



PUBLICACIONES INSTITUCIONALES

A la luz del conocimiento

**Exposición bibliográfica
sobre la luz
y sus aplicaciones**

**MARÍA LUISA REMÓN LÓPEZ
SILVIA MOLERO AVILÉS
(Coord.^{as})**



SERIE TEXTOS / 15

A la luz del conocimiento

Exposición bibliográfica
sobre la luz y sus aplicaciones

A la luz del conocimiento

Exposición bibliográfica sobre la luz y sus aplicaciones

COORDINADORAS
María Luisa Remón López
Silvia Molero Avilés

SERVICIO DE PUBLICACIONES
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA, 2015

Colección:
PUBLICACIONES INSTITUCIONALES

Serie:
TEXTOS/15

Edita:
Servicio de Publicaciones
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA
Campus Central
38200 La Laguna. Santa Cruz de Tenerife
Teléfono: +34 922 319 198

Diseño editorial:
Jaime H. Vera
Javier Torres. Cristóbal Ruiz

1.^a edición: 2015

*Prohibida la reproducción total o parcial
de esta obra sin permiso del editor*

EQUIPO ACADÉMICO
Facultad de Ciencias. Sección de Física
Adrián Arbelo Hernández
Cecilio Hernández Rodríguez
Pamela Pineda Domínguez
Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología. Sección de Ingeniería Industrial
Benjamín González Díaz
Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC)
María Jesús Arévalo Morales
Ramón García López
Francisco Garzón López
Ricardo T. Génova Santos
Artemio Herrero Davó
Antonio Mampaso
Ismael Pérez Fournón
Alfred Rosenberg González

EQUIPO BIBLIOTECARIO
María Luisa Remón López y Silvia Molero Avilés (coordinadoras)
Delfina Galván Alonso
Ismael García Pérez
Sonia García Yáñez
Camir Gómez Pablos
Ana Inés Martín Trujillo
María Luisa Morales Ayala
Fátima Sainz Sainz

COLABORACIÓN
Unidad de Comunicación y Cultura Científica (UC3) del Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC)

Maquetación y preimpresión:
SERVICIO DE PUBLICACIONES

Prólogo.....	11
--------------	----

ARTÍCULOS

ACERCA DE LAS TEORÍAS SOBRE LA NATURALEZA DE LA LUZ.....	17
LA LUZ Y LAS ENERGÍAS RENOVABLES.....	41
LA LUZ Y LA ASTROFÍSICA.....	49
INTRODUCCIÓN.....	51
ASTROFÍSICA EN RAYOS GAMMA: LA VENTANA AL UNIVERSO MÁS VIOLENTO.....	53
ASTROFÍSICA EN RAYOS X: DESCIFRANDO LO INVISIBLE.....	59
LUZ ULTRAVIOLETA UNA EXTENSIÓN RECIENTE DE LA ASTROFÍSICA.....	63
La ASTROFÍSICA EN LUZ VISIBLE.....	69
LA ASTROFÍSICA EN LUZ INFRARROJA.....	73
EL FONDO CÓSMICO DE MICROONDAS.....	77
LA RADIOASTRONOMÍA.....	83
CATÁLOGO.....	87

A LA LUZ DEL CONOCIMIENTO

Exposición bibliográfica
sobre la luz y sus aplicaciones

23 de abril
Día del libro

ULL | Universidad
de La Laguna

PRÓLOGO

Un año más la Biblioteca de la Universidad de La Laguna se apresta a la organización de los actos conmemorativos del Día del Libro, siendo, en esta ocasión, su personal de las Secciones de Física y Matemáticas el encargado de coordinar el acontecimiento.

Con un esquema organizativo que se ha consolidado tras las magníficas experiencias previas, sus hitos más relevantes vienen a ser la exposición bibliográfica y de piezas museísticas relacionadas con el objeto del evento, así como la publicación monográfica en la que participan relevantes especialistas en la materia correspondiente. El concurso fotográfico y las charlas impartidas por nuestro personal docente o por miembros de instituciones de reconocido prestigio, junto con otras actividades de distinta índole, dan forma a estas jornadas, que suponen uno de los retos anuales más ilusionantes para quienes trabajamos en la Biblioteca.

Como cada año, una de las cuestiones más complicadas de dilucidar ha sido la temática del evento. No suele ser fácil encontrar un hilo conductor que sirva de pretexto para dar a conocer algunas de las joyas bibliográficas de que dispone nuestra biblioteca universitaria, a la vez que se enaltece la figura del libro como vehículo de transmisión de conocimiento, de formación y, por qué no, de entretenimiento.

Y por esas coincidencias que a veces se producen, el 2015 ha sido declarado por la ONU Año Internacional de la Luz y de las Tecnologías Basadas en la Luz, en reconocimiento a la importancia que tienen en la vida de la ciudadanía, en el desarrollo de la sociedad y en los retos a los que se enfrenta la humanidad. La efeméride vino pintiparada para el centro de física y matemáticas, que encontró en la Luz, con mayúsculas, el motivo idóneo para echar a andar el proyecto, en una carrera contra el tiempo que suele ser habitual en la organización del Día del Libro.

Difícilmente encontraremos otro agente físico que esté tan presente en los distintos aspectos de la vida y de la naturaleza. Las ciencias, la fotografía, la pintura, la religión, la poesía o las cuestiones más cotidianas de nuestra rutina diaria tienen a la luz como motivo de estudio, como *conditio sine qua non*, como referente espiritual o como simple necesidad existencial. Esa trascendencia se plasma en una producción bibliográfica descomunal, de la que nuestra biblioteca universitaria posee una muestra representativa, complicando el enfoque temático

y la subsiguiente elección de los títulos, y abocando a una visión necesariamente parcial y sin pretensiones de exhaustividad.

De este amplio abanico de posibilidades que ofrecía la luz como tema y, como no podía ser de otra manera, teniendo en cuenta la entidad organizadora, se optó por abordarlo desde la perspectiva de las ciencias físicas y de una de sus especialidades: la astrofísica.

El título de la exposición, «A la luz del conocimiento», alude, en su vertiente inmediata, a todas aquellas publicaciones relevantes en las que se han plasmado tanto las teorías y las ideas pioneras, que han propiciado el conocimiento físico de la luz desde sus remotos inicios en la antigua Grecia, como su aplicación más tecnológica, que se ha materializado en los sucesivos avances para contribuir a la mejora del nivel de vida de la sociedad. Una muestra mínima, aunque ilustrativa de estas obras escritas, constituye el núcleo expositivo que aquí presentamos.

Pero con la elección del título también se pretende superar este objetivo específico, para evocar la importancia del conocimiento y su transmisión en el más amplio sentido del concepto. A lo largo de la historia, el compendio de los saberes de la humanidad se ha grabado en los libros: unidades básicas de conocimiento, que han «iluminado» el camino hacia el progreso y la civilización, convertidos hoy en una «especie en peligro de extinción», preservada gracias a la profesión bibliotecaria.

Incluso acotado al campo de las Ciencias Físicas, el tema de la luz daba para mucho, por lo que fue necesario realizar un nuevo esfuerzo de criba que perfiló una exposición articulada en tres unidades temáticas individualizadas:

- Historia de las teorías sobre la naturaleza de la luz.
- Tecnologías asociadas a la luz (óptica, láser y energías renovables).
- Astrofísica.

El esquema de cada una de las unidades temáticas es siempre el mismo. Por un lado, el repertorio de publicaciones minuciosamente seleccionadas, que pueden entenderse como hitos bibliográficos de mayor o menor repercusión respecto al área de conocimiento de que trata cada unidad temática. En algunos casos destacan por su importancia en el devenir de la historia de la ciencia, en una época en la que el progreso científico era fruto del afán innovador de mentes privilegiadas e inquietas como la de I. Newton o R. Descartes.

Otras veces se trata de publicaciones modernas, obras representativas de las aplicaciones de la luz, como el láser, la óptica o el desarrollo de las energías limpias y renovables; y, por supuesto, el amplio repertorio bibliográfico de que dispone nuestra Universidad en relación con la investigación en el ámbito de la Astrofísica y el estudio del cosmos.

La colección bibliográfica es interpretada a través de paneles expositivos, que facilitan su comprensión y sirven de marco explicativo genérico a la unidad temática y al valor de las obras escogidas. En su diseño aparece la mano maestra

de Ismael A. García Pérez, colaborador indispensable para el éxito alcanzado en las ediciones de años anteriores.

El discurso expositivo se completa con una serie de objetos relacionados con la historia de la óptica y la astronomía, que ambientan y proporcionan cohesión a cada una de las unidades temáticas. Se trata de piezas, algunas de ellas excepcionales, que conforman el reflejo material de las distintas etapas en esa fantástica carrera por la búsqueda del conocimiento científico y el avance tecnológico.

Los objetos han sido cedidos a título de préstamo temporal por parte del Museo de la Ciencia y el Cosmos, adscrito al Organismo Autónomo de Museos y Centros del Cabildo Insular de Tenerife, así como del Instituto de Enseñanza Secundaria Canarias Cabrera Pinto, cuya colección museística es un referente en la isla por la singularidad de sus fondos. No tenemos más que palabras de agradecimiento para la directiva de cada una de estas entidades —Antonio Mampaso y M.^a Jesús Rodríguez Fragoso, respectivamente—, que se pusieron a disposición del proyecto desde el primer momento y que, junto con los profesores Santiago Orduña y Fernando Díaz, han contribuido a que la exposición se enriquezca gracias a sus consejos y sugerencias.

La primera de las unidades temáticas, «Historia de las teorías sobre la naturaleza de la luz», realiza un recorrido sumario por el proceso de teorización del origen y caracterización física de la energía lumínica. Se inicia con las formulaciones que sobre este concepto realizaron los antiguos filósofos griegos en el siglo v a. C., enlazando con la teoría corpuscular, enunciada por I. Newton en 1671. A partir del siglo XIX cobra fuerza la teoría ondulatoria promovida por J. Maxwell (1864) y desarrollada por M. Planck (1900), A. Einstein (1905) y L.-V. de Broglie (1925), con el que se unifican ambas teorías dando origen a una nueva disciplina científica: la mecánica cuántica.

En su vitrina correspondiente se exhiben libros pertenecientes al Fondo Antiguo de la Biblioteca Universitaria, entre los que destacan el incunable *De proprietatibus rerum* (el libro de las propiedades de las cosas), de B. Anglicus (1494), y que se presenta como una de las enciclopedias más difundidas en la Europa medieval.

Mención especial merece la edición príncipe de la *Encyclopédie Française* de D. Diderot y D'Alembert (*Encyclopédie, ou Dictionnaire Raisonné des Sciences, des Arts et des Métiers*), publicada entre 1751 y 1780. Entre sus 17 volúmenes de texto y sus 11 volúmenes de planchas hay entradas dedicadas al tema de la luz, así como hermosos grabados sobre óptica y astronomía, algunos de los cuales forman parte de la exposición.

Otra de las joyas bibliográficas seleccionadas es el *Optices sive de reflexionibus, refractionibus, inflexionibus et coloribus lucis*: libre tres, obra de I. Newton, escrita en 1719 y en la que expone su teoría corpuscular de la luz, frente a la teoría ondulatoria postulada por C. Huygens.

El repertorio bibliográfico de esta primera unidad temática se completa con varias reproducciones facsímiles o reediciones de obras clásicas que se han ocupado del tema de la luz: especial mención merece uno de los precursores en

los estudios sobre óptica y padre del método científico: el árabe Ibn-Al-Haytham, más conocido como Alhazen, que vivió entre finales del siglo x y principios del xi. De crucial importancia es *La Dióptrica*, de R. Descartes, en la que aparece por vez primera su célebre ley sobre la refracción de la luz; y las obras escritas por genios científicos de su tiempo, como el citado C. Huygens, L-V. de Broglie o J. Maxwell.

Entre los objetos materiales que ultiman el discurso expositivo, todos ellos cedidos por el IES Canarias Cabrera Pinto, sobresalen el aparato de Silbermann, utilizado en el siglo xix para verificar las leyes de la reflexión y la refracción de la luz; o un disco ideado por Newton en el siglo xvii, con el que el científico demostró que la luz blanca era una mezcla de todos los colores; así como un microscopio óptico que fue diseñado en el siglo xvii por el científico holandés A. V. Leeuwenhoek.

La segunda de las unidades temáticas hace referencia a las tecnologías asociadas a la luz, un aspecto muy vinculado al *leitmotiv* que ha guiado el eje central de la exposición. Como ha reconocido la ONU en su resolución para proclamar 2015 como Año Internacional de la Luz, las aplicaciones de la ciencia y la tecnología de la luz han sido esenciales en los avances alcanzados —y los que están por venir— en campos tan variados como la medicina, la energía, la información y las comunicaciones, la fibra óptica, la agricultura, la astronomía o, incluso, el ocio, el arte y la cultura. Han contribuido a aumentar la salud y el bienestar de la sociedad, así como en el logro de una mayor eficiencia energética, limitando el despilfarro actual de energía.

Es evidente que la variedad de posibilidades expositivas que ofrece un tema como el que nos ocupa no puede ser abarcada por la modestia de nuestro proyecto. El panel expositivo esboza la idea general del impacto global de estas tecnologías vinculadas a la luz, a tenor de la creciente demanda de energía a escala mundial, lo que ha provocado la imperiosa necesidad de buscar alternativas energéticas. Se repasan las distintas fuentes de energía renovables, incluyendo algunas menos conocidas, como la undimotriz o la geotérmica, y se valora su utilidad práctica en el mundo contemporáneo.

Una de las tecnologías más importantes basadas en la luz, el láser, también tiene su lugar en la exposición. Se pretende destacar el gran impacto que el desarrollo de las fuentes de luz láser tiene en nuestra sociedad, con aplicaciones industriales, biomédicas y en telecomunicaciones que han permitido, entre otras cosas, el desarrollo de internet.

El discurso se acompaña de una selección de obras modernas, tanto en el estudio de temas clásicos, como la óptica o la tecnología láser y también en los últimos avances en el sector de las energías renovables. Los objetos ilustrativos de estas tecnologías comprenden desde un sencillo DVD a un cable de fibra óptica o un pequeño panel solar.

La última de las unidades temáticas hace referencia al vínculo entre la luz y la astrofísica. Nuestro conocimiento acerca del universo y el desarrollo de la ciencia astronómica han sido posibles gracias a la luz. Desde que Galileo dirigiera al cielo su rudimentario telescopio y descubriera evidencias que apoyaban las ideas coper-

nicanas del movimiento de la Tierra alrededor del Sol, los avances tecnológicos para escudriñar el cosmos han sido extraordinarios.

En nuestro archipiélago contamos con una de las entidades punteras vinculadas a este desarrollo tecnológico: el Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC). Su campo de actuación comprende el diseño y construcción de instrumentos ópticos, como filtros, fotómetros, espectroscopios y detectores, para los telescopios de los Observatorios del Teide (Tenerife) y del Roque de los Muchachos (La Palma), entre ellos el Gran Telescopio (GTC), uno de los más avanzados del mundo, y el mayor de los óptico-infrarrojo en el momento actual. Se da la circunstancia de que este año también se celebra el 30 aniversario de la inauguración oficial de los observatorios de Canarias y de la sede central del IAC en La Laguna.

Se ha optado por elegir una bibliografía diversa, entre la que destacan las extraordinarias imágenes del Fondo Antiguo, en contraste con las imágenes de alta resolución de los actuales atlas de estrellas o las de nebulosas galácticas incluidas en la publicación del Instituto de Astrofísica de Canarias: *The IAC morphological catalog of northern galactic planetary nebulae*.

Entre los objetos asociados, es notable el aparato de M. Girod, del siglo XIX, cedido por el IES Canarias Cabrera Pinto y empleado para la enseñanza de la cosmografía. El IAC, junto al Departamento de Astrofísica de la Universidad de La Laguna, aporta un telescopio, así como diversos objetos que muestran la evolución técnica de los detectores de luz: placa fotográfica, fotómetro, filtros, cámara ccd...

El Museo de la Ciencia y el Cosmos, por último, ha prestado dos piezas muy diferentes: un módulo interactivo, conocido como «La pesadilla del astrónomo» y construido por el propio museo para mostrar de manera didáctica por qué titilan las estrellas; junto a otra pieza que reproduce el astrolabio o azafea de Azarquiel. Se trata de un facsímil del original construido en Murcia en 1252 por este astrónomo árabe, que se conserva en la Real Academia de Ciencias y Artes de Barcelona. Esta reproducción fue fabricada en 1985 con motivo de la inauguración del Instituto de Astrofísica de Canarias. Se trata de una calculadora analógica que permitía múltiples funciones astronómicas y matemáticas, esenciales para el desarrollo de la navegación desde finales de la Edad Media.

El segundo componente de los actos del Día del Libro está representado por la publicación que estas líneas prologan. Su contenido es el resultado de la implicación y buen hacer del personal docente e investigador y el alumnado de nuestra Universidad, que se han prestado a plasmar por escrito artículos de carácter divulgativo de su especialidad.

La colaboración de Pamela Pineda, Adrián Arbelo, Cecilio Hernández, Benjamín J. González, Ramón García, M.^a Jesús Arévalo Morales, John E. Beckman, Ramón J. García López, Francisco Garzón López, Ricardo T. Génova Santos, Artemio Herrero Davó, Ismael Pérez Fournón y Alfred Rosenberg González contribuye a enriquecer este evento. Sólo ya por el gesto, la voluntad y la participación en el mismo creemos que son merecedores de nuestro más profundo agradecimiento.

Esta gratitud que se hace extensiva a todas aquellas personas que, de forma desinteresada, participarán en los actos del Día del Libro o que, con su ayuda, consejo y asesoramiento, han contribuido a que todo esto vea la luz, nunca mejor dicho. En primer lugar, agradecer al profesorado y personal técnico que impartirá las charlas que completan la programación: los profesores Jorge Méndez y Antonio Eff-Darwich, así como Ana Delgado (Fundación Canaria Orotava de Historia de la Ciencia) y Érica Pérez y Adal Pío Pérez (Instituto Tecnológico de Energías Renovables).

Tampoco podemos olvidarnos del profesorado de la Facultad de Física que, de una u otra forma, se ha implicado en el proyecto: Antonio Aparicio, Fernando Lahoz, Isabel T. Martín, Teodoro Roca, M.^a de la Peña Fabiani, Vicente Rodríguez, Inocencio Martín, Santiago Brouard y Justo Pérez Cruz.

Esencial ha sido la participación del Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC), con un protagonismo destacado a la hora de dotar de contenido a la exposición, así como por su participación en esta publicación. Nuestro agradecimiento especial a la Unidad de Comunicación y Cultura Científica (UC3) del Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC) y a las siguientes personas: Laura Calero, Inés Bonet, Alfred Rosenberg, Carmen del Puerto, José Manuel Rodríguez, Alejandro Rodríguez, Monique Gómez y Mar Pérez.

Por último, la colaboración y el apoyo de nuestras compañeras de la biblioteca universitaria ha sido decisivo y, en buena parte, es gracias a todas ellas que hemos llegado a buen puerto en esta aventura: M.^a Luisa Morales, Camir Gómez, Delfina Galván, Ana Inés Martín, Sonia García, Fátima Sainz, Gladys Sanabria, Paqui Rivero, Liti García-Ramos y Conchi González.

Y para terminar, nos queda por apuntar el deseo de que cuando estas líneas vean la luz, justo antes de la inauguración de la exposición y la conmemoración de un día tan señalado como el 23 de abril, que evoca figuras sublimes de la literatura como Cervantes, Shakespeare o el Inca Garcilaso de la Vega, el resultado sea del agrado del público. Los esfuerzos y desvelos de la comisión organizadora de estos actos agradecerán el elogio formal y protocolario, pero más aún el reconocimiento íntimo y no declarado de quienes hayan sentido un ápice de interés por lo exhibido.

María Luisa REMÓN LÓPEZ

Silvia MOLERO AVILÉS

Coordinadoras de la exposición del Día del Libro 2015

ACERCA DE LAS TEORÍAS
SOBRE LA NATURALEZA DE LA LUZ

Pamela Pineda Domínguez, Adrián Arbelo Hernández¹,
Cecilio Hernández Rodríguez²

La luz, fuente de vida y bienestar, a la que dedicamos este artículo para divulgar las teorías acerca de su naturaleza, a través de sus protagonistas principales. Este año 2015 es declarado como Año Internacional de la Luz y de las Tecnologías Basadas en la Luz por la Asamblea General de las Naciones Unidas en su LXVIII sesión, en 2013. El 2015 coincide con una serie de efemérides y eventos científicos importantes, como los 100 años del desarrollo de la relatividad por parte de Einstein y los 50 años del desarrollo de las primeras fibras ópticas.

Sirvan estas páginas para ilustrar los acontecimientos históricos principales de las teorías acerca de la luz y que su lectura nos alumbre y nos guíe en nuevos conocimientos que sirvan para que sigamos siendo humanos.

INTRODUCCIÓN

Una de las ramas más antiguas de la física es la óptica, ciencia de la luz, que comienza cuando el hombre trata de explicar su naturaleza y la relaciona con el fenómeno de la visión. Podemos afirmar que las teorías que han caracterizado la naturaleza de la luz desde hace más de 3.000 años son seis: la teoría táctil, la teoría de emisión, la teoría corpuscular, la teoría ondulatoria, la teoría electromagnética y la teoría cuántica.

Este artículo lo hemos dividido en dos apartados, el primero describe las teorías iniciales sobre la naturaleza de la luz, desde los griegos (450 a. C.) hasta la teoría corpuscular de Newton (1671). Con Galileo, en la primera mitad del siglo XVII, es cuando definitivamente la física encuentra su actual método de trabajo, apoyándose en la experimentación y en la matemática, y se separa de la filosofía comenzando a caminar por cuenta propia. El segundo apartado describe las teorías

¹ Alumnado de Física de la ULL.

² Profesor del área de Física Aplicada de la ULL.



Figura 1.

de la luz, desde el modelo corpuscular de Newton, vigente durante un siglo, pese a la teoría ondulatoria propuesta por Huygens (1678), la cual no pudo progresar hasta el primer cuarto de siglo XIX, cuando se explicaron muchos fenómenos que no podía demostrar la teoría corpuscular de Newton como las interferencias, la difracción o la polarización. Finalmente, Maxwell (1864) confirma la teoría ondulatoria al descubrir que la luz eran ondas electromagnéticas. Otros fenómenos como la radiación del cuerpo negro, el efecto fotoeléctrico o los espectros atómicos no se justificaban con la teoría ondulatoria, pero Planck (1900) y Einstein (1905) dan respuesta a éstos mediante el modelo cuántico, donde la luz estaba compuesta por corpúsculos energéticos llamados fotones.

Esta «convivencia» de las teorías ondulatoria y corpuscular, que explicaban los fenómenos físicos macroscópicos de propagación de la luz y microscópicos de emisión y absorción de la luz, respectivamente, no era de mucho agrado para la ciencia hasta que en el año 1925 De Broglie supuso que todo corpúsculo viene regido por una onda asociada, cuya confirmación experimental dio lugar a una nueva ciencia, la mecánica cuántica que es el final de este artículo y el comienzo de una nueva era en la física moderna, que tal vez describiremos en próximas ediciones.

1. LOS ORÍGENES: DESDE LOS GRIEGOS A NEWTON

Desde la Antigüedad hasta nuestros días, la naturaleza de la luz es objeto del pensamiento humano, desde muchos puntos de vista: filosófico, artístico y por supuesto científico, como fuente de vida y bienestar. Los orígenes de estas teorías se deben a dos escuelas: la atomista y la pitagórica.

Los atomistas fueron los primeros en interpretar la naturaleza de la luz, sobre el 450 a. C, según escritos de Leucipo de Mileto. Ellos pensaban que el sentido de la visión venía regido por el hecho de que las propias cosas u objetos emitían las imágenes (eidola), que eran captadas por nuestro órgano sensorial. El procesamiento de la imagen se realizaba por nuestra alma para determinar las formas y

colores de los cuerpos, que eran el resultado de la emisión procedente del objeto. Esta escuela defendía la idea de que la emanación se producía del objeto al ojo.

La idea principal de los miembros de la escuela de los pitagóricos, según escritos de Apuleyo (430-365 a. C.), era la defensa de que los focos emisores eran los ojos. Estos emitían hacia el objeto un fuego invisible que tocaba y exploraba los objetos, algo análogo a lo que hace el sentido del tacto, idea contraria a la propuesta por los atomistas.

A continuación se realiza una breve historia de los personajes más influyentes en las teorías sobre la naturaleza de la luz

TEORÍA TÁCTIL

La hipótesis de la existencia de rayos rectos emitidos por el ojo, que al ser interrumpidos por los objetos producen la sensación de ver, se gesta en la antigua Grecia y perdura durante unos 1.500 años, hasta que se distingue claramente la luz del sentido de la vista.

Empédocles (490 a. C.-430 a. C.)

Empédocles, a pesar de sus muchos escritos, tenía como idea principal «el asunto *la Naturaleza*», un poema de dos mil versos del que actualmente se conservan medio millar. En él se postula una de las ideas por las que es conocido: la existencia de cuatro elementos fundamentales como lo son la tierra, el agua, el aire y el fuego, pero también habla sobre la percepción y los sentidos y ahí encontramos una de las primeras menciones de la historia sobre la naturaleza de la luz.

Empédocles defendió una combinación de las dos teorías emanacionistas provenientes de la escuela de los atomistas y de los pitagóricos. Por tanto, habría entonces dos flujos, uno exterior, que portaría consigo el orden, la forma y los colores del objeto, pero que tendrían que coexistir también con los rayos emitidos por el ojo, que se encontrarían en un espacio intermedio con los exteriores.

En su momento fue una teoría muy compleja, a pesar de sus erróneos aspectos en su hipótesis de emisión. Él emplea el razonamiento lógico (experimentación) en una época donde la filosofía y la ciencia van ligadas de la mano. Desde un punto de vista físico, él consideró que existía una interacción entre los rayos emitidos por el objeto y los rayos provenientes del ojo.

Platón (427 a. C.-347 a. C.)

Sócrates y Platón interpretaban que nosotros podíamos ver porque nuestros ojos emitían filamentos, que al ponerse en contacto con los objetos daban lugar a la visión.

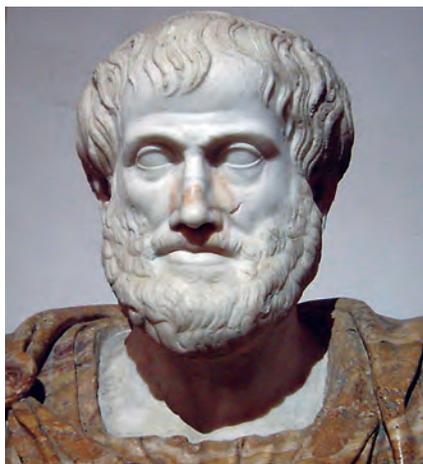


Figura 2.

Platón recoge la teoría de Pitágoras y la complica, de modo que supone tres focos de los que mana una acción: los ojos, el foco que ilumina y los objetos.

Aristóteles (384 a. C.-322 a. C.)

Aristóteles rechaza las teorías anteriores sobre la naturaleza de la luz y el sentido de la visión de manera general. Para él, la luz no es una emanación corpuscular y la visión no es producida por ninguna emanación material desde el ojo al objeto ni al revés. Por eso, añade el concepto del medio, que considera imprescindible para aclarar el significado de la visión.

Este término se encuentra en el tratado *Acerca del Alma (De Anima)*, donde se recoge: «Una prueba evidente de ello es que si colocamos cualquier cosa que tenga color directamente sobre el órgano mismo de la vista, no se ve. El funcionamiento adecuado, por el contrario, consiste en que el color ponga en movimiento lo transparente, por ejemplo el aire, y el órgano sensorial sea, a su vez, movido por éste último con quien está en contacto».

Aristóteles y los sabios de la época se preguntaban por cuestiones relacionadas con el ojo humano y en las hipótesis emanacionistas provenientes de ambas escuelas una de esas cuestiones era: «Si los ojos son la fuente de la luz ¿por qué los objetos no son visibles en la oscuridad?». Aristóteles era consciente de que la luz no es visible y no se ve en la oscuridad, por eso introduce la transparencia en el siguiente párrafo:

Y llamo transparente a aquello que es visible si bien por decirlo en una palabra— no es visible por sí, sino en virtud de un color ajeno a él. Tales son el aire, el agua y



Figura 3.

multitud de sólidos: no son transparentes, en efecto, ni en tanto que agua ni en tanto que aire, sino porque en ellos se da una cierta naturaleza, la misma que se da en el cuerpo eterno situado en la región más alta del firmamento.

Para Aristóteles, lo transparente es visible, es aquello que le comunica al observador el color de los cuerpos situados al otro lado.

*Lo transparente no es algo que se ve
sino algo a través de lo que se ve.*

La luz, por otra parte, aparece definida como un estado de lo transparente, estado que resulta de la presencia del fuego o de cualquier otro cuerpo luminoso; es en un lenguaje propio del sistema aristotélico la actualización de la transparencia. La adquisición de ese estado en el que la transparencia no es mera potencialidad sino plena actualidad, de modo que los objetos separados del observador por el medio resultan visibles.

Euclides (325 a. C.-265 a. C.)

En el año 300 a. C. aproximadamente, Euclides fue uno de los que más avanzaron en el estudio de la óptica dentro de la Grecia Clásica. Él había apreciado que la luz viajaba en línea recta, este fenómeno observacional lo explica en su obra *Óptica*, así como un estudio matemático de la naturaleza de la luz. Él continuó investigando a raíz de esa idea, hasta lograr explicar las leyes de la reflexión e intentar estudiarlas desde un punto de vista matemático.

Euclides, en su obra los *Elementos*, que era un compendio de la geometría griega, daba explicación geométrica sobre la forma circular del arco iris aristotélico y la geometrización de la óptica llevada a cabo. Estos eran los inicios de la matematización de fenómenos naturales que ha tenido lugar a lo largo de la historia del pensamiento.

Euclides ha sido uno de los más influyentes pensadores en los desarrollos posteriores de la ciencia de todos los tiempos.

Ptolomeo (100-170)

Fue el autor del *Almagesto*, que pretendía ser un libro de matemáticas y astronomía. Dentro del mismo se recoge la explicación aristotélica del mundo y la mejora para salvar las apariencias de los cielos astronómicos.

Consciente en esa época de la importancia de la visión en los estudios de astronomía, escribe su libro *Óptica*, en el que estudia el color, la reflexión, la refracción y los espejos de diversas formas, es decir, las propiedades de la naturaleza de la luz desde el análisis matemático.

Ptolomeo, en su obra *Óptica*, llevaba a cabo una teoría de la extramisión-intromisión de visión, donde los rayos del ojo forman un cono, cuyo vértice se encuentra en el interior del ojo y la base que define el campo visual. Estos rayos eran sensibles, y transmitían información sobre aspectos como la distancia y orientación de las superficies. El ángulo visual, relacionado con la distancia y orientación, daba información del tamaño y la forma.

Ptolomeo, en el siglo II, intentó obtener una dependencia empírica entre los ángulos de los rayos incidentes y refractados, con respecto a la normal que separa ambos medios.

Para comprobarlo, empleó un disco dividido en 360 particiones, en cuyo centro se fijaban los extremos de dos reglas que podían girar alrededor del punto, como si fueran las agujas de un reloj. La mitad inferior estaba sumergida en agua, mientras que la superior se encontraba en el aire. Las reglas se orientaban de tal forma que, al mirar a lo largo de la superior, pareciese que ambas formaban una línea recta. Sus mediciones determinaban que los resultados no eran constantes en las relaciones entre los senos de los ángulos de refracción e incidencia, sino que existían fluctuaciones.

Hasta trece siglos después, con el árabe Alhazen de Basora, no hay indicio del menor progreso, salvo que Galeno (130-201 d. C.) da a conocer la anatomía del ojo.

TEORÍA DE EMISIÓN

Al-Hazen demuestra que la visión no puede deberse a rayos que partan del ojo al objeto, sino del objeto al ojo. De esta manera, distinguió claramente la luz

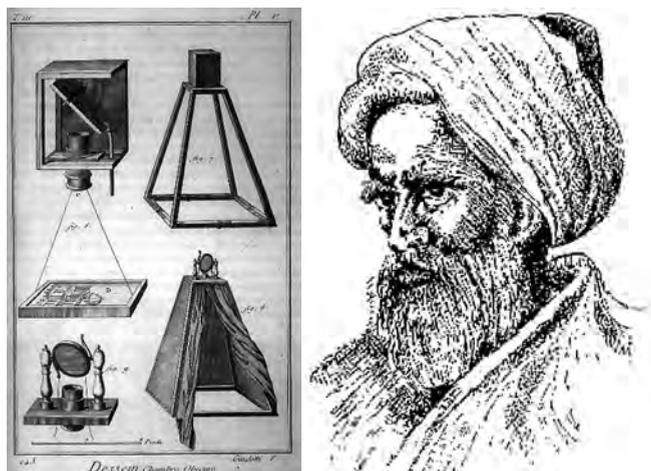


Figura 4.

del sentido de la vista. A partir de entonces, comienza el desarrollo de la óptica geométrica, una teoría basada en la suposición de que cada punto de un objeto luminoso o iluminado emite rayos rectos de luz en todas direcciones, siendo posible la aplicación de los conocimientos de geometría al comportamiento de dichos rayos luminosos, además del estudio de los fenómenos de reflexión y refracción.

Al-Hazen (965-1039)

Al-Hazen invirtió los fundamentos de la óptica geométrica al adoptar un modelo de la luz que resolvió algunos problemas de las ideas surgidas en la Antigüedad.

Para él la visión estaba relacionada con la luz. Esta característica era considerada como una entidad independiente al cuerpo y el ojo hace de intermediario de la visión. La visión no se debía a rayos visuales emitidos por el ojo que encontraban al objeto. Sino por el contrario, como resultado de rayos que, surgiendo del foco luminoso y reenviados por el objeto hacia el ojo, penetran a través de la pupila hasta el cristalino.

Sus investigaciones en el campo de la óptica lo llevaron a proponer el uso de la cámara oscura, convirtiéndose en el primer científico que hace mención de ese artefacto; mediante ésta, pudo formar una imagen invertida de un objeto luminoso permitiendo el paso de la luz por un pequeño orificio. La interpretación de la cámara oscura le llevó a modelizar como un instrumento óptico al ojo humano. Esto ayudó a la ciencia en su desarrollo posterior, ya que se consideró a la luz independiente del ojo y de la fuente luminosa.

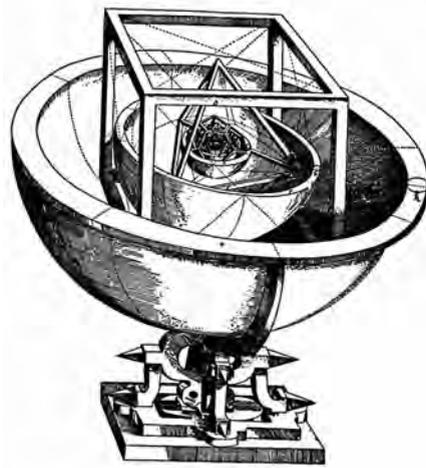


Figura 5.

Al-Hazen estudió la idea de Ptolomeo sobre la refracción y fue el primero en descomponer los rayos de forma vertical y horizontal, permitiendo así un resultado próximo a la ley de Snell. Este nuevo éxito permitió explicar diferentes fenómenos como cuando miramos un objeto al observar un espejo plano.

Sin duda, este científico fue una de las grandes autoridades de la Edad Media.

Robert Fludd (1574-1637)

Robert Fludd, defendía en su esoterismo radical, la idea de que el universo está regido por dos grandes principios: el principio de la luz, que consideraba el de las formas, y el principio de la oscuridad, el de la materia, cuyos lugares naturales estaban asociados respectivamente con el del cielo claro y el de la oscura Tierra. En ellos consideraba que todos los seres del universo: ángeles, planetas, árboles, minerales..., están definidos por su mayor o menor contenido de luz.

Kepler (1571-1630)

En los inicios del siglo XVII, Johannes Kepler, cosmólogo, neoplatónico y pitagórico, realizó un notable trabajo matemático en relación con la óptica. Para él, la óptica era el nexo que ligaba la física con la metafísica, era algo vital para el estudio de la luz y los fenómenos celestes.

Tenía una personalidad bipolar, era irracional y escrupuloso calculador. Esos rasgos en su carácter eran típicos del período en el que vive.

Elaboró hipótesis acertadas relacionadas con el funcionamiento del órgano encargado de la visión y determinó la relación entre la distancia de una fuente luminosa y la intensidad observada de la propia fuente, es decir, que la intensidad de la luz en un punto varía con la inversa del cuadrado de la distancia de la fuente. Pero uno de sus grandes errores fue la propuesta de que la velocidad de la luz era infinita. Pero los estudios y trabajos de Kepler sirvieron como base para la construcción del telescopio por parte de Galileo Galilei.

Para Kepler, los colores eran «luz sepulta en la materia diáfana», que participan en la armonía del mundo con la estrecha relación de la aritmética y los tonos de la escala musical. En el arco iris, como para Aristóteles, los colores resultan de la luz atenuada y de la incorporación de la oscuridad que contiene el agua.

Kepler, lector de Al-Hazen, coloca la cámara oscura en el centro de sus investigaciones ópticas, llegando así a derivar la primera teoría matemática relacionada con este instrumento óptico. Con él, el ojo empezó a ser considerado como lo que realmente es, un aparato óptico que se sujeta a las leyes de la física.

Finalmente, la idea de la cámara oscura se elabora completamente y de ese modo la retina es entendida como la superficie receptora, y el cristalino y la córnea los medios refractantes. En 1610, presentó una publicación en la que describe los principios involucrados en las lentes convergentes y divergentes de los microscopios y telescopios. Finalmente, él también descubrió la reflexión interna a pesar de no poder explicarla.

Galileo (1564-1642)

De Galileo se podría decir que es una de las personas que encarnan el prototipo de un hombre renacentista. Era un amante de la cultura y un hombre que mostraba curiosidad por comprender el mundo que observaba: luz, sonidos, movimientos, etc.

Fue el primero en medir la velocidad del sonido de una manera exacta en su época, con una manera sencilla de realizar su experimentación. Por tanto, lo aplicó a la medición de la luz, como recoge en sus diálogos concernientes a dos nuevas ciencias. En ellos hace referencia a que la luz era instantánea cuando disparábamos con un cañón y el sonido presentaba un retardo, de ahí que se planteara muchas situaciones para lograr medir la velocidad.

Galileo tuvo la inquietud y genial idea de dirigir al cielo un rudimentario telescopio que había conseguido a través de un mercante holandés. Y mediante su observación, descubrió cosas muy sorprendentes para las creencias de la época, que apoyaban con firmeza las ideas copernicanas del movimiento de la Tierra alrededor del Sol.

En ningún momento de su vida Galileo intentó publicar alguna obra sobre la naturaleza de la luz, a pesar de confesar en sus últimos años de vida que por llegar a comprender y saber qué era la luz habría sido capaz «de estar en la cárcel

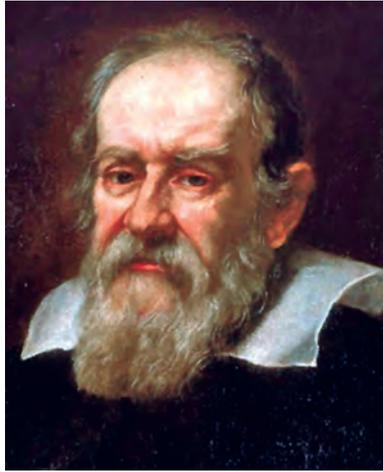


Figura 6.

a pan y agua durante toda mi vida con tal de haber tenido la certeza de conseguir un conocimiento tan deseado por mí».

Snell (1580-1626)

Willebroed Snell, de origen holandés, intentó dar una explicación sobre el fenómeno que se presenta al introducir un objeto de forma vertical y alineado dentro del agua. El objeto es doblado en otra dirección a la que está por fuera, cuyo medio es el aire.

El fenómeno era ya conocido desde la Antigüedad, donde Pitágoras llegó a formalizar sus observaciones. Catorce siglos después de los experimentos desarrollados por Claudio Ptolomeo, Snell, en 1621, llega a elaborar la ley de la refracción de la luz, dándole el nombre de Ley de Snell; en ella se explica cómo los rayos cambian de dirección cuando atraviesan la frontera que separa dos medios distintos.

A pesar de que Snell elaboró dicha ley, nunca descubrió cuál era la causa por la que la luz se desviaba.

Descartes (1596-1650)

Es el creador de un brillante y magnífico método inspirado en el razonamiento geométrico, mediante el cual, «... absteniéndose de admitir verdad alguna

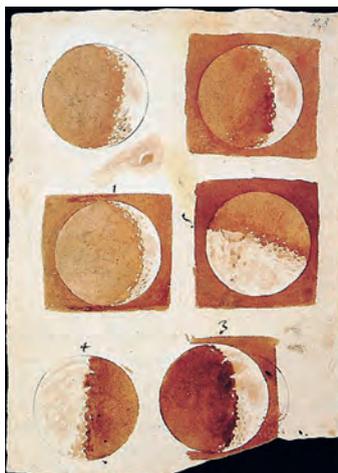


Figura 7.

que no lo sea y guardando siempre el orden necesario para deducir unas de otras verdades, no puede haber algunas tan alejadas de nuestro conocimiento que no podamos finalmente conocer, ni tan ocultas que no podamos llegar a descubrir».

Descartes publica la dióptrica y la meteorología como resultado de aplicar su *Discurso del Método* en la física cartesiana y mecanicista, defendiendo que los fenómenos asociados con la luz debían ser explicados con modelos mecánicos. Fue uno de los primeros defensores importantes de la teoría corpuscular, compuesta por corpúsculos que viajaban a velocidad finita.

En los *Meteoros*, Descartes se enfrentó al más bello de los fenómenos del cielo, el arco iris:

En primer lugar, me ha sido fácil juzgar que tal efecto se produce porque los rayos de luz inciden sobre las gotas de agua y se reflejan contra nuestros ojos, pues he observado que este arco no aparece solamente en el cielo, sino también cerca de nosotros si varias gotas de agua son iluminadas por el sol, según puede comprobarse experimentalmente en algunas fuentes. En segundo lugar, conociendo ya que estas gotas son redondas y que no modifican el aspecto de este arco aunque varíen sus dimensiones, decidí construir una de gran tamaño con el fin de poder examinar en ella con más facilidad cuanto sucede en las otras.

Fue el primero en publicar la correcta ley de la refracción, sin la que no hubiese sido posible el avance en la óptica; y además la incorporó a una teoría físico-matemática, la cual, y a pesar de sus muchos defectos, constituyó el punto inicial de las investigaciones de Fermat, Hooke, Huygens e incluso Newton.

En su madurez, acepta la imposibilidad de hacer una física exacta. La certeza queda para las demostraciones de los teoremas de la aritmética y de la geometría. La matemática es un juego comparado con la Física, con la dura y compleja realidad.

TEORÍA CORPUSCULAR

Defendida por Isaac Newton y aceptada por la comunidad científica del siglo XVIII, esta teoría supone que los rayos luminosos están compuestos por partículas diminutas que los cuerpos luminosos arrojan a gran velocidad y que al penetrar al ojo e incidir sobre la retina estimulan la visión. Newton, basándose en la hipótesis de la propagación rectilínea de la luz, explicó los fenómenos de reflexión, refracción y dispersión.

TEORÍA ONDULATORIA

Con el descubrimiento de Grimaldi de la difracción de la luz, la teoría de los rayos rectos luminosos fue quedando obsoleta ante los nuevos problemas planteados, comenzando así el desarrollo de la teoría ondulatoria de la luz. Con la hipótesis de que la luz era una onda se pudieron describir con detalle los fenómenos de difracción, interferencia y polarización.

Grimaldi (1618-1663)

Grimaldi era astrónomo y físico. En 1665 publicó en Bolonia, el libro *Physico-Mathesis de Lumine, Coloribus et Iride*, donde mostraba por primera vez el fenómeno de la difracción de la luz.

Utilizando una banda muy estrecha de luz natural, situó un pequeño objeto en el interior del cono luminoso que emerge de la abertura y observó la sombra sobre una pantalla blanca que no estaba el objeto, como indicaría la óptica geométrica, netamente separado de la zona luminosa, sino que la sombra está rodeada de tres bandas luminosas y coloreadas, a lo cual le dio el nombre de división de fracciones. Son azuladas en el exterior y rojizas hacia el interior. Su intensidad y anchura disminuyen a medida que se alejan de las ondas.

Grimaldi atribuyó esta observación a la difracción de la luz y fue un importante descubrimiento, cuyos resultados se utilizaron para sustentar la teoría ondulatoria de la luz.



Figura 8.

Bartholinus (1625-1692)

Erasmus Bartholinus describe en 1670 por primera vez el fenómeno de la doble refracción, «birrefringencia», de la luz en una variedad incolora y transparente de calcita denominada espato de Islandia. Pudo observar cómo la luz se refractaba a través del espato dando lugar a dos rayos que él denominó *solita e insolita*. La explicación que le dio Bartholinus en su momento se basó en la teoría de la luz de Descartes, la cual proponía que el cristal presentaba dos sets de «poros» que daban lugar a la refracción doble. Aunque publicó una descripción muy precisa del fenómeno, no fue capaz de comprender su naturaleza física.

Huygens (1629-1695)

En el campo de la óptica elaboró la teoría ondulatoria de la luz, partiendo del concepto de que cada punto luminoso de un frente de ondas puede considerarse una nueva fuente de ondas: «Principio de Huygens». En 1678, postuló que la luz era de naturaleza ondulatoria, es decir, que era como una onda. A partir de esta teoría explicó, en su obra *Traité de la lumière*, la reflexión, refracción y doble refracción de la luz. A fin de explicar la birrefringencia, supuso que el rayo ordinario correspondía con una onda esférica, mientras que el extraordinario correspondía a una onda esferoidal oblata, es decir, con la forma de una esfera achatada. Sin embargo para él, la luz era un fenómeno ondulatorio de tipo mecánico, como el sonido, es decir, era una onda longitudinal donde la vibración ocurría en la

misma dirección que la propagación de la onda y que se propagaba en un medio muy particular: el éter, especie de fluido impalpable que todo lo llenaba, incluso el vacío, donde la luz también se propagaba.

Dicha teoría quedó definitivamente demostrada por los experimentos de Thomas Young, a principios del siglo XIX.

Hooke (1635-1703)

En 1665 descubre el fenómeno de la interferencia, al observar los brillantes colores de las pompas de jabón y las películas de aceite en agua. Hooke interpretó correctamente sólo en forma parcial sus observaciones, las que relacionó indirectamente con movimientos ondulatorios longitudinales.

Roemer (1644-1710)

En 1676, es el primero en realizar un experimento astronómico mediante la observación de los satélites de Júpiter, descubiertos anteriormente por Galileo, para estimar la velocidad de la luz en 212.000 km/s.

En la época era conocido que los satélites de Júpiter presentaban variaciones en el período relacionado con la distancia de Júpiter a nuestro planeta. Roemer sugirió que la diferencia no era real, sino que tenía relación con el tiempo que tardábamos en ver la luz, desde que era emitida por la Luna hasta alcanzar la Tierra. Había dejado bastante claro que la luz se movía a velocidad finita.

Newton (1642-1727)

Newton, considerado uno de los científicos más creativos y completos de la historia, realiza el experimento del prisma y consigue la primera teoría satisfactoria de los colores, asignando a cada color un número, la longitud de onda. Lo publicará en 1704 en su *Óptica*, aunque ya había conseguido esos resultados en 1665, que fueron expuestos en la Royal Society, explicando la descomposición de la luz solar.

Hay que tener en cuenta que la idea idealizada en esa época era la de Descartes, en la que la luz estaba compuesta por corpúsculos. Descartes no logró descomponer la luz totalmente, ya que sólo logró el rojo y el azul.

En 1672, Isaac Newton publica su teoría del color y en ella hace referencia a evidencias experimentales de que la luz está formada por corpúsculos que viajan en línea recta y postula su teoría corpuscular de la luz. Su teoría corpuscular fue duramente criticada por físicos como Hooke y Huygens, cuyas discusiones se mantendrían casi dos siglos después.

