ISSN 2422-8095

SI MUOVE

NÚMERO 26 - PRIMAVERA 2023

REVISTA DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA DEL PLANETARIO DE LA CIUDAD DE BUENOS AIRES GALILEO GALILEI

PLANETARIO
Galileo Galilei · Buenos Aires

Espectáculo de divulgación astronómica para público en general

El deseo de comprender el universo bien puede ser la más antigua experiencia intelectual que tiene en común la humanidad. Los invitamos a compartir un impresionante viaje a través del tiempo y el espacio que nos permitirá descubrir el universo que la ciencia nos ha revelado.

DE LA TIERRA AL UNIVERSO

Buenos Aires Ciudad

SI MUOVE

NÚMERO 26 - PRIMAVERA 2023

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
GUILLERMO ABRAMSON
DIEGO CÓRDOVA
FACUNDO RODRÍGUEZ
ALEJANDRO HACKER

COLABORACIONES
Gabriela Sorondo, Sol Bejarán,
Delfina Rosa, Karina Herrera,
Pablo Laise, Mario Casco,
Carlos Di Nallo, Andrea Anfossi,
Cyntia Olivera, Sergio Eguivar,
Alejandra Brusadin, Melisa Quintero,
María Paula Pia, Paula Hazembiler.

AGRADECIMIENTOS
NASA, ESA, NSF.

CORRECCIÓN
Walter Germaná, Natalia Jaoand.

FOTO DE TAPA
Aurora polar desde Selfoss, Islandia.
Carlos Di Nallo.

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 reproducción, y/o puesta a disposición como resúmenes, reseñas o revistas de prensa con fines comerciales, directa o indirectamente lucrativos. Registro de la Propiedad Intelectual en trámite.

Buenos Aires Ciudad

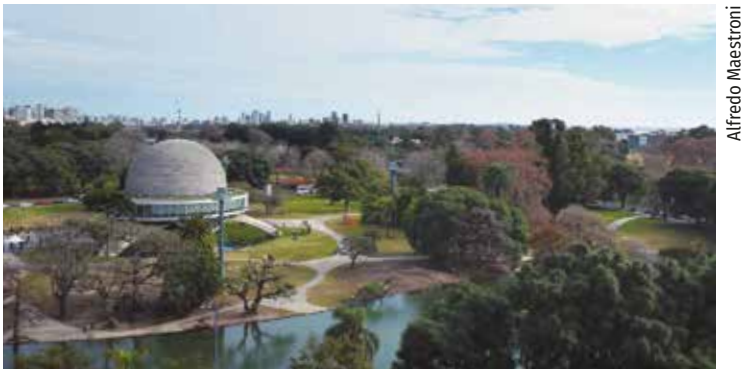
Ministerio de Educación

Jefe de Gobierno: Horacio Rodríguez Larreta
Ministra de Educación: María Soledad Acuña
Subsecretario de Tecnología Educativa
y Sustentabilidad: Santiago Andrés
GO del Planetario: Estefanía Coluccio Leskow

EDITORIAL

Si Muove es una ventana única que nos invita a explorar a través de sus textos los misterios del universo y, al mismo tiempo, reflexionar sobre el poder transformador de la educación.
La astronomía, con su capacidad para despertar la curiosidad y fomentar la indagación, nos brinda la posibilidad de expandir nuestras mentes y descubrir nuevos horizontes. El Planetario, con sus 56 años de historia, es un referente en el conocimiento y la divulgación científica para estudiantes y vecinos de la Ciudad, un lugar donde la pasión por aprender se vive en cada rincón.
Los invito a recorrer estas páginas para conocer un poco más de cerca las maravillas que el universo tiene para ofrecernos, para que podamos seguir preguntando y aprendiendo siempre, como una forma de habitar el mundo con libertad. Espero que disfruten de esta nueva edición tanto como yo.

Soledad Acuña
Ministra de Educación de la Ciudad de Buenos Aires.



Alfredo Maestroni

Planetas, estrellas, galaxias, auroras… Son tantos los astros del universo y los fenómenos astrofísicos que nos maravillan desde la primera vez que el ser humano alzó la mirada hacia el cielo. En este número de **Si Muove**, continuamos con nuestro compromiso de difundir el conocimiento astronómico en la sociedad, de visibilizar la labor científica de los investigadores y las investigadoras de nuestro país, y de contribuir a que la belleza del cosmos nos conmueva cada vez más.
Este año estamos celebrando los 550 años del nacimiento de Nicolás Copérnico y los 480 años de su muerte. Este estudioso de la astronomía, la matemática, la medicina, la filosofía y el derecho, más preocupado por poder demostrar sus ideas que por ser perseguido por ellas, pateó el tablero en el que se inscribía un sistema solar geocéntrico para plantear la revolucionaria idea de que los planetas giraban alrededor del Sol. En su honor, exploramos su vida y cautivadora historia en estas páginas que sostienen en sus manos.
Esperamos que cada artículo los inspire a aprender y disfrutar, que las impresionantes astrofotografías los emocionen y que la lectura los estimule a seguir investigando. Y por supuesto, los esperamos en el Planetario para seguir compartiendo juntos el placer de contemplar el universo. ¡Hasta la próxima edición!

Dra. Estefanía Coluccio Leskow
Planetario de la Ciudad de Buenos Aires Galileo Galilei.

Declarada de Interés Social y Educativo en la Ciudad de Buenos Aires.

Código QR

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

Jean-Léon Huens (1921-1982).

09 Nicolás Copérnico, el revolucionario silencioso.

17 Eclipse parcial de Sol.

Carlos Di Nallo

25 Auroras polares.

SUMARIO

03 Editorial.

06 Saturno, según pasan los años.

07 Récord involuntario en la ISS.

09 Nicolás Copérnico, el revolucionario silencioso.

17 Eclipse parcial de Sol.

18 El color de las estrellas.

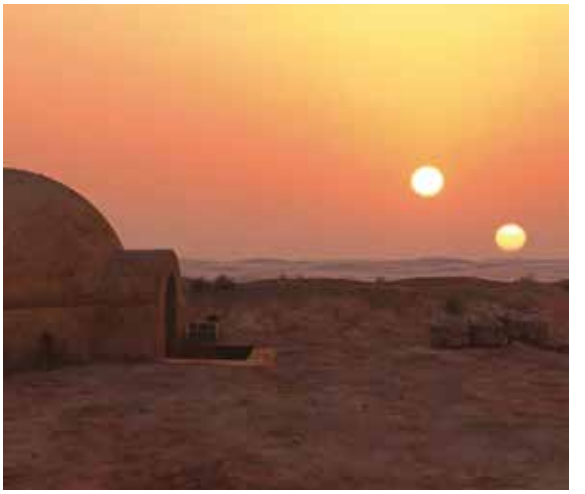
25 Auroras polares.

28 Supersoles. Las primeras estrellas del universo.

35 Exoplanetas. Mundos fuera del sistema solar.

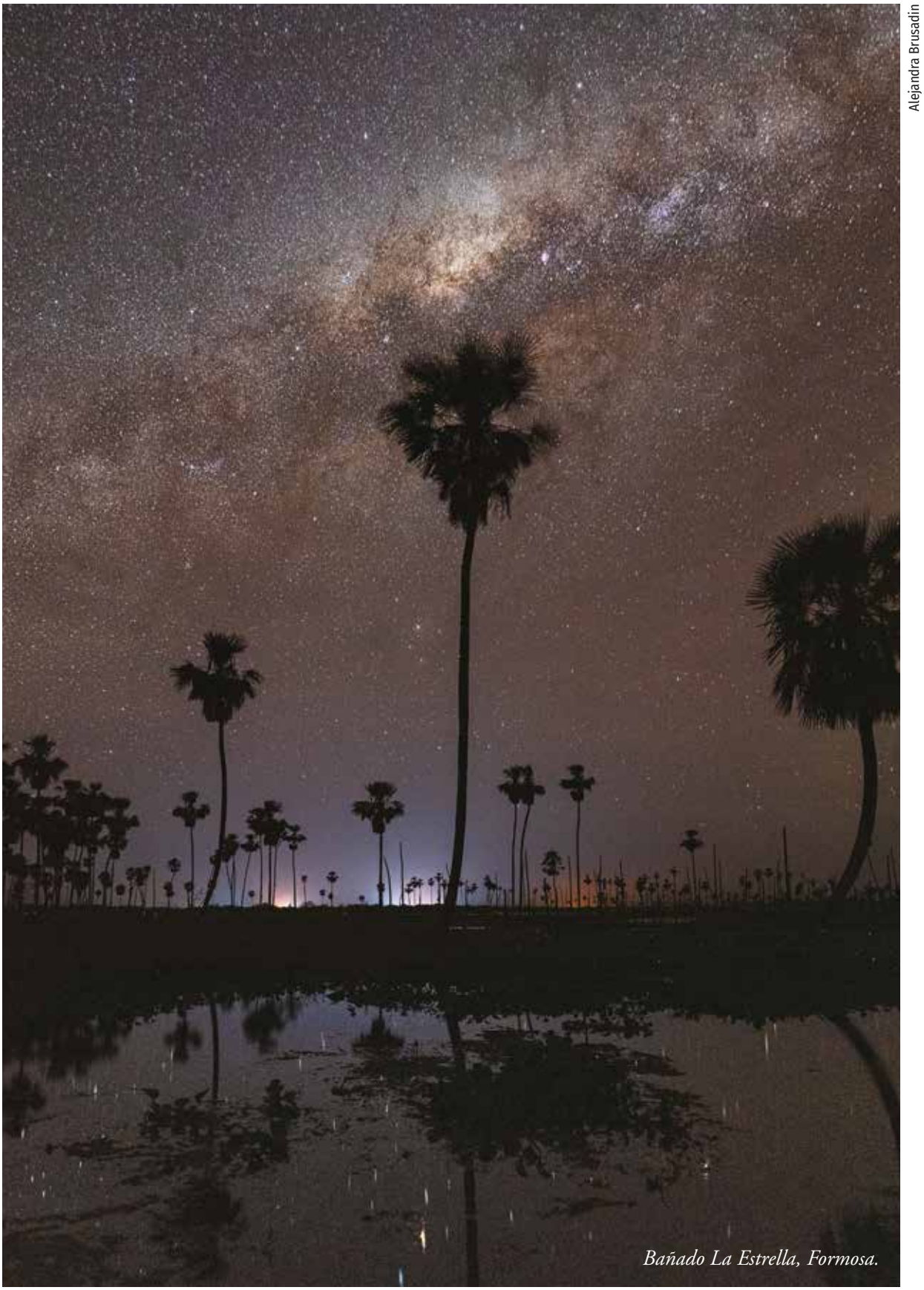
40 Galaxia solitaria.

44 Galería astronómica.



35 Exoplanetas. Mundos fuera del sistema solar.

44 Galería astronómica



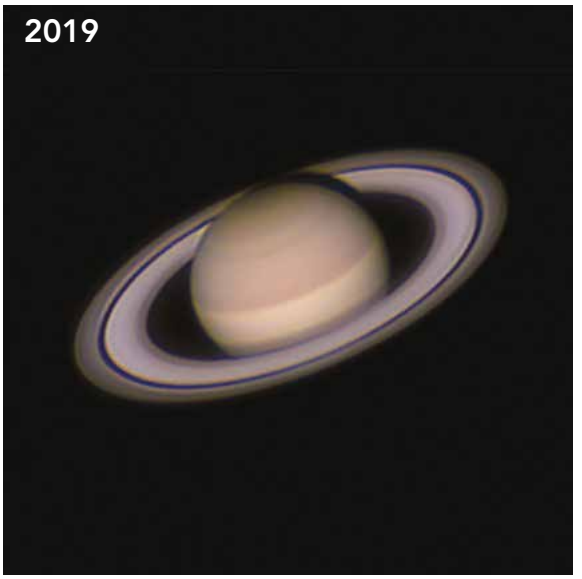
Alejandra Brusadin

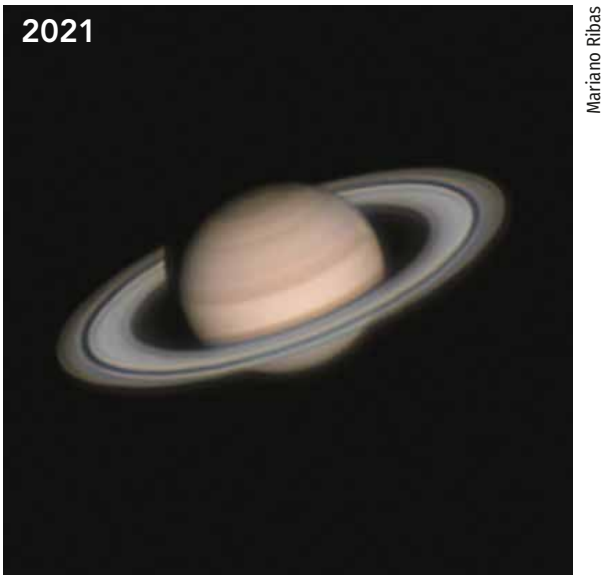
Bañado La Estrella, Formosa.

SATURNO, SEGÚN PASAN LOS AÑOS

Los anillos de Saturno quedan de perfil a la Tierra cada 15 años. En esta secuencia de fotos obtenidas en 2019, 2021, 2022 y 2023 respectivamente, con el mismo equipo, bajo aceptables condiciones atmosféricas y habiendo aplicado técnicas muy similares, podemos ver cómo la orientación del planeta y sus anillos ha ido cambiando notablemente. En la imagen de 2019 solo vemos el hemisferio norte, mientras que, en la más reciente, ya asoma claramente el hemisferio sur. Los anillos se han ido "cerrando" a nuestra visual, y esta tendencia seguirá hasta abril de 2025, cuando directamente quedarán de perfil, casi invisibles desde nuestra posición. En un par de años veremos, entonces, a través de telescopios, el planeta atravesado por un "hilo" fino, con los anillos de perfil, sin ninguna inclinación aparente con respecto a nosotros. Luego, año tras año, veremos el proceso inverso.

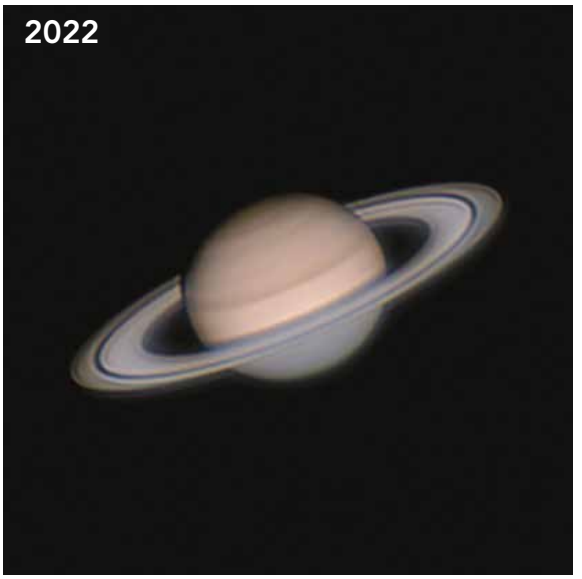
Mariano Ribas

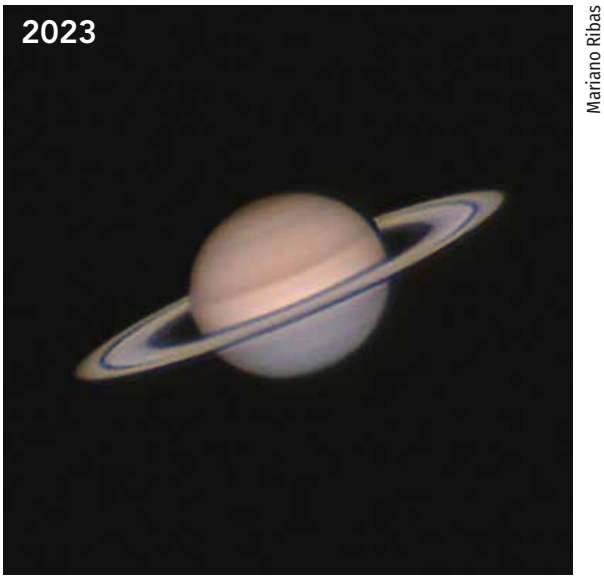




Mariano Ribas

Mariano Ribas





Mariano Ribas

En la Estación Espacial Internacional

RÉCORD INVOLUNTARIO DE PERMANENCIA

Autor: *Lic. Diego Córdova, www.prensaespacial.com*

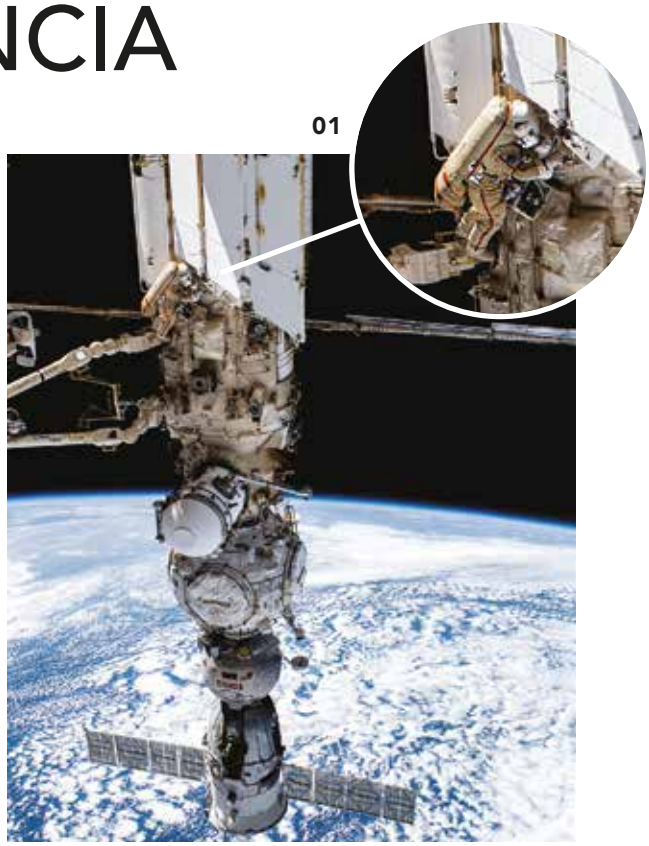
El 21 de septiembre de 2022 despegó desde la base de Baikonur, en Kazajistán, la Soyuz MS-22 rumbo a la Estación Espacial Internacional, el gran complejo orbital que ya lleva 23 años con permanencia humana ininterrumpida. La tripulación la conformaban el comandante Sergei Prokopyev, de 42 años, con un vuelo anterior de experiencia en su haber; y los ingenieros de vuelo, que realizaban su primera misión, Dmitri Petelin, de 39 años, y Francisco Rubio, de 45 (descendiente de salvadoreños). Formaban parte de la Expedición 68, una de las más particulares dentro de esta etapa de la historia del complejo orbital, que daba cumplimiento a un acuerdo celebrado entre las agencias espaciales NASA y Roskosmos, que contempla la inclusión de un astronauta de la NASA en las naves rusas Soyuz y un cosmonauta ruso en las naves Crew Dragon de SpaceX; un enroque que aseguraría la inclusión de tripulantes de ambas partes en la Estación, para prevenir ausencias por potenciales retrasos en los lanzamientos.

En el marco del nuevo acuerdo, la cosmonauta Anna Kikina realizó su primer vuelo a bordo de la nave Endurance, tercera de la flota Crew Dragon de SpaceX, integrando la Crew 5, la otra parte de la Expedición 68. El 6 de octubre de 2022 llegó a la Estación Espacial Internacional, junto a los astronautas de la NASA Nicole Mann y Josh Cassada, y al japonés Koichi Wakata. Una vez reunidos, los siete integrantes de la Expedición 68 comenzaron con las tareas que los mantendría ocupados por los siguientes seis meses. Una de las primeras tareas, que involucró a toda la tripulación, fue la descarga de las 3,7 toneladas de provisiones, instrumental científico, equipos para caminatas espaciales e insumos informáticos llegados a bordo del carguero estadounidense Cygnus 18, el 9 de noviembre; una tarea que suele llevar semanas, a la cual se le sumó la del carguero ruso Progress MS-21, que llegó el 27 del mismo mes. En noviembre comenzó una serie de caminatas espaciales destinadas, por un lado, a preparar la recepción de un nuevo juego de paneles solares desenrollables llamados iROSA; y por otro, se preparaba la instalación de un soporte para grandes cargas en el módulo ruso Nauka y su brazo robot llamado ERA.

Sin embargo, el 14 de diciembre de 2022 ocurrió un percance que alteraría todo el orden establecido. Mientras Prokopyev y Petelin se preparaban para una nueva caminata, se detectó una gran fuga de fluidos en la nave Soyuz MS-22, acoplada al puerto Nadir del módulo Rassvet, la misma que los había llevado a la Estación en septiembre y debía regresarlos a fines de marzo de 2023.

La caminata espacial se canceló y comenzaron a tomarse imágenes de la nave dañada y su constante y visible fuga, para ser analizadas en Moscú y Houston. La fuga era de un líquido refrigerante denominado Triol, una mezcla de agua, amoníaco y glicerina, que sirve para mantener la temperatura del interior de las naves a un nivel constante y disipar los excesos de calor a través de sus radiadores, ya que el vacío espacial es un gran aislante. Sin un sistema dedicado a ello, no se libera el calor en exceso de las cabinas y los motores. La fuga se produjo en los circuitos primarios y provocó que todo el contenido del refrigerante se vertiera al exterior, sin inundar la cabina de la nave.

01



El 27 de septiembre de 2023 retornó a la Tierra la nave Soyuz MS-23 con los cosmonautas rusos Sergei Prokopyev y Dmitri Petelin, y el astronauta estadounidense Francisco Rubio. Después de 371 días en el espacio son, hasta hoy, los seres humanos que más tiempo ininterrumpido pasaron en la ISS.

01 *El cosmonauta Sergei Prokopyev trabaja sobre la estructura del módulo Nauka, acoplado a la Estación Espacial Internacional.*

02

Tras un primer análisis, el director de la agencia espacial Roskosmos, Yuri Borisov, declaró que la fuga se originó a raíz de un impacto de micrometeorito[1], lo que provocó un orificio de 0,8 cm, por donde escapó el refrigerante, y que estudiarían los pasos a seguir para traer de regreso a los tripulantes de manera segura. Sin un sistema de refrigeración, la temperatura de la cabina de la Soyuz MS-22 trepó a los 40º C, una cifra por encima de lo tolerable. Aunque un viaje de regreso solo duraría tres horas, no era aconsejable que los sistemas de navegación funcionaran a esas temperaturas, pues no había garantía de que lo hicieran correctamente. La Soyuz MS-22 permaneció cerrada y aislada del resto de la Estación Espacial.

No solo el regreso de Prokopyev, Petelin y Rubio estaba comprometido, sino que, **por primera vez en la historia, se dio un escenario con siete personas en el espacio y una nave apta para traer de regreso solo a cuatro**. Se estudiaron alternativas para un regreso seguro, en caso de ocurrir una contingencia, y a la vez definir cuándo y cómo traer de regreso a los tres tripulantes de la nave rusa. No había manera de incluirlos en la Crew Dragon, pues no había capacidad ni manera de instalar sus tres asientos. Las otras alternativas eran lanzar la Crew 6 como rescate con un solo astronauta, y traer de regreso a los otros tres (algo políticamente inaceptable para Rusia); o lanzar la Soyuz MS-23, comandada por un solo cosmonauta, y traer a sus dos compañeros rusos, mientras que el asiento de Rubio podría moverse de la Soyuz a la Crew Dragon para que pudiera volver con ellos.

Pero, en todos los casos, ni la Crew Dragon ni la Soyuz MS-23 podían lanzarse antes de febrero de 2023. Finalmente, se optó por enviar la Soyuz MS-23 el 24 de febrero, sin tripulantes, para que actúe como vehículo de regreso para los tres cosmonautas. La nave se acopló de manera automática dos días después. Por lo tanto, durante el período comprendido entre el incidente de la fuga del refrigerante de la Soyuz MS-22 y el arribo de la Soyuz MS-23, la Estación Espacial estuvo en una inusual emergencia que todos acordaron disimular. La Soyuz MS-23 ya estaba en la Estación Espacial y en condiciones de traerse de regreso a los tres cosmonautas, pero sus relevos recién llegarían en septiembre de 2023, en la Soyuz MS-24.

