

SI MUOVE

NÚMERO 27 - OTOÑO 2024





CURSOS EN EL PLANETARIO

Hablemos del universo

Dra. Estefanía Coluccio Leskow

Cursos de astronomía para chicos y chicas de 7 a 11 años

Estructuras cósmicas

Lic. Walter Germaná

Organizando el universo, acomodando las ideas

Descubrir, observar y disfrutar el cielo

Diego Luis Hernández

Curso de observación del cielo para mayores de 15 años

Astronomía general

Lic. Mariano Ribas

Curso de introducción y actualización al conocimiento del universo

Astrofísica y exploración espacial

Dra. Estefanía Coluccio Leskow

Curso para chicos y chicas entre 12 y 15 años

La luz del universo

Dra. Cintia Peri

Curso para mayores de 15 años

SI MUOVE

NÚMERO 27 - OTOÑO 2024

Revista de divulgación científica del Planetario
de la Ciudad de Buenos Aires Galileo Galilei
Av. Sarmiento 2601 - C1425FGA - CABA
Teléfonos: 4772-9265 / 4771-6629

STAFF

EDITORA RESPONSABLE

ESTEFANÍA COLUCCIO LESKOW

DIRECTOR PERIODÍSTICO

DIEGO LUIS HERNÁNDEZ

DISEÑO GRÁFICO

ALFREDO MAESTRONI

SECRETARIO DE REDACCIÓN

MARIANO RIBAS

REDACTARON PARA ESTA EDICIÓN

ROCÍO BERMÚDEZ

SOL BEJARÁN

GUILLERMO ABRAMSON

RODRIGO HAACK

COLABORACIONES

Gabriela Sorondo, Delfina Rosa,
Alberto Russomando, Karina Herrera,
Pablo Laise, Mario Casco, Carlos Di
Nallo, Andrea Anfossi, Cyntia Olivera,
Enzo de Bernardini, Aldo Kleiman,
Ezequiel Bellocchio, Leonardo Julio,
José Chambó, Maximiliano Falierez,
Maximiliano Rocca, Sabrina Mottino,
Nani Pegoraro.

AGRADECIMIENTOS

NASA, ESA, JAXA, Zeiss Planetary History,
Xavier Jubier, Sebastian Voltmer.

CORRECCIÓN

Walter Germaná, Natalia Jaoand.

FOTO DE TAPA

Galaxia espiral barrada NGC 1365 en
Fornax. Autor: Gerardo Ferrarino.

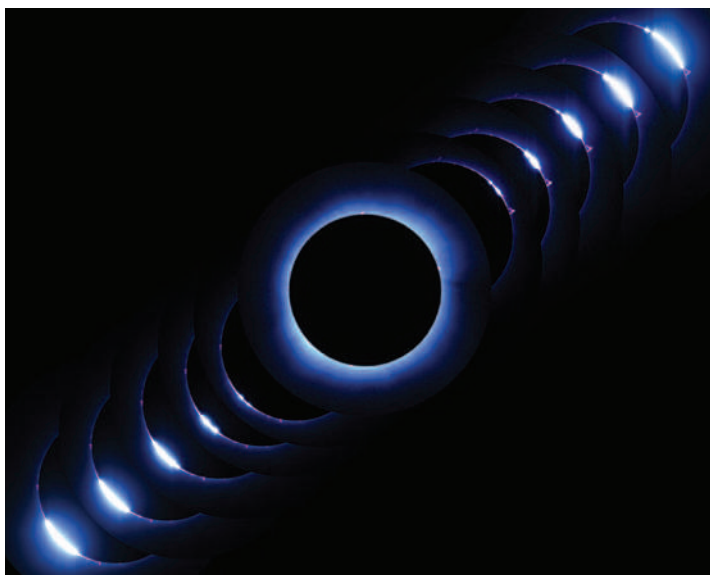
ISSN 2422-8095

Reservados todos los derechos. Está permitida la reproducción,
distribución, comunicación pública y utilización, total o parcial, de
los contenidos de esta revista, en cualquier forma o modalidad,
con la condición de mencionar la fuente. Está prohibida toda re-
producción, y/o puesta a disposición como resúmenes, reseñas
o revistas de prensa con fines comerciales, directa o indirecta-
mente lucrativos. Registro de la Propiedad Intelectual en trámite.



Ministerio de Educación

JeFe de Gobierno: Jorge Macri
Ministra de Educación: Mercedes Miguel
Subsecretario de Tecnología Educativa:
Ignacio M. Sanguinetti
GO del Planetario: Estefanía Coluccio Leskow



Eclipse total de Sol del 8/4/24 en Canatlán, México.
Alejandro Tombolini, Andrés Vattuone y Andrea Anfossi.

EDITORIAL

El Planetario de la Ciudad de Buenos Aires Galileo Galilei se erige como un faro con la misión de democratizar la ciencia, especialmente la astronomía, para todos. Nuestro objetivo principal es fomentar la curiosidad y el entusiasmo en niños, niñas, adolescentes y adultos, y contribuir a la creación de una cultura científica, del pensamiento crítico y de una actitud escéptica hacia la información en la sociedad.

Creemos firmemente que la forma más efectiva de lograr esto es a través de la colaboración con diversas entidades e individuos. Al combinar nuestros esfuerzos, buscamos transformar la educación científica en una aventura emocionante que valga la pena emprender.

El evento realizado en abril en nuestro Planetario, en colaboración con la Agencia Espacial Europea (ESA), fue una oportunidad fantástica para mostrarles a los estudiantes y a la sociedad en su conjunto, los proyectos que nuestro país comparte con la Unión Europea. Además, esta iniciativa posibilitó visibilizar que la ciencia es una empresa colaborativa, que se construye entre miles de personas de muchísimos países, y que cuando el ser humano deja de lado sus conflictos y trabaja por el bien común, es capaz de alcanzar niveles de innovación y progreso impresionantes. Este espíritu de colaboración no solo impulsa el conocimiento científico, sino que también promueve una visión más inclusiva y solidaria de la sociedad, lo que permite un futuro más prometedor para todos.

Nuestra revista Si Muove también busca la colaboración con profesionales de otras instituciones, con el objetivo de mostrar a la comunidad qué hacen nuestros científicos, nuestros divulgadores y nuestros astrofotógrafos. En esta edición, indagamos acerca de qué es la gravedad, la historia de su comprensión y sus consecuencias en nuestra vida cotidiana; nos preparamos para el eclipse anular de Sol de octubre próximo, analizamos diferentes objetos del sistema solar y fenómenos astrofísicos de las estrellas, y recibimos la colaboración de un redactor especial que nos cuenta su historia en primera persona. Ojalá que la disfruten tanto al leerla como nosotros al realizarla.

Dra. Estefanía Coluccio Leskow

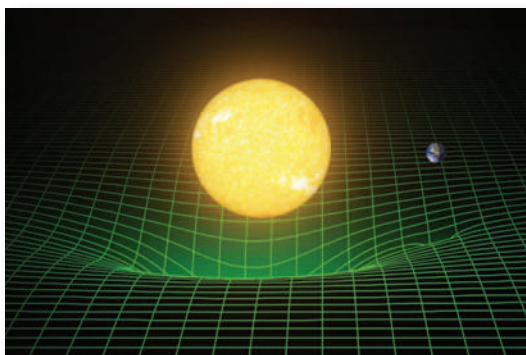
Gerente Operativa del Planetario de la Ciudad de Buenos Aires Galileo Galilei.



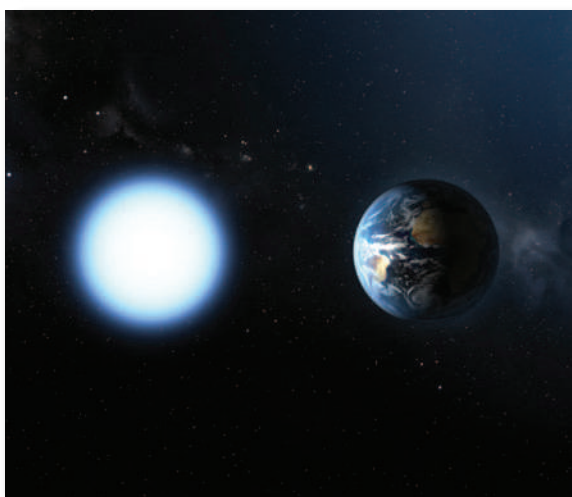
Código QR



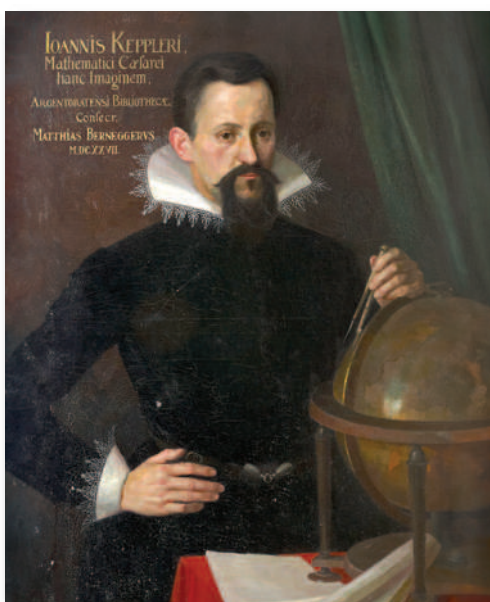
Página web / Correo electrónico
www.planetario.gob.ar
planetario@buenosaires.gob.ar



11 Física. ¿Qué es la gravedad?



15 Astrofísica. Enanas blancas.



28 Memorias: Johannes Kepler.

SUMARIO

03 Editorial.

06 Libros.

07 Anagramas.

08 Cometas.

10 Actividades: la ESA y la CONAE en el Planetario.

11 Física. ¿Qué es la gravedad?

15 Astrofísica. Enanas blancas.

21 2 de octubre: eclipse anular de Sol.

23 100 años del instrumento planetario.

26 Galería astronómica.

28 Memorias: Johannes Kepler.

36 Grandes relevamientos astronómicos.

41 Fornax: estamos en el horno.

43 Sistema solar: Mercurio.

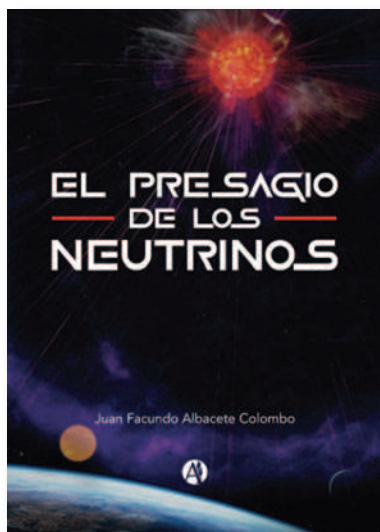


43 Sistema solar: Mercurio.

23 100 años del instrumento planetario



Zeiss Planetarium History



El presagio de los neutrinos

Cuatro astrónomos, un secreto, una amenaza global y el destino de la humanidad bajo amenaza.

Juan Facundo Albacete Colombo
Editorial Autores de Argentina

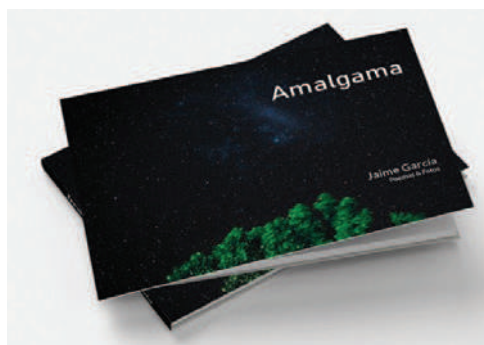
El privilegiado momento, que esperó por eones, se hizo presente. Ocurrió hace cientos de años en algún lugar no muy lejano de nuestra galaxia. Luego de una larga agonía, el núcleo interior de la estrella Betelgeuse no soportó más su propio peso. Allí, la presión alcanzó un límite para la física conocida. Los átomos fueron obligados a dejar de bailar su errática danza para confinarse en un lugar sin espacio, a una densidad casi infinita. Este fatídico instante sentenció su muerte y al mismo tiempo el nacimiento de un infierno explosivo, que solo fue precedido por la liberación de una infinidad de partículas sin masa, ni carga, los neutrinos. Mensajeros insensatos que escaparon horas antes del más violento evento que pueda ocurrir en los cielos, una supernova. Hoy, estos neutrinos viajan por el espacio libremente y presagian una amenaza letal sobre un lejano planeta que orbita en torno a otra estrella. Esa estrella es nuestro Sol y el planeta amenazado, la Tierra.

Amalgama

Poemas y fotos

Jaime García
LP Editores

Fotografiar o pintar la naturaleza es plasmar en una imagen, o en un conjunto de ellas, la mirada, los bordes entre uno y el universo que nos unen a él y, al mismo tiempo, nos apartan. Es hacer poesía con imágenes.



Asteroides

Amenaza de impacto devastador

J. C. Cersósimo
Editorial Autores de Argentina

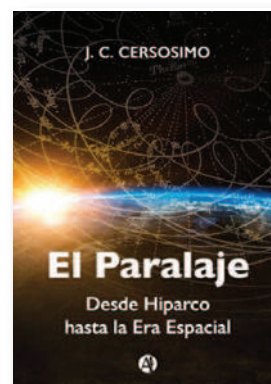
Cada día más de 100 toneladas de meteoros bombardean la Tierra. Aunque la gran mayoría se desintegra antes de llegar a la superficie, los objetos mayores a 100 metros pueden sobrevivir, golpear el suelo y causar destrucción dentro y alrededor del lugar de impacto. La posibilidad de que un meteorito de un kilómetro o más golpee la Tierra es extremadamente remota, pero si sucediera, las consecuencias serían graves.

El Paralaje

Desde Hiparco hasta la Era Espacial

J. C. Cersósimo
Editorial Autores de Argentina

La distancia a las estrellas fue una incógnita desde los comienzos de las observaciones de los astros. Medir un ángulo de paralaje debido al movimiento de la Tierra alrededor del Sol sería el juicio definitivo para aceptar el modelo heliocéntrico y descartar definitivamente el geocentrismo.



SMAISMIRMILMEPOETALEUMIBUNENUGTTAURIAS



Galileo



Kepler

Un anagrama es un cambio en el orden de las letras de una palabra (o de varias palabras) que da como resultado otra palabra diferente (u otra frase diferente). Durante el Renacimiento, algunos científicos y artistas utilizaban cartas secretas en clave, anagramas y otros enredos para comunicar a sus pares sus descubrimientos y dejar constancia de un hecho sin darlo a conocer aún, con la promesa de develarlo pronto, para que nadie se interponga en la prioridad y en el crédito.

En 1609, cuando Galileo comenzó a apuntar su telescopio al cielo, empezó a descubrir un montón de cosas. Tantas que no le daba el tiempo para publicarlas. Entonces, un día, escribió un texto comprendido por 39 letras latinas, sin espacios, y luego hizo saber que había agregado dos letras para complicar aún más el asunto, por lo que había que descubrirlas, eliminarlas y adivinar de qué se trataba el descubrimiento.

El texto decía, literalmente, “SMAISMIRMILMEPOE-TALEUMIBUNENUGTTAURIAS”. Probablemente, una de las pocas personas que podía interesarse en descifrarlo era un matemático obsesivo como Johannes Kepler, quien pasó varios meses intentando adivinar el acertijo. Hasta que propuso que significaba: “*Salve umbistineum geminatum Martia proles*”, lo que significa: “*Salve ardientes gemelos, progenie de Marte*”. Kepler pensó que Galileo, mediante su telescopio, había descubierto que Marte tenía dos satélites. Dado que la Tierra tiene uno, y Galileo había anunciado recientemente su descubrimiento de cuatro lunas alrededor de Júpiter, Kepler creyó absolutamente lógico que Marte debería tener dos.

Efectivamente, Marte tiene dos satélites, Fobos y Deimos, pero los telescopios de Galileo eran demasiado rudimentarios como para descubrirlos, ya que son dos pequeños asteroides capturados por el planeta, muy poco brillantes,



Imán



Maní

en contraste con el brillo de Marte, imposibles de observar incluso para los telescopios “normales” de los aficionados actuales. Recién fueron descubiertos en 1877 por Asaph Hall, con un telescopio refractor de 66 cm de diámetro. Tres meses después, Galileo develó el acertijo en una carta al emperador Rodolfo II de Habsburgo, y dijo que significaba: “*Altissimum planetam tergeminum observavi*”, lo que quiere decir: “*Como triple he observado el planeta más alto*”. El planeta más alto era considerado Saturno (por ser el más alejado de los vistos a simple vista). El telescopio de Galileo no le permitió nunca advertir los anillos de Saturno, sino que creyó ver a cada lado del planeta dos cuerpos menores. Por eso, lo llamó “triple” o “tri corpóreo”.

Más tarde, Galileo publicó: “*Haec in matura a me jam frustra leguntur*”, “*No ha madurado ni ha dado sus frutos lo leído por mí*”. Una vez más, Kepler, desde Praga, intentó descifrarlo. Y una vez más, erró acertando. Dijo que significaba: “*Macula rufa in Jove est gyratur mathem*”. Eso significa “*hay una mancha roja en Júpiter que gira matemáticamente*”.

Casualmente, Júpiter posee una Gran Mancha Roja, una tormenta de unos 12.000 km de ancho por 16.000 de largo. Pero fue descubierta recién en 1664 por Robert Hooke, ya que con los telescopios de Galileo era imposible de ver.

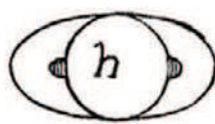
Pero Galileo le develó el acertijo a Julián de Medicis. Y dijo que significaba “*Cynthiar figuras aemulatur amorum*”, “*La madre del amor imita las figuras de Cyntia*”. Es decir, que la diosa del amor (Venus, según la mitología griega) podía observarse con distintas fases, como la Luna (Cyntia, diosa de la Luna para los antiguos griegos). Este descubrimiento constituyó una prueba contundente: Venus gira alrededor del Sol. Pero lo más llamativo siguen siendo los desaciertos acertados involuntariamente por Kepler. ■



1610



1616



1623

Dibujos de Saturno realizados por Galileo, quien nunca pudo apreciar los anillos tal cual son, sino que creyó ver, especialmente al principio, dos cuerpos menores a cada lado del planeta.



La Gran Mancha Roja de Júpiter, otro detalle que los telescopios de Galileo no dejaban ver debido a su precariedad.

Carlos Di Nallo

12P/Pons-Brooks

ENCUENTRO CON EL DIABLO

José Chambó

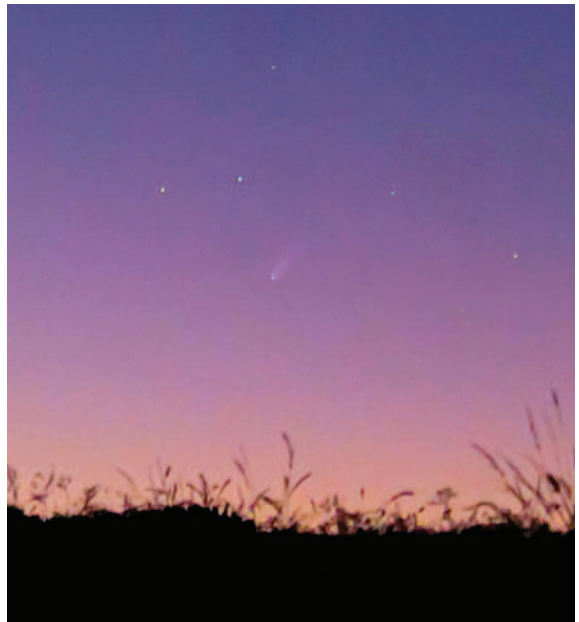


El 12P/Pons-Brooks es un cometa periódico, como el famoso Halley. Fue descubierto por el astrónomo francés Jean-Louis Pons en 1812 (curiosamente, esa vez fue el primero). En 1883, el estadounidense William Robert Brooks descubrió “otro” cometa, hasta que se dio cuenta de que se trataba del mismo. Volvió a ser observado en 1954, lo que confirmaba un período de alrededor de 70 años. El 23 de abril pasado tuvo una nueva aproximación al Sol, a 120 millones de kilómetros, y apareció tímidamente en nuestros cielos, a más de 200 millones de kilómetros de la Tierra. El brillo de los cometas es impredecible, y la mayoría no pasa de ser una tenue manchita observada a través de binoculares o telescopios. Este, llamado mediáticamente “cometa diablo”, debido a una supuesta apariencia en sus primeras observaciones con ese ser mitológico y malvado, no fue la excepción. Antes de alcanzar el perihelio, el cometa fue observado y fotografiado desde el hemisferio norte. Algunas imágenes lo mostraban espectacular. Pero siempre hay que recordar que las fotos, ayudadas por la larga exposición y por los programas de procesado, captan muchísimos más detalles que el ojo humano, incluso, a través de telescopios.

Una vez que pasó a los cielos del sur, con poca expectativa, pudimos captarlo muy bajo desde Buenos Aires, cerca del horizonte del anochecer, en la constelación de Tauro, especialmente con binoculares grandes, en las

noches del 27 y 28 de abril.

La foto de arriba, tomada el 1° de abril desde Enguera, Valencia (España), por Pepe Chambó, con 8 minutos de exposición y filtros LRGB, muestra el cometa muy cerca, aparentemente, de la galaxia de Andrómeda. La foto de abajo fue realizada con una lente de 55 mm desde Santiago del Estero por Cyntia Olivera el 19 de abril. ■



Cyntia Olivera

Caídos del cielo

HIELO SOBRE HIELO



Maximiliano Fajeres

Los núcleos de los cometas están formados principalmente por hielos: un 90 % de hielo de agua, monóxido de carbono y dióxido de carbono. El resto, hielos de otros elementos y polvo. Se estima que menos del 3 % de los núcleos de los cometas está compuesto por rocas o minerales.

Por otro lado, hay reportes en todo el mundo de caídas de bloques de hielo desde el cielo en días despejados, sin tormentas. Algunos de esos bloques pesan varios kilogramos y muestran en sus superficies marcas idénticas a las llamadas *thumbprints*, típicas de los meteoritos, “huellas digitales” producidas por la ablación de sus minerales. Es lógico imaginar que los meteoritos de hielo existen y son de origen cometario. La gran pregunta es cómo identificarlos, ya que esos bloques de hielo que caen desde el

cielo se derriten rápidamente. No pueden ser encontrados luego de décadas, siglos o milenios. Tal vez sí se podrían conservar si cayeran en la Antártida. Pero, ¿cómo identificar un bloque de hielo de origen extraterrestre en medio de los campos de hielo de agua terrestre de la Antártida? La clave podría estar en estudiar las cantidades anormales del isótopo deuterio (los isótopos son átomos de un mismo elemento, pero con cantidad diferente de neutrones). En los núcleos de los cometas, la cantidad de deuterio es diferente a la del agua terrestre. Esto ayudaría a distinguirlos de los granizos y hielos terrestres. ■

Foto del cometa C/2021 A1 (Leonard), fotografiado el 26 de diciembre de 2021 desde Chivilcoy, provincia de Buenos Aires.

Cooperación entre Argentina y la Agencia Espacial Europea

JORNADA ESPACIAL

Autora: Sol Bejarán, Planetario de la Ciudad de Buenos Aires Galileo Galilei.



El Planetario fue el epicentro de una emocionante jornada organizada por la Agencia Espacial Europea (ESA), en colaboración con la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) de Argentina. El evento reunió a estudiantes de nivel secundario de la ciudad para sumergirlos en el fascinante mundo de la exploración espacial y las colaboraciones científicas internacionales.

Desde charlas inspiradoras hasta testimonios de estudiantes involucradas en proyectos espaciales, el evento ofreció una experiencia única. Se inició con una charla de la Gerente Operativa del Planetario, la Dra. en Física Estefanía Coluccio Leskow, quien invitó a los jóvenes a apasionarse por el universo. Luego, el Lic. Julián de Vito, de la CONAE, realizó una presentación sobre Argentina y el Espacio: destacó los proyectos nacionales y las colaboraciones internacionales que han marcado la trayectoria del país en la exploración del cosmos, y mostró los lanzamientos satelitales argentinos. Un punto destacado fue el testimonio de dos estudiantes que participaron en el proyecto CANSAT en 2023, una iniciativa global que desafía a los jóvenes a diseñar y lanzar una carga útil en miniatura, que simboliza la creatividad y el ingenio de la próxima generación de científicos. “No me imaginaba que siendo argentino podía ser astronauta”, comentó uno de los estudiantes, al finalizar.

Luego, fue el turno de la ESA, para mostrarles a los estudiantes, a través de sus profesionales, todas las actividades espaciales que están desarrollando. Los chicos pudieron recibir el mensaje del astronauta de la ESA Pablo Álvarez Fernández, quien los invitó a pensar en el cosmos y les abrió la puerta a la carrera espacial. A continuación, Sandra Benítez y el Ing. Javier de Vicente destacaron el papel fundamental de la antena del espacio lejano (DS3) de la ESA que se encuentra en Malargüe, Mendoza, como punto clave en la comunicación con misiones espaciales y en la recepción de datos cruciales para la investigación científica. Para finalizar este bloque, los asistentes tuvieron la oportunidad de

explorar las actividades científicas y médicas llevadas a cabo por la ESA, con los Dres. Víctor Demaría-Pesce y Daniel Vigo, quienes compartieron investigaciones y avances en medicina espacial, esenciales para garantizar la salud y seguridad de los astronautas en futuras misiones, como las que planean llevar humanos a la Luna y a Marte. Como broche de oro para este gran día, la ESA agradeció la presencia de los estudiantes a través de un sorteo de dos pasajes con estadía en Mendoza para conocer la Deep Space 3 en Malargüe.

Además, estuvieron presentes el Director Ejecutivo y Técnico de la CONAE, Ing. Raúl Kulichevsky, y Anabell Fonseca, en representación de las autoridades de la ESA; y en segundo lugar, el embajador de Francia, Romain Nadal, la Ministra de Educación de CABA, Mercedes Miguel y el Subsecretario de Tecnología Educativa, Ignacio Sanguinetti, quienes brindaron una conferencia de prensa sobre los nuevos proyectos entre ambas agencias espaciales. La jornada concluyó con un mensaje de optimismo y colaboración, con representantes de la ESA expresando su entusiasmo por fortalecer los lazos de cooperación con Argentina en el ámbito espacial, y enfatizando el papel crucial de la educación en la inspiración de futuras generaciones de exploradores del espacio, para lo cual se anunció la intención entre la ESA y el Planetario Galileo Galilei para futuros proyectos de divulgación científica.