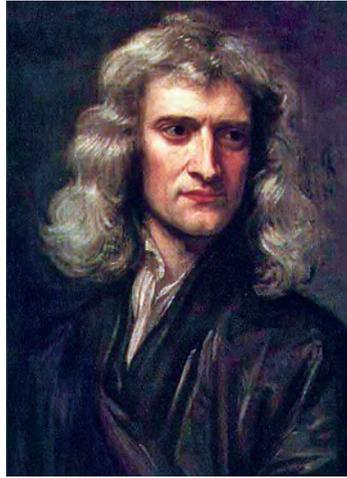


Figura 9.

2. HACIA UN MODELO ÚNICO: DE NEWTON A LOUIS DE BROGLIE

Debido a la gran autoridad científica de Newton, la teoría ondulatoria no pudo progresar hasta que el inglés Young explicó sobre su base, en 1802, el fenómeno de las interferencias, midiendo por primera vez las longitudes de onda correspondientes a distintos colores espectrales. Como en el capítulo 1, repasamos aquellos personajes históricos que han tenido gran influencia en el estudio acerca de la naturaleza de la luz.

Young (1773-1829)

Describió en 1801 en Inglaterra algunos experimentos, entre los cuales el más importante era el de la doble rendija. Con este experimento Young trataba de hacer resurgir la teoría ondulatoria, que ya casi se había olvidado por entonces. Demostró la existencia de la interferencia de la luz y se inició como uno de los defensores principales de la teoría ondulatoria.

Malus (1775-1812)

En 1808, Malus descubrió la polarización de la luz por medio de la reflexión al observar que la luz, al reflejarse en vidrio o agua, presentaba el mismo fenómeno

que cada una de las dos imágenes que aparecían por birrefringencia al pasar a través del espató de Islandia. Este fenómeno consiste en que, al ser observadas las imágenes a través de un segundo trozo de espató de Islandia, la imagen aparece o desaparece según su orientación. A este fenómeno se le llamó polarización.

Brewster (1781-1868)

Poco después, en 1815, Brewster hizo un estudio completo del fenómeno de la polarización, encontrando que la luz reflejada queda polarizada completamente cuando la tangente del ángulo de incidencia es igual al índice de refracción. Fue el inventor del famosísimo caleidoscopio.

Arago (1786-1853)

Ayudó a Jean-Augustin Fresnel en sus trabajos de desarrollo de teorías ópticas, sobre todo en la confirmación de la teoría de Fresnel sobre la naturaleza ondulatoria de la luz, observando lo que hoy en día se denomina punto de Arago. Ambos hicieron experimentos sobre la polarización de la luz, infiriendo que los movimientos del éter eran transversales al movimiento de la luz. Con estas teorías llegaron a idear el polarímetro y descubrieron la polarización circular. La idea general de la experiencia para la determinación de la velocidad de la luz por los experimentos que posteriormente realizarían Hippolyte Fizeau y Léon Foucault fue dada por él en 1838.

Fraunhofer (1787-1826)

En 1814 Fraunhofer fue el primero que investigó con seriedad acerca de las líneas de absorción en el espectro del Sol, que serían explicadas de modo exhaustivo por Kirchhoff y Bunsen en 1859, con la invención del espectroscopio. Esas líneas se siguen llamando en nuestros días líneas de Fraunhofer en honor suyo.

También inventó la retícula de difracción, transformando así la espectroscopia de arte a ciencia, demostrando el modo exacto de medir la longitud de onda de la luz.

Fresnel (1788-1827)

El establecimiento definitivo de una teoría ondulatoria transversal de la luz más formal se obtuvo alrededor de 1823, gracias a los trabajos tanto teóricos como experimentales de Fresnel. La teoría ondulatoria transversal de la luz con-

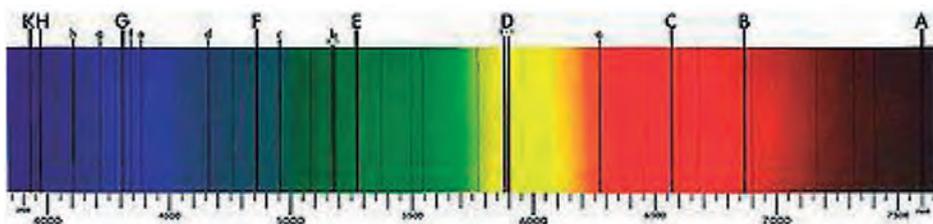


Figura 10.

sistía en que la onda se propagaba en una dirección perpendicular a la vibración de ésta. Sus descubrimientos y deducciones matemáticas, fundamentadas en el trabajo experimental de Thomas Young, extendían el principio de Huygens a más fenómenos ópticos.

Fizeau (1819-1896) y Foucault (1819-1868)

Es curioso que, a pesar de que cada día se entendía mejor la naturaleza de la luz, todavía no se había medido en forma directa su velocidad de propagación. No fue sino hasta 1849 cuando Fizeau midió por primera vez en forma directa la velocidad de propagación de la luz; 313.000 kilómetros por segundo.

Foucault nació el mismo año que Fizeau. Fueron amigos y dos de los físicos más relevantes del siglo XIX. Determinó la velocidad de la luz en 298.000 km/s, 10.000 km/s menos que la obtenida por anteriores experimentadores y solamente 0,6% de diferencia con el valor actualmente aceptado. Probó experimentalmente en 1850 que la velocidad de la luz es menor en un medio denso que en el vacío, obteniendo que el factor en el que se reduce esta velocidad al entrar a un cuerpo transparente es justamente el valor del índice de refracción.

Kirchhoff (1824-1887)

En 1883 derivó su teoría escalar de la difracción en términos de la teoría escalar, mejorando la teoría de Fresnel, y puede considerarse como una aproximación a la de Maxwell. Inventó el espectroscopio y su trabajo en la radiación del cuerpo negro fue fundamental para el desarrollo de la teoría cuántica.



Figura 11.

TEORÍA ELECTROMAGNÉTICA

En 1873, James Clerk Maxwell publica su tratado de electricidad y magnetismo, en el cual presenta una síntesis de los conocimientos adquiridos hasta entonces por científicos como Ampere, Faraday, Coulomb y Oestred, entre otros. La teoría de Maxwell propone que la luz es una onda electromagnética que se propaga en el vacío a velocidad constante, explicando que estas ondas se generan debido a cargas eléctricas en movimiento. Ésta teoría fue constatada experimentalmente por Henrich Hertz, quien consiguió generar y detectar las ondas electromagnéticas predichas por Maxwell, además de medir su velocidad.

Maxwell (1831-1879)

En 1864 ya estaba aceptada la teoría ondulatoria; sin embargo, era completamente desconocido el tipo de onda que era la luz. En este año el físico Maxwell planteó su teoría electromagnética de la luz, con la que probó que la luz es una onda electromagnética transversal de la misma naturaleza que las ondas de radio, que aún no se habían descubierto, diferenciándose de éstas sólo en que su frecuencia es mucho mayor. Lo más interesante fue que obtuvo el valor de la velocidad en el vacío calculándola teóricamente a partir de constantes eléctricas conocidas del vacío.

Morley (1838-1923) y Michelson (1852-1931)

Juntos se propusieron llevar a cabo un experimento interferométrico que había comenzado Michelson, para determinar si la Tierra estaba en reposo o en movimiento con respecto al éter, es decir, al medio en el que se propagaba la luz. En 1888 llegaron a la conclusión de que la franja de interferencia no se movía de posición. Aunque uno de los intentos de explicación era suponer que el éter estaba en reposo en relación con la Tierra, no fue aceptable debido a que otros experimentos de varios investigadores demostraban que esto era imposible. Está considerado como la primera prueba contra la teoría del éter. El resultado del experimento constituiría posteriormente la base experimental de la teoría de la relatividad especial de Einstein.

Michelson fue el primero que tomó la longitud de onda de la luz como referencia para especificar longitudes de objetos con precisión. En 1960 el metro fue definido como igual a 1.650.763,73 longitudes de onda en el vacío de la luz emitida en una cierta línea espectral del kriptón-86.

Hertz (1857-1894)

En 1886 demostró experimentalmente la existencia de las ondas de radio, confirmando así sin lugar a dudas la teoría electromagnética de Maxwell. Encontró también el efecto fotoeléctrico, que consiste en la expulsión de electrones de un metal cuando incide un haz luminoso sobre él. La energía cinética de los electrones expulsados era tanto mayor cuanto mayor era la frecuencia de la luz que iluminaba el metal. Ninguna teoría física de la época podía explicar el fenómeno.

TEORÍA CUÁNTICA

La teoría electromagnética era incapaz de explicar fenómenos como la fluorescencia o el efecto fotoeléctrico. Estos fenómenos fueron explicados con la cuantización de la radiación de Planck y la cuantización de la energía de Einstein, dando lugar a la teoría cuántica de la luz. En esta teoría se asume que la luz tiene una naturaleza dual, es decir, tiene aspectos ondulatorios y corpusculares simultáneamente. Dependiendo del tipo de fenómeno que se manifieste, una de las dos propiedades se hará aparente sin dejar de existir la otra.

Planck (1858-1947)

En 1900 explicó de forma exacta la forma del espectro de la radiación del cuerpo negro, es decir, un cuerpo, bien sea por su color o por su forma, absorbe toda la energía luminosa que le llega. Este cuerpo negro puede hacerse con una

esfera hueca y cerrada, con un agujerito para detectar la radiación luminosa proveniente del interior cuando se calienta.

La teoría buscada tuvo que romper algunos de los principales conceptos de la física de entonces. Dio la ley matemática al suponer que la luz no es emitida de modo continuo, sino por «cuantos» discretos de energía, pero no pudo darle la interpretación física correcta. Einstein completaría esta teoría de manera satisfactoria.

Sommerfeld (1868-1951)

Sommerfeld definió la difracción como la propagación no rectilínea de la luz que no se puede interpretar a partir de las leyes de la reflexión y de la refracción. La teoría de Kirchhoff tiene inconvenientes formales de orden matemático que fueron solucionados por Sommerfeld en 1894, introduciendo algunas modificaciones en la teoría anterior. La teoría escalar es suficientemente rigurosa para explicar la mayor parte de los resultados experimentales macroscópicos. Pese a que se trata de una simplificación que no tiene en cuenta el carácter vectorial de los campos electromagnéticos, la teoría escalar funciona con éxito cuando las aberturas son más grandes que la longitud de onda de la luz y cuando las distancias de observación son suficientemente grandes. En estas condiciones, la polarización del campo electromagnético no es una información relevante y, por lo tanto, se puede prescindir del formalismo vectorial.

Lewis (1875-1946)

En 1926 utilizó el término «fotón» para la menor unidad de energía radiante, terminología que utilizaría Einstein para su postulado de que la luz está formada por unas partículas llamadas fotones.

Einstein (1879-1955)

En 1905 publicó el revolucionario artículo «Heurística de la generación y conversión de la luz», basando su formulación de la fotoelectricidad en una extensión del trabajo sobre los cuantos de Max Planck. Ese mismo año publicó su teoría de la relatividad, deduciendo la ecuación más conocida popularmente, la de la equivalencia masa-energía, y en 1915 presentó la teoría de la relatividad general, en la que reformuló por completo el concepto de gravedad. Pero fue por sus explicaciones sobre el efecto fotoeléctrico y sus contribuciones a la física teórica por lo que le dieron el Premio Nobel de Física en 1921 y no por la teoría de la relatividad, ya que ésta no se entendía por los científicos que la

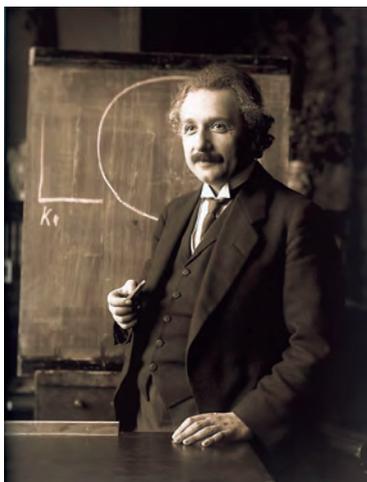


Figura 12.

evaluaron y además corrían el riesgo de que se demostrase errónea. Aún hoy, los científicos intentan desafiar la relatividad general con más y más precisos experimentos directos. La meta de esos tests es arrojar luz en la aún desconocida relación entre la gravedad y la mecánica cuántica. Se utilizan sondas espaciales, bien para hacer mediciones más precisas de largas distancias o para llevar los instrumentos hasta un entorno mucho más controlado que el que se podría conseguir en la Tierra.

Bohr (1885-1962)

En 1913 publicó su modelo atómico, introduciendo la teoría de las órbitas cuantificadas, que en la teoría de la mecánica cuántica consiste en que en torno al núcleo atómico, el número de electrones en cada órbita aumenta desde el interior hacia el exterior. Con ello explicó el espectro de emisión del átomo de hidrógeno, es decir, los electrones podían caer (pasar de una órbita a otra) desde un orbital exterior a otro interior, emitiendo un fotón de energía discreta, hecho sobre el que se sustenta la mecánica cuántica.

Compton (1892-1962)

En 1922 explicó el efecto Compton, que consiste en el aumento de la longitud de onda de un fotón cuando choca con un electrón libre y pierde parte de su



Figura 13.

energía. La frecuencia o la longitud de onda de la radiación dispersada depende únicamente del ángulo de dispersión. Compton pudo explicarlo utilizando la noción cuántica de la radiación electromagnética como cuantos de energía y la mecánica relativista de Einstein. El efecto Compton constituyó la demostración final de la naturaleza cuántica de la luz tras los estudios de Planck sobre el cuerpo negro y la explicación de Albert Einstein del efecto fotoeléctrico.

Numerosos físicos, basándose en este principio, concluyeron que la luz presentaba una dualidad onda-partícula mostrando propiedades mutuamente excluyentes según el caso.

Se presentaba entonces una dualidad de la luz muy difícil de concebir, pues no podía ser una onda y al mismo tiempo una partícula. El francés Louis de Broglie trata de resolver el enigma afirmando que «onda y corpúsculo son solamente dos manifestaciones diferentes del mismo ente, que se presentan según las circunstancias del experimento».

De Broglie (1892-1987)

En 1924 presentó una tesis doctoral titulada *Recherches sur la théorie des quanta* (*Investigaciones sobre la teoría cuántica*), introduciendo los electrones como ondas. Este trabajo presentaba por primera vez la dualidad onda-corpúsculo característica de la mecánica cuántica. Su trabajo se basaba en los trabajos de Einstein y Planck. La asociación de partículas con ondas implicaba la posibilidad de construir un

microscopio electrónico de mucha mayor resolución que cualquier microscopio óptico al trabajar con longitudes de onda mucho menores.

BIBLIOGRAFÍA

- G. CONESA SOLANO. *El Misterio de la Luz*. ISBN: 84-95781-39-5. 2004.
- F. MAURICIO DOMÍNGUEZ. *La Física como fuente de conocimiento y bienestar*. Servicio de Publicaciones Universidad de La Laguna. 2011.
- A. PÉREZ GARCÍA. *La Edad Dorada*. ISBN: 84-7926-142-0. Centro de la Cultura Popular Canaria. 1994.
- M. HERNÁNDEZ GONZÁLEZ, J. L. PRIETO PÉREZ. *Historia de la Ciencia* (vol. I). ISBN: 978-84-611-4645-1. Fundación Orotava de la Ciencia. 2008.
- M. HERNÁNDEZ GONZÁLEZ, J. L. PRIETO PÉREZ. *Historia de la Ciencia* (vol. II). ISBN: 978-84-612-4246-7. Fundación Orotava de la Ciencia. 2008.
- J. CASAS. *Óptica*. ISBN: 300-2448-4. 1985.
- M. BORN and E. WOLF. *Principles of Optics: Electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light*. Pergamon Press. 1998.
- Web. Vídeo explicativo de la UNED:
<https://www.youtube.com/watch?v=rgh6azo9KeI>
- Web. Seminario de La Luz. Fundación Orotava de la Ciencia:
http://www.fundacionorotava.org/web_fcohc/003_actividades/SemMontesinos/luz_section1.html
- Web. Luzarcoiris:
<http://www.luzarcoiris.com/pitagoras-la-musica-como-perfeccion-salud-y-armonia/>
- Web. Filósofos presocráticos:
<http://www.paginasobrefilosofia.com/html/bachi2/presocraticos/apuntes%20presocraticos/Atomistas/atomis.html>
- Web. Fisicanet:
http://www.fisicanet.com.ar/fisica/ondas/ap08_luz.php
- Web. Wikipedia. La enciclopedia libre:
<https://es.wikipedia.org/>

Web. Biblioteca Digital:

<http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/107/htm/paraatra.htm>

Web. Presentaciones:

http://www.slideshare.net/thelawofscience/historical-development-of-light-theory?utm_source=slideshare&utm_medium=ssemail&utm_campaign=download_notification

Applets:

Applet del efecto fotoeléctrico

<http://phet.colorado.edu/es/simulation/photoelectric>

Applet del efecto Doppler

http://enebro.pntic.mec.es/fmag0006/op_applet_14.htm

Onda electromagnética

http://enebro.pntic.mec.es/fmag0006/op_applet_30.htm

Interferómetro de Michelson

<http://www.ub.edu/javaoptics/applets/MichelEs.html>

Difracción de Fresnel y Fraunhofer

<http://www.ub.edu/javaoptics/applets/DifracEs.html>

LA LUZ
Y LAS ENERGÍAS RENOVABLES

Benjamín González Díaz¹

INTRODUCCIÓN

Cuando se habla de energías renovables y se piensa en el espectro electromagnético de la luz que nos llega a la Tierra procedente del Sol, es indudable pensar en la energía solar fotovoltaica y la energía solar térmica.

Sin embargo, debido a la radiación infrarroja, efectos de la geometría de la Tierra y su rotación, la Tierra no se calienta de manera homogénea, provocando que masas de aire caliente generadas en el ecuador se desplacen a lugares más fríos, ocasionando la aparición del mecanismo fundamental de la energía eólica: el viento.

ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

El efecto fotovoltaico, que es la conversión de parte de la luz incidente en un material en corriente eléctrica, tiene su origen en el vocablo griego φώς (*phos*), que significa 'luz'. El vocablo *voltaiico* es utilizado en electricidad debido a uno de sus padres, el italiano Alessandro Giuseppe Antonio Anastasio Volta, del que este año se cumplen 270 de su nacimiento.

En 1839, Alexandre-Edmond Becquerel fue el primero en reportar el efecto fotovoltaico, pero sólo fue posible explicarlo después de 1905 tras los estudios de Albert Einstein, basándose en resultados obtenidos también por otros investigadores como Michael Faraday, Nikola Tesla y James C. Maxwell, entre otros.

Actualmente se conoce que los materiales semiconductores, aquellos materiales que son capaces de conducir electricidad sólo en unas determinadas condiciones, si son iluminados pueden generar corriente eléctrica.

Las células fotovoltaicas son los dispositivos creados a partir de los semiconductores para realizar la conversión de luz en electricidad. Si bien han sido usados varios semiconductores en la historia, actualmente el mercado está dominado

¹ Profesor del Departamento de Ingeniería Industrial de la ULL.

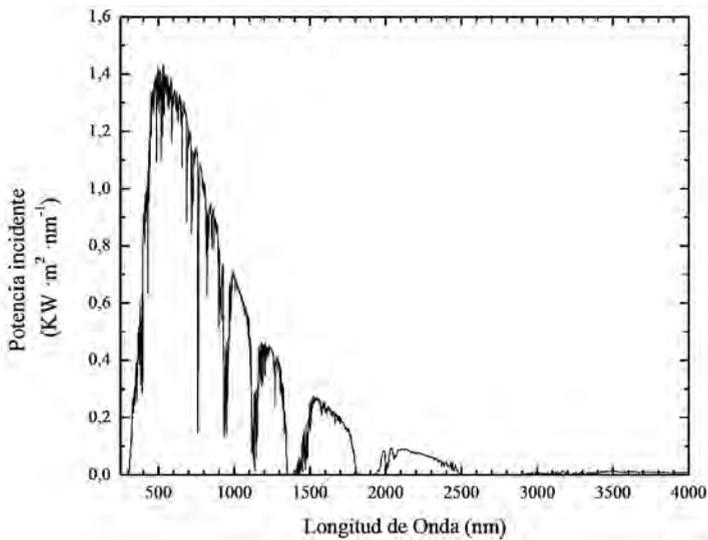


Figura 1. Espectro solar AM1.5G.

por la tecnología del silicio, uno de los elementos más abundantes en la corteza terrestre. Las células fotovoltaicas fabricadas usando obleas de silicio se denominan células de primera generación.

El silicio es un material que se caracteriza por tener cuatro electrones en su última capa. Eso hace que para poder formar enlaces necesite ceder o adquirir otros cuatro electrones. Este tipo de enlace es el que le da las propiedades al material semiconductor.

Cuando el silicio es dopado con fósforo, que tiene 5 electrones en su última capa, el número de electrones medio que tiene la estructura es ligeramente superior a 4. En este caso tenemos un semiconductor tipo n. Análogamente, cuando se dopa con boro, que tiene 3 electrones en su última capa, se obtiene un semiconductor tipo p.

Cuando se une el silicio tipo p con el tipo n lo que se obtiene es un diodo de silicio que es capaz de generar entre 0,6 y 0,7 voltios. Esta unión es la base para poder fabricar una célula fotovoltaica.

El siguiente paso de fabricación nace de la necesidad de maximizar la cantidad de luz incidente. Para ello, es fundamental conocer la cantidad de luz que llega a la Tierra y que los semiconductores elegidos puedan absorber. En la figura 1 se muestra el espectro solar terrestre, también conocido como el espectro AM1.5G.

El espectro solar en la Tierra tiene su máximo de potencia incidente en los 600 nm, por lo que en las células fotovoltaicas se diseña y se deposita una lámina

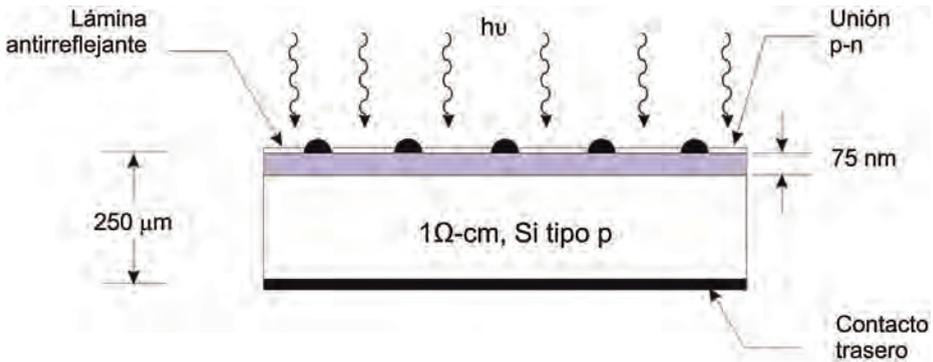


Figura 2. Célula fotovoltaica de primera generación.

antirreflectante que haga que la mayor cantidad de luz que llega sea absorbida por la célula.

Haciendo uso de las investigaciones de Augustin-Jean Fresnel, se diseña una lámina antirreflejante con un espesor aproximado de 75 nm y un índice de refracción de 2. El índice de refracción es un parámetro ampliamente usado en óptica que indica la relación entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz en el material o medio al que se hace referencia. Por eso es siempre un valor superior a 1.

Finalmente se colocan unos contactos metálicos en la parte frontal y en la parte posterior. Los contactos frontales forman una malla para permitir que la luz pueda pasar a la célula fotovoltaica y así poder generar corriente eléctrica.

Otra familia de células que se emplea actualmente en la industria son las células fotovoltaicas de segunda generación, donde se encuentran las láminas delgadas. En esta familia, las células están compuestas por un material semiconductor entre 100 y 1000 veces más delgado que las células descritas anteriormente. Sin embargo, están presentes en muchos dispositivos electrónicos como las calculadoras solares.

Conceptualmente, los pasos seguidos para la fabricación de células de primera generación se aplican también a células de segunda generación, con sus correspondientes modificaciones. Una de ellas es el uso de contactos metálicos transparentes para aumentar la cantidad de superficie del semiconductor que puede absorber la luz incidente.

En este caso, la luz no es completamente absorbida por la estructura, como ocurría en las células de primera generación, sino que parte de ella atraviesa el semiconductor. Sin embargo, los costes de fabricación y su versatilidad a la hora de incorporar este tipo de paneles en integración arquitectónica y pequeños dispositivos han hecho que su instalación se haya extendido a lo largo de estos años.

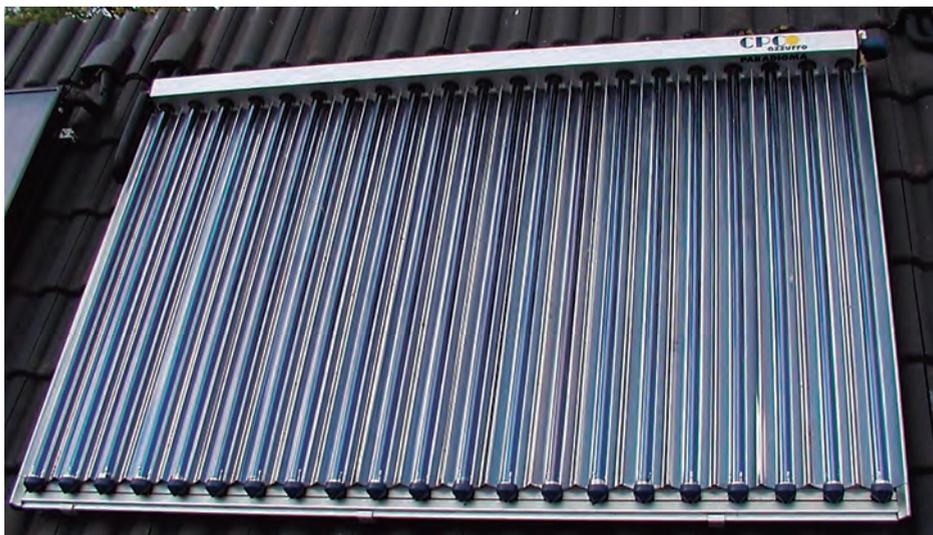


Figura 3. Panel para la captación de energía solar térmica de baja temperatura. Fuente: Wikipedia.

ENERGÍA SOLAR TÉRMICA

Si bien la energía solar fotovoltaica se utiliza para la generación de electricidad en el rango ultravioleta, visible e infrarrojo cercano del espectro solar, la energía solar térmica utiliza el espectro del infrarrojo del Sol: el calor.

Las instalaciones de energía solar térmica pueden dividirse en baja temperatura y alta temperatura. Los sistemas denominados de baja temperatura se utilizan para calentar agua y es típico encontrarlos en tejados y azoteas de las casas.

Estos sistemas constan de unos captadores solares que pueden presentar diferentes geometrías y disposiciones que se encargan de captar la radiación infrarroja y son capaces de calentar un fluido que hay en su interior, ya sea líquido o incluso gaseoso.

Posteriormente este fluido es introducido en un dispositivo denominado intercambiador de calor, que transfiere esa energía térmica al agua que se calentará y podrá ser usada.

En el caso de la energía solar a alta temperatura, se obtienen temperaturas hasta de 450°C . Nuevamente, las investigaciones de Fresnel son necesarias para poder entender cómo se aprovecha la luz solar. A través de espejos, ya sean planos o parabólicos, se concentra la luz del sol sobre un punto determinado en una torre, provocando que se evapore un fluido, típicamente agua, que genera



Figura 4. Instalación de energía solar térmica de alta temperatura. Fuente: Wikipedia.

vapor capaz de mover turbinas acopladas a motores eléctricos y así producir energía eléctrica.

Actualmente España es uno de los países que están en cabeza en el desarrollo e implementación de este tipo de tecnología.

ENERGÍA EÓLICA

Aunque parezca sorprendente, la energía eólica, que usa el recurso de viento para producir energía eléctrica, no se podría entender sin la luz del Sol. Al igual que las tecnologías descritas anteriormente, la luz del Sol juega un papel fundamental para la obtención de energía, en este caso debido al movimiento de las masas de aire en la atmósfera. Debido a la rotación de la Tierra y su geometría, esférica, achatada en los polos, las masas de aire tienen un comportamiento determinado en el planeta.

Para poder entender cómo la luz del Sol es responsable del movimiento de las masas de aire, hay que tener en cuenta el efecto Coriolis. Este efecto, descrito por Gaspard-Gustave Coriolis, se observa en un sistema de referencia en rotación cuando se analiza el movimiento de un cuerpo que se encuentra en movimiento respecto del sistema de referencia.

Debido a este efecto y la forma del planeta Tierra, el calentamiento no ocurre de manera homogénea. Esta variación hace que las masas de aire caliente se eleven hasta latitudes de 30° Norte y 30° Sur, con diferentes sentidos de rotación. A este efecto se le denomina célula de Hadley, en honor a su descubridor, George Hadley, abogado de profesión y meteorólogo de vocación. El ascenso del aire

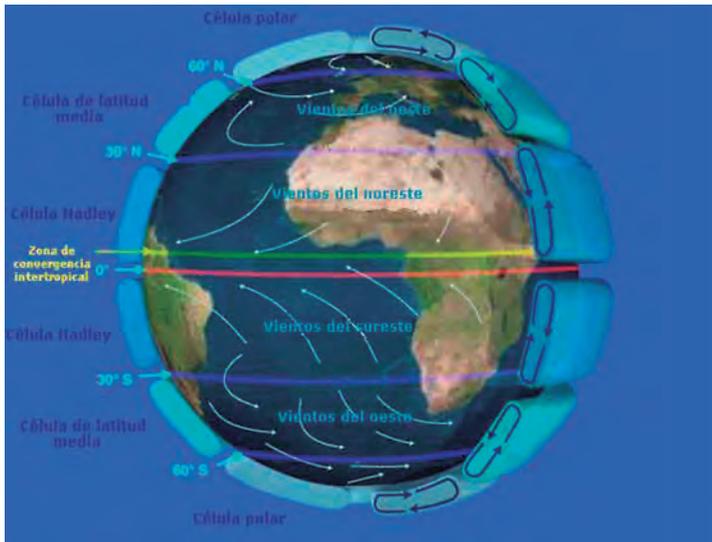


Figura 5. Células de Hadley, Ferrel y polar de la circulación atmosférica.

caliente en el ecuador es uno de los mecanismos más importantes en la aparición de tormentas convectivas en la zona de convergencia intertropical.

Entre los 30° y los 60°, en ambos hemisferios, nos encontramos con la célula de Ferrel, que transporta el calor de los trópicos a latitudes superiores. Como resultado, el sentido de giro de la célula de Ferrel es justo al contrario que el sentido de giro de las células de Hadley.

Entre los 60° y los 90° aparecen las células polares, que realizan el intercambio de calor entre las masas de aires polares y las que se encuentran en el límite de las células de Ferrel. En este caso, el sentido de giro coincide con el de las masas de aire en las células de Hadley y van al contrario que las de Ferrel.

CONCLUSIÓN

A lo largo de los años, la humanidad ha sido capaz de trabajar para aprovechar la luz que llega del sol y transformarla en energía. Si bien el espectro hace que se pueda generar electricidad o generar calor, también la luz que llega al planeta es responsable de la circulación del viento, que puede ser aprovechado para generar energía eléctrica.

LA LUZ Y LA ASTROFÍSICA
ARTÍCULOS DIVULGATIVOS CON MOTIVO DEL
AÑO INTERNACIONAL DE LA LUZ 2015,
EL DÍA DEL LIBRO Y LA EXPOSICIÓN
«A LA LUZ DEL CONOCIMIENTO»

INTRODUCCIÓN

por Alfred Rosenberg González

La astrofísica es, sin duda, un área de la ciencia muy particular. Pese a disponer del mayor de los laboratorios (¡todo el universo!), no podemos interactuar con los objetos de nuestro estudio. No podemos hacer que una estrella vuelva a explotar, tomar una muestra del Sol o de una nebulosa. En astrofísica estamos limitados a la observación. Y prácticamente toda la información que obtenemos del universo es a través de la luz. Así que hablar del universo es hablar de la luz.

Y cuando decimos luz nos referimos tanto a la luz visible como a la que no lo es (rayos gamma, rayos X, ultravioleta, infrarrojo, microondas y ondas de radio), todas ellas ondas electromagnéticas pero con distintas energías, frecuencia o longitudes de onda (ver imagen 1).

Otra característica muy importante de la luz es su velocidad, sólo superada por nuestra imaginación. Cualquier tipo de luz recorre casi 300.000 kilómetros cada segundo, por lo que observar objetos lejanos es observar objetos cada vez más distantes en el tiempo (más jóvenes). Observar más lejos es observar más atrás en el tiempo, y observar los límites del universo es observar su origen.

Una pieza fundamental en la astrofísica son los telescopios. En ellos, lo más relevante es el área de su superficie colectora de luz. Una mayor área permitirá recoger más fotones y esto nos permitirá observar objetos más lejanos, débiles y con mayor resolución. Los telescopios son la herramienta fundamental de la astrofísica, y en Canarias tenemos el privilegio de contar con dos de los observatorios más importantes del mundo: el Observatorio del Teide (en la isla de Tenerife) y el Observatorio del Roque de los Muchachos (en la Isla de La Palma), ambos del Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC).

La excepcionalidad de los cielos canarios fue la razón principal por la que surgió la astrofísica en Canarias, creándose el IAC y el Departamento de Astrofísica de la Universidad de La Laguna.



Imagen 1. Representación del espectro electromagnético: todos los tipos de luz. Cada tipo de luz está asociado con diferentes energías (los rayos gamma son la luz más energética y las ondas de radio, la menos). Igualmente, cada rango del espectro abarca distintas frecuencias o longitudes de onda, inversamente relacionadas entre sí ya que el producto de ambas es igual a la velocidad de la luz. (Créditos: Gabriel Pérez, SMM-IAC).

En los siguientes siete artículos, profesores del Departamento de Astrofísica de la Universidad de La Laguna e investigadores del IAC nos presentan, para cada rango del espectro electromagnético, el tipo de objetos observables, así como algunas de las contribuciones principales que se han hecho desde Canarias en cada área específica. Como podrán comprobar, cada rango del espectro es útil para estudiar determinados fenómenos en particular, y si queremos componer el puzle que representa el universo deberemos reunir tantas piezas como nos sea posible. ¿No es increíble todo lo que nos comunican un puñado de fotones?

Alfred Rosenberg González es astrofísico divulgador de la Unidad de Comunicación y Cultura Científica (UC3) del Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC).

ASTROFÍSICA EN RAYOS GAMMA: LA VENTANA AL UNIVERSO MÁS VIOLENTO

por Ramón García López

Las manifestaciones más energéticas del universo nos llegan a través de los rayos gamma. ¿Qué objetos celestes son responsables de las mismas? De momento se ha registrado que estas manifestaciones de gran violencia pueden proceder de muy diversas fuentes, como por ejemplo las explosiones de supernovas, los púlsares, los núcleos activos de galaxias y otras fuentes exóticas de cuya naturaleza no estamos seguros.

Los púlsares son estrellas de neutrones en rápida rotación que se producen como remanentes en algunas explosiones de supernovas. Son objetos muy compactos que giran muy rápidamente (entre diez y cien veces por segundo) y generan un poderoso campo magnético: como un imán en rápida rotación. En ese campo magnético que generan pueden acelerarse electrones o núcleos cargados susceptibles de emitir rayos gamma de muy alta energía.

Algunas galaxias tienen núcleos que experimentan constantes explosiones. Inmensas cantidades de masa son lanzadas desde el núcleo en forma de chorros (núcleos activos de galaxias). Estos chorros de materia emiten rayos gamma con una enorme intensidad. A veces la actividad empieza inesperadamente, dura unas cuantas horas y luego se desvanece por completo.

Y no se sabe exactamente qué produce los «estallidos de rayos gamma»: explosiones de rayos gamma que duran segundos o minutos y luego se desvanecen para siempre. Los astrónomos han descubierto su existencia y que se producen constantemente, pero constituyen aún un misterio. Es probable que

estén asociados a tremendas explosiones de estrellas que pueden producirse en cualquier parte del universo. Son los fenómenos más energéticamente violentos conocidos.

La radiación gamma es bloqueada por la atmósfera terrestre. Para recibir la información que nos transmite debemos diseñar instrumentos y estrategias observacionales que nos permitan «saltárnosla» para poder observar lo que la atmósfera nos oculta. La solución idónea es situar telescopios en satélites. La historia de la observación gamma con satélites es bastante reciente: se remonta a los años setenta del pasado siglo. El primer satélite que operó de manera eficiente fue el SAS-2, lanzado en 1972. En la década de los noventa volaron los satélites GCRO y BeppoSAX. Y más recientemente, en el siglo XXI, llegaron INTEGRAL y FERMI.

Aunque todas estas misiones han proporcionado conocimientos sin precedentes sobre fenómenos que ocurren a rangos de energía muy elevados, presentan una limitación importante. Se da la circunstancia de que la emisión de rayos gamma asociada a los procesos más energéticos que ocurren en el universo sigue una «ley de potencias» con la energía: a mayor energía desciende de forma exponencial la cantidad de fotones que se emiten. Eso quiere decir que para observar los fotones más energéticos (poco numerosos) deberíamos disponer de telescopios cada vez más grandes en el espacio (con una mayor superficie colectora para «cazarlos»). Y aquí nos topamos con las restricciones que nos imponen la tecnología y el coste de cualquier instrumentación espacial, unas diez veces más cara que su equivalente en tierra.

Para solventar este difícil asunto, los investigadores en este campo se plantearon hace ya tres décadas la posibilidad de realizar medidas indirectas desde tierra de los fotones gamma más energéticos utilizando los denominados «telescopios Cherenkov». Tienen como base el efecto Cherenkov: si una partícula se mueve a una velocidad mayor que la de la luz en un medio determinado, es susceptible de emitir una señal luminosa. Esto es fácil de entender si lo comparamos con un avión que rompe la barrera del sonido: el objeto que produce la señal (el avión) se mueve más rápidamente que la señal (el sonido). Pues bien, algo similar ocurre cuando una partícula se mueve más rápido que la señal luminosa que produce. En lugar de un estruendo sonoro se produce un destello de luz.

Veamos esto con un poco más de detalle. Cuando los rayos gamma muy energéticos llegan a la atmósfera terrestre chocan e interaccionan con los componentes de la misma (átomos, moléculas...). Esa interacción provoca a su vez la creación de nuevas partículas y fotones de menor energía que se propagan hacia abajo y siguen interaccionado y creando nuevas ramas de partículas y fotones, en lo que se conoce como una «cascada electromagnética». Cuando las partículas de esta cascada alcanzan velocidades superlumínicas en la atmósfera se produce un destello de luz azulada. Este destello es muy débil y ocurre en intervalos de mil millonésimas de segundo. Son precisamente estos destellos los que recogen los telescopios Cherenkov y, a partir de sus medidas, debemos



Imagen 2. Telescopios MAGIC en el Observatorio del Roque de los Muchachos (La Palma) (Créditos: Colaboración MAGIC).

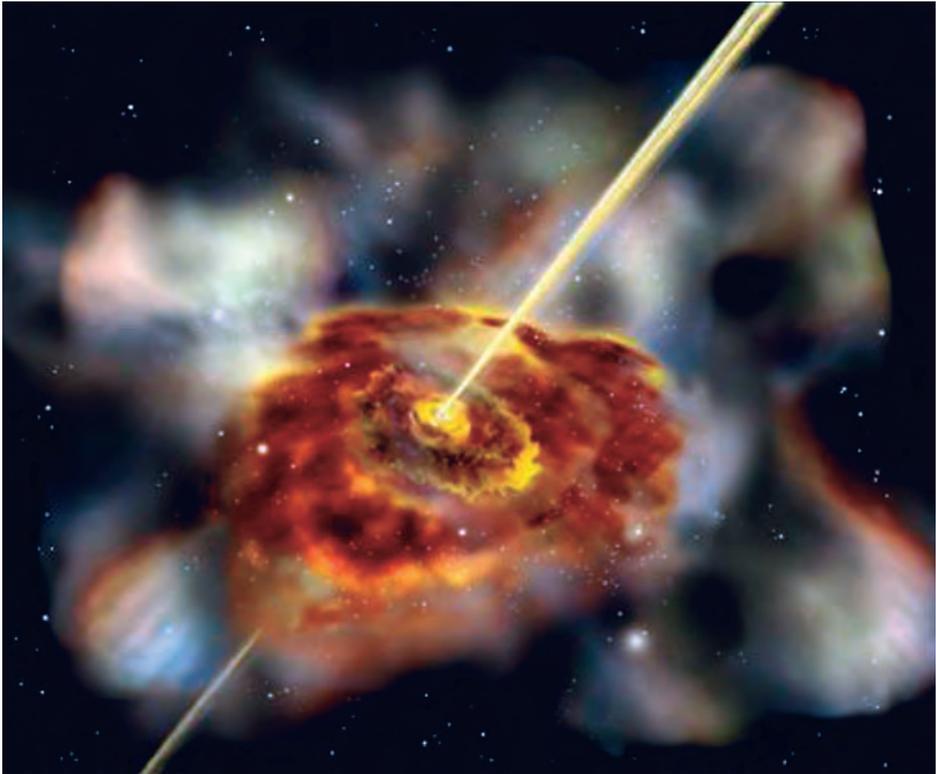


Imagen 3. Ilustración artística de un núcleo activo de galaxia con emisión de rayos gamma (Créditos: ESO).

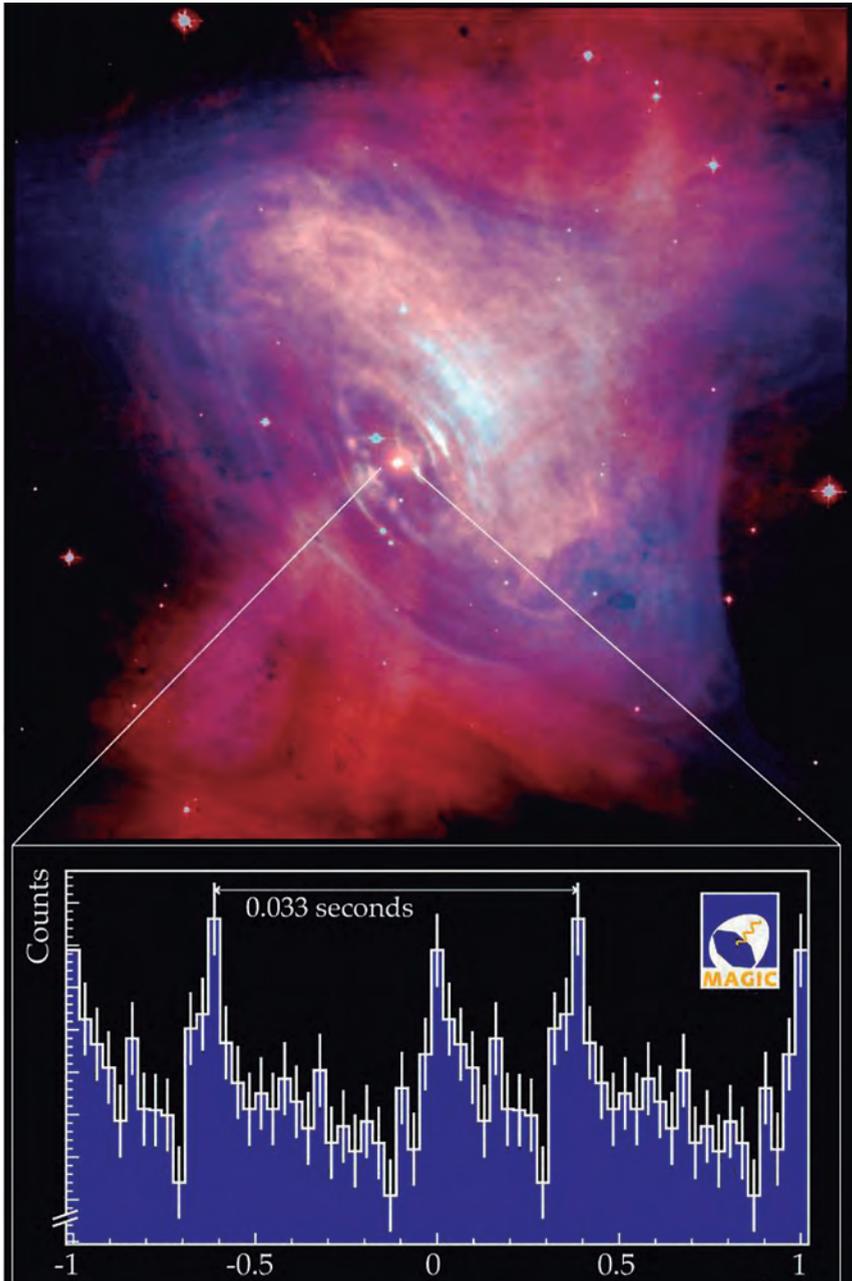


Imagen 4. Pulsación regular en rayos gamma en el seno de la nebulosa del Cangrejo (Créditos: Colaboración MAGIC).

inferir la energía y dirección que tenía el rayo gamma primigenio que los originó al colisionar con la atmósfera.

El Observatorio del Roque de los Muchachos, en la isla de La Palma, alberga la pareja de telescopios gemelos MAGIC (de 17 metros de diámetro). Junto a sus «competidores» HESS (Namibia) y VERITAS (EE. UU.), constituyen el equipo actual de telescopios de rayos gamma de muy alta energía en tierra. Desde hace algunos años, esta sana competición internacional ha propiciado que 28 países colaboren para construir el observatorio del futuro: «Cherenkov Telescope Array» (CTA), que consistirá en dos grandes sedes en los hemisferios Norte y Sur, respectivamente.

CTA permitirá mejorar en un orden de magnitud (¡10 veces!) la capacidad actual de detectar estos fotones tan escurridizos, pero que nos proporcionan una información fundamental acerca de algunos de los sucesos más extraordinarios que ocurren en el universo. Los Observatorios del Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC) compiten actualmente con otras localizaciones para albergar la sede del observatorio CTA Norte, donde se instalarán 19 telescopios con diámetros de 12 y 23 metros.

Actualmente, alrededor de ciento cincuenta investigadores de una decena de países participan en la Colaboración MAGIC, que investiga la radiación recuperada por los dos telescopios gemelos sites en La Palma. Entre ellos se encuentran los científicos del Grupo de Astrofísica de Partículas del IAC. Una decena de publicaciones anuales en revistas científicas de alto impacto refrendan lo relevante de los resultados obtenidos por esta colaboración. Destacaremos dos recientes: el descubrimiento de la pulsación en rayos gamma del púlsar central de la nebulosa del Cangrejo y la detección de una potente emisión de rayos gamma de muy alta energía procedente de la galaxia IC 310.

La nebulosa del Cangrejo es el resultado de una explosión de supernova que fue registrada por astrónomos chinos en 1054. La pulsación de su púlsar central se conocía en visible y radio, y se especulaba con que pudiese tener una contrapartida en rayos gamma. Los telescopios MAGIC detectaron la pulsación en rayos gamma y han hecho un seguimiento detallado de la misma. Como resultado, los modelos teóricos que habían sido propuestos para explicar la emisión gamma por parte del púlsar han sido corregidos teniendo en cuenta los nuevos resultados observacionales.

Los telescopios MAGIC encontraron también la señal de una potente emisión de rayos gamma de muy alta energía originada hace unos 250 millones de años en los alrededores de un agujero negro supermasivo, en la galaxia IC 310 de la constelación de Perseo. Los análisis de los datos obtenidos sostienen que esta extraordinaria emisión se debió a partículas cargadas que fueron aceleradas en una región extremadamente pequeña y próxima al horizonte de eventos del agujero negro (el límite más allá del cual no escapa nada, ni siquiera la luz). Supone un hito haber obtenido información luminosa de una zona tan próxima al abismo.

¿Es muy violento el universo? Estamos empezando a vislumbrar hasta qué punto...

Ramón J. García López es profesor titular del Departamento de Astrofísica de la Universidad de La Laguna e investigador principal del Grupo de Astrofísica de Partículas del Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC).

El Grupo de Astrofísica de Partículas del IAC participa de forma significativa en la Colaboración MAGIC y sus miembros contribuyen activamente a las labores de mantenimiento de los telescopios, observación, análisis de datos y redacción de artículos.

