.
- [8] Kopparapu, R. K. et al. (2013) Habitable Zones around Main-sequence Stars: New Estimates. *The Astrophysical Journal*, Volume 765, Issue 2, article id. 131, pp.
- [9] Jaime, L. Pichardo, B. Aguilar, L. (2012) Regions of dynamical stability for discs and planets in binary stars of the solar neighbourhood. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 427, Issue 4, pp. 2723-2733.
- [10] Jaime, L. Aguilar L. & Pichardo, B. (2014) Habitable zones with stable orbits for planets around binary systems. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 443, Issue 1, p.260-274
- [11] The Extrasolar Planets Encyclopaedia, (consultado el 31 de Mayo de 2020). <http://exoplanet.eu/>
- [12] Suárez Mascareño, A. (2020) Revisiting Proxima with ESPRESSO, arXiv:2005.12114
- [13] Smith Y. Editor (2020) Demo-2 Launch: Setting Forth on a Historic Journey <https://www.nasa.gov/image-feature/demo-2-launch-setting-forth-on-a-historic-journey>
- [14] Organización Mundial de la Salud. <https://www.who.int/es/emergencias/diseases/novel-coronavirus-2019>
- [15] New York Times (Junio 1, 2020) <https://www.nytimes.com/>

Luisa G. Jaime.

Doctora en Ciencias (Astronomía).

Investigadora Postdoctoral, ININ – México.

12.4

Buscando peces en el océano cósmico.

En COSMOS capítulo 12, Carl Sagan nos introduce de una forma exquisita a esa gran pregunta: *¿estamos solos en el Universo?* Sabemos que las leyes de la física se aplican en todo el Universo. Por lo tanto, es posible que en otra parte del mismo haya surgido otra civilización con capacidades tecnológicas. Lo que no sabemos es cuán probable es. Es de resaltar que después de décadas, el mensaje en COSMOS sigue vigente. Hay solo un par de actualizaciones que quisiera resaltar.

En el caso de la ecuación de Drake, tenemos un poco más de conocimiento. En aquel entonces, no se conocían planetas en otras estrellas, se especulaba su presencia basados en información indirecta. Hoy en día, el estudio de exoplanetas ha revolucionado nuestro conocimiento en este tema. No hace ni diez años que sabemos de forma estadística que cada estrella tiene por lo menos un planeta, y alrededor de una de cada cinco estrellas tienen un planeta en la zona de habitabilidad (1). Esta misma zona es la que nuestro "punto azul pálido" es abrigado por nuestro Sol. Si esta noche vemos las estrellas, podemos entonces imaginarnos la gran cantidad de planetas que pueden tener potencialmente la capacidad de albergar vida.

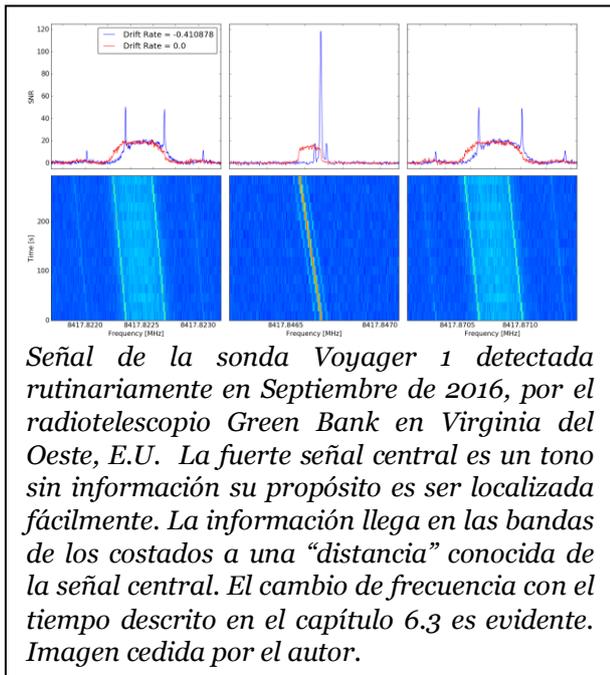
Así como en los tiempos de COSMOS nos preguntábamos sobre la prevalencia de planetas en otras estrellas basados en estudios indirectos. Ahora, nos preguntamos de igual manera sobre el origen y evolución de la vida que dieron como resultado a nuestra especie. Estos campos de la ciencia están empezando a tener sus propias revoluciones, y tal vez en las décadas venideras nos ayudaran a resolver algunas de las otras variables en la ecuación de Drake. Aun así, existen más incógnitas de los procesos evolutivos que dieron como resultado una civilización en nuestro planeta capaz de comunicarse con las sondas Voyager (ver más de Voyager en el capítulo 6.3).

Pero entonces, ¿existen otras civilizaciones en nuestra Galaxia?

Dada cual fuere la probabilidad de la creación de vida inteligente. ¿Qué procesos evolutivos (biológicos o no) serían necesarios para la creación de una civilización con avances científicos y tecnológicos como la nuestra? En la Tierra, la invención de la agricultura, las matemáticas y la astronomía ocurrió

en varias partes del mundo independientemente, ¿podría esto ser consecuencia de alguna universalidad en procesos evolutivos de civilizaciones tecnológicas llegada una capacidad cognitiva suficiente?, ¿o podría ser una coincidencia específica de los humanos? ¿Qué podríamos decir de otros procesos posteriores como la urbanización? Si alguna de estas universalidades existiera, entonces esas nos servirían como la piedra de Rosetta sirvió para entender los jeroglíficos egipcios como nos cuenta entretenidamente Sagan en COSMOS. Desde los tiempos de las pinturas rupestres en cuevas remotas, nos preguntamos sobre nuestros orígenes, y sobre nuestra actual soledad cósmica. En COSMOS, vimos cómo la ecuación de Drake fue utilizada para estimar la realidad de nuestra soledad. Desafortunadamente no podemos llegar muy lejos sin antes asumir y especular demasiado. Dadas las incógnitas de varios factores, es igual de probable que haya millones de civilizaciones en la Vía Láctea o que solo seamos nosotros. Para en realidad poder acercarnos a la respuesta, es necesario un estudio riguroso, sistemático y científico.

En 1959 Guiseppe Cocconi y Philip Morrison, físicos prestigiosos de la Universidad de Cornell, publicaron el artículo: "Buscando Comunicaciones Interestelares". Ahí por primera vez en la historia se señaló audazmente que las ondas de radio era un medio razonable de comunicación interestelar, y con esto el campo de investigación de SETI⁴³ fue creado. Las razones para usar ondas de radio son claras: 1) viajan a la velocidad de la luz⁴⁴; 2) son afectadas mínimamente por el medio interestelar; 3) son muy baratas de producir; y 4) su manipulación para mandar información es sencilla. Como ilustración del potencial de las ondas de radio tenemos las señales que aun recibimos de la sonda espacial Voyager 1 en las afueras del sistema solar, que cuenta con una potencia no más que la de un refrigerador casero (ver figura). ¿De qué sería entonces capaz una civilización avanzada? No es pues casualidad que hoy en día nuestra tecnología de telecomunicaciones permea nuestra vida cotidiana en un sin número de formas. Estas propiedades ofrecen versatilidad en su uso y más importante aún, provee de la capacidad



Señal de la sonda Voyager 1 detectada rutinariamente en Septiembre de 2016, por el radiotelescopio Green Bank en Virginia del Oeste, E.U. La fuerte señal central es un tono sin información su propósito es ser localizada fácilmente. La información llega en las bandas de los costados a una "distancia" conocida de la señal central. El cambio de frecuencia con el tiempo descrito en el capítulo 6.3 es evidente. Imagen cedida por el autor.

(ver figura). ¿De qué sería entonces capaz una civilización avanzada? No es pues casualidad que hoy en día nuestra tecnología de telecomunicaciones permea nuestra vida cotidiana en un sin número de formas. Estas propiedades ofrecen versatilidad en su uso y más importante aún, provee de la capacidad

⁴³ SETI o la búsqueda de inteligencia extraterrestre por sus siglas en inglés, y originalmente llamado CETI, o comunicación con inteligencia extraterrestre.

⁴⁴ La velocidad la luz es la velocidad límite en el universo como descubrió Albert Einstein en 1905 con su teoría de la relatividad especial (véase capítulo 8.5).

de crear un mensaje que sería sin duda reconocido por sus características artificiales. Tal mensaje nos daría una prueba certera pero indirecta de vida inteligente en algún otro lugar del universo, y como dijo Carl Sagan en COSMOS, “la historia de nuestra especie [...] cambiaría para siempre”.

La primera búsqueda de señales de radio fue realizada en 1961 por Franck Drake (a quien tengo el honor de conocer) y conocida como el Proyecto OZMA (2). Esta búsqueda, así como otras realizadas en las siguientes dos décadas, se concentró alrededor de frecuencias específicas o “frecuencias mágicas”, descritas así por su relación a procesos astrofísicos, y entonces de referencia en común con otras civilizaciones. El ejemplo más común es la línea de emisión del átomo de hidrógeno a 1,420 MegaHertz. Las limitaciones tecnológicas de la época permitían a los radioastrónomos buscar solo en un número reducido de frecuencias o “canales” simultáneamente. Para la década de los 80, este número se incrementó a unos miles de frecuencias. Avances tecnológicos aumentaron este número para finales del siglo XX a millones de frecuencias y se extendió a bandas de frecuencia más amplias. Hoy en día es posible estudiar miles de millones simultáneamente, equivalente a darle a cada persona en el mundo su propia frecuencia para sintonizar. La búsqueda ha aumentado también en otros aspectos a través de las décadas. El Proyecto OZMA fue una investigación modesta de dos estrellas vecinas parecidas al Sol. Proyectos posteriores hicieron observaciones de decenas, luego de centenas y hoy en día se han buscado señales en miles de estrellas. Se ha diversificado también a galaxias cercanas y otras regiones del cielo.

COSMOS ha sido una continua inspiración desde mi niñez, y me dirigió al campo de la astronomía. Fue un privilegio para mí en 2017 publicar los primeros resultados del proyecto Breakthrough Listen, que en su momento fueron los resultados más exhaustivos en la historia de SETI (3). Fue una experiencia emocionante, donde descubrimos que el origen de unas señales peculiares era nuestra propia tecnología humana, satélites de comunicaciones orbitando la Tierra.

No todas las búsquedas han sido en ondas de radio, otros proyectos buscan señales de laser ópticos o infrarrojos con telescopios convencionales. O de putativos procesos tecnológicos a gran escala, como es el ejemplo tan conocido de las esferas de Dyson⁴⁵. Hoy en día llamamos al conjunto de todos estos tipos de posibles mediciones (incluyendo las ondas de radio) como tecnomarcadores⁴⁶. En todos estos tipos de búsqueda la premisa es la misma: encontrar señales o procesos que la naturaleza no pueda crear por sí misma.

Múltiples proyectos a través de los años se han realizado buscando estos tipos diferentes de tecnomarcadores. Pero después de todas estas

⁴⁵ Primero propuestas en 1960 por Freeman Dyson, un talentoso físico de Princeton.

⁴⁶ Un subconjunto de los biomarcadores, término usado en Astrobiología. Actualizando así el término algo obsoleto de SETI.

búsquedas aun no sé ha encontrado alguna señal definitiva. Una pregunta inevitable que se han hecho muchos es: después de buscar todas estas décadas, ¿podemos decir que estamos solos en el Universo? En realidad, es muy pronto para decir esto. Las búsquedas más grandes son aun pequeñas. En la Vía Láctea hay entre 100 y 400 mil millones de estrellas, si hubiera un millón de civilizaciones en la Galaxia, como se mencionó en COSMOS, entonces podríamos decir que en promedio una de cada 100 mil o 400 mil estrellas tiene una civilización. Unas 100 veces más del número de estrellas que se han buscado hasta la fecha. Asumiendo que la civilización más cercana se quisiera comunicar con nosotros, y asumiendo que quisiera hacerlo con ondas de radio, ¿qué frecuencia usarían? Aquí tendríamos que extender nuestra búsqueda a otras frecuencias, para cubrir todo el rango posible, tendríamos que aumentar esto por otro factor de 100. Y ¿qué tal si no están transmitiendo continuamente, pero sí de forma esporádica? Esto significaría que tuviéramos que observarles siempre. Hoy en día las estrellas se observan en general por unos minutos, horas a lo más. Las búsquedas tendrían que aumentar por otro factor de 1,000. Multiplicando estos factores e ignorando otros posibles, vemos que necesitamos aumentar por un factor de 10 millones, y esto es un escenario optimista asumiendo millones de civilizaciones en nuestra galaxia. Como dijo Jill Tarter, radioastrónoma por profesión y uno de los personajes más icónicos en la historia de SETI, "todos los esfuerzos [tipo SETI], [...] equivalen a recoger un vaso de agua del océano. Y nadie concluiría que no hay peces en el océano basados solamente en ese vaso de agua" (4).

