

Hervé Dole

El lado oscuro del universo

Prefacio de Pierre Léna,
miembro de la Académie des sciences

Con la colaboración de Ludovic Ligoit
Traducción de Miguel Paredes Larrucea



Alianza editorial
El libro de bolsillo

Título original: *Le côté obscur de l'univers*

Diseño de colección: Estrada Design
Diseño de cubierta: Manuel Estrada
Ilustración de cubierta: © ACIonline/Bridgeman
Selección de imagen: Carlos Caranci Sáez

Reservados todos los derechos. El contenido de esta obra está protegido por la Ley, que establece penas de prisión y/o multas, además de las correspondientes indemnizaciones por daños y perjuicios, para quienes reprodujeran, plagiaran, distribuyeren o comunicaren públicamente, en todo o en parte, una obra literaria, artística o científica, o su transformación, interpretación o ejecución artística fijada en cualquier tipo de soporte o comunicada a través de cualquier medio, sin la preceptiva autorización.



© Dunod 2020, nueva edición, Malakoff
© de la traducción: Miguel Paredes Larrucea, 2025
© Alianza Editorial, S. A., Madrid, 2025
Calle Valentín Beato, 21
28037 Madrid
www.alianzaeditorial.es

ISBN: 978-84-1148-948-5
Depósito legal: M. 169-2025
Printed in Spain

Si quiere recibir información periódica sobre las novedades de Alianza Editorial, envíe un correo electrónico a la dirección: alianzaeditorial@anaya.es

Índice

- 11 Prefacio de Pierre Léna
- 17 Prólogo. Una aventura humana y científica

- 21 1. Primero, lo espacial
- 21 Viernes 17 de noviembre de 1995, sede de la Agencia Espacial Europea (París)
- 24 Lunes 25 de agosto de 2003, Cocoa Beach (Florida, EE UU)
- 27 Mayo de 2009, Instituto de Astrofísica Espacial (IAS)

- 38 2. Alegato en favor de la ciencia astrofísica
- 38 ¿Cuál es el enfoque científico?
- 42 La astrofísica y la cosmología ¿son ciencias?
- 48 Mi trabajo: asesino de modelos
- 51 ¿«Creer» en el Big Bang? ¡No es necesario!

- 56 3. Breve historia de la cosmología
- 57 Relatividad, expansión y materia oscura
- 60 Nucleosíntesis y radiación del universo
- 62 Las observaciones y los modelos son cada vez más precisos
- 65 La fulgurante progresión de los años noventa
- 69 Un bello comienzo de siglo
- 70 Los retos e interrogantes de hoy

- 74 4. Éxitos y problemas del modelo estándar
- 75 Historia del universo en cinco actos

82	Algunos problemas irritantes
89	El fondo cosmológico, principal «reliquia de luz»
90	¿Qué es un cuerpo negro?
92	El fondo cosmológico, desde la superficie terrestre
94	5. La gran aventura de Planck
94	Las bases de la misión
96	Grandes retos
100	Quince años de proyecto, de proezas tecnológicas
114	Un gran número de profesiones para un amplio abanico de talentos
116	¡Llegan los datos!
120	Datos de gran calidad
122	Del fondo cosmológico a los parámetros cosmológicos
124	El universo visto por Planck
126	La red cósmica
128	Los cúmulos de galaxias
129	En la Vía Láctea
132	6. Un fondo de galaxias extrarrojo
133	Una segunda radiación de fondo
134	Composición y emisión de las galaxias
138	Una detección tardía y sorprendente
140	El exceso de emisión infrarroja
141	Una intensidad mejor medida
143	La sorprendente historia de las galaxias
145	Las fluctuaciones del fondo
146	Las otras mediciones del fondo
146	Fondo cosmológico contra fondo extragaláctico
148	Palabra de investigador: Jean-Loup Puget

- 150 7. Una materia demasiado discreta
- 152 La difícil búsqueda de una detección directa
- 153 Observaciones recientes: el efecto de lente gravitatoria
- 156 Planck desvela la materia oscura
- 157 La relación entre materia oscura y formación estelar
- 158 Perspectivas: lentes gravitatorias sobre la totalidad del cielo
- 160 8. El acelerador del universo
- 161 Una cuestión de escala... y de época cósmica
- 162 Modelizar lo desconocido: la ecuación de estado
- 163 La sorpresa de las supernovas
- 164 ¿Cómo medir los efectos de la energía oscura?
- 168 Perspectivas: correlaciones sobre la totalidad del cielo
- 169 9. Misión Euclíd: desenmascarar a los agentes oscuros
- 169 Ver claro en el sector oscuro del universo
- 171 Rastrear la materia oscura mediante lentes gravitatorias
- 172 Revelar la presencia de energía oscura gracias al *clustering*
- 173 Una majestuosa imagen de la bóveda celeste
- 173 Cámaras extraordinarias... ¡y desafíos!
- 178 El futuro: lentes gravitatorias y *clustering* en todo el cielo
- 179 Palabra de investigadora: Nabila Aghanim
- 181 10. Arrugas en el espacio-tiempo
- 181 Una doble detección histórica
- 187 Nuevo reto: las ondas gravitatorias primordiales
- 189 En busca de los modos B