ASTROFÍSICA EN RAYOS X: DESCIFRANDO LO INVISIBLE

por M.^a Jesús Arévalo Morales

Los rayos X fueron descubiertos casualmente por W. C. Roentgen (1845-1923) cuando estaba estudiando el comportamiento de los rayos catódicos (haces de electrones), y obtuvo el Premio Nobel de Física en 1901. Su nombre viene porque eran considerados una incógnita como la «X» en una ecuación.

Su longitud de onda está comprendida entre 10 y 0,01 nm o 0,1 a 30 Å (1 nm = 10^{-9} m y 1 Å = 10^{-10} m) y sus frecuencias comprendidas entre 30 y 30.000 PHz (1 PHz = 10^{15} Hz) son del orden de 50 a 5.000 veces la frecuencia de la luz visible.

Cuando nos hablan de rayos X automáticamente nos viene a la cabeza su uso en medicina y especialmente en las radiografías. Los rayos X son radiaciones ionizantes, como lo son los rayos gamma y la luz ultravioleta, es decir, debido a su gran energía son capaces de disociar los átomos y moléculas si se hacen pasar a través de las sustancias que los contienen, y pueden impresionar placas fotográficas. Las partes del cuerpo humano ocupadas por tejidos blandos transmiten más radiación que las ocupadas por los huesos; de ahí su uso en radiografías de huesos para determinar fracturas. Los rayos X también tienen aplicaciones en la industria y hasta en el arte.

Es importante comprender el aspecto del universo en este rango espectral. Para observar la emisión de los objetos celestes en rayos X es necesario salir de la atmósfera de la Tierra, que absorbe la totalidad de los rayos X emitida por el universo. Por eso, las observaciones en este rango espectral se deben realizar con telescopios en órbita. La década de los sesenta marcó el inicio de la astronomía en

este rango espectral. El descubrimiento de la primera fuente de rayos X procedente del espacio, Scorpio X-1, fue en 1962 y Riccardo Giacconi, director del experimento científico, obtuvo el Premio Nobel de Física en 2002. Las observaciones realizadas desde observatorios espaciales enviados por la NASA, la ESA o la agencia japonesa JAXA han descubierto miles de fuentes de rayos X, habiendo desvelado muchos misterios, pero también han planteado nuevos retos para entender el universo.

Existen estrellas y otros cuerpos cuya luminosidad en este rango espectral es hasta 100.000 veces mayor que su luminosidad en todos los otros rangos del espectro juntos. Hoy día se sabe que el universo visto en estas longitudes de onda difiere notablemente del observado en el rango visible. Las fuentes de rayos X se generan en el universo cuando la materia se calienta a temperaturas de millones de grados. Estas temperaturas se originan en sistemas muy variados, como algunas estrellas, incluido el Sol, supernovas, estrellas de neutrones, agujeros negros, cúmulos de galaxias, fusiones de galaxias y nubes de gas interestelares e intergalácticas, entre otros fenómenos.

En el Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC), distintos grupos están dedicando su investigación a desvelar el comportamiento del universo en este rango espectral. Hay que destacar los resultados del grupo liderado por Jorge Casares, dedicado desde 1988 al estudio de estrellas binarias de rayos X. Jorge Casares y su grupo han publicado resultados muy interesantes, como los tres que se describen a continuación:

Artículo: Swift J1357.2-0933: the faintest black hole?
Armas Padilla, M., et. al, (2014) MNRAS, 444, 902.

Detectan y miden la luminosidad en rayos X de sistema Swift J1357.2-0933 en quietud. Creen que este sistema es el prototipo de una población oculta de agujeros negros con inclinaciones extremas. Son, por tanto, difíciles de detectar porque el disco de acreción oculta al objeto compacto y, en consecuencia, tienen erupciones muy poco luminosas en rayos X. (Ver el trabajo publicado por el grupo en la revista *Science* 339, 6123, 1048-1051 [2013]).

Artículo: Discovery of X-Ray Emission from the First Be/Black Hole System
Munar-Adrover, P., et. al. (2014) The Astrophysical Journal Letters 786, 2, L11, 5.

Igualmente, en este trabajo presentan la primera detección de emisión X en el sistema MWC 656, con una luminosidad consistente con lo esperado para el caso de acreción ineficiente en quietud. Este objeto es clave porque se trata del primer agujero negro conocido alimentado por el disco circunestelar de una estrella compañera de tipo Be, resultado que publicaron el año pasado en *Nature* 505, 7483, 378 (2014). Mientras que conocemos más de 80 sistemas binarios con estrellas Be

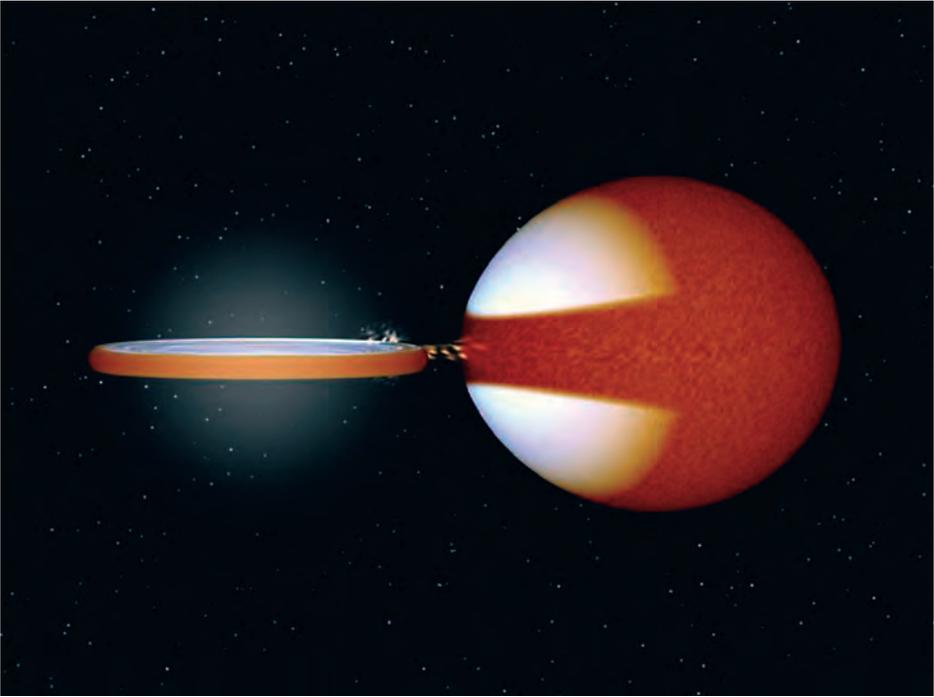


Imagen 5. Simulación del objeto X0921-630 (Créditos: R. Hynes 2005).

y estrellas de neutrones, hasta ahora no había ninguno con un agujero negro en lugar de la estrella de neutrones. En este último trabajo proponen que su ausencia es debida a un efecto de selección (son difíciles de detectar porque acretan a un ritmo muy bajo y no muestran erupciones) y no a un sesgo evolutivo (no existen porque no pueden sobrevivir a la fase de «Common Envelope»), como se creía hasta ahora.

Artículo: Echoes from the companion star in Sco X-1
Muñoz-Darias T., et al. (2014) MNRAS 379, 4, 1637.

En este trabajo presentan la primera detección de ecos ópticos de rayos X en la estrella compañera de Scorpio X-1. Los rayos X, que se emiten cerca de la estrella de neutrones, iluminan a la estrella compañera y son reprocesados en el óptico, especialmente en líneas de emisión fluorescentes llamadas líneas de Bowen. En este trabajo presentan curvas de luz de RXTE simultáneas a curvas de luz ópticas en las líneas de Bowen, donde se observa un retraso de unos 11 segundos. Teniendo

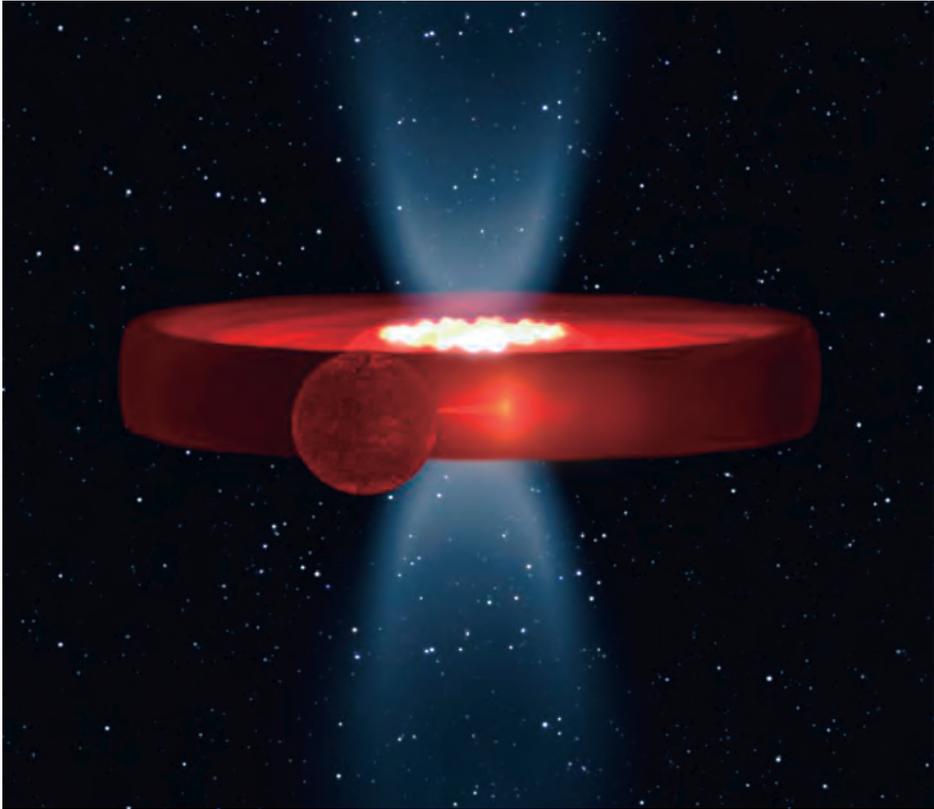


Imagen 6. Vista de canto del disco de acreción, tal y como se observa desde la Tierra. En su interior se aprecia una estructura elevada (como un «donut») que produce eclipses a la luz procedente de las partes internas del disco, las más cercanas al agujero negro. Este «donut» gira en torno al agujero negro en unos pocos minutos y los eclipses que produce se repiten a intervalos más o menos regulares (Crédito: Gabriel Pérez, SMM/IAC).

en cuenta la fase orbital de las observaciones, pueden restringir la geometría de la binaria, especialmente la distancia entre las estrellas y el ángulo de inclinación.

Otra contribución importante del IAC es la participación de este grupo en los casos científicos para el libro blanco de LOFT y ASTROGAM, futuras misiones para las llamadas M4 de la ESA.

M.^a Jesús Arévalo Morales es profesora titular del Departamento de Astrofísica de la Universidad de La Laguna e investigadora de los grupos de «Estrellas Binarias» y «Binarias de Rayos X» del Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC).

LUZ ULTRAVIOLETA: UNA EXTENSIÓN RECIENTE DE LA ASTROFÍSICA

por John E. Beckman

Detectar la radiación ultravioleta (UV) permite a los astrónomos observar objetos muy calientes del universo. Por nuestra vida cotidiana sabemos que los objetos más calientes emiten más luz azul, y que cuando alcanzan temperaturas suficientemente altas emiten en el ultravioleta. Aunque este rango del espectro no se puede ver, la física ha desarrollado buenos detectores para ello, pero existe el problema de que gran parte del UV no penetra la atmósfera terrestre. Por tanto, la astronomía UV se hace principalmente desde telescopios en satélites, razón por la que esta rama de la astronomía es muy reciente. Al principio había observaciones esporádicas tomadas desde cohetes, después telescopios UV en misiones de corta duración, como las misiones *Apolo* y *Skylab*, y observaciones desde el transbordador espacial. Los primeros satélites UV se lanzaron en los años setenta del siglo pasado, y el primer observatorio UV disponible para toda la comunidad astronómica, el satélite *IUE* (un proyecto compartido entre la NASA y la ESA), empezó sus observaciones en 1978 y siguió en activo hasta 1996. No obtenía imágenes de los objetos, sino que tomaba espectros. Su archivo sigue disponible y aún produce bastantes nuevos resultados. El proyecto más impactante con elementos de astronomía UV ha sido el telescopio espacial *Hubble*, lanzado en 1990, que ha producido imágenes y espectros en una amplia gama de longitudes de onda UV. Más recientemente, tres satélites especializados han operado en el UV: el *Extreme UV Explorer*, en ondas UV muy cortas, el *Far UV Explorer*, en ondas UV intermedias, y *GALEX* (Galaxy Evolution Explorer), que ha producido imágenes en UV de galaxias, como su nombre indica.

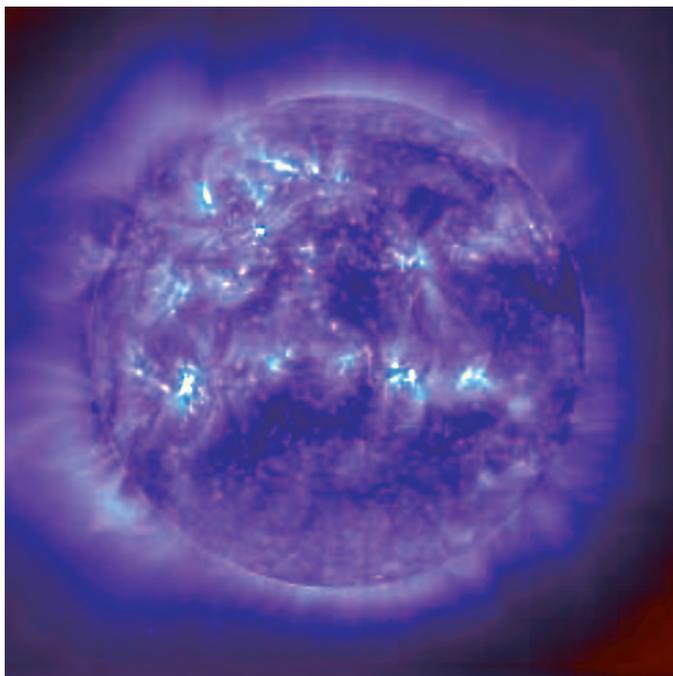


Imagen 7. El Sol en el UV (Créditos: ESA/NASA-SOHO/EIT).

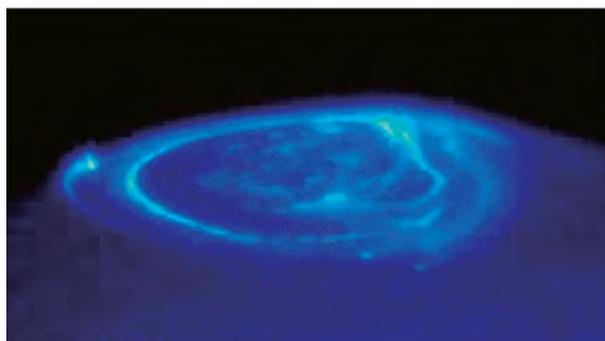


Imagen 8 e imagen 9. La aurora en la atmósfera de Júpiter en su región circumpolar (izquierda) y la aurora en la zona circumpolar de Saturno (derecha) (Créditos: HST/NASA).



Imagen 10. Imágenes de la galaxia de Andrómeda, M31, en diferentes bandas del espectro electromagnético. De izquierda a derecha: en ondas radio, en el infrarrojo, en el visible, en el UV y en rayos X (Créditos: Equipo de la misión Planck, ESA/NASA).

Las primeras observaciones astronómicas en el UV se hicieron del Sol. La figura 7 es un ejemplo. Las capas que brillan en UV están más altas en la atmósfera solar que la fotosfera, la superficie que vemos normalmente en luz visible. Estas capas —la cromosfera y, sobre todo, la corona— son mucho más calientes que la fotosfera y ofrecen un aspecto muy diferente, destacando estructuras dominadas por las líneas de fuerza del campo magnético. Entre otros resultados obtenidos en el UV de objetos del sistema solar sobresalen las espectaculares auroras observadas en las zonas circumpolares de Júpiter y Saturno, que mostramos en las figuras 8 y 9.

Los resultados más recientes sobre las galaxias son los más importantes del UV. Es instructivo comparar imágenes de las galaxias en el UV con imágenes en otras bandas del espectro electromagnético. En la figura 10 mostramos imágenes de la galaxia de Andrómeda, nuestra vecina, casi una gemela de la Vía Láctea (mejor dicho, una melliza, porque las diferencias son casi tan importantes como las similitudes). En las ondas radio, la imagen nos indica la distribución del gas interestelar, el hidrógeno atómico neutro, que es la fuente original de las estrellas. En el infrarrojo se muestra la emisión del polvo interestelar, que viene mezclada con las moléculas interestelares, y las zonas de la formación de futuras estrellas. La imagen en el visible, tomada con el telescopio espacial *Hubble*, muestra con detalle nítido las estrellas, el gas y el polvo interestelar, y en la imagen UV del satélite *GALEX* aparecen las estrellas calientes, que son estrellas masivas y jóvenes. Son las estrellas más potentes en la galaxia de Andrómeda y se forman principalmente en los brazos espirales y en los alrededores del núcleo de la galaxia. Estas estrellas son las dinamizadoras del universo. Son millones de veces más brillantes que nuestro Sol, derrochan su fuel de tal manera que tienen vidas muy cortas y terminan sus

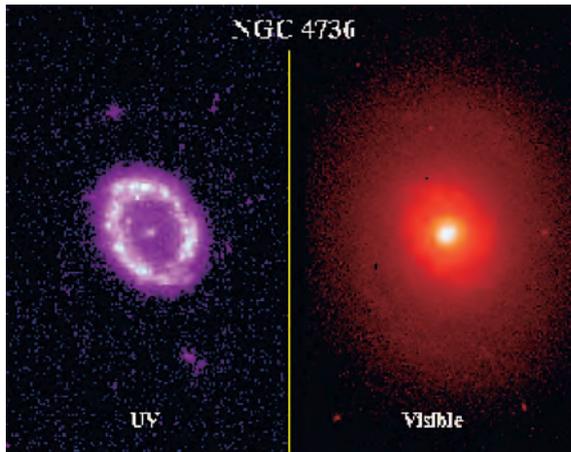


Imagen 11. Imágenes de la galaxia NGC 4736 en el UV y en el visible. El anillo brillante de «diamantes» en el UV es una zona donde se están formando estrellas masivas. La emisión en el UV viene de ellas y del hidrógeno ionizado alrededor de cada cúmulo de estrellas. En el visible se ven las estrellas más viejas (Créditos: HST/NASA).



Imagen 12 e imagen 13. La galaxia espiral M81: imagen en UV de *GALEX* (izquierda) y en el visible desde el telescopio de 4,2 metros de Kitt Peak (derecha) (Créditos: GALEX/NASA).

vidas en explosiones de supernova. Producen casi todos los elementos químicos (aparte del hidrógeno, una parte del helio y una parte del litio, que se produjeron en la gran explosión inicial) y estos elementos se distribuyen alrededor de las galaxias por las explosiones de supernova. Forman parte de nuestro cuerpo, con lo cual empezamos nuestra existencia en esas estrellas masivas. Para estudiarlas se necesita la astronomía UV, no solamente por las imágenes, sino por los espectros, que nos indican sus composiciones. Algunas de las líneas espectroscópicas que los astrónomos usan para diagnosticar las estrellas y el gas interestelar ocurren en el UV. La más importante es la línea Lyman- α , la línea fundamental del átomo de hidrógeno, pero muchas líneas de los elementos ionizados (oxígeno, carbono, azufre, nitrógeno y silicio) se emiten en el UV. Desde la época del satélite *IUE* hemos podido estudiar los fenómenos que emiten estas líneas, y nuestro entendimiento tanto de las estrellas masivas como del gas caliente en el medio interestelar ha mejorado muchísimo. En las figuras 11, 12 y 13 podemos ver la diferencia entre galaxias en el UV y esas mismas galaxias en el visible. Con el telescopio *GALEX* se han descubierto recientemente objetos que brillan en el UV en zonas muy lejanas del centro de ciertas galaxias, lo que nos indica que hay estrellas formándose allí. Este resultado fue una gran sorpresa y está abriendo nuevas visiones sobre los procesos de formación y evolución de las galaxias.

John E. Beckman es profesor de investigación vinculado ad hónore al Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) en el Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC).

LA ASTROFÍSICA EN LUZ VISIBLE

por Artemio Herrero Davó

Todos los mitos de la Creación se muestran de acuerdo en presentar la luz como una de las primeras cosas que el Creador (o los Creadores) hacen aparecer para triunfar sobre la oscuridad. En no pocos casos incluso es la primera, y en todos ellos su aparición marca el verdadero inicio de la Creación.

Este ejemplo ilustra el incomparable valor que la luz tiene para la humanidad. Y lo mismo ocurre en la astronomía.

Cuando los mitos primitivos hablan de luz, se refieren por supuesto a la luz visible. La astrofísica se ha abierto a otros rangos de longitud de onda, pero también ella hunde sus raíces en la parte visible, donde reside nuestra experiencia diaria y nuestra forma de interpretar el universo. Y así nos seguimos sorprendiendo cuando un objeto aparece en el infrarrojo donde no hay ninguno en el visible, y la Luna, un pequeño y oscuro satélite, nos fascina con su brillo, que toma prestado del Sol.

La parte visible es, por definición, aquella parte del espectro electromagnético (la luz en su sentido más amplio) a la que nuestros ojos son sensibles. No es casualidad que esta región corresponda al máximo de la energía emitida por el Sol y a una zona de gran transparencia de nuestra atmósfera. De este modo, nuestros ojos consiguen la mayor eficiencia como detectores de luz.

No es solo que el cielo despierte nuestra admiración al contemplarlo. La información que recogemos de la luz visible es fundamental para nuestra comprensión del universo. El seguimiento de la posición de los planetas permitió descubrir las leyes que rigen su comportamiento y la misma ley de gravitación universal. Las cuentas del número de estrellas permitieron encontrar la forma de nuestra propia galaxia y comenzar a entrever las dimensiones del universo.

Los fundamentos de las técnicas actuales de observación tienen sus raíces en el análisis de la luz visible. Observando los astros a través de filtros de diferentes colores es posible obtener mucha información. Del mismo modo que el Sol es amarillo, encontramos estrellas que son rojas, azules o blancas. El color de una estrella proporciona información de su temperatura (igual que un cuerpo va cambiando de color conforme se calienta) o de su edad, ya que las estrellas se calientan o enfrían conforme evolucionan con el tiempo.

Con la ayuda de la espectroscopia (que descompone la luz en estrechos rangos de longitud de onda, como si la observáramos en infinidad de colores) y de la fotografía (que permite registrarlos) se hizo un descubrimiento fundamental: las líneas atómicas que vemos en nuestros laboratorios, huellas de los elementos químicos que las producen, se encuentran igualmente en las estrellas y otros objetos (si bien algunas veces en condiciones exóticas para nosotros). Se descubrió así que el hidrógeno, el más sencillo de los elementos químicos, es también el más abundante del universo. Y que el segundo elemento más abundante es el helio, desconocido en el momento de su descubrimiento.

Gracias a los espectros de las estrellas, galaxias y otros cuerpos, contrastados con los datos de laboratorio, hemos conseguido conocer la composición del universo y darnos cuenta de que tanto por la posición que ocupamos como por el material de que estamos hechos, no somos distintos del resto del universo. Ocupamos un lugar intermedio en la Vía Láctea, ligeramente hacia fuera, y los gases, moléculas y elementos que están presentes en la Tierra lo están en todas partes.

En ocasiones, los espectros muestran las líneas atómicas desplazadas respecto de su longitud de onda medida en el laboratorio. Este desplazamiento es debido a la velocidad con que se mueve la fuente emisora con respecto al observador (las estrellas y las galaxias, que no están en reposo respecto a nosotros) y permite conocer su velocidad relativa. Así hemos llegado a conocer los movimientos en nuestra galaxia y hemos sabido que algunas estrellas se mueven a velocidades enormes por el espacio.

Pero, además, el estudio de los movimientos de los astros nos ha abierto las puertas a dos descubrimientos de importancia trascendental: la expansión del universo y la existencia de planetas más allá del sistema solar. Ambos descubrimientos, separados por tres cuartos de siglo de investigación en astrofísica y desarrollo de sus técnicas, han sido realizados gracias al análisis de la luz visible.

Los telescopios del Observatorio del Roque de los Muchachos (ORM) y del Observatorio del Teide (OT) están especializados en la observación en el visible e infrarrojo (sin renunciar a investigaciones de primera línea en otros rangos), desde los pequeños telescopios de menos de 1 metro de diámetro hasta el impresionante *Gran Telescopio Canarias (GTC)*, con un diámetro equivalente a un espejo único de 10,4 metros, pasando por otros telescopios como el telescopio *William Herschel*, de 4,2 metros, el *Telescopio Nazionale Galileo*, de 3,6 metros o el *Nordic Optical Telescope*, de 2,5 metros. Sin olvidar los telescopios solares, más pequeños en tamaño (hasta

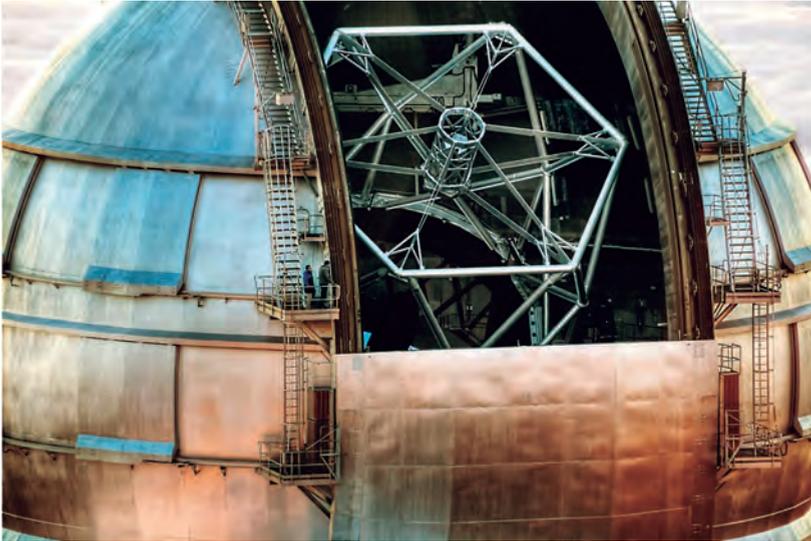


Imagen 14. El *Gran Telescopio Canarias* es la mayor máquina del tiempo construida por el hombre hasta ahora. Con sus 10,4 metros de diámetro de espejo primario, es el telescopio óptico e infrarrojo más grande del mundo (Créditos: Pablo Bonet/IAC).

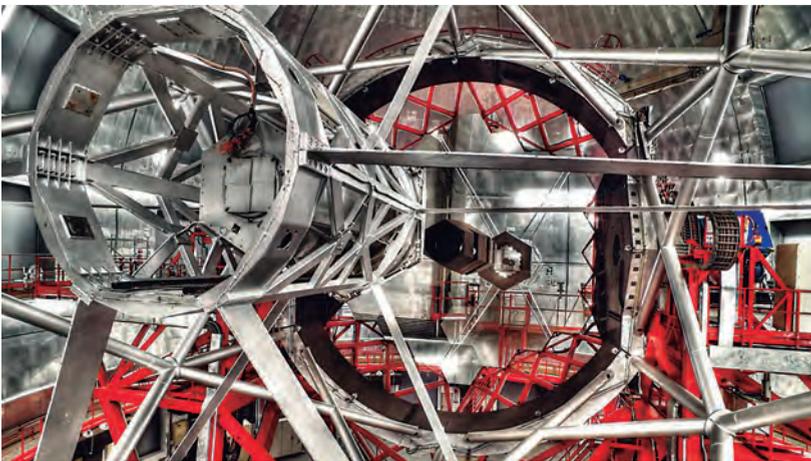


Imagen 15. Vista interior del *Gran Telescopio Canarias*, instalado en el Observatorio del Roque de los Muchachos, en la isla de La Palma. Su espejo primario está compuesto por 36 segmentos hexagonales. Recoger más luz significa ver más lejos, objetos más débiles y con mayor resolución (Créditos: Pablo Bonet/IAC).

1,55 metros, aunque el futuro *European Solar Telescope* tendrá 4 metros) al tener que observar la potente luz solar, pero igualmente avanzados tecnológicamente.

Los instrumentos se acoplan a los telescopios a fin de obtener de estos el máximo rendimiento. Son una pieza fundamental del equipo, ya que sin ellos se desperdicia la capacidad del telescopio para recoger la luz. Todas las partes del instrumento (lentes, espejos, elementos dispersores de luz, filtros y detectores) son fundamentales, y los retos técnicos, enormes y apasionantes. En el rango visible, la instrumentación está dominada por cámaras capaces de obtener imágenes de objetos muy débiles con excelente calidad; espectrógrafos capaces de alcanzar gran resolución (capacidad de descomponer la luz en longitudes de onda); y, sobre todo, por los espectrógrafos multiobjeto, que son capaces de obtener espectros de muchos objetos a la vez.

Este conjunto de telescopios e instrumentos, apoyados por las técnicas de análisis más avanzadas, han permitido a los investigadores del Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC) y otras comunidades con acceso a ellos contribuir significativamente al avance del conocimiento en astrofísica. Podemos citar como ejemplos la primera confirmación observacional de un agujero negro estelar en V404 Cygni, el descubrimiento de planetas tipo Júpiter (TrES-1), la influencia de la composición química de la estrella en la presencia de planetas, el estudio de oscilaciones y campos magnéticos en el Sol, la medida de la edad de los cúmulos globulares de la Vía Láctea, la historia de formación estelar de las galaxias cercanas, los estudios pioneros de la composición química de las estrellas en las galaxias cercanas, el descubrimiento de galaxias compuestas de material cada vez más cercano al del universo primitivo o el análisis de la estructura de galaxias lejanas.

Todos estos ejemplos, por supuesto, no cubren la totalidad de los estudios relevantes que el rango de la luz visible ha permitido a los astrofísicos del IAC y otros centros, y ni siquiera es posible decir que son los más importantes. Son, simplemente, un conjunto de trabajos que será seguido por otros cuando los nuevos instrumentos y telescopios, cada vez mayores y más potentes, estén disponibles. Es imposible predecir qué nuevas maravillas nos descubrirán, pero sí sabemos que el rango visible seguirá siendo para la humanidad la referencia fundamental de su comprensión del universo.

Artemio Herrero Davó es catedrático del Departamento de Astrofísica de la Universidad de La Laguna e investigador principal del grupo de Estrellas Gigantes Azules.

LA ASTROFÍSICA EN LUZ INFRARROJA

por Francisco Garzón López

Los objetos que componen nuestro cosmos emiten una fracción muy significativa, mayoritaria en muchos casos, en el rango infrarrojo, con longitud de onda mayor de 800 nanómetros o 0,8 micrómetros y hasta, pongamos, 500 micrómetros (los límites no son demasiado precisos). De ahí el interés de su estudio. La radiación infrarroja fue descubierta por el astrónomo británico sir William Herschel alrededor del año 1800. Herschel, un auténtico hombre de ciencia cuya influencia llega hasta nuestros días, investigaba la cantidad de energía que pasaba por los diferentes filtros de colores que usaba para observar el Sol. Diseñó un experimento en el que hacía pasar la luz solar por un prisma que la separaba en colores, y colocó termómetros en las zonas iluminadas por los diferentes colores para medir la temperatura de la luz y detectar así diferencias de energía. Con objeto de controlar el experimento, colocó un termómetro a cada lado de la zona iluminada, uno más allá del azul y otro más allá del rojo, para determinar la temperatura fuera de la zona de luz. Para su sorpresa, halló que la temperatura aumentaba desde el azul hacia el rojo, y lo seguía haciendo más allá de la zona roja. Herschel practicó diferentes experimentos con lo que llamó «rayos caloríficos» y determinó que esa luz se reflejaba, refractaba y absorbía de manera similar a la de la luz visible. Entre otras cosas, la importancia del descubrimiento de Herschel fue la de establecer que había luz, o energía, que no podía detectarse por el ojo humano.

Con el tiempo, se fueron desarrollando técnicas para la medida de la radiación infrarroja, la mayoría de ellas basadas en el cambio de temperatura del receptor al ser expuesto a la luz. Hoy sabemos que la radiación infrarroja es una

emisión básicamente térmica, esto es, que es emitida por los cuerpos materiales en razón de su temperatura y que es característica de objetos fríos. Un aspecto importante en astronomía de la radiación infrarroja es que es allí, en el infrarrojo medio y lejano, donde se emite la mayoría de la radiación del medio interestelar al ser calentado por la emisión de potentes estrellas masivas. Otra característica relevante del rango infrarrojo la constituye el que el desplazamiento cosmológico al rojo de la emisión de objetos en los confines del universo, producto de la expansión continua del mismo, hace que energía que se emite originalmente en longitudes de onda menores, característica de fenómenos de muy alta energía, la midamos en el infrarrojo. Y aún podemos añadir una razón más para justificar el interés del estudio del rango infrarrojo: la absorción de la luz por la materia que existe entre el objeto que la emite y la Tierra es mucho menor en el rango infrarrojo que en el visible, debido a la menor interacción radiación-materia en este rango, con lo que somos capaces de penetrar en regiones escondidas tras grandes masas de polvo, si observamos en el infrarrojo.

Por todo lo anterior, el interés de los astrónomos por acceder a este rango del espectro ha sido grande casi desde el desarrollo de la moderna astrofísica observacional a finales del siglo XIX. Sin embargo, las dificultades técnicas eran y son formidables. Como hemos dicho, el infrarrojo es una emisión térmica, propia de la temperatura de los objetos. Por ejemplo, un cuerpo a 20 grados emite la mayor parte de su energía térmica en 10 micrómetros. Si la temperatura es mayor, el máximo de emisión se desplaza a longitudes de onda menores, y a mayores si la temperatura disminuye. Eso implica que la instrumentación infrarroja deba situarse en entornos muy fríos, para disminuir la contaminación por la emisión del propio instrumento. Hay otro aspecto que hace difícil la observación infrarroja: la atmósfera terrestre es prácticamente opaca a esa radiación, absorbiéndola casi en su totalidad y dejando pasar solamente la energía situada en unas pocas ventanas espectrales. De ahí el interés por contar con sitios de observación altos y de atmósferas particularmente limpias y secas, como los cielos de las cumbres canarias, y la necesidad de situar instrumentos de observación infrarrojos en el espacio, donde puedan trabajar sin el impedimento de la atmósfera terrestre.

De hecho, la explosión de la astronomía en el infrarrojo sucede con ocasión de la primera misión espacial dedicada a observar el cielo en el infrarrojo: el satélite *IRAS (InfraRed Astronomical Satellite)*. Lanzado en 1983, este pequeño satélite diseñado y construido conjuntamente por los Estados Unidos, Reino Unido y Países Bajos, con un telescopio de sólo 57 centímetros de apertura, fotografió sin descanso el cielo en 4 bandas infrarrojas centradas en 12, 25, 60 y 100 micrómetros, y supuso un verdadero aldabonazo en la astronomía de la época al presentarle ante sus ojos un nuevo universo, más frío y denso de lo que se pensaba hasta la época, y con una enorme variedad de estructuras materiales no vistas hasta entonces. *IRAS* aumentó el número de fuentes astronómicas catalogadas en un 70%, detectando alrededor de 350.000 fuentes infrarrojas y revelando, por primera vez, el núcleo central de nuestra galaxia, hasta entonces oculto tras espesas nubes de gas y polvo.

Desde entonces, la astronomía infrarroja se ha desarrollado espectacularmente, apoyada por avances igualmente espectaculares en el campo de los detectores de infrarrojo e instrumentación asociada. El éxito de *IRAS* dio pie a una misión de la Agencia Europea del Espacio (ESA), el observatorio espacial *ISO*, en el que participó el Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC) con el diseño y la construcción del instrumento ISOPHOT-S, en lo que constituyó la primera participación instrumental española en misiones espaciales de la ESA. El satélite *ISO* se puso en órbita desde la base de Kourou de la ESA en abril de 1995, y observó el cielo en prácticamente todo el rango infrarrojo, desde los 2 a los 200 micrometros, durante más de 2 años, según programas de observación propuestos y diseñados por prácticamente toda la comunidad astronómica mundial. Pasará todavía tiempo hasta que exploremos completamente los resultados de esa misión.

Actualmente está en órbita el observatorio infrarrojo *Spitzer*, misión conjunta de NASA y ESA, y en 2009 se puso en órbita el satélite *Herschel-Planck*, en el que también participamos desde el IAC. Por acabar con este repaso de las misiones espaciales, el sustituto del telescopio espacial *Hubble*, el *James Webb*, con su enorme espejo de 8 metros y que se pondrá en órbita alrededor de 2017, estará dedicado en exclusiva a la observación infrarroja.

Como complemento a esta batería de observatorios espaciales, se lleva a cabo desde hace décadas un importante esfuerzo instrumental de los más importantes observatorios e instituciones astronómicas del mundo, destinado a dotar a la comunidad de instrumentos cada vez más sofisticados de observación infrarroja. Desde el IAC participamos en esa tarea, y estamos embarcados desde hace tiempo en el desarrollo de la capacidad tecnológica necesaria para acometer la construcción de instrumentación infrarroja avanzada. Esa tecnología es especialmente novedosa en dos áreas básicamente: la criogenia o capacidad para trabajar a temperaturas del entorno de 200 grados centígrados bajo cero; y el control y lectura de mosaicos detectores infrarrojos, que también trabajan en esos entornos tan fríos. Como resultados de nuestro esfuerzo contamos en los Observatorios de Canarias con la cámara infrarroja CAIN, que equipa el telescopio *Carlos Sánchez*, del Observatorio del Teide; el espectrógrafo infrarrojo LIRIS, en servicio en el telescopio *William Herschel*, en el Observatorio del Roque de los Muchachos, y estamos actualmente construyendo el espectrógrafo multiobjeto infrarrojo EMIR, para el *Gran Telescopio Canarias (GTC)*, que esperamos tener a punto en este año 2015. También, grupos de investigación del IAC están involucrados en el desarrollo de MIRADAS, el futuro espectrógrafo IR de alta resolución para el *GTC*. Toda esta batería de instrumentos sitúa a los Observatorios de Canarias, y al IAC, en la vanguardia internacional de la observación infrarroja.

El acceso a las observaciones infrarrojas desde los Observatorios de Canarias ha dado lugar a contribuciones científicas novedosas e interesantes. Así, por ejemplo, el cartografiado TMGS (*Two Micron Sky Survey*) constituyó en su momento el mapa más profundo y extenso del contenido estelar de las regiones centrales de la galaxia, lo que nos dio pie a establecer la hipótesis de la existencia de una



Imagen 16. EMIR, Espectrógrafo Multiobjeto InfraRojo, es un espectrógrafo de gran campo que trabajará en el rango del infrarrojo cercano y podrá obtener información de numerosos objetos a la vez. Es el primer instrumento de segunda generación del *Gran Telescopio Canarias (GTC)* y será clave para el estudio de la historia de la formación de estrellas en el universo. (Créditos: Pablo López/IAC).

gran barra central en la Vía Láctea, ampliamente confirmada con observaciones posteriores. La continuación de este trabajo, en el cartografiado TCS-CAIN, de mayor sensibilidad y resolución espacial, ha permitido detallar la estructura a gran escala de las regiones más profundas y extintas de la galaxia.

Francisco Garzón López es profesor titular del Departamento de Astrofísica de la Universidad de La Laguna e investigador del Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC). Ha sido investigador principal de ISOPHOT-S, CAIN y, actualmente, de EMIR y de la participación del IAC en MIRADAS. Coordina el grupo de Estructura Galáctica en el IAC.

EL FONDO CÓSMICO DE MICROONDAS

por Ricardo T. Génova Santos

El Fondo Cósmico de Microondas (FCM) es la radiación remanente del *Big Bang* que permea todo el universo y que podemos medir como una débil señal, muy uniforme, similar a la emisión térmica de un objeto a una temperatura de 3 K (-270 grados centígrados). Fue descubierta por azar en el año 1964 por los astrónomos Arno Penzias y Robert Wilson, utilizando una antena de los laboratorios Bell en Holmdel (New Jersey, EE. UU.). Esta radiación presenta un alto grado de homogeneidad, lo que significa que, independientemente de la dirección de observación, la intensidad (esto es, la energía de esta radiación, o la cantidad de fotones que lleva asociada) es la misma. Sin embargo, los modelos teóricos predecían que, si se medía con mucha más sensibilidad, debían poder detectarse unas pequeñas fluctuaciones en función de la dirección de observación, que estarían relacionadas con las inhomogeneidades en la distribución de materia en el universo primordial. Es decir, las mismas inhomogeneidades en el universo temprano (en concreto, cuando tenía sólo 400.000 años), que más tarde darían lugar a la estructura en el universo actual (estrellas, planetas, galaxias, agrupaciones de galaxias), habrían dado lugar a estas fluctuaciones en el universo primordial. Tuvieron que transcurrir más de dos décadas, hasta que en 1989 la NASA lanzara el satélite *COBE*, especialmente dedicado al estudio del FCM, que finalmente mediría por primera vez estas «anisotropías» en el FCM. A partir de ese momento, el estudio y la caracterización de estas anisotropías se convertiría en una de las herramientas más importantes para la comprensión de nuestro universo. La importancia que los descubrimientos anteriores han tenido para la cosmología, y para la física en

general, ha quedado demostrada a través de la concesión de los Premios Nobel de Física de 1978 a Arno Penzias y Robert Wilson, por el descubrimiento del FCM, y de 2006 a John Mather y George Smoot (investigadores principales de dos de los instrumentos a bordo del satélite *COBE*) por el descubrimiento de las anisotropías.

En las décadas siguientes se desarrollaron varios experimentos en todo el mundo, con el objetivo de medir, cada vez con más precisión y con más resolución espacial, estas anisotropías. Desde el grupo de Fondo Cósmico de Microondas del Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC) se ha contribuido de manera fundamental a este campo, a través de la instalación de varios experimentos en el Observatorio del Teide, muchos de ellos en colaboración con instituciones extranjeras. El primero de ellos fue el Experimento Tenerife, perteneciente a una colaboración entre el IAC y la Universidad de Manchester, que realizó observaciones entre 1984 y 2000. Este experimento, de hecho, fue contemporáneo al satélite *COBE*, y tenía también como objetivo principal obtener la primera medida de las anisotropías del FCM. Entre los años 1994 y 1997 fue operativo el IAC-Bartol, un experimento perteneciente a una colaboración entre el IAC y el Bartol Research Institute, de la Universidad de Delaware. Posteriormente fue instalado el interferómetro JBO-IAC, operativo entre 1997 y 2002. Entre el año 1998 y el 2007 fue operativo el experimento COSMOSOMAS, liderado y desarrollado íntegramente por el IAC, que fue dedicado no sólo a observar la radiación cosmológica del FCM, sino también la emisión contaminante originada en nuestra galaxia, y que se superpone a la anterior. Finalmente, entre los años 1999 y 2008 realizó observaciones el interferómetro Very Small Array (VSA), perteneciente a una colaboración entre las Universidades de Cambridge y Manchester y el IAC. Este experimento fue uno de los primeros en obtener medidas precisas del FCM en escalas angulares entre 0,1 y 1 grado, aproximadamente. Estas medidas contribuyeron a determinar con gran precisión los principales parámetros cosmológicos que describen el universo que vemos hoy en día, lo cual ha venido a corroborar el modelo cosmológico actual, que establece que el contenido energético del universo está dominado por dos componentes llamadas «energía oscura» y «materia oscura», y que sólo el 4% corresponde a la materia ordinaria que conocemos.

El grupo de FCM del IAC también ha participado en la colaboración *Planck*, un satélite de la ESA (Agencia Espacial Europea), que ha observado el FCM en todo el cielo, con una precisión y una resolución angular nunca antes alcanzadas. Estos datos, que ya son públicos, han confirmado los resultados de todas las observaciones anteriores, pero logrando una precisión aún mayor en la determinación de los parámetros cosmológicos. En la actualidad, cuando parece ya difícil desarrollar experimentos que mejoren de forma significativa las medidas anteriores, el interés de la comunidad científica se centra en la caracterización de la polarización del FCM. Todas las observaciones anteriores se han centrado en la medida de la intensidad total del FCM. Sin embargo, se sabe que esta radiación debe tener un cierto grado de polarización, propiedad de la luz, y en general de cualquier tipo de radiación electromagnética, según la cual las ondas del campo

electromagnético asociado no oscilan de manera aleatoria en todas las direcciones, sino que tienen planos preferenciales de vibración.

El estudio de la polarización del FCM es importante fundamentalmente por la medida de los conocidos como «modos B», un patrón específico que se manifestaría en estos mapas de polarización. La existencia de estos modos B es predicha por modelos teóricos que proponen que el universo primordial, justo después del *Big Bang*, experimentó una expansión extraordinariamente acelerada conocida como «Inflación». Estos modelos fueron desarrollados a principios de los ochenta, y su motivación fue tratar de solucionar algunas inconsistencias inherentes al modelo cosmológico estándar, comúnmente aceptado. Como puede parecer evidente, es difícil encontrar una prueba observacional de un fenómeno que debió ocurrir cuando el universo tenía apenas unos segundos de vida. Pues bien, a finales de los noventa, un grupo de cosmólogos teóricos se dieron cuenta de que esta etapa inflacionaria, como cualquier otro evento físico tan energético, debió crear un fondo de ondas gravitacionales (las perturbaciones en la métrica del espacio tiempo que precedía la teoría general de la relatividad de Einstein), que a su vez debían haber dejado un patrón específico en la polarización del FCM conocido como «modos B». Es decir, mientras que, como dijimos antes, la caracterización de la intensidad total del FCM permitía extraer información acerca de las propiedades del universo cuando éste tenía sólo 400.000 años, la polarización del FCM permitía acceder a estudiar cómo se produjo la evolución del universo en los primeros segundos. Como consecuencia, rápidamente los cosmólogos observacionales se pusieron a desarrollar la instrumentación necesaria para tratar de medir esta señal de modos B, que es mucho más débil que la señal de intensidad, y por lo tanto requiere de instrumentación mucho más sensible y avanzada.

El Experimento QUIJOTE es uno de estos proyectos, resultante de una colaboración liderada por el IAC, en la que también participan el Instituto de Física de Cantabria, el Departamento de Ingeniería de las Comunicaciones (DICOM) de la Universidad de Cantabria y las Universidades británicas de Manchester y Cambridge. El proyecto ha consistido en construir dos telescopios y tres instrumentos, en distintos rangos de frecuencia, instalados en el Observatorio del Teide. Además de la detección de la señal cosmológica, QUIJOTE tiene como objetivo la medida de la señal de polarización de la emisión de tipo «sincrotrón» originada en nuestra galaxia. Se sabe, de hecho, que esta señal de tipo sincrotrón (producida como consecuencia del movimiento relativista de electrones libres en el campo magnético de nuestra galaxia), a baja frecuencia, y la conocida como emisión térmica del polvo (originada en granos de polvo interestelar), a alta frecuencia, son más brillantes que la señal cosmológica de modos B. Esto impone la necesidad de tener una caracterización muy precisa de esta señal, para posteriormente poder corregirla de las observaciones cosmológicas. Esta importancia quedó de manifiesto cuando en marzo de 2014 el equipo del experimento BICEP2 anunció, con gran repercusión mediática, la detección de la buscada señal cosmológica, y posteriormente datos del satélite *Planck* demostraron que gran parte de la señal medida correspondía



Imagen 17 e imagen 18. A la izquierda, Robert Wilson y Arno Penzias, descubridores de la radiación del Fondo Cósmico de Microondas en los Laboratorios Bell (Créditos: Ted Hardin/The LIFE Images Collection/Getty Images). A la derecha, Roberto Wilson con uno de los telescopios del Experimento QUIJOTE, en el Observatorio del Teide (Tenerife) (Créditos: Daniel López/IAC).