La gran búsqueda está aún por comenzar, pero no es momento de desanimarnos. Los avances tecnológicos previstos en las próximas décadas nos darán las herramientas adecuadas para la búsqueda. Lo que tenemos que hacer es seguir "escuchando" e incrementar la búsqueda. En el pasado ha habido altas y bajas en el nivel de soporte público o privado a esta causa. En general han sido solo un puñado de científicos involucrados. Todavía los proyectos actuales siguen careciendo de recursos humanos. Entonces hay muchos aspectos por mejorar en el futuro.

Concluyo con lo que dijeron acertadamente en su artículo inaugural, Guiseppe Cocconi y Philip Morrison en 1959: "La probabilidad de éxito es difícil de estimar, pero si nunca buscamos, la posibilidad de éxito es cero".

Bibliografía:

- (1) <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0004-637X/767/1/95/pdf>
- (2) <https://www.annualreviews.org/doi/full/10.1146/annurev.astro.39.1.511>
- (3) <https://arxiv.org/abs/1709.03491>
- (4) https://www.ted.com/talks/jill_tarter_join_the_seti_search

J. Emilio Enríquez Rascón.

Doctor en Ciencias, Astrofísica.

Previamente investigador científico en la Universidad de California en Berkeley.

Capítulo 13

¿Quién habla en nombre de la Tierra?

¿Por qué motivo tendría que ocuparme en buscar los secretos de las estrellas si tengo continuamente ante mis ojos a la muerte y a la esclavitud?

Pregunta planteada a Pitágoras por Anaxímenes (hacia 600 a.C.), según Montaigne

Qué vastitud la de estos orbes y qué poco considerable es comparada con ellos la Tierra, el teatro sobre el cual se juegan todos nuestros poderosos designios, todas nuestras navegaciones, y todas nuestras guerras. Una consideración muy pertinente, y materia de reflexión para los reyes y príncipes que sacrifican la vida de tantas personas solo para halagar su ambición y convertirse en dueños de algún lamentable rincón de este pequeño lugar.

CHRISTIAAN HUYGENS, Nuevas conjeturas referentes a los mundos planetarios, sus habitantes y sus producciones, hacia 1690

“Al mundo entero –agregó nuestro Padre el Sol-, doy mi luz y resplandor, doy calor a los hombres cuando tienen frío; hago que sus campos fructifiquen y que su ganado se multiplique; cada día que paso doy la vuelta al mundo para estar más enterado de las necesidades del hombre y para satisfacer estas necesidades. Seguid mi ejemplo.”

Mito inca incluido en los Comentarios reales de Garcilaso de la Vega, 1556

Miramos hacia el pasado a través de millones incontables de años, y vemos la gran voluntad de vivir que lucha por salir del fango situado entre las mareas, que lucha de forma en forma y de poder en poder, que se arrastra por el suelo y luego camina con confianza sobre él, que lucha de generación en generación por dominar el aire, que se insinúa en las tinieblas de lo profundo; la vemos levantarse contra sí misma con rabia y hambre y cambiar su forma por otra nueva, contemplamos cómo se nos acerca y se hace más parecida a nosotros, cómo se expande, se elabora a sí misma, persigue su objetivo inexorable e inconcebible, hasta alcanzamos al final y latir su ser a través de nuestros cerebros y nuestras arterias... Es posible creer que todo el pasado no es más que el principio de un principio, y que todo lo que es y ha sido es solo el crepúsculo del alba. Es posible creer que todo lo conseguido por la mente humana no es sino el sueño antes del despertar... Surgirán... de nuestro linaje mentes que volverán su atención a nosotros en nuestra pequeñez y nos conocerán mejor de lo que nos conocemos nosotros. Llegará un día, un día en la sucesión infinita de días, en que seres, seres que están ahora latentes en nuestros pensamientos y escondidos en nuestros lomos, se erguirán sobre esta tierra como uno se yergue sobre un escabel y reirán y con sus manos alcanzarán las estrellas.

H.G. WELLS, “El descubrimiento del futuro” Nature, 65.326 (1902)

13.1

La destrucción de la Biblioteca de Alejandría y la muerte de Hipatia.

Nos remontamos al año 332 a.C., cuando el Gran Alejandro Magno, rey de Macedonia y Hegemón de Grecia, en su conquista por el Mediterráneo, luchó contra los persas en Gaza con el fin de liberar al pueblo egipcio. Esta batalla acabó en victoria para el honorable militar griego y con el fin del yugo persa en Egipto. Tal fue el agradecimiento del pueblo que le proclamaron faraón y fundó la ciudad que hasta nuestros días lleva su nombre, Alejandría.

La ciudad estaba situada a orillas del mar Mediterráneo, en la parte más occidental del delta del río Nilo. El puerto de la ciudad quedaba amparado de las fuertes tempestades por la posteriormente famosa Isla de Faros. Además, un canal permitía a las grandes embarcaciones mercantiles que navegaban por el Nilo llegar al puerto. Así, este enclave pronto se convirtió en uno de los más transitados del mundo.

Además de la ambición por conquistar nuevas tierras, Alejandro Magno tenía un gran interés por la cultura, la ciencia y las letras. Alejandro destacó desde su niñez por su inteligencia y astucia, cualidades que fueron potenciadas por sus diferentes mentores, como el emblemático filósofo Aristóteles. Este interés por el conocimiento y el arte sirvió de modelo a la dinastía Ptolemaica, la cual gobernó Egipto cuando el gran conquistador murió en el 323 a.C. con apenas 32 años.

La cultura helenística de la Antigua Grecia rivalizaba en Alejandría con la milenaria cultura egipcia. Con el fin de aunar ambas culturas, Ptolomeo I decretó el culto oficial a la deidad Serapis en ambas tierras y, además, lo declaró patrón de Alejandría. Sin embargo, la ciudad se urbanizó siguiendo las líneas de la arquitectura helenística y, con el fin de dar prestigio y hacer gala del arte griego, se llevaron a cabo ambiciosos proyectos arquitectónicos.

Ptolomeo I, que fue guardaespaldas y amigo de Alejandro Magno, hizo construir durante su mandato el *Mouseion* o Museo de Alejandría. Era un espacio dedicado a las musas, hijas de Zeus, que servían de inspiración a artistas y filósofos. El Museo contaba con diferentes dependencias, como un zoológico, jardines botánicos, comedores o salas de reunión e investigación.

También disponía de habitaciones para los trabajadores y estudiantes de este impresionante lugar.

Entre las anteriores dependencias destacaba la Gran Biblioteca de Alejandría, cuya importancia y fama ha trascendido durante siglos. Una larga lista de eruditos de diferentes lugares viajó a Alejandría para formarse e investigar. Uno de los más destacados fue Eratóstenes, que llegó a ser bibliotecario jefe, y cuya obra más notable es la medición de la circunferencia de la Tierra.

Los sucesores de Ptolomeo I heredaron este interés por la cultura, y cierta sed insaciable de fama, y se propusieron convertir la Biblioteca en el centro neurálgico del saber. Se hacían expediciones por las ciudades mediterráneas y se registraban todos los barcos que atracaban en el puerto en busca de manuscritos para copiarlos y añadirlos a su colección.

Colección y prestigio que tanto crecieron, que se construyeron otras bibliotecas –llamadas hijas– en la ciudad para acabar albergando gran parte de todo el conocimiento del Mundo Antiguo. La biblioteca hija más famosa estaba localizada al sur de la ciudad, en el templo *Serapeum* o Serapeo; edificado en honor a Serapis.

Llegados al siglo II a.C., la inestabilidad política y económica de los últimos años de la dinastía Ptolemaica supuso un decaimiento de la actividad cultural. Comenzando con Ptolomeo VIII, que expulsó a muchos eruditos de la ciudad como represalia por no haberle apoyado en sus trifulcas familiares para conseguir el ascenso al trono. Asimismo, la figura emblemática de bibliotecario jefe se vio gravemente devaluada al utilizarse el cargo como recompensa política para aquellos leales a la corona.

El presupuesto otorgado al Museo iba disminuyendo y la situación política no mejoraba. Esto provocó inevitablemente una fuga de sabios a otras ciudades mediterráneas y a la principal rival de la Biblioteca de Alejandría, la Biblioteca de Pérgamo. El fin de la dinastía y la llegada de los romanos a Egipto en el 30 a.C., propició aún más el declive cultural de la ciudad. Años después, en el siglo II d.C., la peste antonina asoló al Imperio romano y diezmó la población del Mundo Occidental.

Pese a esta decadencia, la Biblioteca sobrevivió muchos años más, almacenando en sus estanterías importantes obras y acogiendo a ilustrados que, aunque de forma mucho más precaria, seguían aportando conocimiento al mundo. Aunque durante la crisis del siglo III d.C. del Imperio romano se suprimió la financiación al Museo, además de sufrir numerosos saqueos. Hasta que, a finales de este siglo, la Gran Biblioteca de Alejandría no era más que un dulce recuerdo.

Sin embargo, varios historiadores afirman que Teón de Alejandría (335 - 405) fue bibliotecario de la biblioteca hija del Serapeo y que, por tanto, esta seguía en pie en el siglo IV. Teón era un filósofo de la escuela neoplatonista, astrofísico y matemático. También fue un padre peculiar, pues sumergió a su hija Hipatia (360 - 415) desde pequeña en la ciencia y le enseñó todo lo que estaba a su alcance.

Hipatia pronto se convirtió en una mujer excepcional, con una vasta cultura, un dominio de las matemáticas brillante y una personalidad fuerte. Es difícil catalogar a Hipatia en una escuela filosófica, religión o movimiento, pues se cree que era una persona muy crítica y como tal, no comulgaba completamente con ningún movimiento. Aunque tuvo una fuerte influencia del neoplatonismo por su padre.

Este movimiento del helenismo tardío revivió y replanteó la filosofía de Platón. Se basa en una teoría unificadora y mística en la que todo emana de una única realidad suprema; tanto la inteligencia, como el alma y la materia. Esta teoría fue bien acogida por el cristianismo –religión oficial del Imperio romano desde el 380– ya que identificaban a ese origen de todo como Dios. Hipatia tuvo discípulos tanto paganos como cristianos, y varios de ellos llegaron a alcanzar altos cargos en el gobierno y en la Iglesia.

Hipatia llegó a convertirse en una figura altamente valorada en Alejandría y con gran influencia en las altas esferas de la ciudad. El patriarca Cirilo, que era el máximo exponente de la Iglesia cristiana en Alejandría, endureció la persecución a otras religiones y al paganismo. La ciudad quedó entonces dividida y sufría continuas trifulcas entre sus habitantes y frecuentes ataques a los templos paganos como el Serapeo, que fue finalmente destruido en el año 391. Orestes, prefecto de la ciudad, amigo y discípulo de Hipatia, se bautizó y aconsejó a esta que también lo hiciera, pero ella, fiel a sus principios, se negó.

Se forjó una fuerte enemistad entre Cirilo y Orestes. Este último llegó a contactar al emperador Teodosio II denunciando al patriarca por sus persecuciones y actos. Un grupo de unos 500 monjes del desierto de Nitria llegó entonces a Alejandría para apoyar a Cirilo. Poco después, Orestes sufrió un ataque por parte de uno de estos monjes, un tal Amonio, que fue posteriormente encarcelado y asesinado. A lo que Cirilo respondió recogiendo su cadáver, enterrándolo en una iglesia e



*Fotografía de las ruinas del Serapeo.
(Tomada por Daniel Mayer, licencia:
<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)*

intentando proclamarlo mártir. Pero tanto la autoridad local como parte de la comunidad cristiana se opuso y aumentó la tensión en la ciudad.

Aunque entre los cristianos más radicales creció la idea de que la enemistad entre Cirilo y Orestes era causa de la filósofa Hipatia, ya que el prefecto contaba frecuentemente con su opinión y consejo. Un fatídico día de marzo del año 415, Hipatia fue atacada mientras volvía a casa por una turba violenta de cristianos. La sacaron del carruaje donde viajaba, la golpearon y arrastraron por las calles hasta llegar a la catedral de la ciudad. Allí la desnudaron, apalearon hasta la muerte y descuartizaron su cuerpo con conchas marinas. Este brutal asesinato supuso al patriarcado alejandrino una pérdida de influencia política importante. Aunque a Cirilo sólo le fue retirada la guardia de los 500 monjes por su posible implicación y, tras su muerte, fue proclamado Doctor de la Iglesia y santo.