Esta situación obligó a Prokopyev, Petelin y Rubio a duplicar su estadía espacial, de los originales seis meses a más de un año, en que debieron realizar tareas de investigación científica y caminatas espaciales, entre mayo y agosto, para las cuales no habían sido entrenados.

La Expedición 69 dio comienzo en la Estación Espacial en marzo de 2023 con la partida de la Crew 5 y la llegada de la Crew 6, con los astronautas de la NASA Stephen Bowen, Warren Hoburg, el emiratí Sultan Al Neyadi y el cosmonauta Andrei Fedyayev. Pero los otros tres integrantes de esta nueva expedición seguirían siendo los varados de la Soyuz MS-22. Sergei Prokopyev siguió siendo el comandante, y así se convirtió en la persona que más tiempo desempeñó ese cargo en la Estación Espacial.

El 28 de marzo de 2023 la Soyuz MS-22 retornó a la Tierra sin sus tripulantes, aunque se aprovechó su capacidad de carga para retornar algunos experimentos científicos. La temperatura interior había rozado los 50º C, lo cual hubiera sido insoportable para los cosmonautas.

Finalmente, el ansiado relevo llegó con la Soyuz MS-24 el 15 de septiembre de 2023, a cargo de los cosmonautas Oleg Kononenko[2] y Nikolai Chub (quienes pasarán un año a bordo de la Estación Espacial, pero de manera programada), y la astronauta de la NASA Loral O'Hara. El 27 de septiembre, Prokopyev, Petelin y Rubio regresaron en la Soyuz MS-23, aterrizaron en las estepas de Kazajistán tras completar 371 días en órbita, la mayor permanencia en la Estación Espacial. Si bien el récord ruso para una sola misión sigue siendo el de Valery Poliakov, con 438 días en 1995, Rubio ahora es el astronauta de la NASA que más tiempo pasó en el espacio, superando a Mark Vande Hei, cuyo récord era de 355 días.

El récord inesperado para Prokopyev, Petelin y Rubio, sin dudas, ha sentado un precedente en la historia de los vuelos espaciales tripulados, y ha determinado nuevas pautas y protocolos a la hora de enfrentar contingencias y brindar apoyo por parte de ingenieros y técnicos, tanto moral como psicológico, para seguir aprendiendo cómo trabajar y vivir en el espacio. ■

Notas

1 Es poco probable. La nave de carga Progress MS-21 y el módulo Nauka sufrieron el mismo percance, en febrero y octubre de 2023 respectivamente. Eso puso en tela de juicio la capacidad del sector ruso de la Estación Espacial Internacional.

2 Con su actual misión, Oleg Kononenko acumulará 1100 días en el espacio y será el humano con mayor experiencia fuera de la Tierra.

03

02 *La Soyuz MS-22 perdiendo su fluido refrigerante, captada por las cámaras del brazo robot Canadarm2.*

03 *De izq a der: Francisco Rubio, Sergei Prokopyev y Dmitri Petelin, las personas que más tiempo pasaron a bordo de la Estación Espacial Internacional, rescatados en Kazajistán, tras su regreso.*

Nicolás Copérnico,
a 550 años de su nacimiento y 480 de su muerte (para los devotos del sistema decimal).*

EL REVOLUCIONARIO SILENCIOSO

Autor: *Diego Luis Hernández, Planetario de la Ciudad de Buenos Aires Galileo Galilei.*

Jean-Léon Huens (1921-1982)

"Copérnico no solo puso en movimiento a la Tierra, sino también a la mente humana", Giordano Bruno (1548-1600).

Desde que tomamos conciencia del mundo que nos rodea, sabemos que vivimos en un planeta que gira alrededor del Sol. La teoría heliocéntrica nos resulta tan natural como las razones que explican el día y la noche, las estaciones y los predecibles movimientos de los astros. Pero, ¿es eso tan evidente? ¿Cómo la humanidad vivió milenios sin darse cuenta? ¿Qué clase de inspiración tuvo un hombre eclesiástico del siglo XVI para notarlo? ¿Por qué su teoría tardó tanto tiempo en ser revisada dignamente y en aceptarse? ¿Cómo se topó con una idea contraria a las percepciones naturales y a las corrientes tradicionales del pensamiento humano?

Esta es la historia de Nicolás Copérnico, y de cómo la mente humana abandonó un universo estructurado.

Nicolás Copérnico no pretendió consumar ninguna revolución, y no fue consciente del cambio que generaría en la humanidad. Su sistema fue el último intento por remendar una maquinaria obsoleta. Representó una obra moderna en un escenario antiguo, con ideas innovadoras que la infraestructura existente no era capaz de sostener.

Noticias de la antigua Grecia

"El universo es infinito, eterno e indestructible", aseguraba el filósofo griego Anaximandro de Mileto, dos mil años antes de que Copérnico naciera. La antigua ciencia[1] se transformó en el siglo VI a. C., cuando Pitágoras de Samos reunió religión, misticismo, matemática y geometría. Enseñaba la existencia de un universo regular, predecible y aritmético, y fue el primero que utilizó la palabra *cosmos* para empalmar la Tierra y el universo en una ordenada combinación. Los pitagóricos creían que los astros se movían en trazos geométricos y que representaban problemas ideales que podían ser resueltos por los caminos del razonamiento. Pero sus doctrinas se mantenían en un círculo cerrado que archivaba sus códigos secretamente.

Fue Filolao, en el siglo V a. C., el primero en otorgarle un movimiento a la Tierra, que giraba en torno a un fuego central que nada tenía que ver con el Sol. Poco después, Heráclides basó la rotación en la existencia de un eje concreto y sólido que la atravesaba mecánicamente. Aristarco de Samos, el último astrónomo Pitagórico, mencionó por primera vez que la Tierra giraba alrededor del Sol. Pero no se conocen los cálculos, los estudios ni las observaciones que lo hayan acercado a esa conclusión. Sus obras no se han conservado y solo existen unos pocos testimonios de algunos de sus contemporáneos. Arquímedes y Plutarco lo citan en sus trabajos y recuerdan lo que decía Aristarco: "*Las estrellas fijas y el Sol son inamovibles, y la Tierra se mueve en torno al Sol en una órbita oblicua, y gira a su vez sobre su propio eje*". Pero Aristarco no tuvo discípulos y su teoría quedó olvidada hasta 1543.

Los movimientos de los planetas representaban un problema que los astrónomos y matemáticos no podían explicar satisfactoriamente. Hasta que Johannes Kepler descubrió, en el siglo XVII, que las órbitas poseen una ligera forma elíptica, la filosofía y la concepción del universo a partir de Platón y Aristóteles era la de las esferas perfectas, con movimientos circulares perfectos. Aristóteles basó sus conclusiones de astronomía y física en datos ajenos y superficiales. Según él, si la Tierra se moviera, dejaría atrás todos los objetos que hay en ella, inclusive la atmósfera.

Posteriormente, Hiparco (125 años a. C.) y Tolomeo (150 años d. C.) construyeron teorías acerca de los movimientos planetarios de manera más detallada. Hiparco realizó un catálogo de estrellas fijas y calculó la distancia a la Luna con un error insignificante para la época. Tolomeo creó un sistema aparentemente simple, con la Tierra en el centro, inamovible, y el Sol y los planetas girando a su alrededor. Pero para darle consistencia e ilustración formó un laberinto de epiciclos y ruedas dentro de otras ruedas (figura 02), como un mecanismo de relojería que aún no había sido inventado. Ese sistema se transformó en la explicación "oficial" del universo durante 1400 años… hasta Copérnico.

01

Oscuridad

Tras los primeros siglos de nuestra era, con la consolidación del cristianismo se incorporaron a sus doctrinas muchas ideas erróneas que Platón y Aristóteles, cuatro siglos antes de Cristo, habían transmitido acerca del mundo. La ciencia se limitó a la contemplación y a la experiencia de los sentidos, sin fundamentarse en pruebas contundentes. El entorno filosófico modeló el universo y la manera de entenderlo, y se concentró en elementos místicos y abstractos. Cada cultura, con el paso del tiempo, lo fue ajustando a sus interpretaciones e intereses. En Occidente, se tomó de Aristóteles la creencia de que la Tierra era el centro del universo, y se instituyó una especie de ideología de la naturaleza, cubierta por entidades antinaturales y espi-

rituales. Se suprimió el interés por la ciencia y pasó a ser más importante cómo deben pensar y comportarse las personas antes que interpretar el mundo que nos rodea, aprender de él y que somos parte de él. Así se inició un período de oscuridad intelectual que despreció la experimentación y la observación. Los religiosos suplantaron a los filósofos antiguos, y las actitudes opresoras eliminaron la sed de conocimiento y postergaron la sabiduría.
Paralelamente, durante toda la Edad Media europea, el mundo islámico se encargó de rescatar el legado científico de la antigüedad y revolucionó el uso de las matemáticas. Recién en el siglo XI volvió a circular en Europa la idea de que la Tierra era redonda, pero aún inmóvil. En 1337 Nicolás Oresme[2] se animó a refutar a Aristóteles y atribuyó el movimiento diario del cielo a la rotación terrestre. Un siglo después, Nicolás de Cusa[3] afirmaba que el universo era ilimitado y que estaba en constante cambio. Por eso, la Tierra no podía ser el centro, ya que no había centro, y el Sol ocupaba ese lugar solo en el sistema planetario. Este renacimiento de ideas fue apenas una pequeña llama dentro de un amplio movimiento que estaba apareciendo, tímidamente, en gran parte de Europa, que incluiría un extraordinario auge artístico y una evolución progresista. En este marco, la circulación de las traducciones árabes de los clásicos griegos y las obras originales de numerosos hombres de ciencia islámicos, provenientes de la península ibérica, desestabilizaban los paradigmas existentes.

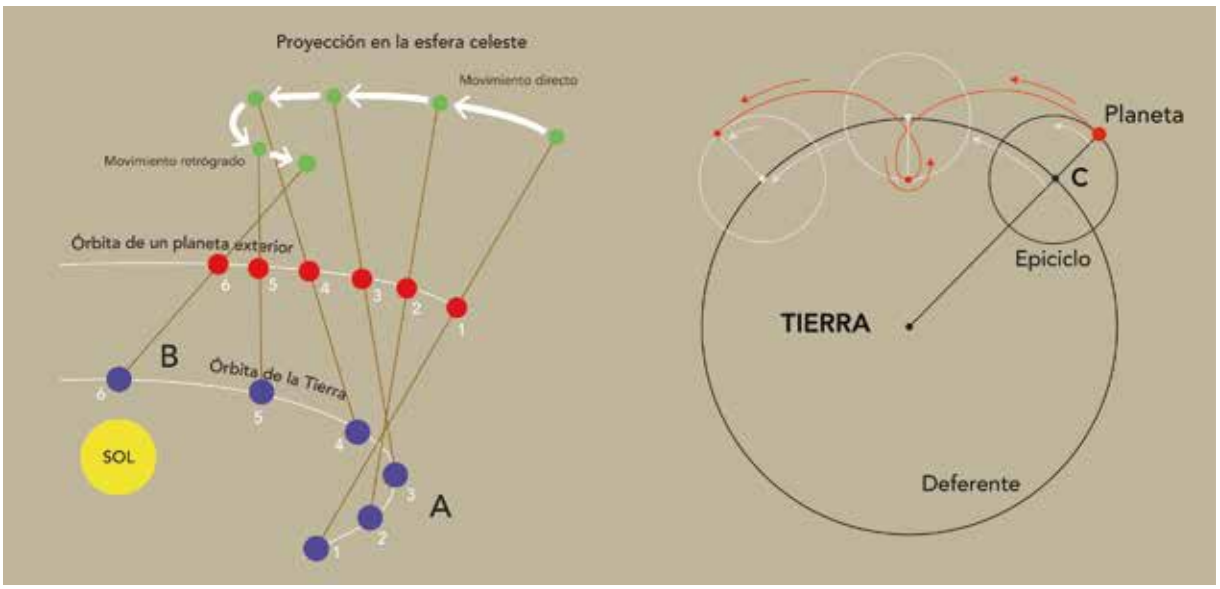
El hombre

La familia de Mikołaj Kopernik (como lo llaman actualmente en Polonia) no daba mucha importancia al sonido y la ortografía de su apellido. Copernic, Copernik, Coppernic, Coppernik, Coppernig, Koppernigk, Kopperlingh, Kopperlingk, Cupernick, Koppernieck Coppernicus y Copernicus (versión latinizada), son todas las formas en las que se ha encontrado su apellido o como él mismo lo ha escrito en diferentes ocasiones. Su padre fue registrado en Toruń como Niclas Koppernigk y su madre se llamaba Bárbara Watzelrode.
Nicolás Copérnico nació el 19 de febrero de 1473 en Toruń, sobre el río Vístula, a 200 km del Mar Báltico, en Polonia, en una época en la que los límites no eran demasiado precisos. Por eso, los alemanes han pretendido muchas veces anexionarse su nacionalidad, pero después no pasan de la primera ronda. Copérnico era católico, súbdito del rey de Polonia y canónigo del castillo de Frauenburg (o Frombork), en la provincia de Varmia (o Warmia). Hablaba en alemán y escribía los documentos importantes

01 *Una página del libro de Las Revoluciones, la única obra científica de Copérnico, su único libro impreso, publicado en 1543. Ingresó en el Índice de libros prohibidos por la Iglesia en 1616.*

02 *Los movimientos aparentes de los planetas en el cielo son el resultado de la combinación de la traslación de la Tierra alrededor de Sol, con la de esos planetas también alrededor del Sol. Por ejemplo, Júpiter tarda 12 años terrestres en completar una vuelta alrededor del Sol. En esos 12 años, la Tierra da 12 vueltas. Por lo tanto, visto desde la Tierra, el movimiento de Júpiter no "dibuja" un simple círculo, sino un movimiento aparente sobre la esfera estrellada en la que se proyecta, cambiando de dirección, una vez al año, de acuerdo a la dirección que toma la Tierra con respecto a Júpiter (si se acerca, como en la zona A, o se aleja, como en la zona B). Esto provoca el llamado movimiento retrógrado que los astrónomos no podían explicar satisfactoriamente mediante el geocentrismo. Para justificarlo, agregaron un círculo en cuyo centro estaba la órbita del planeta. El planeta, entonces, no seguía el círculo grande sino el pequeño, que en el caso de Júpiter, daba 12 vueltas por ciclo. Ese segundo círculo es el epiciclo, y una órbita de un planeta tenía más o menos epiciclos de acuerdo a la distancia que lo separara del Sol. En síntesis, según la concepción tolemaica y geocéntrica, un epiciclo es un círculo cuyo centro (C) se encuentra en algún punto de la circunferencia de un círculo mayor, llamado deferente, que a su vez gira alrededor de la Tierra.*

02



en latín. Era hijo de un magistrado rico, patricio y comerciante cracoviano. Estudió astronomía en la Universidad de Cracovia y medicina en Padua, además de matemática, filosofía y derecho. A los 33 años se doctoró en derecho canónico en Bolonia, estimulado por su tío Lucas de Watzelrode, obispo de Emerland, para poder conseguir un cargo eclesiástico que le diera un ingreso asegurado.

En la península itálica, donde Copérnico permaneció durante varios años, se manifestaba un ambiente renacentista, especialmente entre los estudiantes y los maestros más jóvenes. Allí había llegado parte de las obras antiguas que trasladaron los griegos que huyeron tras la caída de Constantinopla en 1453, en manos de los turcos. Para poder leer y comprender los conocimientos originales de la literatura y la ciencia de los antiguos, Copérnico estudió griego; fundamentalmente, la filosofía aristotélica. Algunos progresistas se alzaban ya en contra de Aristóteles y ponían en duda sus interpretaciones, pero los tradicionalistas seguían venerándolo. Hasta esa época, se honraba demasiado a los sabios de la antigüedad. Fue allí donde Copérnico se topó con el sistema heliocéntrico y la idea primitiva de Aristarco. El movimiento y la forma de la Tierra ya eran discutidos en aquel entonces.

Con más de 30 años, Copérnico dejó Italia y regresó a Varmia para asistir a su tío Lucas, el obispo, a quien acompañó en sus tareas durante casi nueve años. También se dedicó a la cartografía, fue traductor de versos griegos en prosa latina y participó de la vida política de la zona, en los parlamentos de Ermland y en las disputas del reino de Polonia con los Caballeros Teutónicos. Como economista, estuvo interesado en la reforma monetaria de Varmia, cuyo peso estaba devaluado. Luego, en 1512 llegó definitivamente a Frauenburg como canónigo, donde se quedaría hasta el día de su muerte.

03

Cómo llegó a su teoría

En la primera mitad del siglo XVI, prácticamente no existieron persecuciones por aspectos científicos por parte de los organismos de poder. A diferencia de muchos de sus antecesores y sucesores, el papa León X fue partidario de las ciencias y de las artes. En 1514 intentó emprender la aceleración de la reforma del calendario, que dos siglos y medio antes habían comenzado a cuestionar el filósofo inglés Roger Bacon y el rey de Castilla Alfonso X. Para eso se consultó a todos los astrónomos cristianos y se los invitó a participar del Concilio de Letrán, en Roma. Una carta fue dirigida a la catedral de Frauenburg, que estaba custodiada por Copérnico, quien respondió que mientras no se conocieran los movimientos del Sol y de la Luna, no se podría realizar la reforma[4]. El concilio se reunió, y Copérnico no asistió. Era natural, estaba en Frauenburg, desde donde intentó medir mejor la duración del año, como lo había pedido León X. Para eso realizó algunas observaciones, pero sus instrumentos no eran muy precisos ni modernos. Algunos los había construido basándose en las indicaciones que Tolomeo había dejado trece siglos antes. Luego de realizar sus cálculos, explicó la diferencia entre los dos tipos de años conocidos: el Año Trópico, que es el tiempo que tardan las estaciones en completar un ciclo, y el Año Sidéreo, que mide el tiempo que tarda la Tierra en completar una vuelta alrededor del Sol. La diferencia es de 20 minutos debido a la precesión de los equinoccios, un movimiento del eje de rotación terrestre que era desconocido por Copérnico, pero se sospecha que Hiparco lo había descubierto de alguna manera.

Para explicar los movimientos de los planetas, Copérnico desplegó un sistema más complicado que el de Tolomeo, con más epiciclos, más ruedas dentro de otras ruedas, más círculos deferentes. Interpretó el patrón de Aristarco de Samos y colocó el Sol en el centro del sistema. Pero como no sabía que las órbitas de los planetas eran elípticas, intentó ajustar su sistema para que coincidiera con las observaciones de los antiguos. Su posición para mantener el movimiento de la Tierra se basaba en el hecho de que si, como creían los antiguos, fuera la esfera celeste la que girara en torno a la Tierra, las estrellas (que están muy lejos) deberían recorrer distancias enormes en tiempos realmente cortos. Y eso sería más antinatural que otorgarle movimiento a la Tierra.

El Commentariolus

Una vez instalado en Frauenburg, Copérnico continuó con la preparación de un trabajo llamado *Commentariolus*, que había iniciado varios años antes y que no publicaría oficialmente hasta el final de sus días, en 1543, cuyo manuscrito parece haber terminado cerca de 1530. Lo guardó y, cada tanto, le realizaba algunas modificaciones y correcciones. Estaba lleno de tablas astronómicas, cifras

04

y diagramas. Allí presentaba un sistema del universo diferente al de Tolomeo, con el Sol en el centro y la Tierra y los planetas girando a su alrededor. Pero luego Copérnico explica que los planetas no giran directamente alrededor del Sol, sino en epiciclos, en cuyo centro está la Tierra. Esto justificaría el movimiento aparentemente retrógrado de los planetas. Además, aclara que la Tierra gira en torno a un punto en el que no se encuentra el Sol, sino que está separado del Sol por una distancia de tres diámetros solares. Así intentó darle a la Tierra una importancia central similar a la del Sol. Todo esto debía entenderse si se aceptaban primero las siguientes hipótesis:

1- No hay un centro único para todos los cuerpos celestes.
2- El centro de la Tierra no es el centro del universo, sino solo el de la gravedad y el de la órbita de la Luna.
3- El Sol es el centro del sistema planetario y, en consecuencia, del universo, y todas las esferas giran a su alrededor.
4- La distancia de la Tierra al Sol es insensible comparada con la distancia a las estrellas fijas.
5- Todo el movimiento que aparece en el firmamento no se debe al movimiento del firmamento mismo, sino al movimiento de la Tierra sobre su propio eje.
6- El movimiento anual aparente del Sol se debe a que la Tierra, como los demás planetas, gira en torno del Sol. Así, la Tierra tiene varios movimientos.
7- Lo que aparece como retrogradación de los planetas no proviene de sus movimientos sino del movimiento de la Tierra. Por lo tanto, el movimiento de la Tierra es suficiente para explicar la diversidad de los movimientos aparentes en el cielo.
Copérnico atribuye el movimiento de la Tierra a su

03 *Monumento en Toruń, ciudad natal de Copérnico, realizado en 1853 por el escultor Fryderyk Tieck.*

04 *Sin la intervención de un discípulo llamado Rheticus, que convenció a Copérnico de llevar sus trabajos a la imprenta, la teoría heliocéntrica hubiera quedado olvidada, hasta que alguien más se acordara de retomarla y estudiarla.*

05 *El libro de Las Revoluciones estaba escrito en latín, como era costumbre, y se encargaron mil ejemplares en una imprenta de Nuremberg, a 1200 km de Frauenburg, donde residía Copérnico.*

05

NICOLAI COPERNICI

REVOLVTIONVM LIB. I.

06

forma esférica, y esta forma, a la gravedad. Menciona que estas ideas ya las habían anunciado algunos de los antiguos griegos, como Filolao, Heráclides y Aristarco, y de ninguna manera se adjudica estos conceptos como propios. Tiempo después, con el nombre de *Breve esbozo de las hipótesis de Nicolai Copernicus acerca de los movimientos celestes*, envió un manuscrito a varios amigos y colegas, ya que creyó más conveniente comunicar estas ideas solo a sus allegados. Pero no recibió respuestas inmediatas.
Recién en 1532, en el Vaticano comenzaron a interesarse por sus teorías, e intentaron persuadirlo para que las publicara en forma de libro. Pero Copérnico, una vez más, se negó. Las autoridades eclesiásticas estaban muy preocupadas por el afloramiento del protestantismo luterano y en crear una nueva Inquisición que lo combatiera, y cualquier teoría astronómica no resultaría tan importante ni peligrosa… por ahora.

Pienso, luego dudo

Copérnico suponía que su hipótesis era imposible de comprobar. Por eso dudó y tardó tanto tiempo en publicarla. No podía sospechar que, poco más de medio siglo después, con la invención del telescopio, Galileo Galilei le daría una forma concreta y comprobaría algunas de esas presunciones. Tampoco esperaba una persecución ni que lo encarcelaran o torturaran, sino que temía no poder sustentar sus teorías. Sus allegados, especialmente un discípulo llamado Rheticus (Jerzy Joachim) y un único amigo íntimo, Tiedemann Giese, otro canónigo, lo convencieron de llevar el asunto a la imprenta.
Rheticus fue una pieza clave en la publicación del libro. Se le apareció a Copérnico sin previo aviso en Frauenburg en 1539, procedente de la Universidad de Wittenberg, donde comenzaba a ejercer como profesor de matemáticas. Tenía 23 años y su intención era perfeccionarse en astronomía de la mano de Copérnico. Sin la intervención de Rheticus, la teoría heliocéntrica hubiera quedado flotando nuevamente en el aire, quizás, como la de Aristarco, hasta que alguien más se acordara de retomarla y estudiarla. Más tarde o más temprano, eso hubiera ocurrido de cualquier manera.
En un principio, convenció a Copérnico de publicar la teoría como una carta que Rheticus le enviaba a un amigo[5]. Se la llamó *Narratio Prima,* o *Primera Narración del Libro de las revoluciones*, y se imprimió en 1540. Rheticus llenó el texto de adulaciones y genuflexiones hacia su maestro, más que de datos científicos precisos, y solo mencionaba al autor como *Domine Praeceptor* o Dr. Nicolás de Toruń.