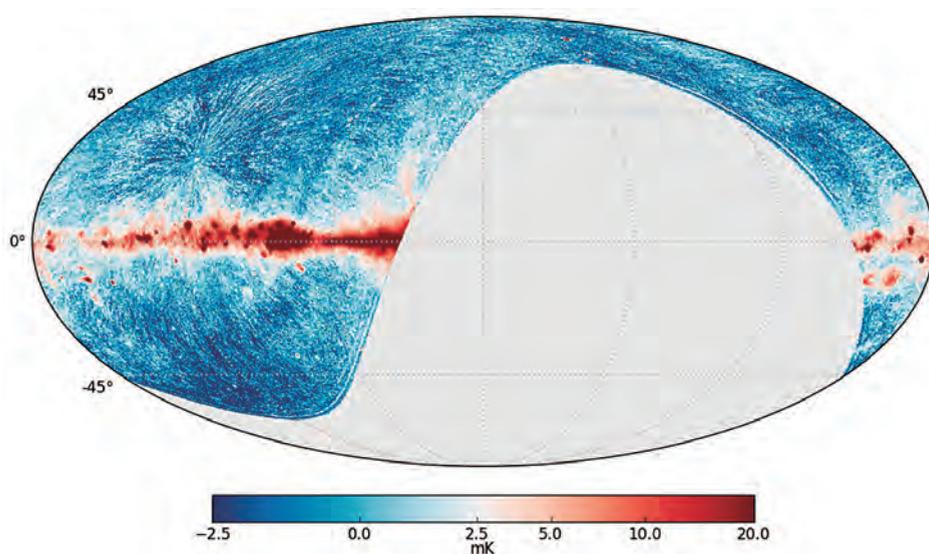


Imagen 19. Mapa de QUIJOTE a 11 GHz, en proyección galáctica, resultante de 2.000 horas de observación. Cubre todo el cielo norte ecuatorial, y en él se aprecia claramente la emisión en intensidad a lo largo del plano galáctico, así como algo de emisión difusa a alta latitud galáctica (Créditos: Stuart Harper).



Imagen 20. Telescopios QUIJOTE I y II, instalados en el Observatorio del Teide (Tenerife) (Créditos: Daniel López/IAC).

en realidad a la señal del polvo galáctico contaminante. Mientras que los datos de polarización de *Planck*, publicados hace unas semanas, permitirán caracterizar la emisión del polvo a alta frecuencia, los datos de QUIJOTE, a más baja frecuencia, proporcionarán la caracterización más precisa de la polarización de la emisión sincrotrón. Ambos conjuntos de datos se complementarán para proporcionar una corrección sobre los datos de experimentos que observarán en un rango de frecuencias intermedio.

El primer instrumento de QUIJOTE y el primer telescopio están realizando observaciones desde el Observatorio del Teide desde noviembre de 2012. El objetivo de este primer experimento es precisamente la caracterización de la emisión sincrotrón. Un segundo instrumento, a más alta frecuencia, está siendo integrado en la actualidad, y empezará a observar en verano de 2015, y un tercer instrumento está empezando a construirse. Estos dos últimos experimentos realizarán observaciones que permitirán mejorar las cotas actuales sobre la señal cosmológica de modos B, o finalmente medirla, si ésta tuviera la intensidad suficiente.

Ricardo T. Génova Santos es investigador del Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC), jefe de operaciones del Experimento QUIJOTE y participante en la misión *Planck*, doctor en Astrofísica (2006) e ingeniero industrial (2013).

LA RADIOASTRONOMÍA

por Ismael Pérez Fournon

La radioastronomía es el estudio de las ondas de radio de origen cósmico, exterior a la Tierra, con longitudes de onda mayores que 0,3 mm o frecuencias menores que 1 THz ($1 \text{ THz} = 10^{12} \text{ Hz}$). En este rango se incluyen las ondas (sub) milimétricas (entre 0,3 mm y 4,5 mm, aproximadamente).

El descubrimiento de ondas de radio producidas en objetos astronómicos tuvo lugar al comienzo de los años treinta del siglo pasado, con la detección por Karl Jansky de ondas de radio de la Vía Láctea. En observaciones posteriores se descubrieron diferentes tipos de fuentes de radio, incluyendo estrellas y galaxias, pero también nuevos tipos de objetos como radiogalaxias, radiocuásares, púlsares y máseres. El descubrimiento de la radiación cósmica en microondas también ha sido una aportación fundamental de la radioastronomía. Existen numerosos procesos que dan lugar a emisión en ondas de radio, incluyendo por ejemplo la radiación sincrotrón en plasma relativista o la emisión de líneas de átomos y moléculas en el medio interestelar. Los cartografiados en ondas de radio han descubierto galaxias activas y con formación estelar en todas las épocas cósmicas.

Los telescopios para observar el universo en ondas de radio son diferentes de los utilizados en otros rangos como el visible o el infrarrojo. Los radiotelescopios son grandes antenas de radio, similares a las que se utilizan en telecomunicación. Se pueden utilizar varias antenas simultáneamente, haciendo interferir las señales detectadas en cada una de ellas. A esta técnica se le denomina radiointerferometría y la gran ventaja que aporta es su gran resolución angular. Mientras que en el rango visible, con telescopios convencionales desde tierra, la resolución angular

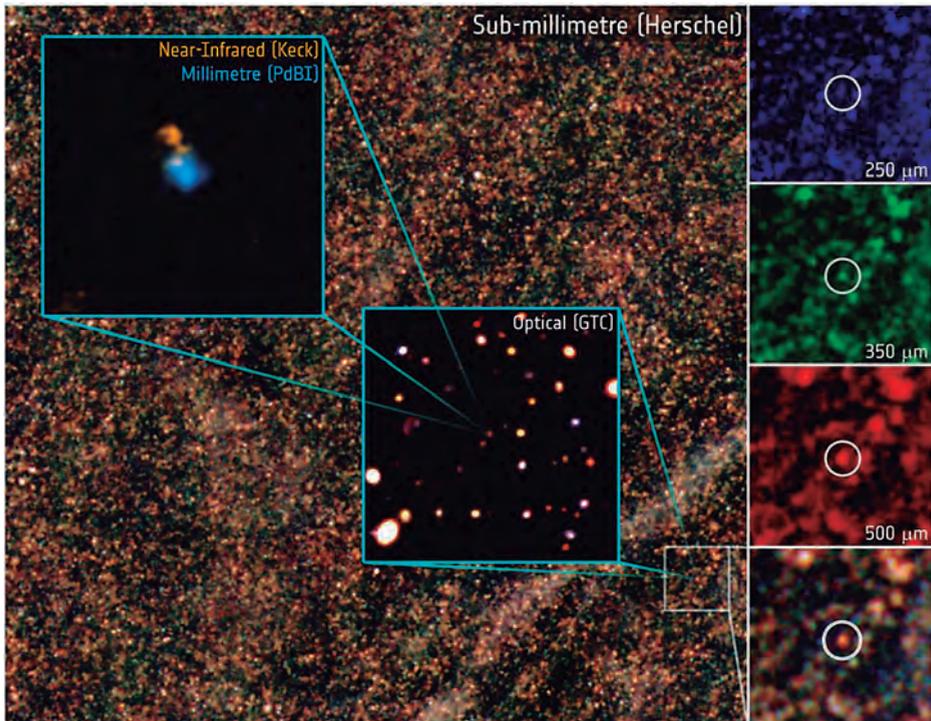


Imagen 21. Al fondo se aprecia una imagen obtenida a partir de las observaciones con el instrumento SPIRE de *Herschel*, el telescopio espacial de la Agencia Espacial Europea. Cada punto brillante es una galaxia distante con alta formación estelar. En el extremo derecho, varios recuadros muestran una porción de lo observado con SPIRE. La mancha roja, apreciable especialmente en el recuadro inferior de la derecha, es HFLS3. En el centro, al frente, otro recuadro muestra la imagen en rango visible obtenida con el *Gran Telescopio Canarias (GTC)*. A la izquierda se representa la emisión de las estrellas en HFLS3 y en una galaxia cercana en el infrarrojo cercano (en naranja), observada con el telescopio Keck y la emisión del polvo frío y gas (en azul) en ondas milimétricas observada con el interferómetro PdBI de IRAM (Créditos: ESA/Herschel/HerMES/IRAM/IAC/GTC/W.M. Keck Observatory).

es del orden del segundo de arco, en radio, y en particular con la llamada interferometría de muy larga base (VLBI por sus siglas en inglés), se puede llegar a resoluciones mil o más veces mejores.

Las superficies reflectantes de los radiotelescopios no necesitan ser tan precisas como las de los telescopios que operan en el rango infrarrojo, visible o en rayos X. Eso permite construir radiotelescopios muy grandes, con antenas de más de 100 metros de diámetro, como los de Effelsberg, en Ale-

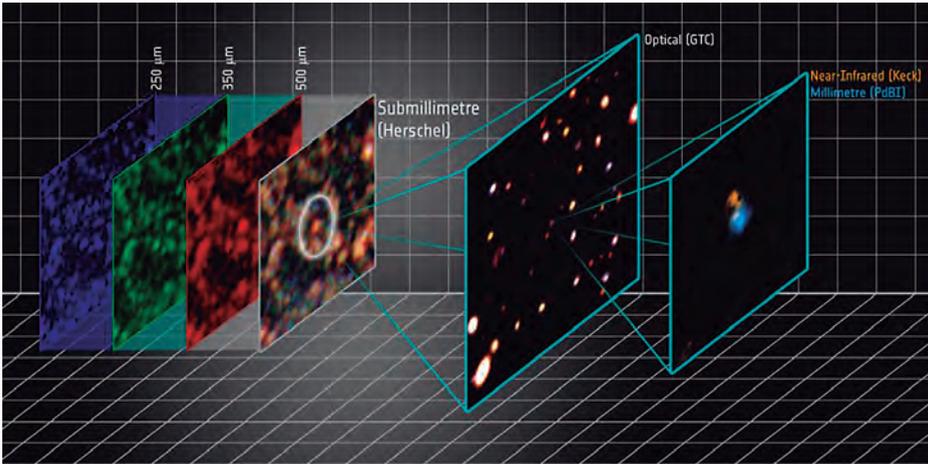


Imagen 22. A la izquierda, varios recuadros muestran una porción de lo observado en las tres bandas del instrumento SPIRE de *Herschel*. La mancha roja del interior del círculo es HFLS3. En el centro, otro recuadro muestra la imagen en rango visible obtenida con el *GTC*. A la derecha se representa la emisión de las estrellas en HFLS3 y en una galaxia cercana en el infrarrojo cercano (en naranja), observada con el telescopio *Keck* y la emisión del polvo frío y gas (en azul) en ondas milimétricas observada con el interferómetro PdBI de IRAM (Créditos: ESA/*Herschel*/HerMES/IRAM/IAC/*GTC*/W.M. Keck Observatory).

mania, o Green Bank, en Estados Unidos, o el de Arecibo, en Puerto Rico. Igual que podemos escuchar la radio en un día lluvioso, a longitudes de onda largas los radiotelescopios pueden funcionar sin problemas en sitios de baja altura. Sin embargo, a las longitudes de onda cercanas al milímetro, el vapor de agua en la atmósfera absorbe las ondas de radio. Para observar esa parte poco explorada, hasta hace poco, de las ondas de radio, necesitamos operar los radiotelescopios sub(milimétricos) en los sitios más secos del planeta, por ejemplo en lugares de más de 4.000 o 5.000 metros de altura, como el desierto de Atacama, en Chile, o en la Antártida. La mayor instalación telescópica construida hasta la fecha, el *Atacama Large Millimeter/submillimeter Array* (ALMA), está formada por 66 antenas de radio funcionando como interferómetro.

En los Observatorios de Canarias ha habido diversas instalaciones en el rango de microondas (ver la sección sobre el Fondo Cósmico de Microondas) para estudiar la radiación cósmica de fondo. Estas instalaciones son también capaces de detectar fuentes individuales intensas de ondas de radio. Además, España forma parte del Instituto de Radio Astronomía Milimétrica (IRAM), que tiene su sede en Grenoble (Francia) y cuenta con dos instalaciones científicas de

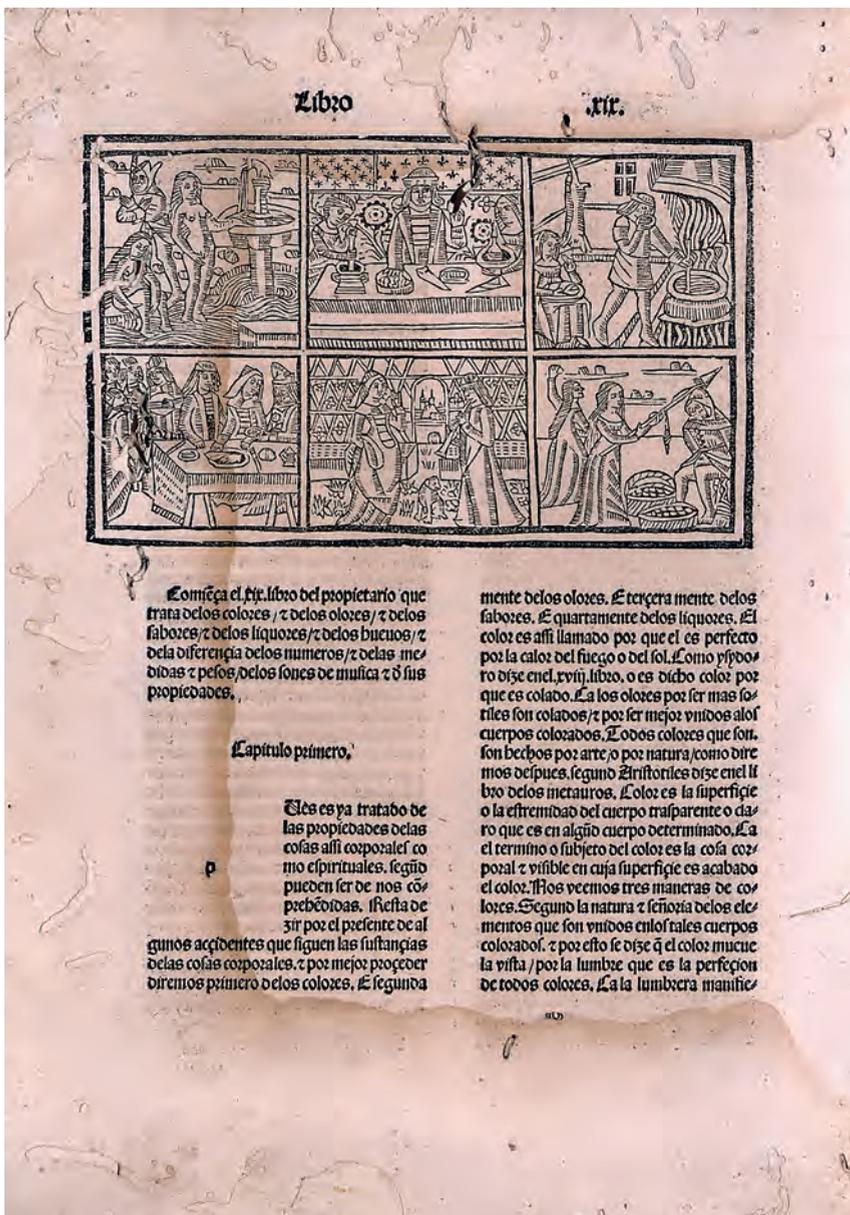
primera línea: el radiotelescopio de 30 metros en Sierra Nevada (Granada) y el interferómetro NOEMA (anteriormente llamado *Plateau de Bure Interferometer*) en los Alpes franceses. Los astrónomos españoles tienen también acceso a ALMA y a varias redes de interferometría de muy larga base, incluyendo la red europea EVN y la internacional VLBI, con antenas de radio localizadas en todo el planeta. La gran antena de radio de la NASA en Robledo de Chavela (Madrid) se utiliza también en observaciones VLBI.

Uno de los ejemplos de los resultados más recientes y novedosos a los que ha contribuido el IAC en el rango de radio fue el descubrimiento de una galaxia hiperluminosa muy distante, la más lejana conocida de este tipo (a desplazamiento al rojo de 6,34, lo que implica que la luz que detectamos ahora fue emitida en esa galaxia cuando la edad del universo era de solo 0,9 Gigaños, menos de la décima parte de la edad actual del universo, que es de 13,8 Gigaños). El descubrimiento de esta galaxia (publicado en Riechers et al. 2013, *Nature*, 496, 329) se llevó a cabo con el instrumento SPIRE del observatorio espacial *Herschel*. Sin embargo, las observaciones que determinaron la distancia a esa galaxia y sus propiedades principales se hicieron en ondas de radio, utilizando tanto antenas individuales como interferómetros. El mismo consorcio internacional HerMES está estudiando galaxias similares con el interferómetro ALMA, una de las instalaciones astronómicas donde resulta extremadamente difícil conseguir tiempo de observación debido a la gran demanda por parte de la comunidad internacional.

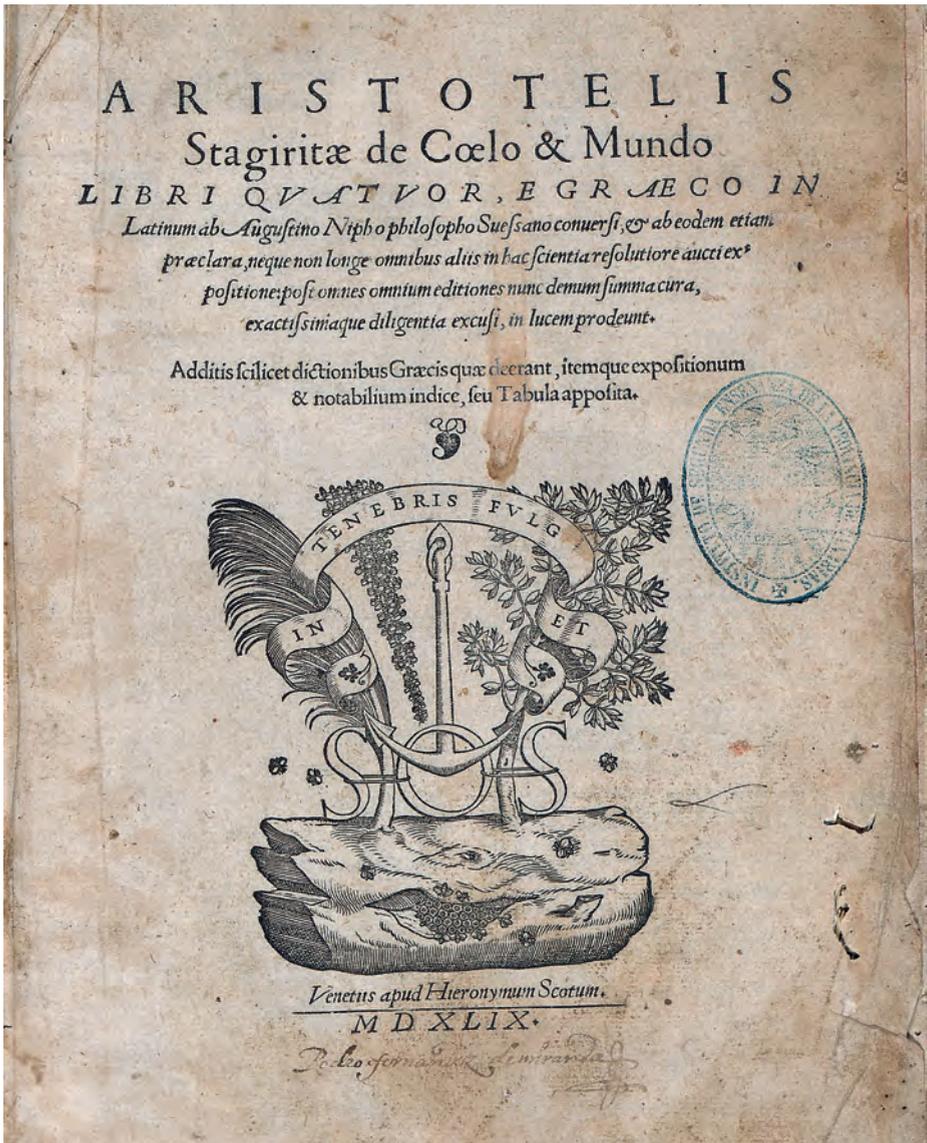
Ismael Pérez Fournon es profesor titular del Departamento de Astrofísica de la Universidad de La Laguna, investigador del Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC) y coinvestigador del equipo del instrumento SPIRE del observatorio espacial *Herschel*. Principales campos de investigación: formación y evolución de galaxias, telescopios espaciales infrarrojos.

CATÁLOGO

LIBROS DE FONDO ANTIGUO
ACERCA DE LA LUZ



s.xv. BARTHOLOMAEUS ANGLICUS. *De proprietatibus rerum* (en castellano). Trad. por Fray Vicente de Burgos. Emprimido en la noble ciudad de Tholosa: por Henrique Meyer ..., 18 de septiembre de 1494.



s.XVI. ARISTÓTELES. *De coelo & mundo libri quatuor e graeco in latinum.*
 Venetiis: apud Hieronymum Scotum, 1549.

Sign. S.XVI 651

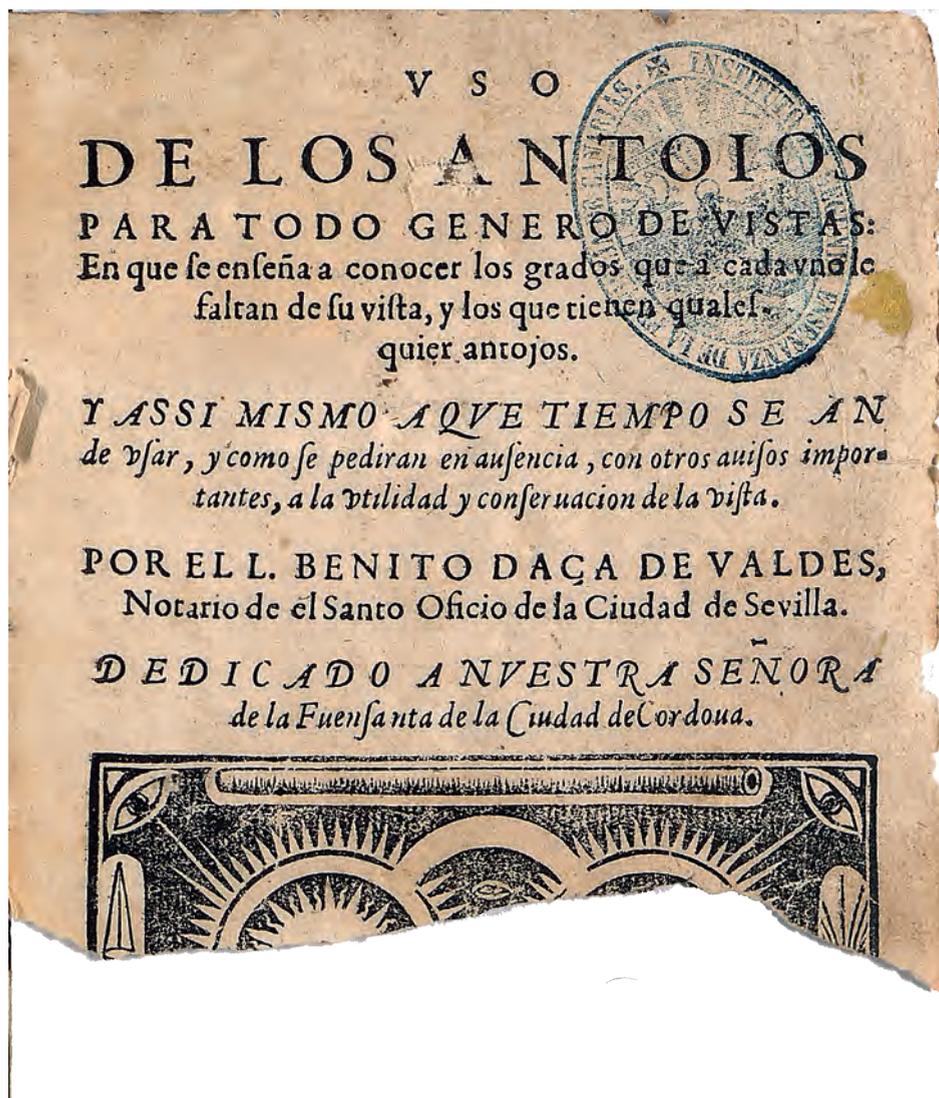


s.xvi. ISIDORO, Santo, Arzobispo de Sevilla (1562-1636).

Opera... e vetustis exemplaribus emendata.

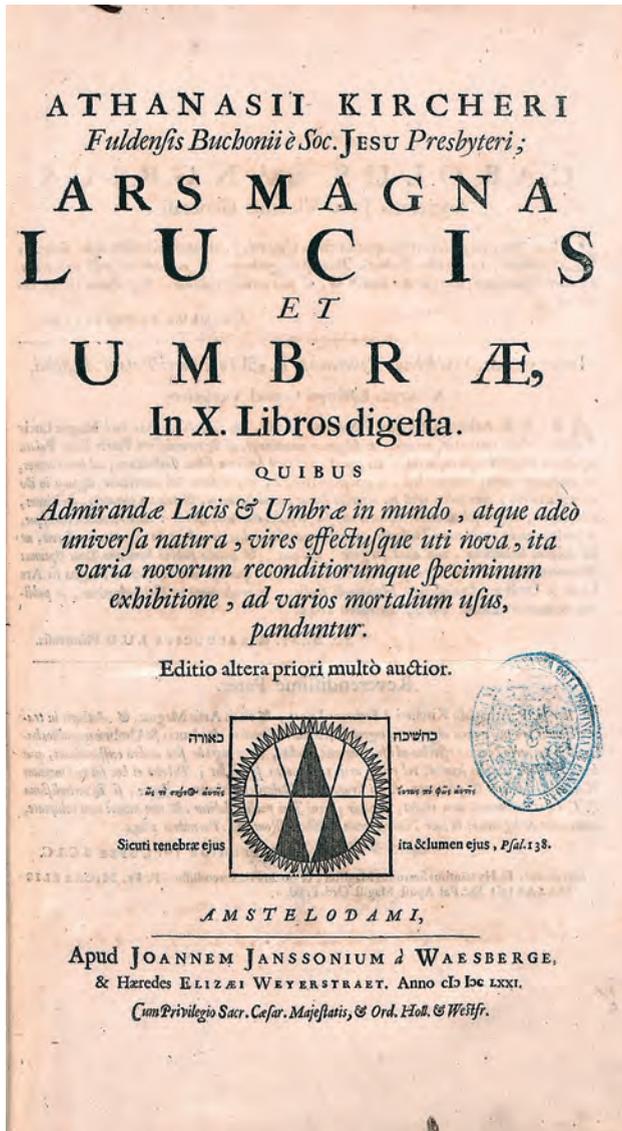
Madridi: Ex Typographia Regia, 1599 (Apud Ioannem Flandrum, 1597).

Sign. S.XVI 538



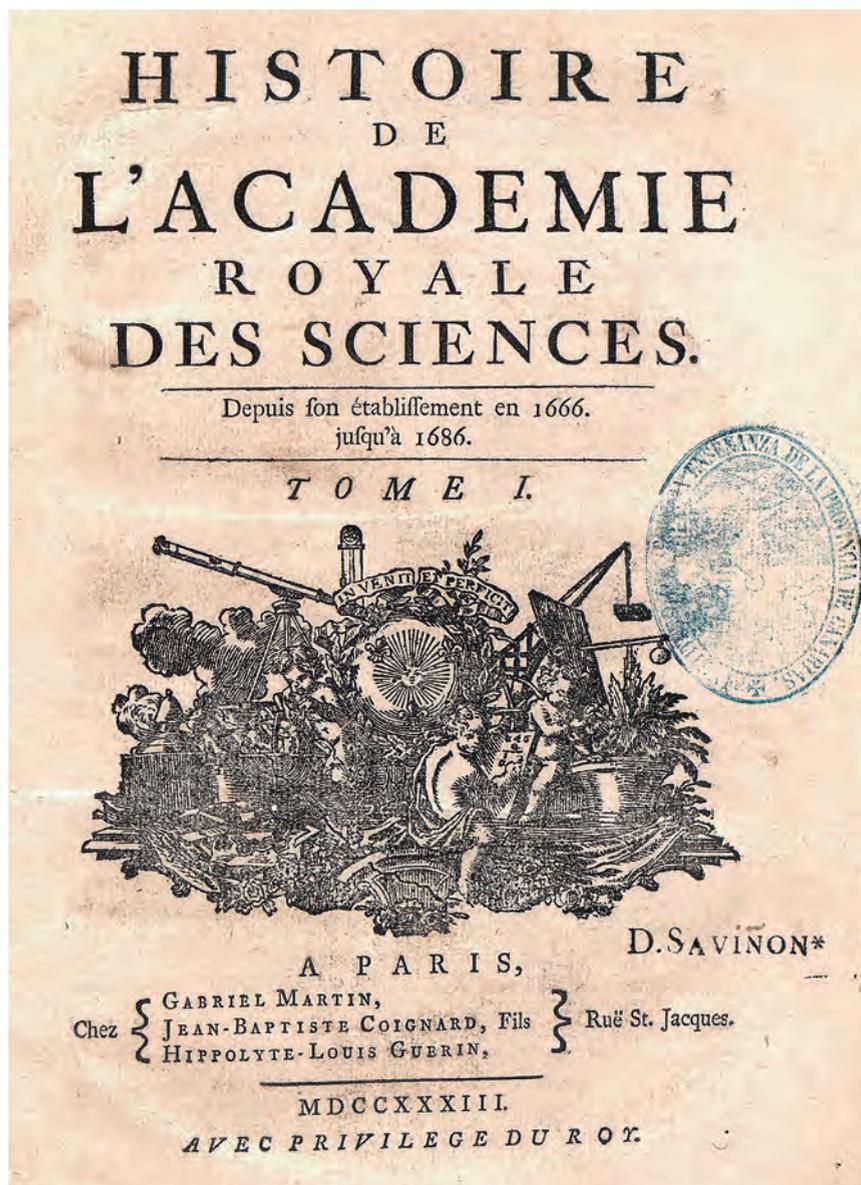
s.xvii. DAZA DE VALDÉS, Benito. *Uso de los antojos para todo genero de vistas: en que se enseña a conocer los grados que a cada uno le falta de su vista y los que tienen qualesquier antojos...* Impreso en Seuilla: por Diego Pérez, 1623.

Sign. AS.3233



s.XVII. KIRCHER, Athanasius (1601-1680). *Ars magna lucis et umbræ, in X libros digesta: quibus admirandæ lucis & umbræ in mundo, atque adeò universa natura, vires effectusque uti nova, ita varia novorum reconditorumque speciminum exhibitione, ad varios mortalium usus, panduntur.* Editio altera priori multò auctior. Amstelodami: apud Joannem Janssonium à Waesberge & hæredes Elizæi Weyerstraet, 1671.

Sign. AS 3438

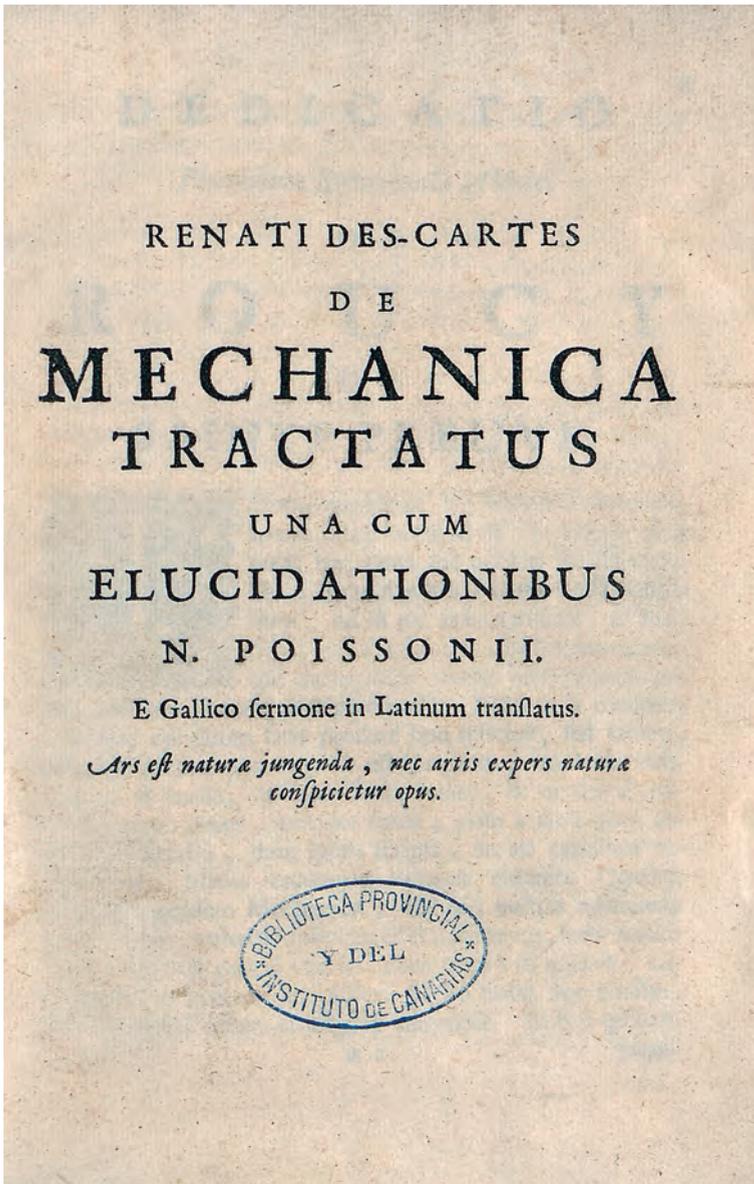


s.xviii. ACADÉMIE ROYALE DES SCIENCES (Paris).

Histoire de l'Académie Royale des Sciences. Tome 1.

A Paris: chez Gabriel Martin, J. B. Coignard, Hippolyte-Louis Guerin,
Charles-Antoine Jombert, 1733.

Sign. AP.1

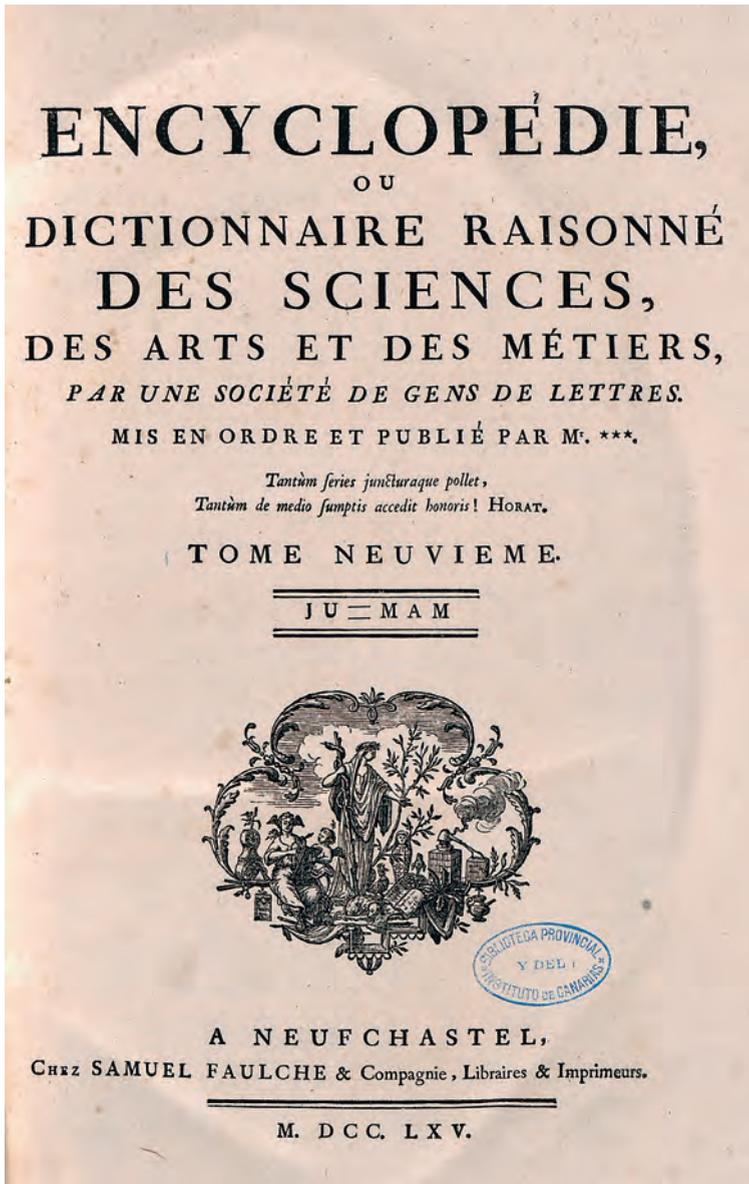


s.xviii. DESCARTES, René (1596-1650).

Opuscula posthuma physica et mathematica.

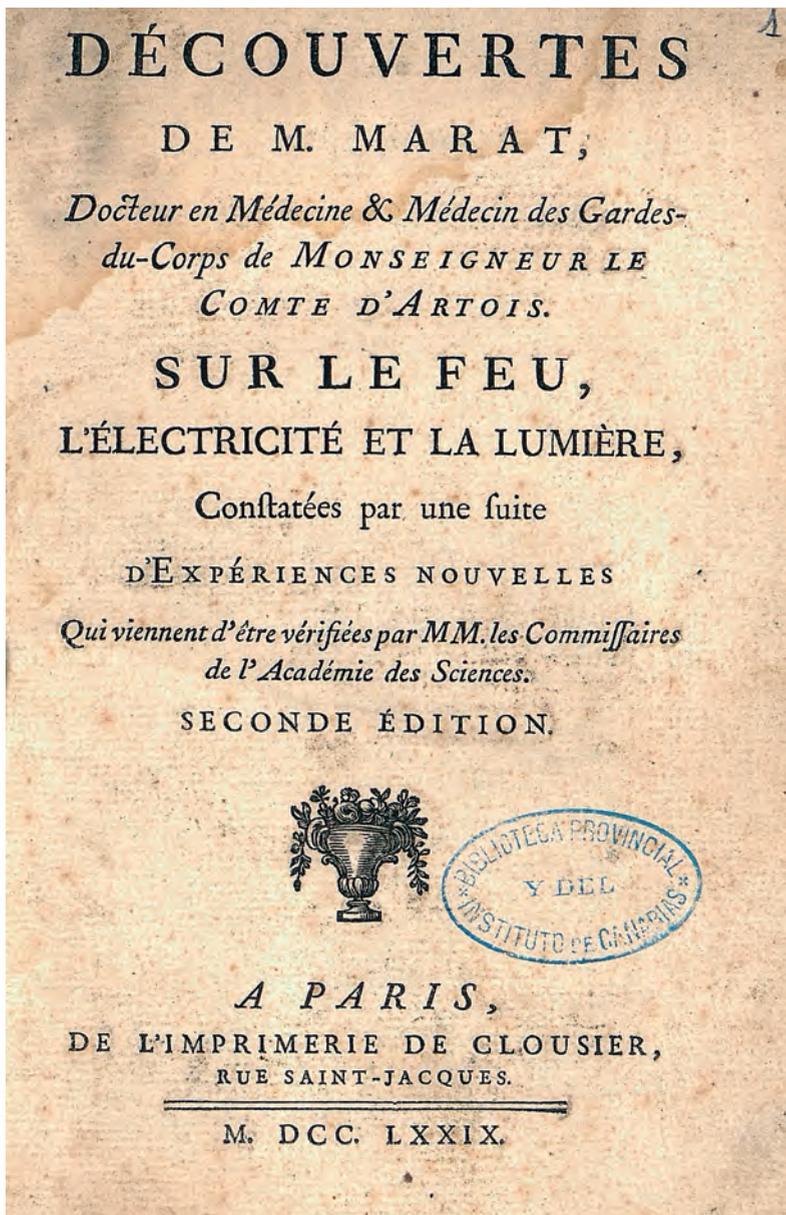
Amstelodami: ex typographia P. & J. Blaeu: prostant apud
 Janssonio-Waesbergios, Boom, & Goethals, 1701.

Sign. AS.3021

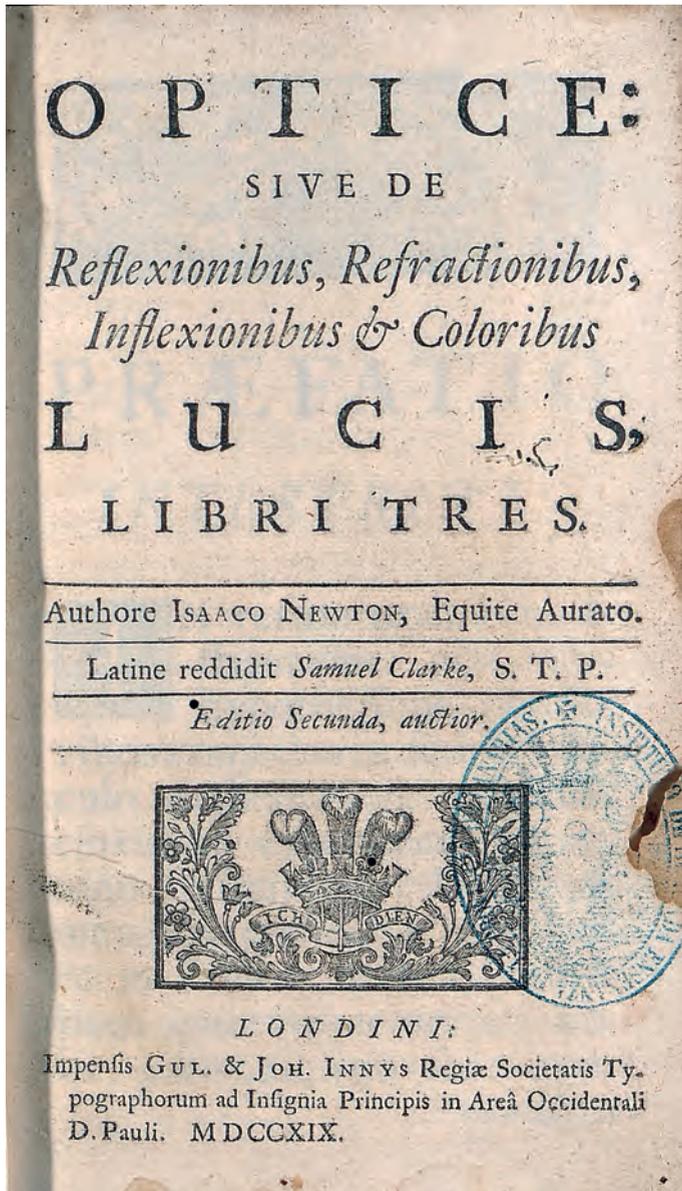


S.XVIII. *ENCYCLOPÉDIE ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers par une Société de gens de lettres.* Mis en ordre & publié par M. Diderot..., & quant à la partie Mathématique par M. D'Alembert ...
A Paris: Chez Briasson: Chez David: Chez Le Breton: Chez Durand..., 1751-1780.

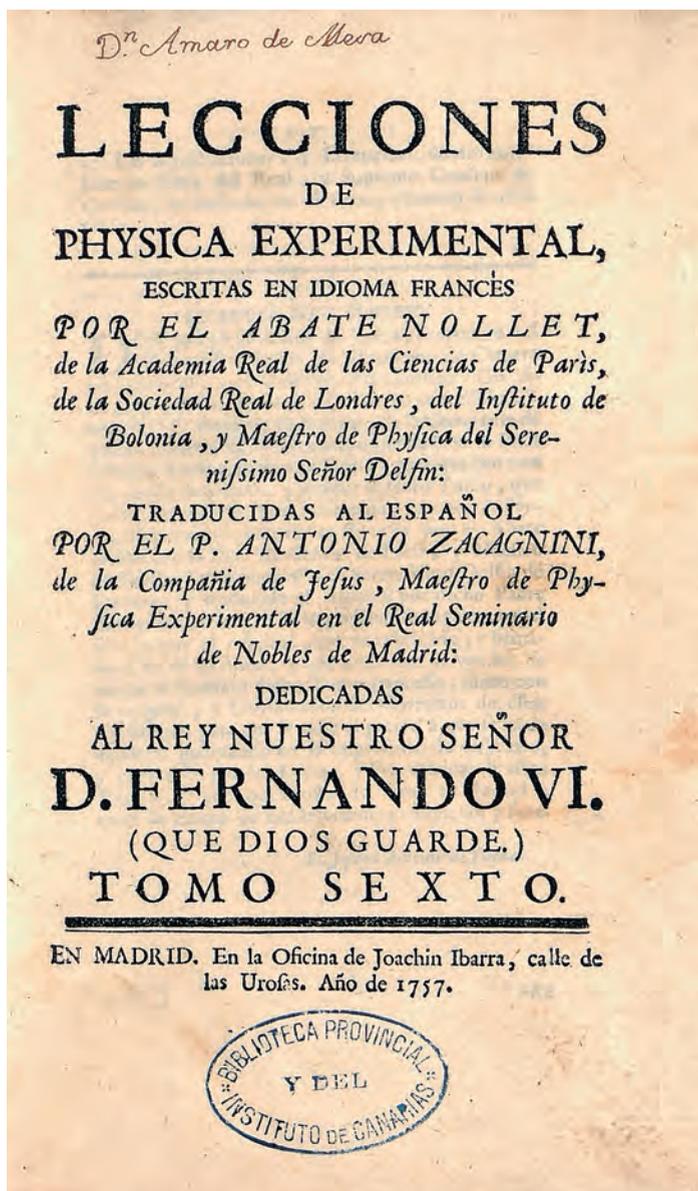
Sign. AC.40



s.xviii. MARAT, Jean-Paul (1743-1793). *Découvertes de M. Marat... sur le feu, l'électricité et la lumière: constatées par une suite d'expériences nouvelles...* Seconde édition. A Paris: De l'imprimerie de Clousier..., 1779.



s.XVIII. NEWTON, Isaac, Sir. *Optice sive de reflexionibus, refractionibus, inflexionibus et coloribus lucis: libri tres*. Latine reddidit Samuel Clarke... editio secunda auctior. Londini: Impensis Gul. & Joh. Innys..., 1719 (Ex officina Gulielmi Bowyer typographi, 1718).



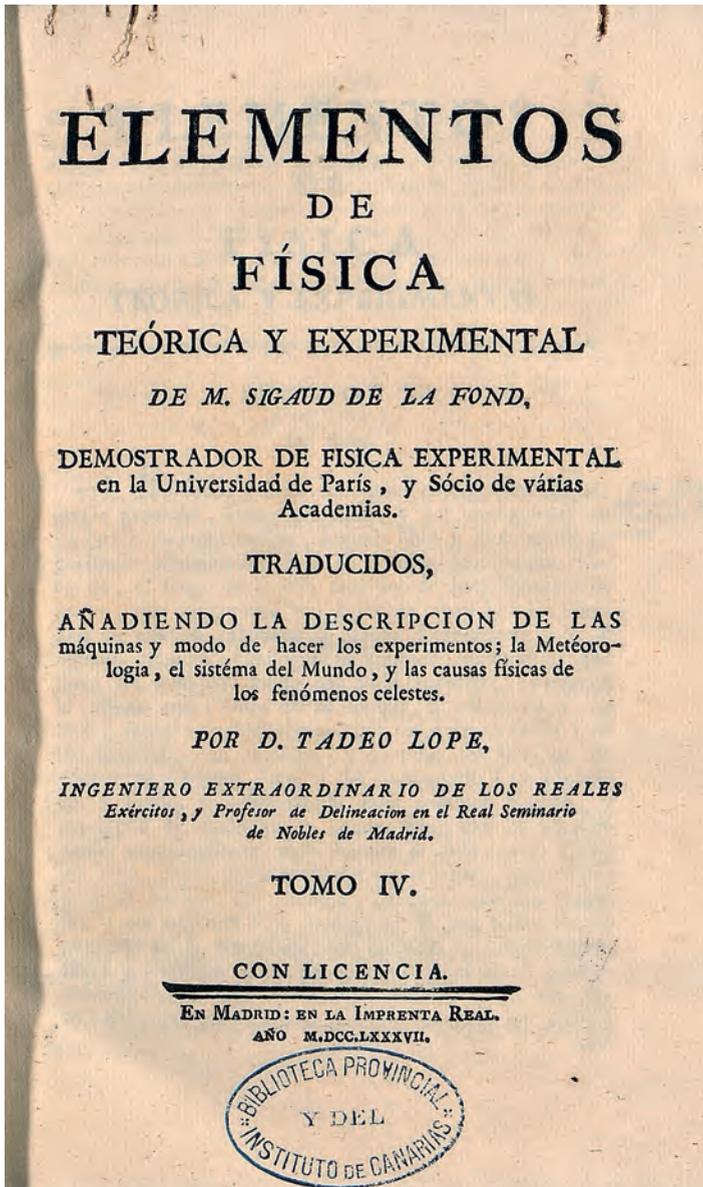
s.xviii. NOLLET, Jean Antoine (1700-1770).