193	Epílogo. De los epiciclos a Λ CDM
197	Notas
203	Referencias bibliográficas
207	Agradecimientos
209	Índice analítico

Prefacio

¿Podemos imaginar lo que sentían los primeros humanos cuando, al ponerse el sol, en días de cielo claro y luna nueva, caía la noche sobre la sabana africana donde habitaba el *Homo sapiens*? En la incipiente oscuridad iban emergiendo una a una las primeras estrellas, antes de que el cielo entero se cubriera de ellas y su lento movimiento de este a oeste fuese apagando unas para iluminar otras. ¿Tenían miedo de esta oscura y moviente claridad? ¿Les invadía el asombro, o tal vez una trémula emoción ante este espectáculo sin igual? No nos es fácil imaginar esa noche primitiva y su misterio, poblado de voces de animales que mucho más tarde encontraron su lugar en los nombres de las constelaciones. Durante miles de años, la experiencia de esta noche luminosa alimentó los sentimientos de los humanos, sus poesías y sus sueños, sus preguntas científicas y sus filosofías. Pero hoy día esta oscuridad fecunda y profunda se ha convertido por desgracia en un bien escasísimo, incluso

más escaso que el silencio. Muchos de nuestros coetáneos no han sentido nunca la noche, le tienen miedo, piden a los concejales del más pequeño pueblo de montaña o de cualquier ciudad que inunden las calles de luz artificial. Y muchos niños crecen huérfanos de esta experiencia fundamental, sin ver jamás una estrella (aparte del Sol) como no sea en las pantallas. Hemos perdido la noche, los astrónomos difícilmente la encuentran ni siquiera en las cimas de las altas montañas del desierto, mientras disipamos al espacio, en pura pérdida, los megavatios de la iluminación urbana. Pero al final, ¿por qué es negra la noche?

Este libro de Hervé Dole nos restituye el poder evocador de la oscuridad, lleva al lector a un fascinante viaje para explorar la cara oscura del universo. Partiendo de esta pregunta secular, ofrece la solución, muy reciente, del enigma, exponiendo lo esencial de la cosmología actual, es decir, de nuestra representación del universo en su totalidad —un pleonasma—. Su relato nos esclarece, y es como si quisiera ilustrar para el lector las palabras de Saint-John Perse: «Me llamaban El Oscuro y yo habitaba en la claridad...». Y he aquí que el enigma de la noche oscura, resuelto, se abre a otros enigmas fascinantes que el autor nos presenta con talento y a veces con humor: los de la materia y la energía oscuras. Así avanza la ciencia en su incesante desvelamiento de la realidad que nos rodea.

Profesor de la Universidad de París-Sur, el autor ha vivido durante mucho tiempo las preguntas de sus alumnos, sus dificultades para imaginar estos fenómenos tan lejanos en el espacio y en el tiempo. Como conferenciante, no escatima ningún esfuerzo para comunicar estos preciosos conocimientos a toda clase de públicos. Pero sobre todo, siendo

como es él mismo investigador, participante y actor en las grandes misiones espaciales de cosmología observacional como Spitzer y Planck ayer y Euclid mañana, ha construido instrumentos y preparado estas misiones, ha analizado las señales recibidas de estos observatorios y ha interpretado la valiosa información que contenían. Ha vivido, a la escala de una gran cooperación internacional, las emociones y la potencia del trabajo en equipo. Sabe compartir con el lector las esperanzas, alegrías y dificultades de su profesión, e ilustra incluso puntualmente su testimonio de la vida cotidiana con los correos electrónicos recibidos. Con él vivimos algunos momentos de las tres últimas décadas, tan fecundas, y compartimos las nuevas preguntas que plantean: lo oscuro no se deja eliminar tan fácilmente...