El prólogo apócrifo

Más tarde, Rheticus comenzó a copiar el manuscrito original y completo del libro de *Las Revoluciones*, la que sería la única obra científica de Copérnico, su único libro impreso. Estaba escrito en latín, como era costumbre, para que lo pudieran leer los sabios de casi toda Europa. Se encargaron mil ejemplares en una imprenta que se encontraba en Nuremberg, a 1200 km de Frauenburg. Fue Rheticus a quien se encomendó la tarea de viajar hasta allí, y fue él quien le cedió la supervisión del material a Andreas Osiander, un teólogo protestante y predicador luterano. Osiander ganaría protagonismo al escribir sin permiso un prólogo anónimo que precedía la obra de Copérnico. Allí advertía a los lectores que, desde un principio, debían considerar esas teorías solo como hipótesis, que no necesariamente debían ser verdaderas, porque se contradecían con la experiencia. Sobre el final agregaba que no había que esperar de esa obra algo cierto en astronomía, pues no podía proporcionarlo.
Osiander cambió también el título original de la obra, que era *De Revolutionibus*, *Las Revoluciones*, entre las que se incluía la rotación de la Tierra. Lo amplió a *De Revolutionibus Orbium Coelestium*, *Las Revoluciones de las Esferas Celestes*, lo que excluye a la Tierra porque no se la consideraba parte de la esfera celeste.
Tanto la primera como las siguientes ediciones de *Las Revoluciones* llevaron el prólogo anónimo de Osiander, y los lectores lo tomaban como si hubiera sido escrito por el propio Copérnico. Recién en 1609 Kepler reveló la verdad del prólogo, ya que había tenido acceso a parte de la correspondencia entre Copérnico, Rheticus y Osiander. Esto hace suponer a algunos historiadores que Copérnico estuvo enterado, antes de que la imprenta finalizara su trabajo, de la existencia del inconveniente prefacio. Si fue así, no hizo nada para evitarlo. Si no lo sabía, debió haber sido un duro golpe para el canónigo agonizante al que le quedaban pocos días de vida. Seguramente, Copérnico ya no tenía mucha voluntad para cambiar las cosas, ya que estaba gravemente enfermo. Cuando recibió el libro, hacía varios meses que estaba en cama, con una hemorragia cerebral que le había provocado una parálisis parcial y, asiduamente, pérdida de la memoria. Según su amigo Tiedemann Giese, recibió el libro y, pocos días después, el 24 de mayo de 1543, murió. Tenía 70 años. Sus restos fueron sepultados en la catedral de Frauenburg, y hasta 2005 se había perdido el rastro de su ubicación exacta (ver figura 08).
Unas pocas décadas antes de la publicación del libro de *Las Revoluciones*, la Iglesia Católica había empezado a afrontar su más violenta ruptura: el cisma provocado por

07

"El libro de Las Revoluciones lleva la formidable ventaja de promover una idea más allá de cualquier explicación".

Martín Lutero, fundador del protestantismo. Lutero había clavado en la puerta de la catedral de Wittenberg 95 tesis en las que cuestionaba el proceder de la Iglesia Católica, especialmente, la venta de indulgencias, es decir, cobrar por perdonar pecados. Sus pensamientos se difundieron rápidamente por toda Europa.

Lutero criticó también duramente a Copérnico por ir en contra de las Sagradas Escrituras, pero Osiander estaba a favor de la publicación de sus teorías. La idea de insertar un prólogo en el que se presentaba la teoría heliocéntrica como una mera suposición, pudo haber sido, quizás, una excusa como para no romper definitivamente los lazos con el incipiente protestantismo. Especialmente, porque el libro se estaba imprimiendo muy cerca del lugar en el que Lutero había comenzado a extender sus ideas. Recién en 1854 se imprimieron nuevas ediciones del libro de *Las Revoluciones* en las que se advertía al lector acerca del prólogo apócrifo.

Prohibición

En Roma, la idea de eliminar el protestantismo reanimó a la Inquisición, una institución creada en el siglo XIII que iba en contra del espíritu del cristianismo. Más tarde, el mismo organismo encontró más fácil que refutar, quemar en la hoguera a Giordano Bruno (en 1600) y condenar a Galileo a retractarse de sus enseñanzas (en 1634). Hasta antes de Bruno y Galileo, la teoría copernicana no había causado ninguna conmoción. Recién en 1615, la Iglesia Católica investigó la teoría heliocéntrica y la calificó de "*estúpida y absurda en filosofía y formalmente herética, ya que contradice las Sagradas Escrituras y es perjudicial para la verdad católica*".

Desde la publicación del libro de Copérnico, pasaron 73 años hasta que fuera prohibido por las autoridades eclesiásticas. El libro de *Las Revoluciones* entró en el Índice de publicaciones prohibidas en 1616, y permaneció allí durante dos siglos, siendo prohibida su lectura bajo amenaza de "purificación" en la hoguera.

Fin. El principio

Más allá del nombre de su libro, Copérnico no pretendió encabezar ninguna revolución. Incluso, concebía el universo como una esfera cerrada que contenía el Sol y los planetas. ¿Fue consciente del cambio que generaría en la mente humana? No, no lo fue de ninguna manera. ¿Tuvo la suerte de que la historia lo reconoció más de lo que pretendía? Quizás. Si Rheticus no lo hubiese ido a ver, su obra jamás se habría publicado.

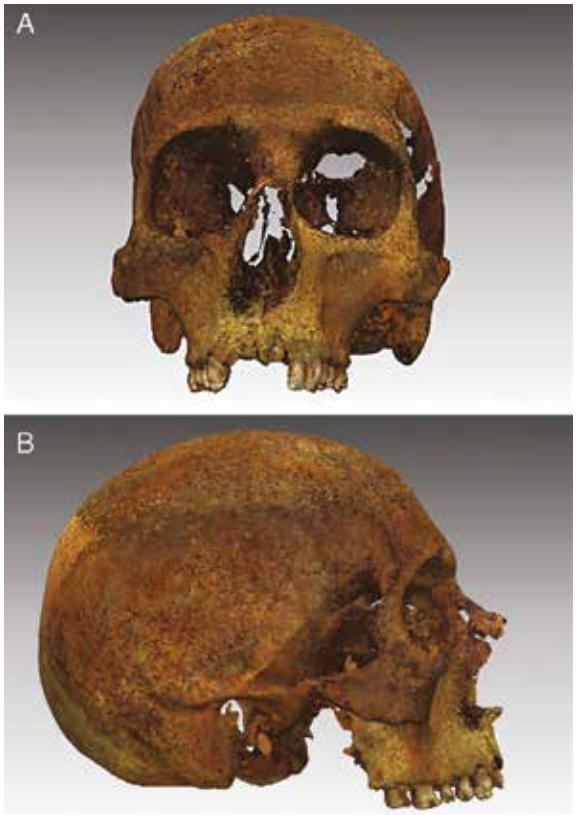
Para lo que representa en la historia del pensamiento científico, su libro tuvo muy pocas reediciones. De los mil ejemplares impresos en la primera edición, no se alcanzaron a vender todos, y hasta 1873 se hicieron solo cuatro reediciones. Quien intente leer el libro de *Las Revoluciones*, se verá tentado a pasar páginas enteras sin prestar atención. Es el libro menos leído de los que hicieron historia. Ni siquiera Galileo lo leyó, aunque seguramente sí lo hizo el obsesivo Kepler. Es un libro indescifrable y está escrito de una manera algo áspera, y quien quiera entenderlo, quizás, nunca lo logre completamente. Pero lleva la formidable ventaja de promover una idea más allá de cualquier explicación. Un movimiento que tardó un siglo en levantar vuelo y que trastocó el pensamiento formal de la humanidad. Sería largo de exponer y explicar todo el contexto histórico, la medida de la mente humana de esa época, cómo se razonaba y los miedos y prejuicios existentes. Pero queda claro que, a través de la obra de Copérnico, la mente humana abandonó la idea de un universo estructurado y jerárquicamente ordenado.

Medio siglo después de la publicación del libro, Kepler, que admiraba a Copérnico, advirtió que el canónigo había confiado demasiado en los antiguos griegos, con un sistema que fue un último intento por remendar una

06 *Linda esquina donde vivir: calle Copérnico en su intersección con la calle Galileo, en el barrio Recoleta, en la ciudad de Buenos Aires, muy cerca de la Biblioteca Nacional.*

07 *El 24 de mayo se proyectó en la cúpula del Planetario la imagen de Copérnico como parte de los homenajes de la Embajada de la República de Polonia en Buenos Aires, con motivo del 550º aniversario de su nacimiento y el 480º de su muerte y de la publicación del De Revolutionibus.*

08



08 *En 2005 fue hallada una tumba en las afueras de la catedral de Frauenburg, donde Copérnico trabajó como canónigo durante 31 años, hasta su muerte. En 2008, tras analizar el ADN del cuerpo y compararlo con unos cabellos encontrados en un libro que perteneció a Copérnico, científicos del Instituto de Arqueología de Pultusk, Polonia, llegaron a la conclusión de que la tumba y el cuerpo pertenecían al astrónomo. Finalmente, el 22 de mayo de 2010 recibió un segundo funeral en el mismo lugar..*

> "Y en medio de todo permanece el Sol. Pues, ¿quién, en este bellísimo templo pondría esta lámpara en otro lugar mejor?", N. Copérnico, Sobre las Revoluciones, Libro Primero, Capítulo X.

maquinaria obsoleta. Solo la astucia de Kepler y la audacia de Galileo revivieron la teoría heliocéntrica, dándole el empujón que necesitaba luego del estancamiento. Había que apartarse de la física aristotélica y de la astronomía tolemaica para iniciar un nuevo rumbo.

La idea heliocéntrica tardó dos mil años en completar la gestación y cristalizarse, y en romper los modelos del universo medieval. Los sólidos límites del universo marcaban, de alguna manera, límites sólidos para la mente humana. Desapareció entonces una eterna sensación de orden, y la astronomía comenzó a ponerse en orden. En el libro de Copérnico no aparece ninguna pregunta explícita acerca de la nueva filosofía del universo, como ¿de qué están hechos los planetas y las estrellas? ¿Puede existir vida en ellos? Si la humanidad no es el centro, ¿hay un dios para cada estrella? Pero luego, todos los copernicanos, excepto él, se preguntaron todas esas cosas, y más.

Hasta ese momento, el ser humano había habitado un universo cerrado, ocupando el centro y, por afuera, la divinidad lo protegía, lo custodiaba y lo juzgaba. Luego de la comprensión del sistema copernicano, la humanidad fue sacada de ese lugar de privilegio, pero la mente humana pudo salir también de un encierro que duró milenios. Adoptar el sistema heliocéntrico reordenó otros conceptos sobre la naturaleza, el universo y la humanidad. El método científico, una nueva forma de pensar, reemplazó el razonamiento abstracto. Las teorías sobre la naturaleza se deben desarrollar, desde entonces, a partir de la observación y la experimentación, y las ideas deben ser probadas empíricamente para saber si son ciertas. Más adelante, Darwin y Freud[6] alejarían aún más a la humanidad de aquel lugar central con otras dos fuertes patadas. Pero esas son otras historias. ■

Notas

* Una curiosa anécdota cuenta que la madre de Jorge Luis Borges murió a los 99 años. En su velorio, una señora amiga se le acercó al gran escritor y le dijo: "*Qué pena que su madre no haya llegado hasta los 100 años*"; a lo que Borges respondió: "*Veo, señora, que usted es devota del sistema decimal*".

1 El término ciencia no era utilizado en aquel entonces, sino que se empleaba comúnmente Filosofía Natural, incluso hasta la época de Charles Darwin, en el siglo XIX.

2 Matemático y astrónomo nacido en Normandía, actual Francia.

3 Cardenal y filósofo nacido en la actual Alemania.

4 En ese entonces, regía el calendario Juliano, establecido por Julio César en el año 46 a. C. Debieron pasar casi 30 años hasta que se implementara el cambio necesario en el calendario a través de la intervención del papa Gregorio XIII, quien hizo suprimir 10 días, entre el jueves 4 y el viernes 15 de octubre de 1542 ("*¡Hoy es jueves 4, y mañana es viernes 15!*", habrá dicho alguien aquel día). Gregorio basó la reforma del calendario en la mejora de las tablas que Copérnico publicó en su libro *Sobre las Revoluciones*.

5 La carta o relación y los diálogos eran formas habituales de publicar teorías y pensamientos en aquella época.

6 En el siglo XIX, a través de la teoría de la evolución por selección natural, Charles Darwin eliminó el creacionismo, por el cual se entendía que el ser humano (especialmente, el macho, blanco, europeo) había sido creado por un dios. Más tarde, Sigmund Freud, creador del psicoanálisis, aseguró que los actos, impulsos e instintos del ser humano no están dominados del todo por su parte consciente sino, especialmente, por la inconsciente.

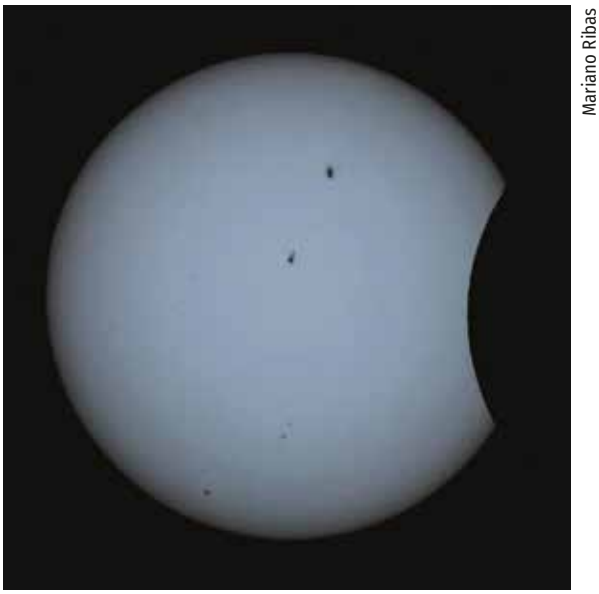
Bibliografía

Copérnico, N. Sobre las Revoluciones (Altaya).
Copérnico, N. Las Revoluciones de las Esferas Celestes. Introducción y notas de Alexandre Koiré.
Koestler, A. Los Sonámbulos.
Koiré, A. Estudios de historia del pensamiento científico.
Adamczewski, J. Nicolás Copérnico y su época.
Armitage, A. Copérnico.
Duncan, D. Historia del calendario.
Flammarion, C. Vida de Copérnico.
Sociedad Científica de Toruń. Nicolás Copérnico. 1473-1973.
Asimov, I. El paso de los milenios.
Mazurkiewicz, J. y Klimek, E. Nicolás Copérnico, L'uomo Universale.
Alifano, R. El humor de Borges.

Eclipse parcial de Sol

El sábado 14 de octubre se produjo un eclipse solar que, desde nuestras latitudes, apenas se mostró como parcial, con un sector muy pequeño del Sol tapado por la Luna. El eclipse fue, en realidad, **anular**, y la franja de la anularidad se vio desde parte de Estados Unidos, la península de Yucatán en México, Centroamérica, Colombia y norte de Brasil. En el resto de América se vio parcialmente, excepto en la Patagonia y Groenlandia. Un eclipse anular se da cuando la Luna, debido a que se mueve alrededor de la Tierra en una órbita elíptica, está un poco más lejos de lo habitual. Eso hace que, en el cielo, la Luna parezca apenitas más chica que el Sol (en general, parecen tener ambos el mismo tamaño, ya que el Sol es unas 400 veces más grande que la Luna, pero está unas 400 veces más lejos) y no alcance a taparlo en el momento máximo del eclipse. Así, queda alrededor de la Luna un "anillo" de luz solar, lo que impide que el oscurecimiento sea completo, como en un eclipse total.
Desde Buenos Aires y alrededores se apreció, en el momento del máximo, que la Luna cubrió un 14% del diámetro solar. El evento se dio entre las 16:03 y las 17:22. No fue mucho, pero este tipo de fenómenos astronómicos siempre resultan fascinantes y muy interesantes para compartir con el público, unas 500 personas que se acercaron hasta el Planetario Galileo Galilei.
Además, sirvió para ir anunciando el próximo gran eclipse que podrá verse en nuestro país. Prácticamente un año después de este "eclipsito", el 2 de octubre de 2024 habrá otro eclipse anular, en este caso, visible desde el norte de Santa Cruz. Mientras más hacia el norte de esa provincia nos encontremos, menor porción del Sol será tapada por la Luna. En Buenos Aires, nuestro satélite cubrirá un 53% del diámetro solar. Ampliaremos. ■

01



Mariano Ribas

02

03

01 *Máximo del eclipse visto desde Buenos Aires, a las 16:43, cuando la Luna llegó a cubrir casi el 14% del diámetro solar. Se aprecian también varios grupos de manchas solares especialmente grandes: AR3465 y AR3464, de unos 30.000 km de diámetro.*

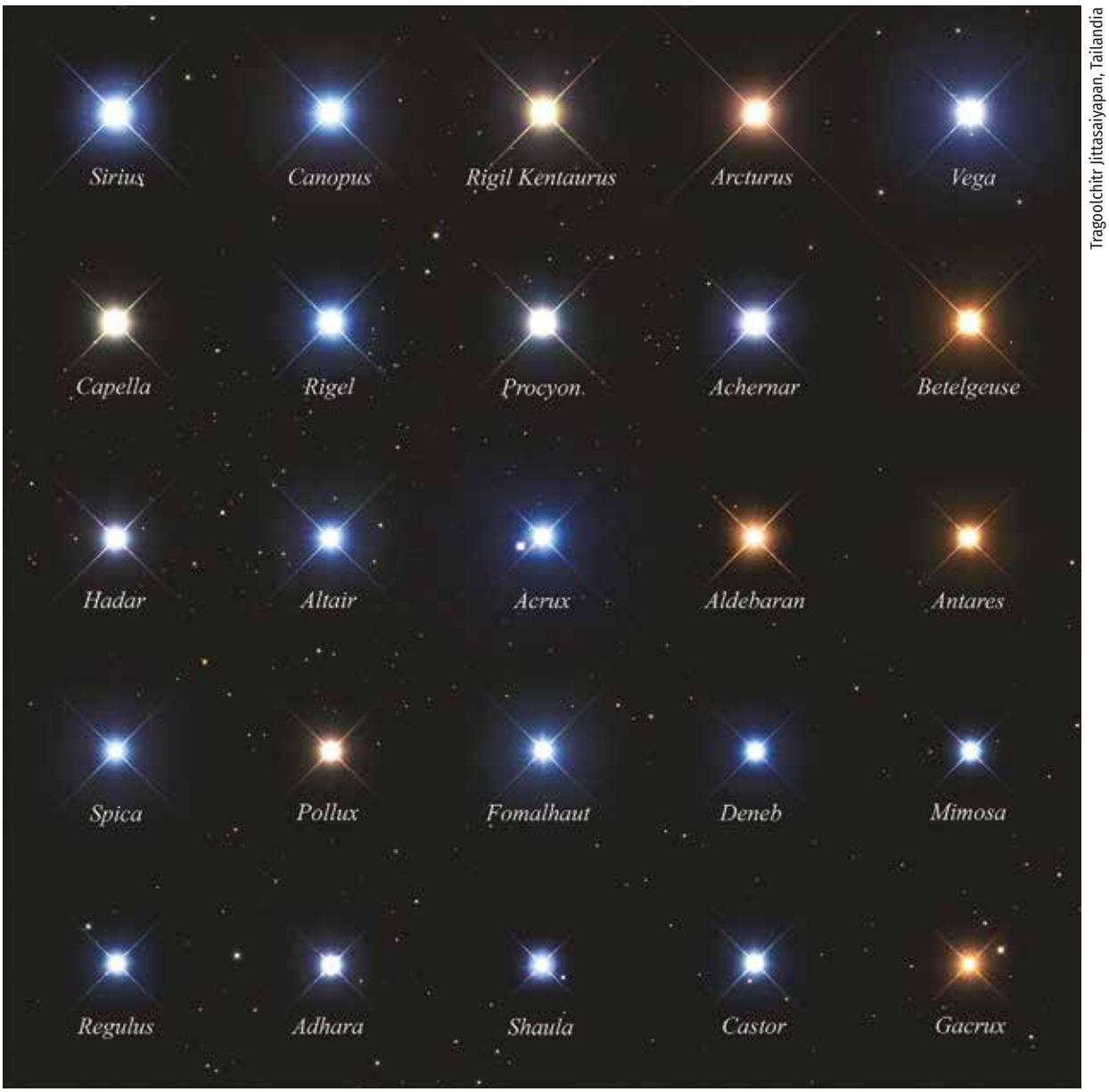
02 y 03 *Unas 500 personas asistieron al Planetario para observar el eclipse mediante telescopios y la Caja solar.*

De noche, todos los gatos son pardos, pero las estrellas son de colores

EL COLOR DE LAS ESTRELLAS

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

01



Tragoolchitr Jittasaiyapan, Tailandia

Los colores de las estrellas no son del todo obvios a ojo desnudo, porque nuestra vista no funciona igual de noche que de día. Cuando hay poca luz nuestra retina es casi ciega a los colores. ¡A quién no le pasó ponerse medias de colores distintos si nos vestimos con poca luz a la madrugada! Pero algunas estrellas son suficientemente brillantes como para que veamos su color. En particular, se distingue perfectamente que estrellas como Betelgeuse (en Orión) o Antares (en el Escorpión) son rojizas. A través del telescopio, que recoge mucha más luz que nuestras pupilas, los colores son más evidentes, y podemos ver estrellas azules, blancas, amarillentas, anaranjadas o rojas. En fotografías, en particular si tenemos la precaución de no saturar la exposición, los colores son todavía más notables (figura 01).

02

Andrea Anfossi

"El color de la luz de las estrellas depende en gran medida de la temperatura de su superficie".

En la escuela nos enseñaron que el rojo es un color cálido y el azul es un color frío. Uno aprendió que los colores cálidos se destacan y avanzan, mientras que los fríos retroceden. Parece algo bastante natural: el fuego quema y es rojo, el pasto es verde y fresco, los lagos y el hielo son azules y fríos... Una estrella roja, ¿acaso es más caliente que una azul? Parece lógico. Veamos.

El color de la luz de una estrella depende en gran medida de la temperatura de su superficie, tal como el de una brasa en el fueguito del asado. Es algo de lo más familiar: un cuerpo caliente, brilla. En el siglo XIX los físicos estudiaron este fenómeno, conocido desde que la gente del Paleolítico inventó el asado, y descubrieron cuánto brilla en cada color. Vale decir, el *espectro* de un objeto caliente. Y encontraron algo sorprendente: el espectro es el mismo, ya sea que el cuerpo sea un carbón del asado, un vaso de vidrio que sale del horno del vidriero, un pedazo de hierro en la fragua, o una estrella en el espacio. El espectro obedece a la ley que mostramos en la figura 03: tiene un "pico" en un cierto color (un máximo donde está el máximo brillo) y brilla menos (de una manera matemática precisa) en los colores de longitud de onda mayor o menor que la del pico. Este tipo de fenómeno universal es irresistible para un físico: tiene que entender de dónde sale. Debe haber algún mecanismo único que lo explique.