Lecciones de physica experimental escritas en idioma francés.

Traducidas al español por... Antonio Zacagnini...; tomo primero.

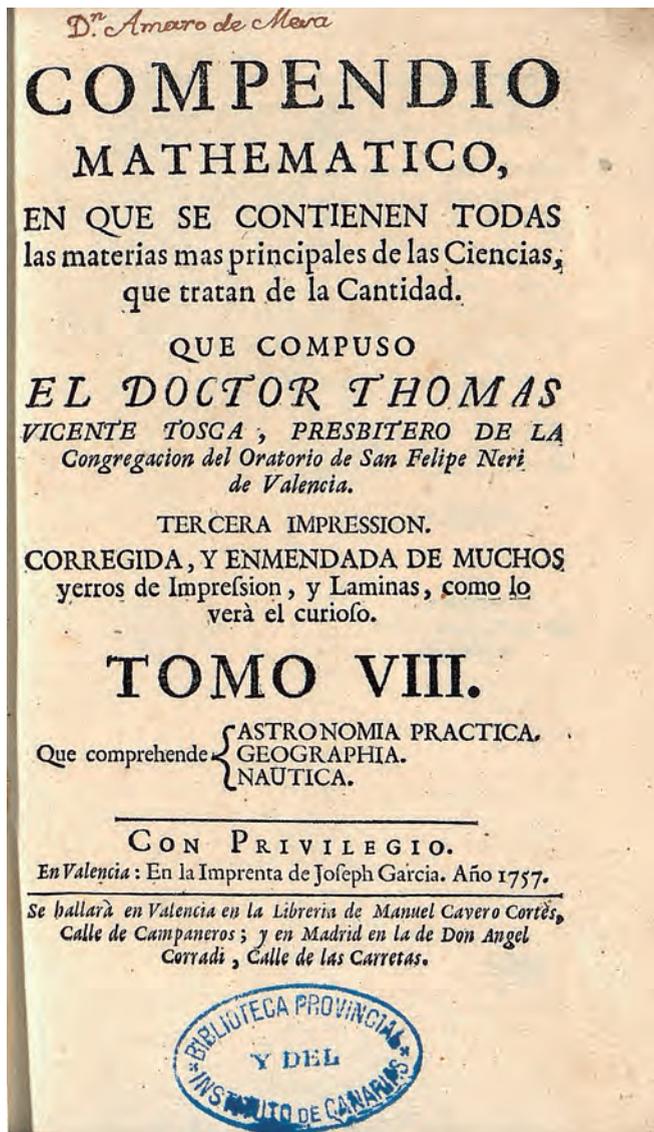
En Madrid: En la oficina de Joachin Ibarra..., 1757.

Sign. AS.2623



s.xviii. SIGAUD DE LA FOND, Joseph-Aigna (1740-1810).
Elementos de física teórica y experimental. Traducidos añadiendo la descripción
 de las máquinas y modo de hacer los experimentos ...
 por D. Tadeo Lope...; tomo iv. En Madrid: En la Imprenta Real, 1787.

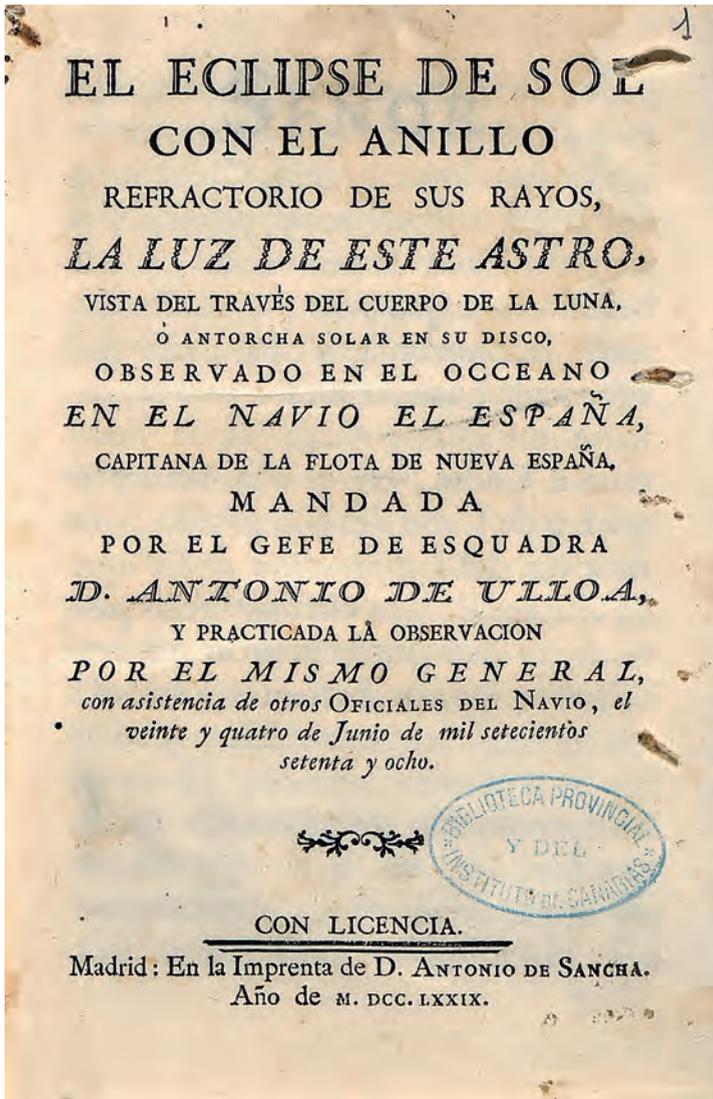
Sign. AD.763



s.xviii. TOSCA, Tomas Vicente (C.O.). *Compendio mathematico en que se contienen todas las materias mas principales de las ciencias que tratan de la cantidad.* Tercera impresion corregida y enmendada de muchos yerros de impresion y laminas como verè el curioso.

En Valencia: En la Imprenta de Joseph Garcia, 1757.

Tomo vii que comprehende Astronomia practica, geographia, náutica.



s.xviii. ULLOA, Antonio de (1716-1795). *El eclipse de sol con el anillo refractorio de sus rayos, la luz de este astro vista del través del cuerpo de la luna ó antorcha solar en su disco observado en el oceano en el navio El España, capitana de la flota de nueva España mandada por... Antonio de Ulloa y practicada la observacion por el mismo General... el veinte y quatro de junio de mil setecientos setenta y ocho.*
 Madrid: En la Imprenta de D. Antonio de Sancha, 1779.

Sign. P.V. 41(1)

535.1:539.19

RECHERCHES

EXPÉRIMENTALES ET MATHÉMATIQUES

SUR LES MOUVEMENS DES MOLÉCULES DE LA LUMIÈRE
AUTOUR DE LEUR CENTRE DE GRAVITÉ;

PAR M. BIOT,

Membre de l'Institut impérial de France, adjoint du Bureau des Longitudes,
professeur de physique mathématique au Collège de France, et d'astronomie
à la Faculté des Sciences, membre de la Société Philomatique de Paris, des
Académies de Lucques, de Turin, de Munich, et de Wilna.

*Omnis enim philosophia difficultas in eo versari videtur, ut
à phænomenis motuum investigemus vires naturæ, deinde
ab his viribus demonstremus phænomena reliqua.*

NEWTON. Princip.

Dominos Parisien.

A PARIS,

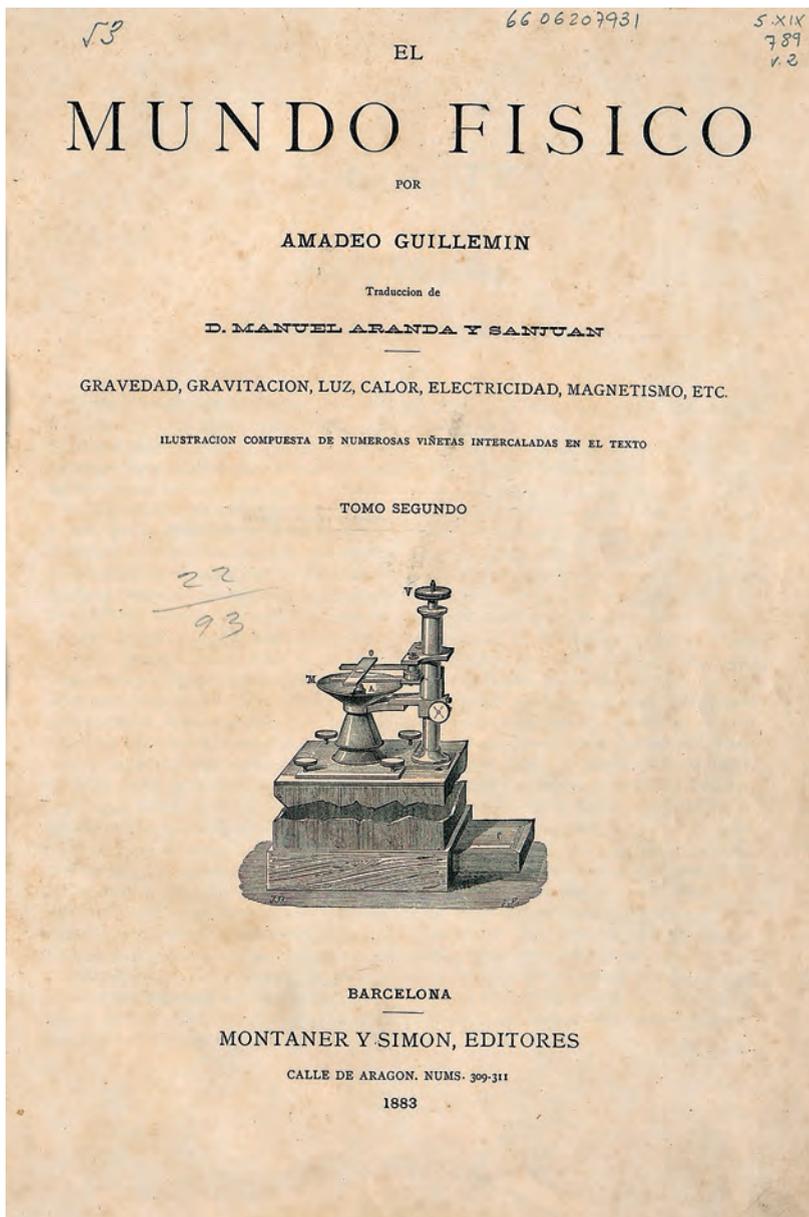
Chez FIRMIN DIDOT, Imprimeur de l'Institut Impérial de France,
et Libraire pour les Mathématiques, etc., rue Jacob, n° 24.

M. DCCC. XIV.



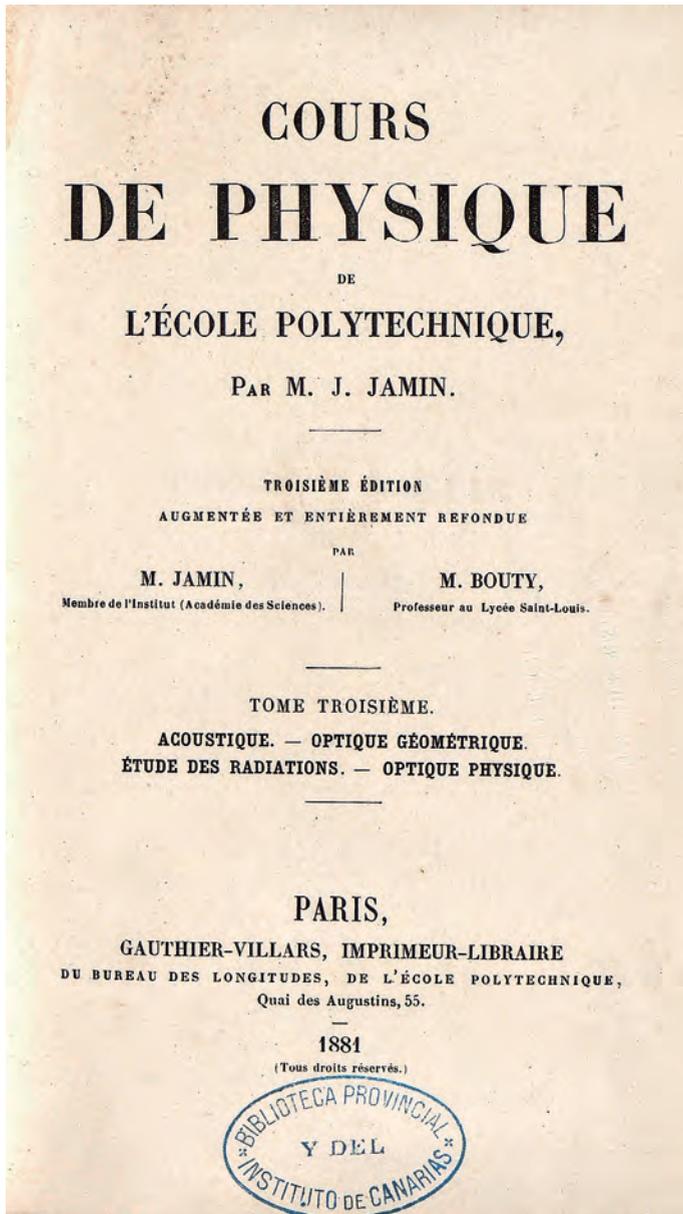
s.XIX. BIOT, Jean-Baptiste (1774-1862). *Recherches expérimentales et mathématiques sur les mouvemens des molécules de la lumière autour de leur centre de gravité.* Paris: Chez Firmin Didot, 1814.

Sign. S.XIX 1781



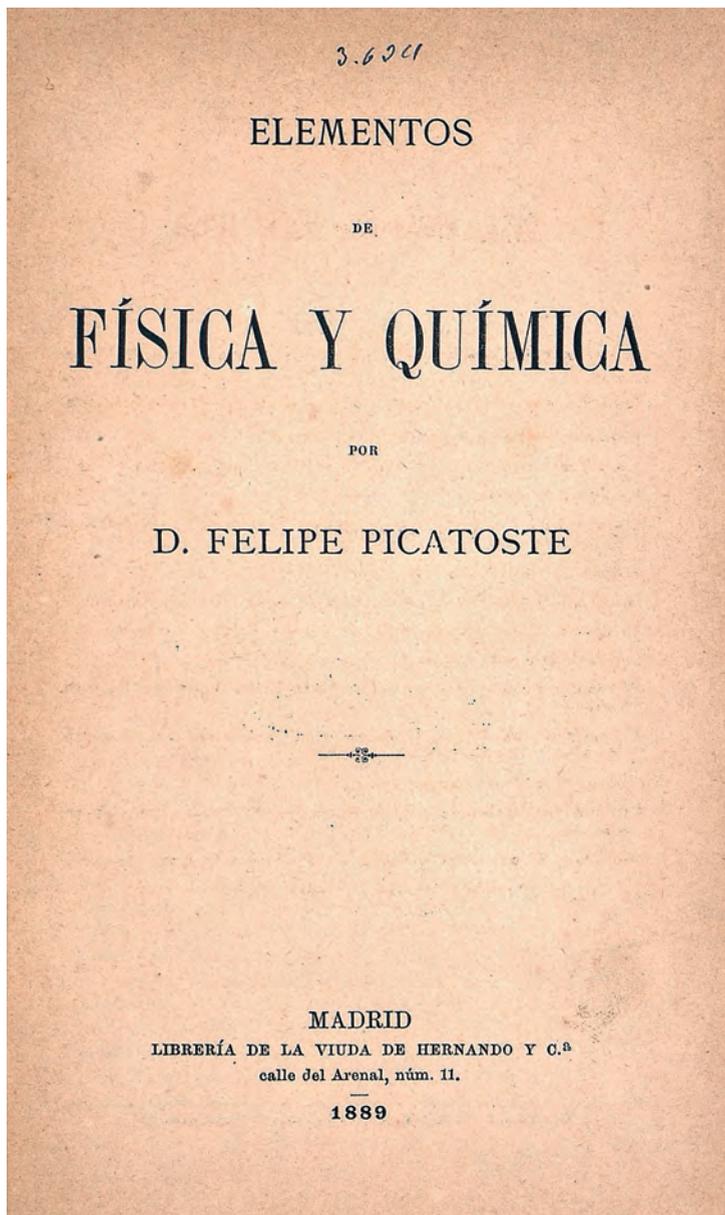
S.XIX. GUILLEMÍN, Amadeo. *El mundo físico: gravedad, gravitación, luz, calor, electricidad, magnetismo, etc.* Traducción de Manuel Aranda y Sanjuan... Barcelona: Montaner y Simón, 1883-1885.

Sign. S.XIX 789

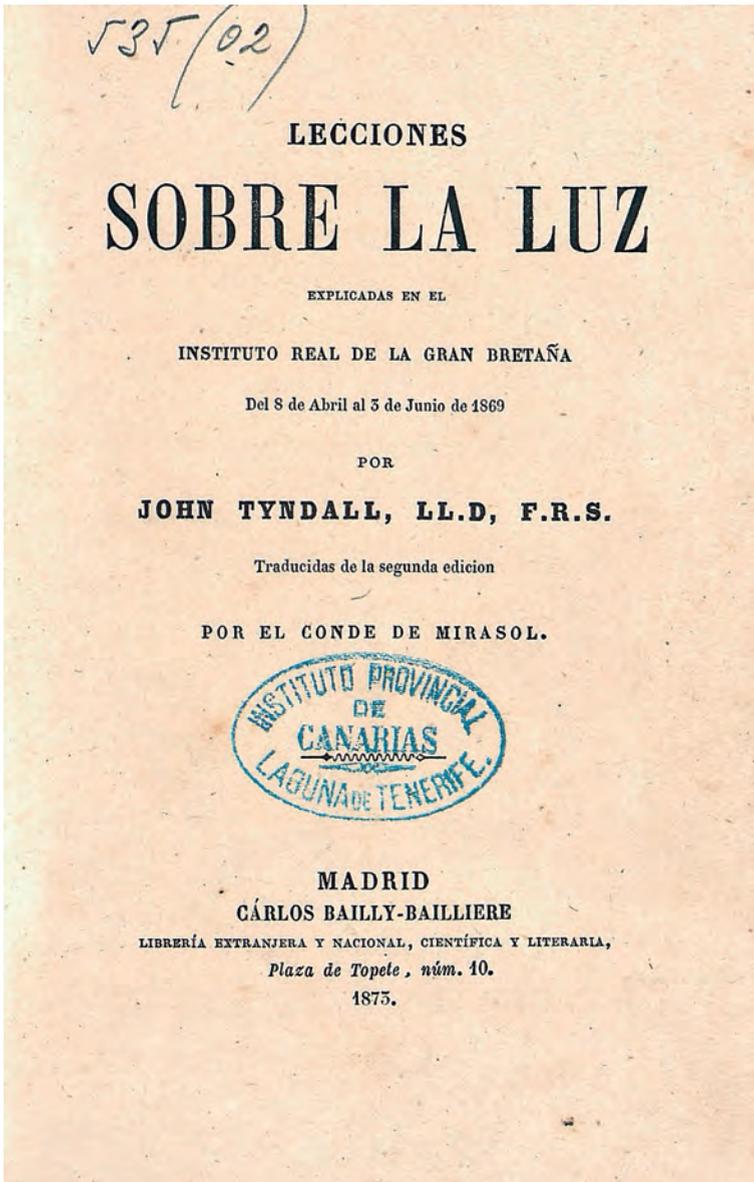


s.xix. JAMIN, Jules Celestin. *Cours de physique de l'École Polytechnique*.
3e éd. augm. et entièrement refondue par M. Jamin... [et] M. Bouty.
Paris: Gauthier-Villars, Imprimeur-Libraire..., 1878-1883.

Sign. S.XIX 2180 vol.3



s.XIX. PICATOSTE, Felipe (1834-1892). *Elementos de física y química*.
Madrid: Librería de la Viuda de Hernando y C.^a, 1889
(Imprenta de la viuda de Hernando y C.^a).

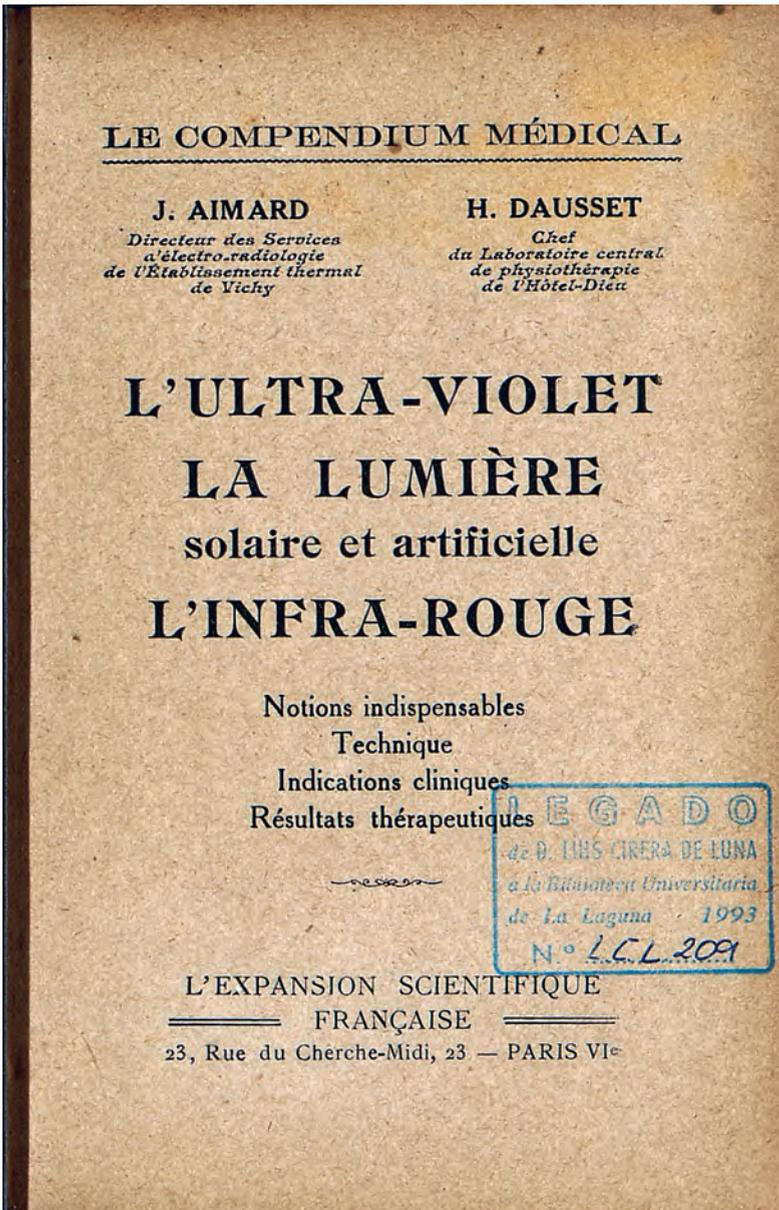


s.XIX. TYNDALL, John (1820-1893). *Lecciones sobre la luz: explicadas en el Instituto Real de la Gran Bretaña del 8 de abril al 3 de junio de 1869.*

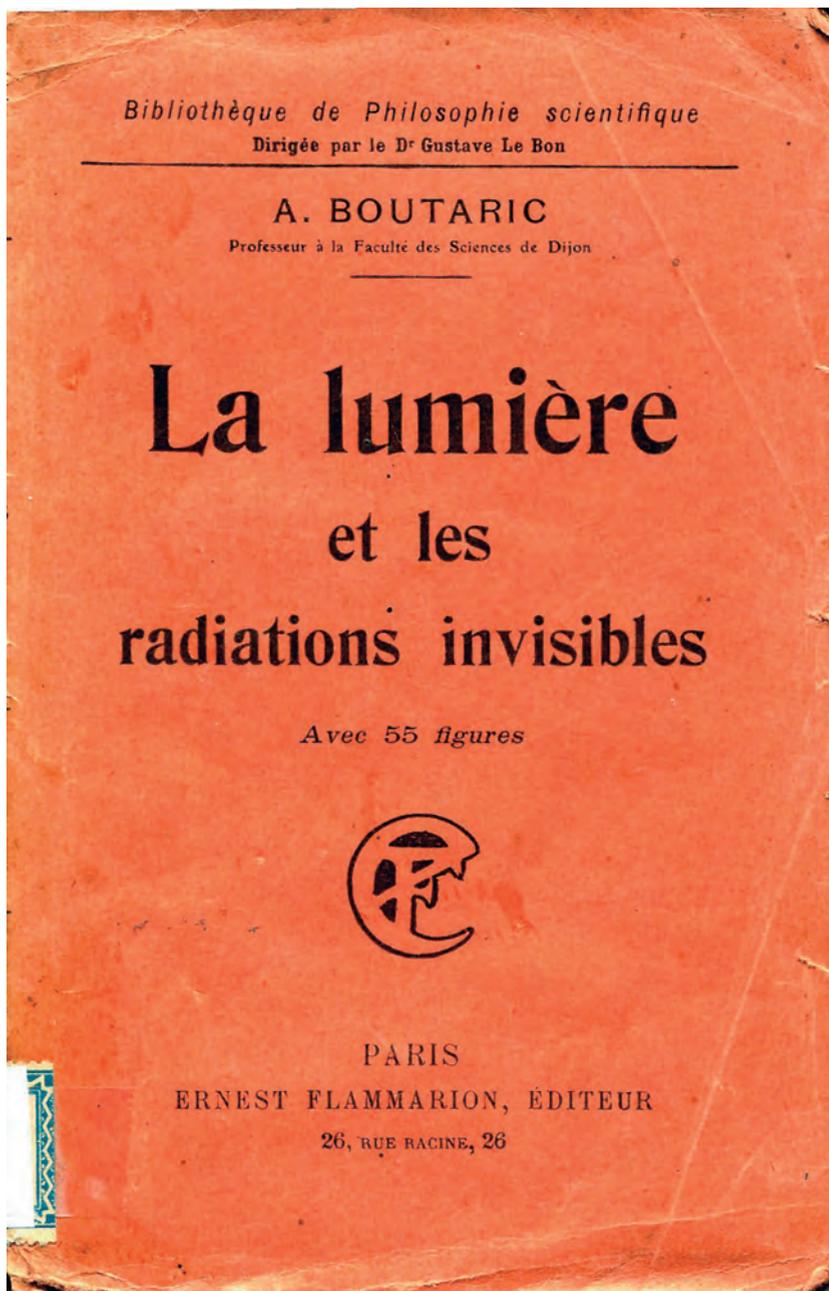
Traducidas de la segunda edición por el Conde de Mirasol.
Madrid: Carlos Bailly-Bailliere, 1873.

Sign. S.XIX 1768

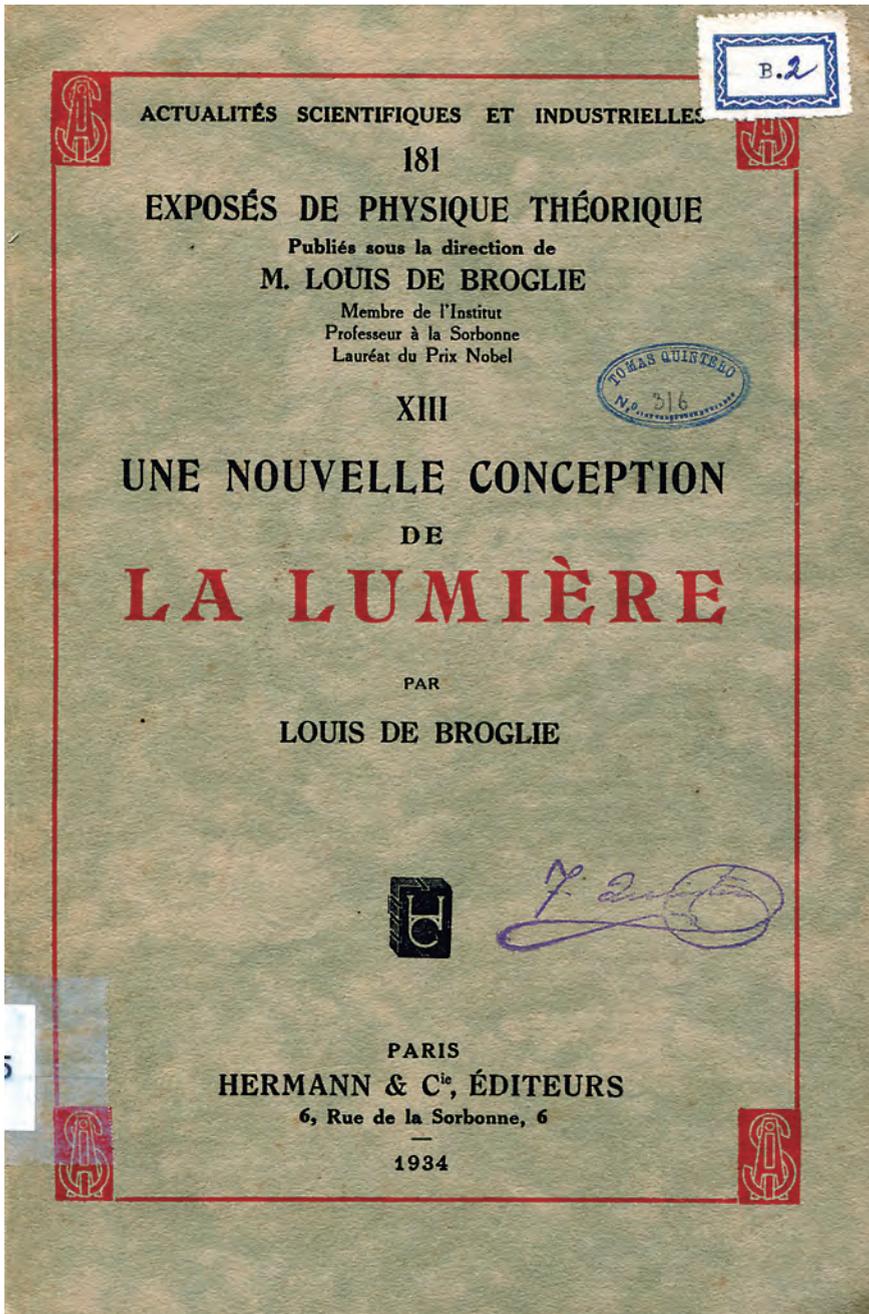
CONOCIMIENTO HISTÓRICO DE LA LUZ



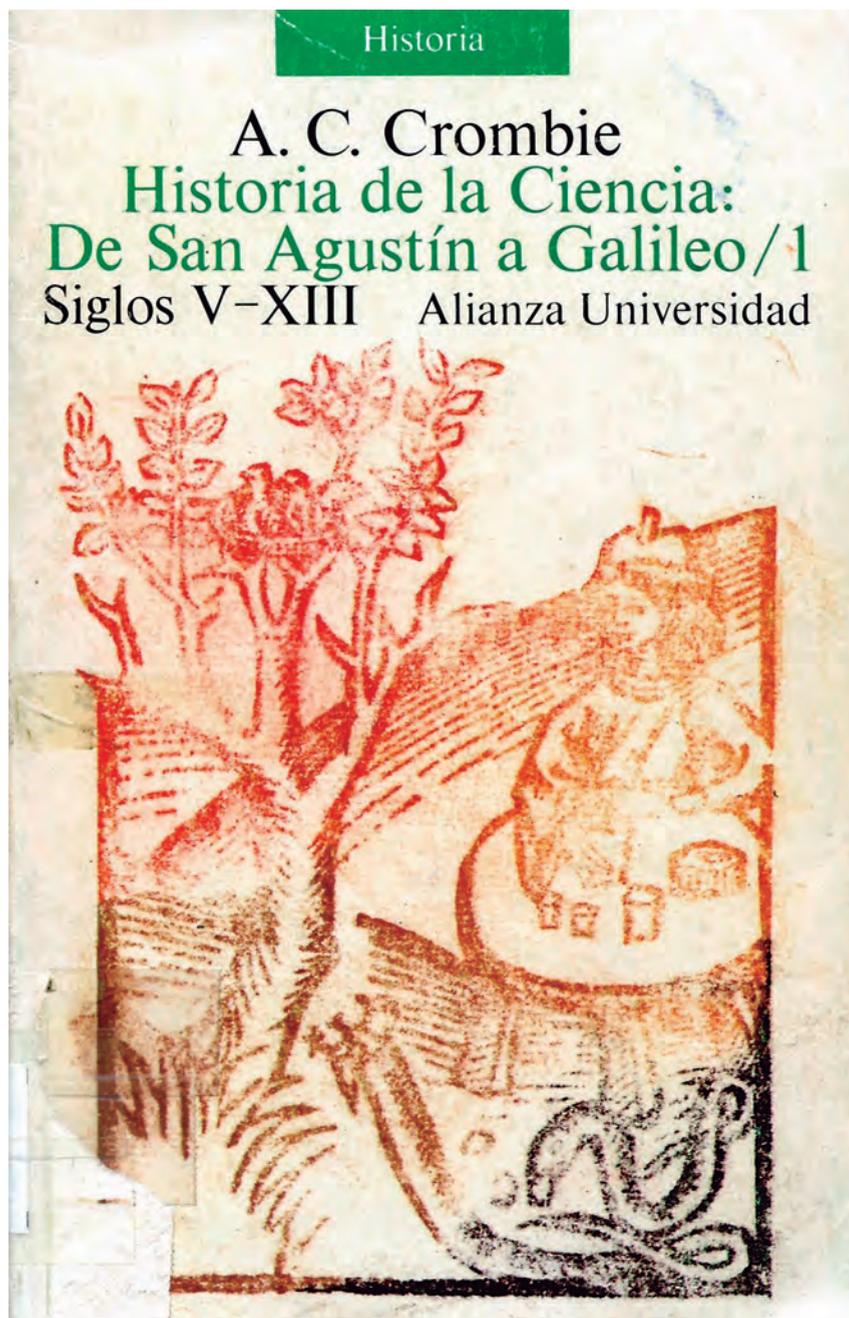
AIMARD, Jean; DAUSSET, Henri. *L'ultra-violet, la lumière solaire et artificielle, l'infra-rouge: notions indispensables, technique, indications cliniques, résultats thérapeutiques*. Paris: L'Expansion Scientifique Française, 1928.



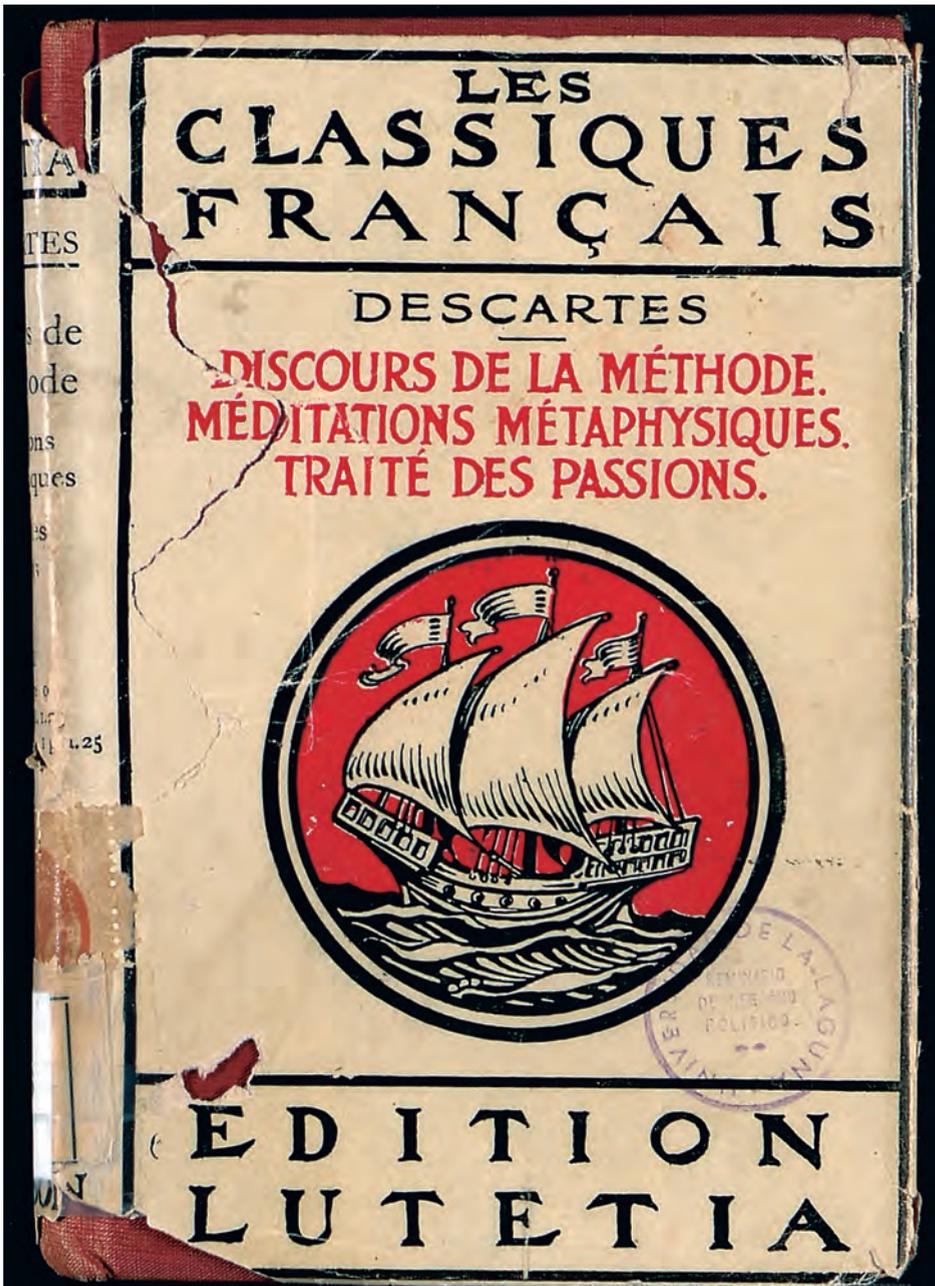
BOUTARIC, Augustin. *La lumière et les radiations invisibles*.
Paris: Ernest Flammarion, 1925.



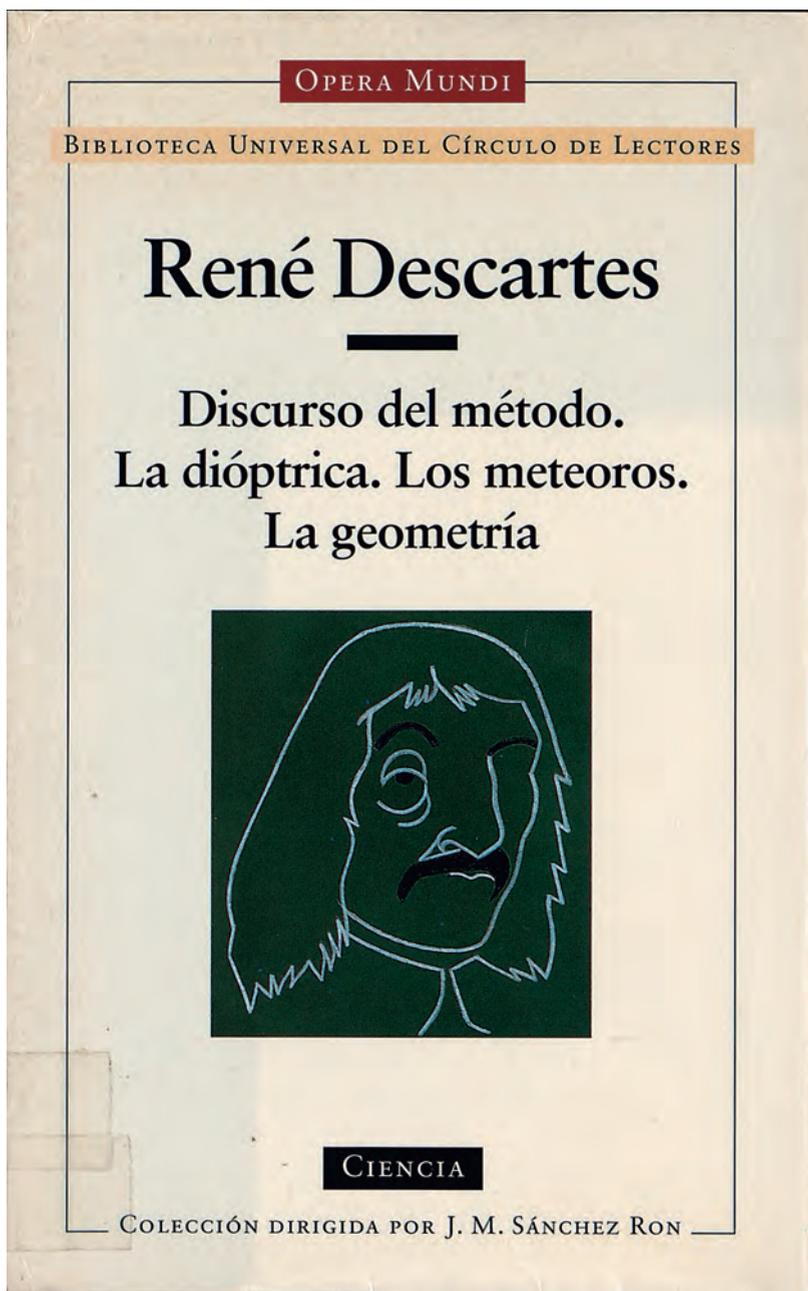
BROGLIE, Louis de. *Une nouvelle conception de la lumière*. Paris: Hermann & Cie, 1934.



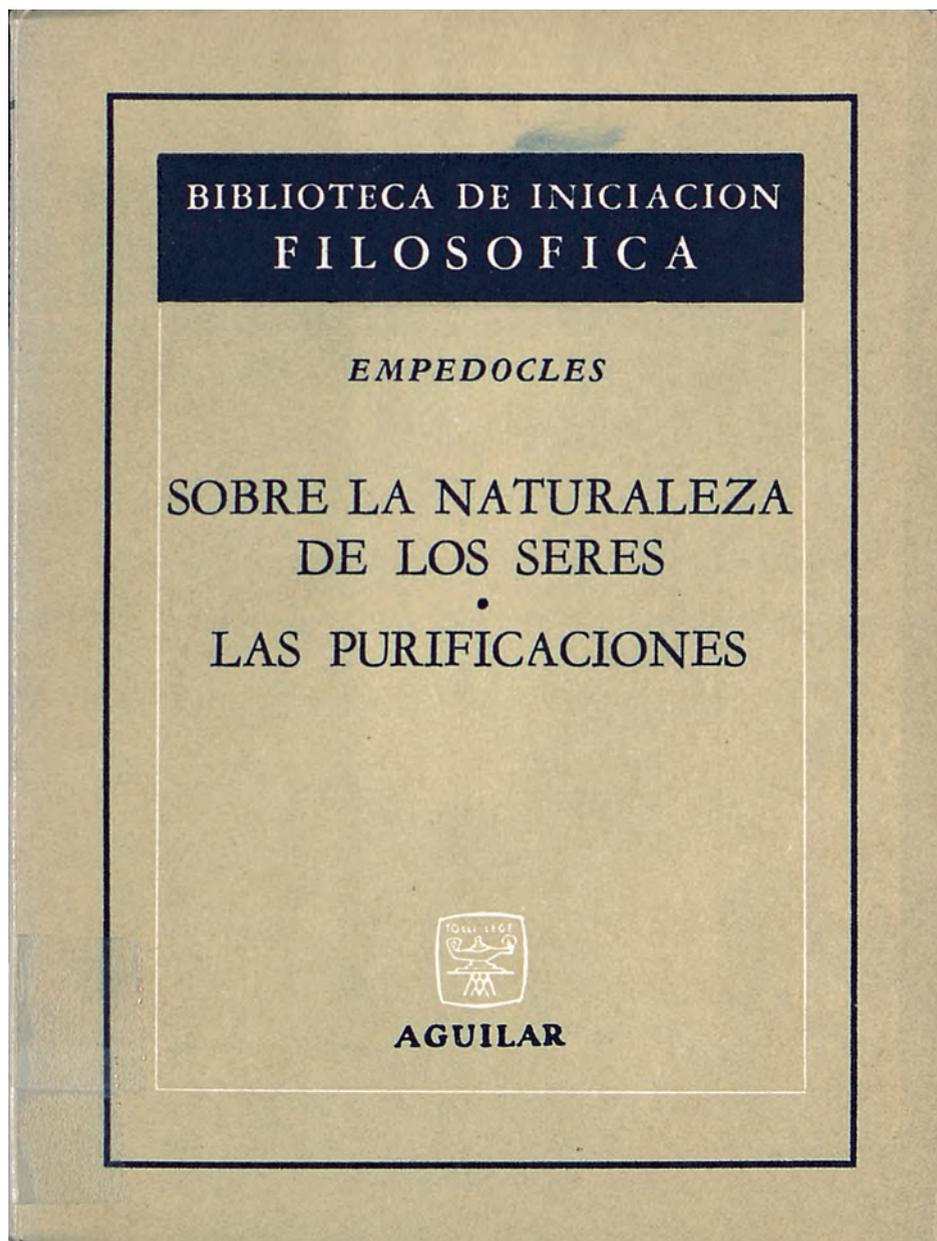
CROMBIE, AC. *Historia de la ciencia de San Agustín a Galileo*. Madrid: Alianza, 1979.



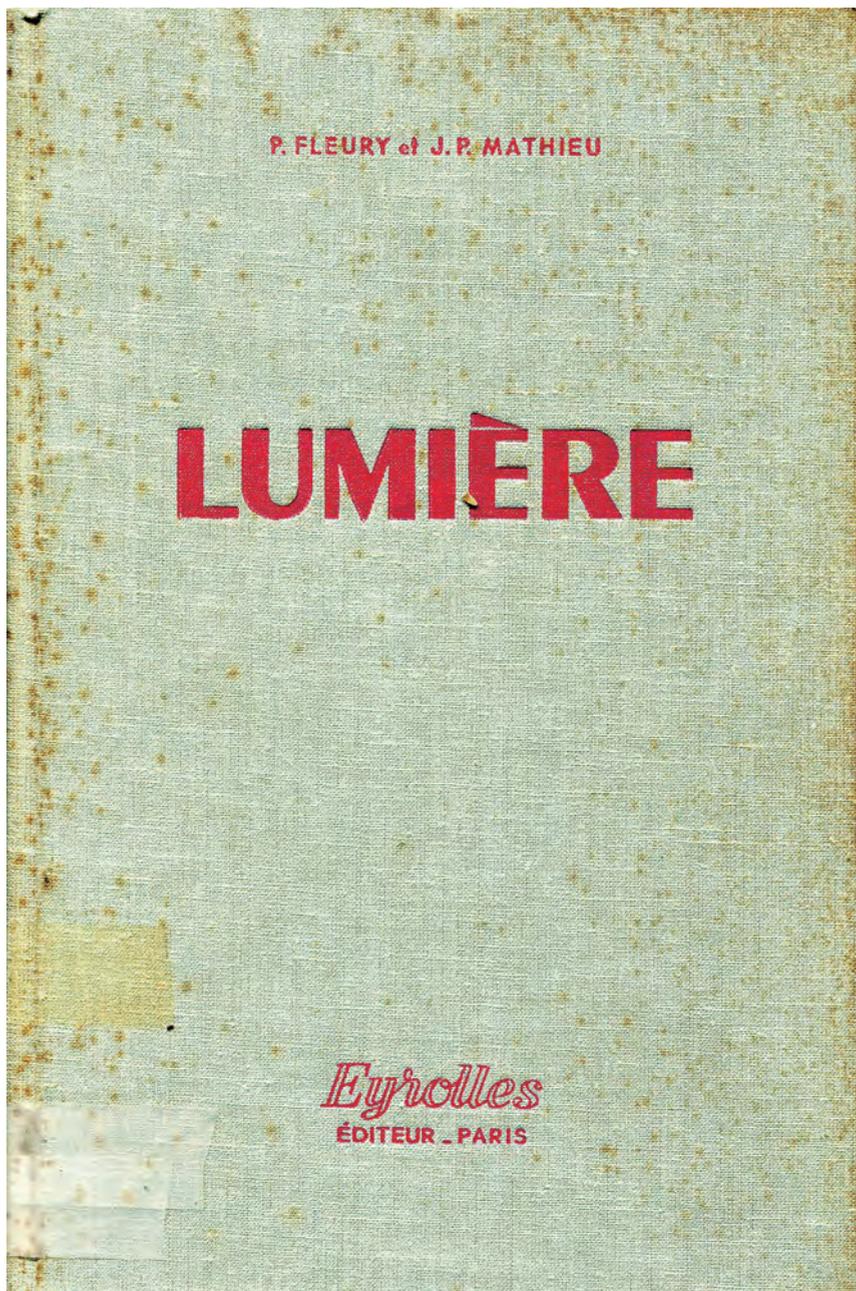
DESCARTES, René. *Discours de la méthode; Méditations métaphysiques; Traité des passions*. Paris: Nelson, 1916.