Hervé Dole es consciente de los límites del saber científico que es el suyo. Porque no ignora la profundidad de las cuestiones metafísicas o religiosas que puede suscitar esta contemplación científica del universo. Sabe así distinguir entre lo que es del orden de la ciencia, tratado en este libro, y lo que es del orden de la experiencia espiritual y de la búsqueda de sentido, que él respeta y que habitan, tanto como la racionalidad, en todo ser humano.

¡Cuánto más rica es una meditación sobre el universo cuando puede tener lugar en un paisaje marcado por la ciencia, y por una ciencia cuyos principios comprendemos! Astrofísico apasionado y pedagogo, Hervé Dole no cesa de proponer este paisaje, ya se trate de niños de guardería o de estudiantes de bachillerato, de astrónomos aficionados o de estudiantes de doctorado. Su sitio web bien merece una visita, ya que muestra cómo hoy en día un verdadero científico ejemplifica estas líneas escritas por Isaac Newton

a un amigo unas semanas antes de su muerte: «No sé lo que yo le pareceré al mundo, pero a mí me parece haber sido solo un niño jugando en la playa, y divirtiéndome en encontrar de vez en cuando un guijarro más liso o una concha más bella que de costumbre, mientras que el gran océano de la verdad se extendía ante mí sin descubrir».

Pierre Léna, agosto de 2017

Miembro de l'Académie des sciences

*A Aline, Caroline y Maryse, que me inspiran.
A la memoria de Bernard Dole.*

Prólogo.

Una aventura humana y científica

La idea de este libro germinó progresivamente, durante las numerosas conferencias que he dado en escuelas, universidades, asociaciones y ante públicos profanos, y gracias a los enriquecedores debates entablados a continuación. La idea se afinó en discusiones con mis alumnos de la Universidad París-Sur de Orsay, donde enseñé física y cosmología. También tuvieron algo que ver algunas de las tonterías vertidas por pseudocientíficos en los medios de comunicación. Después de pensármelo un poco y de discutirlo con colegas investigadores, se me ocurrió que la respuesta más elegante sería ponerme a escribir yo mismo, con resultados quizá menos sensacionales, pero sin duda más serios. Por último, mi participación en misiones espaciales de la NASA y la ESA, en particular la extraordinaria aventura de Planck y la de Euclid, me convenció finalmente para compartir esta emulación científica e intelectual pero también humana y técnica (aspectos estos últimos que se mencionan con menos frecuencia).

Mi ambición es por tanto contar «desde dentro» una parte de los resultados sobresalientes de la ciencia contemporánea, así como explicar algunos de los interrogantes que nos planteamos a diario. El lector encontrará en este libro un relato de experiencias personales y sensibles (como la indescriptible emoción provocada por el lanzamiento de una misión espacial en la que participé), así como elementos de respuesta a la cuestión de para qué sirve enviar satélites para observar el universo. El núcleo de mi exposición concierne a la cosmología de los siglos XX y XXI, con un foco en la misión europea Planck, que ha analizado la radiación fósil —residuo luminoso del Big Bang— con una precisión inigualada. Gracias a estas medidas, los investigadores han logrado establecer una tarjeta de identidad precisa del universo —su edad, su composición, su evolución— y han podido aclarar episodios particularmente oscuros, como la inflación cósmica o la época de la reionización.

Como astrofísico especialista en cosmología observacional he tenido la oportunidad de coordinar un grupo de unos cien investigadores (repartidos por más de diez países) para organizar el análisis de los datos de Planck relativos a las galaxias. Actualmente coordino una parte de la arquitectura del futuro análisis de datos de Euclid. Como actor y observador privilegiado de campos relacionados con los míos, he trabajado con muchos investigadores implicados en proyectos encaminados a comprender la naturaleza y la historia de nuestro universo, sus leyes fundamentales y sus constituyentes, entre ellos las enigmáticas materia y energía oscuras.

Por tanto, qué más natural que querer compartir este formidable hervidero de ideas, de tecnologías, de preguntas,

dudas y discusiones. Este compartir de conocimientos y experiencias entre los científicos y la sociedad, plasmado aquí en forma de libro, me es particularmente caro. Desde hace una veintena de años me reúno con alumnos (de primaria, secundaria o universitarios) y con el público en general con el deseo y la exigencia de transmitir y compartir nuestros conocimientos sin desnaturalizarlos y, a cambio, comprender las preguntas y el punto de vista de los ciudadanos. La ciencia y todas las demás formas de reflexión intelectual y sensible (artística, cultural, etc.) forman parte de un proceso común de interrogación sobre el mundo, sobre nuestra sociedad y sobre nosotros mismos.