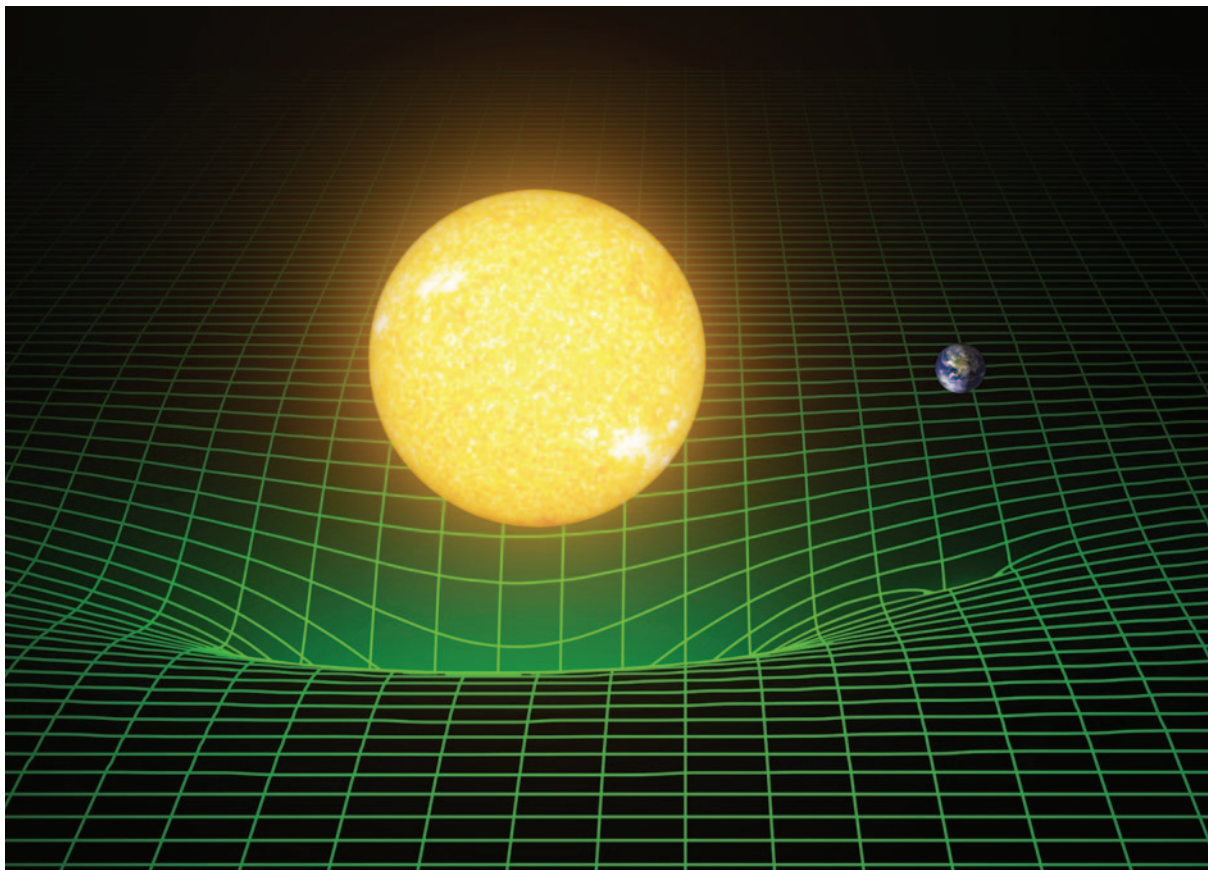
La Jornada Espacial fue un evento inspirador que destacó el poder de la colaboración internacional y la pasión por la exploración espacial que esperamos estimule nuevas vocaciones científicas. ¡Que la exploración del cosmos, con su vastedad y misterio, nos recuerde que nuestros límites solo existen para ser desafiados, y que nuestros sueños son el combustible que nos impulsa más allá de las estrellas! ■

Ideas revolucionarias

¿QUÉ ES LA GRAVEDAD?

Autora: Dra. Estefanía Coluccio Leskow, Gerente Operativa del Planetario de la Ciudad de Buenos Aires Galileo Galilei.

01



T. Pyle Caltech MITLIGO Lab. / NASA

La teoría de la relatividad general de Einstein está entre las más revolucionarias de toda la historia científica. Recorreremos en este artículo parte de los esfuerzos por comprender de qué se trata esta fuerza que experimentamos cotidianamente, y que vivenciamos con total naturalidad, pero de la que aún queda mucho por entender.

En la física newtoniana, la masa de un cuerpo se interpreta como una medida de su inercia, de su tendencia a resistir cambios en su estado de movimiento ante la aplicación de una fuerza. Este concepto, y las famosas leyes de Newton publicadas en el *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* (Principios Matemáticos de la Filosofía Natural) en 1687, han sido la base del desarrollo de la mecánica clásica, que es hasta el día de hoy el marco teórico que nos permite realizar hazañas como construir edificios o enviar misiones a la Luna.

A principios del siglo pasado, Albert Einstein, cuyas contribuciones al conocimiento científico son, sin duda, una de las mayores que se le atribuyen a una persona en toda la historia de la humanidad, desarrolló su teoría de la re-

latividad especial y sacudió el mundo científico con numerosos y extraordinarios aportes a nuestra comprensión de la naturaleza. Uno de ellos es la equivalencia que este

01 Desde Einstein, la gravedad no es entendida como una fuerza sino como un campo, descrito por la curvatura del espacio-tiempo provocada por la presencia de masa, energía, presión y/o momento. Si imaginamos el universo como un “espacio plano” como una cama elástica en la que apoyamos una pelota, la superficie se deformará y la pelota se hundirá. Si arrojamamos una pelotita más pequeña y liviana, su trayectoria se verá afectada por la curvatura que genera el objeto más pesado y cambiará su dirección. Las órbitas de los planetas son los caminos que siguen debido a la deformación del espacio que genera la presencia del Sol. ¡Pero el espacio tiene tres dimensiones y no dos!



excepcional físico alemán encontró entre la masa y la energía de cuerpos en reposo, plasmada en la ecuación más famosa del siglo XX: $E=m \cdot c^2$. Einstein entendió que la energía contenida en un cuerpo inmóvil es igual a la velocidad de la luz en el vacío al cuadrado (¡una magnitud constante!), multiplicada por su masa. Esto quiere decir que la masa y la energía se revelaban como dos conceptos íntimamente vinculados. Esta relación describe entonces cuánta energía se necesita para crear una masa en reposo y cuánta se libera si esa masa se destruye.

Una década más tarde, Einstein volvió a deslumbrar al mundo. Su teoría de la relatividad especial no podía albergar la gravedad, no era una teoría válida para cuerpos acelerados. Después de años de trabajo, en los que necesitó la ayuda de grandes matemáticos de la época para desarrollar el complejo lenguaje que ameritaba la descripción de su exquisito entendimiento de las leyes de la física, la relatividad general salió a la luz con una robustez y una belleza conceptual y matemática sin precedentes. Es imposible no conmoverse con esta teoría que,

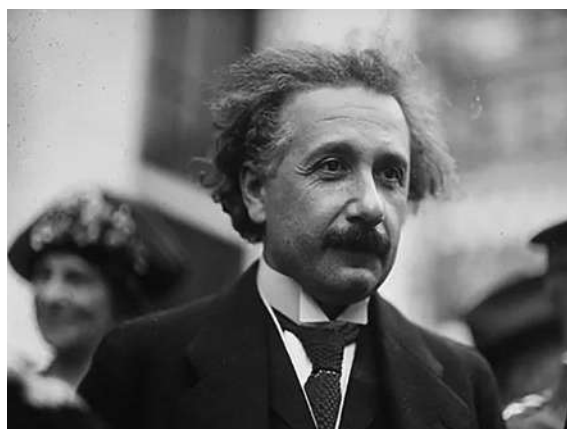
publicada en noviembre de 1915, no solo explicó fenómenos como la precesión del perihelio de Mercurio¹, sino que predijo otros, como la existencia de agujeros negros y ondas gravitacionales², y el hecho de que la luz se curva en presencia de campos gravitatorios. Pero, ¿qué hace a la relatividad general tan especial y qué nos enseñó sobre la naturaleza de la gravedad?

Manzanas y ondas gravitacionales

Las leyes que Newton describió en el siglo XVII establecen que todos los objetos masivos se ven afectados por la fuerza de la gravedad. Así, esta fuerza es la responsable de que las manzanas caigan de los árboles atraídas hacia el centro de la Tierra, y que los planetas, atraídos por el Sol, giren a su alrededor. ¿Por qué? Porque tienen masa, y eso da lugar, según la teoría newtoniana, a una interacción atractiva e instantánea entre los cuerpos.

Más de tres siglos después, la relatividad general nos cuenta una historia muy distinta. Primero, nos revela que no es solo la masa lo que genera gravedad, sino que también lo hacen la energía, la presión y el momento (podemos pensar en el *momento* como una cantidad relacionada con el estado de movimiento de los cuerpos, con la velocidad³). Así, en esta teoría, la inercia a la que se refería Newton es un objeto matemático complejo, que involucra múltiples fuentes de gravedad, al que se denomina tensor energía-momento.

Por otro lado, la relatividad general afirma que la gravedad no solo no es una fuerza en el sentido clásico que nos es familiar, sino que es la curvatura del espacio-tiempo provocada por la presencia de masa, energía, presión y/o momento. Por simplicidad, de ahora en adelante nos referiremos a estas cantidades como fuentes de gravedad. Dejemos el tiempo de lado, por ahora, e imaginemos por un momento que el universo es un espacio plano,



“Las contribuciones de Einstein al conocimiento científico son unas de las mayores que se le atribuyen a una persona en toda la historia de la humanidad”.

02 Retrato de Isaac Newton, realizado en 1689 por Godfrey Kneller.

03 Albert Einstein cerca de 1920.

04 La ecuación de la relatividad general de Einstein escrita en un tren abandonado en el cementerio de trenes del Salar de Uyuni, en Bolivia.





como una cama elástica en la que apoyamos una pelota. La superficie alrededor de la cama elástica naturalmente se deformará y la pelota se hundirá. Si arrojamos una pelotita más pequeña y liviana, con la intención de que pase cerca de la pelota más grande, veremos que su trayectoria se verá afectada por la curvatura que genera el objeto más pesado. La pelotita no podrá mantener la dirección que se le imprime al hacerla rodar por la cama elástica. Inevitablemente, su dirección cambiará. Así, podemos interpretar que las órbitas de los planetas son los caminos que estos siguen debido a la deformación del espacio que genera la presencia del Sol, ¡con la salvedad de que el espacio tiene tres dimensiones y no dos! Las tres dimensiones se curvan por la presencia del Sol. Retomemos el tiempo, ahora. Einstein hablaba del espacio-tiempo. Para él, las fuentes de gravedad interactúan en un entramado con tres dimensiones espaciales y una temporal. Esta última también se “deforma” por la presencia de masa, energía, momento y/o presión. Dos observadores situados en distintos puntos del espacio-tiempo, donde las densidades de estas fuentes de gravedad son diferentes, percibirán un intervalo temporal distinto entre dos eventos. El tiempo dejaba de ser una cantidad absoluta: a partir de Einstein, el transcurrir del tiempo se vuelve relativo. El físico alemán ya se había percatado de este fenómeno, pero debido a otras causas, no a la gravedad, cuando desarrolló su teoría de la relatividad especial en 1905. Las nociones de tiempo y espacio, separadas y diferenciadas hasta ese momento, fueron asociadas por la teoría de la relatividad general de Einstein, de tal manera que ya no tiene sentido entender la gravedad como una interacción que acaece solo en el espacio y que modifica la dinámica de los cuerpos masivos, sino que, además, afecta también al tiempo. Como sentenció John Wheeler, reconocido físico teórico norteamericano, “*el espacio-tiempo le dice a la materia cómo moverse, y la materia le dice al espacio-tiempo cómo curvarse*”. Con materia se refería a las densidades de masa, energía, presión y momento.

La teoría de la relatividad general expone, además, una modificación radical a las ideas de Newton: Einstein afirma que la gravedad no se transmite en forma instantánea. Un

cambio en la distribución de las fuentes de gravedad de un sistema provoca una alteración en el espacio-tiempo circundante que se propaga con una velocidad finita. Esa velocidad es la de la luz en el vacío, y esa transmisión del entramado espacio-temporal son las ondas gravitacionales que su teoría predijo que existían. El 14 de septiembre de 2015 (¡100 años después de la publicación de su teoría!), la colaboración LIGO (*Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory*) detectó físicamente las ondulaciones en el espacio-tiempo causadas por las ondas gravitacionales generadas por la colisión de dos agujeros negros a 1300 millones de años luz de distancia.

La teoría de la relatividad general es, quizás, una de las construcciones matemáticas más hermosas desarrolladas por el ser humano, y el entendimiento de la gravedad como una deformación del espacio-tiempo es, sin duda, una de las ideas más revolucionarias de la historia de la ciencia. El concepto de fuerza gravitatoria, no obstante, queda en un lugar un poco incómodo en cuanto a nuestra comprensión del funcionamiento fundamental de la naturaleza. Nos resta aún comprender por qué esta fuerza es tan distinta a las demás. Pero esa, será otra historia. ■

06



NASA

05 *A punto de caer. Charly García experimenta la gravedad al arrojarle a una pileta desde el noveno piso de un hotel, el 3 de marzo de 2000.*

06 *Un satélite (como una nave Soyuz acoplada a la Estación Espacial Internacional) también está cayendo a la Tierra, pero le ha sido dado un “empujón” para mantenerse en órbita.*

Notas

1 El perihelio es el punto en la órbita de un planeta más cercano al Sol. La precesión del perihelio de Mercurio se refiere a un “comportamiento” que no se había observado en otros planetas: ese punto se desplaza alrededor del Sol ligeramente cada año, y arrastra la órbita del planeta. Esas irregularidades fueron finalmente explicadas a través de los cálculos realizados por Einstein, y coinciden con las observaciones.

2 Los agujeros negros y las ondas gravitacionales (oscilaciones en el tejido que compone el universo) fueron predichas por Einstein a través de la teoría de la relatividad general, en la que describe la gravedad como una propiedad geométrica del espacio-tiempo.

3 Para ser rigurosos, las fuentes de gravedad según la teoría de la relatividad general son la densidad de masa, de energía, de momento y de presión.

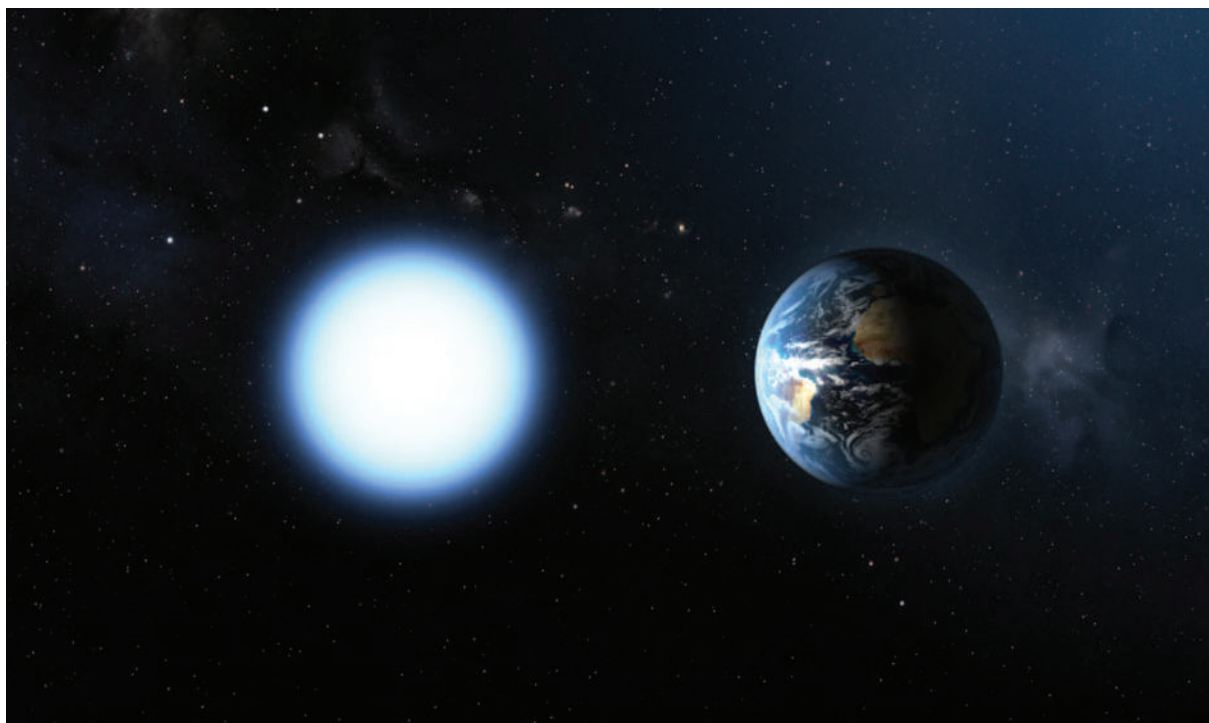
Enanas blancas

ESTRELLAS IMPOSIBLES

Autor: Dr. Guillermo Abramson, Centro Atómico Bariloche, CONICET e Instituto Balseiro.
 guillermoabramson.blogspot.com

*You radiate away your last remaining heat
 Your atmosphere has blown away when you admit defeat (*).
 A-ha, White dwarf*

01

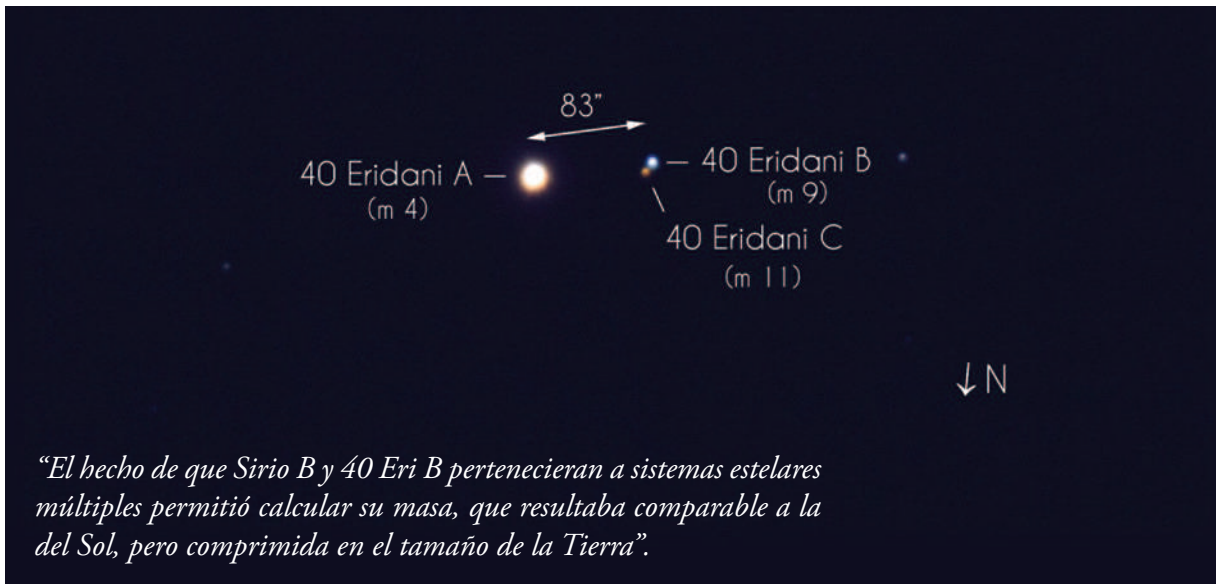


A principios del siglo XX cobró impulso la nueva ciencia de la astrofísica, buscando ir más allá de la acumulación de brillos, posiciones y movimientos estelares que había ocupado buena parte del trabajo astronómico durante el siglo anterior. Los astrónomos empezaron a emplear las técnicas y los modelos teóricos de la física para comprender cómo funcionaban las estrellas. En el camino, se encontraron con más de una sorpresa. Entre ellas, unas estrellas minúsculas y brillantes, que no podían existir: las enanas blancas.

En palabras de su descubridor “oficial”, Henry Norris Russell, la primera persona que supo de la existencia de las enanas blancas fue Williamina Fleming, una de las “computadoras” del Observatorio del Harvard College (ver recuadro). Durante sus años en el Observatorio de Cambridge, Russell había determinado con precisión la distancia a varios cientos de estrellas, lo cual le había permitido calcular su luminosidad intrínseca (la *magnitud absoluta*). Un día, en 1910, Russell estaba visitando al director del Observatorio del Harvard College, Edward Charles Pickering, para revisar las clases espectrales estelares que allí habían compilado en el notable catálogo Henry Draper, en uso hasta la actualidad. Russell no tardó en observar que todas las estrellas

intrínsecamente tenues de su colección eran de las clases G, K o M, correspondientes a colores amarillo, anaranjado y rojo. Todas, salvo una: la estrella compañera de 40 Eridani (40 Eri B), le parecía recordar, no era tan roja. Pickering llamó por teléfono a Fleming, quien un rato después les comunicó que 40 Eri B era de clase A. ¡Blanca! Russell quedó perplejo. La estrella, que brillaba con apenas el 1% de la luminosidad del Sol, era 11 magnitudes más tenue que las estrellas típicas de la clase A. La estrella principal del sistema, 40 Eri A, es de clase K. Siendo de clase A, 40 Eri B debería ser más brillante que ella, no al revés (figura 02).

01 Representación artística de una enana blanca, una estrella del tamaño de la Tierra.



Por otro lado, las leyes de la termodinámica requerían que fuese 150 veces más pequeña (ver el recuadro en Si Muove 26, página 23), es decir, de un tamaño comparable al de la Tierra. ¿Cómo podía ser tan caliente y tan chiquita? Russell estaba perplejo. Pickering lo tranquilizó: *“Estas discrepancias son justamente las que hacen progresar nuestro conocimiento”*.

En 1913 Russell publicó la primera versión de sus resultados, incluyendo un diagrama (figura 03, izquierda) en el cual la gran mayoría de sus estrellas ocupaba una banda estrecha (hoy llamada *secuencia principal*) cuando graficaba la magnitud absoluta como función de la clase espectral. El resto de las estrellas ocupaba una banda separada, de estrellas muy luminosas y rojas. Las leyes de la termodinámica, además, señalaban que estas estrellas eran mucho más grandes que el Sol y todas las estrellas de la secuencia principal. Russell las llamó *gigantes*, como había propuesto Ejnar Hertzsprung, el astrónomo danés que había descubierto la misma relación entre la luminosidad y el color de las estrellas (ver Si Muove 25, páginas 43-49). Poco después se conocieron y comentaron el caso de 40 Eri B. Hertzsprung se mostró escéptico: las estrellas blancas eran siempre muy luminosas, y el propio Russell empezó a tener dudas. Pero en 1914 la clasificación de la estrella fue confirmada por el astrónomo estadounidense Walter Adams, mediante el mejor telescopio del mundo, el reflector de 60 pulgadas del Observatorio de Monte Wilson. Y con el mismo instrumento, meses después, logró obtener un espectro de la tenue estrella compañera de Sirio, conocida desde el siglo XIX, pero de difícil observación por el resplandor de la estrella más brillante del cielo nocturno (figura 04).

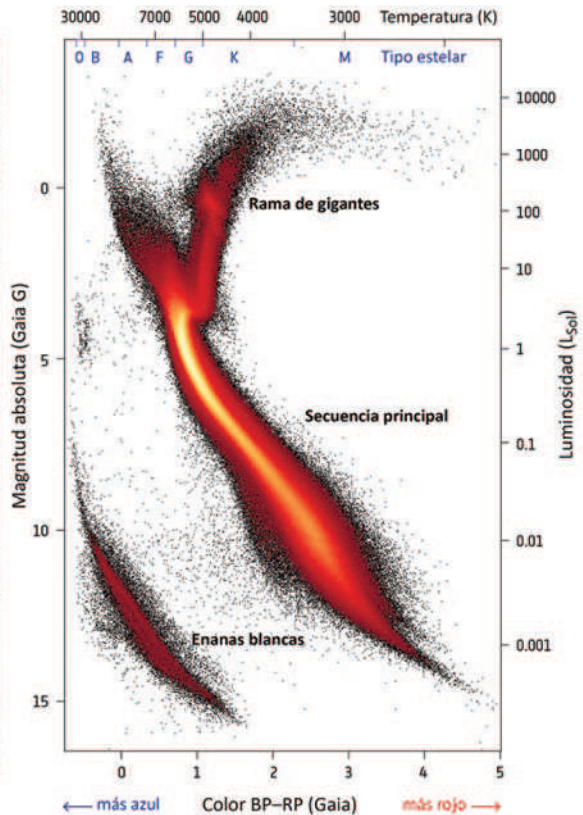
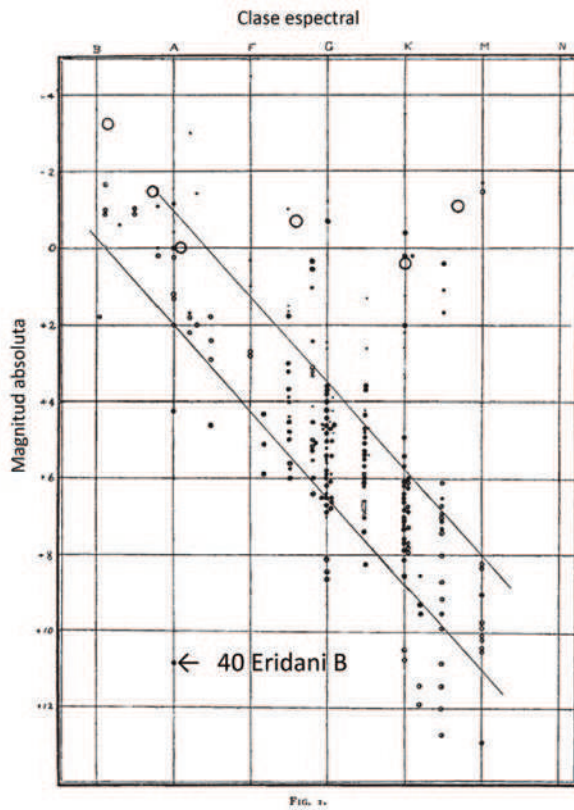
El espectro resultó idéntico al de Sirio (clase A), pero la estrellita era 10 magnitudes más tenue. Adicionalmente, el corrimiento al rojo de las líneas espectrales, por efecto de la relatividad general, le permitió a Adams calcular directamente el radio de la compañera, lo que confirmó

su minúsculo tamaño. Si 40 Eri B era una rareza, dos estrellas ya hacían sospechar la existencia de algún fenómeno desconocido. Seguramente habría más.