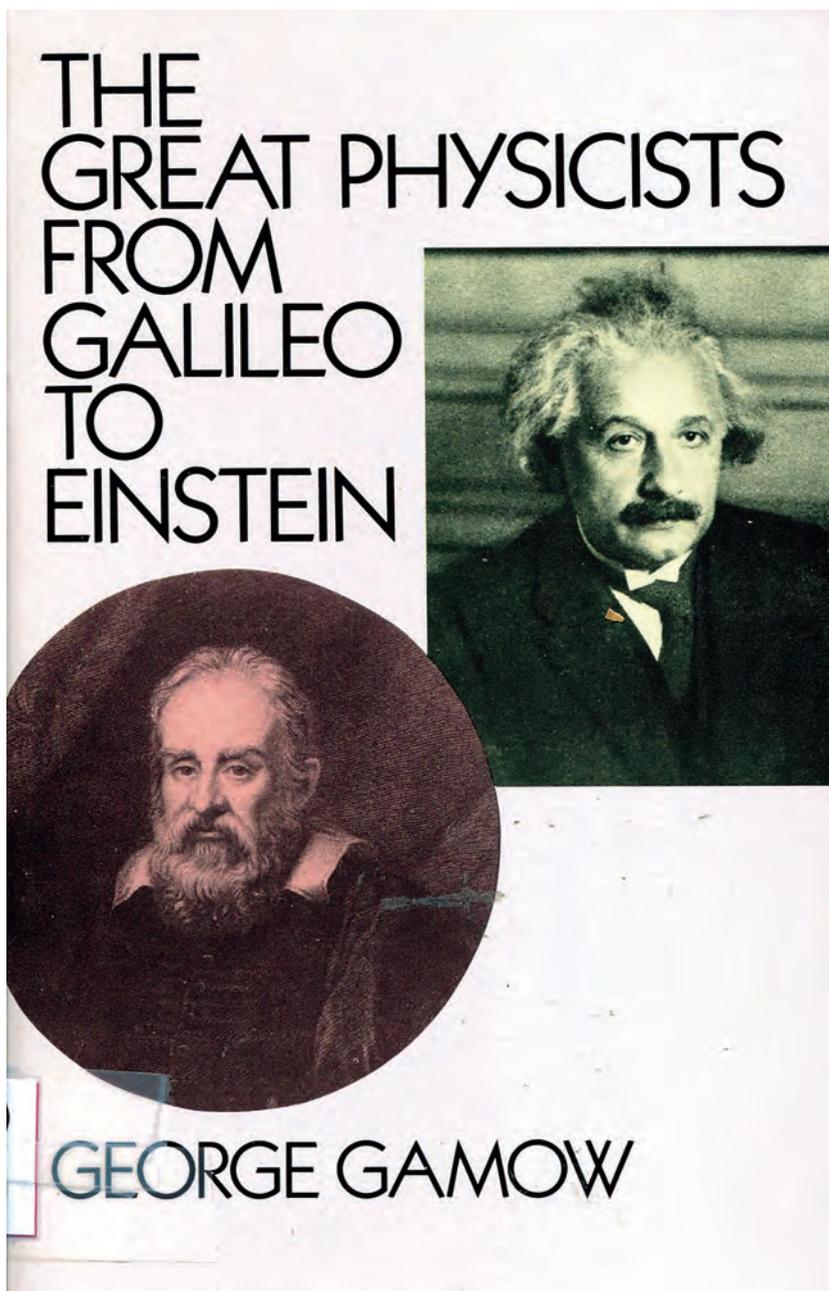
DESCARTES, René. *Discurso del método, dióptrica, meteoros y geometría*.
Madrid: Alfaguara, 1986.



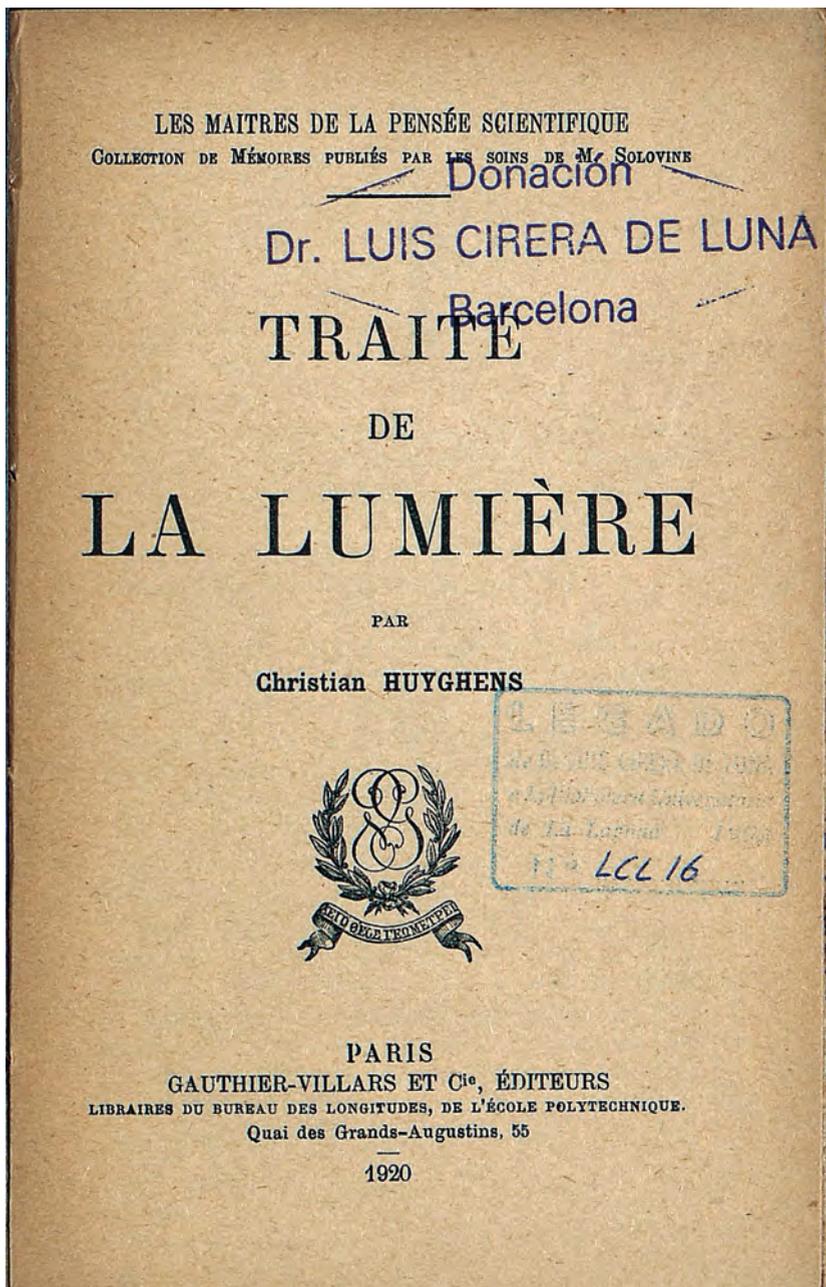
EMPÉDOCLES. *Sobre la naturaleza de los seres; Las purificaciones*. Buenos Aires: Aguilar, 1964.



FLEURY, Pierre; MATHIEU, Jean-Paul. *Lumière*.
Paris: Editions Eyrolles, 1965.



GAMOW, George. *The great physicists from Galileo to Einstein*.
New York: Dover, 1988.



HUYGHENS, Christian. *Traité de la lumière*.
 Paris: Gauthier-Villars et Cie, 1920.

ARAB REPUBLIC OF EGYPT
NATIONAL LIBRARY AND ARCHIVES
Centre for Editing & Publishing
Arabic Manuscripts.

IBN AL-HAYTHAM
AL-SHUKŪK ʿALĀ BAṬLAMĪYŪS
(DUBITATIONES IN PTOLEMAEUM)

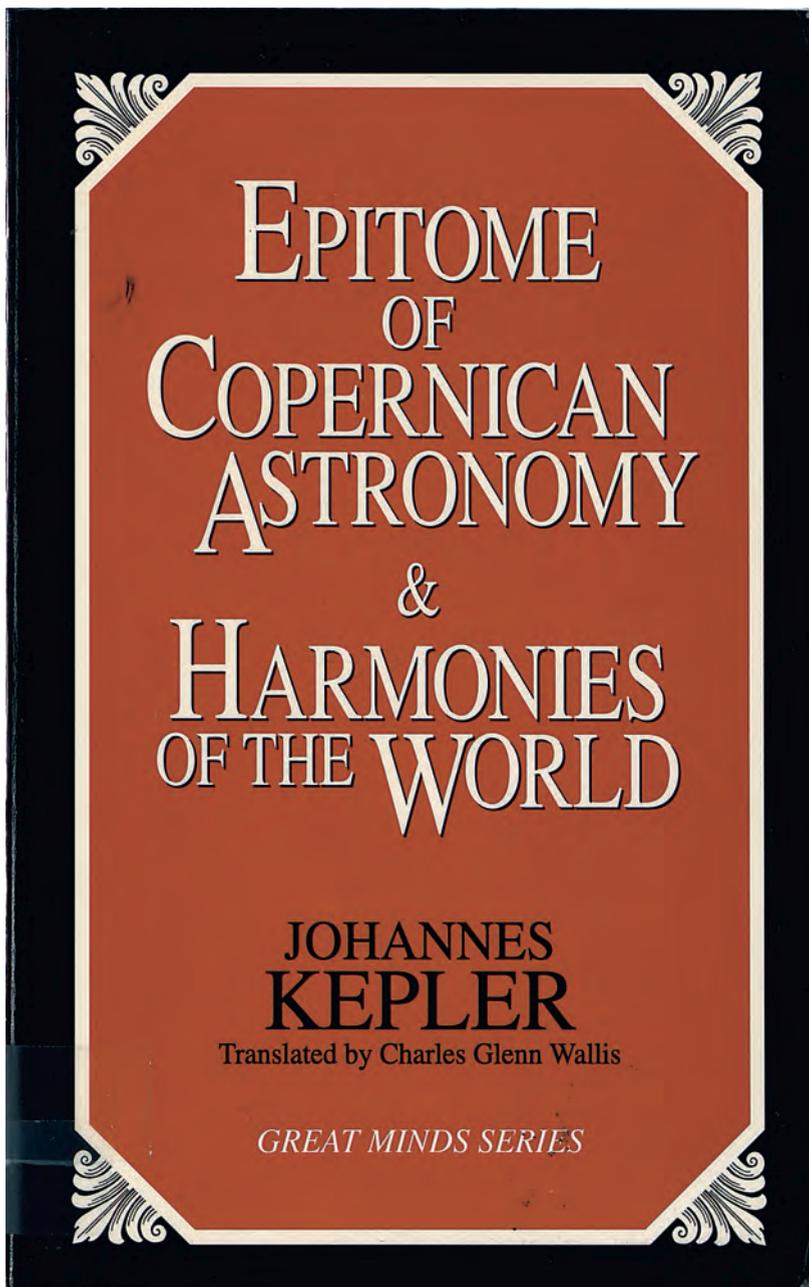
Edited by
A. SABRA
AND
N. SHEHABY

Prologue by
I. MADKOUR

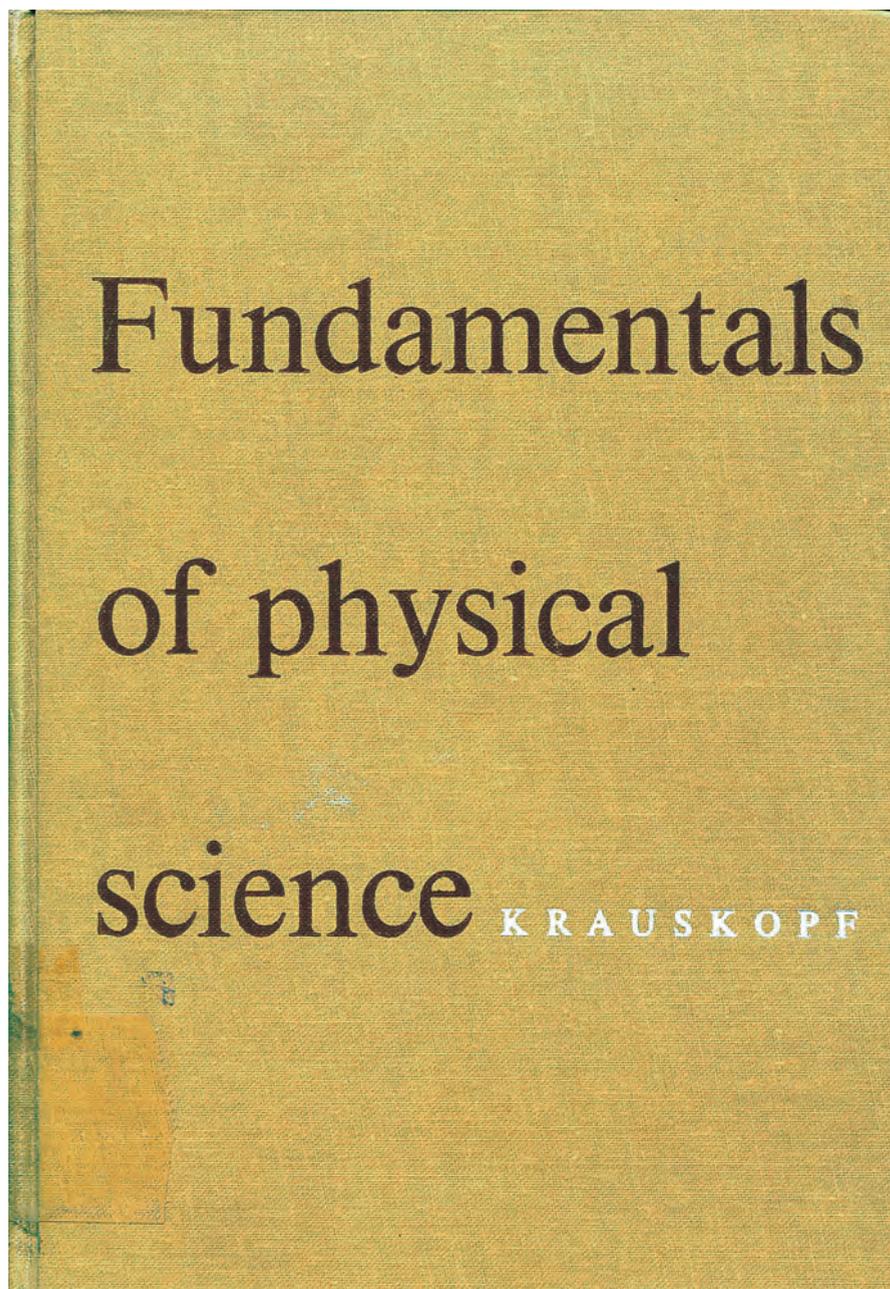
The National Library Press
Cairo 1971

IBN

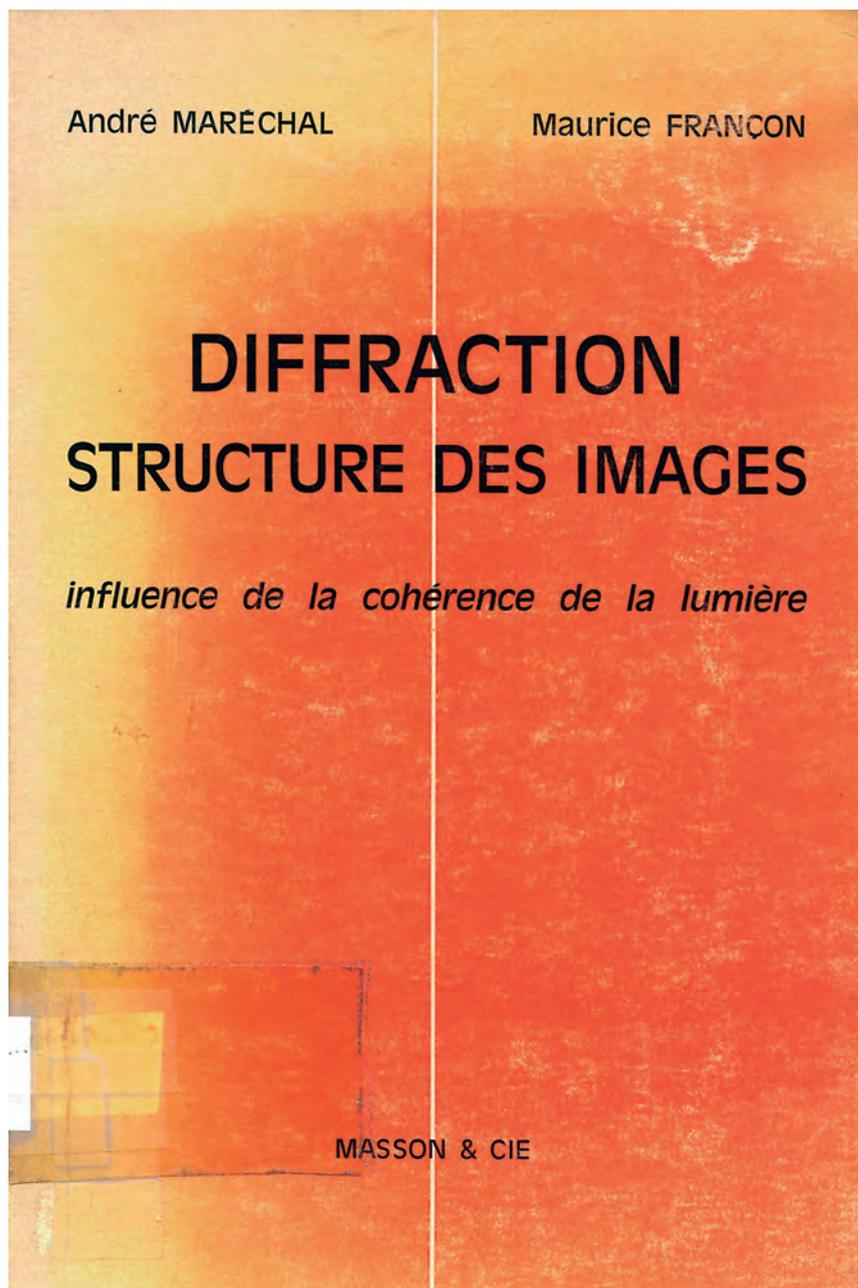
IBN AL-HAYTHAM, Jaʿfar ibn Ahmad. *Al-Shukuk ʿalā Batlamyus: (dubitaciones in Ptolemaeum)*. Cairo: The National Library Press, 1971.



KEPLER, Johannes. *Epitome of Copernican astronomy & harmonies of the world*.
New York: Prometheus Books, 1995.

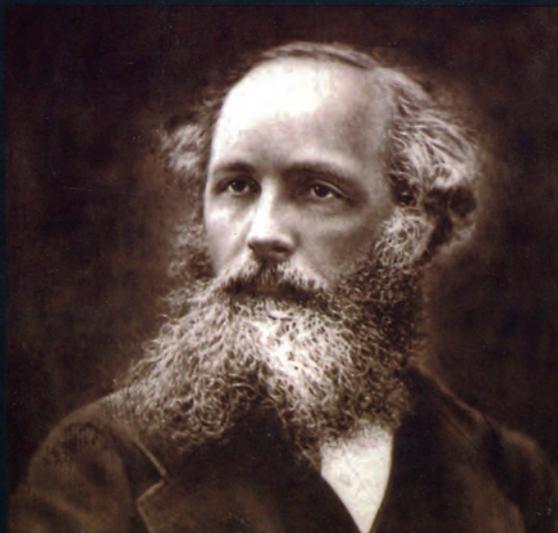


KRAUSKOPF, Konrad Bates. *Fundamentals of physical science*.
New York: McGraw-Hill, 1959.



MARECHAL, André; FRANÇON, Maurice. *Diffraction, structure des images : influence de la cohérence de la lumière*. Paris: Masson & Cie, 1970.

CLÁSICOS DEL
PENSAMIENTO



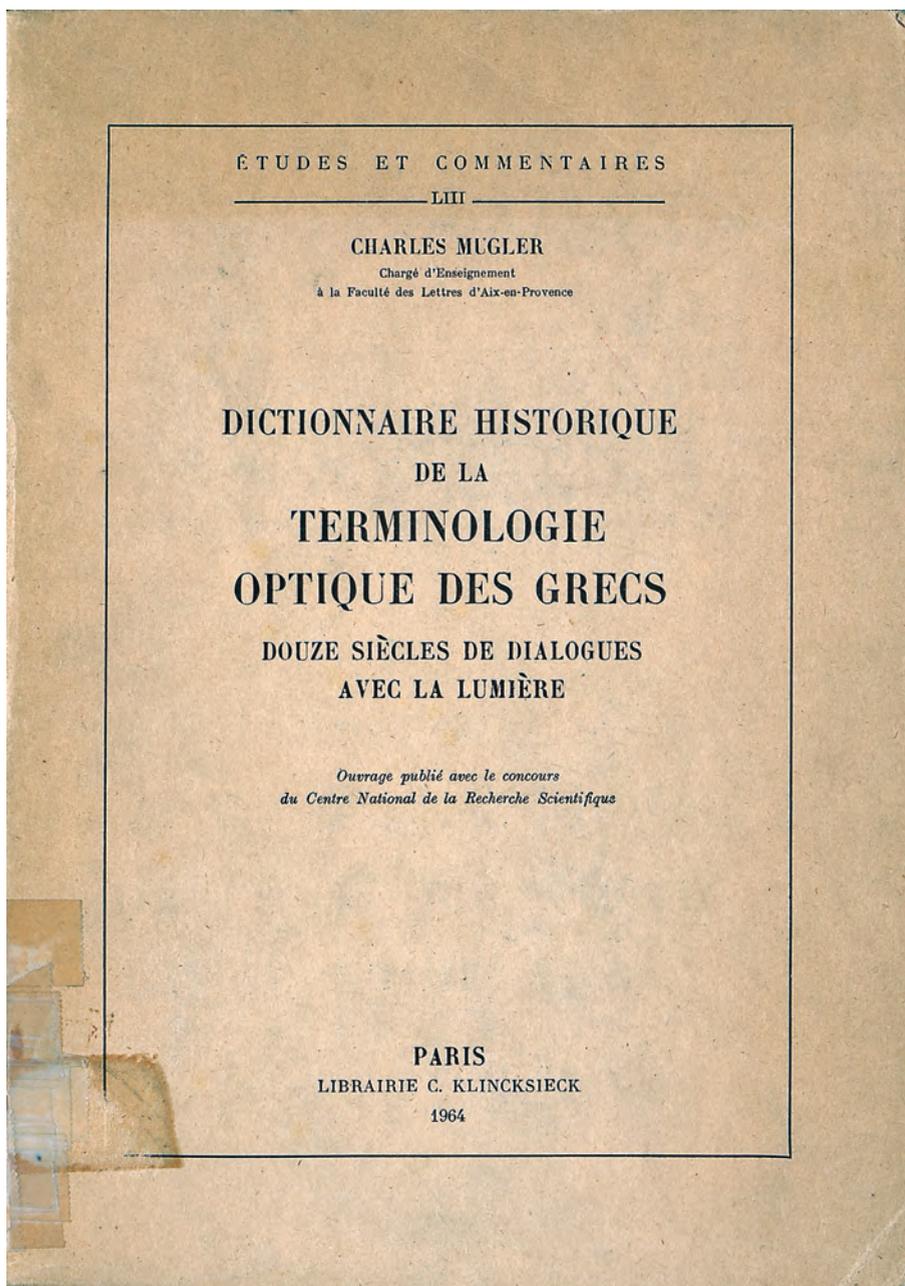
JAMES CLERK MAXWELL

ESCRITOS
CIENTÍFICOS

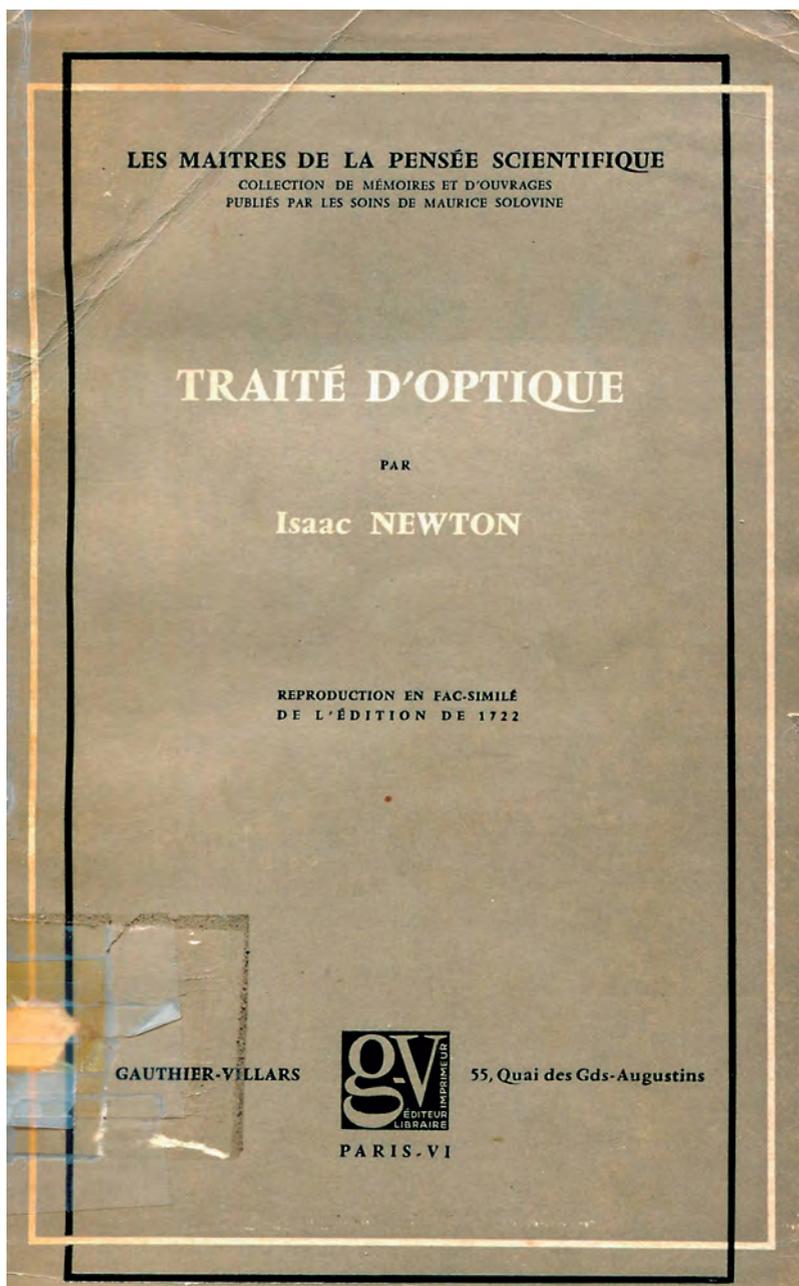
Edición de José Manuel Sánchez Ron

CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

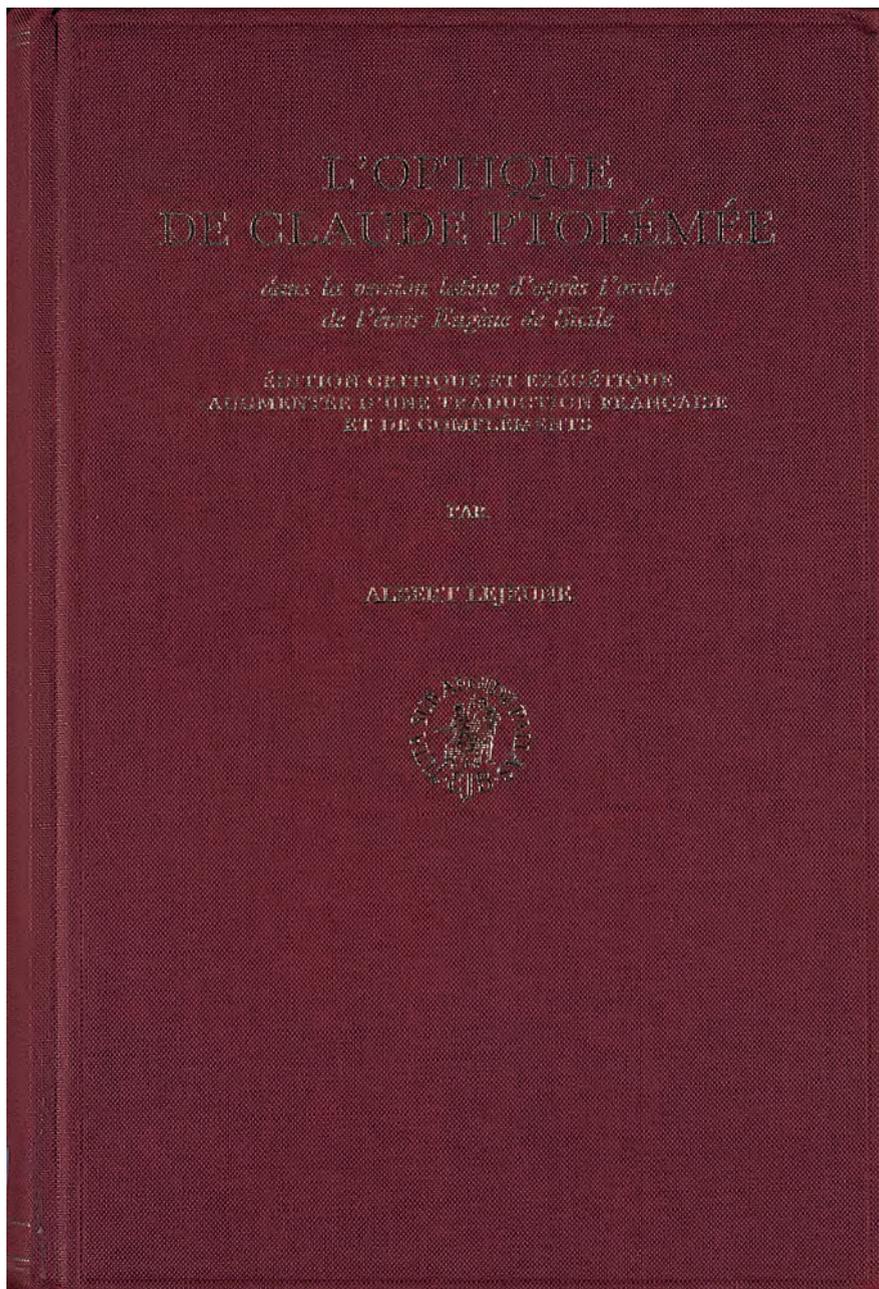
MAXWELL, James Clerk. *Escritos científicos*. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 1998.



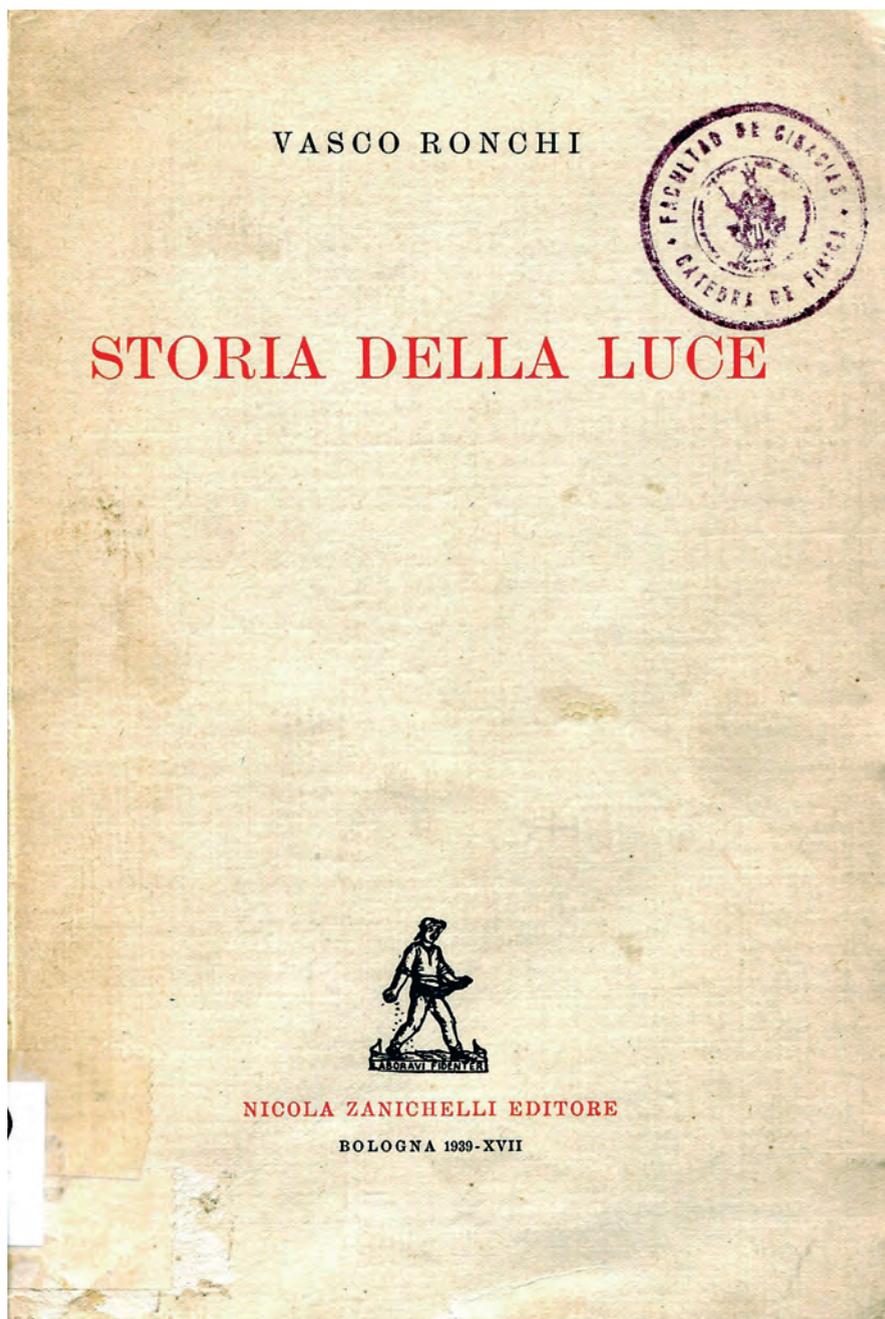
MUGLER, Charles. *Dictionnaire historique de la terminologie optique des grecs: douze siècles de dialogues avec la lumière*. Paris: Librairie C. Klincksieck, 1964.



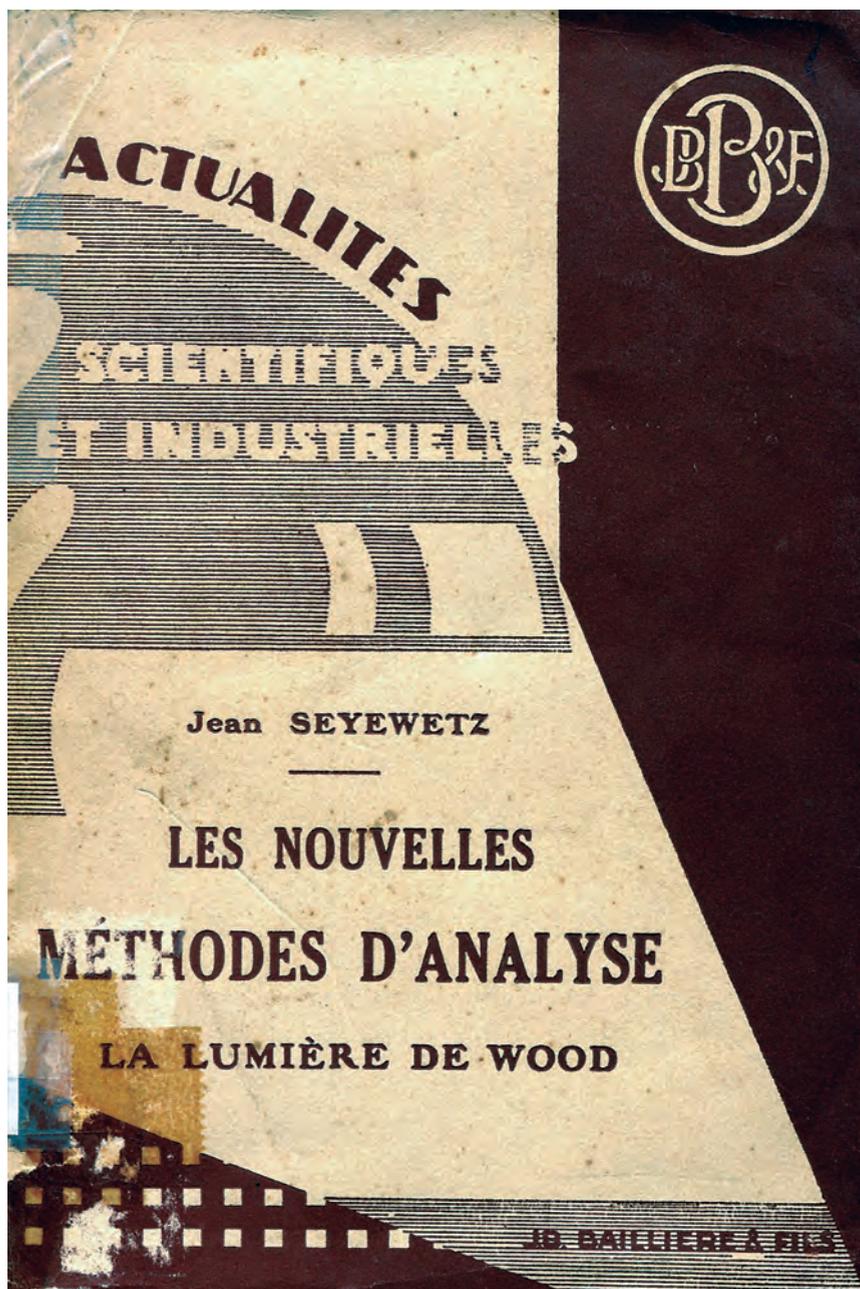
NEWTON, Isaac. *Traité d'optique*. Paris: Gauthier-Villars, 1955.



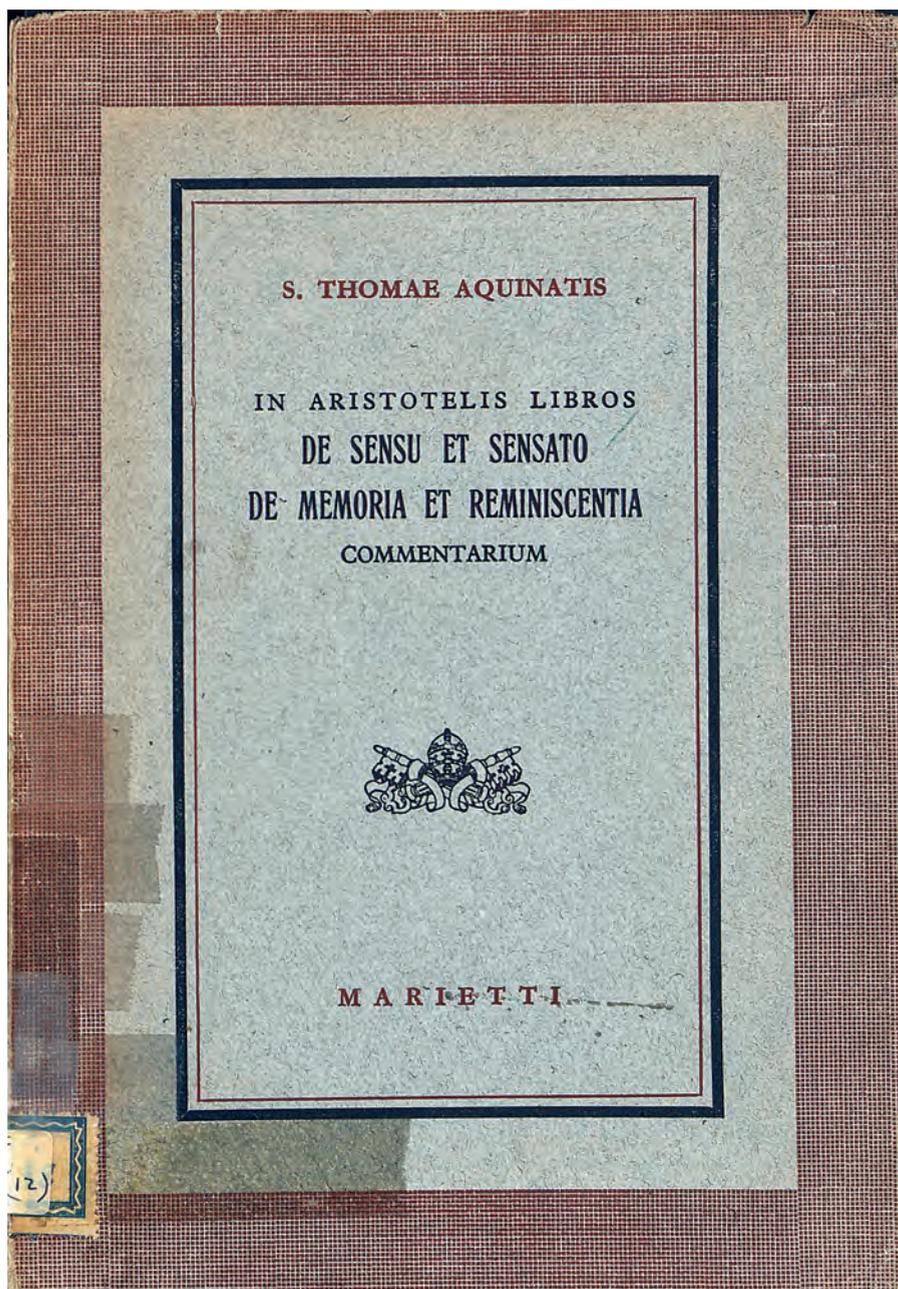
PTOOLMEO, Claudio. *L'optique de Claude Ptolémée dans la version latine d'après l'arabe de l'émir Eugène de Sicile*. Leiden: E. J. Brill, 1989.



RONCHI, Vasco. *Storia della luce*. Bologna: Nicola Zanichelli, 1939.



SEYEWETZ, Jean. *Les nouvelles méthodes d'analyse: l'emploi de la lumière de Wood dans les sciences, l'industrie, l'alimentation, la recherche des fraudes*. Paris: J. B. Baillière et Fils, 1934.



TOMÁS DE AQUINO. *In Aristotelis libros; De sensu et sensato; De memoria et reminiscentia: commentarium*. Torino: Marietti, 1949.

Clifford M. Will

¿TENIA RAZON EINSTEIN?

La más celebrada teoría científica de nuestro siglo a la luz de los últimos datos suministrados por las sondas planetarias, los relojes atómicos, las modernas supercomputadoras electrónicas y la radioastronomía



gedisa
editorial

WILL, Clifford M. *¿Tenía razón Einstein?: la más celebrada teoría científica de nuestro siglo a la luz de los últimos datos suministrados por las sondas planetarias, los relojes atómicos, las modernas supercomputadoras electrónicas y radioastronomía.* Barcelona: Gedisa, 1992.

ÓPTICA Y LÁSER

OPTICA Y FISICA ONDULATORIA

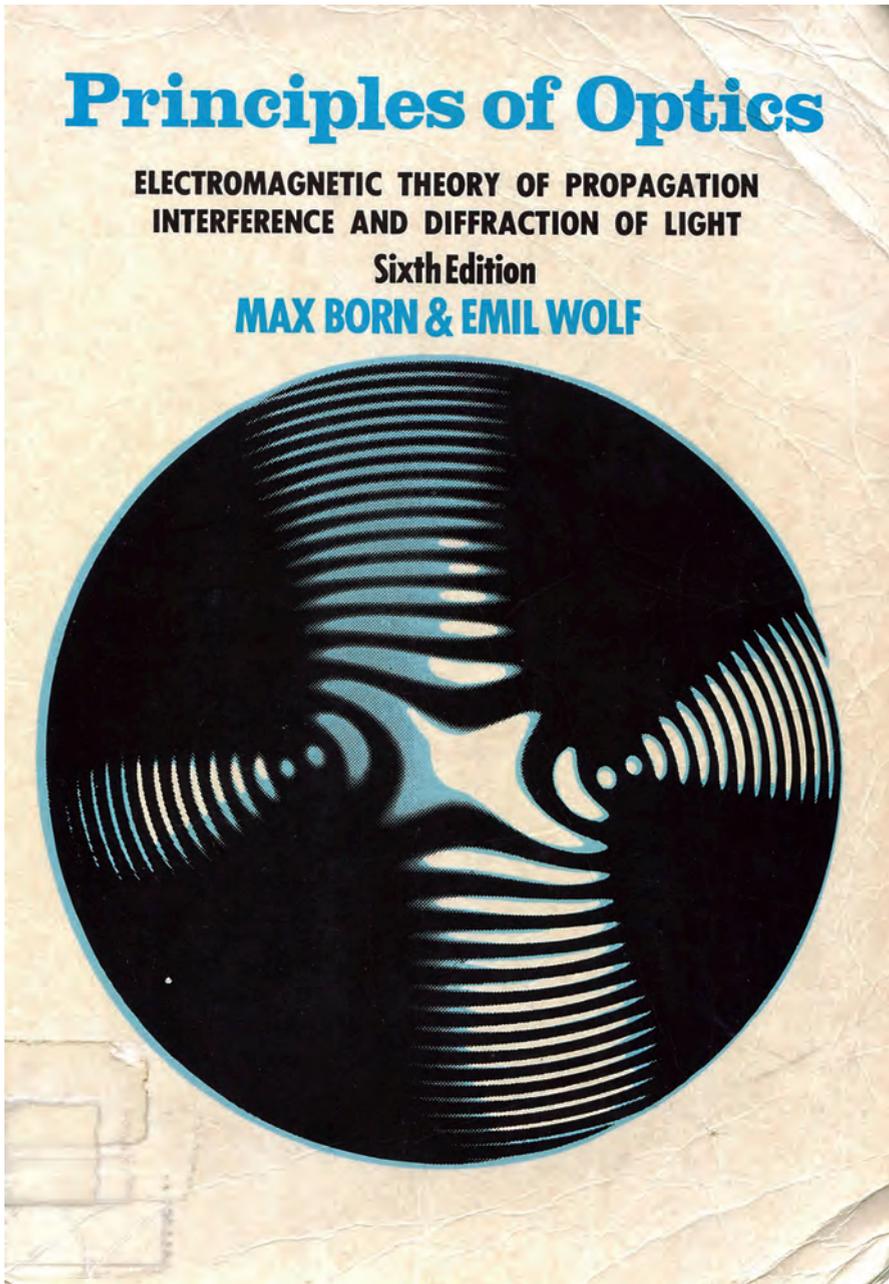
Optica geométrica y física
Fenómenos de propagación



editorial Paraninfo

M. BERTIN
J. P. FAROUX
J. RENAULT

BERTIN, Michel; FAROUX; Jean Pierre; RENAULT, J. *Óptica y física ondulatoria: óptica geométrica y física. Fenómenos de propagación.* Madrid: Paraninfo, 1993.