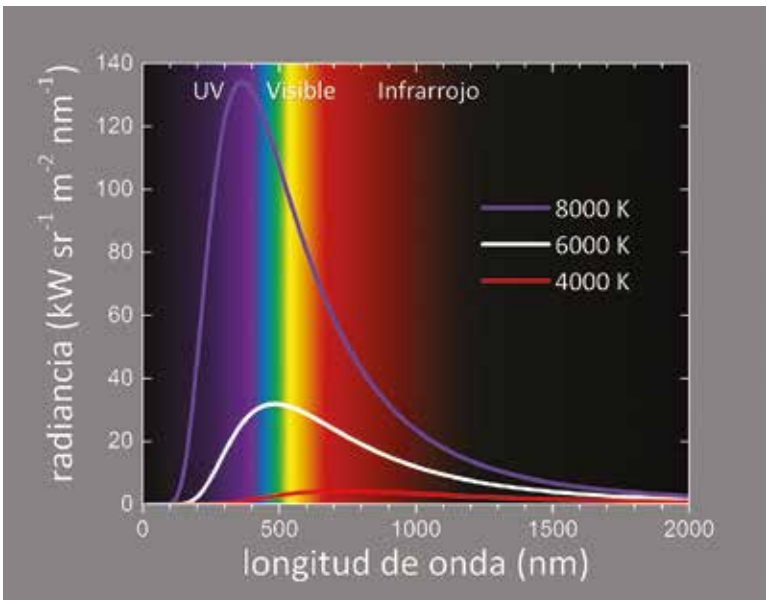
El fenómeno es extremadamente sencillo: una cosa (cualquier cosa) caliente. Y su descripción en el contexto de la física de fines del siglo XIX (la mecánica hoy llamada clásica, más el electromagnetismo) es un modelo también muy sencillo. Pero es un modelo que fracasa estrepitosamente. Muchas de las mejores mentes científicas de aquel entonces atacaron el problema: Josef Stefan, Ludwig Boltzmann, Wilhelm Wien, Lord Rayleigh (el del color del cielo), James Jeans, entre otros. En particular, los dos últimos descubrieron que la energía radiada por un cuerpo caliente parecía depender de su temperatura (lo cual está muy bien) y de la longitud de onda (o sea, del color) de una manera particularmente sencilla. Pero había un problema: en la fórmula de Rayleigh-Jeans la longitud de onda aparece dividiendo, y encima elevada a la cuarta potencia. ¿Qué pasa cuando la longitud de onda es más chica? Al dividir por un número más chico, la energía da más grande. ¿Y si es más chica todavía? La energía es todavía más grande. Así no habría un pico: el brillo sube y sube sin parar para longitudes de onda menores y menores: ultravioleta, rayos X, rayos gamma... Si fuera así, cuando prendemos el fuego para el asado, ¡los carbones nos fulminarían con rayos gamma! Cosa que no pasa; miles de asadores domingueros damos fe. El fracaso recibió un nombre digno de una banda de rock: catástrofe ultravioleta.

La radiación de cuerpo negro

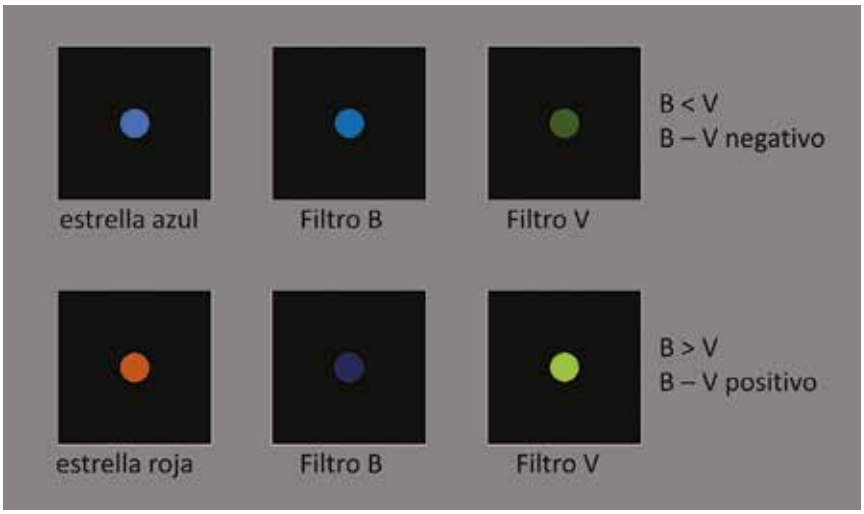
La solución fue descubierta por Max Planck. Su presentación en la última reunión del siglo de la Asociación Física Alemana en diciembre de 1900 es uno de los momentos de gloria de la física, y marca el comienzo de la física moderna, la Física Cuántica. Planck propuso que el objeto caliente emite su energía en "paquetes" (los *cuantos* que le dan nombre a la teoría), cada uno con una energía que solo puede ser un múltiplo entero de una energía fundamental (que es además proporcional a la frecuencia, o sea la inversa de la longitud de onda). *Y le dio el pico de la curva.* Hoy la llamamos ley de radiación de Planck, una expresión matemática cuyo gráfico tiene la forma que mostramos en la figura 03 para varias temperaturas. La ley de Planck explica el espectro de cualquier objeto caliente (llamado "cuerpo negro" por una cuestión técnica, pero que no necesita ser de color negro[1]). Hay que decir que la ley de Planck de radiación del cuerpo negro fue un comienzo, y que se necesitarían 30 años para tener una teoría razonable de los fenómenos cuánticos. Y aun hoy es un edificio que no hemos terminado de construir. Quiero enfatizar, a propósito de lo que generalmente se cree, que la mecánica cuántica no es *apenas* una rareza de fenómenos microscópicos y exóticos, como átomos y electrones, aceleradores de partículas, o gatos vivos y muertos a la vez. *Necesitamos* la física cuántica para entender incluso fenómenos cotidianos: por qué y cómo brillan los alambres del tostador cuando preparamos el desayuno. En un sentido muy estricto, la física cuántica está detrás de toda la civilización tecnológica en la que vivimos hoy en día.

Pero volvamos a la astronomía. Existe un enorme rango de temperaturas estelares, desde algunas apenas tibias hasta otras a decenas de miles de grados. En la figura 03 mostramos espectros correspondientes a

03



04



tres temperaturas, 4000, 6000 y 8000 K. Podemos ver que, cuando la temperatura es mayor, el pico es más alto. Esto dice que las estrellas más calientes emiten más energía electromagnética. Pero, además, vemos que el pico se corre hacia la izquierda (hacia longitudes de onda más cortas) al aumentar la temperatura. Por ejemplo, una estrella cuya superficie esté a 4000 K tiene el máximo en el infrarrojo (es la curva roja bien bajita en la figura). Es decir, de los colores visibles (entre 400 y 700 nm), el más intenso es el rojo. Estas estrellas "frías", entonces, se ven rojas. Es el caso de Betelgeuse, Antares, Aldebarán o Gácrux (la estrella roja en la "cabeza" de la Cruz del Sur). Una estrella más caliente, como el Sol o Alfa Centauri (la estrella blanca brillante en el Puntero de la Cruz), tiene el máximo en la región visible (curva blanca, a 6000 K), de modo que mezcla en forma bastante pareja los colores. Vemos estas estrellas blancas, amarillentas o anaranjadas (según sean más o menos calientes). Las estrellas aun más calientes tienen el máximo todavía más a la izquierda, inclusive en el ultravioleta (curva violeta, a 8000 K). Así que el máximo de intensidad visible está en la región violeta y azul del espectro, y las vemos azules (como las otras estrellas de la Cruz, o las Tres Marías, por ejemplo). Existen estrellas cuyas superficies están a temperaturas aún mayores, hasta a 35.000 K, cuyos picos son muchísimo más altos y más dentro del ultravioleta que los que mostramos en la figura 03. Así que, en astronomía, es al revés que en las artes plásticas: rojo es frío y azul es caliente.

La forma del espectro de cuerpo negro correspondiente a las temperaturas estelares permite caracterizar el color (y la temperatura) de una manera matemática muy precisa, sin necesidad de conocer toda la curva. En las que dibujamos en la figura 03 puede verse que, para una estrella caliente (la curva de 8000 K, por ejemplo), la radiancia es decreciente en la región visible. Podemos usar dos colores (dos longitudes de onda) para ejemplificarlo: la estrella brilla más en el color azul que en el verde. En cambio, para una estrella roja (menos caliente), la curva es creciente en la región azul-verde del espectro. Así que la estrella roja es menos brillante en el azul que en el verde. En la práctica esto se hace tomando fotografías a través de filtros, y midiendo la magnitud estelar con cada uno (figura 04). Existen muchos sistemas fotométricos de este tipo, pero por lejos el más usado es el de Johnson (estandarizado en 1953). Se usan tres filtros, uno ultravioleta, uno azul y uno verde-amarillo, y se miden las magnitudes correspondientes, U, B (de *blue*, "azul") y V (de *visual*). La diferencia entre estas magnitudes se usa para definir índices de color: U–B y B–V, de los cuales el B–V (a veces indicado BV) es el más común. Cuando la diferencia es negativa, es porque la magnitud B es menor que la magnitud V. Una magnitud menor significa mayor brillo (por la manera caprichosa en que funciona el sistema de magnitudes astronómicas), así que en tal caso la estrella brilla más en el azul que en el verde. Nuestro ojo, o cualquier instrumento, la verá azulada (figura 04, arriba). Por el contrario, cuando la diferencia es positiva, la estrella tiene mayor magnitud B que V, y la

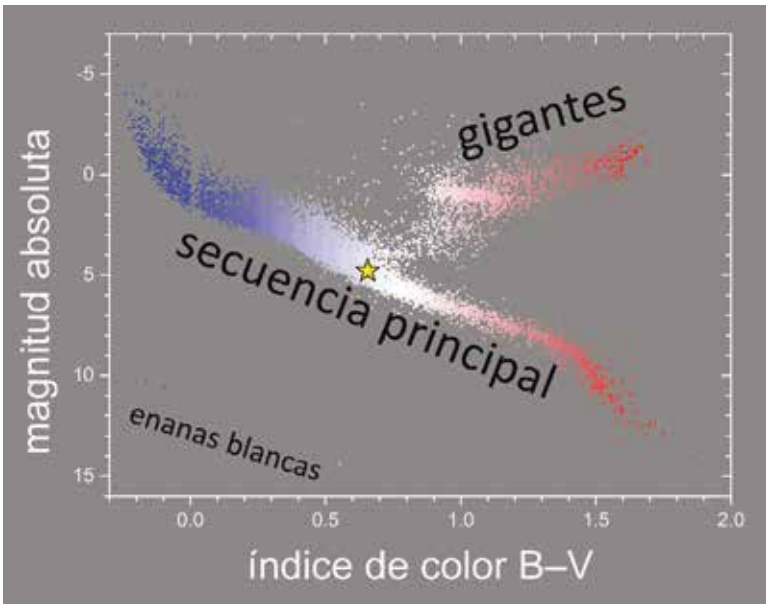
01 *Las 25 estrellas más brillantes del cielo, en una cuidadosa composición fotográfica de Tragoolchitr Jittasaiyapan, muestran una variedad de colores.*

02 *Si en lugar de hacer foco tomamos una imagen desenfocada, el color de las estrellas se hace aún más notable. Se ven las constelaciones de la Cruz del Sur (arriba a la izquierda), el Centauro, el Lobo, entre otras. Abajo, a la izquierda de la esfera, la estrella roja es Antares, la más brillante del Escorpión.*

03 *Un gráfico que muestra la intensidad luminosa de cada color (cada longitud de onda) se llama espectro. Aquí mostramos tres curvas, y cada una es un espectro de cuerpo negro correspondiente a cierta temperatura, según se indica. En el fondo del gráfico hemos usado colores para ilustrar las longitudes de onda del eje horizontal. El rango de luz visible es aproximadamente el que va de 400 a 700 nm (nanómetros, millonésimas de milímetro). Hemos usado colores también en la región ultravioleta e infrarroja de manera representativa, si bien esas longitudes de onda son invisibles para el ojo humano. La unidad de temperatura es el Kelvin (no "grado Kelvin"), igual en tamaño al grado Celsius, pero con el cero a -273.15°C. La radiancia es complicada y los detalles no vienen al caso: representa la energía radiante a cada longitud de onda.*

04 *Representación esquemática del índice de color B–V: se restan las magnitudes medidas en fotografías tomadas a través de filtros estándar. El filtro B está centrado en 445 nm (azul) y el filtro V (visual, verde-amarillo) está en 551 nm. La magnitud es mayor si la intensidad es menor.*

05



vemos rojiza (figura 04, abajo). Usados en conjunto, los índices U–B y B–V permiten calcular muy exactamente la temperatura de una estrella.

La ciencia de las estrellas

Además de esta cuestión de los colores, mencionamos más arriba que la ley de Planck nos dice que los objetos más calientes emiten más radiación (figura 03). ¿Esta mayor emisión de radiación, corresponderá a un mayor brillo estelar? Para verificarlo, primero tenemos que observar que la luminosidad intrínseca de una estrella no necesariamente coincide con su brillo aparente en el cielo. Una estrella podría ser muy luminosa, pero resultar muy tenue por encontrarse muy lejos. O, a la inversa, podría ser muy poco luminosa, pero verse relativamente brillante si se encontrara cerca nuestro. Pero si conocemos (porque medimos o calculamos) la distancia a la estrella, es fácil convertir el brillo en el cielo (la *magnitud aparente*) en luminosidad intrínseca (*magnitud absoluta*). El primero en explorar esta relación entre luminosidad y color fue un astrónomo aficionado danés, Ejnar Hertzsprung, a principios del siglo XX. Independientemente, el destacado astrónomo de Princeton Henry Norris Russell puso la misma relación en forma de gráfico, que hoy se llama diagrama de Hertzsprung-Russell, o diagrama H-R (figura 05). En el eje vertical se representa la luminosidad de la estrella, y en el horizontal su color (o temperatura)[2].

Cada punto en este diagrama representa una estrella. Y la principal característica que observamos es que casi todas las estrellas (el 90%) forman una franja ondulante en diagonal: desde las estrellas más azules y calientes, arriba a la izquierda, hasta las más rojas y "tibias", abajo a la derecha. Esta franja se llama hoy en día *secuencia principal*. Juega un rol importante en la teoría de la evolución estelar, ya que es allí donde las estrellas pasan la mayor parte de sus existencias, fusionando hidrógeno en sus núcleos. El Sol es una estrella de la secuencia principal, con magnitud absoluta 4.8 e índice de color B–V 0.656. Y lo hemos marcado en la figura.

Esta reducción de la temperatura al aumentar la longitud de onda es precisamente lo que predice la ley de Planck para cuerpos negros de distintas temperaturas, siempre que sean del mismo tamaño. Así que la secuencia principal nos dice, de paso, que casi todas las estrellas son aproximadamente del mismo tamaño (ver recuadro). Sin embargo, por encima de la secuencia principal hay una nube de estrellas que, teniendo los mismos colores, son mucho más luminosas. Las leyes de la radiación del cuerpo negro dicen que esas estrellas deberían ser más grandes (*mucho* más grandes) que las correspondientes, del mismo color, que se encuentran debajo de ellas en la secuencia principal. Este fue precisamente el descubrimiento de Hertzsprung y Russell, y llamaron a esas estrellas "gigantes". Hoy sabemos que es así, y que estas estrellas gigantes (y supergigantes) corresponden a fases especiales de la evolución de las estrellas a lo largo de su existencia. Típicamente, son estrellas maduras, que han agotado el hidrógeno en sus núcleos, empie-

06

Sergio Eguivar

La secuencia principal

Las estrellas de la secuencia principal no son exactamente del mismo tamaño. Las más luminosas y calientes, en el extremo izquierdo del diagrama H-R, son más grandes (hasta unas 10 veces el tamaño del Sol), mientras que las del extremo inferior derecho, menos calientes y luminosas, son más pequeñas (hasta un 20% del tamaño del Sol). Pero este factor 10 en el tamaño es insignificante frente al enorme tamaño de las gigantes y supergigantes (que son cientos o miles de veces mayores). La razón, para los que disfruten de los aspectos técnicos de la astrofísica, es la siguiente. En un cuerpo negro de radio R a temperatura T, la luminosidad está dada por la ley de Stefan-Boltzmann: $L=4\pi\sigma R^2T^4$, donde σ es una constante de la naturaleza (relacionada con la velocidad de la luz, la constante de Planck y la constante de Boltzmann). Por lo tanto, si dos estrellas tienen la misma temperatura, pero una es 100 veces más luminosa que la otra, el radio de la más luminosa es $\sqrt{100}=10$ veces más grande. Este hecho es lo que llevó a Hertzsprung y Russell al descubrimiento de las estrellas gigantes, con radios entre 10 y 100 veces el solar, mientras que las supergigantes son todavía mayores. Por otro lado, las líneas de R constante son rectas decrecientes en un gráfico del logaritmo de la luminosidad (que es la magnitud absoluta) en función del logaritmo de la temperatura (con las temperaturas más elevadas a la izquierda, como es habitual en el diagrama H-R). La secuencia principal es aproximadamente paralela a estas rectas, que podemos ver dibujadas en la figura original de Russell, publicada en la revista *Nature* en 1914. Russell usó unas 300 estrellas para las cuales se conocía la distancia, y por lo tanto la magnitud absoluta representada en el eje vertical, con un error menor que el 42% (un valor enorme para el estándar actual). La única excepción a la secuencia principal y las gigantes, observó Russell, es la estrella que vemos abajo y a la izquierda. Se trata de Omicron2 Eridani B, que les dio dolores de cabeza a los astrónomos por muchos años: fue la primera enana blanca conocida, el núcleo supercaliente de una estrella muerta que ha dispersado completamente sus capas exteriores.

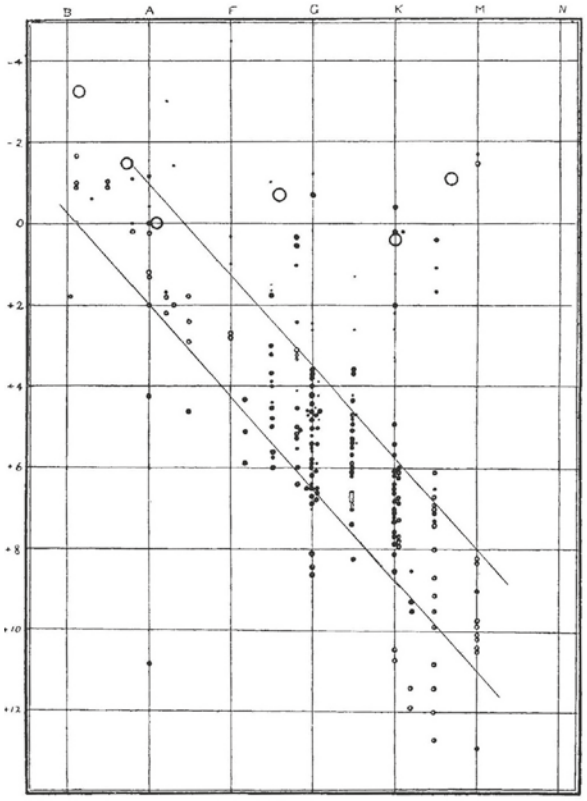


Fig. 1.

05 *Diagrama de Hertzsprung-Russell. Se grafica la luminosidad intrínseca de cada estrella en el eje vertical (en unidades de magnitud absoluta), versus su índice de color (representando mayor temperatura hacia la izquierda, y menor hacia la derecha). La inmensa mayoría de las estrellas (el Sol incluido) aparecen agrupadas en una franja llamada secuencia principal. (Selección de estrellas del catálogo Hipparcos [van Leeuwen, 2007], más el Sol indicado por una estrella amarilla). El viboreo de la secuencia principal es una manifestación de que las estrellas no son exactamente cuerpos negros. La curvita hacia arriba en las estrellas más calientes, en particular, nos dice que estas estrellas muy calientes y brillantes son mayores que el Sol y comparables a las gigantes. Y la curva hacia abajo en las enanas rojas, en cambio, nos dice que son más pequeñas que el Sol (que está en el medio, en la parte bastante recta de la secuencia principal). En la región media, donde se encuentra el Sol, el tamaño es casi el mismo. La existencia de una relación tan sencilla entre la luminosidad y la temperatura fue una clave importante de que la posición de una estrella en la secuencia principal depende de un solo factor: su masa.*

06 *La estrella 145 CMa, en la constelación del Can Mayor, son en realidad dos estrellas, que no tienen relación física entre sí, sino que casualmente están en la misma dirección vistas desde la Tierra, pero a distancias muy diferentes. La estrella azul se encuentra a 258 años luz de nosotros, mientras que la naranja está a 6272 años luz, y ambas están separadas visualmente por 26 segundos de arco.*

07

Sergio Eguivar

zan a fusionar helio, abandonan la secuencia principal y se acercan al final de sus vidas[3]. Es una fase relativamente breve de la evolución estelar, y por eso la rama de estrellas gigantes (y también, las supergigantes) está mucho menos poblada que la secuencia principal. Las estrellas de la secuencia principal, en contraste con la rama de gigantes, recibieron el nombre de "enanas", una designación un poco confusa que hoy en día casi no se usa; es preferible llamarlas estrellas de la secuencia principal.

Por debajo de la secuencia principal hay una tercera rama, todavía menos poblada (en el diagrama original de Russell había una sola estrella aquí, y en el catálogo que usamos para la figura 05 hay apenas cuatro). La mayor parte de ellas tienen temperaturas que se manifiestan en un color blanco o blanco azulado. Y como son poco luminosas, las leyes del cuerpo negro nos dicen que son pequeñas. Así que recibieron el nombre de "enanas blancas", y su naturaleza fue misteriosa durante bastante tiempo. ¿Cómo podían ser tan chiquitas y tan calientes? Otro día nos ocuparemos de ellas.

A lo largo de un siglo se acumularon millones y millones de observaciones y se desarrolló toda una ciencia de la evolución estelar, que confirmaron estas observaciones básicas acerca de los colores y la luminosidad de las estrellas. Se trata de un logro extraordinario, teniendo en cuenta que todo lo que sabemos sobre las estrellas, lo sabemos mirando de lejos. El astrónomo no puede meterle un termómetro para medir la temperatura, por ejemplo. Así que todo lo hemos averiguado analizando la luz que nos llega de ellas con nuestros mejores instrumentos: telescopios, espectroscopios y el cerebro humano. ■

> "Las estrellas de la secuencia principal, en contraste con las gigantes, recibieron el nombre de 'enanas', una designación un poco confusa que hoy en día casi no se usa; es preferible llamarlas estrellas de la secuencia principal".

07 *La constelación del Can Mayor, con una gran variedad de colores en las estrellas. A la izquierda, la estrella más brillante es Sirio, y el grupito cerca del centro de la imagen, el cúmulo abierto M 41.*

Notas:

1 Los objetos reales son cuerpos negros solo aproximadamente, si bien existen dispositivos diseñados especialmente para calibrar instrumentos, que radian casi exactamente con la Ley de Planck. Las estrellas son muy aproximadamente cuerpos negros, pero otros objetos naturales radian de otra manera: nebulosas, chorros de materia y energía, láseres y máseres, etc., no son cuerpos negros. El mejor cuerpo negro que conocemos es la radiación cósmica de microondas, el resplandor residual de cuando el universo entero estaba muy caliente.

2 Russell no usó el color ni la temperatura en el eje horizontal, sino la "clase espectral", un tema que abordaremos en otra oportunidad. Hertzsprung no hizo un gráfico, sino que presentó sus resultados en forma de tabla.

3 Nos ocupamos de gigantes y supergigantes rojas en Si Muove N° 25 (planetario.buenosaires.gob.ar/revista).

Fotos de Carlos Di Nallo, desde Selfoss, Islandia

EL RESPLANDOR

Carlos Di Nallo

Las auroras polares son fenómenos lumínicos que se dan en las capas superiores de la atmósfera terrestre (y en algunos otros planetas, como Júpiter o Saturno), generalmente, entre 90 y 200 km de altura, y resultan visibles desde regiones cercanas a los círculos polares, tanto en el norte como en el sur. Quizás sean más famosas las auroras boreales, debido a que en esas zonas hay más ciudades con más habitantes que en el sur. En la Antártida vive menos gente que en Islandia, Noruega, Finlandia, norte de Rusia y de Canadá, Alaska, etc. Pero las auroras australes son tan frecuentes como las boreales. Por las características lumínicas de estos fenómenos, se aprecian durante la noche, casi exclusivamente entre el otoño y el invierno polares.