Integrante actualmente del equipo de dirección de una gran universidad, participo activamente en la promoción de este diálogo entre ciencia y sociedad y en una mejor mezcla de cultura científica y cultura sin más. En el momento actual de los «hechos alternativos», cuando algunos conceden el mismo crédito a una creencia o una opinión que a hechos científicos establecidos, se trata de cruzar diversas visiones del mundo a fin de formar ciudadanos libres, críticos, realizados e independientes. Nada menos que un verdadero proyecto republicano.

Si el lector descubre aquí la cosmología, debe prepararse para un gran salto a la historia mal conocida de las concepciones del universo y a su lado oscuro, para ver los retos con que se enfrentan los investigadores en su afán por desentrañar sus misterios. Si, por el contrario, está familiarizado con ella, puede que le sorprenda la riqueza de los recientes avances. En este libro (que podría haberse titulado «52 sombras de universo con Planck», como se comprenderá en los capítulos 2 y 5), es posible que el lector desee

saltarse algunos párrafos o capítulos —independientes del resto— a partir del capítulo 6, si encuentra conceptos que le parecen demasiado difíciles, en la segunda mitad del libro. Partamos ahora juntos a descubrir el lado oscuro de nuestro universo. Aunque no habrá muchas menciones de *La guerra de las galaxias* en este libro, ¡que la fuerza os acompañe para no caer demasiado rápido en el lado oscuro!

1. Primero, lo espacial

Desde su desarrollo hasta su funcionamiento, un telescopio espacial es una aventura colectiva a largo plazo, llena de tensión y suspense. La etapa crítica del lanzamiento suscita siempre una emoción especial. Para comenzar este viaje me gustaría por tanto hablar de los tres telescopios que han marcado mi carrera y revivir sus lanzamientos. Tres... dos... uno... ¡despegue!

Viernes 17 de noviembre de 1995, sede de la Agencia Espacial Europea (París)

En el otoño de ese año empiezo un DEA en astrofísica (quinto curso universitario, equivalente al actual Máster 2) y casi todas las asignaturas me apasionan. Entre los temas de actualidad, los profesores-investigadores nos hablan del ISO (Infrared Space Observatory, Observatorio Espacial Infrarrojo), un satélite que se va a lanzar muy pronto. Desarrollado por

la Agencia Espacial Europea (ESA, European Space Agency), será el primer telescopio espacial europeo que observará en el infrarrojo (luz más allá del rojo, en este caso entre 2 y 240 micras de longitud de onda).

Este satélite promete hacer muchos descubrimientos sobre los objetos «fríos» del universo, desde el sistema solar hasta las galaxias más lejanas. Algunos de los instrumentos han sido diseñados y desarrollados en Francia, con el apoyo de la agencia espacial francesa, el CNES (Centre national d'études spatiales). Los científicos —y los franceses en particular— tienen depositadas grandes esperanzas en el ISO, porque han elaborado un ambicioso programa aprovechando al máximo el potencial excepcional de los instrumentos. La ganancia esperada con respecto a las misiones anteriores es inmensa: una resolución angular unas 100 veces mejor y una sensibilidad 1000 veces mayor.

Reunimos a un grupo de estudiantes y pedimos a los investigadores poder asistir con ellos al lanzamiento del ingenio, retransmitido en directo en la sede de la ESA. La petición es rápidamente aceptada y nuestros nombres son añadidos a la lista de invitados. Así, en una fría tarde de noviembre, hemos aquí, pasada la medianoche, esperando en un café parisino. Por fin entramos en la Agencia, un lugar mágico a nuestros ojos.

Muy intimidados, ocupamos nuestros asientos y escuchamos con atención la información técnica procedente del Centro Espacial Guayanés (CSG) en Kourou. En el rostro de nuestros profesores y del público vemos reflejada la tensión y la importancia de lo que está en juego, que evidentemente la jerga técnica no deja entrever. En la punta de la lanzadera Ariane 4 hay unos quince años de trabajo

tecnológico y científico de primer orden, y este vuelo (el V80) va a decidir todo lo que sigue... Esta experiencia única, con sabor a formación acelerada, dejó en mí una impresión duradera.