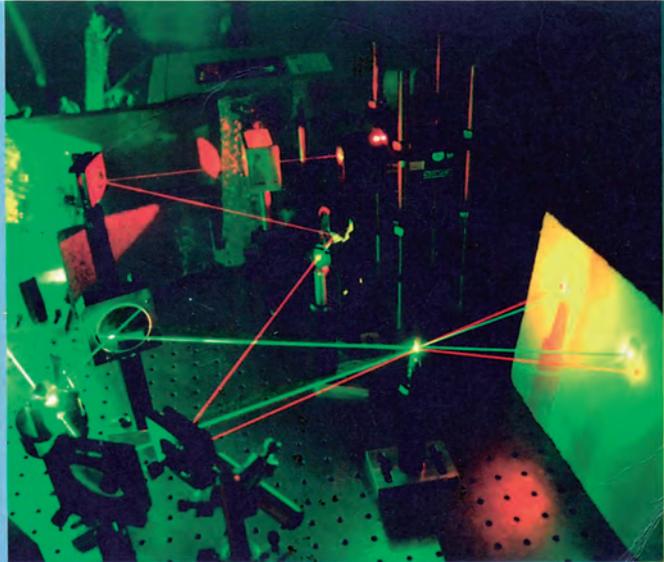


BORN, Max; WOLF, Emil. *Principles of optics: Electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light*. Oxford: Pergamon Press, 1980 (imp. 1998).

Óptica electromagnética

Vol. II: Materiales y aplicaciones

José Manuel Cabrera
Fernando Agulló López
Fernando Jesús López

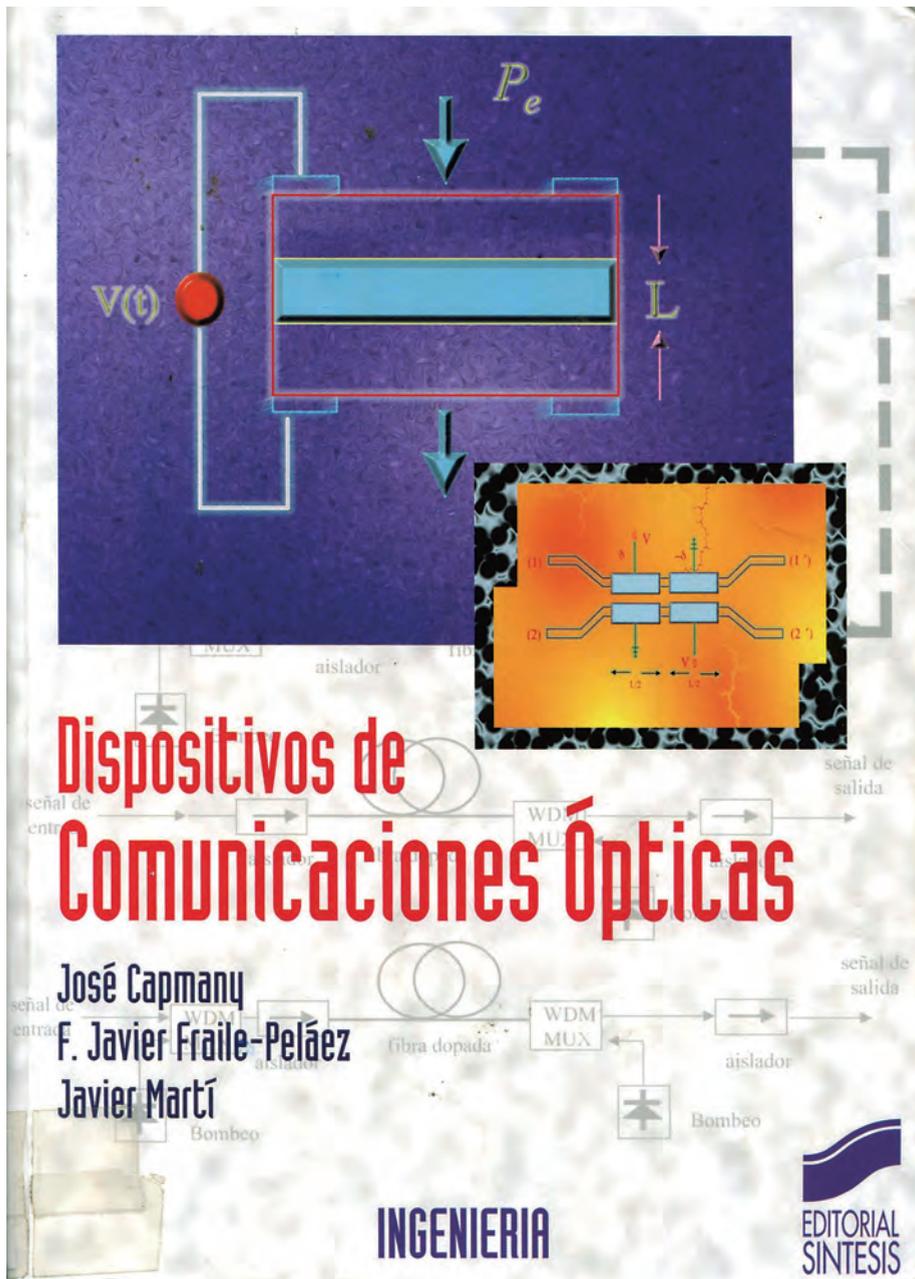


Addison
Wesley

UA
EDICIONES

ADDISON-WESLEY/UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID

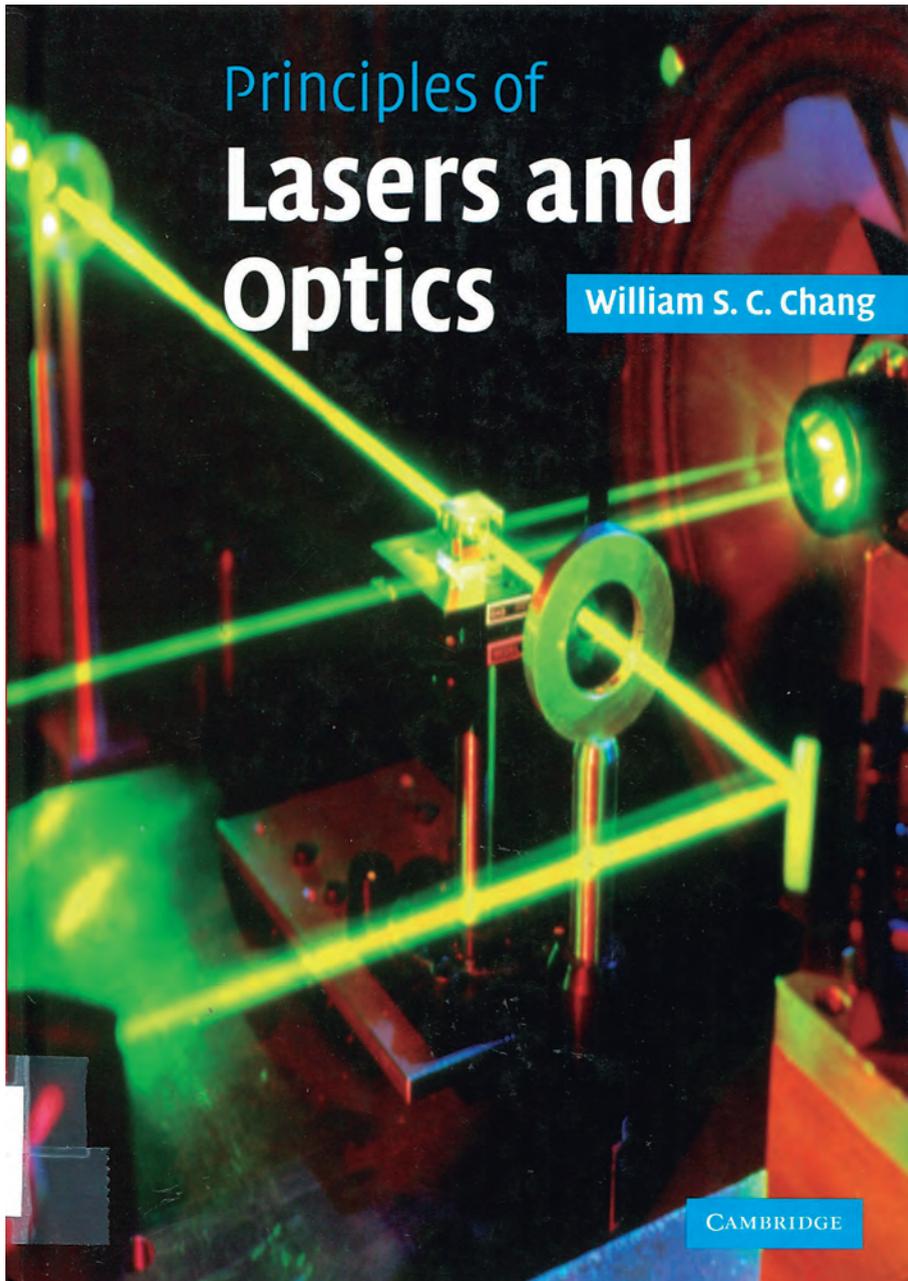
CABRERA, José Manuel; AGULLÓ LÓPEZ, Fernando; LÓPEZ,
Fernando Jesús. *Óptica Electromagnética*.
Madrid: Addison Wesley: Universidad Autónoma de Madrid, 2000.



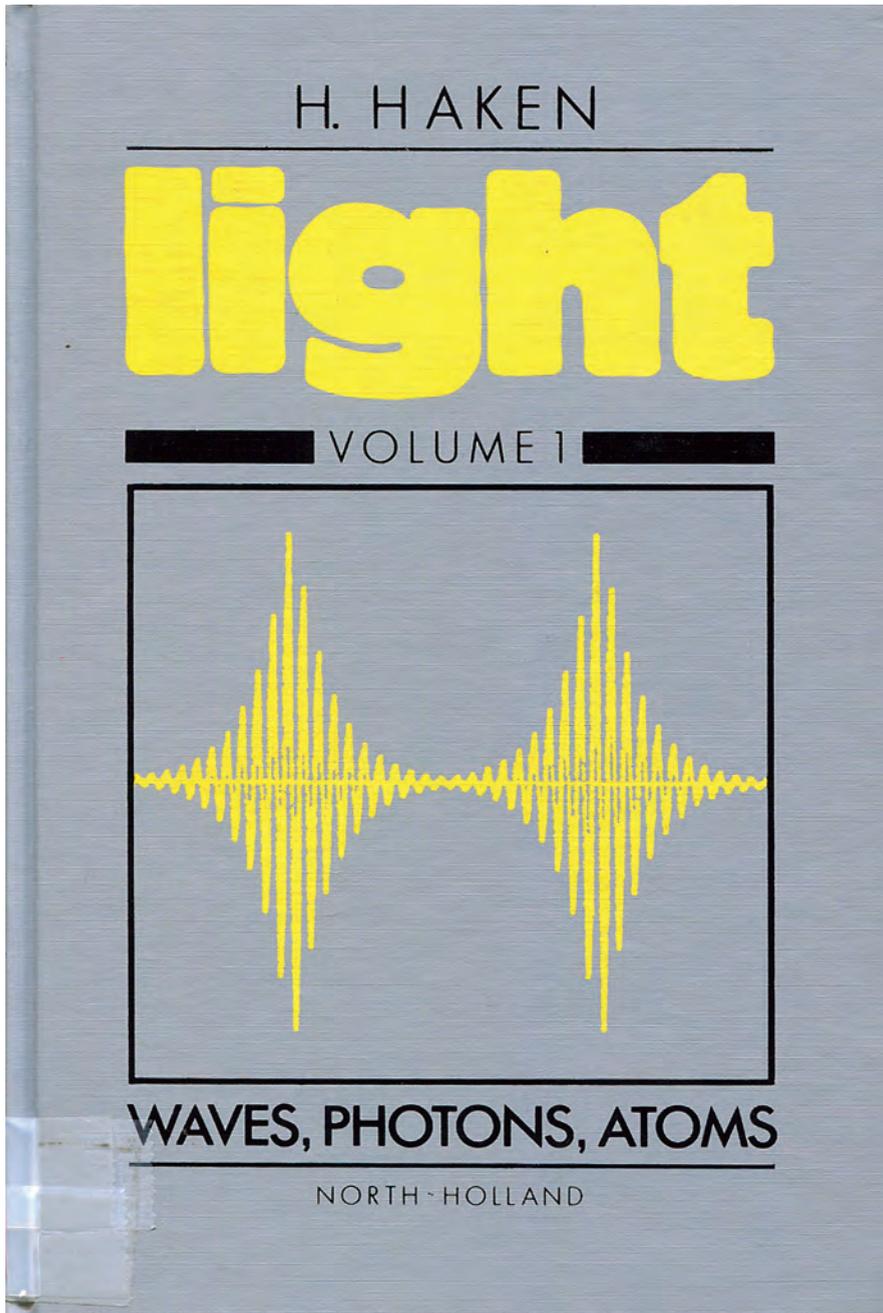
CAPMANY, José; FRAILE-PELÁEZ, F. Javier; MARTÍ, Javier.
Dispositivos de comunicaciones ópticas. Madrid: Síntesis, 1999.



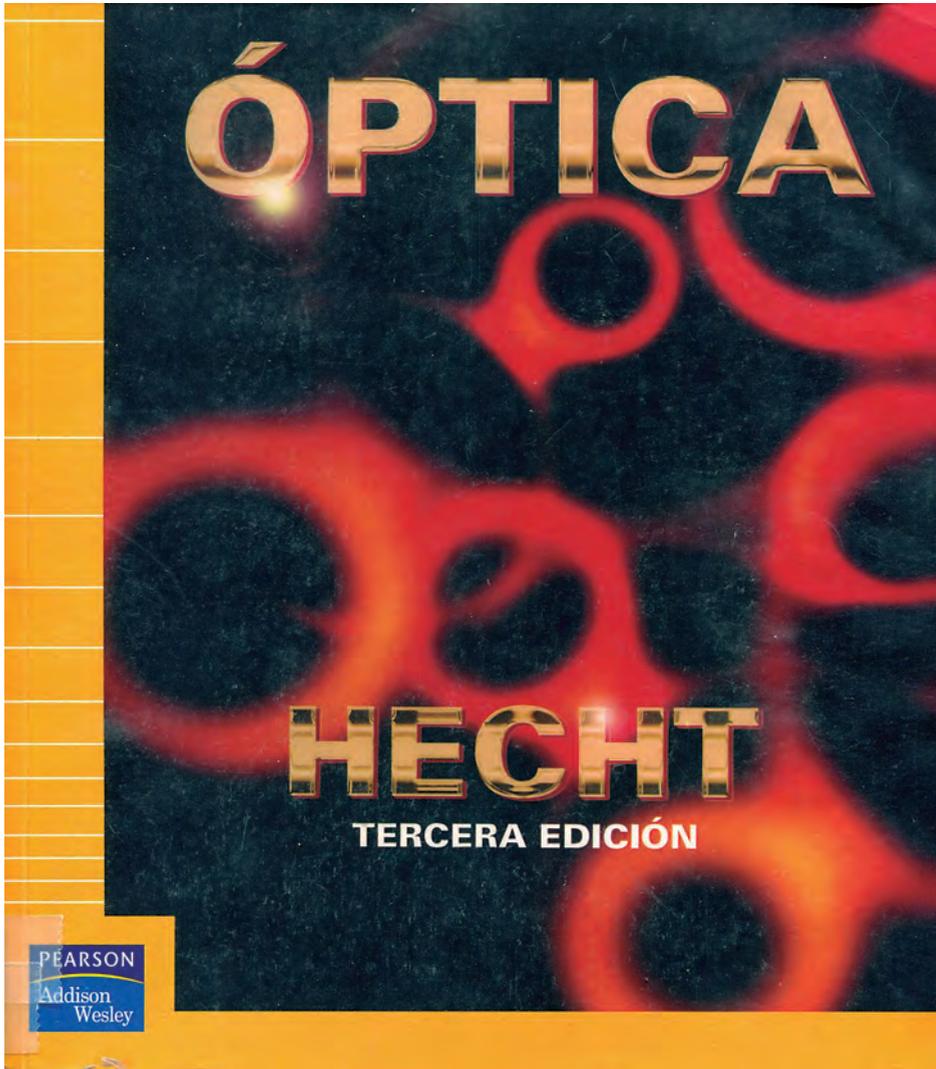
CARROLL, John M. *Fundamentos y aplicaciones del laser.*
Barcelona: Marcombo, 1978.



CHANG, William Shen Chie. *Principles of lasers and optics*.
New York: Cambridge University Press, 2005.



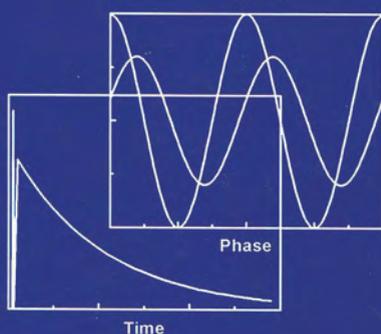
HAKEN, H. *Light*. Amsterdam: North Holland, 1981.



HECHT, Eugene. *Óptica*. Madrid: Addison Wesley, 2000.

Principles of Fluorescence Spectroscopy

Second Edition



Joseph R. Lakowicz

LAKOWICZ, Joseph R. *Principles of fluorescence spectroscopy*.
New York: Kluwer Academic: Plenum Publishers, 1999.



El láser

la luz de nuestro tiempo

The image shows the back cover of the book. It features a dark background with a bright blue laser beam extending horizontally across the middle. On the right side, a blue lens or optical component is visible, with light reflecting off its surfaces. The names of the editors are listed in white text on the left side.

BENJAMÍN ALONSO FERNÁNDEZ
ROCÍO BORREGO VARILLAS
CARLOS HERNÁNDEZ GARCÍA
JOSÉ ANTONIO PÉREZ HERNÁNDEZ
CAROLINA ROMERO VÁZQUEZ
(Editores)

El láser, la luz de nuestro tiempo. [Editor] Benjamín Alonso Fernández.
Llucmajor: Globalia, 2010.

The Quantum Theory of Light

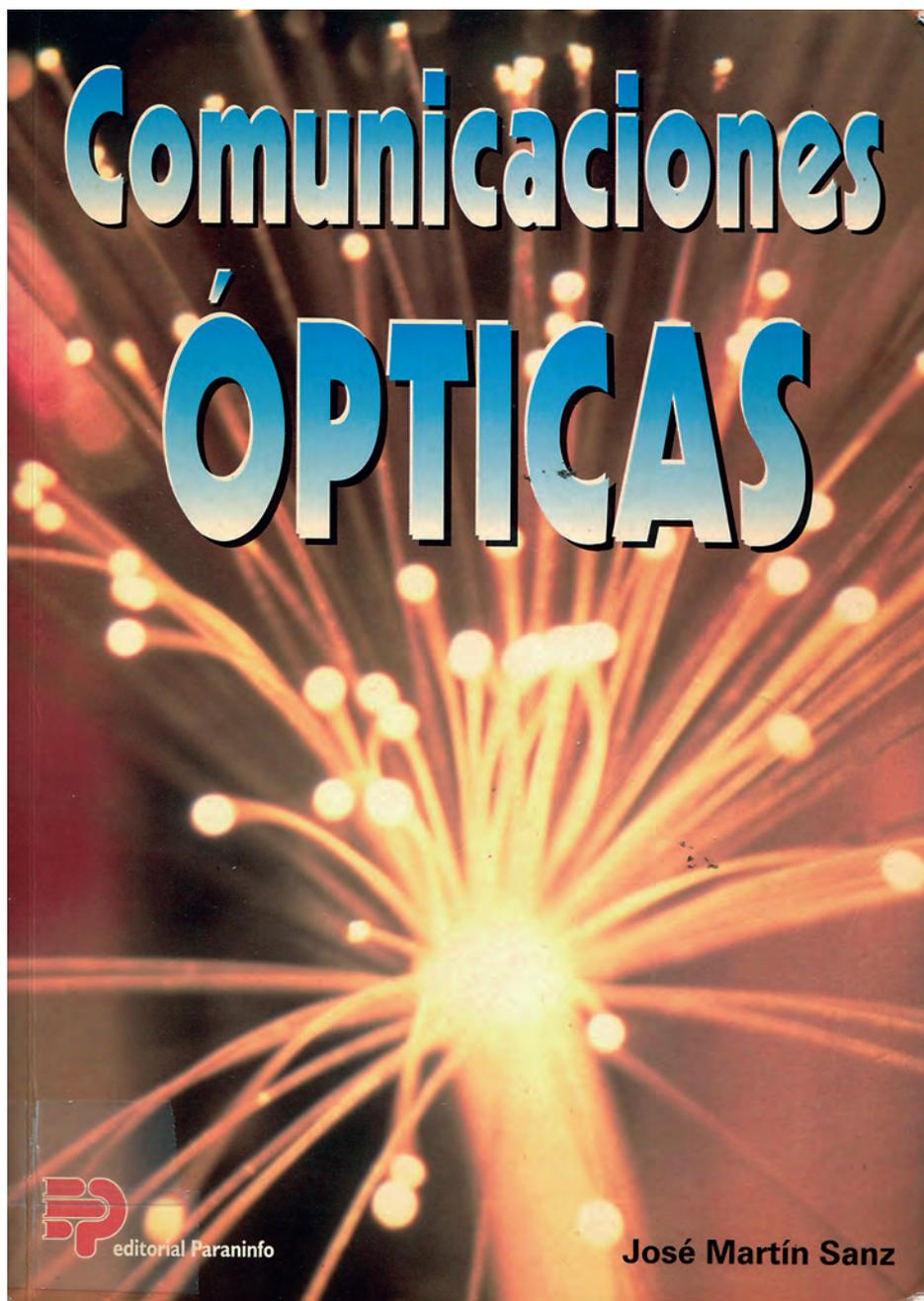
SECOND EDITION

RODNEY LOUDON

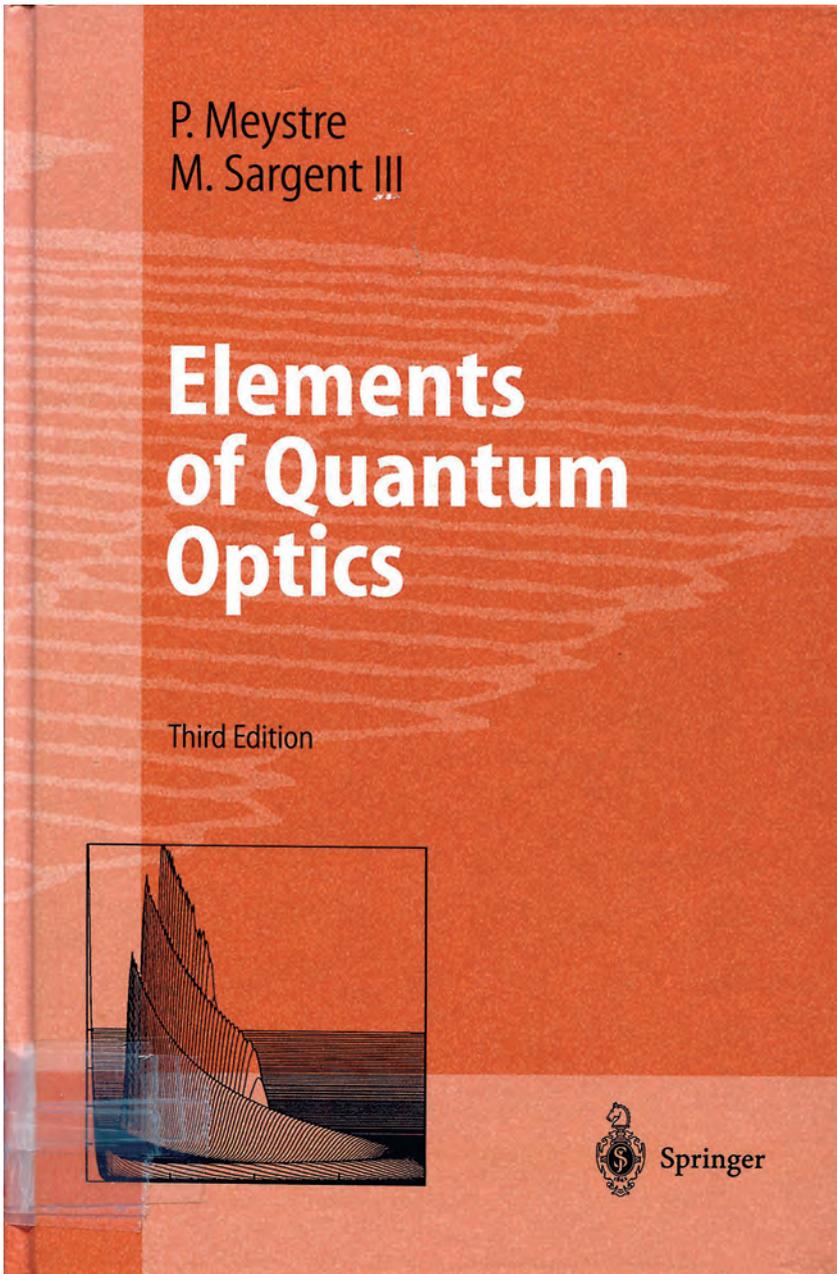


OXFORD SCIENCE PUBLICATIONS

LOUDON, Rodney. *The quantum theory of light*. Oxford: Clarendon Press, 1983.



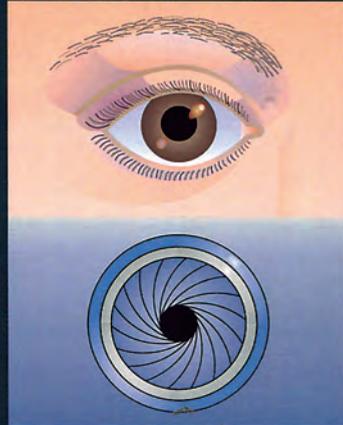
MARTÍN SANZ, José. *Comunicaciones ópticas*. Madrid: Paraninfo, 1996.



MEYSTRE, Pierre; SARGENT, Murray.
Elements of quantum optics. Berlin: Springer, 1999.

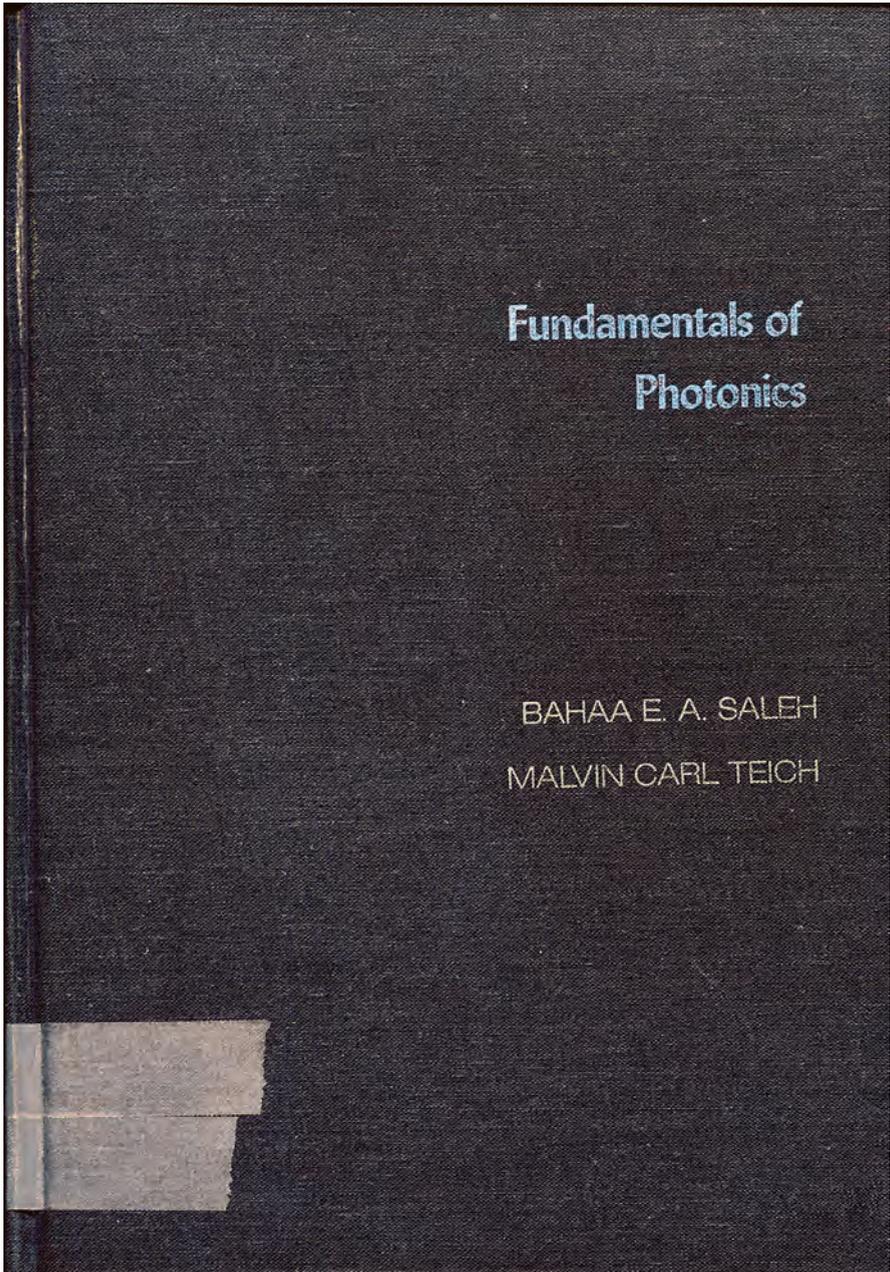
María Sagrario Millán, Jaume Escofet,
Elisabet Pérez

Óptica Geométrica

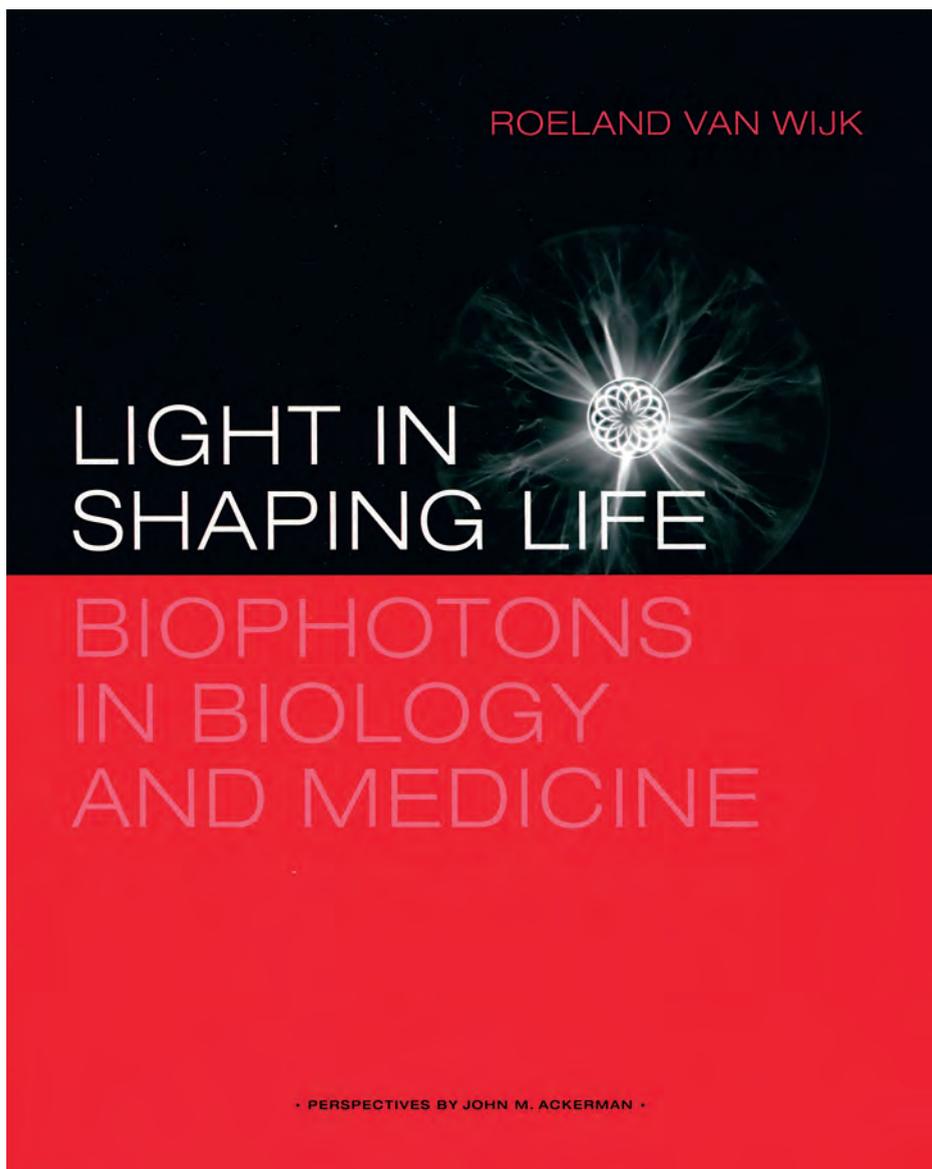


Ariel Ciencia

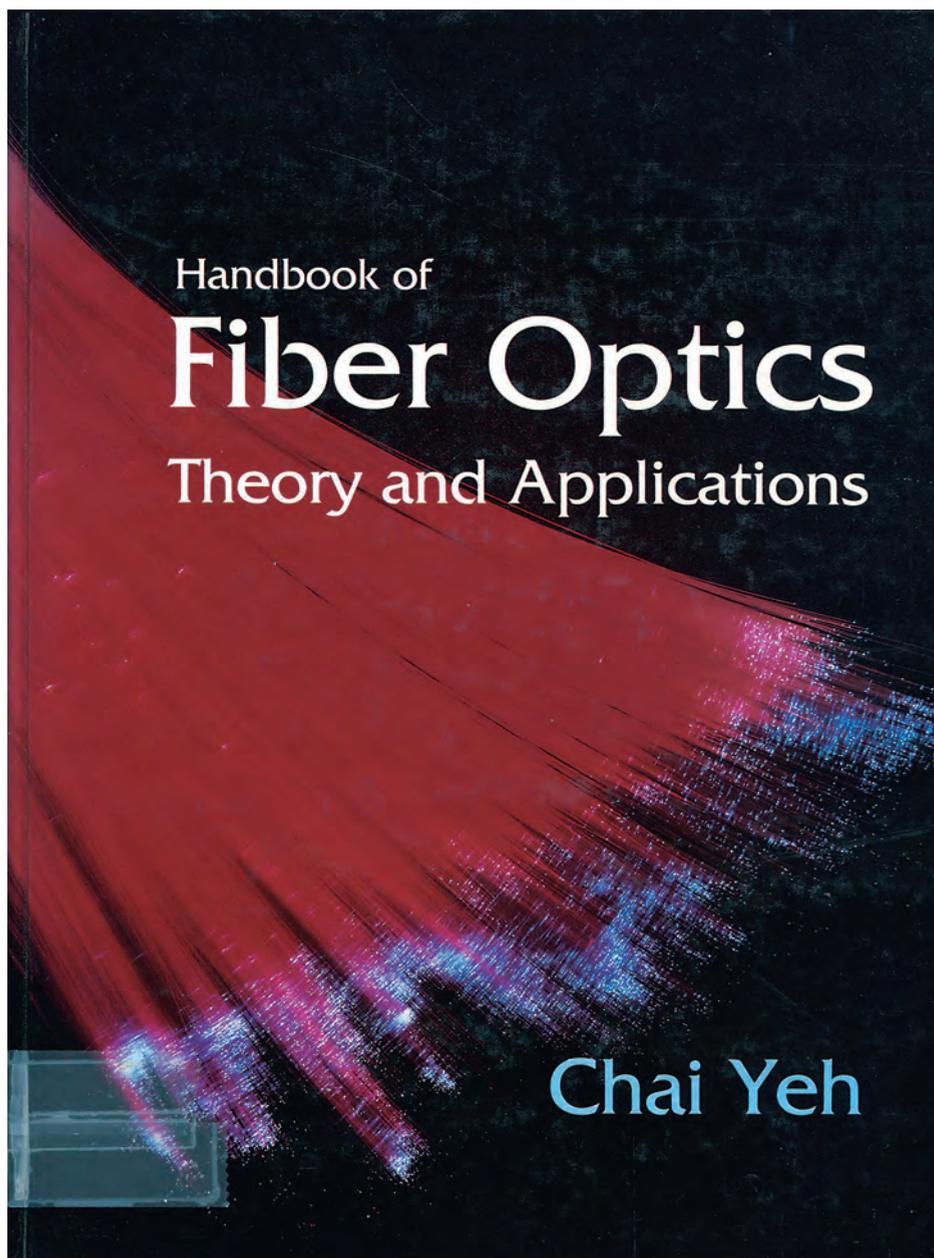
SAGRARIO MILLÁN, María; ESCOFET, Jaume; PÉREZ, Elisabet.
Óptica Geométrica. Barcelona: Ariel, 2004.



SALEH, Bahaa E. A.; TEICH, Malvin Carl. *Fundamentals of photonics*.
New York: John Wiley and Sons, 1991.

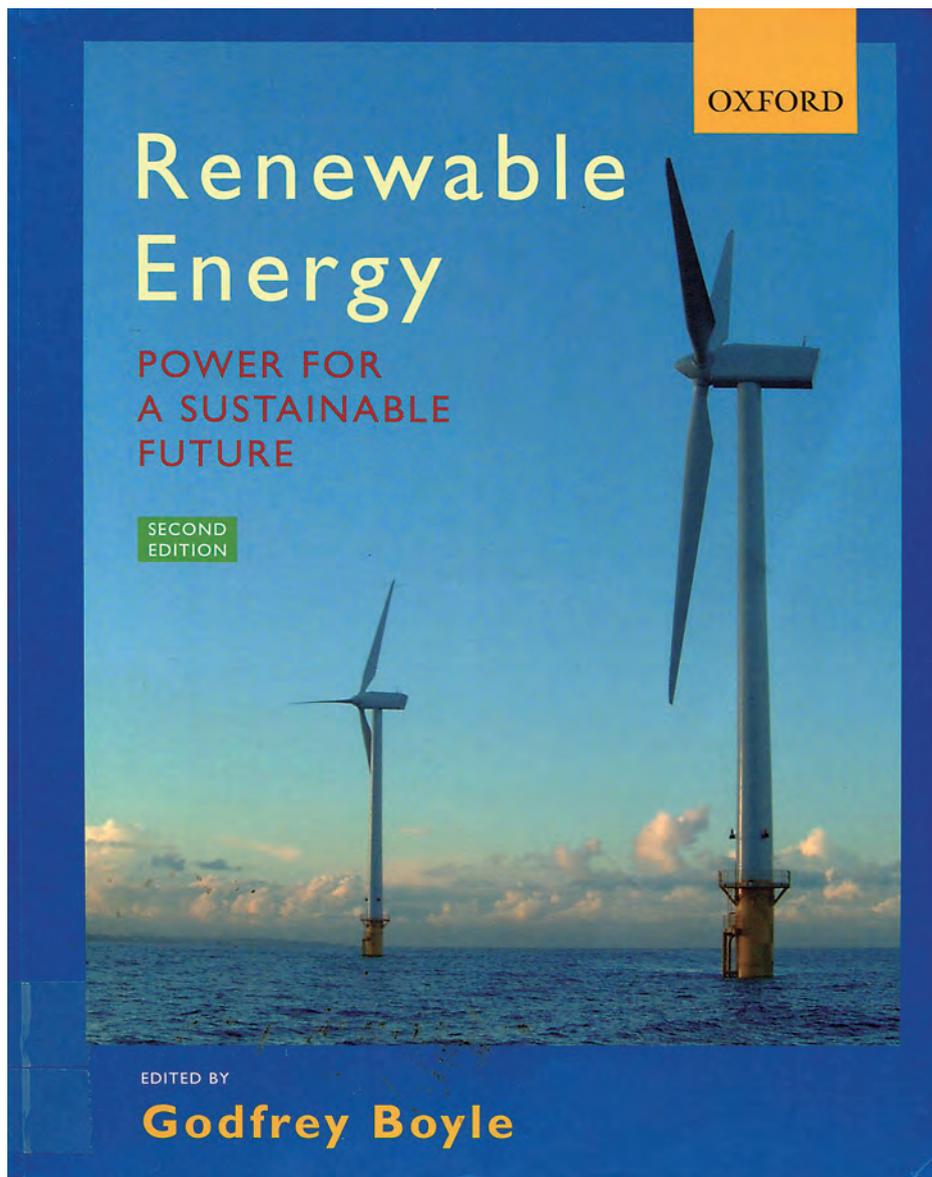


WIJK, Roeland van. *Light in shaping life biophotons in biology and medicine*.
The Netherlands: Boek en Service, 2014.



YEH, Chai. *Handbook of fiber optics: theory and applications*.
San Diego: Academic Press, 1990.

LUZ EN LAS ENERGÍAS RENOVABLES



BOYLE, Godfrey. *Renewable energy*. Oxford: Oxford University Press, 2004.



Centrales de energías renovables

Generación eléctrica con energías renovables

José Antonio Carta González
Roque Calero Pérez
Antonio Colmenar Santos
Manuel-Alonso Castro Gil

UNED

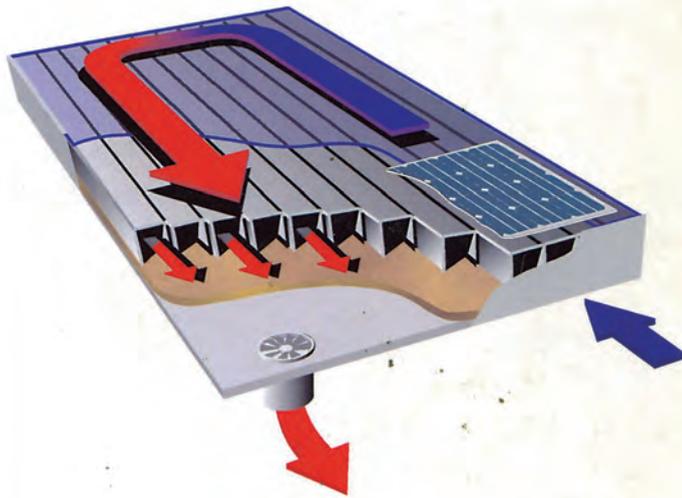
PEARSON
Prentice
Hall

CASTRO GIL, Manuel-Alonso; CALERO PÉREZ, Roque;
CARTA GONZÁEZ, José Antonio; COLMENAR SANTOS, Antonio.
Centrales de energías renovables: generación eléctrica con energías renovables.
Madrid: UNED: Pearson Educación, 2009.