Pero el mundo entró en guerra, y recién en 1922 Willem Luyten publicó tres notitas con un puñado de estrellas que parecían del mismo tipo, y acuñó el nombre que se imponía naturalmente: *enanas blancas*. Para 1939 se conocían 18, y hacia 1950 un centenar. Hoy en día se conocen cientos de miles, como muestra el diagrama H-R compilado con el inmenso catálogo del observatorio espacial Gaia (figura 03, derecha).

El misterio de las enanas blancas fue inmediatamente reconocido por Arthur Eddington, director del Observatorio de Cambridge y uno de los astrofísicos más brillantes de principios del siglo XX. El hecho de que tanto Sirio B como 40 Eri B pertenecieran a sistemas estelares múltiples permitía calcular su masa, que resultaba comparable a la del Sol, pero comprimida en el tamaño de la Tierra (figura 01). ¡Una cucharadita de materia de enana blanca pesaría una tonelada! Eddington observó que esto podía ocurrir solamente si los electrones estaban completamente separados de los núcleos atómicos, permitiendo que esos núcleos estuviesen mucho más próximos que en la materia ordinaria. Pero, en tal caso, aparecía una paradoja termodinámica. Si la estrella se enfriara, al recombinarse los átomos y adquirir la densidad de la materia sólida, la estrella se expandiría, haciendo trabajo en contra de la gravedad. Es decir, la estrella *necesitaba energía para enfriarse*. Acertadamente, concluyó que la solución surgiría de la nueva física que se estaba

02 El sistema estelar triple 40 Eridani (también llamado σ^2 Eridani), a 16,3 años luz del sistema solar. La estrella principal, 40 Eri A, lleva el nombre propio Keid y es una estrella de secuencia principal. La segunda es 40 Eri B, de magnitud 9. Es la enana blanca más fácil de observar para los aficionados. La tercera es también una estrella de secuencia principal, una enana roja de magnitud 11.



desarrollando en esos años: la mecánica cuántica. Llegó en 1926, justo para que pudiera incluirla en un apéndice de su libro de divulgación *Estrellas y átomos*, en el que popularizó las enanas blancas como una historia de misterio. Y vino de la mano de otro astrónomo de Cambridge, Ralph Fowler, quien usó una nueva mecánica estadística cuántica, recién inventada por Enrico Fermi en Italia y por Paul Dirac, también de Cambridge. Fowler descubrió que esta nueva teoría, inventada de manera abstracta por la fuerza de la lógica cuántica y distinta de la de los gases normales, tenía una aplicación en el interior de estas paradojas astronómicas. Vamos a tratar de explicarlo de manera conceptual, no solo porque involucra una de las rarezas de la física cuántica,

sino que tiene una inesperada conexión con un fenómeno cotidiano.

Estrellas degeneradas

Aprieto un dedo contra la mesa y siento su dureza, no puedo penetrarla. Aprieto más fuerte y me duele un poco. Ni el dedo ni la mesa se mueven, así que no hay trabajo mecánico realizado, pero siento una energía. ¿Qué es lo que está pasando? Estamos ante un caso de física cuántica en la vida cotidiana. Si bien existe una impresión generalizada de que la física cuántica solo tiene que ver con el mundo microscópico, en realidad se manifiesta también a escala humana. O astronómica. Solo hay que saber mirar. Cuando aprieto el dedo contra la mesa, los electrones de mi dedo se acercan a los electrones de la mesa. Resulta que para los electrones vale el *principio de exclusión de Pauli*: dos electrones no pueden estar en el mismo estado

03 Diagramas de Hertzsprung-Russell, que vinculan la luminosidad (o la magnitud absoluta) de las estrellas, con su temperatura (o su color, o su clase espectral). Izquierda: el diagrama original de Russell, donde cada punto es una estrella. Derecha: más de mil millones de estrellas observadas por el telescopio espacial Gaia. En las regiones más densas, los colores rojos a amarillo representan la cantidad de estrellas en cada punto del diagrama. El diagrama H-R de Gaia es tan rico que ha permitido descubrir fenómenos desconocidos, o apenas conjeturados, sobre las enanas blancas y otros tipos estelares.

04 Sirio, la estrella más brillante del cielo nocturno, es una estrella de la secuencia principal. La acompaña una enana blanca muy difícil de observar por el resplandor de la primaria.

04

Aldo Kleiman



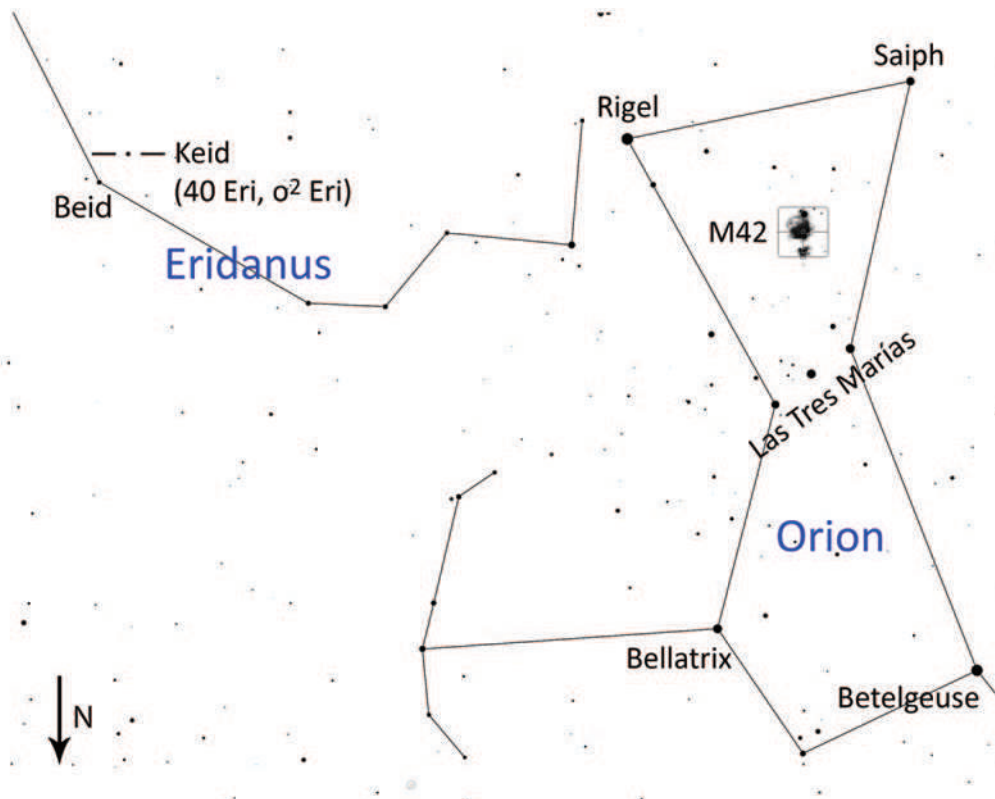
cuántico. El estado cuántico está compuesto de una variedad de parámetros: la energía, el momento lineal, y también la posición, el lugar donde están. Cuando trato de poner los electrones de mi dedo en el mismo lugar que los de la mesa, algunos electrones tienen que pasar a otros niveles de energía, para no compartir el mismo estado cuántico que los que están tratando de ocupar el mismo lugar. Este aumento de energía es lo que siento en el dedo cuando hago fuerza: estoy sintiendo en carne propia el principio de exclusión de Pauli.

La exclusión electrónica entre mi dedo y la mesa es un fenómeno localizado; solamente ocurre donde el dedo hace contacto con la mesa. Para que ocurra de manera volumétrica, en todo un pedazo de materia, la gravedad es la respuesta. Una cantidad de materia suficientemente grande, bajo la acción de su propio peso, podría comprimirse toda ella de tal modo que todos sus electrones sintieran la presencia de los demás, formando un estado de la materia muy distinto del cotidiano, llamado *degenerado*. ¿Cuánta materia? Claramente, esto no es lo que ocurre con la Tierra. Se necesita más materia. ¿Júpiter? Más. Pero si uno pone más materia, se enciende una estrella, y la radiación producida por las reacciones nucleares la mantiene inflada, contrarrestando la tendencia gravitatoria a comprimirla. Pero cuando se apagan las reacciones nucleares al acabarse el combustible, hacia el final de la vida de la estrella, se reinicia la contracción y solo la detiene la degeneración de los electrones. Esto es efectivamente lo que ocurre con la mayoría de las estrellas del universo. Es lo que pasará con el Sol, en un futuro lejano.

Durante la mayor parte de sus vidas, las estrellas convierten hidrógeno en helio en sus núcleos supercalientes. En esta fase permanecen en la secuencia principal que descubrieron Russell y Hertzsprung. Esta reacción de fusión nuclear produce energía, que calienta la estrella y la mantiene “inflada”, en equilibrio con la fuerza de la gravedad, que tiende a comprimirla. Cuando empieza a escasear el hidrógeno en el núcleo, la estrella se comprime; esto agrega nuevo hidrógeno al núcleo y dispara una nueva etapa de fusión. La estrella se recalienta y se infla, abandona la secuencia principal y se convierte temporariamente en una gigante roja mientras empieza a fusionar helio. Finalmente pasa con el helio lo mismo que con el hidrógeno, el núcleo vuelve a comprimirse y la estrella rejuvenece. Durante esta etapa la estrella acumula carbono y oxígeno, productos de la fusión del helio, en el núcleo. A medida que el helio se acaba, el núcleo vuelve a contraerse. El futuro de la estrella depende ahora de su masa: las estrellas de masa como el Sol, o un poco más livianas, o un poco más pesadas, son las que se convierten en enanas blancas. Si la estrella tiene menos de 8 masas solares, nunca llega a tener temperaturas suficientes para fusionar el carbono ni el oxígeno¹. La contracción aporta helio e hidrógeno remanentes como para recalentar el núcleo y expulsar las capas exteriores de la estrella, formando una *nebulosa planetaria* (ninguna relación con los planetas, el confuso nombre obedece a razones históricas). Detrás queda el núcleo estelar desnudo, formado por carbono y oxígeno principalmente, contrayéndose y calentándose, hasta que los electrones están tan apretados que se dege-

05

G. Abramson, Cartes du Ciel





“Una enana blanca no es una estrella, ya que no produce reacciones de fusión nuclear en su interior. Brilla intensamente, simplemente, porque está muy caliente”.

neran, y nace una enana blanca como 40 Eri B o Sirio B. Estrictamente, como vemos, una enana blanca no es una estrella, ya que no produce reacciones de fusión nuclear en su interior. Brilla intensamente simplemente porque está muy caliente, pero es solo un rescoldo estelar, enfriándose muy lentamente. Hipotéticamente, debería ir perdiendo el lustre, pasando por los colores usuales para cualquier asador dominguero: amarillo, naranja, rojo, rojo oscuro, negro. Acabaría convertida en una esfera negra de carbono y oxígeno, una especie de diamante del tamaño de un planeta. El tiempo requerido para llegar a semejante estado, de todos modos, es abrumador, mucho mayor que la edad del universo, de manera que nunca se ha observado y, seguramente, nunca se observará.

Algo distinto puede ocurrir, sin embargo, si la estrella tiene una compañera, como es el caso de 40 Eri B o Sirio B. Sus compañeras eventualmente pasarán por las mismas fases y, al inflarse como gigantes, si la distancia lo permite, empezarán a aportar nuevo hidrógeno a la enana blanca. Esto produce un aumento de su masa y, por consiguiente, de la temperatura en el centro. Otro físico de Cambridge, Subrahmanyan Chandrasekhar (conocido, comprensiblemente, como Chandra), observó que la temperatura de los electrones en el centro de la estrella podía llegar a ser tan elevada que era necesario hacer un cálculo relativista. Descubrió entonces que el comportamiento de la materia de la enana blanca era sutilmente distinto del calculado por Fowler². En particular, si la masa total era mayor que 1.44 masas solares, su fórmula no tenía ninguna solución de equilibrio estable (una condición hoy conocida como *límite de Chandrasekhar*). Es decir, la degeneración de los electrones era insuficiente para equilibrar la fuerza de la gravedad. Al aproximarse al límite de Chandrasekhar, la temperatura

en el centro de la enana blanca alcanza para iniciar la fusión del carbono. La materia degenerada no puede expandirse para disipar la energía producida, y una detonación termonuclear consume y destroza la enana blanca en cuestión de segundos. Esta explosión se llama supernova de tipo Ia (uno-a). Su magnitud absoluta típica es -19; es decir, entre la enana blanca (de magnitud típica +11) y la supernova, hay 30 magnitudes de diferencia de brillo, lo que equivale a un descomunal factor 10^{12} en la luminosidad. Dependiendo de sutilezas del aporte de materia que realiza la compañera, también puede ocurrir que se produzca una explosión termonuclear en la superficie de la enana blanca, sin llegar a destruirla. Son las *novas*, mucho menos energéticas que las supernovas, que incluso pueden volver a explotar si la situación de aporte de hidrógeno sobre la enana blanca persiste. Eventualmente, cuando la compañera se convierta a su vez en enana blanca, y si la primera no detonó, el sistema estará formado por dos enanas blancas, que pueden llegar a colisionar, si sus órbitas lo permiten, explotando como supernova.

En el cielo de Vulcano

En *Star Trek* (en Argentina, *Viaje a las Estrellas*), el planeta Vulcano orbita la estrella principal del sistema triple 40 Eridani. La estrella principal, 40 Eri A, tiene nombre propio: Keid. Es una estrella amarilla, de tipo espectral K, un

05 Mapa del cielo para encontrar 40 Eridani, cerca de la bien conocida constelación de Orión.

06 Representación artística de un planeta rocoso en órbita de Keid, con la enana blanca y la enana roja en la distancia.

poco más chica, menos caliente y la mitad de luminosa que el Sol. ¡Y tiene al menos un planeta!³ Designado 40 Eri Ab, o Keid b, es una supertierra. No sabemos mucho de este tipo de planetas, con tamaño y masa entre la Tierra y Neptuno, porque en nuestro sistema solar no hay ninguno. En todo caso, es muy difícil que sea como Vulcano, ya que está en una órbita muy apretada y tiene una insolación mucho mayor que la de la Tierra. Vulcano es caliente, pero no tanto. Pero, si hay un planeta, seguramente haya más, y quizás alguno de ellos sea rocoso y cálido; un verdadero Vulcano, como el del Sr. Spock.

40 Eri B es, de lejos, la enana blanca más fácil de observar para un aficionado. El sistema es una triple preciosa, porque el amarillo de Keid contrasta con el blanco azulado de la enana blanca, y con el rojo de la componente C, una enana roja mucho más tenue (figura 02). Las dos estrellas menores están relativamente cercanas entre sí (período de 230 años, como si fueran Plutón y el Sol), pero orbitan bastante lejos de Keid, una vez cada 8000 años. Eridanus, el río Erídano, es una constelación gigante y es fácil perderse en sus meandros. Pero Keid está cerca de Orión, y es fácil encontrarla si partimos desde Rigel (figura 05). Imaginen, cuando la observen, que en el cielo de Vulcano

brilla no un sol sino tres, y que, aunque Vulcano no tiene luna (capítulo 1 de la temporada 1), sus noches suelen estar iluminadas por una estrella rara, 15 veces más brillante que Venus en nuestro cielo, con una compañera roja con el brillo de la Estación Espacial Internacional. ■

Notas

(*) "Radiás todo el calor que te queda, tu atmósfera se vuela cuando admitís la derrota". A-ha, Enana blanca.

1 Si la estrella es suficientemente pesada, su destino es otro: explotará como supernova de tipo II. El núcleo estelar se contrae hasta alcanzar una densidad aún más increíble que la de las enanas blancas, comparable a la de un núcleo atómico. La mayor parte de las veces lo que queda es una *estrella de neutrones*, sostenida por la degeneración de los neutrones, que también son fermiones. Solo las más pesadas de todas logran vencer a Pauli por completo y formar un agujero negro (que no es materia, sino pura geometría).

2 Chandrasekhar recibió el Premio Nobel en Física en 1983, el año que yo empecé mi carrera de física en la universidad, más de 50 años después de sus trabajos. Lo compartió con otro Fowler, William, quien junto a Fred Hoyle y el matrimonio Burbidge, desarrollaron la teoría de cómo se forman los elementos químicos en las estrellas.

3 El planeta en órbita de Keid, conjeturado por variaciones en la velocidad de la estrella, es todavía controversial y podría no existir.

Las computadoras de Harvard

Hoy en día las computadoras son máquinas. Pero hasta la revolución de las máquinas electrónicas programables, las computadoras eran personas, generalmente chicas, que hacían buena parte del trabajo de cómputo tanto en instituciones científicas como en empresas. Un caso es el que muestra la película *Talentos Ocultos* (*Hidden Figures*, 2016), en el origen de la Era Espacial en la década de 1960, cuando incluso ya existían computadoras electrónicas. Williamina Fleming, "la primera persona que supo de la existencia de las enanas blancas", nació en Escocia y emigró a Boston, EE.UU., en 1871, a los 21 años. Madre soltera, consiguió trabajo de mucama en la casa del Profesor Pickering, director del Observatorio del Harvard College. La esposa de Pickering no tardó en notar que Mina (como la llamaban todos) tenía talentos más allá de las tareas domésticas, y le recomendó a su marido que la emplease en el Observatorio. Pickering le asignó inicialmente tareas administrativas, pero también le enseñó a analizar los espectros estelares que el Observatorio estaba obteniendo como parte de un proyecto de largo plazo, financiado por Mary Anna Draper en memoria de su marido, el fallecido astrónomo Henry Draper. Fleming se convirtió en una de las primeras computadoras de un equipo que llegó a ser legendario, conocido durante mucho tiempo con el desafortunado nombre de "el harén de Pickering". Fleming llegaría a ser la mano derecha de Pickering, en los hechos una vicedirectora sin cargo, y finalmente Curadora de Placas Astronómicas de Harvard, la primera



Las computadoras de Harvard en 1891. Durante una visita de Mary Anna Draper (sentada, a la derecha), Mina Fleming, de pie junto a ella, le muestra los espectros estelares del catálogo.

mujer con este cargo. Durante toda su destacada carrera abogó por la participación de las mujeres en la ciencia y su trato igualitario con los varones. La clasificación de los espectros que propuso inicialmente Fleming fue modificada por otra miembro del equipo, Annie Jump Cannon, autora de la "clasificación espectral de Harvard", que es la que se usa actualmente. Cannon se hizo cargo de la dirección del equipo a la muerte de Pickering, en 1919. Otra miembro destacada de las computadoras de Harvard fue Henrietta Leavitt, quien descubrió que el brillo de las estrellas variables llamadas *cefeidas* estaba relacionado con su período de variación. Esto abrió la puerta a un método fantástico para calcular distancias estelares, en particular en otras galaxias, y que hoy en día forma parte del segundo escalón de la escalera de distancias cósmicas, entre la paralaje estelar y las supernovas de tipo Ia (ver artículo en Si Muove 16, páginas 31-37).

2 de octubre de 2024

ECLIPSE ANULAR DE SOL EN SANTA CRUZ

01



Enzo de Bernardini

Un eclipse anular como este se da cuando la Luna, debido a su tamaño aparente en el cielo, no alcanza a cubrir por completo el disco solar. Las localidades de Puerto Deseado, Puerto San Julián y la Cueva de las Manos serán, entre otros, los lugares más beneficiados.

Viajar y recorrer nuestro país es algo inigualable. Decenas -quizás, cientos- de paisajes y ambientes completamente diferentes, además de sus habitantes y sus costumbres, nos indican que no nos alcanzaría la vida para conocerlos todos. A veces viajamos para reconocer alguno de esos paisajes famosos, o para estar en contacto con la naturaleza o, “simplemente”, para buscar lugares oscuros para observar el cielo. Todo eso junto ocurre cuando recorremos muchos kilómetros para ir a ver un eclipse, cualquiera sea su característica.

El próximo miércoles 2 de octubre puede ser una de esas oportunidades, ya que habrá un eclipse anular que resultará visible en el norte de la provincia de Santa Cruz. Puerto Deseado y Puerto San Julián son las principales localidades dentro de la franja principal, mientras que El Chaltén, Perito Moreno y Los Antiguos quedan afuera por poco. En el resto del país será parcial, incluyendo Buenos Aires y alrededores.

Con diferencia de unos pocos minutos según la localidad, entre la costa y la cordillera, todo el eclipse transcurrirá entre las 16:00 y las 18:20 aproximadamente, y el máximo será cerca de las 17:25. Eso indica que el Sol y la Luna estarán relativamente bajos sobre el horizonte oeste, entre 36° y 10° de altura durante todo el evento. La anularidad durará 6 minutos y 20 segundos en el sector central de la franja del eclipse. Mientras más cerca del borde, menor será el tiempo: tres minutos y medio en Puerto Deseado, por ejemplo.

En todo el resto del país será parcial: 83 % en El Calafate; 71 % en Ushuaia, Puerto Madryn y El Bolsón; 56 % en Bahía Blanca, 53 % en Buenos Aires, 33 % en Córdoba, 22 % en Corrientes y 15 % en Puerto Iguazú y Jujuy.

02



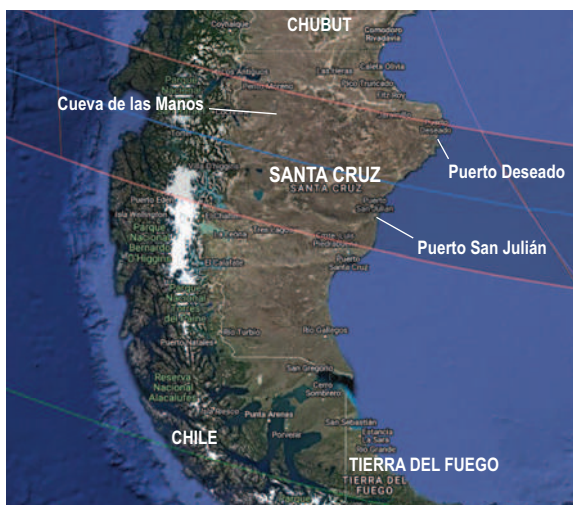
Mapa interactivo de Xavier Jubier
http://xjubier.free.fr/en/site_pages/eclipses.html

01 Secuencias del eclipse anular del 16 de febrero de 2017 observado desde el sur de Chubut.

02 El recorrido de la franja de la anularidad (como también el de un eclipse total) tiene varios miles de kilómetros. El eclipse comienza en 1, y desde allí se verá al amanecer. En 2, será la mitad de su recorrido y la parte principal se da al mediodía. Y finalizará en 3, al anochecer. El eclipse será visible en forma parcial en el resto de nuestro país.

03

Mapa interactivo de Xavier Jubier



¿Por qué será un eclipse anular y no total?

En nuestro cielo, el Sol y la Luna parecen tener el mismo tamaño. Pero, en esa fecha, la Luna estará cerca de su apogeo, es decir, el punto de su órbita más alejado de la Tierra (lo que ocurre una vez al mes), dado que sigue una órbita elíptica alrededor de nuestro planeta. Por eso, en el cielo, la Luna será un poquito más chica que cuando se encuentra más cerca. Por su parte, el Sol estará a una distancia media, ni la más lejana, ni la más cercana a la Tierra. En esa fecha, el Sol se encontrará a 150 millones de km de la Tierra, mientras que la Luna estará a 406.515 km. Esas distancias divididas entre sí, nos da una relación muy similar a la de los diámetros de los mismos astros divididos entre sí ($1.400.000 / 3500$ km). Por eso, el tamaño aparente del Sol y de la Luna en nuestro cielo es tan parecido. Las diferencias son prácticamente imperceptibles a simple vista, pero al pasar la Luna justo por delante del Sol durante el eclipse, se notarán. Por lo tanto, la Luna se verá un poco más chica que el Sol y no alcanzará a cubrirlo por completo. En el momento del máximo del eclipse, alrededor de la Luna se verá un “anillo” de Sol, por detrás. Así, como en

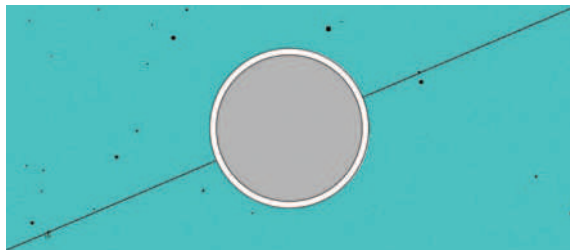
04

Mariano Ribas



05

SkyMap



cada eclipse anular, el oscurecimiento no será total. En este caso será del 85 % y no se hará de noche completamente. La relación de tamaño entre la Luna y el Sol será de 0,92467. El Sol medirá en nuestro cielo unos 32' (32 minutos de arco; es decir, poquito más de medio grado. $1^\circ = 60'$), mientras que la Luna medirá 29' 26" (29 minutos, 26 segundos de arco. $1' = 60''$).

La anularidad del último eclipse de este tipo visto en nuestro país, el de febrero de 2017 en el sur de Chubut, duró apenas un minuto. La larga duración de la anularidad en este caso se deberá al menor tamaño aparente de la Luna durante este eclipse.

En Buenos Aires, el eclipse será parcial y comenzará a las 16:23, con el Sol a una altura de 31° sobre el horizonte. El máximo será a las 17:37, con el Sol a 16° de altura, y la Luna cubrirá un 53,3 % del Sol. El eclipse finalizará a las 18:43 con el Sol a punto de ocultarse, apenas 2° sobre el horizonte. ■

06



Mariano Ribas

03 El ancho de la franja de anularidad cubrirá una superficie de unos 300 km de norte a sur. Quien se encuentre en el centro (franja azul), verá una duración mayor de la anularidad (más de 6 minutos) que quien se encuentre más cerca del borde (franja roja). Mientras más cerca del borde esté, más corta será la duración de la “anularidad”.

04 Eclipse anular del 16 de febrero de 2017. Se puede apreciar la diferencia en el tamaño de la Luna con respecto al Sol entre este eclipse y el del 2 de octubre de 2024 (abajo).

05 Así será la relación de tamaños entre el Sol (blanco, por detrás) y la Luna (gris, por delante) durante la anularidad del eclipse del 2 de octubre de 2024.

06 Cómo observarlo. Nunca se debe observar el Sol sin la protección adecuada. Se recomienda utilizar los clásicos anteojitos para ver eclipses o instrumentación adecuada, previamente chequeada, como telescopios con filtros.