Son ahora las 2 de la mañana y la cuenta atrás comienza con normalidad. Hacia las 2:20 h, el DDO (director de operaciones) canta los últimos segundos en un silencio y una tensión inolvidables. *Cinco... cuatro... tres... dos... uno... ¡cero!* Se encienden los cuatro motores Vulcain de la primera etapa, seguidos cuatro segundos más tarde por los cuatro cohetes aceleradores sólidos, que producen un intenso fogonazo de luz. El cohete asciende en el cielo nocturno guayanés. Todo transcurre de acuerdo con lo previsto: la potencia, la trayectoria, el encendido de la segunda y la tercera etapa, la separación de los elementos. Alrededor de 20 (muy largos) minutos después del despegue tenemos la confirmación de que ISO se ha separado de la tercera etapa: ¡lanzamiento con éxito!

Los aplausos se funden con el alivio; la sala, que había estado como congelada durante casi media hora, revive: ¡qué contraste! Sigue habiendo cierta tensión, porque si bien el lanzamiento es esencial para el éxito de una misión, quedan otras etapas: hay que examinar el satélite para asegurarse de que funciona correctamente. Primera fase crucial: la apertura de las válvulas criogénicas del ISO, antes de verificar y probar sus cuatro instrumentos científicos. El satélite está equipado con una tecnología única de refrigeración criogénica (a temperaturas ultrabajas) del telescopio y de sus instrumentos: el helio líquido superfluido los mantiene a $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$, es decir 4 K (4 grados por encima del cero absoluto).

Esta noche en la ESA se sella mi destino. Al llegar a mi último año de universidad (antes del «santo grial» de financiar una tesis doctoral para seguir investigando) tengo ya un objetivo: participar en estos proyectos colectivos, las misiones espaciales que están revolucionando nuestra visión del mundo, vibrar por estos momentos de intensidad única. Aquella noche, un modesto estudiante decide hacer todo lo posible para trabajar en los datos de ISO...

La historia tiene una bella continuación. El satélite ha funcionado perfectamente, muy por encima de lo esperado: 28 meses en lugar de los 18 previstos. A pesar de unos estudios universitarios lejos de ser brillantes, terminé primero en el DEA, lo que me permitió formar parte del equipo de doctorado de Richard Gispert y Jean-Loup Puget en Orsay, donde trabajé entre otras cosas en ISO (y un poco ya en el proyecto del satélite Planck).

Lunes 25 de agosto de 2003, Cocoa Beach
(Florida, EE UU)

La tesis queda ya lejos. Desde hace casi tres años trabajo en la Universidad de Arizona en el sucesor de ISO, una misión de la NASA llamada SIRTf (Space Infrared Telescope Facility). El instrumento es más grande, sus detectores más amplios y sensibles, y dispone de un sistema criogénico más potente que llega hasta 1,6 K. Muy implicado en el equipo de los profesores George y Marcia Rieke, que idearon una de las cámaras de infrarrojos (MIPS, la más innovadora de aquella época), me ocupo de una parte del tratamiento automatizado de datos, y sobre todo de las así

llamadas observaciones «profundas» del cielo. Los objetivos son descubrir nuevas galaxias lejanas y comprender mejor la formación de las estrellas y galaxias.

Tras varios aplazamientos del lanzamiento de SIRTf (uno de ellos nos costó el sitio en la punta de la lanzadera, en beneficio del Mars Exploration Rover), hemos aquí en Florida hacia finales de agosto para el tan esperado acontecimiento. Todo el equipo se aloja en un hotel de Cocoa Beach, a varios kilómetros de Cabo Cañaveral, el lugar del lanzamiento; desde el último piso se ve a lo lejos «nuestro» cohete.

Durante el día visitamos el mítico Kennedy Space Center. Me acuerdo de otra visita en Florida —estado conservador del sur— donde encontré un edificante mensaje que una iglesia había puesto al borde de la carretera: «*Big Bang theory? You must be kidding!*» (¿La teoría del Big Bang? Estás de broma, ¿no?). Es justamente para evitar estas amalgamas y oposiciones estériles y difundir la cultura (en sentido amplio) por lo que se esfuerzan muchos científicos y por lo que las misiones espaciales van acompañadas de ambiciosos programas de difusión de los conocimientos y de comunicación científica.

La tarde de marras nos reunimos en un restaurante. El ambiente es pesado, porque el lanzamiento de esa noche, previsto para la 1:30 h aproximadamente, es tan temido como esperado. Trabajo en esta misión desde hace tres años, pero hay colegas que le han dedicado veinte. Afortunadamente, George Rieke y otros saben distender el ambiente... La tarde es larga pero dulce, la temperatura estival y el cielo despejado, con algunas nubes. Para el lanzamiento hemos decidido no estar en el sitio oficial, sino quedarnos todo el equipo en la bella playa de Cocoa Beach, a algo más de 5,5 kilómetros. Tras un chaparrón que hace temer un