Las auroras se producen por la interacción entre el viento solar, que es desviado por el campo magnético de la Tierra, y los elementos propios de la alta atmósfera del planeta. El viento solar es un flujo de partículas cargadas eléctricamente emitidas por el Sol permanentemente en todas direcciones, aunque, según sus ciclos de actividad, puede ser más o menos pronunciado. Se genera una actividad magnética asociada a erupciones solares y eyecciones de masa coronal, eventos extremadamente violentos y energéticos desde la superficie del Sol.

Las partículas provenientes del Sol interactúan con los gases de las capas superiores de la atmósfera terrestre. El campo magnético de la Tierra atrapa y conduce las partículas hacia las regiones polares. Allí, electrones y protones de átomos de nitrógeno y oxígeno colisionan con moléculas de los gases de la termósfera y exósfera terrestres, lo que provoca que los electrones asciendan temporalmente a un estado energético superior, un estado de excitación de energía. Cuando el nivel se normaliza, se libera energía en forma de luz de distintas longitudes de onda.

Según el tipo de elemento y la altura a la que se produce la interacción con el viento solar, se generará una aurora de diferentes colores. El verde (ligeramente amarillento) es el más habitual, porque es el color de las emisiones de luz que el oxígeno provoca a unos 200 km de altitud. Si se da a una altura mayor, se producirán auroras más rojizas; mientras que a una altitud menor, por la mayor abundancia de nitrógeno, las auroras serán más violáceas.

Las auroras que ilustran nuestra tapa duraron aproximadamente una hora. Todas las imágenes que acompañan estas páginas fueron realizadas por Carlos Di Nallo en la localidad de Selfoss, en su viaje a Islandia junto al Observatorio Astronómico Ampimpa de Tucumán, durante septiembre y octubre de 2023. ■

Carlos Di Nallo

Carlos Di Nallo

Carlos Di Nallo

Carlos Di Nallo

Carlos Di Nallo

Carlos Di Nallo

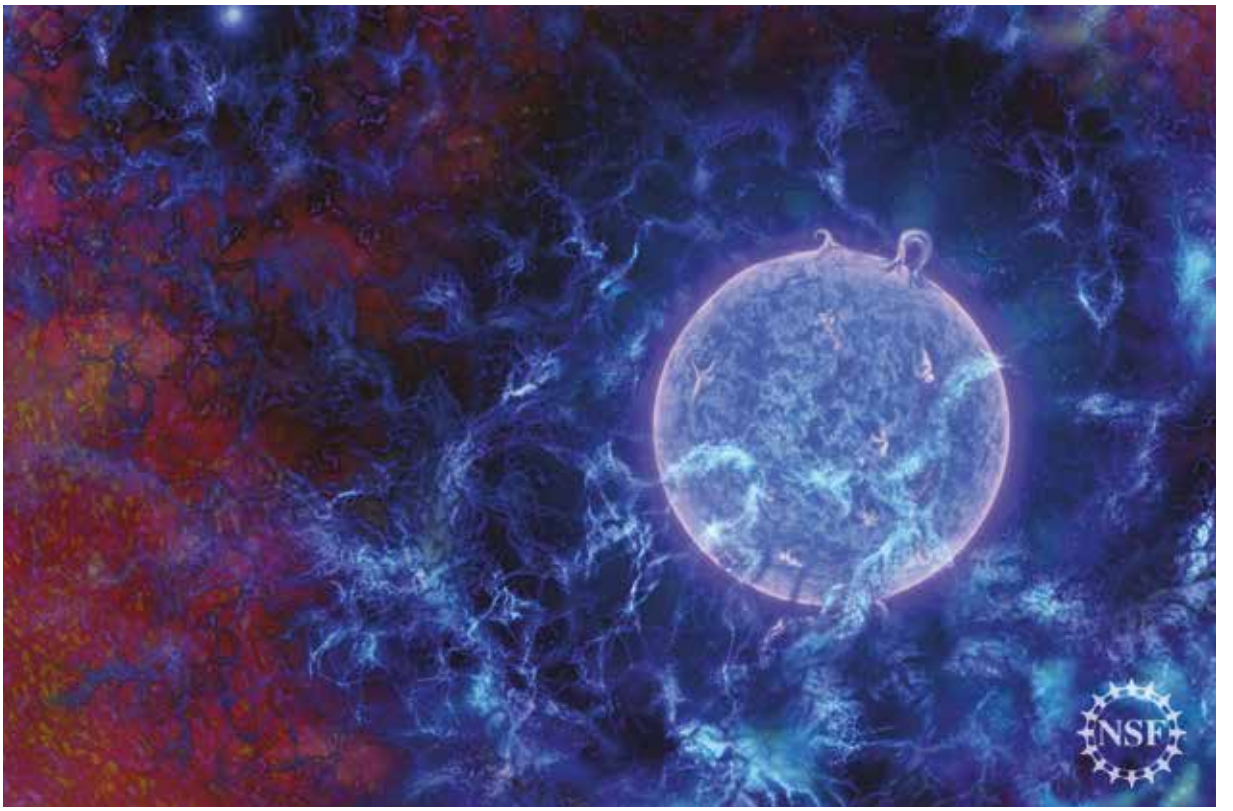
Las primeras estrellas del universo

SUPERSOLES

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

01

National Science Foundation (EE.UU.)



Se encendieron cuando el cosmos aún gateaba, cuando todo era oscuridad. Eran enormes, supermasivas y extremadamente calientes y luminosas. Esas primeras estrellas vivieron pocos millones de años y luego explotaron como ninguna otra cosa haya vuelto a explotar. Gracias a su metamorfosis físico-química, cambiaron para siempre la historia del universo. Hoy, unos 13.600 millones de años más tarde, la astronomía, en una suerte de arqueología cósmica, arriesga modelos, juega con complejas simulaciones por computadora y busca pistas y radiaciones "fósiles" que puedan ayudarnos a delinear su perfil. Estamos comenzando a escribir la historia de aquellos arcaicos supersoles.

Al principio, todo era oscuridad. Luego del Big Bang, el universo en expansión era un pequeño, denso y muy caliente mar de espacio, energía y partículas elementales. No había estrellas, ni galaxias, ni planetas. Los primeros 200 millones de años del cosmos corresponden a lo que los astrónomos llaman las Eras Oscuras. En aquel cosmos primitivo, la gravedad fue organizando y agrupando la materia en estructuras cada vez más grandes, tanto la materia normal (o bariónica) como la materia oscura, que era y es abrumadoramente mayoritaria.

Poco a poco, a la par del progresivo crecimiento y enfriamiento generalizados, colosales nubes de hidrógeno, salpicadas de helio e ínfimas piscas de litio (y ningún otro elemento, porque no los había), fueron colapsando y ganando densidad y temperatura. Según los modelos actuales, se gestaron "mini-halos" de gas y materia oscura de alrededor de 1 millón de masas solares, en cuyo interior se formaron nódulos más densos. Eran los "embriones" de las primeras estrellas, soles primitivos que se encendieron gracias a la fusión termonuclear (de hidrógeno en helio) en sus núcleos; y que, a su vez y de a millones, darían cuerpo y luz a las primeras galaxias.

Universo diferente, estrellas diferentes

Tras este necesario vistazo, breve y simplificado, al muy temprano y primitivo escenario cósmico, vamos directamente al punto de este artículo: según todos los modelos

científicos vigentes, las primeras estrellas del universo eran *muy* diferentes a las actuales, tanto en escala como en composición química. Y eso fue así, justamente, porque las condiciones generales del cosmos eran bien distintas.
Tanto en el universo contemporáneo como en el de los últimos miles de millones de años, las nebulosas (que siempre fueron las "fábricas" de estrellas) están salpicadas de elementos pesados, como carbono, oxígeno, nitrógeno, calcio, hierro, y hasta granos de polvo. Elementos que las enfrían y facilitan la múltiple fragmentación de sus nódulos internos, sus partes más densas. Por el contrario, en los primeros cientos de millones de años, las nebulosas carecían de elementos pesados. Eran puro hidrógeno y helio. Y fue justamente esa pobreza química la que permitió que los nódulos protoestelares alcanzaran temperaturas relativamente altas (unos 500°C). Eso, a su vez, los hacía más resistentes a la fragmentación. De ese modo, los nódulos podían colapsar completos y dar origen a estrellas mucho más grandes y masivas que las modernas. ¿Cuán masivas? La respuesta es sorprendente.

Estudios previos y actuales: ¿quién da más?
Durante los últimos veinte años, el escenario teórico que acabamos de plantear se consolidó gracias a una multiplicidad de estudios, observaciones y modelos. Los astrónomos han ido afinando, pacientemente, el perfil de aquellos primeros y monumentales soles.
Si hacemos un rápido repaso cronológico, no podemos dejar de mencionar los aportes que, en 2005 y de modo independiente hicieron dos equipos de científicos: uno, de las Universidades de Yale y Harvard, en Estados Unidos; y el otro, del Instituto Max Planck de Astrofísica, en Alemania. Mediante sofisticadas simulaciones por computadora, estos detectives del pasado cosmológico recrearon las condiciones de gestación estelar en el universo primitivo. En ambos casos, llegaron a conclusiones similares: los nódulos primigenios habrían formado estrellas de cientos de masas solares; incluso, de más de 1000. Tengamos en cuenta que las estrellas más masivas de nuestra galaxia (como Eta Carinae A, WR42e, WR93, Arches-F9 o la llamada Pistol Star) tienen entre 100 y 150 masas solares.
Investigaciones posteriores, realizadas durante la pasada década (como el programa EDGES, encabezado por científicos del Instituto de Tecnología de Massachusetts, EE.UU., que utilizó un radiotelescopio en Australia en 2018) ajustaron algunas tuercas. Pero coincidieron en lo esencial: esas primitivas criaturas estelares habrían sido mucho más grandes y masivas que las actuales.
Mil masas solares no es poco. Pero un flamante estudio sugiere que, al menos en ciertos casos, las primeras estrellas pudieron haber ido mucho más allá. El trabajo en cuestión fue publicado a fines de enero, y sus autores principales

01 *Ilustración de una de las extraordinarias estrellas de la antiquísima Población III.*

02 *El Telescopio Espacial James Webb es un instrumento fundamental para la búsqueda y el estudio de las primeras estrellas y galaxias del universo. Está equipado con un espejo primario segmentado, bañado en oro, de 6,5 metros de diámetro, y observa el cosmos en el rango del infrarrojo cercano y medio.*

02

NASA

03

Merrill Sherman/Quanta Magazine

Poblaciones I, II y III

Partiendo de la clasificación inicial realizada por el gran astrónomo alemán Walter Baade (1893-1960) durante la Segunda Guerra Mundial, los astrónomos de hoy en día hablan de tres tipos de poblaciones estelares a lo largo de la historia del universo. En su momento, Baade observó y analizó espectroscópicamente estrellas individuales de la vecina galaxia de Andrómeda (dicho sea de paso, fue el primero en resolverlas visualmente, con el auxilio del telescopio reflector de 2,5 m de diámetro del Observatorio de Monte Wilson, California, EE.UU.). Y así notó que podía dividirlas en dos grandes grupos: las azules, más jóvenes, calientes y luminosas; y las rojizas, más viejas y frías. La Población I y II, respectivamente.

Mas tarde, los astrónomos se dieron cuenta de que esta clasificación tenía mucho que ver con la construcción de elementos químicos más pesados a lo largo de la historia de la Vía Láctea.

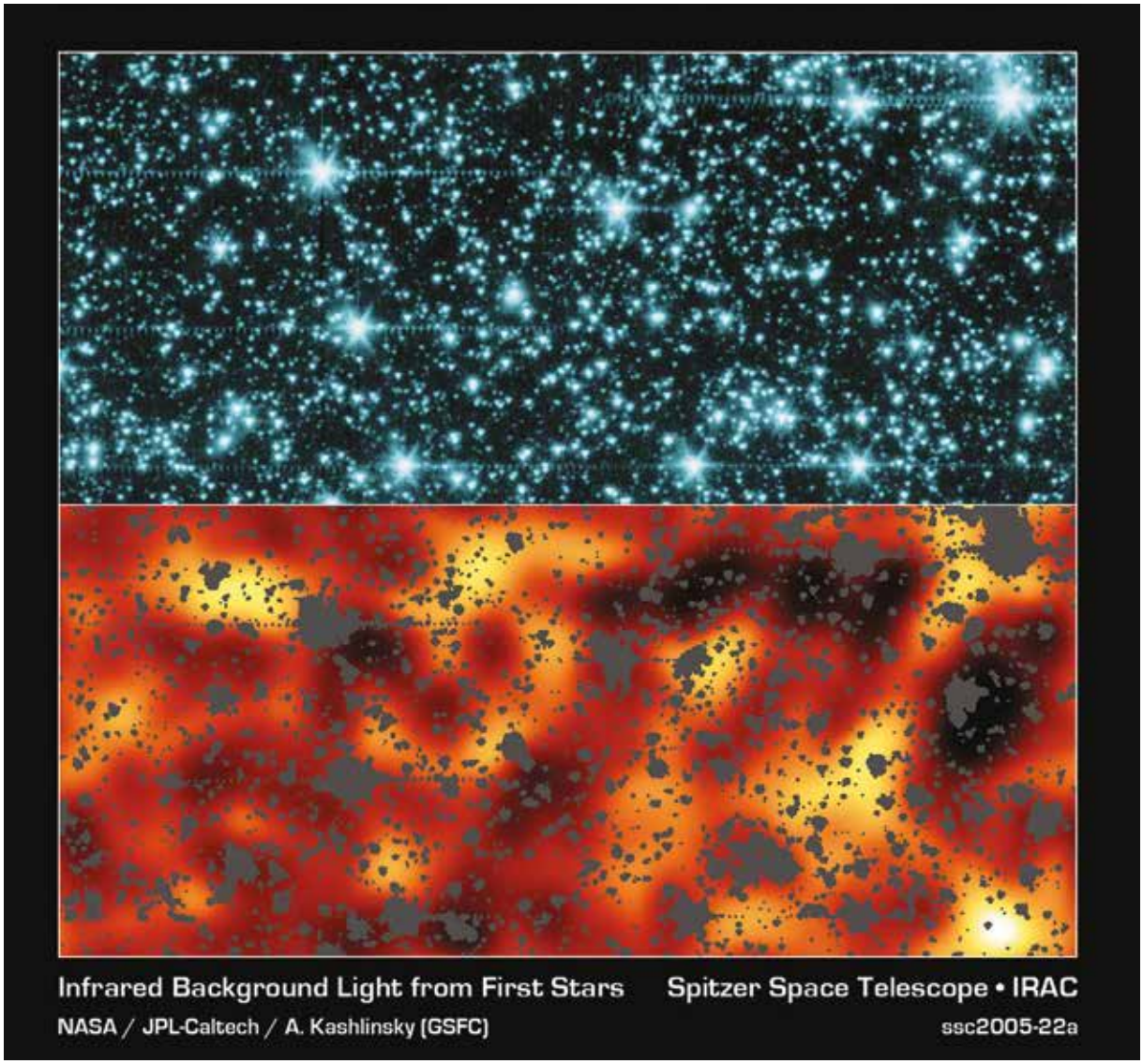
Las estrellas de Población II, mucho más antiguas, estaban menos enriquecidas con elementos más pesados que el helio (carbono, oxígeno, hierro, por ejemplo). Las de Población I, en cambio, se habían gestado en nubes de gas mucho más "contaminadas" de elementos pesados, provenientes de estrellas ya extintas. Sin embargo, había algo que no terminaba de cerrar: a pesar de contener cantidades exiguas de oxígeno, calcio o hierro, las estrellas de Población II sí los tenían. Y esos elementos no podían haber nacido luego del Big Bang. Por lo tanto, debió existir una generación de estrellas aún más antiguas y primitivas, formadas solo a partir del hidrógeno y helio iniciales.

Ya en la década de 1980, los astrónomos (entre ellos, el británico Bernard Carr), bautizaron a esas estrellas, arcaicas y fundacionales, como la Población III, y las modelaron teóricamente como colosales bolas de hidrógeno y helio crudos, esculpidas por la gravedad en los primeros cientos de millones de años del universo. Objetos de miles de millones de km de diámetro y cientos o miles de masas solares. Ni más ni menos que los supersoles de los que habla este artículo.

son los astrofísicos japoneses Masaki Kiyuna, Takashi Hosokawa y Sunmyon Chon, del Departamento de Física de la Universidad de Kyoto. Mediante simulaciones con supercomputadoras de una resolución sin precedentes, estos investigadores no solo demostraron que para "construir" estrellas supermasivas se requiere un medio denso, relativamente caliente y carente de elementos pesados; sino que también el proceso de colapso gravitatorio debe afectar a masas muy elevadas, en volúmenes pequeños y en tiempos muy breves. Las simulaciones de Kiyuna, Hosokawa y Chon se basan en el fenómeno astrofísico de "acreción fría", en el que también intervienen colisiones de flujos de materia sobre los discos protoestelares, ondas de choque y mecanismos que remueven el calor del material durante el abrupto colapso gravitatorio[1].

Y ahora sí, la asombrosa y prometida conclusión: según este minucioso trabajo científico, es probable que, bajo las condiciones imperantes en aquellos primerísimos

04



tiempos del cosmos, el repentino e imparable colapso de inmensos nódulos de gas haya encendido estrellas de decenas de miles de masas solares; incluso, hasta 100 mil.

Monstruos luminosos y explosivos

Debido a sus descomunales masas, justamente, aquellos primitivos soles gigantes habrían sido decenas o cientos de millones de veces más luminosos que cualquier estrella común del universo actual (como el Sol, por ejemplo). Y qué decir de sus temperaturas superficiales, que según estos mismos modelos teóricos ardían a más de 100.000°C (contra los 5500°C del Sol; o los 20.000°C o 30.000°C de estrellas modernas fuera de serie, como las espléndidas y azuladas Spica, en la constelación de Virgo; Regulus, en Leo; o Rigel, en Orión). A punto tal, que su pico de emisión no estaba en el rango visible, sino en lo profundo de la luz ultravioleta (de menor longitud de onda, mayor frecuencia y mucha mayor energía). Con semejante perfil, esas superestrellas debieron haber calentado y ionizado todo el gas de sus alrededores, esa

> "Es probable que, bajo las condiciones de los primerísimos tiempos del cosmos, se hayan encendido estrellas de decenas de miles de masas solares".

03 *Gráfico a escala que muestra la relación de tamaño entre diferentes tipos de estrellas, incluido el Sol, y una de las colosales estrellas de la Población III que existieron en los primeros cientos de millones de años del universo.*

04 *Esta imagen infrarroja, obtenida por el Telescopio Espacial Spitzer en 2005, muestra un suave resplandor de fondo, posiblemente asociado a radiación emitida, en tiempos muy remotos, por las primeras estrellas.*

> "Quizás pronto, el Telescopio Espacial James Webb podría lograr una imagen directa y puntual de alguna de las estrellas de la Población III".

misma materia prima que les diera origen.
Semejante furia astrofísica iba de la mano de una brutal y muy veloz fusión termonuclear en sus núcleos todopoderosos. Y aquí se abre otra cuestión tan apasionante como decisiva para la posterior evolución del cosmos. Gracias a la fusión termonuclear en sus corazones, las primeras estrellas del universo reciclaron su hidrógeno y helio originales; y en etapas sucesivas, cada vez más calientes, breves y violentas, forjaron elementos más y más complejos: carbono, oxígeno, magnesio, nitrógeno, silicio e, incluso, hierro. Finalmente, tras brillar durante unos pocos millones de años, explotaron como hipernovas, estallidos cientos de veces más energéticos y luminosos que cualquier supernova contemporánea.

Población III: revolución y legado cósmico

Ya es hora de etiquetarlas: técnicamente hablando, los astrónomos dicen que las primeras estrellas formaron la *Población III*, y que sus descendientes, aquellas que vivieron en los siguientes miles de millones de años, corresponden a la *Población II* y a la *Población I*. Estas últimas, por ejemplo, incluyen al Sol y todas las estrellas que vemos en el cielo nocturno (ver recuadro).
La aparición y desarrollo de las primeras estrellas no solo dio por finalizadas las Eras Oscuras, sino que dio inicio a una nueva y revolucionaria etapa en la historia del universo. Por un lado, la intensa luz ultravioleta derramada por estos monstruos calentó y ionizó las masas de gas interestelar, que en las Eras Oscuras habían permanecido esencialmente en estado calmo y neutro. Es decir: en lugar de dejar los átomos de hidrógeno intactos, con sus electrones ligados a sus núcleos, la radiación ultravioleta les arrancó los electrones a los núcleos de hidrógeno.
Por un lado, desde aquel lejano momento, el gas que flota en el universo está mayormente ionizado. Pero lo más jugoso es algo que dejamos picando en el párrafo anterior: a fuerza de la fusión termonuclear del hidrógeno y del helio, las estrellas de *Población III* forjaron elementos químicos más complejos, que no existían en el amanecer del cosmos. Y cuando explotaron como hipernovas, desparramaron esos nuevos elementos a cientos de años luz a la redonda, nutriendo y enriqueciendo el medio interestelar y las, hasta entonces, nebulosas vírgenes, de puro hidrógeno y helio.
De esa manera, las posteriores generaciones de estrellas, si bien ya no tan masivas, calientes ni luminosas (por las mismas limitaciones cósmicas que imponían las nuevas condiciones físico-químicas), se hicieron cada vez más ricas químicamente. Las nuevas recetas estelares ya incluían también carbono, oxígeno, hierro y tantos otros preciosos elementos que permitirían la gestación de planetas. Y en épocas mucho más recientes, al menos en este pequeño rincón del universo, la vida. Ni más ni menos. Un tema que, desde luego, merece todo un artículo aparte. El legado de los supersoles fue verdaderamente trascendental.

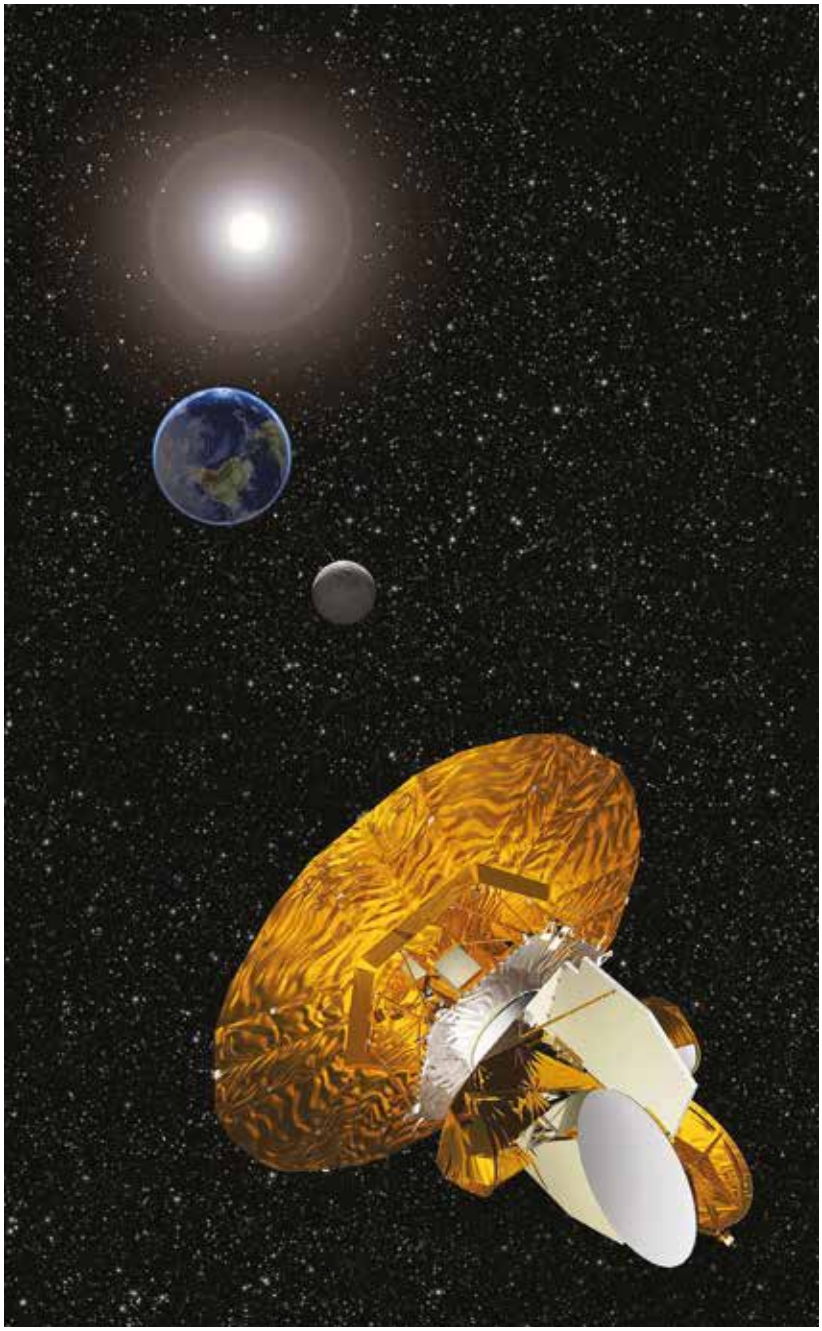
Huellas en el cosmos: antecedentes

Desde hace décadas, los astrónomos barren el cielo con

05

NASA

06



NASA

toda clase de instrumentos para encontrar las posibles huellas de aquellas estrellas prodigiosas. No solo desde la superficie, sino también con sofisticados observatorios espaciales. Durante los años '90, por ejemplo, el satélite COBE (*Cosmic Backgroud Explorer*), de la NASA, destinado principalmente a estudiar la famosa radiación de fondo cósmico de microondas (una suerte de "fósil" de los primeros tiempos del universo), detectó un muy débil "fondo infrarrojo", tentativamente atribuido a la emisión de estrellas extremadamente lejanas/antiguas.