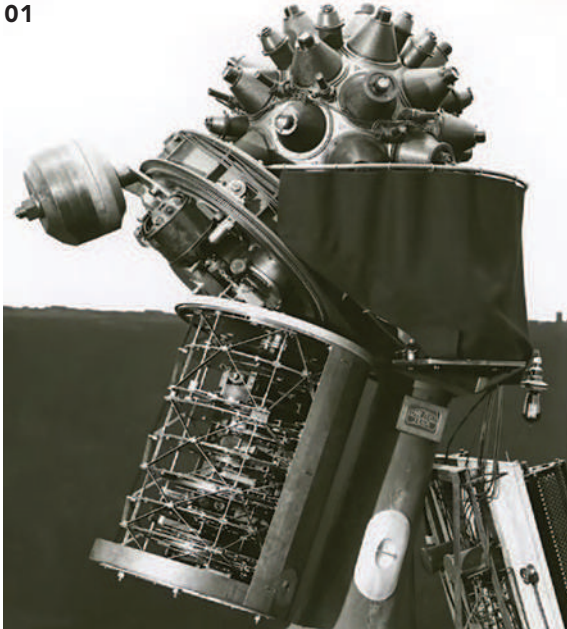
El gran simulador cumple

100 AÑOS

Autora: Dra. Rocío Bermúdez, Planetario de la Ciudad de Buenos Aires Galileo Galilei.

01

Zeiss Planetarium History



Además de recrear cielos espectaculares, los planetarios son partícipes de la enorme tarea de divulgar las ciencias astronómicas y ayudan a fomentar vocaciones científicas. Celebrando el primer centenario de estos instrumentos, hacemos un recorrido de su historia.

“¿Somos humanos porque miramos las estrellas o miramos las estrellas porque somos humanos?”. Con esta pregunta Neil Gaiman introduce una historia de amor y fantasía en su novela *Stardust*—que poco tiene que ver con lo que conocemos sobre el universo a través de la ciencia—, y plantea la intrínseca relación entre los seres humanos y las estrellas. Mirar el cosmos es una actividad tan

vieja como la humanidad misma, una constante que atraviesa la historia y las civilizaciones, y que afortunadamente sigue hasta nuestros días.

Si bien la observación del cielo nocturno ha evolucionado conforme los avances tecnológicos, pasando del ojo desnudo a los telescopios ópticos, los radiotelescopios e, incluso, aquellos que se encuentran en órbita, esta no es la única forma de (ad)mirar el cosmos.

En 1913, Oskar von Miller, fundador del *Deutsches Museum* en Munich, Alemania —un importante museo de ciencia y tecnología—, tuvo la idea de fabricar un aparato de proyección que pudiera simular el movimiento de los astros. Se lo planteó a **Zeiss**, empresa alemana reconocida por sus instrumentos ópticos. Pero esta idea se vio aplazada debido a la Primera Guerra Mundial¹, y no fue hasta terminado el conflicto que la compañía emprendió este proyecto en Jena, Alemania.

Así, el 21 de octubre de 1923, el primer planetario iluminó el recién construido domo del *Deutsches Museum* con 4500 estrellas. Se trataba de un instrumento óptico-mecánico de proyección de luz que fue tan impactante que el público presente le concedió el título de “El milagro de Jena”. Sin embargo, fue el 7 de mayo de 1925 que el Planetario del *Deutsches Museum* inició operaciones. Desde entonces, los planetarios empezaron a producirse y distribuirse en los distintos museos del mundo.

Máquinas estelares, mecanismos del cosmos

Pero la historia de los planetarios inicia mucho tiempo

01 El primer proyector planetario. El cielo simulado constaba de 4500 estrellas a las que se les podían sumar el Sol, la Luna y los planetas visibles: Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno.

02 El Sistema Planetario Copernicano es un instrumento mecánico construido en Alemania en 1901 y se exhibe en nuestro museo.

02





atrás, cuando la palabra solo hacía referencia a los dispositivos mecánicos para representar el movimiento de los planetas y que, muchas veces, carecían de estrellas². Hoy en día podemos considerarlos modelos móviles del sistema solar, como el instrumento Copernicano que se encuentra en el museo de nuestro Planetario (imagen 02).

Uno de los primeros dispositivos de este estilo es el que en inglés lleva el nombre de *orrery* y que, como dato curioso, se traduce al español como planetario mecánico. Cabe mencionar que una particularidad de estos instrumentos es que representan el cielo visto desde el exterior y centrado en el Sol. Sin embargo, a mediados del siglo XVII, el alemán Andreas Bösch y el holandés Adam Olearius construyeron una esfera de 3,11 metros de diámetro, en la que pueden entrar 12 personas. El exterior se muestra como un gran globo terráqueo, mientras que su interior se encuentra decorado con una hermosa representación del cielo de ese entonces, que incluye los elementos celestiales de moda. Este proyecto se construyó a pedido del Duque de Schleswig-Holstein-Gottorf, por lo que lleva el nombre de Globo de Gottorf. El original aún existe y se encuentra en Rusia. Esta estructura se considera el antecesor de los planetarios modernos, puesto que se observa el cielo centrado en el observador interno. Luego, ya en el siglo XX, volvemos al momento donde Oskar von Miller inició la empresa de encontrar el mejor método para representar el cielo nocturno de forma artifi-

cial. Junto con Max Wolf, ex director del Observatorio de Heidelberg, desarrollaron un planetario copernicano. Este planetario es una habitación circular de 12 metros de diámetro en cuyo techo se encuentran el Sol y los elementos del sistema solar. El movimiento se realizaba mediante rieles y mantenía la relación entre los periodos de revolución de los planetas. Además, en las paredes se encontraban representadas las constelaciones del zodiaco, con ayuda de pequeñas lámparas para las estrellas más brillantes. La construcción de esta sala se hizo a la par de la fabricación del primer proyector planetario. Sin embargo, el éxito del proyector marca el fin del desarrollo de los planetarios mecánicos.

Así, desde hace un siglo, la palabra “planetario” hace referencia tanto al proyector planetario como al lugar donde se encuentra. Además, hoy en día, siendo un popular instrumento para la socialización de la ciencia, podemos encontrar planetarios en todo el mundo.

El universo en una cúpula latinoamericana

Ante el gran éxito de los planetarios en Alemania, varios países buscaron hacerse de un proyector. De esta manera, Rusia, Estados Unidos, Países Bajos, Bélgica y Japón fueron los primeros en construir edificios planetarios y ofrecer este gran espectáculo.

En Latinoamérica, el primer planetario fue el de Montevideo, inaugurado en 1955, que se encuentra activo hasta el día de hoy. Sin embargo, este no fue un Zeiss, sino un instrumento Spitz, de origen estadounidense. En 1936, Armando Spitz buscó llevar la magia de los planetarios a un precio más accesible y de menor tamaño. Un modelo B, del que solo se construyeron tres ejemplares, es el que aún se encuentra operativo en Uruguay, aunque no se usa a diario³. Pero la fiebre de los planetarios recién empezaba, y San Pablo fue la segunda ciudad de la región en tener uno propio. Con un modelo Zeiss, adquirido en 1952, el Planetario de Ibirapuera se inauguró en 1957, uno de los tres que actualmente se encuentran en esa ciudad brasileña.

En Argentina ya había sido solicitada la “necesidad y urgencia de la adquisición del planetario” en 1932 y en 1938. Sin embargo, fue hasta 1959, motivado por las obras de Uruguay y Brasil, que se ordenó la adquisición del instrumento planetario, así como la construcción del edificio en la entonces Municipalidad de Buenos Aires. Se le encargó el diseño al arquitecto Enrique Jan quien, junto al ingeniero calculista Carlos Laucher, iniciaron en 1960 la proyección del Planetario Galileo Galilei, finalmente inaugurado el 13 de junio de 1967⁴.

La ciudad de Rosario también aprobó la edificación de un planetario, así como un observatorio y un museo de ciencias, para formar un complejo astronómico. El proyector fue adquirido en 1962. Sin embargo, este planetario no fue





inaugurado hasta 1984, una vez restaurada la democracia. Para el primer alunizaje, las ciudades de Caracas (1961), la Ciudad de México (1967) y Bogotá (1969) ya contaban con su propio planetario. Después se sumarían Chile, Ecuador, Perú y Bolivia. Incluso, varios países irían por su segundo, tercero y varios planetarios más para cubrir la oferta en sus ciudades más importantes.

Hasta el día de hoy, la Asociación de Planetarios de América del Sur (APAS) reporta más de 120 planetarios en la región, sin contar los que se encuentran en México y Centroamérica. El avance de la tecnología ha hecho esto posible, variando el tamaño y la practicidad de los proyectores, adaptándose a las necesidades de cada lugar.

Tecnología en movimiento

Quienes hayan visitado el Planetario Galileo Galilei reconocen la gran “hormiga”, la que recreó el cielo de Buenos Aires por 44 años. Esta forma, distinta al diseño de 1923, tiene apariencia de pesa (*dumbbell*, en inglés) y pertenece al modelo Mark IV. De hecho, con este diseño, Zeiss construyó los modelos Mark desde el II hasta el VI. Sin embargo, desde el modelo Mark VII el diseño cambió a una forma de “huevo”, similar al Megastar (de fabricación japonesa) que ahora se encuentra en el centro de la sala de nuestro planetario.

Si bien Zeiss fue el primero en crear este maravilloso artefacto, la fascinación por el cosmos impulsó a otros a involucrarse en la fabricación de instrumentos planetarios. Tal es el caso de los Laboratorios Spitz, antes mencionado, o la compañía Ohira Tech, los fabricantes de los Megastar. De igual forma, la tecnología ha cambiado. Los proyectores planetarios ya no son los enormes artefactos óptico-mecánicos de hace un siglo, aunque aún existen y algunos se encuentran en uso. Hoy en día, la representación de los cielos nocturnos a base de millones de estrellas se realiza con instrumentos más pequeños y, frecuentemente, ayudados con tecnología digital. Muchos planetarios (los edificios) utilizan varios proyectores, algo similar a lo que ocurre en un cine,

para lograr la reproducción de grandes shows astronómicos. Esto ha hecho que, en la actualidad, la palabra planetario se refiera principalmente a la edificación.

Si bien los diseños de los edificios son variados, hay un aspecto común. Al buscar que la representación del cielo sea como la misma esfera celeste, la pantalla de proyección ha sido el interior de las cúpulas. De hecho, los proyectores y muchas funciones son 360° o *fulldome*, en referencia a una proyección en una semiesfera, aunque es común encontrar planetarios que utilizan semidomos.

Con el cambio de tecnología y la miniaturización de los electrónicos, ahora existen muchos planetarios móviles: domos inflables con un proyector planetario en su interior. Estos dispositivos cumplen una función muy importante de llevar la experiencia planetaria a la gente. Pueden instalarse en espacios cerrados o al aire libre, y pueden empacarse para ser llevados a distintos lugares.

No cabe duda que en estos 100 años los planetarios han demostrado ser una herramienta invaluable para la comunicación pública de la ciencia, así como para la educación. Con la capacidad de transportarnos a los rincones más lejanos del universo, los planetarios seguirán siendo faros de conocimiento y una puerta a un maravilloso viaje hacia las estrellas. ■

Notas

1 <https://www.zeiss.com/corporate/en/about-zeiss/past/history/technological-milestones/planetariums.html>

2 Acker, A. (2009). Planetariums, theaters of the Universe. *Proceedings of the International Astronomical Union* 5(S260), 465-474. DOI:10.1017/S1743921311002687.

3 <https://montevideo.gub.uy/institucional/dependencias/planetario-municipal>

4 <https://modernabuenosaires.org/noticias/el-planetario-de-buenos-aires>

06



Sabrina Mottino

03 El globo de Gottorf, en Rusia.

04 Con la idea de mostrar a los visitantes del museo de Munich los movimientos de los astros, se construyó este planetario copernicano, que dio inicio a la compañía Zeiss como fabricante de estos instrumentos.

05 El proyector planetario original que funcionó desde 1967 a 2011. Actualmente se encuentra en el anillo del Planetario.

06 El Planetario de la Ciudad de Buenos Aires Galileo Galilei tiene una arquitectura única en el mundo.





Kepler por Kepler

DESARMANDO EL MISTERIO CÓSMICO

Autor: Johannes Kepler, para revista *Si Muove* (*).

Como tantos otros investigadores a través de la historia, me dejé llevar por la idea de un universo perfecto. En estas líneas pretendo contar cómo llegué a una conclusión diferente. Repasando los trabajos de mi vida, puede entenderse lo que significa una verdadera investigación científica.

No deberíamos preguntarnos por qué la mente humana se preocupa en desentrañar los secretos de los cielos. Yo creí en un universo simple, geométrico, que responde a leyes matemáticas precisas, firmes y claras, fácilmente verificables. *Para mí, es impensable la idea de un universo infinito.*

Me propuse demostrar que el universo no está manejado por la divinidad, sino que funciona como un reloj. Me pregunté por qué había solo seis planetas (Mercurio, Venus, Tierra, Marte, Júpiter y Saturno), y no veinte o cien. Como lo enunció Copérnico medio siglo atrás, con el Sol en el centro (*por razones físicas o, si prefieren, metafísicas*), pensé que las órbitas de los planetas deberían apoyarse en un sistema sólido y geométrico, y busqué una teoría que diera sentido matemático al número de planetas y a sus distancias al Sol. No soy de los que afirman una idea, y punto. Yo estoy dispuesto a dedicar toda mi vida a confrontar la validez de una hipótesis con los registros astronómicos. Dos mil años atrás, los griegos creían que el cielo estelífero era una gran esfera que encerraba una Tierra esférica situada en el centro. Los matemáticos pitagóricos habían

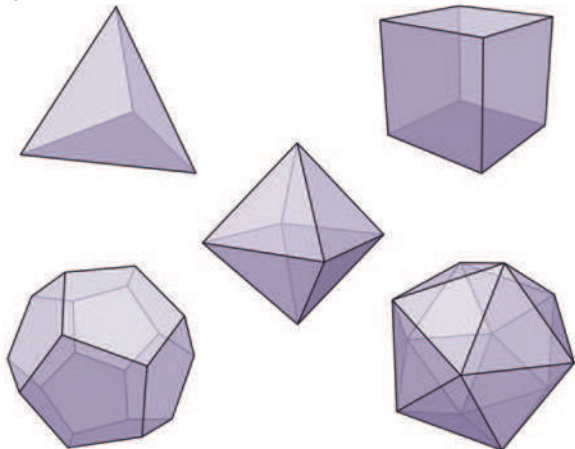


descubierto que solo pueden existir cinco figuras cuyos lados son polígonos regulares iguales entre sí (figura 01). Cualquier otra combinación, con otras caras, no resultaría simétrico como esos cinco sólidos regulares. Y sostenían que el movimiento de los planetas estaba regido por la armonía y las escalas musicales.

Una tarde de verano, mientras daba una clase a unos pocos alumnos de la escuela de Graz, Austria, *tuve una revelación en la que creí haber comprendido los secretos del Creador.* Intentaba asociar astrológicamente las relaciones temporales entre las conjunciones de los dos planetas más lejanos, Saturno y Júpiter, que se repiten cada 20 años (figura 02). La última conjunción, la de 1583, había provocado tantas profecías catastróficas que, en Roma, el papa prohibió las predicciones y los horóscopos. Pero en los países protestantes la práctica adivinatoria era moneda corriente, sobre todo en una Europa dominada, entre las guerras y la peste, por el miedo.

Había dibujado en la pizarra un círculo grande y, dentro de él, un triángulo; y dentro del triángulo, otro círculo más pequeño (figura 03). Noté que la relación entre

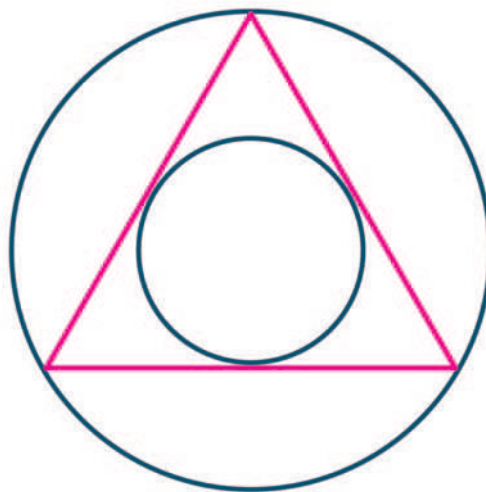
01



ambos círculos era la misma que entre las órbitas de Saturno y Júpiter. Entonces, entre Júpiter y Marte dibujé un cuadrado, y entre Marte y la Tierra, un pentágono; y entre la Tierra y Venus, un hexágono. Pero algo no encajaba. Y pensé, *por qué buscar formas bidimensionales y no tridimensionales*, si las órbitas, al fin y al cabo, no están dibujadas en una pizarra sino dispuestas espacialmente. Pensé que la razón por la que solo hay seis planetas, es porque sus órbitas se apoyan dentro de los cinco sólidos pitagóricos, uno dentro de otro. Si hay seis planetas, hay cinco intervalos entre ellos, donde se ubican esas cinco figuras geométricas perfectas.

Me propuse demostrar que Dios, al crear el universo y establecer el orden del cosmos, tuvo ante sus ojos los cinco sólidos regulares de la geometría conocidos desde los días de Pitágoras y Platón, y que ha fijado así el número de planetas y las relaciones de sus movimientos. Creé un modelo para describir las distancias entre las órbitas de los planetas y el Sol, apoyadas en figuras geométricas transparentes, como andamios que sostienen todo el sistema. Entre las estrellas fijas y la órbita de Saturno, se coloca un cubo. Dentro del cubo, otra esfera que contiene la órbita de Júpiter, apoyada en un tetraedro o pirámide. Sobre el tetraedro, la esfera de la órbita de Marte; y allí dentro, un dodecaedro (formado por doce pentágonos) que sostiene la órbita terrestre. Entre la Tierra y Venus, un icosaedro (veinte triángulos equiláteros); y entre Venus y Mercurio, un octaedro (ocho triángulos equiláteros). En el centro de todo, el Sol (figura 04). Esas figuras son tan perfectas que cada una puede estar enmarcada en una esfera, de modo tal que cada uno de sus vértices se apoye en la esfera externa. Y por dentro, pueden contener otra esfera, y que el centro de cada una de sus caras toque la esfera interna. Y no existe otra figura, más que esos cinco sólidos regulares, que cumpla esas características, para que puedan contener seis órbitas planetarias perfectamente.

Pensaba, además, que la velocidad de los planetas en sus órbitas debía ser musicalmente armónica. Las notas se irían fundiendo unas con otras, sin intervalos, ya que los



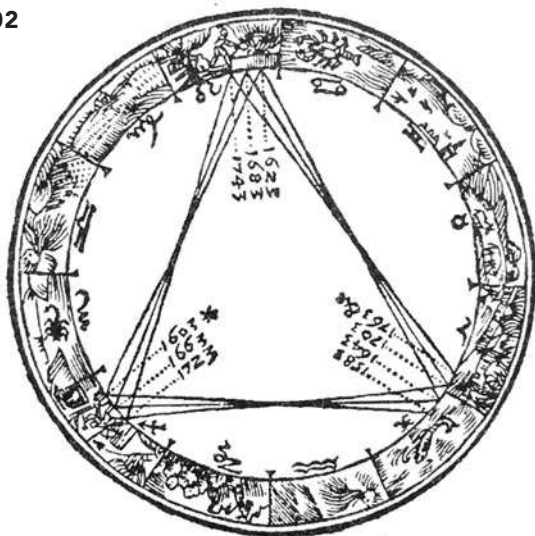
03

planetas se mueven suavemente y no saltan de un paso a otro. Y las armonías no se repetirían, ya que los planetas no volverían todos a la vez a sus posiciones iniciales. Solo había un espacio absurdamente grande e innecesario entre Marte y Júpiter, por lo que allí, donde parece no haber nada, *interpongo un planeta*, demasiado pequeño como para ser observado¹.

Esa revelación le dio un vuelco a mi vida y me llevó a querer demostrar el plan de Dios, el Geómetra. La llamé el Misterio Cósmico. *La Geometría existía antes de la Creación. Es co-eterna con la mente de Dios. La Geometría ofreció a Dios un modelo para la Creación. La Geometría es Dios mismo.* Y el Sol es la metáfora de Dios, alrededor del cual gira todo. Pero la mayoría de la gente se cree en el centro del universo, ya que *es imposible que la razón, sin una instrucción previa, pueda dejar de imaginar que la Tierra es una especie de casa inmensa con la bóveda del cielo situada sobre ella*.

Mis colegas astrónomos cuestionaron tanto ornamento en mi sistema, y algunos me acusan aún de loco. Hasta ahora, ninguno se ocupó de las causas físicas de los movimientos del cielo, y solo hacen descripciones celestes sin cuestionar la física aristotélica. Solo Galileo Galilei dice que el universo está escrito en el lenguaje matemático, lo que permite solucionar muchos problemas de la física que, desde la antigüedad, se explican mediante modelos geocéntricos. Mi primer libro, el *Misterio Cósmico*, publicado a mis 25 años, contuvo la primera aparición impresa, después de Copérnico, del heliocentrismo. *Ese librito determinó la dirección de toda mi vida, de mis estudios y trabajos. Los caminos por*

02

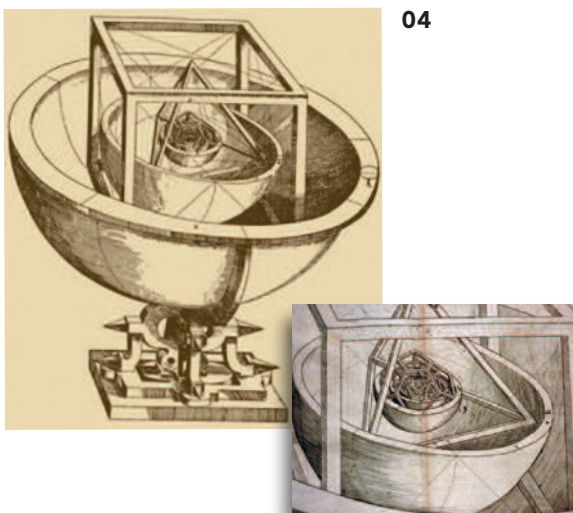


01 Los cinco sólidos regulares: tetraedro, cubo, octaedro, dodecaedro e icosaedro.

02 Dibujo astronómico que Kepler realizó en la pizarra durante una clase en la escuela de Graz.

03 Dos círculos y un triángulo. “Noté que la relación entre ambos círculos era la misma que entre las órbitas de Saturno y Júpiter”.

04



los que se llegan a comprender los asuntos celestes me parecen tan maravillosos como esos mismos asuntos.

El destino

Nací el 27 de diciembre de 1571 en Weil der Stadt, Alemania, a las 2:30 de la tarde, tras un embarazo que duró 224 días, 9 horas y 53 minutos. Mi familia siempre se preguntó cómo hice para sobrevivir habiendo sido tan frágil y enfermizo, víctima de viruela, asiduas fiebres y llagas en la piel, cuando no de golpizas por parte de mis compañeros.

A los seis años, mi madre me llevó a una colina para ver el famoso cometa de 1577. Los cometas no presagiaban nada bueno, y ese año habían pasado tres. Resultó que los cometas eran tan comunes como las manzanas. Uno trajo un terremoto, otro precedió unos volcanes, otro anunció el asesinato de Julio César... No sé, tal vez, eran todos inventos, pero cómo íbamos a saberlo. A los nueve, mis padres me llevaron afuera para ver el eclipse de Luna. Apareció completamente roja.

Mis estudios se iniciaron en escuelas protestantes con la idea de seguir una carrera eclesiástica. Teología, griego, latín, música y matemáticas eran la excusa para, en realidad, adiestrar a los jóvenes en contra del catolicismo romano, a favor del luteranismo. Pero mi dios era el poder creativo del Cosmos, y la geometría de Euclides representaba su perfección.

A los 17 años llegué a la Universidad de Tübingen, en el ducado de Wurtemberg. Allí conocí y adopté la hipótesis de Copérnico, gracias a mi gran maestro Maestlin, el primero en aceptar y enseñar realmente la idea heliocéntrica. Él fue quien se la enseñó a Galileo. Pero hasta ese momento, era una hipótesis que se discutía en secreto. *En mi opinión, Copérnico tardó en publicarla porque temía el efecto que ejercería sobre las mentes humanas el hecho de quitar la Tierra del centro del mundo y convertirla solo en un planeta más.*

Quizás cansados de mis debates a favor del copernicanismo, las autoridades decidieron que abandonara una poco prometedora carrera eclesiástica, y me destinaron a Graz, en Austria, para reemplazar a un fallecido maestro de matemáticas en la escuela secundaria. Tenía 23 años, y poco después empecé a confeccionar para los nobles almanaques astro-

nómicos, pronósticos meteorológicos y horóscopos personales, es decir, generalidades ambiguas que podrían encajar en cualquier persona. *Dios proporciona a cada animal sus medios de sustento, y al astrónomo le ha proporcionado la astrología. Pero la astrología puede causar un daño enorme cuando explota la credulidad humana.*

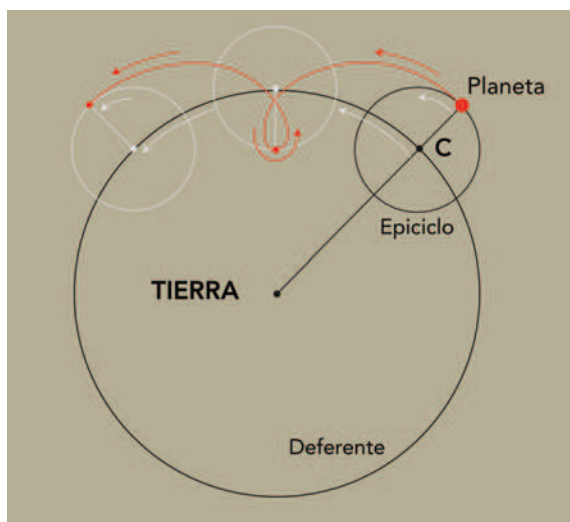
Allí, el 9 de julio de 1595, cuando ya se notaba que la enseñanza no era lo mío, me visitó aquella revelación de los sólidos regulares que iba a alterar radicalmente el futuro de la astronomía. Pedí un subsidio para confeccionar un modelo gigante en plata y bronce, adornado con joyas, para ser expuesto en la entrada del palacio del duque Federico I de Wurtemberg. Las tuberías serían huecas para proporcionar bebidas a los que se detuvieran a admirarlo. Cada planeta expendería una bebida distinta: *aqua vitae* para el Sol, coñac para Mercurio, hidromiel para Venus, agua para la Luna, vermut para Marte, vino blanco para Júpiter. Y Saturno sería amargo, para que quienes tuvieran la poca erudición de servirse de él quedaran en ridículo. Pero solo me dieron algo de dinero para armar un modelo de hilos y cartón, que completé con tiras de papel y engrudo. Menos mal porque, de todas maneras, no terminaba de encajar.