Toda la información que nos llega de Hipatia, al igual que de otros filósofos de la época, es por medio de las obras que se conservan de ellos y de las cartas que escribían sus discípulos. De esta forma, los datos históricos se nos presentan con un revestimiento de subjetivismo e interpretación. Por ejemplo, ni siquiera sabemos con certeza dónde se hallaba la Gran Biblioteca de Alejandría.

En el capítulo 13 de la serie Cosmos, Carl Sagan nos relata esta historia de una forma contundente y lanzando una fuerte crítica a aquellos ambiciosos e ignorantes que han destruido tanto conocimiento a lo largo de la historia, apelando a los espectadores que no se vuelva a repetir. No obstante, algunos de los datos que se proporcionan son un tanto controvertidos y en los que no se llega a ningún consenso, como en el número de manuscritos almacenados en la Biblioteca, donde las cifras varían entre treinta mil y medio millón.

Sea lo que fuere, se destruyeron grandes obras de escritores, artistas y científicos causando una fuerte ralentización en el avance del conocimiento. Pero no creamos que esto forma parte del pasado, no. Movimientos actuales religiosos, sociales y políticos anulan el pensamiento crítico de muchas personas que, con el fin de apoyar un fin o causa, se convierten en un mero eco.

*“Defiende tu derecho a pensar,
porque incluso pensar de manera errónea es mejor que no pensar”*

Hipatia de Alejandría.

Pilar Sánchez Sánchez-Pastor.

Doctora en Ciencias de la Tierra.

Swiss Seismological Service, ETH Zürich.

13.2

¿Pero quién habla en nombre del Universo?

Este capítulo no fue en absoluto mi favorito al verlo por primera vez en los años ochenta. No estaba preparado para entender las profundas reflexiones que la serie compartía. Hoy día, sin embargo, me parece que mantiene plenamente su vigencia.

El capítulo comienza realizando un perfil de la condición humana: la creación y la destrucción son inherentes a todos los actos del hombre. ¡Los encuentros entre sociedades nunca fueron fáciles! Nuestra existencia está llena de culturas aniquiladas a manos de otras.

Y es que, nuestra naturaleza territorial ha tenido siempre dos caras opuestas. Esta actitud defensiva nace de nuestra organización como seres sociales. Mientras nos ha permitido construir una identidad que trasciende al individuo y conforma una sociedad, en el otro extremo se encuentra la esencia atávica de la misma: un instinto agresivo y violento ante lo extraño que está presente en todos los animales sociales que pueblan nuestro planeta. Todas y cada una de las guerras y conflictos desencadenados en este rincón del universo han estado, de una u otra manera, dominadas por la territorialidad. Y para colmo, nos recordaba Sagan, que no por ser la civilización con mejores conocimientos estamos en mejor situación para sobrevivir. Los hechos que llevaron a la destrucción de la biblioteca de Alejandría son un ejemplo.

Sagan compartía una visión de nuestro mundo destruido por las armas nucleares, muy en el contexto de la Guerra Fría. Fruto de dos formas distintas de entender la sociedad, representadas por los Estados Unidos y la extinta Unión Soviética. Por suerte, aquella visión no se ha llegado a cumplir y las probabilidades de vernos perecer bajo el fuego nuclear se encuentran bajo mínimos.

Pero la cuenta atrás para la extinción de la humanidad no se detuvo tras la caída de la URSS, es más, se ha acelerado. Nuestro poder bélico de aniquilación no era nuestra 'espada de Damocles'. Nuestro comportamiento como sociedad, en pleno siglo XXI, hace insostenible nuestra existencia y nos aboca a una catástrofe más lenta, gradual, pero con un inexorable desenlace.

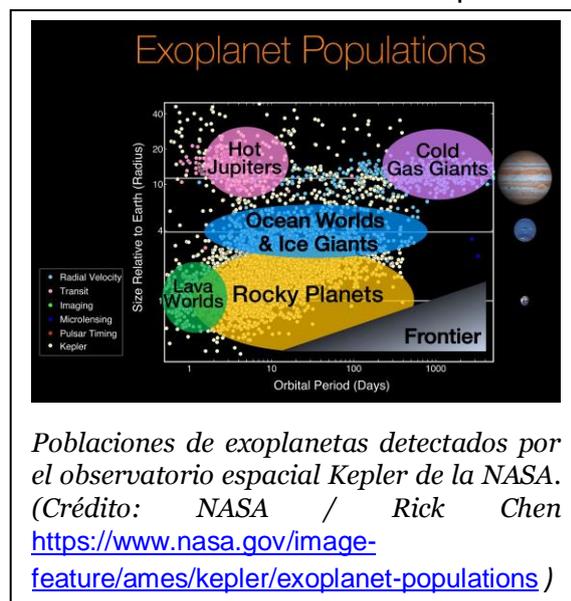
El crecimiento demográfico de la humanidad requiere de recursos que nuestro planeta es incapaz de aportar. Por tanto, la expansión humana en nuestro mundo se hace a costa de degradar el medio ambiente, de la explotación tanto de recursos limitados como de seres humanos a manos de otros. La esclavitud, que había sido casi erradicada en el siglo XX como celebraba Sagan, ha renacido bajo el paraguas de una globalización mal entendida, donde han primado los índices de crecimiento económico sobre los de desarrollo humano.

¡Había mucho más que temer, Carl! Como en casi todas las catástrofes ocurridas a lo largo de la historia, se trata de la suma de diversos factores, cada uno incapaz de producir daño suficiente por sí mismo pero que al acumularse dan lugar a auténticos desastres. En estos momentos, se da la conjunción de un sinfín de factores como para aventurar que la humanidad se encuentra en un serio riesgo para su supervivencia. La visión de Sagan era la correcta, aunque no las causas.

Echemos ahora la vista arriba. En términos de conocimiento del universo, muchas cosas han cambiado desde la primera emisión de Cosmos, no obstante, seguimos sin conocer otra civilización inteligente aparte de la humana.

En aquel capítulo 13 Sagan visitaba diferentes mundos. ¿Cómo imaginaríamos esos mundos con el conocimiento que tenemos hoy en día de planetas extrasolares? A mediados de los 90 se encontraron los primeros planetas fuera del sistema solar, y desde entonces el número no ha dejado de crecer. Sólo el observatorio espacial Kepler de la NASA añadió 2600 mundos más [1].

La imagen que se nos muestra de estos mundos es muy distinta a la imagen de nuestro sistema solar y nos han ayudado a entender que el nuestro quizá no es un sistema planetario tan común como pudiéramos pensar. Si los datos son ciertos, abundan los Júpiter calientes, planetas gaseosos con órbitas muy cercanas a su estrella (años que duran horas), también Supertierras, con base rocosa y con masas varias veces superiores a la de la Tierra. Hay planetas como la Tierra en zonas de habitabilidad, pero ni son tantos como imaginábamos, ni esta condición es garantía de un lugar con vida. Particularidades de sus estrellas y órbitas pueden hacer estériles sus superficies.



Antes de descubrir estos mundos teníamos descartada la posibilidad de encontrar civilizaciones en determinados sistemas estelares. Por ejemplo, nadie fijaría su atención en las estrellas gigantes y supergigantes por su corta vida, de pocos millones de años. Si hubiera que apostar, muchos lo hubieran hecho por las estrellas enanas rojas [2]. Son las más abundantes en el Universo y su existencia puede prolongarse cientos de miles de millones de años, con planetas rocosos que pueden permanecer a corta distancia de su estrella y al mismo tiempo estar en zona de habitabilidad. Sin embargo, la ciencia ha descubierto que todas las estrellas pasan por un periodo de variabilidad donde las fulguraciones de la estrella pueden causar daño a los planetas que las orbitan. En el caso de las enanas rojas este periodo es extremadamente largo y provocaría que los planetas que pudieran albergar vida estén expuestos a radiación que los esterilizaría, convirtiéndolos en eriales.

Entonces, ¿dónde debemos buscar vida inteligente? La respuesta no es fácil. Las generaciones de estrellas se clasifican en lo que denominamos poblaciones. Las estrellas de Población I, a la que pertenece el sol, se sitúan habitualmente en las zonas más alejadas del centro de las galaxias. Es la generación más reciente de estrellas, de relativa nueva hornada. Cuentan en abundancia con elementos químicos distintos del hidrógeno y el helio, (lo que se denomina metalicidad). Las estrellas de Población II se sitúan en los núcleos galácticos, con apenas elementos químicos distintos del hidrógeno y el helio y son con diferencia más viejas; por lo que las posibilidades de existencia de planetas rocosos en ellas caen drásticamente. Hay una Población III mucho más antigua de la que no hay evidencias, pero si indicios, que sería la primera generación de estrellas conocidas, en los albores del universo. Nos quedamos pues con estrellas de Población I como candidatas a albergar planetas rocosos. De hecho, por duración necesaria para la evolución y estabilidad en su aporte energético son enanas naranjas y amarillas (como nuestro sol) de Población I las mejores candidatas.

¿Y cómo ha de ser un planeta donde surja una civilización? Al menos lo suficientemente grande como para desarrollar atmósfera, pero sin llegar a ser supertierras, donde los modelos apuntan a mundos oceánicos sin una superficie donde desarrollar tecnología, o supertierras con atmósferas densas que impedirían a una posible civilización conocer la existencia de un universo fuera de ella y mucho menos salir de él debido a la fuerte gravedad. Tampoco nos detendremos en supertierras rocosas y sin atmósfera. Para más complicación, nuestra observación de exoplanetas nos señala que los planetas del tipo Júpiter, en estrellas como la nuestra, tienden a migrar al interior del sistema planetario, destrozando cualquier planeta rocoso que encuentren a su paso, como bolas de demolición. En nuestro sistema solar, la aparición de un planeta como Saturno situado a la distancia exacta para entrar en resonancia con Júpiter evitó que éste arrasara con el Sistema Solar interior [3].

La ecuación de Drake, que nos hacía soñar con innumerables civilizaciones inteligentes, se diluye ante nuestros nuevos conocimientos. El Universo que hoy conocemos reúne las condiciones para la vida por doquier, sin embargo, es un universo restrictivo para que la evolución de ésta permita la aparición de civilizaciones.

Volvamos a la Tierra, donde la vida apareció muy pronto, pero la evolución se tomó las cosas con cierta calma. Durante 4.000 millones de años la vida se extendió y hubo evolución, aunque muy lenta. No fue hasta la explosión cámbrica hace algo más de 500 millones de años que surgieron organismos complejos, de los cuales han surgido la mayoría de las ramificaciones del árbol de la vida. En nuestro mundo se dieron las condiciones para la aparición de la vida, lo que se produjo y llevó como consecuencia a la existencia de la civilización humana. Sin embargo, correlación no implica causalidad. Olvidamos que, por el camino, han quedado extinguidas ramas enteras de ese árbol de la vida, o árboles de la vida distintos como la biota de Ediacara, anterior a la explosión cámbrica. Todas las especies desaparecidas a lo largo de las grandes extinciones conocidas nos recuerdan que el éxito de la vida ni está asegurado ni conduce a civilización alguna. Así pues, debemos desterrar este sesgo de supervivencia.

Tras muchos años escudriñando el cielo en búsqueda de compañeros de existencia, sin haber obtenido pruebas convincentes de ello, conviene que reflexionemos sobre el valor de la humanidad, por ser la única especie inteligente conocida. Tenemos el deber de sobrevivir, no solo nos lo debemos a nosotros mismos, sino al Universo entero. Hay cierta posibilidad que seamos una de las primeras manifestaciones de un universo observándose y entendiéndose a sí mismo. Y configura la pregunta que hizo Sagan de una manera totalmente distinta:

¿Quién habla en nombre del Universo?

Referencias:

[1] NASA Retires the Kepler Space Telescope <https://www.nasa.gov/press-release/nasa-retires-kepler-space-telescope-passes-planet-hunting-torch>

[2] Schirber, Michael «Can Life Thrive Around a Red Dwarf Star?» <https://www.space.com/6560-life-thrive-red-dwarf-star.html>

[3] F. S. Masset, J. C. B. Papaloizou "Runaway Migration and the Formation of Hot Jupiters" <https://iopscience.iop.org/article/10.1086/373892>

Fernando Ortuño Guerrero.

Graduado Universitario.

Responsable de Proyectos de Investigación Aeroespacial.
Presidente de la Asociación de Divulgación Científica de la Región de Murcia.

Apéndice 1

La reducción al absurdo y la raíz cuadrada de dos.