Ya a comienzos de este siglo, el observatorio espacial WMAP (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*), sucesor del COBE, detectó curiosos patrones de polarización en la radiación de fondo cósmico de microondas, que fueron asociados a la ionización a gran escala generada por las primeras estrellas. También por entonces, el observatorio espacial Swift (también de la NASA) detectó un tremendo estallido de rayos gamma, aparentemente originado hace unos 12.800 millones de años. El brutal fogonazo cósmico bien pudo ser la señal de una hipernova de Población III.

Otra pista particularmente interesante surgió en 2005, cuando un equipo encabezado por Alexander Kashlinsky apuntó durante 10 horas el Telescopio Espacial Spitzer (NASA) hacia un rincón de la constelación boreal de Draco. El resultado fue una recordada imagen infrarroja, cargada de estrellas de la Vía Láctea y montones de galaxias de fondo (imagen 04). Pero lo verdaderamente interesante no eran las estrellas, ni las galaxias, sino el suave resplandor de fondo que bañaba la imagen. Mediante técnicas digitales de procesado, Kashlinsky y sus colegas le quitaron a la imagen original todas las estrellas y galaxias, y dejaron solo los manchones infrarrojos de fondo. Y fue entonces cuando arriesgaron una asombrosa explicación: "*Creemos que esa es la luz colectiva de millones de los primeros objetos que se formaron en el universo (…), astros que desaparecieron hace eones, pero cuya luz sigue viajando por el cosmos*", decía el científico en la revista *Nature*. Si así fuera, es verdaderamente impresionante: luz estelar que viajó desde la infancia del universo, durante más de 13.000 millones de años, acompañando su expansión y "estirándose" y

05 *Imagen artística que representa las primeras estrellas supermasivas aparecidas en el universo tan solo 200 millones de años después del Big Bang.*

06 *El observatorio espacial de microondas WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) ha sido otra herramienta fundamental para detectar pistas sobre la existencia de las inmensas y extremadamente calientes y luminosas estrellas de la Población III.*

debilitándose a la par, pasando de ser furiosa luz ultravioleta, a ese actual y etéreo resplandor infrarrojo. Una suerte de fósiles electromagnéticos que permean el cosmos y hablan en nombre de incontables soles extintos.
En clara sintonía con aquel "fogonazo" detectado por el Swift, en 2009, y con la ayuda de un enorme globo que se elevó hasta la alta atmósfera, el programa ARCADE (*Absolute Radiometer for Cosmology, Astrophysics, and Diffuse Emission*) de la NASA registró breves y débiles pulsos de ondas de radio, cuyo posterior análisis sugirió que podían ser los "ecos" de una o más hipernovas extremadamente lejanas/antiguas. La lista de sugerentes indicios podría extenderse mucho más. De hecho, durante la pasada década los astrónomos sumaron pistas muy similares que, tomadas en su conjunto, apuntan en la misma dirección: todas serían posibles evidencias de la presencia de estrellas extremadamente masivas y luminosas que vivieron y murieron en los primeros cientos de millones de años del cosmos.

Búsquedas con el Telescopio Espacial James Webb

Más allá de perfiles teóricos, sólidas simulaciones por computadoras y una muy buena cantidad de sugerentes indicios, ¿tenemos evidencias directas de aquellos arcaicos prodigios estelares? Oficialmente, aún no. Pero estamos cerca de lograrlo, fundamentalmente, gracias al flamante y prometedor Telescopio Espacial James Webb (JWST) de la NASA. A la luz de sus primeros e impresionantes imágenes y datos (que diferentes especialistas han abordado, incluso, en charlas especiales en la sala del Planetario), hay muy buenas razones para hacernos ilusiones. Gracias a su espejo primario de 6,5 metros de diámetro, sus múltiples sensores y espectroscopios, y su altísima sensibilidad en el rango del infrarrojo cercano y medio, el JWST es una máquina perfecta para escudriñar el universo más distante/primitivo. Eso incluye, por supuesto, las galaxias de hace más de 13 mil millones de años, donde anidaban las estrellas de Población III.
El JWST podría observar sin problemas las hipernovas en los límites del universo observable. Y mediante el análisis espectral de esos cataclismos, se podría perfilar mucho mejor los supersoles que los precedieron.
Otras pistas podrían surgir de la búsqueda y detección de helio ionizado (o helio II) en galaxias extremadamente antiguas. Los astrónomos sospechan que la brutal radiación de las estrellas de Población III debería haber "arrancado" electrones a sus átomos de helio, un fenómeno que emitiría patrones de luz específicos. Sobre este punto también tenemos novedades, y tienen que ver con el JWST. En febrero pasado se conocieron resultados muy preliminares de un estudio espectroscópico de más de 2 mil galaxias, realizado por el astrónomo Xin Wang (Academia China de Ciencias, en Pekín) y sus colegas. Entre los datos filtrados, aparece una galaxia que ya existía apenas 620 millones de años después del Big Bang, con claras señales de helio II. Es muy probable que pronto tengamos novedades.

¿Supersoles en los arrabales galácticos?

Dicho todo lo anterior, parecería completamente absurdo buscar aquellos supersoles en el universo actual. Sin embargo, hay quienes piensan que, no tan lejos, podríamos dar con criaturas bastante similares. ¿Dónde? La respuesta, una vez más, proviene de las simulaciones por computadora. Un estudio publicado en enero de este año por un grupo internacional de científicos[2], sugiere que en las zonas más externas de las más grandes galaxias modernas podrían existir reservorios de hidrógeno y helio esencialmente vírgenes. Regiones muy aisladas del resto del cuerpo galáctico, donde inmensas nubes de gas no "contaminado" de elementos pesados podrían gestar estrellas colosales, de características muy similares a las de la Población III original. Nuevamente, el JWST tendría la capacidad necesaria para encontrarlas, al menos, en galaxias situadas a decenas o cientos de millones de años luz.

Una asombrosa posibilidad

Para el final dejamos lo más extremo: bajo circunstancias tan extremas como fortuitas, el JWST podría lograr una *imagen directa y puntual* de alguna de las estrellas de la Población III. En principio, esto parece imposible dado que, incluso bajo la penetrante mirada infrarroja de este telescopio, galaxias *enteras* en los confines del espacio (y del tiempo) apenas lucen como vagas manchitas de unos pocos píxeles. ¿Cómo pretender, entonces, resolver una estrella, por más monumental que haya sido? La respuesta tiene que ver con el conocido fenómeno astrofísico de lentes gravitacionales.
En 2018, el astrónomo Rogier Windhorst (Universidad de Arizona, EE.UU.) y sus colegas, propusieron que la brutal fuerza de gravedad de los más grandes cúmulos de galaxias, podría torcer, concentrar y amplificar la luz de estrellas individuales en galaxias ubicadas mucho más "atrás", pero *exactamente* en la misma línea visual. Con esa ayudita de la naturaleza, la luz alguna vez emitida por los supersoles "*podría sufrir una casi infinita magnificación, y así saltar a la vista (una imagen individual)*", dice Windhorst. No es casual que, sobre esa base y ahora mismo, este científico lidere un plan de búsqueda con el JWST: "*Estoy muy confiado de que en uno o dos años veremos una... Ya tenemos algunos objetos candidatos*".
Sencillamente, fascinante. Quizás muy pronto, y desde la otra punta del espacio y del tiempo, aquellos supersoles que vivieron y brillaron durante el amanecer del universo, nos revelen el secreto último de su gloria, su tragedia y su revolucionario legado. ■

Notas

1 Todo ha sido dicho de modo simplificado. Quienes quieran profundizar, pueden buscar el trabajo original en internet: *First emergence of cold accretion and supermassive star formation in the early universe* / Kiyuna, Hosokawa, Chon.

2 *A needle in a haystack? Catching Pop III stars in the Epoch of Reionization: I. Pop III star forming environments* / Venditti, Graziani, Schneider, Pentericci, Di Cesare, Maio, Omukai.

MUNDOS FUERA DEL SISTEMA SOLAR

Autor: *Alejandro Hacker, Licenciado en Ciencias Físicas de la Universidad de Buenos Aires, estudiante de Doctorado en el International Center for Advanced Studies de la Universidad de San Martín.*

Hay planetas que orbitan alrededor de dos estrellas, como en Tatooine, de Star Wars.

Vivimos en el tercer planeta orbitando el Sol, una de los cientos de miles de millones de estrellas de la Vía Láctea, una de los miles de millones de galaxias del universo observable. ¿Qué hay ahí fuera? ¿Innumerables mundos rebosantes de vida o un silencio ensordecedor? ¿Civilizaciones tecnológicas que se extienden por galaxias o pequeños microorganismos unicelulares? ¿Planetas parecidos a la Tierra con formas de vida similares o sistemas totalmente distintos a todo lo que alguna vez nos hayamos encontrado?

Hasta hace 30 años, los únicos planetas que conocíamos eran los que están en nuestro sistema solar. Hoy conocemos miles de otros mundos alrededor de otras estrellas, llamados exoplanetas, los cuales abrieron un nuevo campo de investigación científica y un nuevo paradigma que pone en contexto nuestra experiencia en este mundo. ¿Son únicos nuestra Tierra, nuestro Sol, nuestro sistema solar? ¿Estamos solos en el universo?

El desafío de buscar exoplanetas

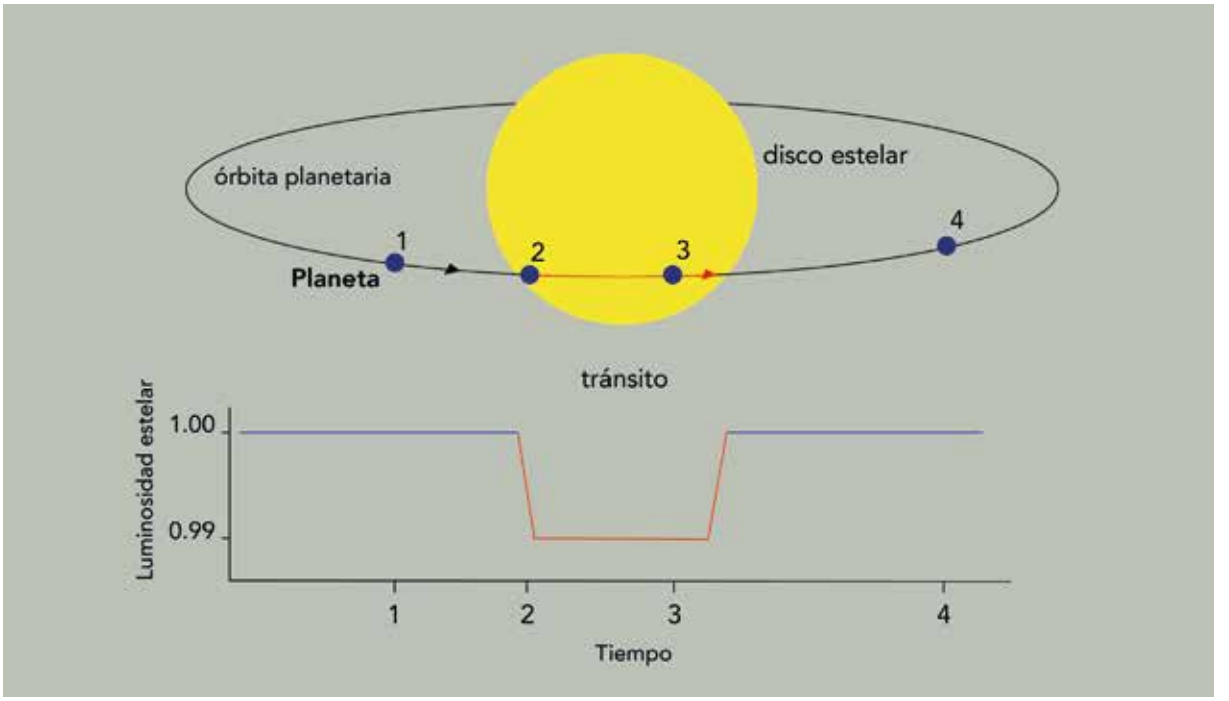
Un exoplaneta o planeta extrasolar es cualquier planeta fuera de nuestro sistema solar, generalmente orbitando otras estrellas. La idea de que existen otros planetas, quizás habitados, fue formulada por distintos pensadores a lo largo de la historia. En el siglo IV antes de nuestra era, el filósofo griego Epicuro de Samos escribió, en su epístola a Heródoto: "*Hay un número infinito de mundos, algunos como este, otros diferentes. Los átomos de los que se forman no se acaban en un mundo o en un número finito de mundos, sean o no parecidos al nuestro. Por lo tanto, no habrá nada que impida una infinidad de mundos*". Dos mil años después, Isaac Newton incluyó en sus Principia la tesis de que las estrellas fijas podrían ser los centros de sistemas planetarios similares al nuestro, y Giordano Bruno fue encarcelado y sentenciado a muerte por proponer, entre otras cosas, que nuestro mundo no es el único de su género y hay otros cuerpos planetarios semejantes a este.

En el siglo XX, se empezó a considerar que la existencia de otros mundos era una consecuencia natural del proceso de formación de estrellas, a medida que este se iba comprendiendo cada vez mejor. Sin embargo, todavía faltaba la tecnología necesaria para buscar exoplanetas. El problema principal es la distancia.

¿Qué tan lejos están las estrellas que vemos en el cielo? Supongamos que el Sol es una pelotita de un centímetro de diámetro y la Tierra un granito de arena azul de una décima de milímetro ubicado a un metro de distancia del Sol. La distancia del Sol a Plutón sería de unos 40

02

Exoplanet Diagrams (blog)



metros, así que todo el sistema solar entraría dentro de una plaza en nuestro barrio. Ahora bien, en esta escala, la estrella más cercana, Próxima Centauri, estaría a 270 km de distancia. Poco menos que la distancia de Buenos Aires a Rosario.

Con esta analogía se puede ver por qué descubrir planetas dentro del sistema solar es relativamente fácil, alcanza con un telescopio adecuado. Pero hacerlo más allá es un problema completamente distinto. Debido a la distancia descomunal a las estrellas, incluso con los mejores telescopios, lo mejor que podemos obtener de la mayoría de ellas es una imagen borrosa de un punto de luz. Y para colmo, los exoplanetas son mucho más pequeños y su brillo es hasta 10 mil millones de veces más tenue, por lo que aparecen en el cielo fundidos con la estrella.

A pesar de todas estas dificultades, se diseñaron métodos de detección indirecta y la tecnología para llevarlos a cabo se terminó de desarrollar en la década de 1980, superando barreras que antes se consideraban insalvables.

Nuevos mundos, nuevos paradigmas

La primera detección confirmada de un exoplaneta ocurrió en 1992. Ese año, Aleksander Wolszczan (astrónomo polaco) y Dale Frail (astrónomo canadiense) descubrieron dos planetas orbitando un púlsar, PSR B1257+12, a 2300 años luz de la Tierra. Un púlsar es uno de los posibles resultados de la evolución estelar, un remanente posterior a las fases finales de la evolución de la estrella, que emite ondas de radio en direcciones muy específicas del espacio. La primera detección de un exoplaneta orbitando una estrella parecida al Sol (en la secuencia principal de la evolución estelar, es decir, que produce energía por la fusión del hidrógeno) fue en 1995 por los astrónomos suizos Michel Mayor y Didier Queloz; hazaña que les valió el Premio Nobel de Física de 2019. Descubrieron un planeta del tamaño de Júpiter orbitando la estrella 51 Pegasi, a 50,1 años luz de nosotros. La detección de este gigante gaseoso mostraba que el planeta, denominado 51 Pegasi b, orbitaba alrededor de su estrella a una distancia casi ocho veces más chica que la órbita de Mercurio alrededor del Sol, y con un periodo de tan solo 4,2 días (Júpiter tarda 12 años en dar la vuelta al Sol). Este resultado no podía explicarse con los modelos vigentes sobre formación de planetas, ya que iba en contra de lo que pasa en nuestro sistema solar, e introdujo una categoría completamente nueva de planetas que no se sabía que podían existir: los júpiter calientes, gigantes gaseosos que orbitan muy cerca de su estrella. Esto causó mucho escepticismo por parte de la comunidad científica y se buscaron otras explicaciones alternativas para entender los datos. Las propuestas fueron desde pulsaciones estelares hasta actividad magnética en la estrella.

Sin embargo, después de esos primeros descubrimientos, se siguieron encontrando otros júpiter calientes en torno de otras estrellas, lo que disipó dudas sobre la existencia de este tipo de planetas. Luego, con mejores técnicas instrumentales, la ciencia de los exoplanetas creció rápidamente y al día de hoy (noviembre 2023) ya se descubrieron más de 5500 planetas extrasolares con masas y tamaños muy diferentes, muchos de los cuales son parecidos a la Tierra. Incluso se han descubierto exoplanetas dentro de la zona de habitabilidad de su sistema estelar, es decir, la región alrededor de la estrella en la que la radiación incidente permitiría la existencia de agua líquida en la superficie del planeta. Ni muy cerca, donde el agua se convertiría en vapor, ni muy lejos donde se congelaría. Hoy, gracias a estudios de in-

ferencia estadística, sabemos que una gran fracción de las estrellas similares al Sol tienen al menos un planeta y que los planetas pequeños y rocosos como la Tierra, si bien son los más difíciles de detectar, representarían la mayoría de los planetas existentes.

Cómo se detectan exoplanetas

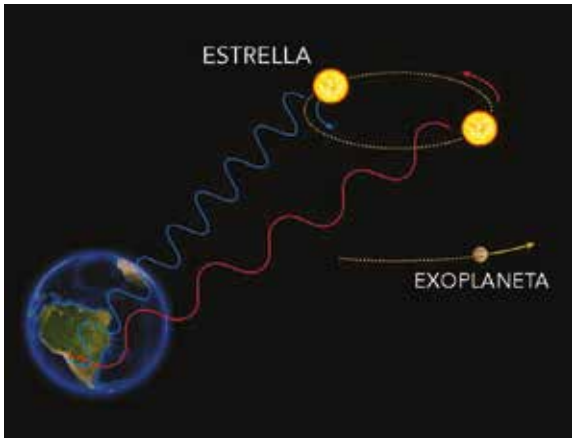
El problema de la distancia y las diferencias de tamaño y brillo entre los exoplanetas y sus estrellas impulsó la elaboración de métodos muy creativos para detectarlos de manera indirecta. Se trata de distinguir los rastros que dejan en la luz que nos llega de la estrella. Existen varios métodos de este tipo, pero nueve de cada diez exoplanetas fueron descubiertos con los dos métodos principales: el método de tránsitos y el de velocidades radiales.

Se conoce como **tránsito** al evento en el cual un exoplaneta, visto desde la Tierra, pasa por delante de la estrella, disminuyendo levemente el brillo que percibimos de ella. Para medir esta disminución se emplean técnicas de medición de luz de muy alta sensibilidad, ya que el cambio de luminosidad es casi imperceptible. Para darse una idea, visto desde afuera, el paso de la Tierra por delante del Sol, baja el brillo de nuestra estrella en menos de un 0,01%. Los tránsitos son extremadamente ricos en información acerca del sistema estrella-planeta. Por ejemplo, como el tránsito se repite cada vez que el exoplaneta da una vuelta alrededor de la estrella podemos determinar su periodo orbital, es decir, cuánto dura un año en el planeta. También sirve para determinar el radio del planeta, ya que cuanto más grande sea este, más se atenuará el brillo de la estrella durante el tránsito. Por lo tanto, la detección de un tránsito planetario resulta más sencilla mientras más pequeña sea la diferencia de tamaños entre la estrella y el planeta.

La **velocidad radial** es la velocidad a la que la estrella se aleja o se acerca a la Tierra. Cuando un planeta orbita una estrella, la estrella también se mueve ligeramente por culpa de la gravedad del planeta. Cada uno gira alrededor del otro. Como la estrella es mucho más masiva que el planeta, se mueve mucho menos, pero realiza un leve vaivén. Si el planeta es lo suficientemente masivo y está lo suficientemente cerca de la estrella, es posible detectar este bamboleo en la estrella, observar cambios periódicos en la velocidad con la que se acerca y aleja de nosotros. Esto se mide mediante cambios en la luz que emite la estrella, gracias al efecto Doppler. Este es el efecto que hace que escuchemos más agudo un auto o una moto que se está acercando y más grave cuando se está alejando. En el caso de la luz de la estrella, cuando esta se mueve hacia la Tierra, su luz se desplaza a frecuencias más altas ('hacia el azul') y cuando se mueve alejándose, su luz se desplaza a frecuencias más bajas ('hacia el rojo'). Al medir estos cambios que se dan de forma periódica en la luz de la estrella, podemos determinar la presencia y algunas características del planeta, como su periodo orbital o la masa mínima que este debe tener para producir el efecto.

Otros métodos de detección son la **astrometría**, que registra el movimiento de la estrella inducido por el planeta en el plano del cielo; el **cronometraje** de sistemas que emiten señales periódicas como los púlsares, estrellas variables pulsantes o sistemas binarios eclipsantes, en donde la presencia de exoplanetas produce pequeñas anomalías en la regularidad periódica del sistema; las **microlentes gravitacionales**, cuando el campo gravitacional de una estrella desvía la luz de una estrella distante situada más atrás y la presencia de un exoplaneta modifica sutilmente este efecto. Finalmente, también existen **métodos de detección directa** para obtener imágenes de exoplanetas en el espectro visible o infrarrojo, utilizando técnicas que permiten bloquear o cancelar la luz de la estrella. Sin embargo, estos métodos hoy en día solo se pueden usar para detectar planetas alrededor de estrellas muy jóvenes y muy cercanas a la Tierra.