Entonces, me di cuenta de que necesitaba algo de lo que no disponía: una sucesión de observaciones precisas realizadas a lo largo de muchos años. Algo que no me había preocupado en hacer, ya que mi vista nunca fue buena, y tampoco contaba con algún instrumento que me permitiera ver más allá. El que sí tenía las observaciones era el astrónomo más prestigioso de la época, Tycho Brahe, producto del trabajo de toda su vida. (Recomiendo el interesante artículo aparecido en la revista Si Muove 17, en el que Tycho cuenta su propia historia).

El viejo Tycho

Tycho Brahe (se pronuncia "Tijo") fue un excéntrico astrónomo danés adornado por una nariz de oro (había perdido la suya en un duelo en su juventud), el más grande observador del cielo, con los mejores instrumentos jamás contruidos hasta la época, antes de la invención de cualquier instrumento óptico. Era el astrónomo de la corte de Rodolfo II, emperador del Sacro Imperio Romano Germánico.

Tycho se manejaba como un rey, tenía un régimen despótico con sus ayudantes, castigaba a latigazos y encerraba a quienes no lo obedecían. Vivía en un castillo en una isla y lo acompañaban sus familiares, amigos, bufones y toda clase de aduladores, además de sus animales exóticos, prostitutas y enanos, con los que realizaba diariamente fiestas y banquetes. En 1599 lo trasladaron al castillo de Benatek, en Praga, para continuar sus trabajos cerca de su mecenas. El año que pasé en lo de Tycho con mi familia fue parte del martirio en el que se convirtió mi vida desde 1598, cuando el flamante archiduque católico Fernando de Habsburgo promulgó un edicto contra los protestantes, por lo que nos vimos obligados a abandonar nuestra fe o a marcharnos de Austria, bajo pena de muerte. "¿Cómo distinguir un fiel de un infiel en una ciudad con mayoría



de protestantes?”, le preguntaron al archiduque. “Mátenlos a todos y que Dios decida”, respondió. Así es la intolerancia religiosa, entre otras.

Pero mi fama como matemático crecía. Por sugerencia de Rodolfo, Tycho me había mandado a llamar para ayudarlo a describir los caminos de los planetas, para poder predecir sus posiciones y realizar un calendario que abarcara los siglos venideros, y plasmar así su nombre en la posteridad. Pero Tycho no era un teórico como yo, y no poseía el talento matemático. *Él tenía los datos, y necesitaba el arquitecto que le diera forma al edificio del sistema planetario.*

Yo era copernicano desde hacía años, pero Tycho había confeccionado otro modelo: los planetas (excepto la Tierra) giraban alrededor del Sol, y todo ese conjunto, alrededor de una Tierra todavía central. Tycho creía fervientemente en esa posibilidad, y eso agravó nuestras diferencias.

Por su “sugerencia” me entreveré en una pesadilla con Marte, el planeta más difícil de predecir, la clave del secreto, el que había vuelto loco a los astrónomos desde las eras más antiguas. Pero las observaciones realizadas durante años no tenían demasiado sentido más que como una serie de registros muy detallados y confiables de ángulos y posiciones, y solo un examen exhaustivo a través de un modelo astronómico permitiría establecer el tamaño y la forma de la órbita.

Tycho no estaba muy dispuesto a compartir conmigo el trabajo de su vida. Solo me entregaba datos en forma limitada entre otros temas de conversación. Un día, en la cena, la cifra del apogeo de un planeta; a la mañana, los nodos de otro.

Luego de un banquete con el emperador, Tycho murió tras unos días de fiebres y agonías. Otras mentes afiebradas, mucho tiempo después, pretendieron hacer creer que yo lo había envenenado. Pero el viejo era adepto a la alquimia y a peligrosos experimentos con mercurio. Sin esperar, dos días después fui nombrado su sucesor por Rodolfo, y asumí como el nuevo matemático de la corte. Heredé sus instrumentos y “tomé” los valiosísimos datos que Tycho había reunido durante 38 años, sobre todo, las cambiantes posiciones de Marte, y utilicé esa información para conseguir un modelo preciso del movimiento plane-

tario, según mis propias ideas.

Hasta ese momento, la explicación oficial del sistema tenía mil quinientos años y seguía siendo la de los epiciclos y deferentes de Tolomeo (figura 05), que justificaban el movimiento retrógrado de los planetas. Pero cada vez más filósofos naturales nos inclinábamos hacia el copernicanismo (aquí recomiendo el interesante artículo sobre Nicolás Copérnico aparecido en la edición anterior de Si Muove, la 26), ya que la diferencia entre la teoría de los epiciclos y la observación era mayor de lo que podía corregirse mediante remiendos auxiliares que salvaran las apariencias. Yo estaba decidido a hallar una solución más sencilla. La verdad siempre resulta más simple de lo que uno piensa.

Estudí la velocidad del planeta en los distintos puntos de su trayecto, y descubrí que variaba irremediabilmente. Elaboré una relación matemática para su solución: *la velocidad de un planeta varía en proporción inversa a su distancia al Sol, de manera tal que la línea que une el planeta al Sol barre áreas iguales en tiempos iguales.* Incluso, hice los cálculos desde el punto de vista de un supuesto observador ubicado en Marte, para determinar también la forma de la órbita de la Tierra. Me incliné a creer que las órbitas deberían tener forma de huevo, pero en las observaciones hallaba siempre discrepancias. Fue allí cuando se me presentó otro sabio de la Antigüedad: Apolonio de Perge, el matemático griego que dieciocho siglos atrás había demostrado las formas de las secciones cónicas (elipse, parábola e hipérbola) que pueden obtenerse cortando un cono en diferentes ángulos (figura 06).

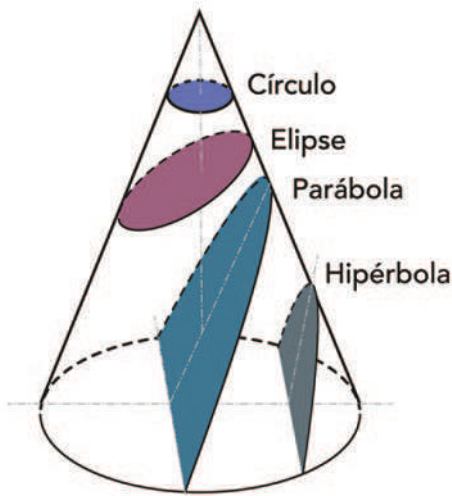
Entonces, calculé el aspecto que presentaría el movimiento de Marte *si su órbita se curvara hacia adentro por ambos lados, y volviera a curvarse hacia afuera en sus extremos.* Es decir, si fuera una elipse, y ya no un círculo. Una elipse es un círculo aplastado, con dos “focos”, uno a cada lado del centro (figura 07). La elipse de la órbita de Marte es muy poco aplastada, y si se la dibuja a escala, a primera vista es muy parecida a un círculo. Pero el Sol no está en el centro, sino un poco a un lado, en uno de los focos.

Esa figura oval me aterrorizó. Pero, al eliminar los efectos de la órbita de la Tierra, los bucles retrógrados desaparecieron, y así desaparecieron también las últimas discrepancias serias. Ocho años más de cálculos y la humildad necesaria para admitir un fracaso tras otro, fueron necesarios para descubrir la verdadera naturaleza de los movimientos y las posiciones planetarias. Y todo a partir de una fantasía, aquella hipótesis de los cinco sólidos regulares, el punto de partida de toda esta investigación. Muchas veces, la ciencia empieza con una idea equivocada, pero es en el camino hacia la verdad en el que se cosechan los mejores resultados. *La verdad es hija del tiempo, y yo no siento ninguna vergüenza en ser su partera.*

04 *Modelo del Misterio cósmico que busca explicar con un sistema geométrico las relaciones de distancias entre los planetas.*

05 *Epiciclos y deferentes que explicaban el movimiento retrógrado de los planetas, con la Tierra en el centro del sistema.*

06



Así llegué a mis famosas leyes de los movimientos planetarios (figura 07). **Mi Primera Ley** (1609) es sencilla y elegante: los planetas se mueven en órbitas elípticas alrededor del Sol, y el Sol está en uno de sus focos. **Mi Segunda Ley** (1609, descubierta antes que la Primera) es una descripción matemática que demuestra cómo un planeta viaja más lento o más rápido según dónde se encuentre en su órbita, más lejos o más cerca del Sol. **Mi Tercera Ley** (1619) relaciona el tamaño de la órbita de un planeta con el tiempo necesario para dar la vuelta alrededor del Sol, y demuestra que los planetas más distantes se mueven a velocidades medias más lentas. Para recorrer toda su órbita, Júpiter necesita 12 veces más tiempo que la Tierra, y Saturno, 30, aunque Júpiter o Saturno no se hallen 12 o 30 veces más alejados respectivamente².

Estas, mis leyes, se pueden utilizar para predecir la ubicación de los planetas en el futuro y determinar sus posiciones en el pasado, y son válidas para todos los planetas, cometas, satélites, estrellas; incluso para planetas que, si existieran, aún no hayan sido descubiertos.

Así, la idea de que la música gobernaba el universo se desmoronó también, y el dogma de la velocidad uniforme y la figura perfecta del círculo para las órbitas de los planetas quedó, muy a mi pesar, roto para siempre. Esto sacudió mi fe en un dios geómetra. *Había limpiado el establo de la astronomía de círculos y espirales, y ahora solo me quedó una carreta llena de estiércol*, es decir, las elipses. Una porquería. ¿Quién será este Kepler para desentrañar un secreto velado a las mentes más brillantes desde los inicios de nuestra ciencia, y poner todo patas para arriba? Pero la verdad está en la prueba matemática a la que todos pueden llegar haciendo una y otra vez las observaciones y los cálculos, y no en las ideas de una sola persona. “Que no se diga que he vivido en vano”, repitió el viejo Tycho varias veces en su lecho de muerte. Sin sus observaciones, nunca hubiera llegado a revelar nada de esto.

Gravedad

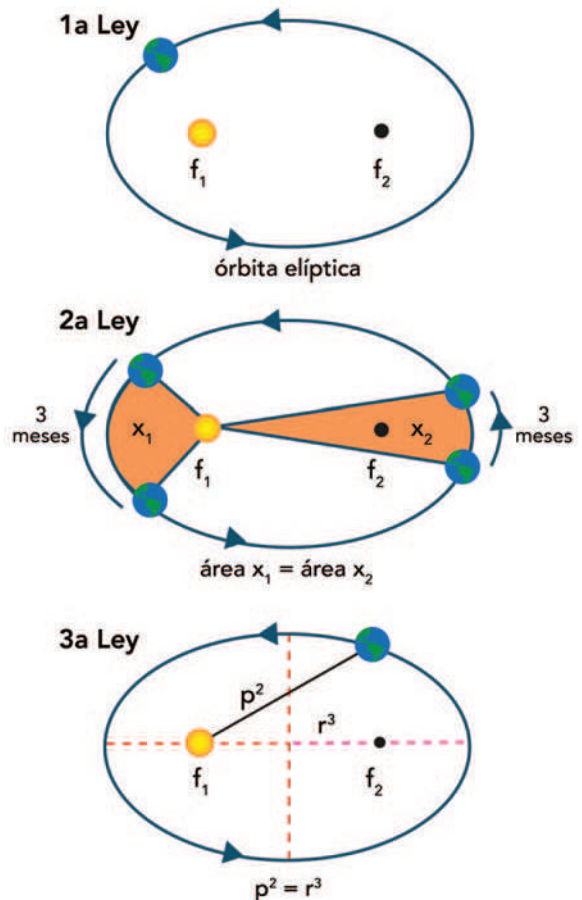
Desde la más remota antigüedad hasta nuestros tiempos, nadie se había dado cuenta de que los movimientos de los astros exigían una fuerza física permanente y a dis-

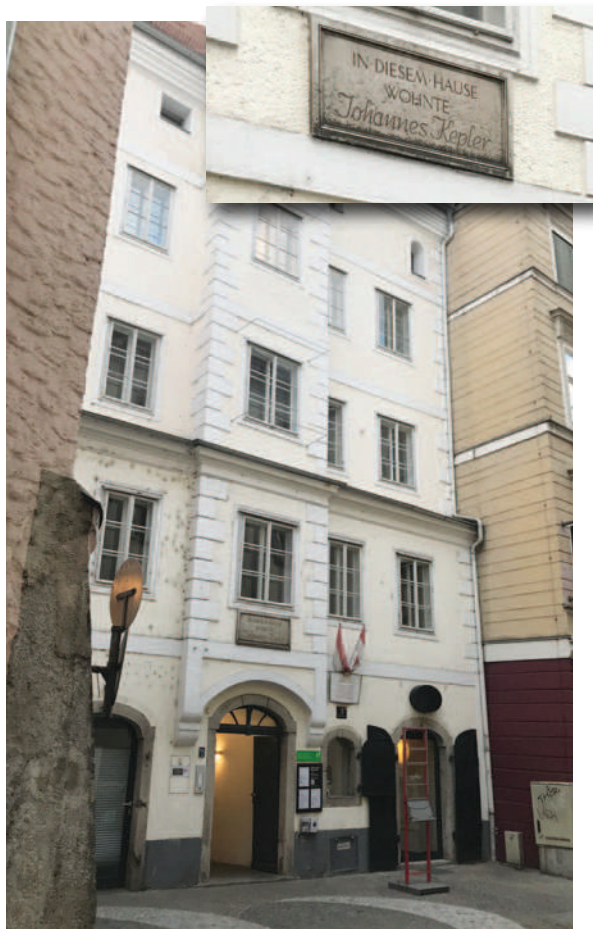
tancia que los mantuviera ligados entre sí. De mis leyes se intuye que esa fuerza tiene como eje el Sol, que lo convierte en la causa de los movimientos planetarios. Las formas y las dimensiones de las órbitas, y las velocidades con que los planetas se desplazan por ellas, están relacionadas matemáticamente, y la clave de esas relaciones está en la distancia al Sol. Por lo tanto, esa fuerza proveniente del Sol disminuye a medida que aumenta la distancia, y debe ser parecida a la acción terrestre.

Contra esa fuerza del Sol también existe la natural inercia de los planetas, que los hace permanecer en su lugar. Sin esta otra fuerza, la Tierra y la Luna se precipitarían la una sobre la otra, y los planetas caerían hacia el Sol. Por tanto, la fuerza motora del Sol y la inercia del planeta combaten entre sí, y cada una tiene su parte en la victoria. La fuerza del Sol desplaza al planeta de su sede, y la inercia lo libera un poco de los vínculos que lo ligan al Sol. La resultante de las dos acciones es el movimiento de traslación alrededor del Sol. La “gravedad” es la tendencia mutua entre cuerpos semejantes a unirse o ponerse en contacto, de modo que la Tierra atrae una piedra mucho más de lo que la piedra atrae a la Tierra.

07

LEYES DE KEPLER





Galileo y yo

Curiosamente, en 1609, el mismo año en que publiqué los descubrimientos de las órbitas elípticas, se inventó un instrumento que hizo que la humanidad cambiara la visión que tenía del universo. *Siempre recordaré con nervios aquel día en el que un amigo llegó a mi casa para decirme que Galileo había dirigido al firmamento un perspicillum de dos lentes, y había descubierto cuatro planetas nuevos. Me sentí conmovido.*

Galileo observó montañas en la Luna, fases en Venus, miles de estrellas tras el resplandor de la Vía Láctea. *Pero lo que más excitación me provocó fue su descubrimiento de cuatro astros girando alrededor de Júpiter, del mismo modo que nuestra Luna gira alrededor de la Tierra.* Él los llamó astros medicos, en honor a los Medici, sus mecenas florentinos. Pero yo los llamé satélites, una palabra que, hasta ese momento, se utilizaba solo para mencionar a esas personas que rodean a los poderosos con el fin de ganarse sus favores; los chupamedias.

Con Galileo estuvimos en contacto mediante cartas, ya que nunca nos vimos personalmente. Por alguna razón, era bastante reticente a responderme y a enviarme uno de sus instrumentos, pese a mis constantes pedidos. En 1596, cuando publiqué el Misterio Cósmico con la hipótesis de los sólidos regulares, se lo envié a Tycho y a Galileo. El italiano me respondió que se había convertido en copernicano, y así había descubierto la razón de muchos

acontecimientos naturales que de otra manera no se podían explicar. Me aclaró las diferencias entre *las estrellas fijas y las errantes* (los planetas): *las primeras resplandecen por luz propia, y las segundas, por la luz reflejada del Sol. Explicó también que la Luna, cuando está totalmente eclipsada, aparece iluminada por una débil luz, generalmente roja. Supone correctamente que es la luz del Sol atravesando la atmósfera terrestre, que se desvía y es reflejada por la Luna.*

Mandé colgar en la pared de mi casa su carta enmarcada. Galileo Galilei es un italiano muy importante, aunque creo que en su patria no le será fácil dar a conocer sus trabajos, y hasta podría llegar a ser perseguido por eso.

Galileo envió un telescopio al príncipe Ernesto de Baviera, quien me lo facilitó para que comprobara sus descubrimientos. *El tubo óptico es tan precioso como un cetro, y quien observa a través de él, se convierte en rey y puede comprender la obra de Dios.* A partir de ahora, los progresos que se lograrán con el nuevo instrumento de investigación serán inimaginables.

Reuní a varios científicos en mi casa, apuntamos a Júpiter y le pedí a cada uno que dibujara en una pizarra lo que veía a través del telescopio, bajo juramento, sin mostrársela a los demás, para comprobar que Galileo tenía razón. Repetimos el experimento varias noches y celebramos con buen vino y comida. Algunos años antes del telescopio, me había ocupado de los conceptos fundamentales de la óptica. Así que, una vez que recibí uno, lo estudié a fondo y desarrollé una nueva teoría. Realicé una mejora en el diseño, coloqué dos lentes convexas en el ocular en lugar de la cóncava del modelo de Galileo. La ventaja es que los rayos de luz que emergen del ocular son convergentes. *Esto permite un campo de visión mucho más amplio y un mayor detalle, pero la imagen se invierte.* Quizás, eso no le haya gustado al italiano.

En 1609 había propuesto que la fuerza de la Luna, al ser menor que la de la Tierra, causa las mareas. Pero Galileo lo rechazó enérgicamente, al igual que a mis órbitas elípticas. En 1611 hice observaciones del Sol a través de una cámara oscura. Comprobé que las manchas no eran tránsitos de Mercurio, sino, probablemente, *emanaciones de gas candente que se elevan de la superficie. Su movimiento demuestra la rotación del Sol.* Galileo también rechazó estas tesis. Quizás, el hecho de que el italiano no me respondiera más mis cartas y solicitudes se haya debido a estas pequeñas diferencias científicas. Igualmente, *prefiero la crítica más aguda de un hombre inteligente que la aprobación irreflexiva de las masas. La ciencia no es como la diplomacia, no progresa mediante cumplidos.*

06 Secciones cónicas de Apolonio.

07 Leyes de Kepler. 1- *Un planeta se mueve en una órbita elíptica y el Sol no está en el centro, sino en uno de los focos. 2-* *Descripción matemática que demuestra cómo un planeta viaja más lento o más rápido según dónde se encuentre en su órbita, más lejos o más cerca del Sol. 3-* *Relación del tamaño de la órbita de un planeta con el tiempo necesario para dar la vuelta alrededor del Sol. Los planetas más distantes se mueven a velocidades medias más lentas.*

08 La casa de Kepler en Linz, Austria.

Somnium

Una vez, el emperador me preguntó qué eran esas zonas oscuras en la Luna. Seguramente son sombras que proyectan las montañas lunares, respondí. Dijo que nunca había imaginado que la Luna pudiera ser un mundo con montañas iluminadas al atardecer, y no dejó de hacerme preguntas durante semanas. Me pidió que hiciera un relato ficticio al respecto. Escribí una historia imaginaria que llamé Somnium, un sueño de un chico que viaja a la Luna, y desde allí ve la Tierra. El protagonista es un niño islandés llamado Duracotus, que estudió con Tycho Brahe. Su madre, Fiolxhide, que recogía hierbas y las vendía a los marineros, utiliza un hechizo para viajar a la Luna. Despegan durante un eclipse, cuando la nave queda protegida del Sol por la sombra de la Tierra. El despegue se realiza gracias a la utilización de toneladas de pólvora, pero una vez liberados del influjo terrestre, la nave viaja siguiendo una trayectoria curva sin necesidad de motor. Al llegar les comunican que la Luna tiene dos hemisferios: uno desde el que siempre se ve la Tierra, y otro desde el que no se ve nunca, y que el día lunar dura dos semanas terrestres, al igual que la noche. Eso provoca un movimiento del cielo diferente al que se observa desde la Tierra. La geografía lunar está llena de montañas, valles y cavidades, donde se encuentran las ciudades, rodeadas de muros circulares para protegerse de gigantescos reptiles prehistóricos. Los habitantes crecen muy deprisa y viven muy poco. Solo asoman un rato al atardecer, y luego vuelven a sumergirse en la noche impenetrable. Guardan el agua en cuevas para protegerla de las insostenibles temperaturas diurnas, en contraste con el frío extremo de la noche. Desde allí, se ve girar la Tierra lentamente³.

Fin

Las persecuciones religiosas y la inestabilidad política me obligaron a trasladarme, junto a mi familia, una vez más. La edición de mis obras se veía retrasada, generalmente, por las mismas razones. En 1612 murió mi esposa Bárbara y dos de mis pequeños niños, víctimas de la epidemia que llegó con los soldados de la guerra civil. Al año siguiente, me casé en Linz, Austria, con Susanne, con quien tuve siete niños, de los cuales tres fallecieron pronto. Allí volví a tomar un puesto de maestro en una escuelita, ya que me negaron la cátedra en la Universidad de Tübingen, a pesar de mi creciente fama como matemático. Otra revuelta religiosa nos obligó a volver a mudarnos, esta vez, a Ulm, Alemania. En 1615, algunos lectores maliciosos repararon en supuestos datos autobiográficos del Somnium, y propusieron a las autoridades de Leonberg, donde residía Katherine, mi anciana madre, que ella estaba representada por la madre del niño en la historia, la que vendía hierbas extrañas. Mi madre fue acusada de envenenamiento y de brujería (junto a otras 14 mujeres, 8 de las



cuales fueron ejecutadas, como lo hicieron con cientos de mujeres en unas pocas décadas), y sufrió interpelaciones por parte de las autoridades durante años. Ya se lo había advertido yo en numerosas oportunidades: “No podés seguir insistiendo con tus remedios, sean lo que sean. ¿Me ves a mí, acaso, tratando de convencer a los eclesiásticos de las ideas de Copérnico?”. Pasé esos años en los tribunales tratando de ayudarla, buscando explicaciones naturales a las acusaciones de brujería. Fue encarcelada y juzgada recién en 1620, y fue liberada tras 14 meses de prisión. Murió poco después, debilitada por las humillaciones y los tormentos recibidos.

En 1619, la administración central de la Iglesia católica incluyó algunas de mis obras en el Índice de libros prohibidos por ser considerados heréticos. *En teología, solo es válido el peso de la autoridad, pero en filosofía solo cuenta el peso de la razón. Para mí, más sagrado que todo eso es la verdad. Yo, con todo respeto hacia los doctores de la Iglesia, demuestro que la Tierra es redonda, de una pequeñez casi insignificante y que se mueve velozmente entre las estrellas. ¿Qué haríamos sin nuestra ciencia? En estos tiempos, es un gran consuelo para mí.*

Galileo no volvió a responder mis cartas, y la familia de Tycho me persiguió durante años para que publicara su obra en forma de tablas, algo que él le había prometido al empe-

09 Monumento a Kepler y Brahe realizado en 1984 en Praga.

rador. Finalmente, tras intensas solicitudes de astrónomos, astrólogos, sacerdotes, misioneros, peregrinos, navegantes, aventureros y confeccionadores de calendarios de Europa, China y la India, las Tablas Rudolfinas aparecieron en 1627. Esas listas de las posiciones de los planetas y de más de mil estrellas fueron las más precisas jamás realizadas, y fueron utilizadas durante siglos para predecir fenómenos astronómicos como eclipses, tránsitos, conjunciones, etc.

En 1628 pasé al servicio de Albrecht von Wallenstein, un mercenario bajo las órdenes de Fernando, el archiduque católico convertido ahora en emperador, quien me prometió saldar las deudas que el ducado había ido acumulando conmigo durante años. Así llegué a la ciudad de Sagan, con mi familia, para asegurar cierta estabilidad. Pero Wallenstein fue depuesto poco después, nunca cobré lo adeudado y tuve que buscar un nuevo empleo. Después de un largo viaje hasta Ratisbona, Baviera, una vez más, para tratar de cobrar deudas, el invierno me encontró agotado y enfermo. No sé cuánto tiempo me queda por delante. Durante mi vida, *medí los cielos. Ahora, mediré las sombras. Mi mente tiene por límite los cielos, mi cuerpo descansará encerrado en la Tierra.*

Nota de Si Muove

Hans, como lo llamaba su madre, murió 13 días después de llegar a Ratisbona, el 15 de noviembre de 1630, poco antes de cumplir 59 años. No hubo detalles de su enfermedad, más que unas fiebres que lo acosaron. Fue sepultado en el cementerio de la Iglesia de Santa Ana en Linz, Austria, en una tumba adornada con uno de sus libros, “La armonía del mundo”. Su epitafio, tal como él mismo lo pidió, decía las palabras con las que termina el artículo: *Medí los cielos, ahora mido las sombras...*

Durante la Guerra de los Treinta Años⁴, soldados suecos saquearon el cementerio y la ubicación exacta de su tumba permaneció desconocida hasta 2008, cuando un equipo de arqueólogos descubrió la ubicación debajo del suelo de la iglesia.

El uso de las matemáticas para buscar una solución frente a las observaciones, la repetición de los procesos, el hecho de evitar “acomodar” los datos para que todo encajara mejor, y la capacidad de asumir los fracasos para buscar otras soluciones, hacen parecer a Kepler un científico moderno. Pero nunca dejó de concebir el universo como la obra cerrada de un creador, y vivió su vida en un mundo enmarcado por la mística, las pseudociencias y las disputas religiosas.

Sus leyes y las órbitas elípticas no fueron aceptadas inmediatamente por los astrónomos de su época, sino hasta que Isaac Newton, 50 años después, las utilizó para confeccionar la ley de la gravitación universal. Son las mismas leyes que ahora utilizan las naves espaciales que viajan por el sistema solar. ■

(*) **Aclaración:** el autor de estas memorias desea agradecer la colaboración desinteresada de Diego Luis Hernández, del Planetario de la Ciudad de Buenos Aires Galileo Galilei.

“No soy de los que prefieren simplemente afirmar una idea. Yo estoy dispuesto a dedicar toda mi vida a confrontar la validez de una hipótesis con los registros astronómicos”.