14.1

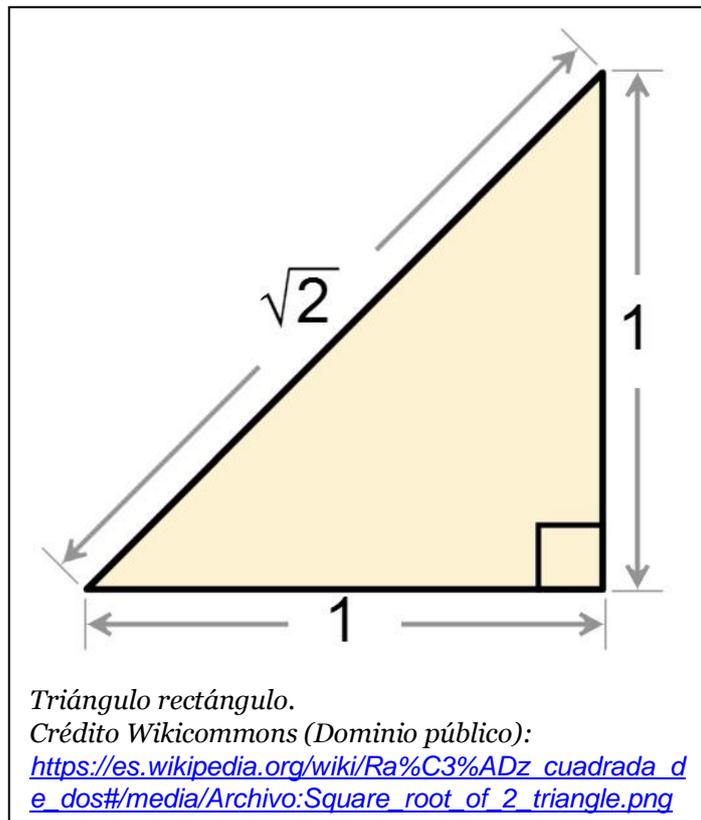
Saber perder en ciencia: cuando no te gusta el resultado.

En el primer apéndice del volumen original de "Cosmos", Carl Sagan habla sobre la raíz cuadrada de 2 ($\sqrt{2}$), la cual tiene como resultado un número irracional, es decir, que no se puede expresar como una fracción entre dos números enteros. Fueron los pitagóricos los primeros que descubrieron que $\sqrt{2}$ era un número irracional, mediante un argumento geométrico. Dicho argumento estaba basado en una reducción al absurdo, que, como explica el propio Carl Sagan, es una forma de razonamiento en la cual inicialmente asumimos como cierta una afirmación, seguimos paso por paso sus consecuencias, y al final llegamos a una contradicción, demostrando de este modo la falsedad de dicha afirmación. En este caso, Carl Sagan utiliza también la reducción al absurdo, aunque esta vez desde el punto de vista aritmético, para llegar a la misma conclusión que los pitagóricos. Sin embargo, nosotros emplearemos este apéndice como punto de partida para algo ligeramente distinto.

Para entender un descubrimiento científico, a veces hay que comprender qué buscaban sus descubridores. Partamos pues de los pitagóricos, y en concreto de Pitágoras de Samos, una figura cuya vida estuvo envuelta en la leyenda, a la cual contribuyó la fundación de su propia escuela de pensamiento. Dicen que tras el encuentro con un anciano Tales de Mileto, un Pitágoras que ya era discípulo del famoso Anaximandro se dedicó a viajar: habría llegado como prisionero de guerra a Babilonia, habría recalado en la India, y es más factible la noticia de su visita a Egipto. Las pocas y poco fiables fuentes que poseemos dicen que, en todos esos países, Pitágoras contactó con magos y sacerdotes para imbuirse de sus conocimientos, y en lo que coinciden dichos textos es en que más tarde partió hacia Crotona, Italia, donde creó su escuela. Si hasta ahora la vida de Pitágoras nos ha parecido sorprendente, más extravagante nos resultará la forma en que se dice que él y sus discípulos convivían: eran vegetarianos, se negaban a vestir pieles de animal, divagaban en el mundo de la meditación y buscaban vivir en un perenne universo de pureza. La tradición ha atribuido a la escuela pitagórica un carácter netamente matemático, y es cierto que realizaron grandes contribuciones a dicho campo (aunque resulte difícil determinar qué logros pertenecen a Pitágoras, y cuáles a los miembros de su escuela, pues todos los descubrimientos se atribuían por defecto al primero), entre otros el teorema

sobre el triángulo rectángulo que lleva el nombre del maestro. Sin embargo, la escuela de Pitágoras abarcaba mucho más: puede parecer un reduccionismo simplificarlos como matemáticos, pero sin duda ellos hubieran estado de acuerdo porque, para sus integrantes, el universo podía descomponerse en cifras. A partir de allí radiaban el resto de sus ideas, más vinculadas a la religión y la metafísica: la inmortalidad del alma; su concepción general de un universo ilimitado; la relación profunda que subyacía a la astronomía, la música y la medicina, que no era otra que una concordia mística que se articulaba alrededor de las matemáticas y de sus representantes más perfectos, los números. La perfección de esta serie de abstracciones los embriagó, y de ahí que el descubrimiento de $\sqrt{2}$, y todo lo que conlleva, supusiera un doble mal trago.

Entrando ya en el responsable directo de tan endiablado entuerto, las cuestiones relativas a $\sqrt{2}$ fueron exploradas por el pitagórico Hípaso de Metaponto, entre otras cosas profesor de Heráclito, y a quien se le atribuye también el descubrimiento de la relación entre el grosor de discos de bronce y el sonido que éstos producen al golpearlos (idea que se relaciona con el conocimiento pitagórico de que la longitud de las cuerdas de un instrumento musical determina su sonido, y que entronca con la teoría de la escuela acerca de la armonía de las esferas celestes). El caso es



que Hípaso, aun perteneciendo a la escuela pitagórica, era el líder de los acusmáticos, una sección de la secta que, pese a formar parte de la misma, no tenía la misma categoría que los "matemáticos", los cuales se hallaban bajo la supervisión directa de Pitágoras y conocían la doctrina en su totalidad, privilegio con el que no contaban los seguidores de Hípaso: aquello constituiría un primer y desafortunado desencuentro. El descubrimiento de los números irracionales fue producto, según se dice, de la casualidad: el resultado de dicha raíz se llevaba buscando bastante tiempo, pues constituye la medida de la diagonal de un cuadrado cuyo lado tuviera una longitud de 1 y, créamoslo no, su valor tiene unas cuantas aplicaciones prácticas. Hípaso empleó la geometría

para expandir los límites del saber hasta llegar una conclusión que a todos dejó traumatizados: $\sqrt{2}$ tenía que ser, necesariamente, un número irracional. El sueño que los pitagóricos habían vivido era tan plácido, que el despertar trocó, de manera ineludible, en amarga pesadilla.

Pero, ¿qué demonios les importaba a los pitagóricos que $\sqrt{2}$ no pudiera expresarse como la fracción de dos números enteros, y que en concreto correspondiera a un valor aproximado de 1,4 (Pitágoras, perdónanos si nos lees ahora mismo)? Pues que, obviamente, para gente obsesionada con la perfección, con la hermosura de las matemáticas, con la armonía de los planetas, las verdades tenían que ser expresadas mediante números perfectos, tales como los enteros, o al menos como fracciones de los mismos. Pero, ¿una cifra seguida por una lista de decimales que no termina nunca (los filósofos helénicos ni siquiera llegaron a ver eso; los números griegos no operaban con esas herramientas)? ¿Qué clase de aberración era ésa? Por eso, el resultado obtenido por Hípaso les incomodó. Dicen que Pitágoras se negaba a que le hablaran de los irracionales. Durante años, los pitagóricos obviaron la cuestión disfrazando $\sqrt{2}$ como si se tratara de un número entero en sí mismo. En todo caso, impusieron un absoluto secreto: la existencia de los números irracionales no debía salir nunca a la luz. Hípaso incumplió esa regla, y como castigo, cuenta el mito, fue asesinado.

Aunque, como tantas otras cosas alrededor de los pitagóricos, no hemos de fiarnos de las leyendas. Desde luego, hay rumores sobre que Hípaso fue expulsado de la orden, y también sobre que falleció en un naufragio en extrañas circunstancias, en las que se ha querido ver la oscura sombra del suicidio, o tal vez la mano negra de los miembros de la escuela, que lo habrían empujado al mar. Una versión más delirante nos dibuja al propio Pitágoras arrojándole del barco, doblemente avergonzado no solo por haber sido incapaz de rebatir el descubrimiento de Hípaso, sino también porque la infausta verdad procedía del líder de una rama de la escuela considerada inferior, para más inri la némesis natural de Pitágoras, al constituir la única figura en Crotona que podía hacerle sombra. Especulaciones aparte, lo cierto es que el supuesto secreto se rompió y hoy sabemos que existen los números irracionales: de hecho, varios de ellos (como π , o el número *phi*, también conocido como "la proporción áurea") han resultado de gran importancia para la comprensión de las proporciones tanto en el interior de los seres vivos como de los cuerpos geométricos. Una conclusión que, sin embargo, a Pitágoras no le hubiera satisfecho en absoluto.

Ahora vamos a avanzar unos cuantos siglos, hasta llegar a un nuevo (aunque no demasiado diferente) tipo de polémica. A lo largo de la década de 1920, Albert Einstein y Niels Bohr se embarcaron en un debate que redefinió los términos de la física. Einstein había elaborado, poco tiempo antes, su Teoría de la Relatividad, basada en concepciones sumamente teóricas y abstractas y que a pesar de ello explicaba buena parte del funcionamiento real del universo, como si hubiera sido propuesta por los antiguos pitagóricos en un

arrebatado de inspiración. Este "conejo sacado de la chistera" sigue aun resistiendo la mayor parte de los ensayos experimentales que han osado tratar de refutarlo, manteniéndose firme de un reto a otro. No obstante, Niels Bohr (el hombre que había creado una versión del átomo que superaba a la de su maestro Ernest Rutherford) dijo una vez una frase que Carl Sagan intenta reducir al absurdo en el ya mentado apéndice 1: "Lo contrario de cualquier gran idea es otra gran idea". En este caso, la afirmación revela ser cierta, pues el paradigma opuesto que surge ante los axiomas de la relatividad es la teoría cuántica, sustentada en inicio por los descubrimientos de Max Planck y que propone una visión radicalmente diferente de la física, basada en probabilidades y en cuánto somos (y, sobre todo, no somos) capaces de medir. Einstein siempre rechazó aquella teoría -lo cual decepcionó a sus creadores, que se habían sentido en parte inspirados por él-, y convirtió la cuestión cuántica en el punto central de las intensas disquisiciones que mantuvo con Bohr, en las que se llevó al extremo las posibilidades de la discusión científica. Famosa es la sentencia de Einstein de "Dios no juega a los dados con el universo", pero no menos impactante fue la serie de acontecimientos que se inició cuando Einstein trató de reducir al absurdo la teoría cuántica al apuntar a que, de acuerdo la misma, dos partículas que hubieran entrado una vez en contacto nunca llegarían a estar del todo desconectadas. Para su incredulidad, los discípulos de la teoría cuántica analizaron aquella supuesta idiotez y descubrieron -también para su propia sorpresa- que era cierta, poniendo patas arriba los cimientos de todo su sistema de conocimiento, una vez más. Hoy en día, la contraposición entre teoría de la relatividad y teoría cuántica sigue adelante: la relatividad es capaz de explicar a la perfección lo que ocurre con las grandes masas (como una renovada revisión de la armonía de las esferas), mientras que la teoría cuántica describe con certeza matemática lo que sucede a nivel subatómico; sin embargo, las dos visiones no son capaces de ponerse de acuerdo. Mientras tanto, algunos ansían y ponen su empeño en una Teoría Unificada que exponga con sencillez las leyes básicas del universo, a partir de las cuales las distintas fuerzas fundamentales se deduzcan de manera elemental. Hoy día, no obstante, el final de la búsqueda de esa teoría absoluta a la que la física aspira, como a un unicornio dorado, o una suerte de científico Santo Grial, sigue sin vislumbrarse.