03



European Southern Observatory (ESO)

El censo creciente de exoplanetas

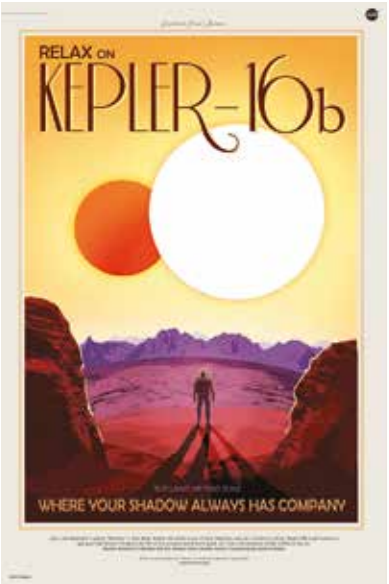
Al día de hoy se han confirmado 5528 exoplanetas de 4120 sistemas distintos. A estos se les suman otros 9900 candidatos a confirmar. La variedad de exoplanetas descubiertos es tan grande que las posibilidades para su clasificación son muy variadas: cuerpos pequeños y grandes, con superficie sólida y gaseosa, calientes y fríos, rocosos y helados, con y sin atmósfera, órbitas circulares o muy alargadas. Mientras los seguimos descubriendo y aprendiendo acerca de su diversidad, los vamos agrupando según las características que comparten con los planetas que ya conocemos. Encontramos, por ejemplo, planetas gigantes y gaseosos como Júpiter, gigantes helados como Neptuno y Urano o pequeños y rocosos, como la Tierra. Pero también hay categorías nuevas como júpiter calientes, minineptunos o supertierras. Estas últimas tienen masas entre 2 y 10 veces la terrestre, y como no existen en nuestro sistema solar, su verdadera

02 *Esquema de un planeta transitando frente a su estrella y la disminución en la luminosidad de la estrella durante el proceso.*

03 *Método de la velocidad radial para detectar exoplanetas. Esquema ilustrativo del desplazamiento Doppler en la luz de la estrella, provocado por la presencia de un planeta orbitándola.*

04

NASA/JPL-Caltech



naturaleza es un misterio. Sin embargo, son muy comunes en nuestra galaxia.

Dentro de este amplio catálogo descubrimos mundos infernales cubiertos enteramente de lava y mundos que podrían estar completamente cubiertos de agua. Hay mundos que orbitan alrededor de dos estrellas, lo cual nos regalaría dos amaneceres, como en el planeta *Tatooine*, de *Star Wars*. Hay exoplanetas más oscuros que el carbón, exoplanetas con forma de huevo y cuyo interior podría ser de diamante. Hay exoplanetas con tormentas increíbles y vientos supersónicos y exoplanetas donde llueven vidrios de lado a lado. Los planetas *vagabundos* o *interestelares* son planetas que no están gravitacionalmente sujetos a ninguna estrella, y por tanto se mueven solos y en la oscuridad del espacio. En estos planetas siempre es de noche.

Una era de caracterización

La detección de exoplanetas seguirá creciendo a un ritmo acelerado gracias al trabajo de las científicas y los científicos implicados en numerosos telescopios terrestres y espaciales, como **TESS** o **Cheops**. El desafío actual es caracterizar los planetas más interesantes con el mayor nivel de detalle posible. Por ejemplo, a partir de las medidas de masa y radio, podemos estimar la densidad media de los exoplanetas, lo cual nos permite plantear modelos de cómo es su interior y ayudarnos a entender mejor los procesos de formación y evolución de los sistemas planetarios.

Por otro lado, los métodos actuales nos permiten estudiar la composición de las atmósferas de los planetas observados. La técnica para hacer esto es la **espectroscopía**, es decir, estudiando cómo se distribuye la intensidad de la luz de la estrella en todos sus colores o longitudes de onda. Esta distribución define el espectro de la estrella. Diferentes elementos y moléculas absorben luz en longitudes de onda características, y así podemos ver la firma de estos elementos en el espectro de la luz que nos llega. Cuando detectamos un planeta pasando por delante de su estrella, la luz que vemos de la estrella atraviesa la atmósfera del planeta. Entonces, si esta atmósfera cuenta con un elemento en particular (sodio, agua, metano, etc.), el espectro de la estrella, sumado al del planeta, va a tener una "línea de absorción" en el lugar donde esperaríamos ver la firma de ese elemento.

Estos estudios no solo nos dan información acerca de las dinámicas y fenómenos atmosféricos como vientos o tormentas, sino que ofrecen indicios acerca de los procesos que suceden en la superficie del exoplaneta. Particularmente, la presencia de ciertas moléculas o su concentración relativa podría indicar que en la superficie se están dando procesos biológicos.

¿Estamos solos?

A fines de 2021, fue lanzado al espacio el **Telescopio Espacial James Webb**, el observatorio espacial más grande y complejo jamás construido. Entre sus principales objetivos, los cuales incluyen estudiar el universo temprano, la formación de galaxias, el ciclo de vida de las estrellas y otros temas igualmente fascinantes, está estudiar las atmósferas de exoplanetas con el objetivo de encontrar alguno con atmósfera similar a la Tierra y descubrir los ladrillos fundamentales de la vida en otras partes del universo.

Desde hace años venimos estudiando las atmósferas de exoplanetas gigantes (es más fácil porque su atmósfera está más extendida) y algunos planetas más pequeños particularmente favorables. Desde el lanzamiento del Webb, estos estudios se están haciendo de manera más amplia y sistemática. Más aún, el telescopio está diseñado específicamente para estudiar el rango infrarrojo, lo cual es clave para caracterizar los planetas potencialmente habitables, ya que las moléculas de la atmósfera tienen la mayor parte de sus huellas espectrales en este rango. En esto el Webb ya está marcando una revolución, con las mediciones de atmósferas más detalladas hasta el momento.

Dos ejemplos recientes son los descubrimientos en las atmósferas de los exoplanetas **VHS 1256-b** y **K2-18b**. El primero se encuentra a unos 40 años luz de la Tierra y orbita alrededor de dos estrellas. A partir de las observaciones del James Webb se realizaron detecciones muy claras de agua, metano, monóxido de carbono, dióxido de carbono, sodio, potasio y nubes de silicato en la atmósfera de VHS 1256-b, siendo este el mayor número de moléculas que se hayan identificado a la vez en un exoplaneta. Estas observaciones muestran que la atmósfera está constantemente ascendiendo, mezclándose y moviéndose durante su día de 22 horas, empujando el material más caliente hacia arriba y el más frío hacia abajo. Esto produce variaciones tan dramáticas en su brillo que es el objeto de masa planetaria más variable que se haya conocido hasta el momento. Por otro lado, los espectrógrafos del telescopio detectaron metano y dióxido de carbono en la atmósfera del exoplaneta K2-18b, el cual se encuentra en la zona de habitabilidad de su estrella, a 120 años luz de la Tierra. La abundancia de estos elementos, junto con la escasez de amoníaco, podría indicar que se trata de un planeta hiceánico: un tipo de planeta, hasta ahora sin confirmación, cubierto por un océano global bajo una atmósfera rica en hidrógeno y que posiblemente sea capaz de albergar vida. Por otro lado, las observaciones muestran una posible detección de sulfuro de dimetilo (DMS), una molécula que en la Tierra solo es producida por organismos vivos (la mayoría del DMS en la atmósfera de la Tierra la emite el fitoplancton en ambientes marinos).

En los próximos años serán lanzados al espacio los telescopios **Plato** (programado para 2026) y **Ariel** (programado para 2029) que investigarán millones de estrellas, acercándonos a detectar planetas en zona de habitabilidad cada vez más parecidos a la Tierra, tanto en tamaño y masa como también, por primera vez, en tipo de estrella alrededor de la cual orbitan. Ya no es especulación filosófica solamente. En los próximos años vamos a poder encarar la cuestión de la vida fuera del sistema solar desde un punto de vista científico.

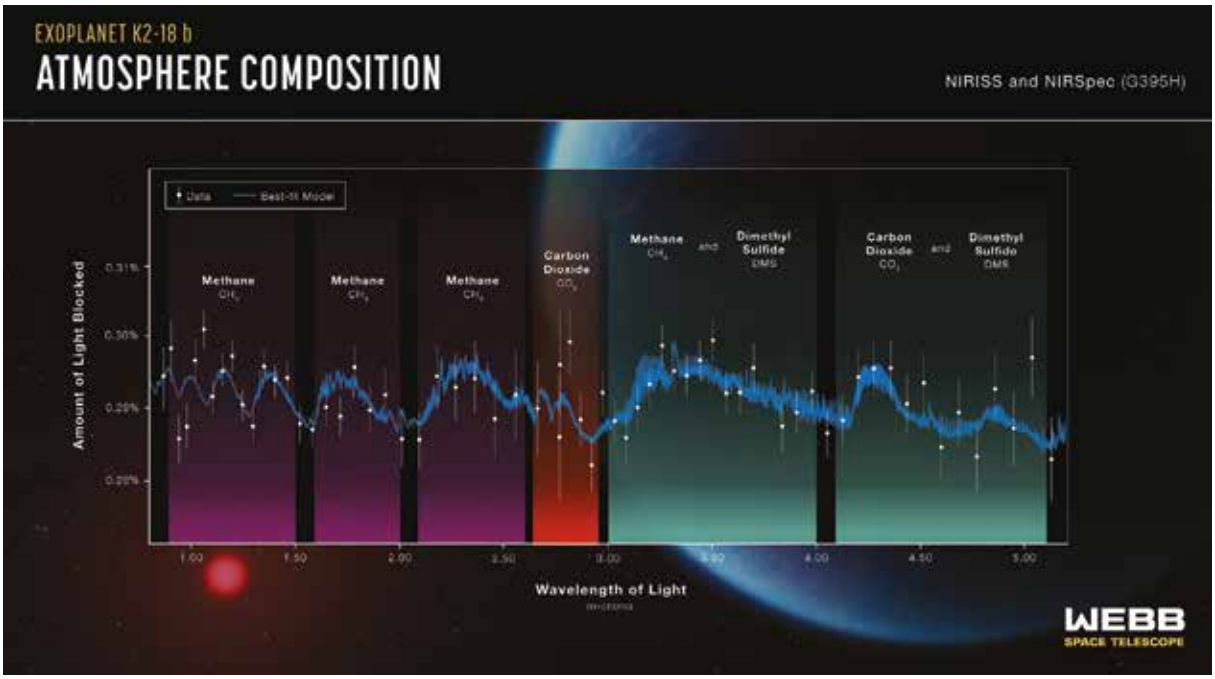
> "Ya no es especulación filosófica solamente. En los próximos años vamos a poder encarar la cuestión de la vida fuera del sistema solar desde un punto de vista científico".

Los exoplanetas nos ayudan a entender de dónde venimos, cómo se conforman y evolucionan los sistemas planetarios como el que habitamos, y si vivimos en un mundo con características únicas o no. Descubrir qué hay ahí afuera nos permite ponernos en contexto dentro de la galaxia y nos ayuda, finalmente, a entender mejor qué hay acá adentro. ■

04 *Postales de viajes de un turismo exoplanetario ficticio, elaboradas por el Exoplanet Exploration Program de la NASA. Se muestran los exoplanetas Kepler-16 b, que orbita dos soles; Trappist-1e, en la zona de habitabilidad de su estrella y con vistas a los otros planetas de su sistema; y 55 Cancri e, cubierto por un océano global de lava y cielos chispeantes por los silicatos condensados de su atmósfera.*

05 *Espectro del exoplaneta K2-18 b obtenido con los espectrógrafos del Telescopio Espacial James Webb. Se identifican moléculas de metano y dióxido de carbono en la atmósfera y la posible detección de sulfuro de dimetilo (DMS), una molécula que en la Tierra solo es producida por procesos biológicos.*

05



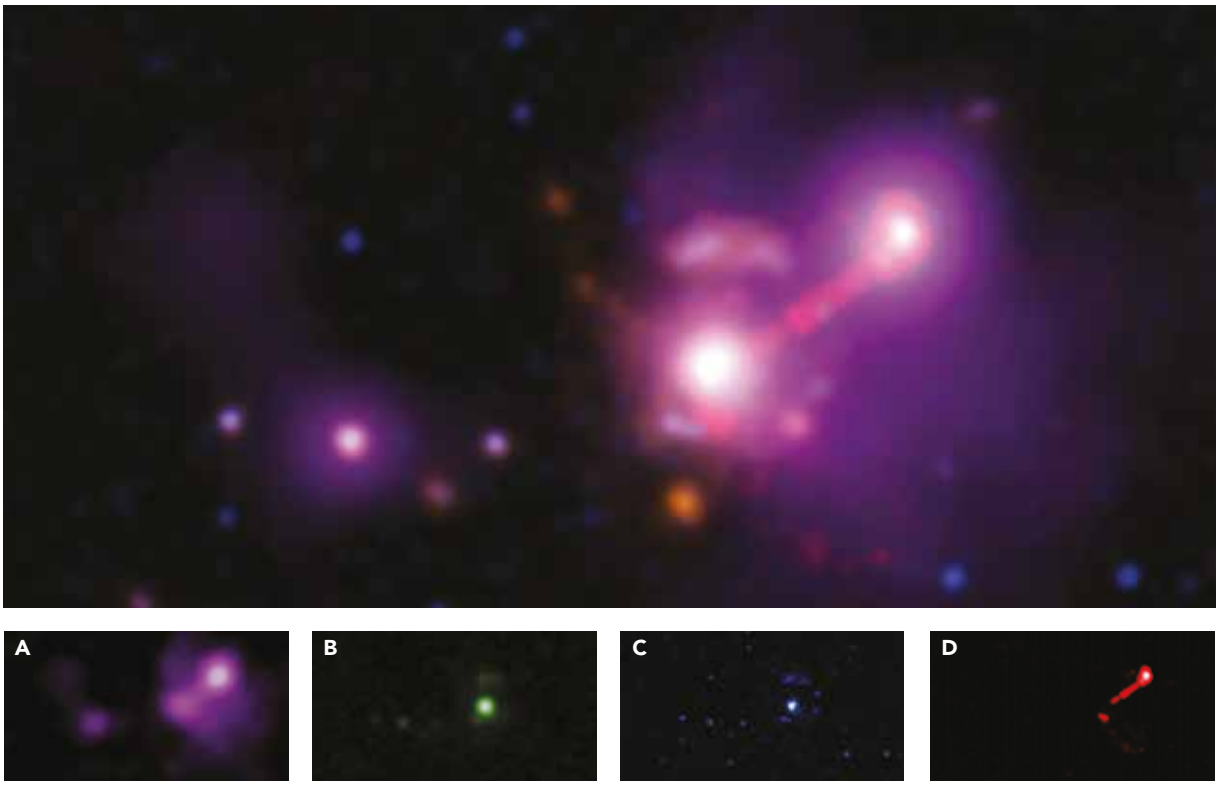
NASA, CSA, ESA, R. Crawford (STScI), J. Olmsted (STScI), N. Madhusudhan (Cambridge University)

3C 297

DESCUBREN UNA GALAXIA INESPERADAMENTE SOLITARIA

Autor: *Facundo Rodríguez. Instituto de Astronomía Teórica y Experimental (IATE).*
facundo.rodriguez@unc.edu.ar

01



Un equipo internacional del que participa un investigador argentino, hizo un hallazgo que podría desafiar los tiempos en los que se espera que crezcan las galaxias. Estos resultados se obtuvieron utilizando datos del Observatorio de Rayos X Chandra (NASA) y del Observatorio Internacional Gemini.

A unos 9200 millones de años luz de la Tierra, se detectó una galaxia inesperadamente solitaria, que parece haber atraído y asimilado a todas sus antiguas compañeras. La galaxia tendría en su interior un agujero negro supermasivo que arrastra gas en el centro de la galaxia e impulsa potentes chorros de materia, y genera lo que se considera un cuásar. A este objeto se lo denominó 3C 297. Si bien su entorno es consistente con lo que se esperaría de un cúmulo de galaxias, es decir, de una estructura de cientos o miles de galaxias, este ejemplar está solo.

Los estudios de 3C 297 realizados mediante el Observatorio espacial de Rayos X Chandra, muestran que esta galaxia está rodeada de grandes cantidades de gas con temperaturas de decenas de millones de grados, algo característico de los cúmulos de galaxias. Entonces, se esperaría encontrar allí al menos decenas de galaxias similares a la Vía Láctea. Sin embargo, los datos procedentes del Observatorio Gemini de Hawái revelaron que las galaxias más cercanas a este solitario objeto están a una gran distancia. Es decir, parece ser un cúmulo de galaxias al que le faltan todas sus integrantes.

Por otra parte, el chorro del agujero negro supermasivo ha creado una intensa fuente de rayos X que llega a unos 140.000 años luz de distancia de su centro, lo que im-

01 *Imagen de 3C 297 compuesta a partir de la superposición de datos obtenidos por telescopios que observan en diferentes longitudes de onda. A- Rayos X (NASA/CXC/Universidad de Torino/V. Missaglia et al.). B y C- Óptico (NASA/ESA/STScI y Gemini/NOIRLab/NSF/AURA). D- Radio (NRAO/AUI/NSF).*

02 *El Observatorio de Rayos X Chandra es un satélite en torno a la Tierra lanzado por la NASA en 1999. Su nombre es un homenaje al físico indio Subrahmanyan Chandrasekhar, uno de los fundadores de la astrofísica. Como la mayoría de los rayos X son absorbidos por la atmósfera terrestre, un telescopio desde la superficie no puede detectarlos. Por eso, para este tipo de estudios es necesario que el telescopio esté en el espacio exterior.*

plica que ha penetrado en el gas que rodea la galaxia. Y, como si esto fuera poco, otro de los chorros, en este caso, detectado por sus emisiones de radio, está doblado, lo que demuestra que ha interactuado con su entorno. Entonces, la explicación dada por quienes firman el trabajo, entre quienes se encuentra Carlos Donzelli, investigador del Instituto de Astronomía Teórica y Experimental (IATE) y del Observatorio Astronómico de Córdoba, es que las galaxias circundantes se fusionaron con esta galaxia observada.

En el trabajo publicado en la revista científica *The Astrophysical Journal*, el equipo sugiere que 3C 297 ya no es un cúmulo de galaxias sino un "grupo fósil", es decir, la etapa final de una galaxia que se arrastra y se fusiona con otras galaxias. Aunque no es el primer grupo fósil detectado, este se encontraría a una distancia mucho mayor que los más lejanos encontrados hasta ahora. Los anteriores récords se encontraban a distancias de 4900 y 7900 millones de años luz.

Mischa Schirmer, quien investiga en el Instituto Max-Planck, en Alemania, es uno de los coautores de la publicación científica, y afirma que "*puede resultar difícil explicar cómo el universo pudo crear este sistema solo 4600 millones de años después del Big Bang*". Y agrega que "*esto no rompe nuestras ideas de cosmología, pero empieza a empujar los límites de lo rápido que deben haberse formado tanto las galaxias como los cúmulos de galaxias*".

Si bien no se puede descartar la presencia de galaxias enanas alrededor de 3C 297, su existencia seguiría sin explicar la ausencia de galaxias más grandes, como la Vía Láctea. Por lo tanto, según los impresionantes resultados obtenidos por este equipo, esta galaxia pasará miles de millones de años esencialmente sola. ■

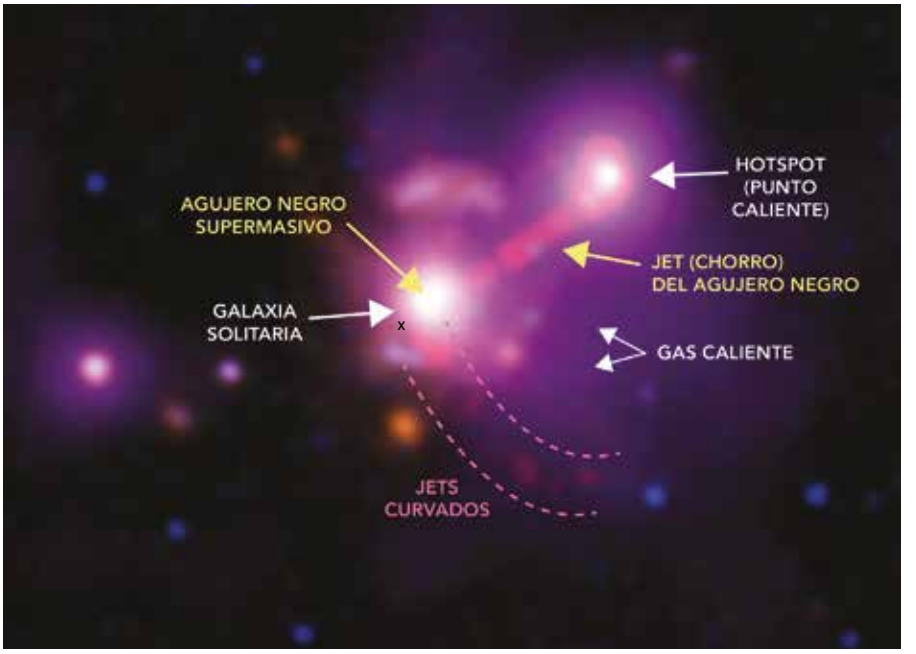
"La galaxia 3C 297 está rodeada de grandes cantidades de gas con temperaturas de decenas de millones de grados, algo característico de los cúmulos de galaxias".

Publicación científica

Powerful Yet Lonely: Is 3C 297 a High-redshift Fossil Group?

Autores: Valentina Missaglia, Francesco Massaro y Alessandro Paggi (Università degli Studi di Torino, Italia), Juan P. Madrid y Martell Valencia (Universidad de Tejas en el Valle del Río Grande, EE.UU.), Mischa Schirmer (Max-Planck-Institut für Astronomie, Alemania), Alberto Rodríguez-Ardila (LNA/MCTIC, Brasil), Carlos J. Donzelli (IATE, CONICET/UNC, Argentina), Ralph P. Kraft y Belinda J. Wilkes (Center for Astrophysics, Harvard & Smithsonian, EE.UU.), Chiara Stuardi (Universitá di Bologna, Italia).

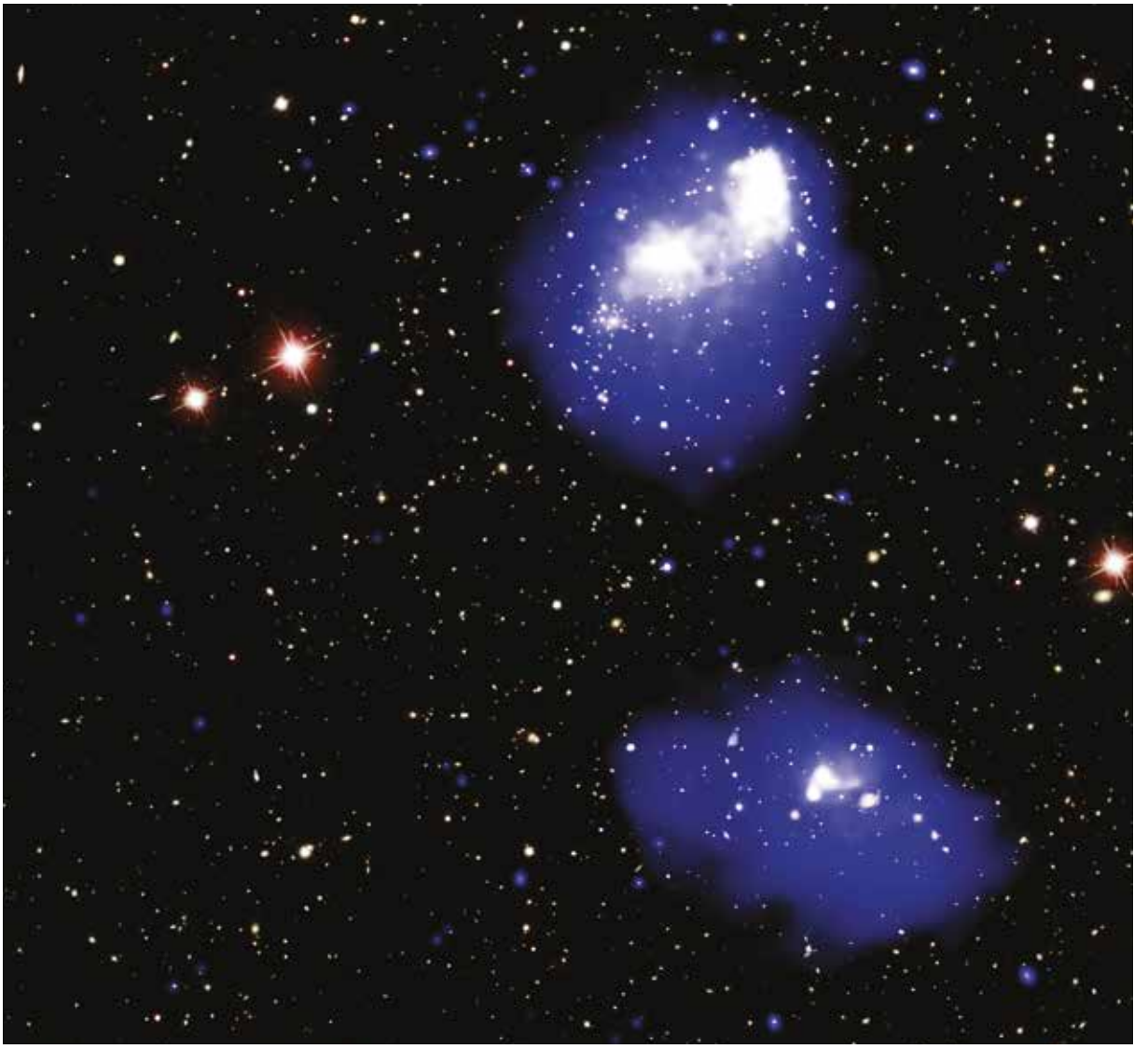
03



03 *Gracias a las observaciones de Chandra y Gemini se ha logrado inferir la existencia de un agujero negro supermasivo con chorros de materia en torno a la galaxia 3C 297, que está rodeada de grandes cantidades de gas a decenas de millones de grados.*

04 *Otra interesante detección del Observatorio de Rayos X Chandra. Abell 1758, un megacúmulo de galaxias en formación, una rara colisión entre cuatro cúmulos de galaxias, cada uno con cientos de galaxias, rodeadas de gas caliente y materia oscura, y que finalmente formarán un único grupo muy masivo. Créditos: Rayos X: NASA/CXC/SAO/G. Schellenberger et al. Óptico: SDSS.*

04



Zambullida galáctica

Mediante simulaciones computacionales, se explica la transformación que sufren las galaxias que ingresan a un cúmulo y vuelven a salir.