Notas

Las citas en *italica* son textuales de libros, cartas y otros escritos del propio Kepler. Todo el resto son interpretaciones basadas en su historia.

1 A simple vista no se observa ningún planeta entre las órbitas de Marte y Júpiter, pero allí están Ceres y los asteroides del cinturón principal. Ceres fue descubierto en 1801 mediante telescopio, y es mucho más pequeño que cualquier planeta. Inicialmente, Ceres fue considerado un planeta; luego, un asteroide; y, actualmente, un planeta enano. Por lo tanto, Kepler supuso bien que allí había “algo”.

2 Si tomamos como unidad de tiempo (1) lo que le lleva a la Tierra completar una vuelta alrededor del Sol, y como unidad de distancia (1) la que separa el Sol de la Tierra, los “años” de los planetas son: Mercurio 0,24, Venus 0,615, Tierra 1, Marte 1,88, Júpiter 11,86 y Saturno 29,457. Y sus distancias al Sol: Mercurio 0,387, Venus 0,723, Tierra 1, Marte 1,524, Júpiter 5,203 y Saturno 9,539.

3 Se suele mencionar el *Somnium* de Kepler como el primer relato de ciencia ficción. Efectivamente, posee algunos datos autobiográficos, como que el joven estudió con Tycho o que su madre vendía hierbas. Pero hay cosas más curiosas, como el despegue de la nave mediante pólvora (combustible) y la trayectoria que toma una vez fuera de la influencia terrestre, “sin necesidad de motor” (leyes de Newton); las estructuras circulares (cráteres), el lugar donde se guarda el agua (existe hielo en la Luna, en el fondo de los cráteres polares), la gran amplitud térmica (real) y los reptiles prehistóricos (¿dinosaurios?). Nada de eso era conocido en la época en la que vivió Kepler, pero existe.

4 La Guerra de los 30 años (1618-1648) fue un conflicto que tuvo su epicentro en Europa central, motivado por las divisiones religiosas entre el catolicismo y el protestantismo luterano, que desembocó en otros conflictos políticos y que dejó un saldo aproximado de 8 millones de muertos, además de infirmitades de perseguidos y desterrados.

Bibliografía

Platón. *Timeo*.
Kepler, J. *La armonía del mundo*.
Clark, S. *Bajo el cielo nocturno*.
Toulmin, S. y Goodfield, J. *La trama de los cielos*.
Abetti, G. *Historia de la astronomía*.
Asimov, I. *Historia del telescopio*.
Beltrán Marí, A. *Galileo, ciencia y religión*.
Gribbin, J. *Historia de la ciencia (1543-2001)*.
Koestler, A. *Los sonámbulos*.
Koestler, A. *Kepler*.
Kuhn, T. S. *La estructura de las revoluciones científicas*.
Banville, J. *Kepler*.
Galchen, R. *Todo el mundo sabe que tu madre es una bruja*.
Sagan, C. *Cosmos*.
Serie *Cosmos*, capítulo sobre Kepler:
https://www.youtube.com/watch?v=9wvgKPMNb_pM
Juicio a Katherina y defensa de Kepler (en inglés): <https://keplers-trial.hist.cam.ac.uk/keplers-defence.pdf> y <https://keplers-trial.hist.cam.ac.uk/>
Revista *Si Muove* 13. Págs. 18-23.
Revista *Si Muove* 17. Págs. 37-44.
Revista *Si Muove* 26. Págs. 9-16.

Algunos desafíos actuales

LA ERA DE LOS GRANDES RELEVAMIENTOS ASTRONÓMICOS

Autor: Rodrigo Haack, licenciado en Astronomía en la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de la Universidad Nacional de La Plata, estudiante de Doctorado en el Instituto de Astrofísica de La Plata. Docente, extensionista universitario y guía de visitas en el Observatorio de La Plata.

01

<https://www.astrobin.com/gu154q/0/>



Desde tiempos inmemorables, la humanidad ha alzado la mirada hacia el cielo. Apostando al desarrollo científico, hemos ampliado nuestra capacidad tecnológica para observar el universo, y los telescopios han representado una de nuestras herramientas más poderosas para investigar los objetos celestes. Actualmente hay telescopios de todos los colores, olores y sabores, pero... ¿Todos observan de la misma forma? ¿Qué son los grandes relevamientos astronómicos? ¿Quiénes acceden a sus observaciones?

Los telescopios modernos con metodología de observación “clásica” son aquellos que cuentan con sus turnos meticulosamente planificados y cuidadosamente coordinados. Representan un hito en la capacidad humana para estudiar e intentar explicar el universo. Sin embargo, esta metodología también implica que gran parte de las personas dedicadas a la astronomía observacional deben competir por la asignación de tiempo de

01 El cúmulo de Fornax, la mayor concentración de galaxias en un radio menor a 20 Mpc (megapársecs) de nuestra galaxia, después del cúmulo de Virgo. Muestra subestructuras: el subcúmulo principal está centrado en NGC 1399, mientras que un subcúmulo que incluye NGC 1316 (Fornax A) está centrado 3° al suroeste. Fornax A fue identificada como una radio fuente. Aunque está aún en discusión, todo parece indicar que el subcúmulo de Fornax A está cayendo hacia la estructura principal. El cúmulo está centrado, aproximadamente, en $\alpha \sim 3^h 35^m$ y $\delta \sim -35,7^\circ$.

observación, lo cual, en muchos casos, puede determinar el curso de sus investigaciones. En general, el tiempo de observación total disponible es proporcional a lo que los países, proyectos e instituciones aporten. Por lo tanto, decidir no formar parte de observatorios implica no tener siquiera la posibilidad de competir por dicho tiempo. Un ejemplo más entre tantos otros que evidencia una realidad indiscutible: no invertir en ciencia representa no fomentar el pensamiento crítico, interrumpir la producción científica y renunciar a un país autónomo y soberano.

A diferencia de los métodos tradicionales de observación, los relevamientos astronómicos se centran en explorar grandes áreas del cielo de manera sistemática y eficiente. En lugar de apuntar hacia un objeto específico durante horas, estos proyectos emplean telescopios modernos y sofisticados que escanean vastas regiones del cielo de manera automatizada y programada. Este cambio en la metodología ha revolucionado nuestra comprensión del universo y ha permitido realizar descubrimientos sorprendentes a una escala sin precedentes.

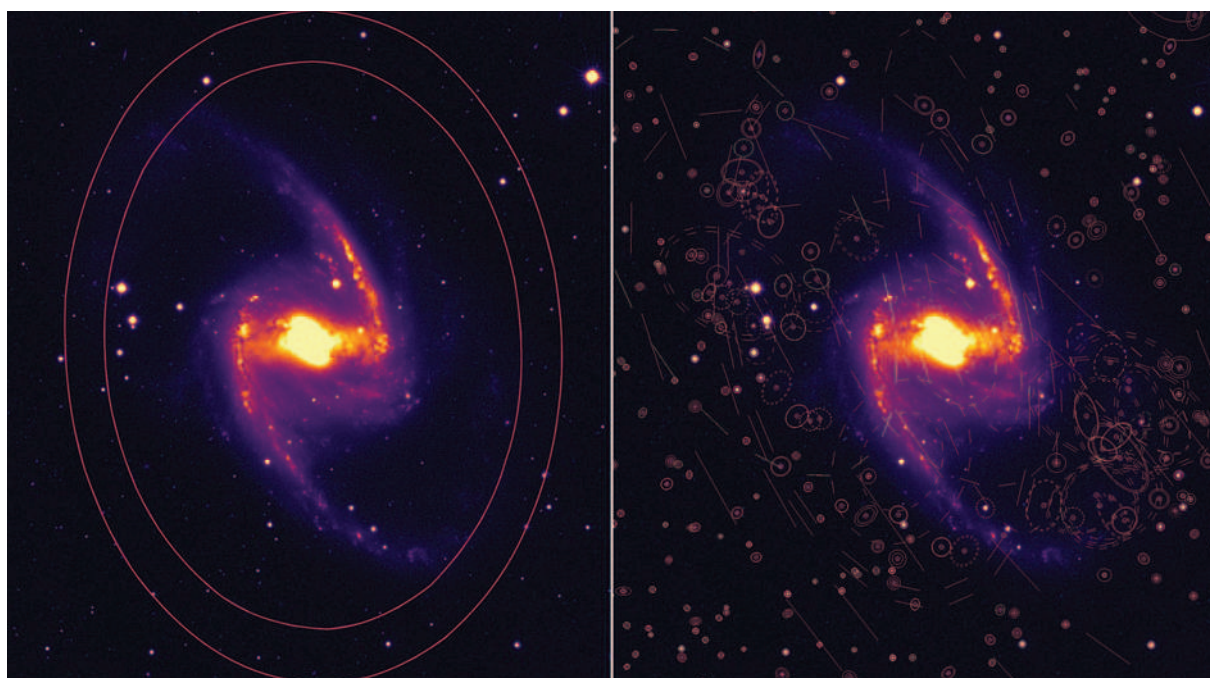
El volumen de datos generado por estos relevamientos es monumental, con miles de terabytes de información recopilada en un corto período de tiempo. Esta velocidad de adquisición de datos, combinada con su acceso público, ha democratizado la astronomía y ha permitido que investigadores e investigadoras de todo el mundo utilicen estos datos para sus propios estudios. Además de ofrecer datos en bruto, los grandes relevamientos astronómicos generan y proveen catálogos detallados, imágenes calibradas y espectros de alta y baja resolución de una amplia variedad de objetos celestes. Estos recursos son fundamentales para la astronomía moderna, ya que permiten no solo desarrollar sino proyectar investigaciones desde la búsqueda de exoplanetas, estudios estelares, el

seguimiento de eventos transitorios (asteroides, novas, supernovas, entre otros), la formación y evolución de galaxias y hasta la estructura a gran escala del universo.

Si bien todo parece favorable para los relevamientos astronómicos, esto no es tan así: mapear el cielo de manera sistemática y automatizada implica la necesidad de tomar estrategias de observación muy generales. Al observar distintas regiones del cielo en una noche y distintos tipos de objetos (por ejemplo: estrellas y galaxias) simultáneamente, los telescopios operan bajo configuraciones fijas. En ciertos escenarios estas configuraciones generales están lejos de ser óptimas para la detección de algún tipo de objeto en particular. Vale mencionar que esta problemática no sucede en la metodología “clásica” de observación, pues la asignación de tiempo está vinculada directamente con la rigurosidad de la planificación y optimización de detalles específicos en la observación propuesta.

Algunos pocos relevamientos cuentan con estrategias de observación intercambiables según el tipo de objeto que se desea observar. Otros solo buscan observar tipos específicos de objetos (por ejemplo: la misión TESS, *The Transiting Exoplanet Survey Satellite*, busca exclusivamente exoplanetas en tránsito por delante de su estrella). Pero la gran mayoría utiliza estrategias generales y cuenta con objetivos tanto galácticos como extragalácticos.

02 *Ejemplo de subdivisión o desdoblamiento sobre la galaxia espiral NGC 1365, en Fornax. Cada dupla de elipses concéntricas corresponde a una detección. En la imagen izquierda se evidencia una buena detección como un único objeto, mientras que, en la imagen derecha, una deficiente detección separa excesivamente la galaxia en varios objetos.*



02

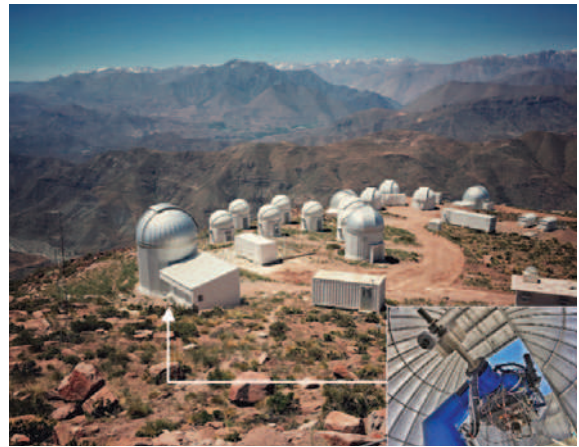
Rodrigo F. Haack

Algunas soluciones: la pelota siempre al 10

Motivados por ello, junto con el grupo *Astrophysics with Large Astronomical Surveys* (ALAS), del Instituto de Astrofísica de La Plata (IALP), en los últimos años hemos intentado resolver la problemática, considerando inicialmente como objeto de estudio el cúmulo de Fornax (figura 01), el segundo cúmulo de galaxias más numeroso e importante dentro de una distancia menor a 20 Mpc (megapársecs) después del cúmulo de Virgo (20 Mpc equivale a 6.5×10^7 años luz o 6.2×10^{20} km). Utilizando imágenes del *Southern Photometric Local Universe Survey* (S-PLUS) notamos que algunas galaxias enanas y brillantes que son miembros espectroscópicamente confirmados del cúmulo, no estaban incluidas en los catálogos proporcionados por el relevamiento. Y no solo eso, sino que algunas galaxias espirales o irregulares están subdivididas en más de un objeto, es decir, distintas partes de una galaxia aparecen como objetos separados e independientes dentro de los catálogos (figura 02). Ambos casos, la no detección o la subdivisión/desdoblamiento, son claros ejemplos de datos defectuosos que potencialmente producirán errores en estudios que tomen esos datos como insumo de análisis.

Que una galaxia esté espectroscópicamente confirmada significa que se cuenta con su espectro (radiación en función de la longitud de onda), del cual pueden obtenerse velocidades radiales midiendo el desplazamiento de líneas espectrales. A escala extragaláctica, este desplazamiento siempre será hacia el rojo del espectro electromagnético. Esto quiere decir que las galaxias se alejan de quien observa. A estas se las conocen como velocidades de recesión y es la primera evidencia observacional de que el universo se está expandiendo. Una vez que contamos con las velocidades de recesión (V_r), podemos estimar distancias (D) gracias a la ley de Hubble-Lemaître, $V_r = H_0 \times D$, donde H_0 es una constante. Se considerarán galaxias miembros del cúmulo aquellas que estén en la misma dirección y a una distancia cercana a la estimada para el cúmulo. Muchas veces, delimitar esta cercanía no es tarea sencilla.

Con la intención de detectar y obtener la fotometría (medición de la intensidad lumínica que llega desde una fuente) adecuadamente de estas galaxias problemáticas, hemos encontrado tres conjuntos diferentes de parámetros de *SExtractor*, un software utilizado por la gran mayoría de los relevamientos fotométricos para medir la posición, el tamaño, flujo y magnitudes de las fuentes astronómicas directamente sobre las imágenes. Básicamente, el primer conjunto



Mendes de Oliveira et al., 2019.

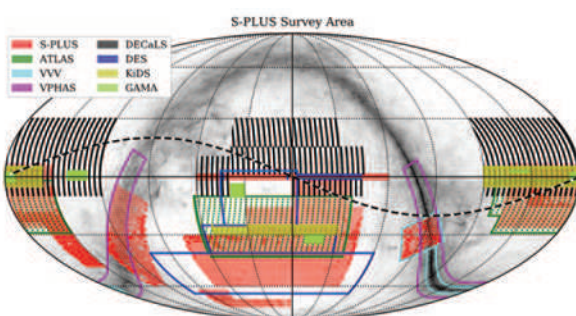
de parámetros encontrado nos permite detectar las galaxias enanas o débiles en las cercanías de las galaxias más masivas y brillantes. El segundo conjunto de parámetros permite caracterizar correctamente las galaxias de tamaño intermedio y brillantes. Mientras que el tercero detecta y mide las galaxias más masivas y extendidas de todas.

Para realizar las ejecuciones de *SExtractor* desarrollamos un *pipeline*, es decir, un código programado con una serie de etapas que los datos recorren desde su adquisición inicial hasta su análisis y visualización, el cual nos permite automatizar todo el proceso, desde la descarga de las imágenes, la ejecución de *SExtractor*, hasta la estandarización de un catálogo final. Esto resulta indispensable por el gran volumen de datos considerados. Nombramos al *pipeline* M.E.S.S.I., por sus siglas en inglés: *Measurement and Extraction with SExtractor on Surveys Images*. Quizá sea demasiado para un código tan simple cargar con semejante nombre, pero seguro que es más sencillo construir el acrónimo con Messi que con Maradona.

A partir de estas ejecuciones, obtuvimos catálogos con fotometría homogénea en la dirección del cúmulo de Fornax. Posteriormente, también de los cúmulos de Antlia

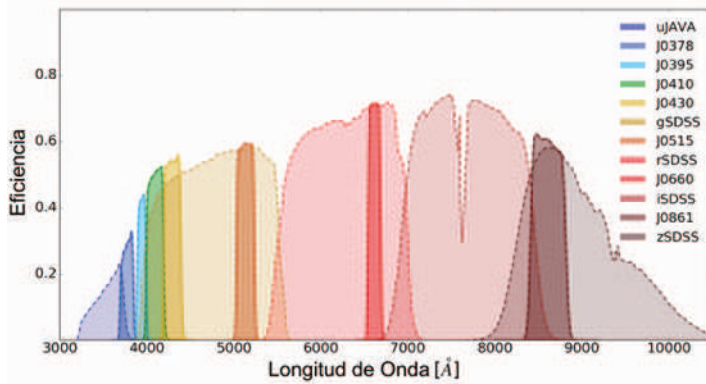
03

Mendes de Oliveira et al., 2019.



03 Diagrama en coordenadas ecuatoriales que muestra la cobertura de algunos de los principales relevamientos ópticos y en el infrarrojo cercano del hemisferio sur celeste. Para los relevamientos ópticos, ATLAS se muestra en verde sombreado, VPHAS+ es el contorno rectangular rosa sobre el bulbo y el disco de la galaxia. DECaLS está en negro sombreado y DES se muestra en contornos azules. KiDS en amarillo relleno y GAMA en áreas verdes rellenas. El único relevamiento en el infrarrojo cercano que se muestra en esta figura es VISTA-VVV, en contornos azul claro, principalmente sobre el bulbo galáctico, solapándose con S-PLUS. El área cubierta por S-PLUS se muestra en rojo. La línea negra representa la eclíptica. La imagen de fondo es el mapa de extinción de Schlegel et al. (1998).

04 El T80S se encuentra en Cerro Tololo, Chile, junto a los telescopios PROMPT. En esta foto, tomada en octubre de 2017, T80S es la cúpula más grande de la izquierda.



e Hydra, y en la zona de Stripe-82. Esta última es una región ecuatorial del cielo que sirve como zona de intersección y calibración para ambos hemisferios, y ha sido observada por muchísimos relevamientos, entre ellos el histórico *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS). Últimamente hemos extendido nuestro análisis a otros relevamientos fotométricos, como *Dark Energy Camera Legacy Survey* (DECaLS), *Javalambre-Photometric Local Universe Survey* (J-PLUS) y *Mini Javalambre Physics of the Accelerating Universe Astrophysical Survey* (MiniJ-PAS), es decir, probar M.E.S.S.I. en imágenes con características diferentes a las de S-PLUS. Hemos evidenciado que la problemática original no es únicamente de S-PLUS, sino que también está presente en los catálogos de DECaLS y J-PLUS. Además, nuestros conjuntos de parámetros propuestos para resolver el problema funcionan óptimamente sobre las imágenes de DECaLS, J-PLUS y MiniJ-PAS. En ese sentido, advertimos de la problemática en cada relevamiento y a sus usuarios y usuarias. Además, compartimos públicamente los catálogos, conjuntos de parámetros y el *pipeline* para que sean utilizados y replicados por la comunidad astronómica en general. Podríamos decir que hemos proporcionado tanto la receta como el postre para quien desee probarlo o cocinarlo por su cuenta.

Gracias al impacto del trabajo, estos catálogos están siendo utilizados para seleccionar objetos a observar por parte del relevamiento espectroscópico CHANCES (*Chilean Cluster Galaxy Evolution Survey*) de la colaboración 4MOST (*4-metre Multi-Object Spectroscopic Telescope*). Actualmente me encuentro realizando una comparación de cúmulos de galaxias cercanos (Fornax, Hydra, Antlia y otros grupos menores) bajo dos focos principales. Por un lado, analizando parámetros morfológicos, entre ellos: tamaños, proporción entre el bulbo y el disco, e índices de Sérsic (parámetro de forma que mide la curvatura del perfil de luz de la galaxia, fuertemente correlacionado con la masa y el tamaño) para cada galaxia. Por otro lado, utilizando ajustes de distribución espectral de energía (SED-Fitting), buscamos estimar y comparar: *redshifts* fotométricos (medida indirecta de distancias), masas estelares, edades, metal-

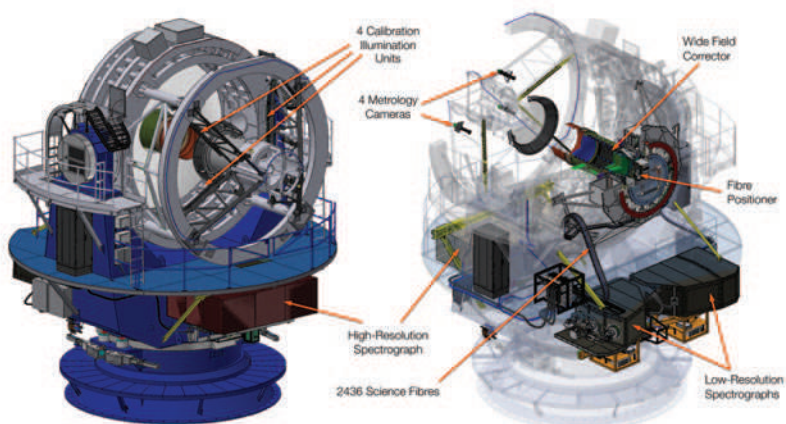
idades, temperaturas y tasas de formación estelar para cada galaxia. Todo ello, utilizando los catálogos ya mencionados con la ambiciosa intención de comprender la formación, evolución y estructura de cada cúmulo, la influencia del entorno y la conexión filamentaria o interacción entre cúmulos. A continuación, mencionamos algunos detalles adicionales sobre S-PLUS y CHANCES, proyectos de los cuales orgullosamente soy parte.

Ciencia desde Latinoamérica, la presencia de relevamientos astronómicos en el sur

El *Southern Photometric Local Universe Survey* (S-PLUS) es una colaboración internacional liderada principalmente por investigadoras e investigadores latinoamericanos, y se encuentra obteniendo imágenes de aproximadamente 9300 grados cuadrados de la esfera celeste (figura 03) utilizando un telescopio robótico de 0,8 m de diámetro, el T80-Sur, en el Observatorio Interamericano de Cerro Tololo, Chile (figura 04). S-PLUS utiliza el sistema de magnitudes de 12 bandas de Javalambre (figura 05). Si bien es un relevamiento con un telescopio de tamaño modesto, su campo amplio de visión (2 grados cuadrados) y su sistema de 12 filtros lo hacen único, sin precedente en el hemisferio sur. Al día de hoy ya se ha mapeado un 80 % de lo planificado originalmente, y muy pronto se hará pública su quinta liberación de datos, incluyendo catálogos e imágenes. Además, se encuentra disponible un nuevo proyecto

05 El sistema Javalambre de 12 filtros que incluye los 5 filtros *ugriz* de banda ancha y 7 filtros de banda estrecha centrados en líneas espectrales: el salto de Balmer/[OII], Ca H + K, H δ , banda G, triplete de Mg b, H α , y el triplete de Ca. El eje vertical muestra la eficiencia total de los filtros S-PLUS, obtenida mediante la multiplicación de las curvas de transmisión media de los filtros, la transmisión atmosférica, la eficiencia de la cámara CCD y las curvas de reflectividad del espejo primario. Los distintos filtros están coloreados según las etiquetas que aparecen en la leyenda de la derecha.

06 Proyecto 4MOST, 4-metre Multi-Object Spectroscopic Telescope.



de ciencia ciudadana: si querés jugar identificando y clasificando asteroides, estrellas, galaxias y objetos exóticos, podés acceder a: zooniverse.org/projects/cfllopes/splus-science-hunters. Por su parte, *Chilean Cluster Galaxy Evolution Survey* (CHANCES) está diseñado para estudiar la evolución de las galaxias en alrededor de 150 de los cúmulos de galaxias más masivos del universo local. Se complementará con la misión de rayos X *eROSITA* y con *4MOST Galaxy Clusters Survey* mediante la obtención de *redshifts* “z” (desplazamientos al rojo) espectroscópicos que confirmen la pertenencia de más de 1000 galaxias por cúmulo. CHANCES proporcionará una cobertura espectroscópica completa de las galaxias de los cúmulos, tanto dentro como más allá del radio virial del cúmulo (este radio está vinculado con la extensión y región de influencia del cúmulo). Esto nos permitirá trazar un mapa detallado de la estructura jerárquica de los cúmulos y medir la importancia del preprocesamiento, es decir, el proceso en el que las galaxias se transforman dentro de grupos y en filamentos de rayos X antes de su llegada a los propios cúmulos. En el caso de los cúmulos locales ($z < 0,07$), CHANCES impulsará los estudios sobre la evolución de las galaxias en cúmulos hasta el régimen de las galaxias enanas (10^8 a 10^9 masas solares), donde se espera que el entorno desempeñe un papel dominante en su evolución. CHANCES también analizará el efecto de los cúmulos en los halos gaseosos de las galaxias miembros obteniendo espectros de cuásares (galaxias recién nacidas o bien aquellas fuentes de energía que se presenta en el agujero negro del centro de dichas galaxias) detrás de cúmulos de $z > 0,35$, para buscar sistemas con absorción de MgII (doblete de magnesio) vinculados a las galaxias. Como ya mencionamos, el relevamiento es parte del proyecto 4MOST, una nueva instalación espectroscópica que se está desarrollando para el telescopio *Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy* (VISTA), de 4 metros de diámetro, ubicado en Cerro Paranal, Antofagasta, Chile. Sus especificaciones claves son: un gran campo de visión de 4,2 grados cuadrados y una gran capacidad de tomar múltiples espectros en simultáneo, bajo 1624 fibras que alimentan dos espectrógrafos de baja resolución, y 812 fibras que transfieren luz al espectrógrafo de alta resolución.

07

Y. Beletsky (LCO)/ESO



ción. Por lo tanto, se podrán tomar 2436 espectros al mismo tiempo (figuras 06 y 07).

Lo que se viene

El Observatorio Vera Rubin, en Antofagasta, Chile, que planea iniciar sus operaciones científicas a fines de 2025, llevará adelante el relevamiento *Legacy Survey of Space and Time* (LSST), que durante diez años explorará todo el cielo del hemisferio sur con un telescopio de 8,4 metros, de movimiento rápido y la cámara digital actual más grande del mundo. Por primera vez revelará millones de objetos desconocidos del sistema solar. Además de brindar la visión más amplia e integral del cielo austral jamás vista, LSST también alertará sobre cambios en el cielo nocturno dentro de 60 segundos de su detección, lo que permitirá el seguimiento de eventos transitorios como novae y supernovas. También pretende medir lentes gravitacionales débiles en el espacio para la detección de materia oscura. Logrará mapear el cielo austral cada 3 días (figura 08).