Einstein se hallaba disgustado con la teoría cuántica porque, como fiel determinista, se sentía incómodo con unas premisas que otorgaban tanta relevancia a la probabilidad y a las cuantificaciones medidas por el observador. Sin embargo, él no llegó tan lejos, como Pitágoras, como para tratar de prohibir su divulgación. De todos modos, no sería la primera vez, ni tampoco la última, en que la oposición de científicos más veteranos impide a una teoría joven y bisoña salir adelante. Un reciente estudio, incluso, ha llegado a proclamar que ciertas áreas de la ciencia sienten un reverdecimiento al fallecer científicos prominentes en dicho campo, como si la presencia de estas colosales figuras taponara el talento de poco reconocidos científicos que se atreven a oponerse a los dogmas aceptados de manera unánime. Max Planck, el padre de la teoría

cuántica (aunque al primero que le desconcertó fue a él mismo) declaró: "Las nuevas ideas avanzan en ciencia no porque sean ciertas, sino porque sus enemigos fallecen". Quizás el mejor ejemplo lo encontremos también en el campo de la física con otro debate, el que tuvo lugar entre Rutherford y Lord Kelvin. Este último había hecho grandes contribuciones a la ciencia, pero contaba ya una avanzada edad y, desde su cátedra, se negaba a reconocer los datos que señalaban a que la antigüedad de la Tierra era en realidad mucho mayor que la que él mismo había propuesto (por debajo de veinte millones de años). Por eso, cuando un imberbe Rutherford se plantó en una de las reales instituciones británicas, delante de un auditorio de 800 personas, para exponer cómo el fenómeno de la radiactividad apoyaba la noción de una edad del planeta Tierra de varios cientos de millones de años, su única preocupación era lo que diría Lord Kelvin al respecto. El crucial acontecimiento se desarrolló en varias fases: lo primero de todo, durante la disertación, el venerable hombre que emanaba autoridad desde su atalaya se quedó dormido. Más tarde, parece que se despertó y colocó una sonrisa beatífica -producto de la digestión de una buena siesta-, momento en que Rutherford encontró la clave para convencer al eminente pope: citó en voz alta una antigua frase del maestro en la que expresaba que la edad de la Tierra debía de ser de unos pocos millones de años, mientras no se descubriera una nueva fuente de calor que explicara los resultados obtenidos. Rutherford proclamaba, pues, que Lord Kelvin habría sido el primero anticipar la existencia de esa nueva fuente de calor (que no sería otra que la radioactividad) y que, por tanto, era co-partícipe del reciente descubrimiento. Era un intento descarado de halagar la vanidad del anciano pero, como suele ocurrir en estos casos, la cuestión es que funcionó, y Lord Kelvin expresó un asentimiento complaciente. El obstáculo había sido salvado, y no por la fuerza la razón y la forma de comportarse de los hechos, como dicta la ciencia, sino empleando la psicología y la forma de comportarse los científicos, como dictan las relaciones personales. La ciencia, después de todo, tiene sus defectos, y éstos, como los inherentes a casi toda actividad humana, provienen fundamentalmente que quienes la hacemos consistimos en seres humanos también.

En este caso, hemos hablado de nuevos hallazgos pero, quizás, lo mejor que puede aportar el futuro, por parte de las generaciones venideras, es una perspectiva inédita. Al respecto, el mejor ejemplo que podemos aportar es una anécdota que se atribuye a numerosas parejas de aprendiz-maestro, entre ellas la más conocida de Niels Bohr y Ernest Rutherford. Rutherford habría preguntado, en un examen, cómo determinar la altura de un edificio a partir de un barómetro. Según la leyenda, Bohr habría elaborado varias decenas de respuestas (que no podemos reproducir por falta de espacio; una de ellas consistía en regalar el barómetro al portero a cambio de la información), todas ellas correctas, pero ninguna de ellas coincidente con la solución canónica. De acuerdo a la historia, Rutherford le habría reprochado: "Usted sabe que ésa no es la respuesta que estoy buscando", a lo que Bohr le habría contrapuesto: "Quizás entonces debería reformular la pregunta". A veces el mejor favor que le

podemos hacer a la ciencia es replantear las viejas cuestiones, para que las respuestas no se vuelvan caducas desde antes de empezar. Es la única manera de agitar el árbol de Newton para que, con suerte, el fruto que caiga sea uno más sabroso. O, al menos, uno distinto a una manzana.

En parte, la ciencia (como cualquier otro campo) consiste en eso: gente que llega con conceptos nuevos los cuales, a las pretéritas generaciones, se les antojan irreverentes, ofensivos, hasta cabría decirse que irracionales. Pero que encajan mejor con una forma de ver el mundo que deriva de cómo funciona éste, o de tal vez de cómo funcionamos nosotros. Los científicos, mientras tanto, van y vienen; hoy los defensores de la teoría cuántica y los relativistas siguen espíandose de reajo, mientras que los pitagóricos fueron expulsados de Crotona por culpa de los vaivenes que tuvieron lugar tras meterse en el poco racional ámbito de la política. La ciencia, sin embargo, y las aportaciones de unos y otros, se deposita en el sedimento que va asentando en el ser humano, donde los episodios biográficos y las disputas entre científicos se soslayan para dar lugar a lo que de una manera muy cauta podemos denominar "la verdad"; por muy imperfecta, incompleta y desafiante que ésta resulte. Incluso aunque tenga que pasar por un par de reducciones al absurdo para probarse. Al fin y al cabo, la cualidad principal de un científico es la curiosidad, y ésta debe hallarse siempre dispuesta a darle la oportunidad de sorprenderse. Carl Sagan lo sabía, y nos transmitió parte de su alegría al quedar impresionado con los portentos del universo. Él nos concedió ese regalo, y el mejor apéndice u homenaje que nuestra generación puede hacerle a "Cosmos", ese legado único, es –desde una óptica distinta- seguir impactándonos. Maravillándonos, si es preciso, ante la perfección de la imperfección.

Emilio Tejera Puente.

Doctor en Bioquímica, Biología Molecular y Biomedicina.
Instituto Cajal (CSIC), Madrid.

Apéndice 2

Los cinco sólidos pitagóricos

14.2

La forma del mundo.

Un “sólido platónico” es un poliedro regular convexo (Figura 1). Esto significa que sus caras son polígonos regulares iguales y que en todos los vértices el número de caras incidentes es el mismo. Además, se cumple la conocida fórmula de Euler:

$$V - A + C = 2, \quad (\text{Ecuación 1})$$

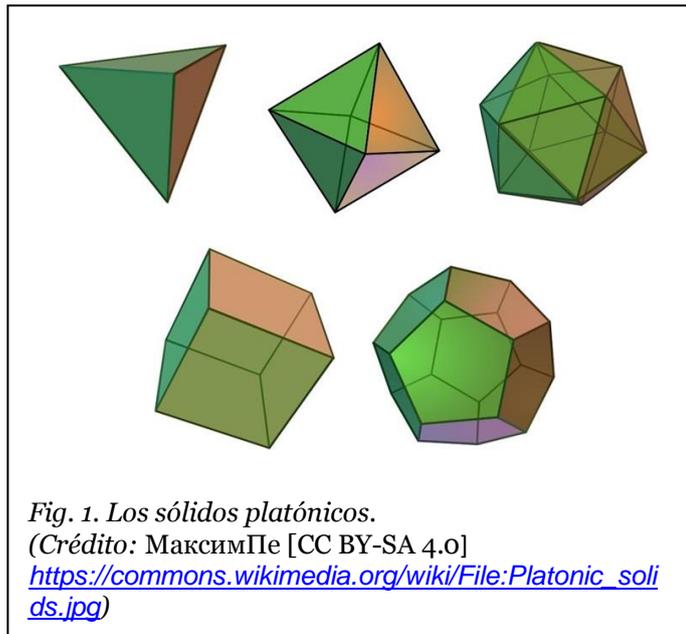
donde V es el número de vértices, A el número de aristas y C el número de caras.

En tres de los sólidos las caras son triángulos equiláteros:

- el *tetraedro*, con $V = 4$, $A = 6$, $C = 4$,
- el *octaedro*: $V = 6$, $A = 12$, $C = 8$,
- el *icosaedro*: $V = 12$, $A = 30$, $C = 20$;

en el *cubo* o *hexaedro*, las caras son cuadrados, $V=8$, $A=12$, $C=6$; y en el *dodecaedro* las caras son pentágonos regulares, $V = 20$, $A = 30$, $C = 12$.

Estos sólidos, que Sagan llama “pitagóricos”, se conocen desde hace miles de años. Para Platón (427 a. C.-347 a. C.) representaban los componentes elementales del mundo, respectivamente: el fuego, el aire, el agua, la tierra y la forma del universo. La belleza extraordinaria de estos cuerpos radica en su simetría, especular y rotacional, que ha atraído el interés de muchos artistas a lo largo de la historia. Sus formas también aparecen en la Naturaleza: hay minerales que cristalizan en forma de poliedro, como la *pirita* de la Figura 2, y es posible que la observación de estos cristales esté en el origen de las ideas de Platón. También aparecen en la disposición



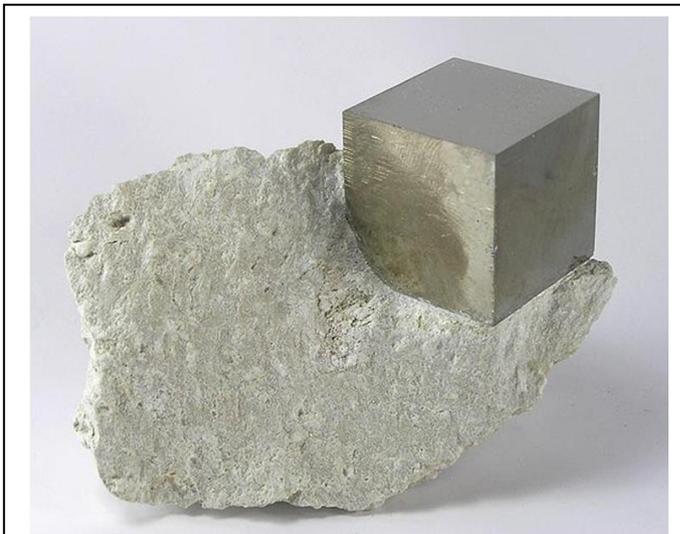


Figura 2. Cristal de pirita.
 (Crédito: RobLavinsky, iRocks.com [CC-BY-SA-3.0]
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pyrite-135018.jpg>)

de los átomos de ciertas moléculas [1], en los esqueletos de radiolarios [2] y en la cápside de algunos virus [3].

Solo existen cinco sólidos platónicos. Una demostración ya aparece en los *Elementos* de Euclides (325 a. C.-265 a. C.). Aquí, en vez de la prueba algebraica que se daba en el libro original de Sagan, haremos otra, basada en el hecho de que, en cada vértice, la suma de los ángulos internos de las caras incidentes tiene que ser inferior a 360° .

En un polígono regular de n lados, cada ángulo interno mide

$$a = 180^\circ - 360^\circ/n,$$

en un poliedro, si r es el número de aristas (y también de caras) que inciden en un vértice, tenemos

$$r \cdot a < 360^\circ,$$

como podemos comprobar si imaginamos que aplastamos el vértice y abrimos las caras hasta ponerlas en un mismo plano. Como n no puede ser inferior a 3, vemos que:

- para $n = 3$ tenemos $r \cdot 60 < 360$, con lo que $r = 3, 4, 5$;
- para $n = 4$ es $r \cdot 90 < 360$, luego $r = 3$;
- para $n = 5$ es $r \cdot 108 < 360$, de donde $r = 3$,
- y para n superior no sirve ningún r , ya que r no puede valer menos que 3.

Por otro lado, como cada arista está bordeada por dos caras, al contar el número de aristas tendremos $n \cdot C = 2A$; y como cada arista tiene dos vértices, será $r \cdot V = 2A$. Si usamos estas fórmulas, la Ecuación 1 se convierte en

$$1/r + 1/n = 1/A + 1/2,$$

que nos da, en cada caso, el valor correcto de A , y a partir de ahí los de V y C . Con esto queda probado que no hay más poliedros regulares.

En Matemáticas, estos poliedros están relacionados con la teoría de grupos, por sus simetrías; con la teoría de grafos, ya que se obtiene un grafo proyectando sus aristas sobre el plano de una de sus caras; y, sobre todo, con la Topología, pues la comprensión profunda de la Ecuación 1 llevó a Poincaré (1854-1912) al impulso de esta nueva especialidad, cuando introdujo las nociones de *homotopía* y *homología*.

La Ecuación 1 se cumple también para los poliedros *semi-regulares*, por ejemplo los sólidos platónicos con las esquinas truncadas (Figura 4), ya estudiados por Arquímedes (287 a. C.-212 a. C.); y para los *prismas* y *antiprismas*, donde las caras son polígonos regulares, pero de dos tipos diferentes.

También se cumple para algunos poliedros regulares no convexos, como el poliedro *estrellado*, de la Figura 3, que es una ilustración de Leonardo da Vinci (1452-1519) para el libro *Divina propotione*, de Luca Pacioli (1445–1517). Este poliedro es una "estelación" del *icosidodecaedro* y tiene $V = 62$, $A = 180$ y $C = 120$ triángulos.