Autor: *Facundo Rodríguez*

Las galaxias tienden a agruparse y a conformar sistemas que pueden tener desde unos pocos miembros a cientos. Los sistemas más numerosos se denominan cúmulos de galaxias. En ellos, hay decenas o cientos de galaxias unidas por la gravedad. Estos sistemas pueden modificar las galaxias que los habitan, fundamentalmente, mediante la presión de su gas extremadamente caliente (centenares de millones de grados) que barre el gas propio de las galaxias. Ese gas es, a su vez, la reserva de material que las galaxias tienen para formar sus estrellas.

Además, los tirones gravitacionales que produce un cúmulo sobre las galaxias que pasan cerca de sus zonas centrales pueden generar cambios en sus formas, la pérdida de parte de sus estrellas o, en casos extremos, su destrucción completa.

Algunas galaxias, debido a su velocidad y localización, son atraídas por el cúmulo, ingresan en él y, luego, lo abandonan y quedan cerca. Si bien no hay una palabra en español para definirlas, el término con el que se las denomina en inglés es "*backsplash*", que quiere decir algo así como "que salpican el cúmulo".

Este tipo de galaxias ha atraído la atención de los astrónomos y han sido muy estudiadas en los últimos años. Sin embargo, todavía se intenta determinar qué consecuencias tiene el pasaje por el cúmulo en su evolución. Este fue el desafío que asumió el equipo liderado por Andrés Ruiz, Julián Martínez, Valeria Coenda y Hernán Muriel, quienes investigan en el IATE; con la colaboración de Sofía Cora, del Instituto de Astrofísica de La Plata; Martín de los Ríos, de la Universidad Autónoma de Madrid; y Cristian Vega-Martínez, de la Universidad de La Serena. "*Nuestra principal motivación fue estudiar la primera experiencia que tiene una galaxia al ingresar a un cúmulo, y poder separar los cambios que sufre antes y los efectos del cúmulo en ese pasaje por su interior*", explica Valeria Coenda.

Para estudiar los detalles de estas galaxias particulares se utilizan simulaciones computacionales. En ellas, se eligieron los cúmulos aislados, sin otros sistemas cercanos. Obtuvieron una muestra de 34 cúmulos. Además, aprovechando que en las simulaciones se pueden conocer los detalles de la trayectoria de las galaxias, se eligieron aquellas que están fuera de los cúmulos pero que hubieran previamente ingresado y salido de los mismos. Con estos criterios, se seleccionaron más de 5000 galaxias, las dividieron en categorías y así obtuvieron más información sobre su evolución.

Cuando se estudian los estadios de evolución de las galaxias, una característica fundamental es describir si están formando estrellas o no. Las galaxias con mucho gas disponible forman estrellas, mientras que aquellas que pierden ese gas dejan de hacerlo. "*Basándonos en trabajos anteriores, clasificamos las galaxias que ingresaron y salieron del cúmulo según si estaban o no formando estrellas, y estudiamos cómo iba variando esto, teniendo en cuenta, además, cómo era su pasaje por el cúmulo*", comenta Andrés Ruiz.

Resultados

A partir del detallado estudio se determinó que la mayoría de estas galaxias que se zambullen en el cúmulo y luego salen, y no han atravesado la región central, continúan formando estrellas. Por lo tanto, su evolución no ha sido afectada de manera importante por ese pasaje. Las galaxias que dejaron de formar estrellas antes de abandonar el cúmulo, en cambio, llegan a regiones más centrales del cúmulo y, por lo tanto, sufren muchas más interacciones que afectan su evolución. Solo una pequeña fracción deja de formar estrellas mientras está dentro del cúmulo. Por otro lado, en aquellas galaxias que dejan de formar estrellas antes de ingresar, el pasaje por el interior del cúmulo no las afecta significativamente.

"*El resultado global del trabajo es que, a pesar de que los cúmulos son de los ambientes más extremos donde puede estar una galaxia, una sola pasada por estas estructuras no va a producir grandes efectos en la gran mayoría de ellas. El factor fundamental es qué tan cerca del centro del cúmulo pasan. Eso es lo que más las altera*", resume Julián Martínez. A lo que Valeria agrega: "*Sin embargo, mucho tiempo después de haber salido del cúmulo seguirán sintiendo su efecto*". Mientras que Hernán Muriel concluye: "*Los entornos de los cúmulos son ambientes interesantes porque allí se encuentran objetos con historias muy diversas. En este trabajo, pudimos avanzar y, mediante simulaciones, explicar detalles de estas galaxias que ingresan y salen de los cúmulos. Esto nos da información sobre una población que no podemos identificar fácilmente en observaciones*".

Luego de los resultados encontrados, el equipo está trabajando en poder ampliar su estudio y obtener más detalles sobre la evolución de estas galaxias y otras con historias similares, y extender el estudio a sistemas de galaxias menos numerosos que los cúmulos, para seguir brindando explicaciones acerca de los procesos que conducen las transformaciones de las galaxias en diferentes entornos. ■

Publicación científica

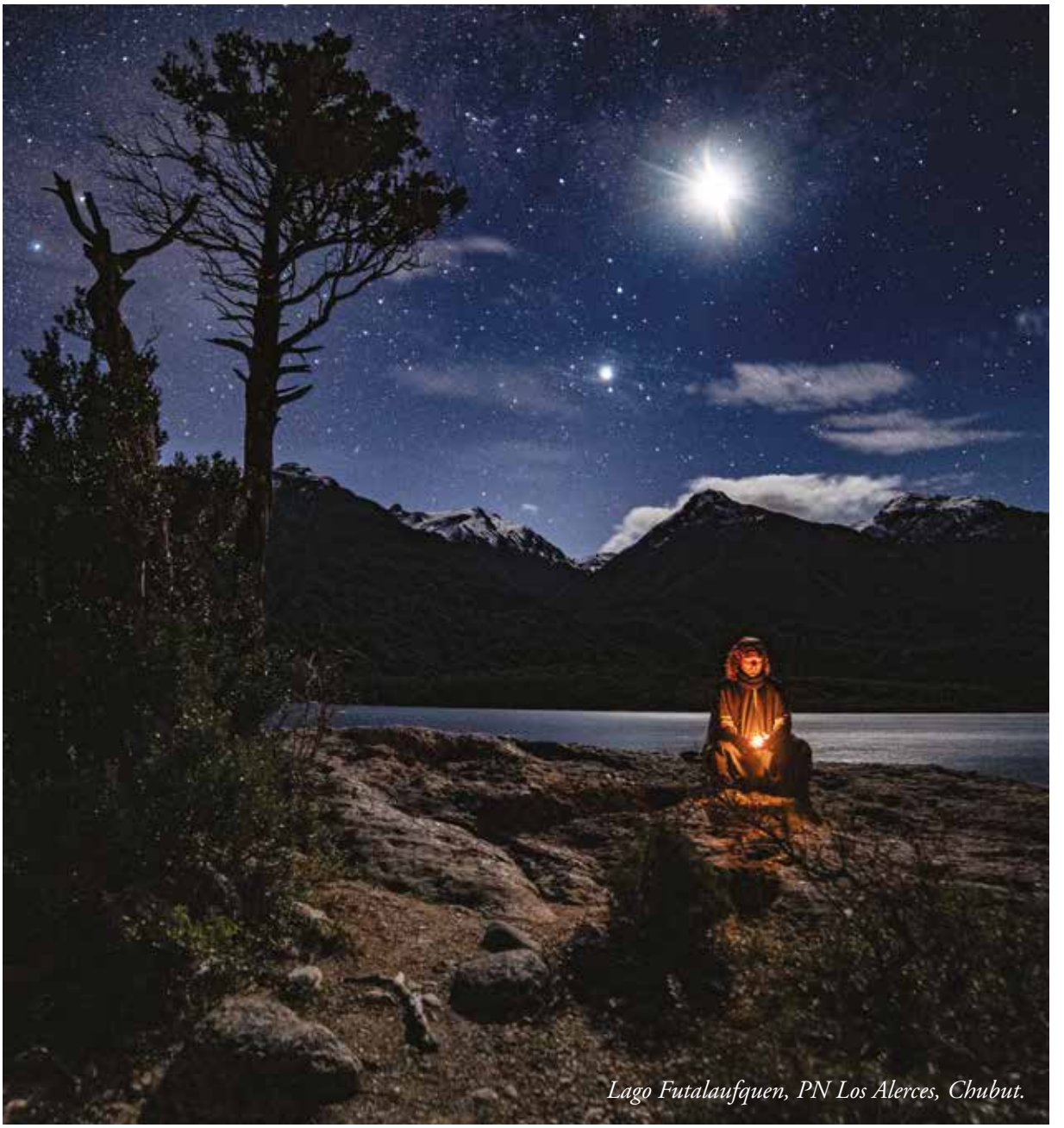
Backsplash galaxies and their impact on galaxy evolution: a three stage, four-type perspective. Autores: Andrés Nicolás Ruiz, Héctor Julián Martínez, Valeria Coenda y Hernán Muriel (IATE, CONICET/UNC), Sofía Cora (Instituto de Astrofísica de La Plata), Martín de los Ríos (Universidad Autónoma de Madrid, España), Cristian Vega-Martínez (Universidad de La Serena, Chile).

En estas páginas compartimos 11 imágenes espectaculares (a las que se suma la foto de la página 5) de paisajes terrestres enmarcados con paisajes celestes. Todas fueron realizadas en lugares reconocibles de nuestro país, en diferentes provincias, por astrofotógrafas argentinas. Seguramente, cada imagen inspire a viajar para disfrutar tanto del lugar como del cielo nocturno.

Melisa Quintero

Laguna Torre, PN Los Glaciares, Santa Cruz.

Paula Hazembiler



Lago Futalaufquen, PN Los Alerces, Chubut.

Cyntia Olivera

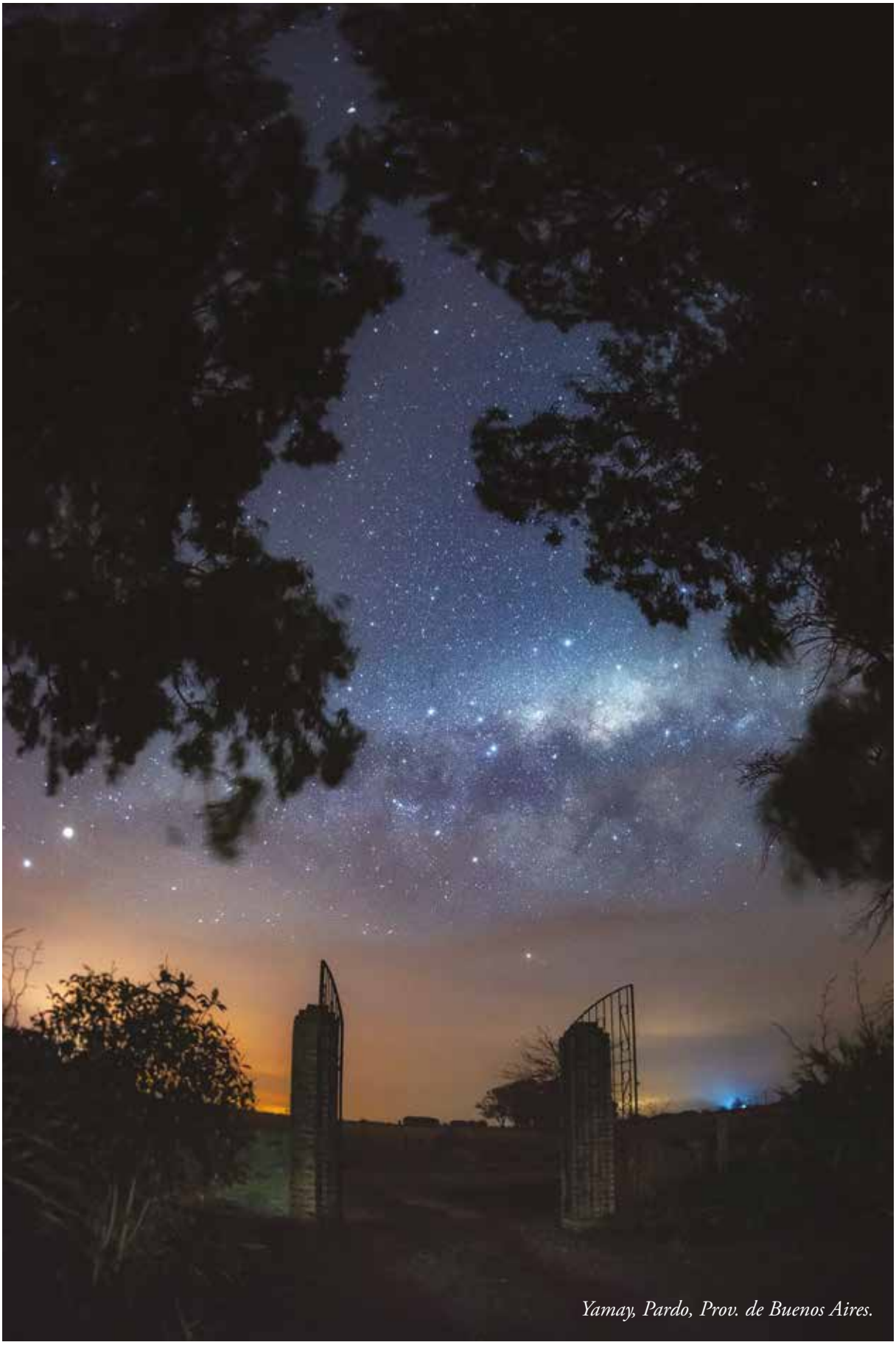
Departamento San Martín, Santiago del Estero.

María Paula Pia

Yamay, Pardo, Prov. de Buenos Aires.

Alejandra Brusadin

Laguna Iberá, Corrientes.



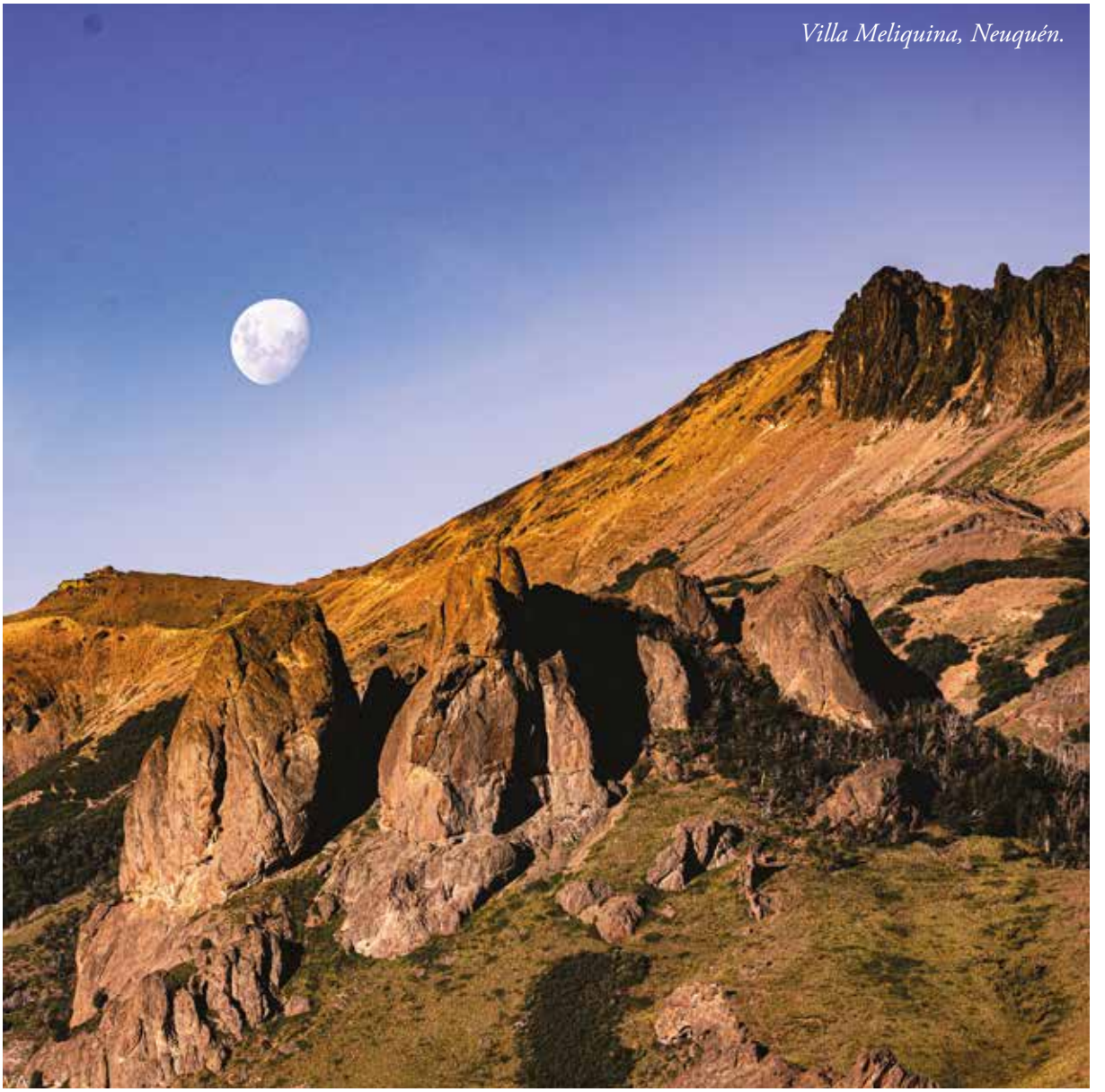
Andrea Anfossi

Yamay, Pardo, Prov. de Buenos Aires.

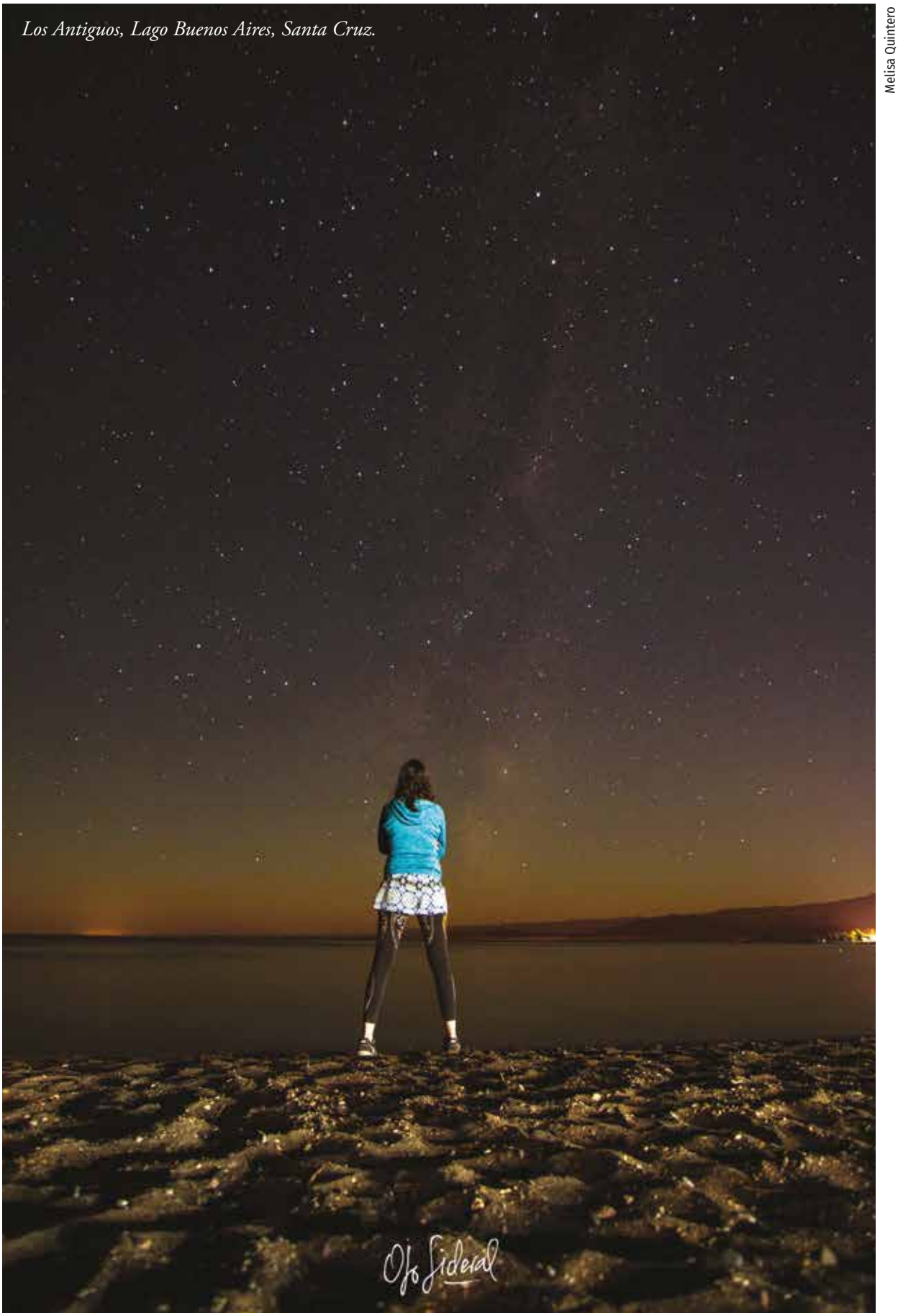
Alejandra Brusadin

Bañado La Estrella, Formosa.

Andrea Anfossi



Villa Meliquina, Neuquén.



Los Antiguos, Lago Buenos Aires, Santa Cruz.

Melisa Quintero

Melisa Quintero

Villa Las Cuevas, Mendoza.

Paula Hazembiler

Área Natural Protegida Piedra Parada, Chubut.

El universo nos une

CLUB DEL COSMOS

Discord

Si tenés entre 15 y 20 años, te interesa el espacio, te gusta la ciencia, te apasiona la astronomía y te fascina la astronáutica ¡Este lugar es para vos!

Inscribite con el código QR

LAS ADMINISTRADORAS

SOL

MILI

ROCÍO

PLANETARIO

Galileo Galilei · Buenos Aires

ARGENTINA MIRA EL CIELO

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

Exposición de Astrofotografía

ASTROFOTO: GONZALO SANTILE

PLANETARIO
Galileo Galilei · Buenos Aires