Otra interesante misión ya en curso es *Euclid*, que en los próximos 6 años mapeará un tercio del cielo. Uno de sus principales objetivos es medir con más detalle que nunca las formas de miles de millones de galaxias a lo largo de gran parte de la historia del universo, con el fin de proporcionar una visión tridimensional de la distribución de la materia oscura en nuestro universo.

En muchos casos, es necesario adoptar nuevas técnicas y herramientas para procesar y estudiar los datos utilizando algoritmos de aprendizaje automático. Si bien solo hemos nombrado un puñado de tantos, no podemos negar que los grandes relevamientos astronómicos ya han revolucionado la astronomía moderna, y lo seguirán haciendo. Esta es una metodología alternativa y, a su vez, complementaria con los turnos de observación, que permite realizar y planificar investigaciones sin precedentes e, incluso, introduce nuevos desafíos a las y los profesionales para analizar volúmenes de datos, ya que se cuenta con más datos que personas para analizarlos. ■

07 Telescopio VISTA, *Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy*.

08 LSST, *Legacy Survey of Space and Time*, en construcción.

Cúmulo de Fornax

ESTAMOS EN EL HORNO

Autor: Dr. Guillermo Abramson, Centro Atómico Bariloche, CONICET e Instituto Balseiro.
 guillermoabramson.blogspot.com

01



Ezequiel Bellocchio

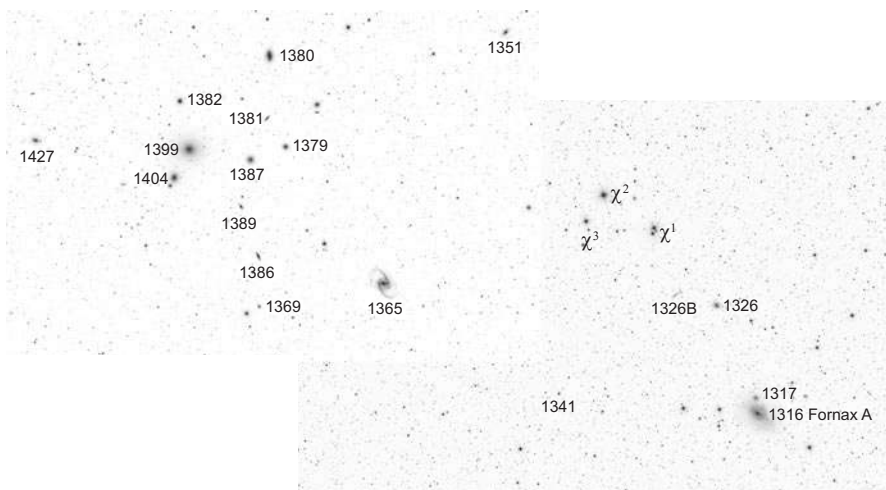
Leonardo Julio

Todos los días del año pasa por el cenit (desde nuestras latitudes) uno de los lugares más interesantes del universo de aquí a 100 millones de años luz: el cúmulo de galaxias de Fornax¹, el segundo cúmulo más rico del universo cercano, después del de Virgo.

02

Miren con cuidado la imagen 01 para tratar de distinguir las galaxias entre la multitud de estrellas individuales que, naturalmente, están mucho más cerca, en nuestra propia galaxia. En la imagen 02 encontrarán una versión en negativo, en la que identificamos muchas de las galaxias por sus números de catálogo.

Los cúmulos de galaxias son las estructuras más grandes del universo que se mantienen unidas por acción de la gravedad. Si bien algunos probablemente sean muy antiguos, se formaron en una época relativamente reciente al caer las galaxias unas hacia otras, fusionarse y asociarse en una lentísima danza gravitatoria que lucha contra la expansión del universo. Parecen alinearse a lo largo de filamentos de una especie de “espuma” de materia oscura. Su tamaño descomunal es imposible de abarcar desde nuestra escala humana. Si los cientos de miles de millones de estrellas de una



01 El cúmulo de galaxias de Fornax en dos imágenes superpuestas, ya que el gran tamaño de esta zona del cielo hace difícil tomarlo en una sola foto. Traten de distinguir las galaxias entre la multitud de estrellas individuales que están mucho más cerca, en la Vía Láctea.

02 Una versión en negativo de la imagen 01, en la que identificamos muchas de las galaxias por sus números de catálogo NGC. Las letras griegas (X) marcan las estrellas más brillantes de la zona, que se llegan a ver a simple vista y están dentro de nuestra propia galaxia, muchísimo más cerca que las galaxias.

03

Maximiliano Falieres



galaxia (¡cientos de miles de millones!) nos dejan con la mente en blanco, ¿qué decir de estos cúmulos, que abarcan centenares o millares de galaxias?

Puede calcularse, aunque cueste imaginarlo: el cúmulo de Fornax pesa algo más de 10^{14} masas solares. Cien millones de millones de soles. Tiene dos subgrupos fácilmente distinguibles. El mayor tiene dos galaxias principales: NGC 1399 (la mayor del cúmulo) y NGC 1365 (imagen 03, con dos lindos brazos espirales). Abajo a la derecha está el subgrupo menor, alrededor de NGC 1316 (imagen 04), que es además la galaxia más brillante del cúmulo (magnitud 9,4). Todo el subgrupo de NGC 1316 está cayendo hacia NGC 1399, en una danza de cúmulos de galaxias que ya ha disparado una intensa formación estelar en varias de ellas. ¿Se fusionarán? ¿Se atravesarán? El propio grupo principal parece estar en un estado de desequilibrio tras haberse formado por la fusión de grupos menores (no está *virializado*, dicen los astrónomos, regalándonos una linda palabra para el Scrabel).

Además de ser tan brillante, NGC 1316 es la cuarta fuente de radio más intensa de todo el cielo, designada Fornax A. Se trata de una galaxia “peculiar”, con aspecto elipsoidal pero con mucho polvo, que nos recuerda a Centaurus A (la más conocida de este tipo), y actualmente está clasificada como lenticular. Parece ser el resultado de la fusión de varias galaxias más pequeñas, datando la última de estas colisiones hace 3 mil millones de años. NGC 1317, que vemos muy cerquita de ella, podría ser la siguiente en caer. Observen también el lindo par formado por NGC 1326B (una espiral vista de canto) y NGC 1326A: parecen estar en contacto, comenzando su propia fusión. La enorme galaxia elipsoidal NGC 1399 está a 66 millones de años luz de nosotros. Esos fotones capturados por las cámaras de Ezequiel Bellocchio, Leonardo Julio y Maximiliano

04

Maximiliano Falieres



Falieres, comenzaron su loco viaje hacia nosotros cuando los últimos dinosaurios -salvo las aves, claro- estiraban la pata.

La constelación del Horno no es de las más populares, pero para quien se pregunte dónde están estos universos-isla en el cielo, aquí está también la carta celeste para ubicarla (imagen 05). Orión sirve de referencia: hay que seguir la línea de Betelgeuse a Rigel y se llega derecho. ■

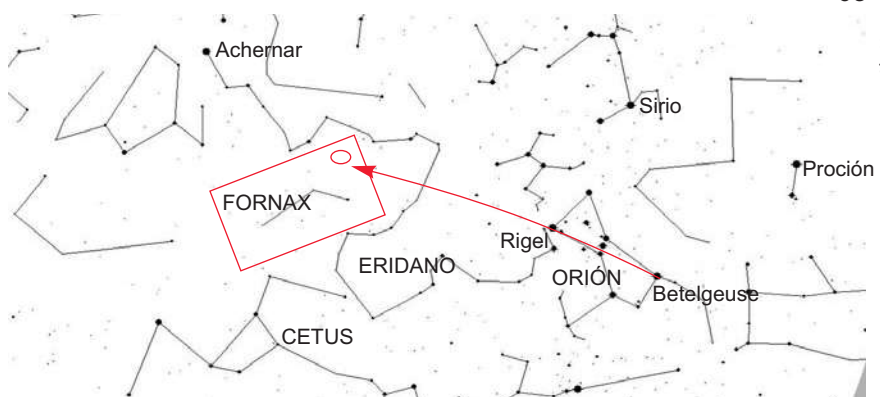
Nota

1 Fornax, o el Horno (anteriormente, el Horno químico), es la constelación en la que se encuentra este cúmulo de galaxias.

03 *Galaxia espiral barrada NGC 1365, la más linda del cúmulo de Fornax.*

04 *NGC 1316 (Fornax A) es la más brillante del cúmulo y parece ser el resultado de la fusión de varias galaxias más pequeñas. Muy cerca, NGC 1317, podría ser la siguiente en caer en la fusión.*

05 *Carta celeste para ubicar, primero, la constelación de Fornax y, después, el cúmulo de galaxias.*



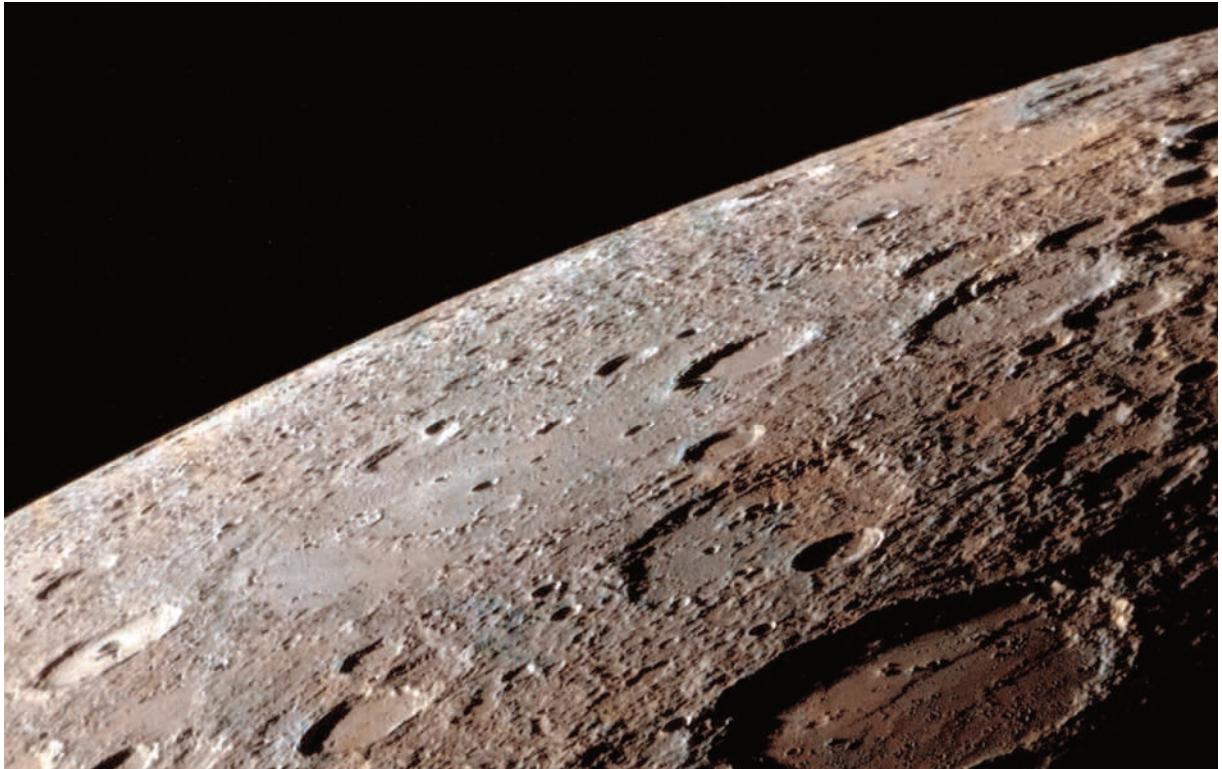
SkyMap

Mercurio

PERFIL, REVELACIONES Y MISTERIOS DEL PLANETA HEAVY METAL

Autor: Lic. Mariano Ribas, Planetario de la Ciudad de Buenos Aires Galileo Galilei.

01



MESSENGER, NASA

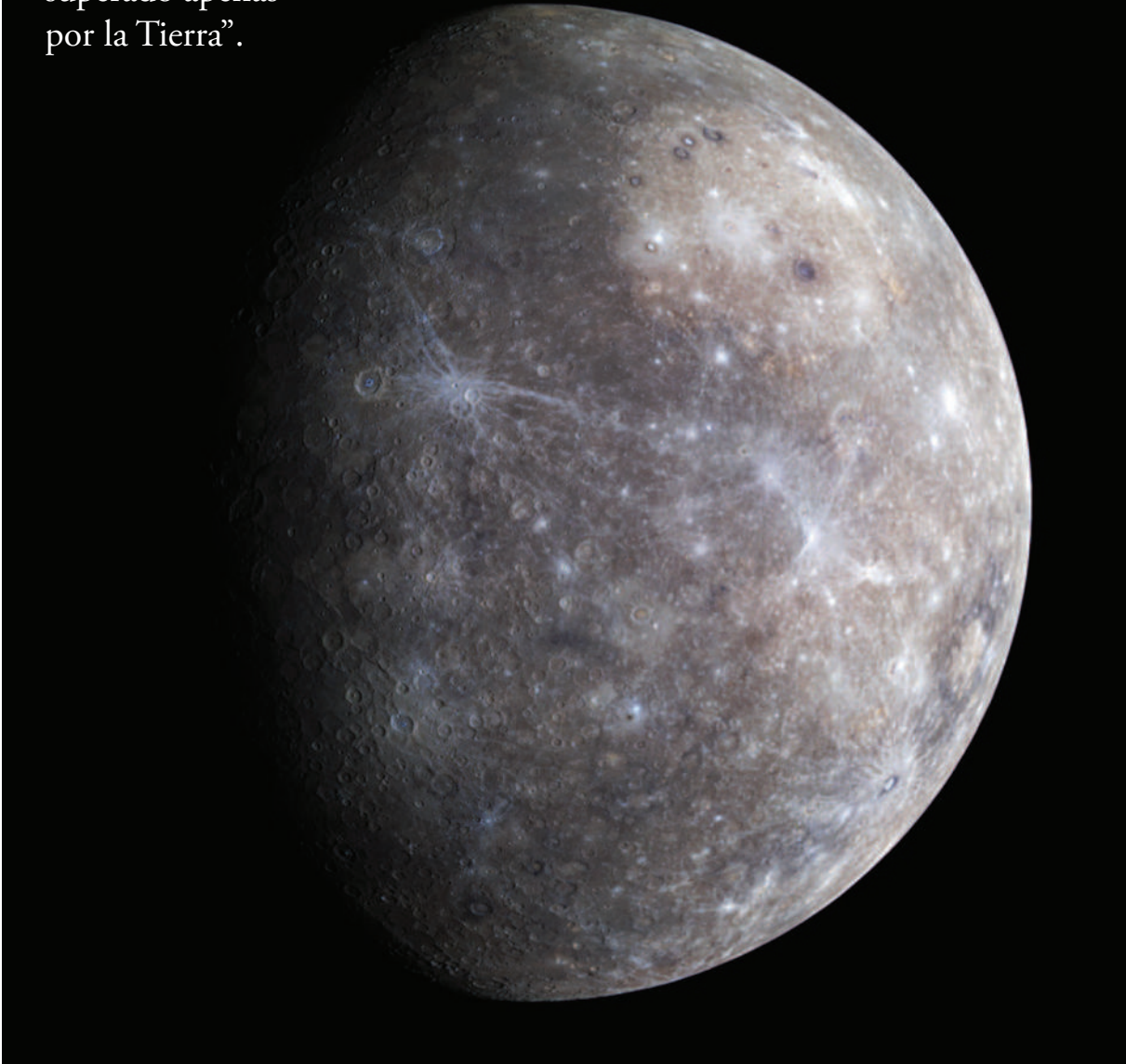
Es una pequeña, exótica y demacrada criatura planetaria. No tiene la fama ni el innegable atractivo de Marte, el irresistible glamour de Saturno, ni la imponente estatura de Júpiter. Sin embargo, Mercurio tiene lo suyo... mucho más de lo que creíamos hasta comienzos de este siglo. La apasionante imagen contemporánea del planeta más cercano al Sol comenzó a delinearse hace 50 años, gracias a la sonda Mariner 10 de la NASA. Y mucho más aún con su demorada sucesora, la exitosa MESSENGER, que estuvo varios años en órbita de este mundo tan brutalmente caliente como frío. De cara a la misión que lo visitará el año próximo, la sonda doble BepiColombo, de la ESA y la JAXA, es un buen momento para repasar lo que sabemos de Mercurio, y por qué no, de aventurarnos a lo que solo sospechamos, o aún nos falta responder.

Mercurio es un pequeño mundo de extremos y rarezas. Con apenas 4880 kilómetros de diámetro, es el menor de los ocho planetas del sistema solar y el más cercano al Sol: apenas tarda tres meses en completar su órbita marcadamente excéntrica (ovalada), a una impresionante velocidad media de 170.000 km/hora. Es el planeta más “rápido”. Sin embargo, la misma gravedad solar que lo obliga a correr alocadamente en su órbita, ha ralentizado su rotación: gira sobre sí mismo a unos exiguos 10 km/hora. En ese aspecto, por el contrario, es el planeta más “lento”: su período de rotación es de 59 días. Esa extraña combinación de

velocidades (a la que se suman aceleraciones y desaceleraciones, según se ubique más cerca o más lejos del Sol) da lugar a algo muy llamativo: en la mayor parte del planeta los días -entendidos como el tiempo que separa una salida de Sol de la siguiente- duran meses. Pero esto es solo el comienzo: Mercurio es una caja de fantásticas y bizarras sorpresas, que revelaremos paso a paso.

01 *Primer plano de la superficie de Mercurio.*

“Mercurio es el segundo planeta más denso del sistema solar, superado apenas por la Tierra”.



Primera mirada: a 50 años del Mariner 10

Si bien es cierto que podemos verlo a simple vista durante los crepúsculos matutinos o vespertinos, Mercurio no es un astro visualmente generoso, ni siquiera con la ayuda de buenos telescopios. El planeta presenta un disco diminuto (nunca mayor a 10”), de color grisáceo, prácticamente carente de detalles, salvo ligerísimas variaciones de tonalidad. Lo único verdaderamente interesante para el observador telescópico son sus fases (otro planeta que muestra fases es Venus, pero son mucho más notables, dado su mayor tamaño, brillo y nitidez). No es raro, entonces, que poco y nada se supiera del aspecto de Mercurio hasta la llegada de la primera sonda espacial que lo visitó: la Mariner 10, de la NASA. Un hito del

que este año, justamente, se cumple medio siglo.

Mariner 10 realizó tres breves sobrevuelos al planeta: en marzo y septiembre de 1974, y en marzo de 1975, y obtuvo 2700 fotografías que fueron transmitidas por ondas de radio a la Tierra. Imágenes pioneras nos revelaron un mundo que, a primera vista, luce similar a la Luna. Mercurio tiene una superficie rocosa, oscura y caótica. Más allá de algunas fisuras, desniveles, escarpas y antiquísimas llanuras volcánicas (semejantes a los “mares” lunares), su corteza está acibillada de cráteres de impacto. Son las impresionantes huellas geológicas que dan cuenta de los violentísimos tiempos que vivió el sistema solar en sus épocas de formación, hace más de 4 mil millones de años.

Un mundo fósil y sin atmósfera

Las imágenes del Mariner 10 sugerían un mundo geológicamente “muerto”, sin indicios claros de un presente con actividad volcánica, tectónica de placas, sismos, ni erosión atribuida a factores endógenos. Los geólogos planetarios piensan que, más allá del regular impacto de partículas interplanetarias y meteoroides (o muy eventualmente de asteroides o cometas, una vez cada varios millones de años), el planeta es un mundo fósil. Poco y nada ha cambiado en su superficie desde hace 3 o 4 mil millones de años.

En sintonía con lo anterior, vale la pena recordar un dato fundamental: tal como terminaron de confirmar los instrumentos del Mariner 10, Mercurio no tiene atmósfera. El planeta es una suerte de roca pelada expuesta al espacio. ¿Por qué? Hay dos factores de particular importancia: por un lado, su proximidad al Sol (unas decenas de millones de kilómetros); y por el otro, su pequeño tamaño y, por ende, modesto campo gravitatorio. Esa combinación probablemente permitió que, a lo largo de los primeros cientos de millones de años del sistema solar, el viento solar¹ le haya ido arrancando a Mercurio su atmósfera primigenia. Esa carencia tiene varias consecuencias para el planeta, entre ellas, la brutal variación de las temperaturas superficiales: 430 °C de día y -180 °C de noche. Es el planeta con mayor amplitud térmica del sistema solar: más de 600 °C. Lo dijimos al comenzar: es un mundo de extremos.

“Mensajero” en Mercurio

Más allá de su carácter histórico, el mapeado fotográfico de Mariner 10 solo cubrió un 45 % de la superficie de Mercurio. Más de la mitad del planeta quedó como una absoluta *terra incognita*. Ese solo hecho pedía a gritos una nueva misión interplanetaria. Una nave espacial que no solo pudiera completar el registro visual de la superficie, sino también ir más a fondo en tópicos físicos, químicos, geológicos y ambientales.

La sucesora de Mariner 10 se hizo esperar 30 años: en agosto de 2004, la NASA finalmente lanzó la sonda MESSENGER rumbo a Mercurio. La larga y compleja travesía incluyó tres sobrevuelos previos (entre 2008 y 2009), que le permitieron a la nave reducir gradualmente su velocidad, hasta entrar en órbita del planeta el 18 de marzo de 2011.

El nombre de la misión es un tanto juguetón: MESSENGER, desde luego, significa mensajero en inglés (y alude al “mensajero de los dioses”, una de las imágenes míticas



del planeta). Pero también es la sigla, intencionalmente acomodada, de *MERcury Surface, Space, ENvironment, GEochemistry and Ranging*.

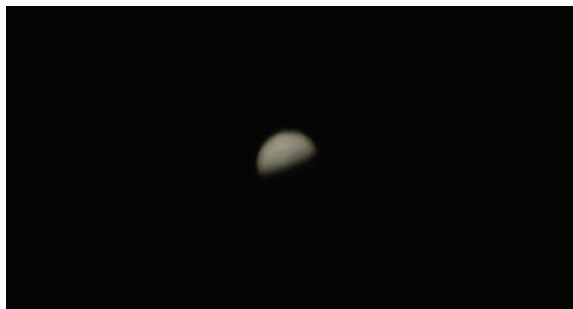
Unas semanas más tarde, en abril de 2011, los científicos que comandaban la misión desde el Laboratorio de Física Aplicada de la Universidad Johns Hopkins (en Maryland, Estados Unidos), dieron inicio formal a la exploración del planeta. Una aventura que duró cuatro años y reveló datos sorprendentes.

Campo magnético asimétrico

Desde los tiempos de Mariner 10, los astrónomos saben que Mercurio tiene campo magnético, gracias al magnetómetro de la nave. Ni por asomo tan intenso, extendido y parejo como el de la Tierra, pero campo magnético al fin (dato al

03

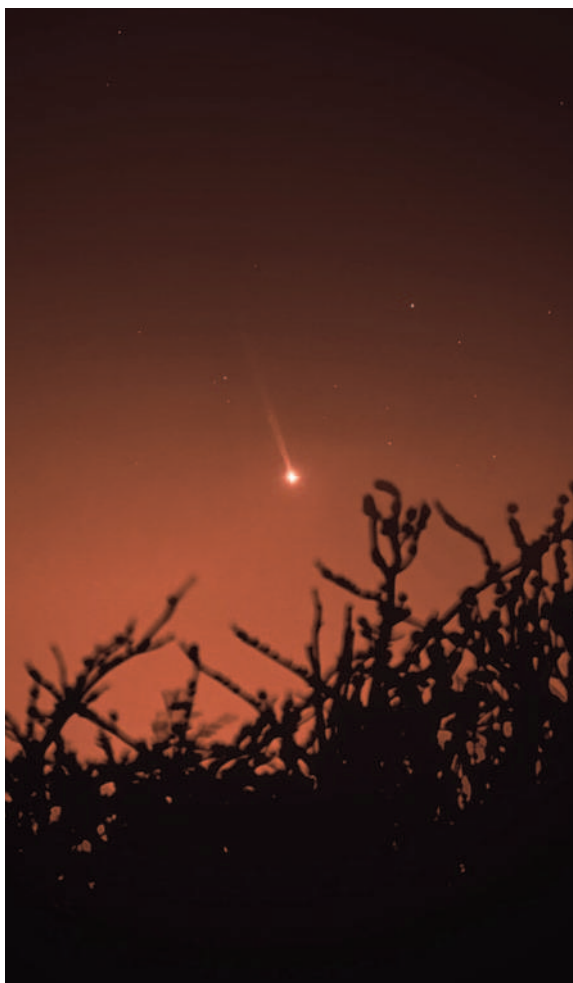
Mariano Ribas



02 Mercurio fotografiado por la sonda MESSENGER.

03 Mercurio fotografiado en el anochecer del 7 de agosto de 2023, con un telescopio de 300 mm de diámetro y una cámara planetaria ZWO ASI 385. La imagen final es un apilado de 2000 cuadros seleccionados de 10.000.

04 El histórico mosaico de imágenes obtenidas por Mariner 10, el 29 de marzo de 1974.



margen: ni Marte ni Venus -planetas bastante mayores- lo tienen). Pero MESSENGER fue mucho más allá al caracterizarlo en detalle: el campo magnético de Mercurio es “asimétrico y desviado”, en palabras de los científicos de la misión. A punto tal, que las líneas de campo magnético convergen de modo diferente en ambos polos, y provocan una suerte de “agujero” en torno al polo sur de Mercurio. Como consecuencia, la región polar austral está menos protegida que la boreal del viento solar (y otros factores externos), y eso permite una mayor erosión espacial de la superficie. De hecho, las imágenes de alta resolución obtenidas por MESSENGER mostraron una marcada decoloración del suelo mercuriano en la zona polar austral. “*No sabemos bien el porqué de esa asimetría del campo magnético, pero esa rareza sería clave para entender el interior de Mercurio*”, decía Brian Anderson, un físico que integró el equipo de MESSENGER. Justamente, el estudio del campo magnético, sumado a las mediciones del campo gravitatorio, son claves para descifrar la estructura interna del planeta. Un asunto que, como veremos, es literalmente pesado.