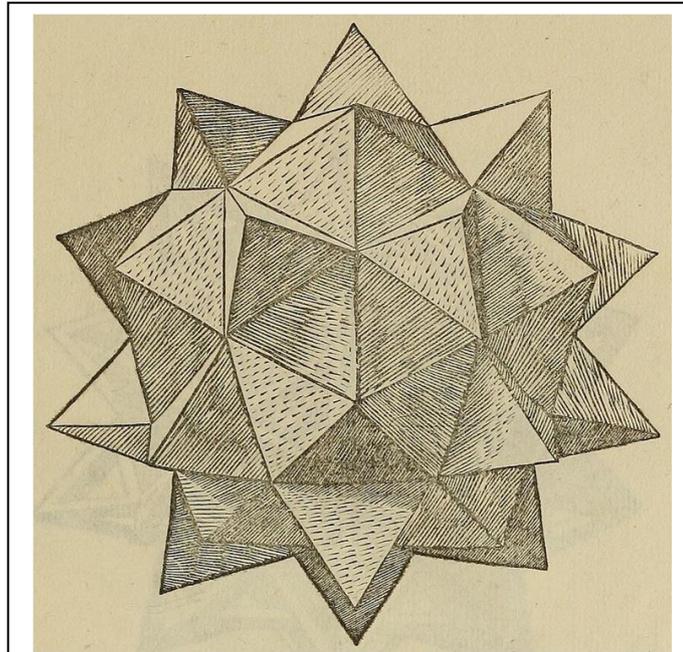


Fig. 3. Poliedro estrellado.
(Crédito: Leonardo da Vinci [Public domain]
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:De_divina_propotione_-_Dodecaedron_Abscisum_Elevatum_Solidum.jpg)

Desde el punto de vista topológico, lo esencial de un poliedro es que sus caras forman una superficie cerrada, es decir, limitada y sin borde. Las aristas son así líneas dibujadas en la superficie, que se cortan en los vértices. En la parte derecha de la Figura 4 queda claro que un poliedro es, esencialmente, una esfera, con una cierta descomposición de su superficie en regiones. Como veremos a continuación, esta idea es crucial para la demostración de la Ecuación 1.

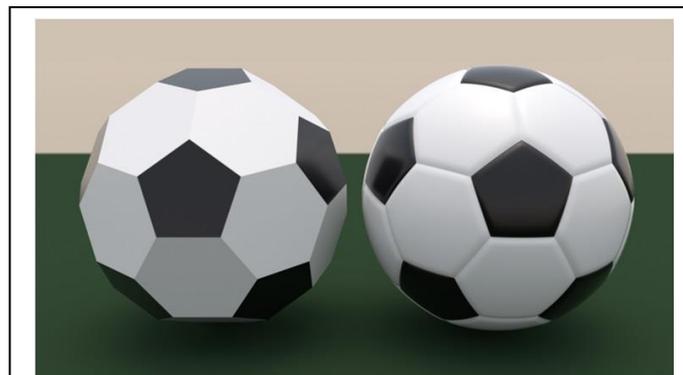


Fig. 4. Icosaedro truncado
(Crédito: AaronRotenberg [CC BY-SA 4.0]
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Comparison_of_truncated_icosahedron_and_soccer_ball.png)

Esta ecuación, enunciada por Euler (1707-1783) [4], tiene muchas demostraciones diferentes. Coxeter (1907-2003) dio en [5] la siguiente: recorramos las aristas del poliedro de modo que pasemos una sola vez por cada uno de los V vértices. De este modo tendremos un "árbol" que tiene $V - 1$ ramas, que son las aristas recorridas (en la Figura 5 algunas aristas están

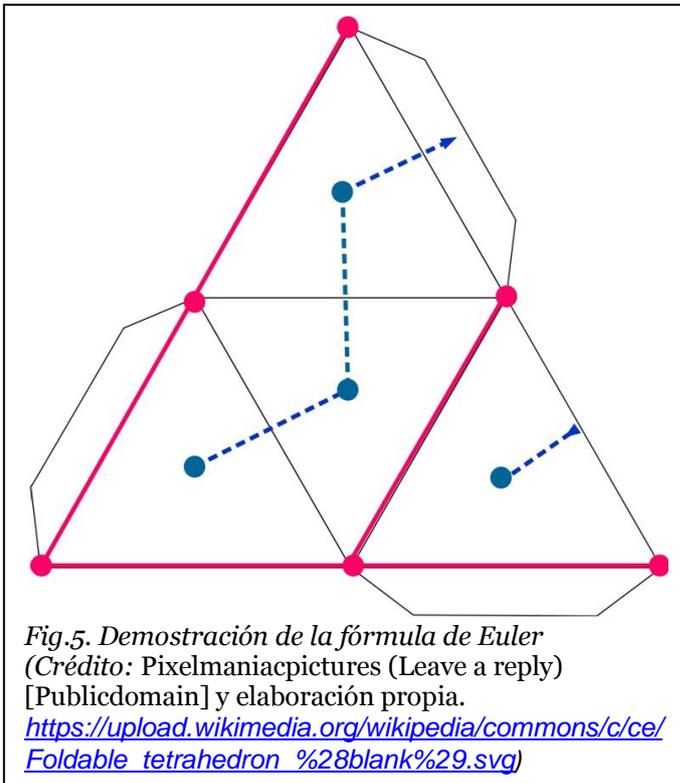


Fig.5. Demostración de la fórmula de Euler
 (Crédito: Pixelmaniacpictures (Leave a reply)
 [Publicdomain] y elaboración propia.
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/ce/Foldable_tetrahedron_%28blank%29.svg)

repetidas). Cada arista que falta en el árbol limita dos caras y por tanto podemos dibujar un camino que conecte los C centros de las caras. Este camino es conexo, es decir, puede llegarse de una cara a cualquier otra, ya que en caso contrario habría dos caras separadas por un circuito cerrado del árbol, pero por definición un árbol no tiene circuitos. Por otra parte, nuestro camino tampoco puede tener circuitos, ya que separaría la superficie en dos partes, con algunos vértices del primer árbol en cada una de ellas, lo que no puede ser. Así, el segundo camino también es

un árbol, y tiene C - 1 ramas. Ahora bien, cada arista del poliedro es una rama de alguno de los dos árboles, de modo que

$$(V - 1) + (C - 1) = A,$$

que es la fórmula de Euler.

La propiedad esencial que se usa en la prueba anterior, puesta en valor por Poincaré [6], es que, en una esfera y por tanto en todos los poliedros que estamos considerando, cualquier curva cerrada simple trazada en ella la desconectará. Se dice que la esfera es "simplemente conexa", o, lo que es lo mismo, que tiene "género cero". Dicho de manera más vaga, la esfera no tiene "asas".

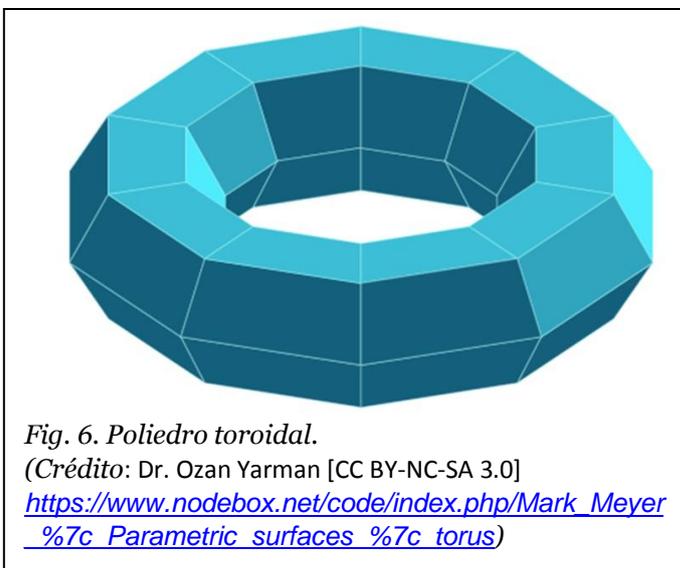


Fig. 6. Poliedro toroidal.
 (Crédito: Dr. Ozan Yarman [CC BY-NC-SA 3.0]
https://www.nodebox.net/code/index.php/Mark_Meyer_%7c_Parametric_surfaces_%7c_torus)

En cambio, un *toro* (Figura 6) tiene un asa, es decir, su género es g = 1. Para un poliedro trazado en una superficie de género g, la "fórmula de Euler-Poincaré" nos dará

$$V - A + C = 2 - 2g.$$

Estas ideas llevaron, a principios del siglo XX, a la clasificación de todas las superficies, y más recientemente a la generalización, por Perelman (1966-), de esta clasificación a otras dimensiones [7].

En el *Cosmos* original de Carl Sagan, los sólidos platónicos aparecen dos veces: cuando cuenta las ideas de los antiguos griegos sobre los elementos; y cuando comenta la teoría de Kepler (1571-1630) sobre las órbitas de los planetas. El mérito de estas especulaciones fue establecer el principio de que es posible explicar el universo mediante modelos matemáticos. Siglos después, el objetivo de las Matemáticas sigue siendo imaginar, a partir de métodos geométricos y topológicos como los que hemos visto, todos los mundos teóricos posibles y descartar después los que no se ajustan a las leyes de la astrofísica.

Referencias:

- [1] S. Álvarez, *Polyhedra in (inorganic) chemistry*, Dalton Trans. 2209-2233 (2005), <https://www.doi.org/10.1039/b503582c>
- [2] M. Mallo Zurdo, *Sistemas radiolarios. Geometrías y arquitecturas derivadas*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, 2015.
- [3] Viral Zone <https://viralzone.expasy.org/8577>
- [4] L. Euler, *Elementa doctrinae solidorum*, Euler Archive – Obras completas. E230 (1758). <https://scholarlycommons.pacific.edu/euler-works/230>
- [5] H.S.M. Coxeter, *Regular polytopes*. Methuen & Co. Ltd. London, 1948.
- [6] H. Poincaré, *Sur la généralisation d'un théorème d'Euler relatif aux polyèdres*. Comptes Rendus Acad.Sci., t. 117, p. 144-145 (17 juillet 1893). <http://analysis-situs.math.cnrs.fr/>
- [7] *Virtual and manipulative geometrical and topological games*, Juegos Topológicos del Mago Moebius. <https://topologia.wordpress.com/2009/03/04/la-conjetura-de-poincare/>

Bibliografía:

- (1) Henar Lanza González. *Matemática y física en el Timeo de Platón. Poliedros regulares y elementos naturales*. Praxis Filosófica Nueva serie, No. 40, enero-junio 2015: 85 – 112.
- (2) Marjorie Senechal Editor. *Shaping Space: Exploring Polyhedra in Nature, Art, and the Geometrical Imagination*. Springer, 2013.
- (3) J. R. Weeks. *The shape of space*, Second Edition, Marcel Dekker, 2002.
- (4) E. Cabezas Rivas y V. Miquel Molina. *Demostración de Hamilton-Perelman de las conjeturas de Poincaré y Thurston*, La Gaceta de la RSME, Vol. 9.1 (2006), 15–42.

Enrique Macías Virgós.

Doctor en Matemáticas.

Catedrático de Geometría y Topología, Departamento de Matemáticas, Universidad de Santiago de Compostela.

Epílogo

Dos obras básicas para la comprensión de la Tierra y el Espacio.

15.1

Del *Cosmos* de Humboldt al *Cosmos* de Sagan.

“Nos hemos ido alejando cada vez más del Cosmos, hasta parecernos algo remoto y sin consecuencias importantes para nuestras preocupaciones de cada día. Pero la ciencia no solo ha descubierto que el universo tiene una grandeza que inspira vértigo y éxtasis, una grandeza accesible a la comprensión humana, sino también que nosotros formamos parte, en sentido real y profundo, de este Cosmos, que nacimos en él y que nuestro destino depende íntimamente de él.”

Carl Sagan, *Cosmos*, 1980

“Mi ensayo sobre el *Cosmos* es la contemplación del Universo, fundada en un empirismo razonado; es decir, sobre el conjunto de hechos registrados por la ciencia y sometidos a las operaciones del entendimiento que compara y combina. La unidad que yo trato de fijar en el desarrollo de los grandes fenómenos del Universo es la que ofrecen las composiciones históricas....Ensanchando los límites de la física del Globo, reuniendo bajo un mismo punto de vista los fenómenos que presenta la Tierra con los que abarcan los espacios celestes, llégase a la ciencia del *Cosmos*, es decir, que se convierte la física del globo en una física del mundo.”