Atmósfera no, exósfera si

Mercurio no tiene atmósfera. No hay un verdadero manto de gases, parejo y extendido, cubriendo su superficie. Eso no es novedad, y MESSENGER lo confirmó. Pero sus

sensibles instrumentos detectaron algo de menor cuantía: el planeta tiene exósfera, una suerte de pseudoatmósfera, formada por trazas gaseosas suspendidas a decenas, y hasta cientos de km de altura (hasta entonces, esa posibilidad era solo una sospecha, sostenida por datos dispersos). Hablamos de cantidades marginales de helio, sodio, calcio, potasio, oxígeno y magnesio. Los científicos piensan que son átomos arrancados de la superficie rocosa del planeta por la acción brutal de la radiación y el viento solar, sumadas al constante impacto de micrometeoros.

Los datos de MESSENGER revelaron que la exósfera no es estática, sino que aumenta y disminuye (en densidad y extensión) a lo largo de la excéntrica órbita de Mercurio. La causa más probable es la mayor o menor incidencia del calor y del viento solar en la superficie del planeta, variaciones asociadas a la menor o mayor distancia entre Mercurio y el Sol (en el perihelio, se ubica a 46 millones de km, pero en el afelio la distancia llega a 70 millones de km). Este juego de interacciones físico-químicas tiene otro asombroso efecto, algo que es posible de detectar desde la Tierra con instrumentos relativamente simples. Pero es tan interesante que se ganó un párrafo aparte.

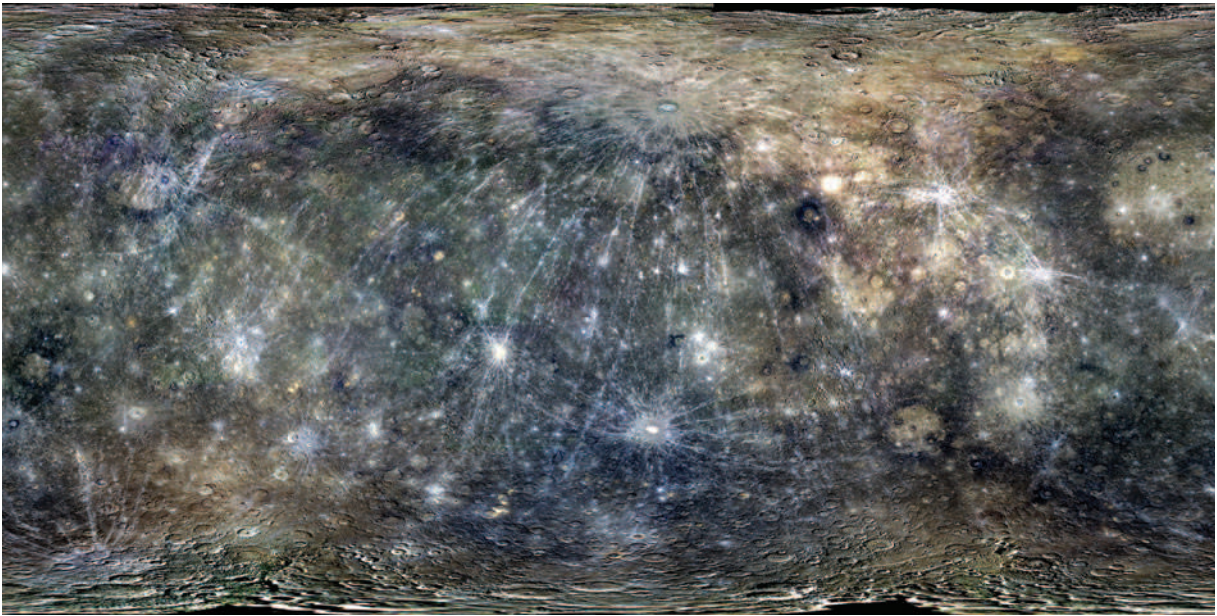
El planeta con “cola”

Durante sus tres sobrevuelos de 2008 y 2009 (previos a la inserción orbital de 2011), los instrumentos de MESSENGER detectaron una sutil estela de gases que se proyectaba desde Mercurio hacia el espacio. Una “cola” mayormente compuesta de sodio (y en menor medida, helio e hidrógeno) de varios millones de kilómetros de largo, que apunta en dirección contraria al Sol, al estilo de las caudas de gas y polvo de los cometas. ¿La causa? Los científicos piensan que el asunto está directamente emparentado con la exósfera y con los mecanismos que la generan: la continua erosión, sublimación y liberación de elementos químicos presentes en las rocas del suelo. El propio viento solar “soplaría” la exósfera mercuriana. Sí, Mercurio es un planeta con cola. En esto también es bizarro y extremo. El asunto no termina ahí: MESSENGER descubrió que esa estela de sodio fluctúa en tamaño y densidad a lo largo del tiempo, probablemente, a causa de la mayor o menor incidencia de la radiación y el viento solar en la superficie. Algo que, a su vez, no solo dependería de las variaciones de distancia entre el planeta y el Sol, sino también con la propia actividad solar y con eventuales variaciones del campo magnético de Mercurio. “*Las variaciones de extensión de la cola de sodio de Mercurio son una impactante*

05 La cola de sodio de Mercurio, fotografiada el 12 de abril de 2023.

06 Planisferio de Mercurio en color falso, que revela diferentes relieves y materiales de la superficie, ensamblado con imágenes obtenidas con filtros infrarrojos y visibles por MESSENGER entre 2011 y 2014.

07 Hollows dentro del gran cráter Tyagaraja (97 km), fotografiado en 2013 por MESSENGER.



muestra de los efectos estacionales en su exósfera, a medida que el planeta se mueve en su órbita”, explicaba Ron Vervack (Laboratorio de Física Aplicada de la Universidad Johns Hopkins), otro de los científicos de MESSENGER.

Un último dato para ponerle el moño a este tópico: la cola de Mercurio puede fotografiarse desde la Tierra, y no es necesario contar con un carísimo y complejo instrumental profesional. Durante los últimos años fue registrada por astrónomos amateurs de distintas partes del mundo. Uno de los primeros fue el italiano Andrea Alessandrini, en 2020. Más recientemente, en 2022 y 2023, la amarillenta cauda mercuriana fue revelada por otros reconocidos astrofotógrafos internacionales, como el alemán Sebastian Voltmer. Para acompañar estas líneas, elegimos una de sus fotos (05), obtenida el 12 de abril de 2023 con una cámara digital, una lente fotográfica de 135 mm y un filtro de sodio (que deja pasar la amarillenta luz emitida por este gas, en la longitud de onda de 589 nanómetros). A partir de la imagen se estima que la cola gaseosa del planeta alcanzaba los 24 millones de km de largo, más de 60 veces la distancia Tierra-Luna. Sorprendente es poco.

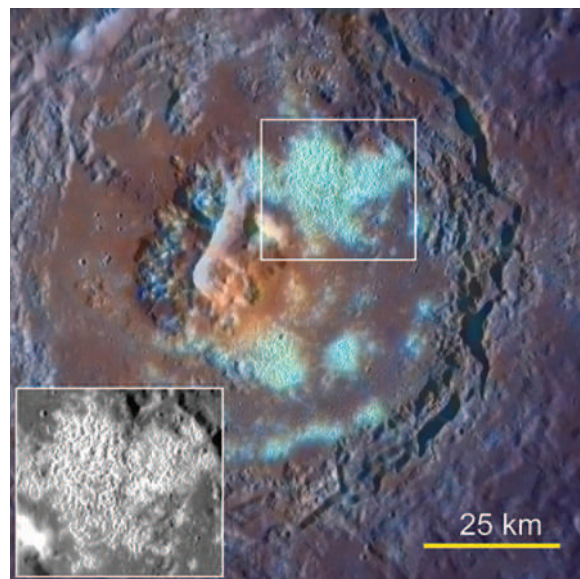
Cráteres, vulcanismo de ayer, azufre y hollows

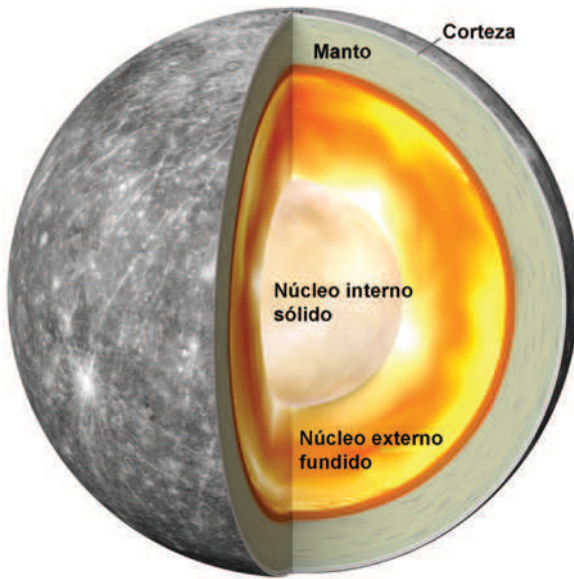
Durante sus 4 años en órbita (2011-2015), la sonda MESSENGER completó la tarea de su predecesora mapeando el 100 % del planeta con 250 mil imágenes de alta resolución que, sumadas a datos altimétricos y espectrales, permitieron ir a fondo en la caracterización del suelo mercuriano. Lo que sigue son las principales conclusiones del relevamiento:

1) Cráteres de impacto: más de 31 mil mayores a 5 km de diámetro. De ellos, más de 6 mil superan los 20 km, incluyendo los más de 400 que miden más de 100 km, y de ahí, 80 que están por encima de los 200 km. En el otro extremo de la craterización, los geólogos planetarios estimaron que los cráteres “pequeños” (de entre 10 y 5000

metros) son varios millones. Si al comienzo utilizamos la palabra “demacrado”, ya queda más que claro el porqué. 2) El vulcanismo jugó un importante rol en la traumática infancia de Mercurio: un apreciable 6 % de su superficie corresponde a llanuras volcánicas. Son mantos de roca basáltica -muy comunes en la Tierra o en la Luna- de hasta 2 km de espesor, formados en los primeros tiempos del planeta a partir del enfriamiento de lavas que, tras brotar de su interior, cubrieron grandes extensiones. Hoy en día no hay vulcanismo activo, a diferencia de la Tierra y, posiblemente, Venus. 3) Aquellos arcaicos procesos volcánicos llenaron la superficie de azufre. Mercurio es el planeta de tipo terrestre con los suelos más sulfurosos (superando, incluso, a Venus). A la inversa, su suelo es pobre en hierro. Una de las regiones del planeta más ricas en azufre es *Caloris Basin*, situada a 30° de latitud norte, una antiquísima cuenca de impacto cubierta de lavas enfriadas de 1500 km de diámetro, una

07





de las mayores estructuras de su clase en el sistema solar.

4) *Hollows*: si bien habían sido vagamente identificados por Mariner 10, una de las mayores revelaciones de MESSENGER fue la extendida presencia de unas pequeñas y brillantes fosas, generalmente amontonadas en grupos. Los científicos las bautizaron *hollows* (algo así como “huecos”). Su aspecto relativamente “joven” delataría algún proceso geológico reciente o, incluso, actual. Es probable que se trate de zonas de calentamiento y sublimación de ciertos compuestos, o de algún otro tipo de reacción físico-química. Un caso muy notable de estas formaciones es el interior del cráter Tyagaraja (imagen 07), de casi 100 km de diámetro.

5) La contracción de Mercurio (debida al lento enfriamiento de su interior) se ha prolongado hasta épocas geológicamente recientes. MESSENGER fotografió gran cantidad de *escarpas lobulares* en diferentes partes de la superficie. Estas “arrugas” (también observadas en la Luna y otros cuerpos del sistema solar) delatan el colapso de la corteza ante la reducción de volumen planetario. El proceso de contracción global podría continuar hoy en día.

Corazón metálico

Es hora de ocuparnos de la parte más dura, pesada y distintiva de Mercurio. Lo que lo define como un planeta “heavy metal”, su impresionante corazón de hierro. No es un rasgo que salte a la vista, desde luego, pero la ciencia tiene ingeniosos métodos y elegantes herramientas que revelan aquello que no es tan evidente. En este caso puntual, aquello que se esconde bien por debajo de la corteza del planeta. Pero para contar bien las cosas, una vez más, tenemos que retroceder 50 años para repasar datos obtenidos por la legendaria Mariner 10.

Las mediciones gravimétricas de la nave, de las que se deriva la masa total del planeta, permitieron calcular otro importante dato: la densidad media de Mercurio es de $5,4 \text{ gr/cm}^3$. Muy alta. A punto tal que, con ese valor, es el segundo planeta más denso de la comarca solar (apenas

superado por el nuestro, que ostenta $5,5 \text{ g/cm}^3$). Una densidad tan elevada delata una robusta y pesada composición interna. ¿Por qué? Porque ese valor global es más elevado que el de los materiales de la corteza rocosa (silicatos, principalmente). Por ende, forzosamente tiene que haber materiales más pesados/densos (y en abundancia) por debajo: metales. Algo nada raro teniendo en cuenta que la Tierra, Venus, Marte y hasta la propia Luna, están “construidos” y geológicamente *diferenciados* de ese modo: cortezas y mantos rocosos, y núcleos metálicos. Y cuando hablamos de metales, nos referimos, principalmente, al hierro.

MESSENGER confirmó los datos gravimétricos de su predecesora. Incluso, como ya dijimos, delineó la desigual distribución e intensidad del campo magnético. Ambos temas están relacionados: el campo magnético “habla” en nombre del interior profundo de Mercurio. Si existe es por algo, y a esta altura los científicos piensan que ese magnetismo es resultado de fricciones internas. Más puntualmente, corrientes eléctricas generadas por el movimiento y roce de masas metálicas (líquidas o semifundidas) en las entrañas del planeta. Algo similar al mecanismo que genera el campo magnético (mucho más poderoso, por cierto) de la Tierra. Tratándose de mundos vecinos, y con una génesis en común, no debería resultarnos extraño.

Radiografía actual de Mercurio

Los modelos actuales de geología planetaria indican que Mercurio tiene un enorme y complejo núcleo metálico. Un corazón de hierro que, comparativamente, es más grande que el de sus hermanos mayores (Marte, Venus, e incluso, la propia Tierra). Y que, además, no está frío, duro, ni “muerto” (como se pensaba hasta hace unas décadas²), sino todo lo contrario: es caliente, dinámico y sus fricciones internas generan un apreciable campo magnético global.

A partir de las mediciones gravimétricas, magnéticas y topográficas de MESSENGER, los científicos han modelado la actual maqueta geológica de Mercurio. El dato sobresaliente, por supuesto, es la escala de su pesado corazón: ese núcleo de hierro mediría unos 3800 km de diámetro, más de tres cuartas partes del tamaño total del planeta. Una bola metálica tan o más grande que nuestra Luna completa. En términos de masa, los números también impactan: el núcleo concentraría entre el 70 y 75 % del total.

Ese núcleo tendría una parte central completamente sólida, y una parte más externa viscosa e, incluso, líquida. Por encima, habría una delgada cáscara de sulfuro de hierro. Luego, un manto de unos cientos de kilómetros de espesor, mucho más rocoso que ferroso. Finalmente, envolviéndolo todo, una dura corteza, de decenas de kilómetros de grosor, básicamente compuesta de silicatos.

¿Por qué hay tanto hierro en Mercurio? Qué mejor que preguntarle al propio Dr. Sean Solomon, principal investigador de MESSENGER. “*El porqué de semejante núcleo de hierro en relación al tamaño total de Mercurio es una de las preguntas centrales que queremos responder*”, reconoce el científico. No hay certezas, pero sí hipótesis en danza. Solomon nos cuenta

que una de ellas es que Mercurio se haya formado en una zona del sistema solar primitivo muy pobre en materiales relativamente “livianos” (para simplificar: rocas), y más rica en materiales “pesados” (metales). Otra es que “*el calor solar haya despojado al planeta de la mayor parte de sus elementos volátiles originales. Incluso, cabe la posibilidad de que un tremendo impacto le haya arrancado gran parte de su corteza y manto rocosos primitivos*”.

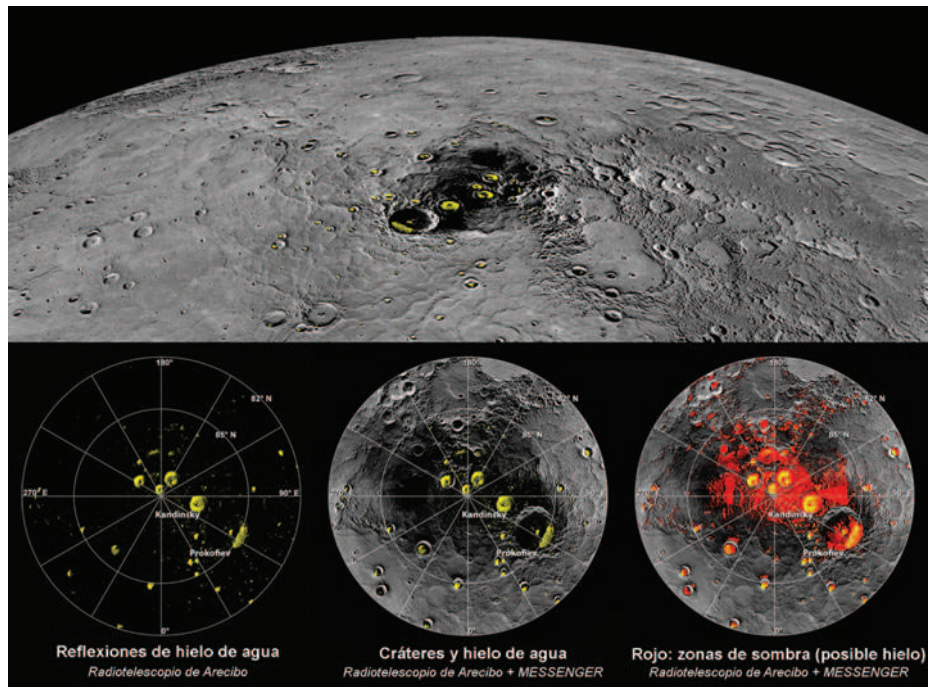
Hielos polares y materia orgánica

Si alguna vez pensamos que Mercurio era un planeta aburrido, ya va quedando claro que estábamos errados. Pero hay algo más: el planeta tendría depósitos de agua congelada y materia orgánica. Veamos primero el asunto del hielo, porque la idea de que un mundo tan caliente (durante el día) conserve masas heladas podría resultar absurda.

Los primeros indicios de la existencia de hielo en Mercurio se remontan a comienzos de la década del '90, cuando el histórico y colosal radiotelescopio de Arecibo, en Puerto Rico, detectó “*regiones muy brillantes al radar*” (en palabras de científicos de la época) en ambas zonas polares del planeta; sitios tan altamente reflectivos a las ondas de radio que parecían corresponder a superficies heladas. Aquellas pioneras pistas radiotelescópicas fueron reforzadas por otras bien entrado este siglo, pero faltaban datos más contundentes.

Justamente por eso, uno de los principales objetivos de MESSENGER fue examinar a fondo las zonas polares de Mercurio con sus cámaras, sensores y espectrómetros. Siguiendo un derrotero orbital que, en su punto más cercano, la dejaba a solo 200 km de altura de la superficie del planeta, la sonda de la NASA descubrió que aquellos potentes ecos de radio coincidían con “*áreas polares puntuales y en sombra permanente*”; concretamente, el fondo y las paredes internas de cráteres grandes y profundos, lugares donde la luz y el calor del Sol nunca llegan. Pozos de oscuridad a unos -200 °C. Los instrumentos de la nave (altímetro láser y espectrómetro de neutrones) completaron un fino relevamiento topográfico de las zonas polares, midieron la reflectancia infrarroja de los materiales de la superficie y detectaron excesos de hidrógeno. En suma: “*El hielo de agua pasó por estos desafiantes tests, y ningún otro material iguala las características que medimos*”, explica Solomon.

Eso, en lo cualitativo. Vamos a lo cuantitativo: Mercurio



tendría entre 100.000 millones y 1 billón de toneladas de hielo en torno a sus polos. Capas de agua congelada de 10 a 20 metros de espesor, expuestas, o total o parcialmente cubiertas de una fina capa de materiales rocosos e, incluso, orgánicos: en 2013 y 2014 MESSENGER descubrió gran cantidad de “parches oscuros” en zonas polares, incluyendo el interior de cráteres helados. Los datos espectroscópicos revelaron que son depósitos de compuestos orgánicos (basados en el carbono). Cráteres, agua congelada y materia orgánica. Todo apuntaría en la misma dirección: antiquísimos impactos de cometas e, incluso, asteroides, ricos en hielos y sustancias ricas en carbono. Y acá se abren varias preguntas: ¿podrían existir depósitos de agua líquida debajo de los mantos de hielo, en lo profundo de la corteza del planeta y al amparo del calor interno? Y de ser así, ¿esa agua líquida podría estar orgánicamente “sucia”? Son preguntas apasionantes que, a pesar de su enorme legado científico, MESSENGER no llegó a responder.

El 30 de abril de 2015 la nave se estrelló contra la superficie de Mercurio. Había permanecido más de 4 años en órbita, completando 4100 vueltas al planeta, transmitiendo a la Tierra 291 mil imágenes y una avalancha de datos de todo tipo. Fue un final tan épico como intencional: al estrellarse, a una velocidad de 14.000 km/hora, la sonda de 513 kilogramos de peso provocó, según los

08 *El actual modelo geológico de Mercurio, con su inmenso y caliente núcleo metálico: interno (sólido) y externo (fluido).*

09 *Posibles depósitos de hielo en cráteres cercanos al polo norte de Mercurio. Imágenes de MESSENGER combinadas con datos del radiotelescopio de Arecibo (manchas amarillas).*

Lo que vendrá: BepiColombo rumbo a Mercurio

La tercera misión espacial a Mercurio ya está en camino, llegará a destino a fines de 2025 y se llama BepiColombo. Es una doble apuesta científica de la Agencia Espacial Europea (ESA) y la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA). Fue lanzada el 20 de octubre de 2018 desde el Centro Espacial de la Guayana Francesa. Desde entonces siguió un complejo derrotero interplanetario, consistente en sucesivas y cada vez más “cerradas” órbitas en torno al Sol. A punto tal que, en estos últimos años, BepiColombo realizó un sobrevuelo a la Tierra, dos a Venus (en 2020 y 2021) y seis al propio Mercurio (en 2021, 2022, 2023, más dos que hará este año y el último, a comienzos de 2025).

Esta trayectoria en etapas permite desacelerar gradualmente la nave y así, ser finalmente atrapada por la gravedad de Mercurio y entrar en órbita. Un viaje más corto y directo requiere motores mucho más grandes y potentes, y muchísimo más combustible, para lograr la captura gravitatoria; en suma, una nave enorme, más cara y más difícil de lanzar.

Si todo marcha bien, BepiColombo se colocará en órbita de Mercurio el 5 de diciembre de 2025, iniciando formalmente su tarea científica (más allá, por supuesto, de algunos datos e imágenes obtenidos en sus fugaces sobrevuelos previos). La mi-



Mercurio fotografiado el 21 de junio de 2023 por la sonda BepiColombo durante su tercer sobrevuelo al planeta.

sión no está formada por una, sino por dos sondas orbitadoras: la *Mercury Planetary Orbiter* (MPO), de la ESA, y la *Mercury Magnetospheric Orbiter* (MMO), de la JAXA. Será su primera vez en Mercurio para ambas agencias. ¿Los objetivos? Fundamentalmente, tres: 1) La búsqueda y estudio de hielo en las regiones polares. 2) Escrutar a fondo la composición y estructura del planeta. 3) Modelar en detalle la intensidad y distribución del campo magnético. Allí va, pues, la intrépida BepiColombo rumbo al pequeño planeta metálico.

cálculos, un cráter de unos 15 metros de diámetro y 3 o 4 de profundidad; una suerte de excavación que, justamente, será científicamente aprovechada por la próxima misión que visitará el planeta. Esa fosa abierta en suelo mercuriano dejó al descubierto materiales internos y vírgenes, dada su menor exposición al ambiente exterior.

La buena noticia es que ya hay otra misión en viaje que llegará a Mercurio el año que viene. Se llama BepiColombo³ y es una doble apuesta científica europeo-japonesa (ver recuadro).

A esta altura podemos preguntarnos: ¿qué más nos puede enseñar Mercurio, especialmente en el contexto de los mundos vecinos, incluido el nuestro? Le dejamos el cierre al Dr. Sean Solomon: “Mercurio nació y evolucionó a partir de los mismos procesos que originaron a los otros planetas terrestres. Sin embargo, es muy raro: es bastante más chico, mucho más pesado, tiene una órbita muy excéntrica y una rara relación entre su veloz movimiento orbital y su lento movimiento de rotación. Además, muestra una extraordi-

naria amplitud térmica, entre día y noche. Y hasta tendría agua congelada en sus cráteres polares. No podemos decir que realmente conocemos los procesos que dieron forma al sistema solar, hasta que podamos explicar un resultado planetario tan extraño como Mercurio. Si lo logramos, también habremos ganado un conocimiento más profundo de la propia Tierra”. ■

Notas

1 El viento solar es una corriente de partículas cargadas (mayormente, protones) que el Sol emite constantemente en todas direcciones. Sus efectos se hacen sentir de diferentes maneras en los planetas. En el caso de Mercurio, afecta directamente la superficie.
2 La idea de que el núcleo de Mercurio era frío e inactivo dominó el panorama de la astronomía durante buena parte del siglo XX. Se creía que un planeta mucho más pequeño que el nuestro debería haberse enfriado y solidificado del todo por dentro. Hoy sabemos que no es el caso.

3 El nombre de la próxima misión a Mercurio es un homenaje a Giuseppe “Bepi” Colombo (1920-1984), gran matemático, ingeniero y físico italiano que dedicó parte de su vida al estudio de Mercurio, y colaboró con la NASA en la misión Mariner 10.

LUCES DEL INFINITO

DEVELANDO LOS COLORES DEL UNIVERSO

Casi todo lo que sabemos del universo se lo debemos a la luz que nos llega de los astros, algunos, increíblemente lejanos. Pero... ¿qué es la luz? Durante milenios, las mentes más brillantes de la humanidad intentaron resolver esta pregunta, simple pero profunda: "Luces del infinito" nos trae algunas sorprendentes respuestas, y nos lleva a descubrir el cosmos de la mano de coloridas, espectaculares y "luminosas" imágenes.



VENTA ÚNICAMENTE ONLINE
www.planetario.gob.ar/espectaculos-publico-general



ARGENTINA MIRA EL CIELO

<https://planetario.buenosaires.gob.ar/argentina-mira-el-cielo>

Exposición de Astrofotografía

ASTROFOTO: FRANCO MECONI



PLANETARIO
Galileo Galilei · Buenos Aires