Humboldt, *Cosmos*, 1845

En 1845 Alexander von Humboldt plasma su idea de reunir en una obra magna los conocimientos existentes sobre la Tierra en el universo, en una obra que vería su primer tomo editado en esa fecha: el *Cosmos*. Casi siglo y medio después, Carl Sagan publicaba su *Cosmos*, resultado de su serie documental de divulgación científica (1980) de enorme éxito; una obra aparentemente diferente al trabajo del geógrafo alemán, pero con idéntica finalidad -la recopilación de conocimientos sobre el estado de las investigaciones de la Tierra en el Espacio- y con unos contenidos que, tras la lectura detallada de ambos trabajos, nos permiten comparar aspectos de la Física del Globo abordados en dos momentos importantes en la historia de la ciencia. Humboldt

ha pasado a la historia de la ciencia como uno de los padres de la geografía, de la disciplina encargada del estudio de las relaciones entre el medio físico y los seres humanos, pero cuando se lee su *Cosmos* se comprueba que en esta obra se contiene, asimismo, una detallada síntesis de los conocimientos existentes en su época sobre la parte celeste de los fenómenos de la naturaleza (Libro I), del sistema solar, de los planetas y sus satélites, de los cometas, de la luz zodiacal y de los asteroides meteóricos (Libro III). Esto es, saberes de la parte no terrestre del Cosmos. Porque para el sabio alemán todo ello forma parte de la *Física del mundo*. El estudio de estas dos obras resulta fascinante, por su contenido y por las relaciones que se puede encontrar entre ambas; no en vano Sagan conocía la obra de Humboldt que cita en su libro y que define como "una gran obra de popularización de toda la ciencia" (cap. 13), una expresión que permite caracterizar, sin duda, al propio *Cosmos* del astrofísico estadounidense.

En el prólogo del Libro I, Humboldt aclara la intención que le llevó a emplear el término "Cosmos" para titular su obra, lo que da razón de la concepción integral del medio natural en el geógrafo alemán: "En mi obra, la palabra "Cosmos" está tomada como la prescriben el uso helénico, posterior a Pitágoras, y la definición muy exacta dada en el *Tratado del mundo* que falsamente se ha atribuido a Aristóteles: es el conjunto del Cielo y de la Tierra, la universalidad de las cosas que componen el mundo sensible". Sagan, en su *Cosmos*, realiza un salto espacio-temporal a la hora de definir este concepto: "Cosmos es todo lo que es, lo que fue o lo que será alguna vez". Se podría decir que el *Cosmos* de Humboldt es el estudio de la Tierra, morada del ser humano, en el Espacio. Al respecto Humboldt señala: "La ciencia que trato de definir tiene, por consiguiente, para el hombre, habitante de la tierra, dos partes distintas: la propiamente dicha, y los espacios celestes". Por su parte, el *Cosmos* de Sagan es el estudio del Espacio como morada de la Tierra y del ser humano. Pero ambos coinciden en el empleo de la ciencia como método para comprender los hechos que se dan en el universo. Sagan afirma al respecto: "Cosmos es un intento ilusionado de difundir las alegrías de la ciencia"; con el *Cosmos* de Humboldt, las ciencias naturales y de la tierra, muy singularmente la geografía, adquirirán expresión científica: "La naturaleza es el todo animado por un soplo de vida. El resultado más importante de un estudio racional de la naturaleza es recoger la unidad y la armonía en esta inmensa acumulación de cosas y de fuerzas, abrazar con el mismo ardor lo que es consecuencia de los descubrimientos de los siglos pasados y lo que se debe a las investigaciones de los tiempos en que vivimos".

El *Cosmos* de Humboldt es una obra de madurez, encierra las esencias del otoño del polímata alemán, que había dedicado su intensa vida a formarse, conocer nuevas tierras en Europa y fuera de ella, y a aplicar sus conocimientos y método de trabajo en la explicación de los hechos geográficos que va encontrando a lo largo de sus viajes. En el prefacio del *Cosmos*, Humboldt confiesa el porqué de su factura: "Próxima a su fin mi existencia, ofrezco a mis compatriotas una obra que ocupa mi pensamiento hace ya medio siglo". Es una

obra científica y de reflexión sobre las interrelaciones entre los fenómenos del universo, a modo de conclusión del trabajo científico realizado a lo largo de su vida. El *Cosmos* de Sagan está escrito en la plenitud creativa de su madurez, como respuesta al escaso interés que, según el autor, mostraban los medios de comunicación de entonces por las cuestiones científicas: "yo sabía positivamente, por experiencia propia, que existe un enorme interés global por la exploración de los planetas y por muchos temas científicos relacionados con ella: el origen de la vida, la Tierra y el Cosmos, la búsqueda de inteligencias extraterrestre, nuestra conexión con el universo". Y el resultado fue todo un éxito, tanto en la serie documental televisiva como en el libro que le acompañó.

La idea de publicar el *Cosmos*, por parte de Humboldt se remonta a las diversas conferencias sobre aspectos de la física del mundo que comenzó a dictar entre 1825 y 1828 en París y Berlín (*Kosmos-Lectures*). Debido al éxito de las conferencias y la asistencia de una cantidad considerable de público general a estas, no tardaron en aparecer las propuestas editoriales. Finalmente, en 1828 se firma un contrato con Johann Friedrich Cotta en donde se acuerda publicar no tan solo el *Cosmos*, sino que también el conjunto de conferencias que dictó Humboldt en París y Berlín. Pero no será hasta seis años después de la última conferencia impartida en Berlín, en 1834, cuando Humboldt sintió que estaba listo para empezar a preparar la publicación, y sus borradores crecieron y crecieron. El primer tomo de *Cosmos* se publicó en 1845, cuya primera edición se agotó en apenas dos meses. Los cinco libros del *Cosmos* fueron diseñados, en sus contenidos, por el propio Humboldt y publicado entre 1845 y hasta 1862, cuando se edita el quinto y último tomo de forma póstuma. Sagan vivió, por el contrario al geógrafo alemán, el éxito de su *Cosmos*, tanto por la enorme audiencia televisiva conseguida en todo el mundo (140 millones de personas, según indica en la introducción del libro), como por las repetidas ediciones del libro que se tradujo a múltiples idiomas (en 1982, la editorial Planeta lo editaría en castellano).

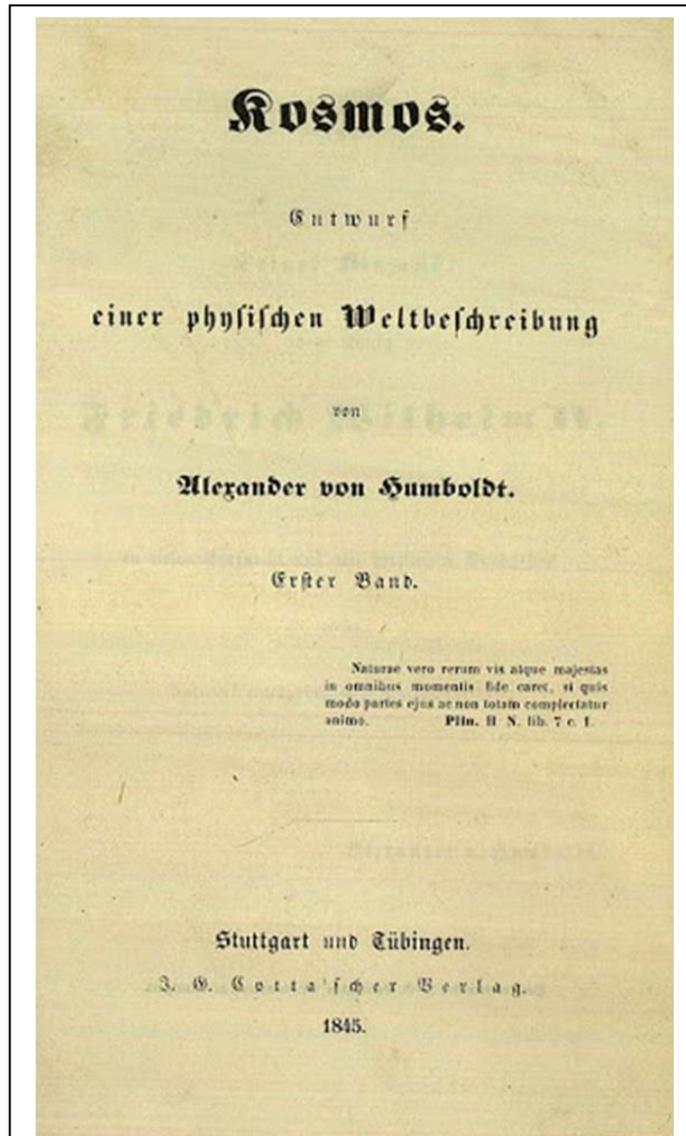
En la redacción del *Cosmos*, Humboldt se asemeja en su proceder a muchos otros intelectuales como algunos cronistas de Indias de los siglos XVI y XVII o a ilustrados franceses como Voltaire. Humboldt, como ellos y muchos otros, echó mano no solo de una amplia diversidad de fuentes, sino que sus textos surgen gracias al intercambio con otros intelectuales, al diálogo con otras disciplinas y al trabajo de las múltiples manos que se encargaron de transcribir, ordenar, clasificar y medir las decenas de notas, muestras y mediciones recopiladas en sus viajes científicos. El conocimiento propio y la documentación con trabajos de otros autores es, también, el que sigue Carl Sagan en su libro, como indica en la introducción.

Humboldt participa de la concepción del proyecto científico decimonónico con sus dos principios generales: la asunción de la Historia como patrón del orden temporal de las cosas y la conciencia epistemológica del ser humano como asunción de una nueva positividad que se refiere a las relaciones entre naturaleza y naturaleza humana. Estas ideas, que se van

fraguando durante sus años de formación académica, en los años finales del s. XVIII, serán mejoradas por las aportaciones propias de Humboldt y su apuesta por la observación directa y el análisis de datos. De este modo, se convierten en un ideario sin vuelta atrás para la ciencia positiva. Humboldt aúna una formación ilustrada, la incorporación del sentimiento a la razón –propio del romanticismo alemán-, y la aceptación evidente del positivismo como guía para el desarrollo de una disciplina que se pretende científica. De hecho, Humboldt aportará en su *Cosmos*, un esquema nuevo, científico, para el conocimiento de la Tierra que debía contener, por este orden: 1) la descripción de las formas de la superficie terrestre incluyendo su determinación en la red de triangulaciones de la Tierra (morfografía), 2) el magnetismo terrestre, 3) la descripción climática, 4) el estudio de los ríos, lagos y mares con todas sus características físicas (medición de las corrientes, perfiles, extensión, etc.), esto es, lo que compone la parte hidrográfica del medio natural, 5) la geografía vegetal, sin olvidar el papel del ser humano en la distribución de las especies, 6) la geografía zoológica, si bien este campo no sería tan cultivado por Humboldt como el anterior, y 7) la etnología, o estudio del comportamiento y de las relaciones del ser humano con su entorno. Este esquema, sin que faltasen críticas, fue aplicado por diversos geógrafos alemanes a partir de los años veinte del siglo XIX. Humboldt entiende que el desarrollo de este esquema es el que posibilita la comprensión integral de los hechos geográficos en un medio. Es el esquema de lo que Varenio, en el siglo XVII, había denominado Geografía General, y que Humboldt caracterizó como Geografía Física, pero que integraba el componente humano como parte fundamental del análisis y descripción de un territorio. En este sentido, Humboldt se denominaba frecuentemente "physicien", esto es, naturalista en el sentido de geógrafo integral. El *Cosmos* de Sagan, pese a la impresión generalizada que se tiene de su obra de ser un libro básicamente de astronomía, aborda a través de las páginas de sus trece capítulos aspectos de historia de la ciencia y la interpretación de fenómenos astronómicos, de los hitos alcanzados por los griegos para el conocimiento de la física del globo (Eratóstenes, los filósofos jónicos) y su representación cartográfica (Ptolomeo), de las interpretaciones sobre la creación por parte de distintas creencias religiosas, de la importancia del conocimiento recogido en los libros y las bibliotecas (biblioteca de Alejandría), del choque de civilizaciones en el descubrimiento y conquista del Nuevo Mundo, de la evolución del ser humano desde la prehistoria; de la importancia de la ciencia y la necesidad de su promoción como medio para la mejora de la civilización.

Desde la publicación del *Cosmos* de Humboldt hasta la aparición del *Cosmos* de Sagan, la ciencia dará un salto exponencial mejorando sus métodos e instrumental. En el caso de las ciencias de la Tierra y el Espacio esto es especialmente notable: telescopios, cohetes, satélites, radares, ordenadores y esto se percibe, de forma evidente, en las páginas del trabajo de Sagan. Pero Humboldt incluiría en su obra, esencialmente en el Libro III del *Cosmos*, aspectos de gran utilidad para el avance posterior de las ciencias del

Espacio –lo que él denomina estudio de la “uranología”- como la relación de las órbitas de las estrellas nobles y los elementos integrantes del Sistema Solar conocidos a fines de la primera mitad del siglo XIX: “Veintidos planetas principales, de ellos ocho principales y catorce pequeños llamados también asteroides, veintiún satélites y ciento noventa y siete cometas cuya órbita está calculada”. Humboldt deja la puerta abierta a otros fenómenos y elementos del Espacio que puedan formar parte en su época histórica o posteriormente del Sistema Solar: “Probablemente el Sistema Solar contiene también la luz zodiacal... y numerosos observadores opinan que deben añadirse a esta relación los enjambres de asteroides meteóricos que cortan la órbita de la Tierra”. Como gran novedad astronómica en la época de Humboldt, se destaca en el *Cosmos* el descubrimiento de Urano (1781) y el anuncio de la existencia de Neptuno por Le Verrier, comprobada posteriormente por Galle, en 1846. Humboldt incluye en su obra, también, la relación de manchas solares observadas entre 1826 y 1850, las fechas clave del descubrimiento de los planetas, entre el siglo XVII y XIX, los datos de volumen y distancia a la Tierra y al Sol de los mismos, las características de la Luna como cuerpo satelital de la Tierra, los rasgos principales de los cometas y de la luz zodiacal, las leyes que explican el movimiento de los astros. Como sabemos la relación de cuerpos siderales sería modificada y mejorada especialmente



Detalle de la 1ª edición en alemán del Cosmos de A. von Humboldt, editado en Stuttgart y Tübingen en 1845, por el prestigioso impresor de la época J. G. Cotta. La obra se compondría, finalmente, de seis volúmenes, que se publicarían sin periodicidad fija hasta el año 1862. La obra de Humboldt tuvo una repercusión fundamental para la consolidación de las ciencias de la Tierra y de la naturaleza en la segunda mitad del siglo XIX.

desde la segunda mitad del siglo XX, así como los principios físicos que explican los fenómenos siderales, pero el estudio de Humboldt tiene el valor de ser un inventario preciso de los conocimientos existentes en el tiempo del erudito alemán. Pese a las novedades y experimentos espaciales que relata con detalle en su *Cosmos* el astrofísico estadounidense, Sagan reconoce, por ejemplo, a Humboldt como impulsor de la idea de que los aerolitos y los meteoritos son restos de cometas (Sagan, 1980; cap. 13). Humboldt es consciente de que el conocimiento del espacio en su época, a pesar de los avances experimentados, está en un estado incipiente y que en su *Cosmos* solo incluiría aquello que estaba totalmente demostrado por la ciencia: "Lo que no puede fijarse como posible debe quedar fuera de una descripción física del mundo: no está permitido a la ciencia el perderse en las regiones nebulosas de las fantasías cosmológicas". Este es su gran acierto, como el de Sagan, la apuesta por la ciencia como criterio de selección, descripción y explicación de los aspectos analizados en sus obras.

Por último, un aspecto curioso es el tratamiento del clima terrestre y, en concreto del cambio climático, cuestión de gran importancia en la actualidad, en las obras de Humboldt y Sagan. El cambio climático que ambos señalan es el ocasionado por el ser humano pero por alteraciones del medio natural terrestre (deforestación, desecación de lagunas). Se indica, por tanto, la mano del ser humano en las alteraciones que experimenta el clima en sus épocas. Al respecto, Sagan señala: "Hay un factor adicional que puede alterar el paisaje y el clima de la Tierra: la vida inteligente, capaz de realizar cambios ambientales a gran escala". Resulta curioso que Sagan indica la posibilidad de que la Tierra se acerque a una nueva era glacial, aunque recordemos que el descenso de temperaturas que experimento nuestro planeta en los años sesenta y setenta del pasado siglo hizo pensar a muchos investigadores del clima esa posibilidad. A este respecto indica "durante cientos de miles de años los seres humanos han estado quemando y talando los bosques, y llevando a los animales domésticos a pastar y a destruir las praderas. La agricultura intensiva, la deforestación industrial de los trópicos y el exceso de pastoreo son hoy desenfrenados. Pero los bosques son más oscuros que las praderas, y las praderas lo son más que los desiertos. Como consecuencia, la cantidad de luz solar absorbida por el suelo ha ido disminuyendo y los cambios en la utilización del suelo han hecho bajar la temperatura de la superficie de nuestro planeta. Es posible que este enfriamiento aumente el tamaño del casquete de hielo polar, el cual con su brillo reflejará aún más la luz solar desde la Tierra, enfriando aun más el planeta y disparando un efecto de albedo". Hoy sabemos que este proceso no ha ocurrido, sino todo lo contrario. El calentamiento planetario que se registra desde los años ochenta del pasado siglo, de origen antrópico ha alterado el balance energético planetario favoreciendo un forzamiento radiativo que está incrementando las temperaturas de la baja troposfera de forma continuada, dando al traste, pues, con esa hipótesis de enfriamiento que apuntaba Sagan. En ninguna de las dos obras se hace mención explícita a este proceso actual de calentamiento ocasionado por la

emisión de gases de efecto invernadero por parte del ser humano. Esto es comprensible en el caso del Cosmos de Humboldt, que se escribe en un contexto climático (final de la Pequeña Edad del Hielo) totalmente diferente al actual. Pero sorprende en el *Cosmos* de Sagan (cap. 4) puesto que, aunque a comienzos de los años ochenta del pasado siglo la actual hipótesis de efecto invernadero de causa antrópica aún no se había lanzado al mundo científico, se disponían ya de algunos trabajos que hablaban del problema climático de la Tierra por acumulación de dióxido de carbono; proceso que, como es notable, ha cobrado enorme protagonismo científico y social en los años siguientes. Sagan, no obstante, esboza la cuestión y señala: "las principales fuentes de energía de nuestra actual civilización industrial son los llamados carburantes fósiles. Utilizamos como combustible madera, petróleo, carbón y gas natural, y en el proceso se liberan al aire gases de desecho, principalmente CO₂. En consecuencia el dióxido de carbono contenido en la Tierra está aumentando de modo espectacular. La posibilidad de que se dispare el efecto invernadero sugiere que tenemos que ir con cuidado: incluso un aumento de uno o dos grados en la temperatura global podría tener consecuencias catastróficas". Y apunta, con enorme clarividencia, "nuestro encantado planeta azul, la Tierra, es el único hogar que conocemos. Venus es demasiado caliente, Marte es demasiado frío. Pero la Tierra está en el punto justo, y es un paraíso para los humanos. Fue aquí, al fin y al cabo, donde evolucionamos. Pero nuestro agradable clima puede ser inestable. Estamos perturbando nuestro propio planeta de un modo serio y contradictorio. ¿Existe el peligro de empujar el ambiente de la Tierra hacia el infierno planetario de Venus o la eterna era glacial de Marte? La respuesta sencilla es que nadie lo sabe. El estudio del clima global, la comparación de la Tierra con otros mundos, son materias que están en sus primeras bases de desarrollo". Sí que menciona Sagan en su *Cosmos* el problema, incipiente en la literatura científica a inicios de los años ochenta, de la destrucción de la "capa de ozono por los gases propulsores fluorocarbónicos de los botes de spray con aerosol" y señala los efectos negativos que ello tendría en los seres vivos de nuestro planeta: "Este aumento en el flujo ultravioleta... producirá cáncer de la piel, preferentemente en personas de piel clara. Y algo más importante: afectará la ecología de nuestro planeta de un modo desconocido". Como sabemos, en 1987, el protocolo de Montreal prohibiría la fabricación y utilización de los conocidos CFCs, favoreciendo el actual proceso de recuperación de la capa de ozono de la estratosfera.

En el mundo actual, donde lo mediático ha cobrado protagonismo de fuerza civilizadora, el término "Cosmos" ha pasado a ser, merecidamente, sinónimo de la obra (serie de televisión y libro) de Carl Sagan en el imaginario colectivo de la humanidad, porque acercó con inteligencia la dificultad de las ciencias del Espacio y de la Tierra al gran público y ha recibido una justa respuesta de recuerdo y agradecimiento. Casi siglo y medio antes, Alexander von Humboldt había comenzado a publicar su *Cosmos*, asimismo una obra de sentido universal que pretendía acercar a un público numeroso los

conocimientos de la Física del Globo existentes en su época y que desde entonces se convirtió en un trabajo de referencia para muchas disciplinas científicas, mereciendo ediciones constantes y traducciones a múltiples idiomas.

Ambos *Cosmos* tienen el valor de ser síntesis documentada, de base científica, de los conocimientos sobre la Tierra y el Espacio existentes en sus épocas. Ambas obras tienen la finalidad de desentrañar y mostrar a un gran público los saberes de numerosos fenómenos que ocurren en la naturaleza, en su amplio sentido. Ambas coinciden en el papel importante del ser humano como habitante y pieza principal del Cosmos. Algo más de siglo y medio separan su edición con sus numerosos y acelerados cambios en la ciencia cuyo resultado muestra el *Cosmos* de Sagan. Pero desde 1980 a la actualidad la rapidez de la mejora de las herramientas y métodos de trabajo científico, y de los procesos físico-naturales que se han manifestado desde entonces nos lleva a asegurar que si Carl Sagan pudiera ahora escribir un nuevo *Cosmos* su resultado supondría un salto en la descripción de la Tierra y del Espacio tan importante, en tan corto tiempo, como el que supuso su obra respecto a la elaborada a mediados del siglo XIX por el geógrafo alemán.

Bibliografía:

- (1) Capel, H. (2012) *Filosofía y Ciencia en la Geografía contemporánea*. Barcelona, Ediciones del Serbal, 480 p.
- (2) Gómez Mendoza, J.; Muñoz Jiménez, J. y Ortega Cantero, N. (1998) *El pensamiento geográfico*. (2ª ed.), Madrid, Alianza Universidad Textos, 545 p.
- (3) Harstshorne, R. (1991). "El concepto de geografía como ciencia del espacio: de Kant y Humboldt a Hettner", *Documents d'Anàlisi i Geogràfica*, 18, Universitat Autònoma de Barcelona, p. 31-54.
- (4) Humboldt, A.von (2011) *Cosmos. Ensayo de una descripción física del mundo*. (Edición e introducción de Sandra Rebok), Madrid, Los libros de la Catarata y Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 959 p. + 2 mapas.
- (5) Sagan, C. (1982) *Cosmos*. Barcelona. Editorial Planeta, 366 p.
- (6) Sloterdijk, P. (2019) *En el mundo interior del capital. Para una teoría filosófica de la globalización*. Madrid, Ed. Siruela, 332 p.
- (7) Wulf, A. (2016) *La invención de la naturaleza. El Nuevo Mundo de Alexander von Humboldt*, Madrid, Ed. Taurus, 584 p.

Jorge Olcina Cantos.

Catedrático de Análisis Geográfico Regional.

Departamento de Análisis Geográfico Regional y Geografía Física,
Laboratorio de Climatología, Universidad de Alicante.

Autores participantes:

**Marcelino Agúndez Chico
Andrea Verónica Ahumada
Gustavo Alfredo Arciniega Durán
Carlos Barceló
Juan Antonio Belmonte Avilés
Juan F. Cabrero Gómez
José I. Crespo-Anadón
Elsa de Cea del Pozo
Manuel de León
David Delgado Iglesias
Antonio Dobado González
J. Emilio Enríquez Rascón
Judith Estengre Pérez
José L. Fernández Barbón
Leonardo Fernández Jambrina
Elías Fernández-Combarro Álvarez
David Galadí Enríquez**

**Diego García-Martín
Beatriz Gato Rivera
Rodrigo Gil-Merino y Rubio
Luis J. Goicoechea Santamaría
Andrés Gomberoff
Alberto Güijosa Hidalgo
Francisco Guinea
Bernardo Herradón García
Antonio Huertas Peña
Luisa G. Jaime
Elena Jiménez Martínez
Enrique Joven Álvarez
Ester Lázaro Lázaro
Jon Lomberg
Ernesto Lozano
Enrique Macías Virgós
Jesús Martínez Frías
Vicent J. Martínez
Jose Miguel Mas Hesse
Javier Mas Solé
Martín Monteiro
Benjamín Montesinos Comino
Óscar Moreno Díaz
Pedro Naranjo Pérez
Alfonso Ogayar Serrano
Jorge Olcina Cantos
Fernando Ortuño Guerrero
Inés Pellón González
Jorge Pla-García
Alberto Rábano Gutiérrez
Joaquín M. Ramírez Rodríguez
Patricia Sánchez Pérez
Pilar Sánchez Sánchez-Pastor
Tomás Sánchez Sánchez-Pastor
Beatriz Sánchez-Cano
Emilio Tejera Puente
Jose Manuel Urech Ribera
Luis Velilla Prieto**