GUÍA COMPLETA DE LA ENERGÍA SOLAR TÉRMICA Y TERMOELÉCTRICA

(Adaptada al Código Técnico de la Edificación
y al nuevo RITE)

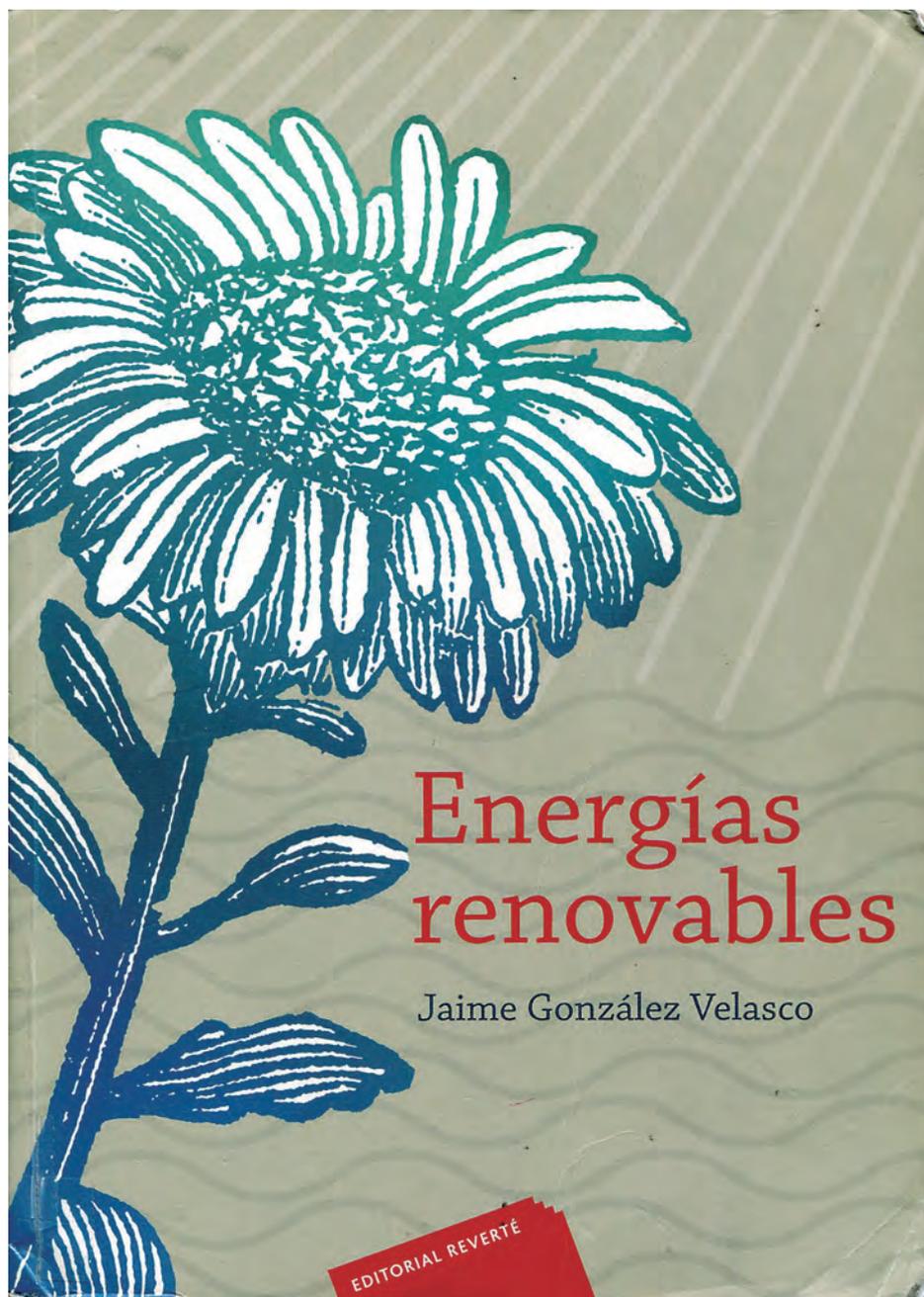
José M^a Fernández Salgado



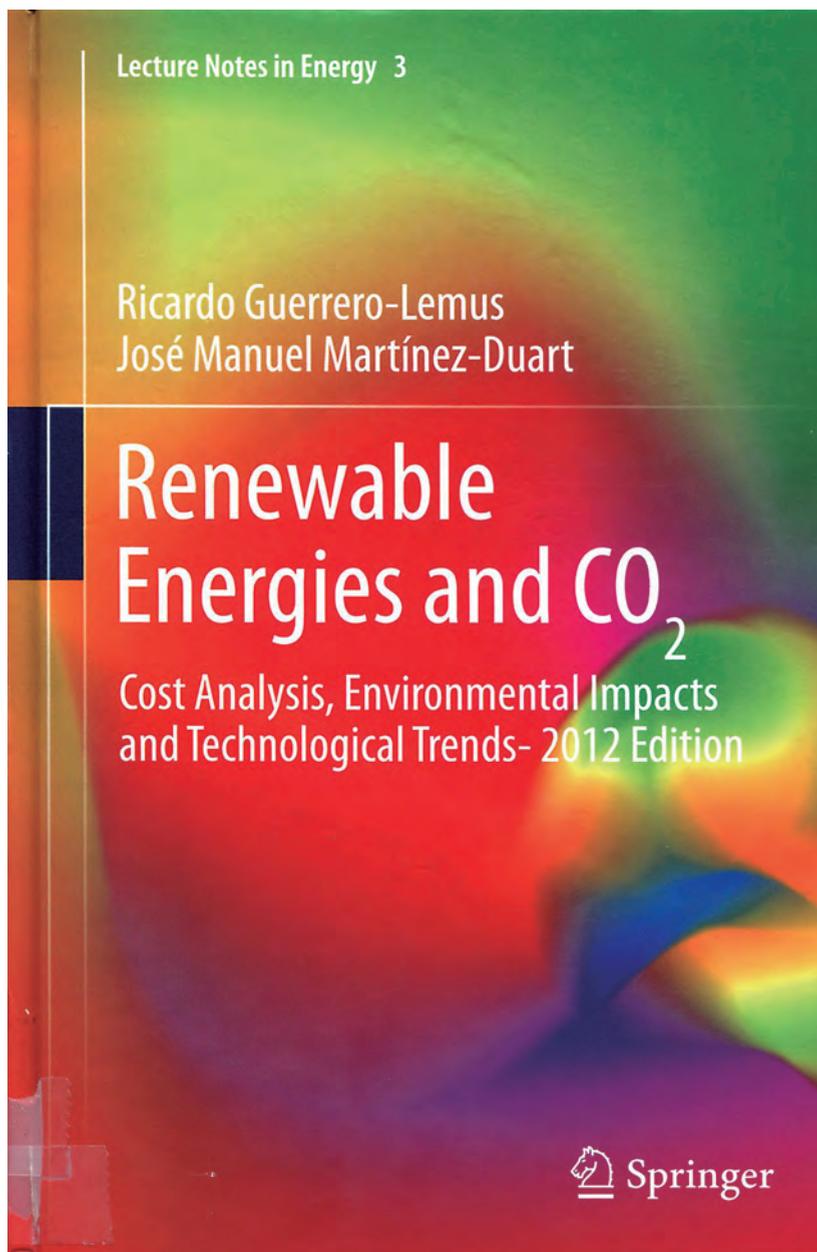
A. MADRID VICENTE, EDICIONES

FERNÁNDEZ SALGADO, José María. *Guía completa de la energía solar térmica y termoeléctrica: (adaptada al Código Técnico de la Edificación y al nuevo RITE).*

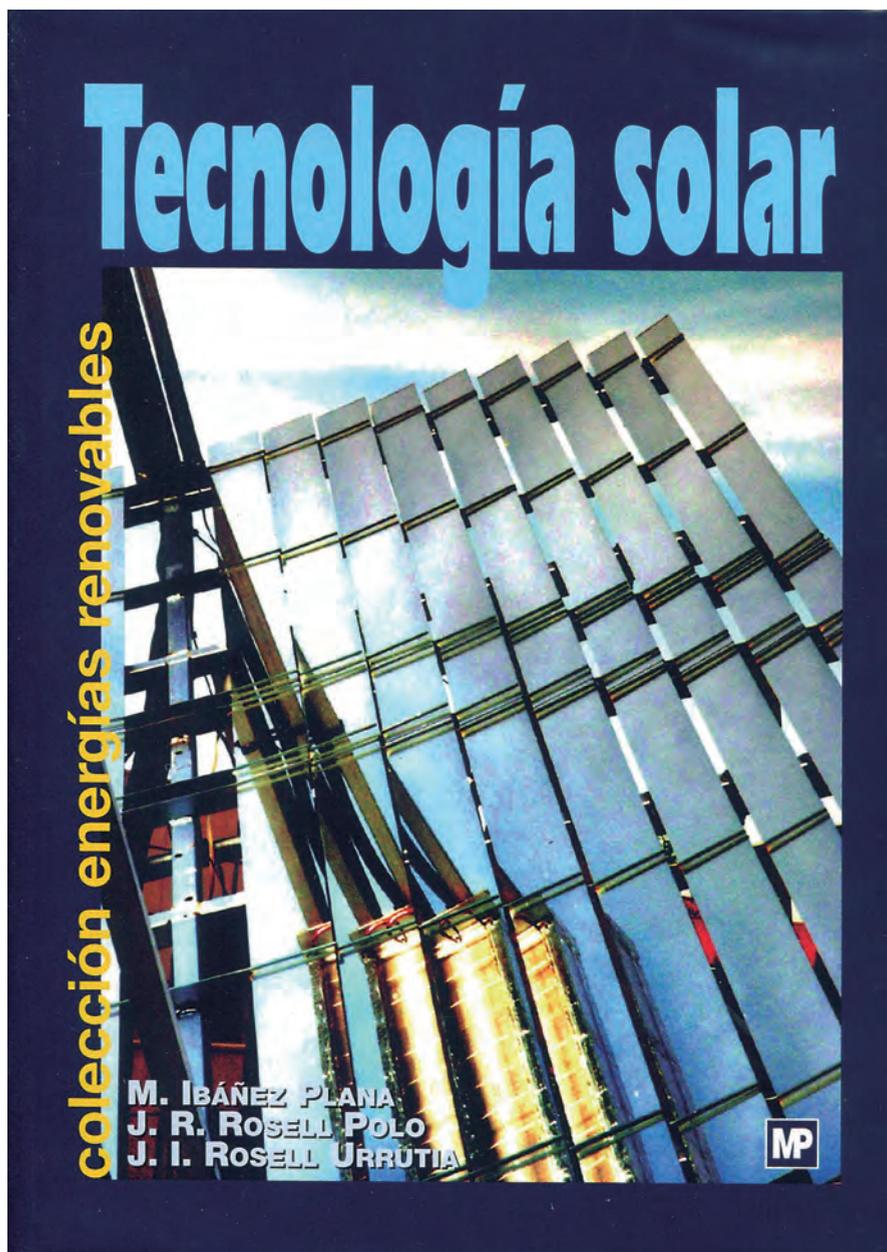
Madrid: A. Madrid Vicente, 2010.



GONZÁLEZ VELASCO, Jaime. *Energías renovables*. Barcelona: Reverté, 2009.



GUERRERO LEMUS, Ricardo; MARTÍNEZ-DUART, José Manuel.
*Renewable energies and CO₂: cost analysis, environmental impacts
and technological trends-2012 edition*. London: Springer, 2013.



IBÁÑEZ PLANA, Miguel; ROSELL POLO, Joan Ramón;
ROSELL URRUTIA, Joan Ignasi. *Tecnología solar*.
Madrid: Mundi-Prensa, 2011.

Paraninfo

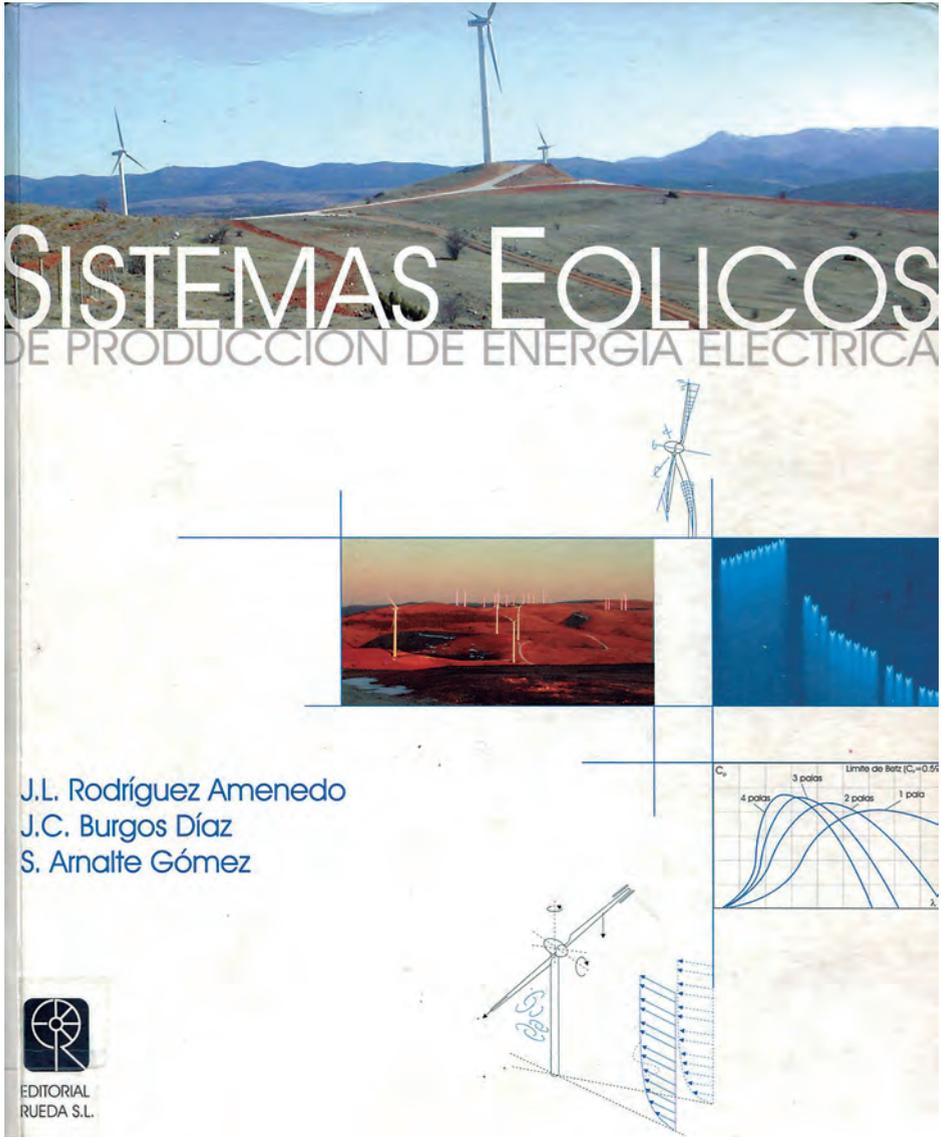
EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EDIFICIOS

Certificación y Auditorías Energéticas

**Francisco Javier Rey Martínez
Eloy Velasco Gómez**



REY MARTÍNEZ, Francisco Javier; VELASCO GÓMEZ, Eloy.
Eficiencia energética en edificios: certificación y auditorías energéticas.
Madrid: Thomson, 2006.

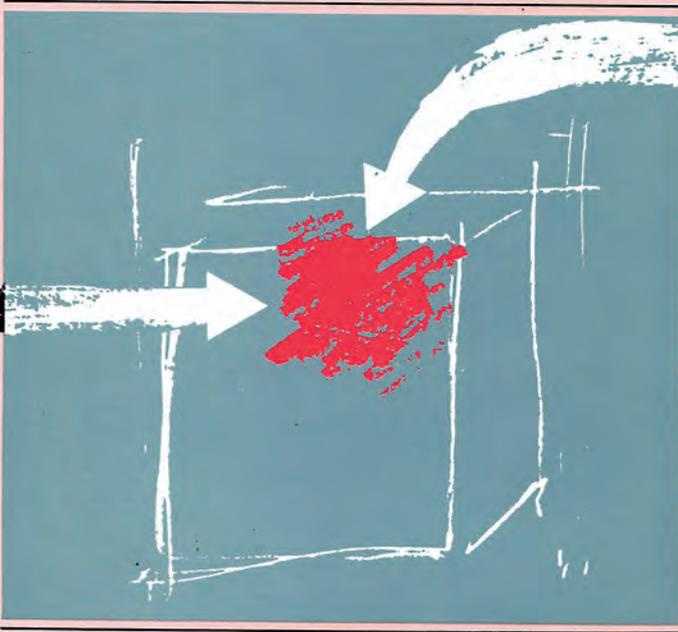


Sistemas eólicos de producción de energía eléctrica.

Coordinadores: José Luis Rodríguez Amenedo, Santiago Arnalte Gómez,
Juan Carlos Burgos Díaz. Madrid: Editorial Rueda, 2003.

Colección Documentos Ciemat

**SOLAR THERMAL
DESALINATION PROJECT
FIRST PHASE RESULTS
&
SECOND PHASE DESCRIPTION**



Ciemat

Centro de Investigaciones Energéticas,
Medioambientales y Tecnológicas
Secretaría General de la Energía
y Recursos Minerales.

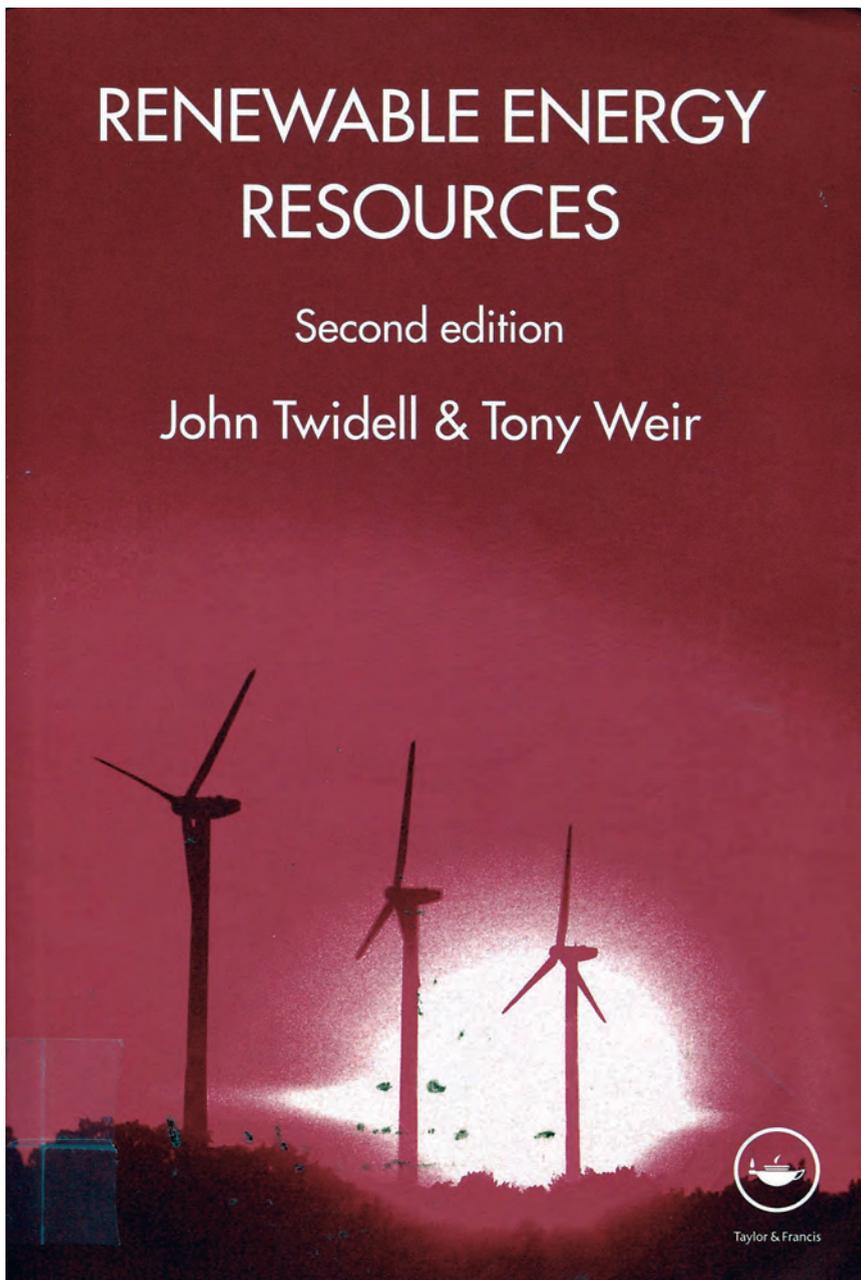
MINISTERIO DE INDUSTRIA, COMERCIO
Y TURISMO

Solar thermal desalination project: first phase results and second phase description.
Madrid: Secretaría General Técnica del CIEMAT, 1991.

RENEWABLE ENERGY RESOURCES

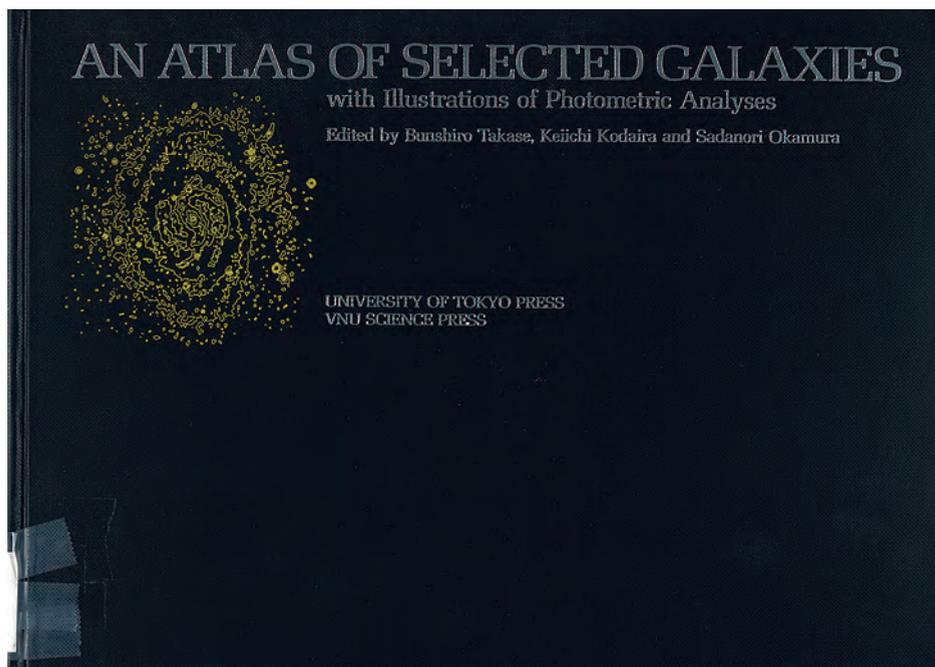
Second edition

John Twidell & Tony Weir



TWIDELL, John; WEIR, Tony. *Renewable energy resources*.
London: Taylor & Francis, 2006.

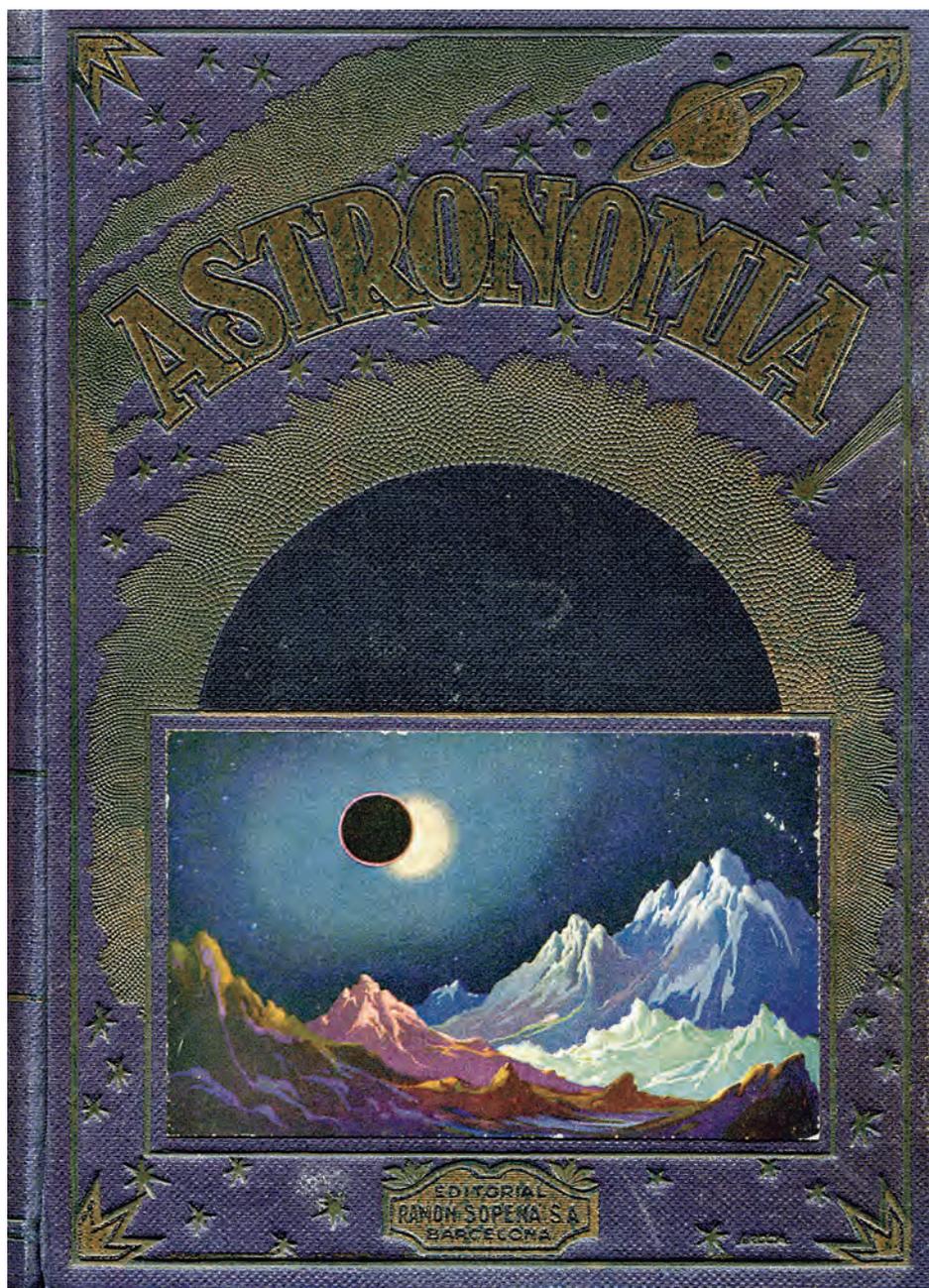
ASTROFÍSICA: LA LUZ DE LAS ESTRELLAS



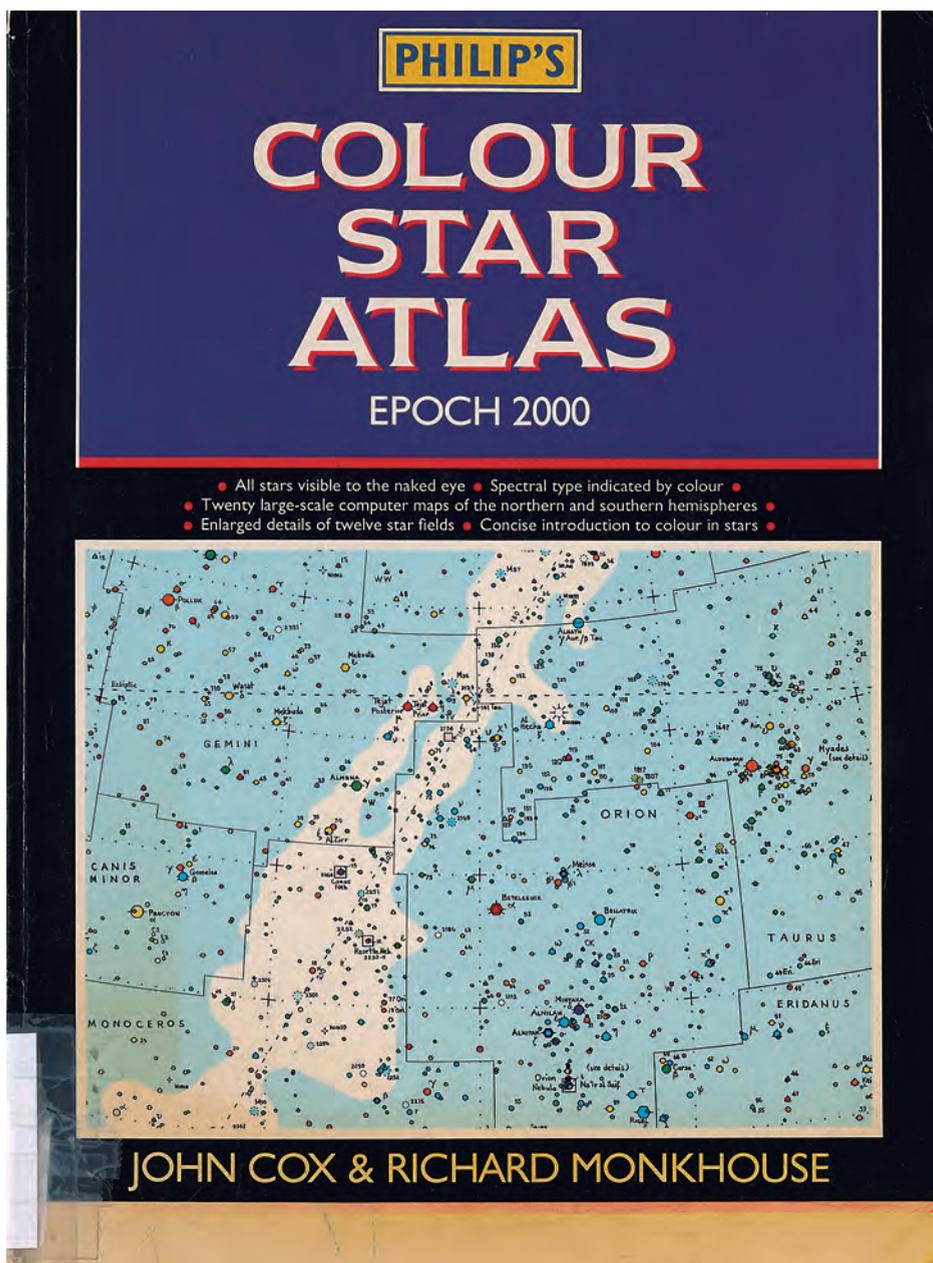
An atlas of selected galaxies: with illustrations of photometric analyses.
[Editado] Bunshiro Takase, Keiichi Kodaira, Sadanori Okamura Tokyo.
Utrecht: University of Tokyo Press; VNU Science Press, 1984.



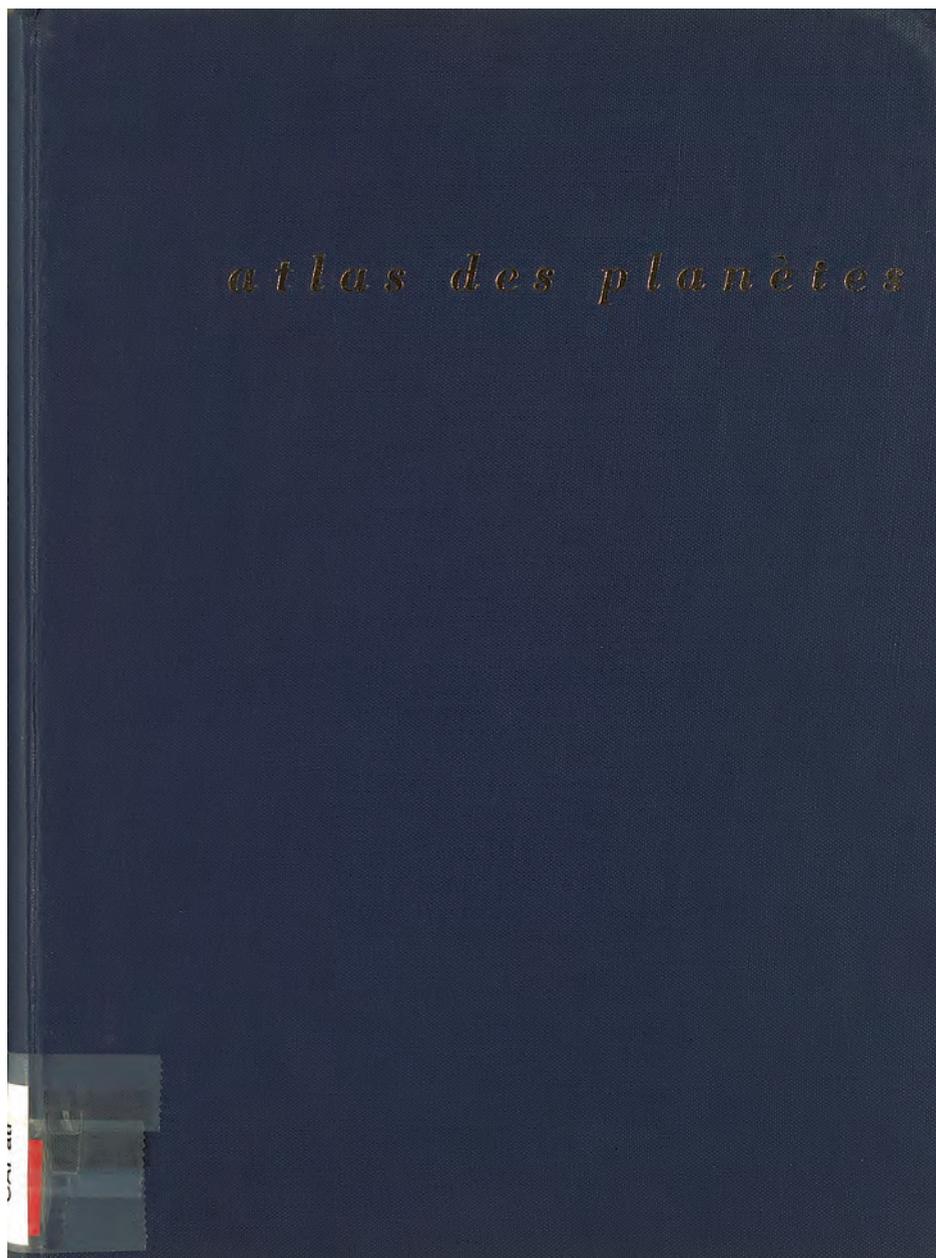
BARRENA DELGADO, R.; León Cruz, J. de; Roca Cortés, Teodoro;
Torrentó Coello, A. S. *Problemas de astrofísica*. Badajoz: Abecedario, 2006.



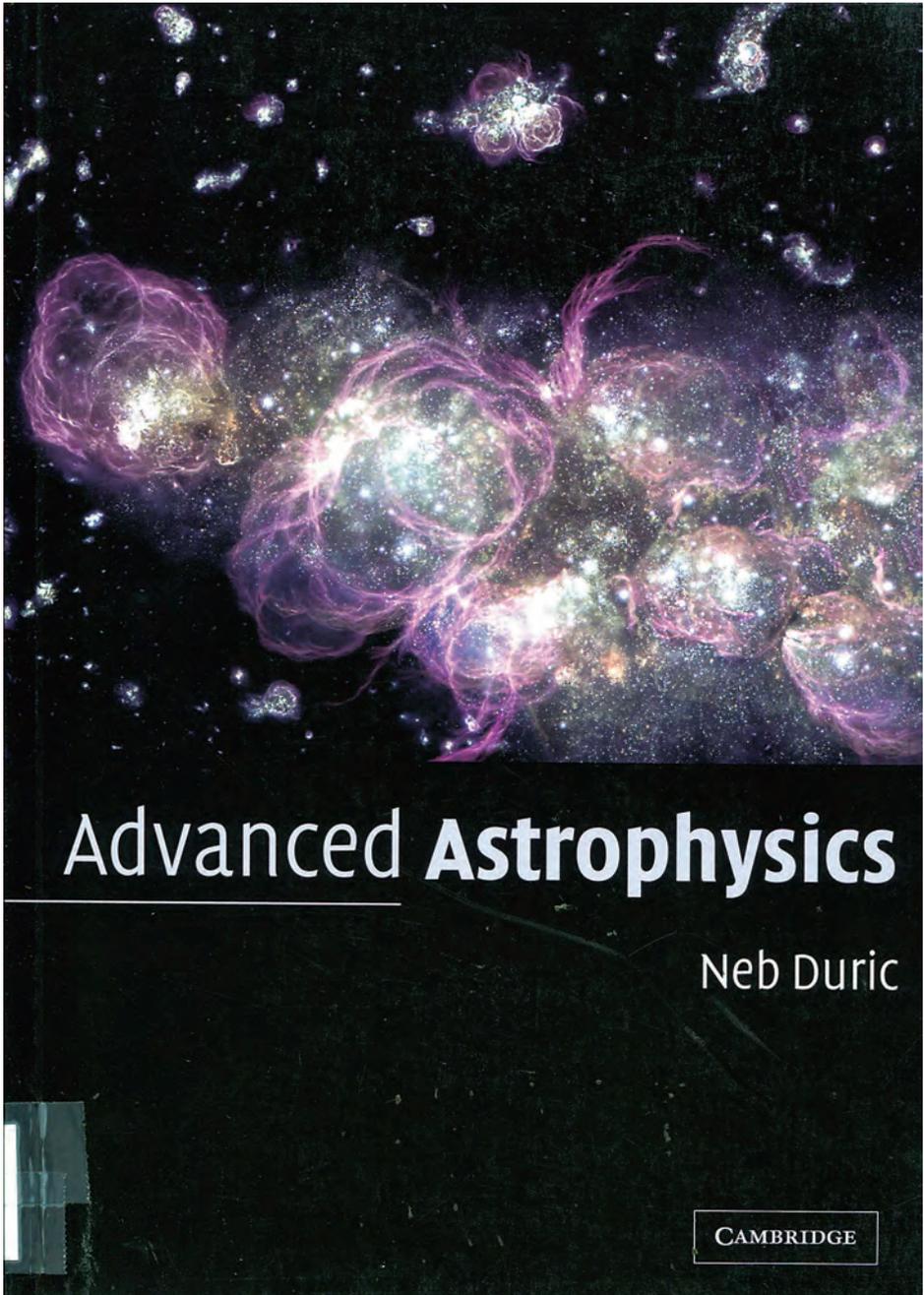
COMAS SOLÁ, José. *Astronomía*. Barcelona: Ramón Sopena, 1939.



COX, John; MONKHOUSE, Richard. *Philip's colour star atlas*.
London: George Philip, 1991.



CALLATAY, Vincent de; DOLLFUS, Audouin. *Atlas des planètes*.
Bruxelles: A. de Visscher, 1968.



DURIC, Neb. *Advanced astrophysics*. Cambridge: University Press, 2004.



GONZÁLEZ MARTÍNEZ-PAIS, Ignacio. *Introducción a la mecánica celeste: formulación newtoniana*. La Laguna: Servicio de Publicaciones, Universidad de La Laguna, 2003.

The IAC Morphological Catalog of Northern Galactic Planetary Nebulae

Arturo Manchado, Martín A. Guerrero,
Letizia Stanghellini and Miquel Serra-Ricart



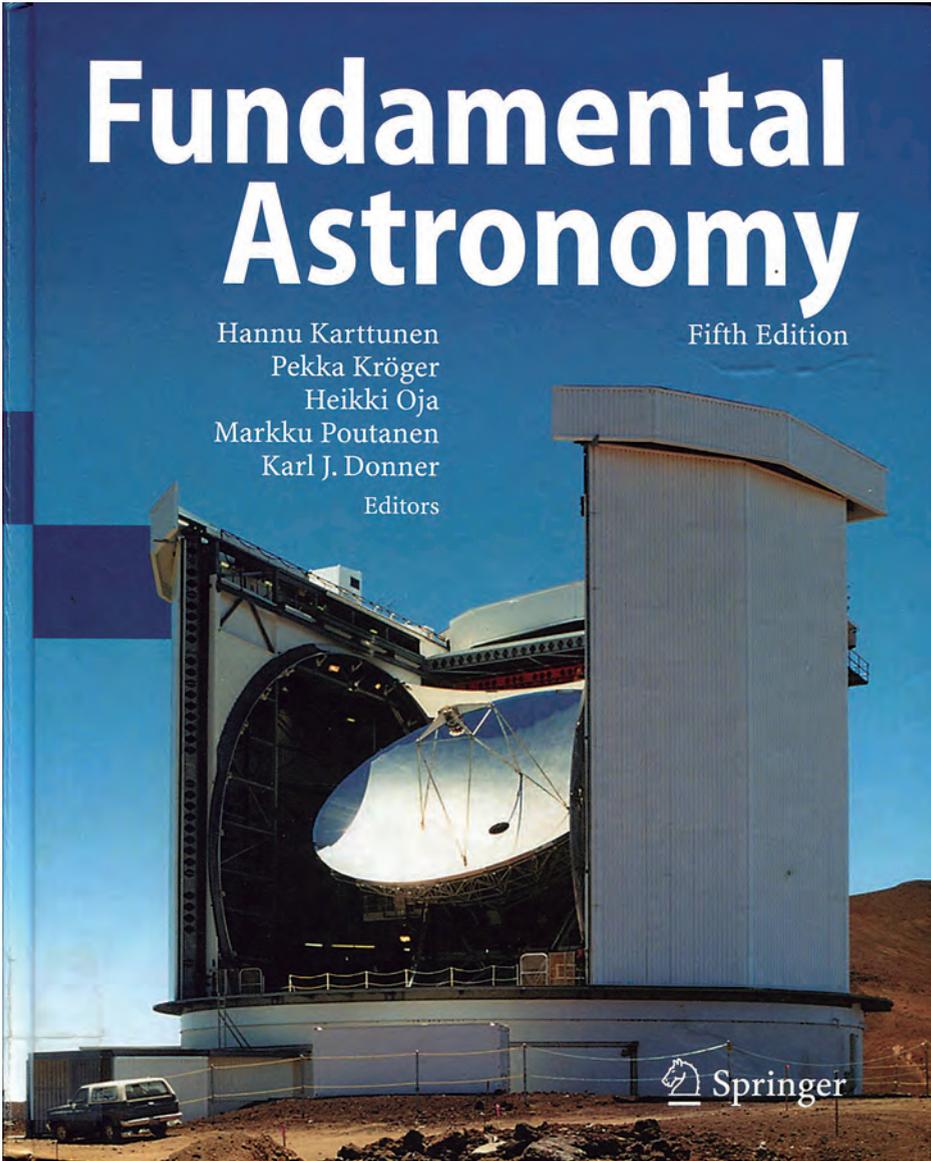
The IAC morphological catalog of northern galactic planetary nebulae = Catálogo morfológico del IAC de nebulosas planetarias galácticas del hemisferio norte.

La Laguna: Instituto de Astrofísica de Canarias, 1996.

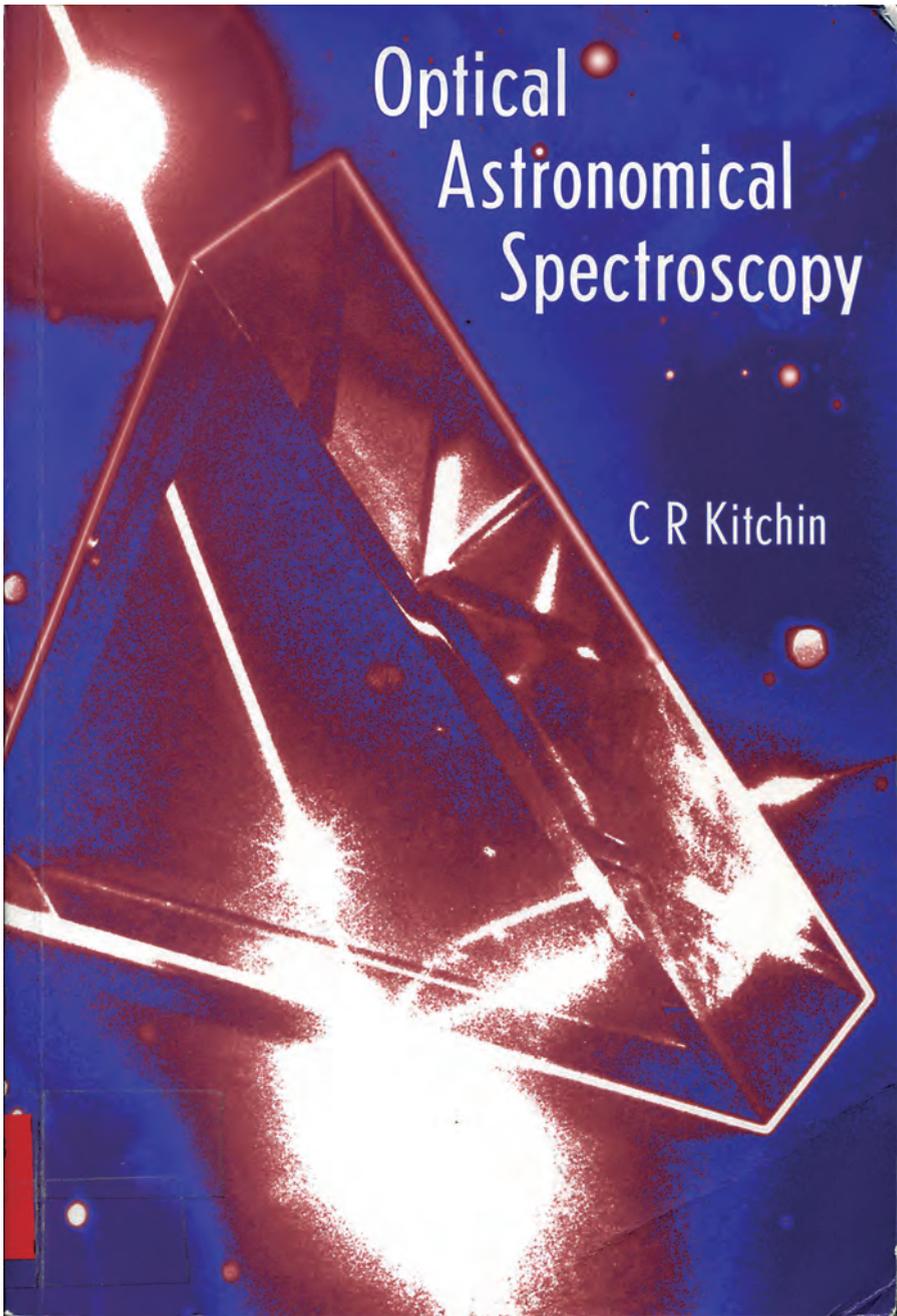
Fundamental Astronomy

Hannu Karttunen
Pekka Kröger
Heikki Oja
Markku Poutanen
Karl J. Donner
Editors

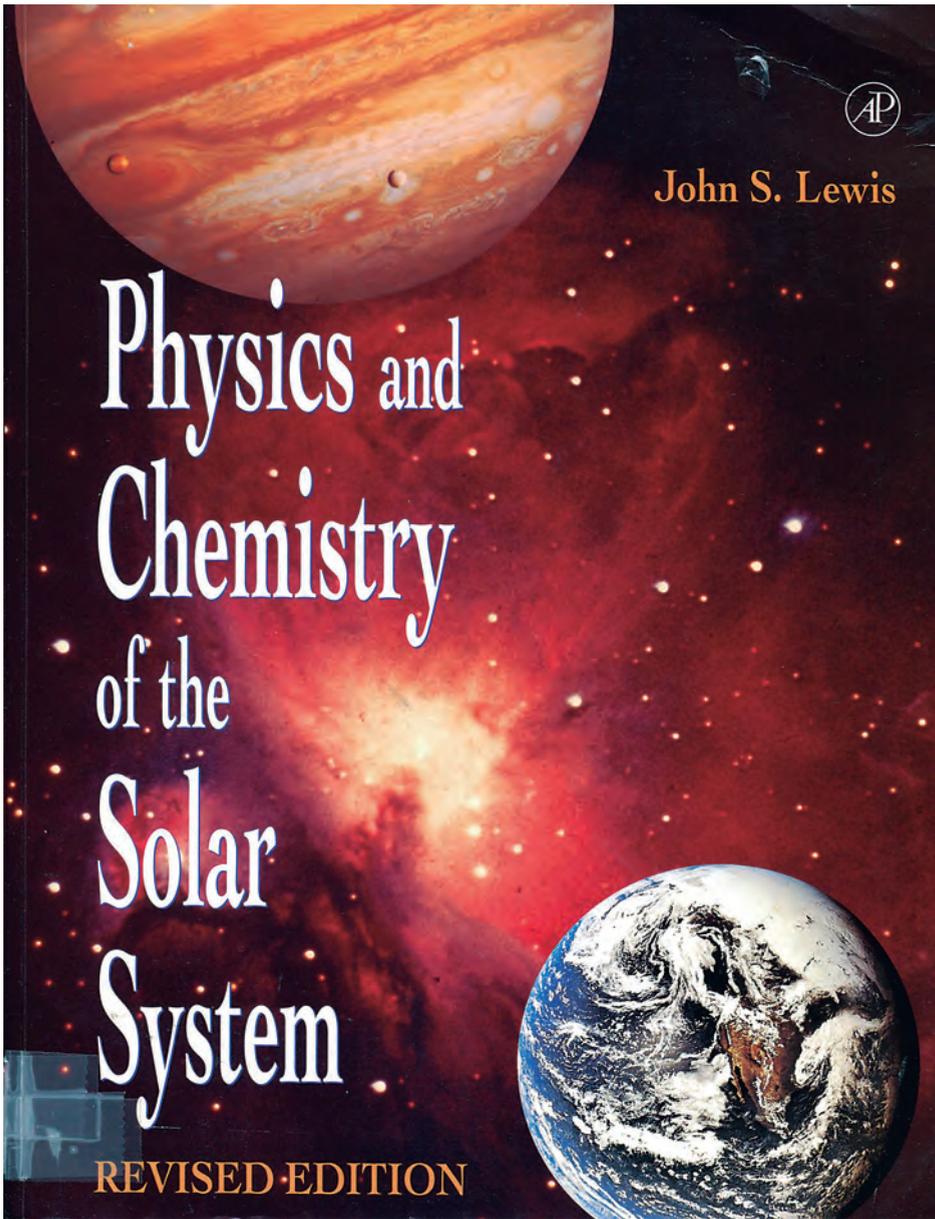
Fifth Edition



KARTTUNEN, Hannu. *Fundamental astronomy*. Berlin: Springer-Verlag, 2007.



KITCHIN, C.R. *Optical astronomical spectroscopy*. Bristol: Institute of Physics, 1995.



LEWIS, John S. *Physics and chemistry of the solar systems*. San Diego: Academic Press, 1997.

D-2024

Telescopes

HOW TO MAKE THEM AND USE THEM

EDITED BY THORNTON PAGE & LOU WILLIAMS PAGE

VOLUME 4 *Sky and Telescope* Library of Astronomy

Illustrated with over 120 photographs, drawings, and diagrams

6607185771

The Macmillan Company, New York
Collier-Macmillan Limited, London



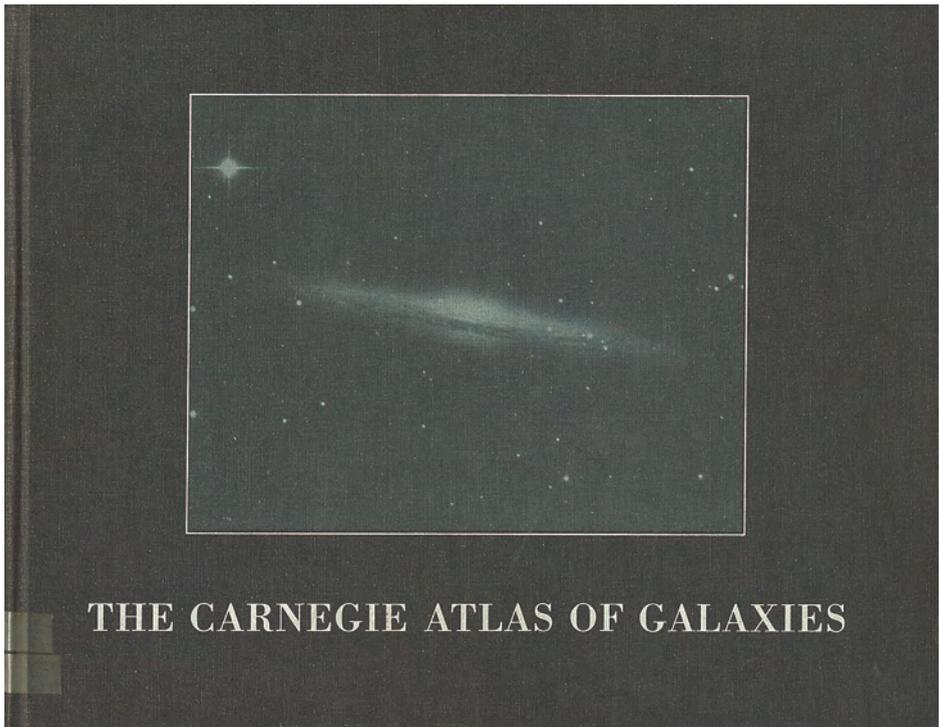
Telescopes; how to make them and use them. [Editado] Thornton Page,
Lou Williams Page. New York: Macmillan, 1966.

An Introduction to Planetary Atmospheres

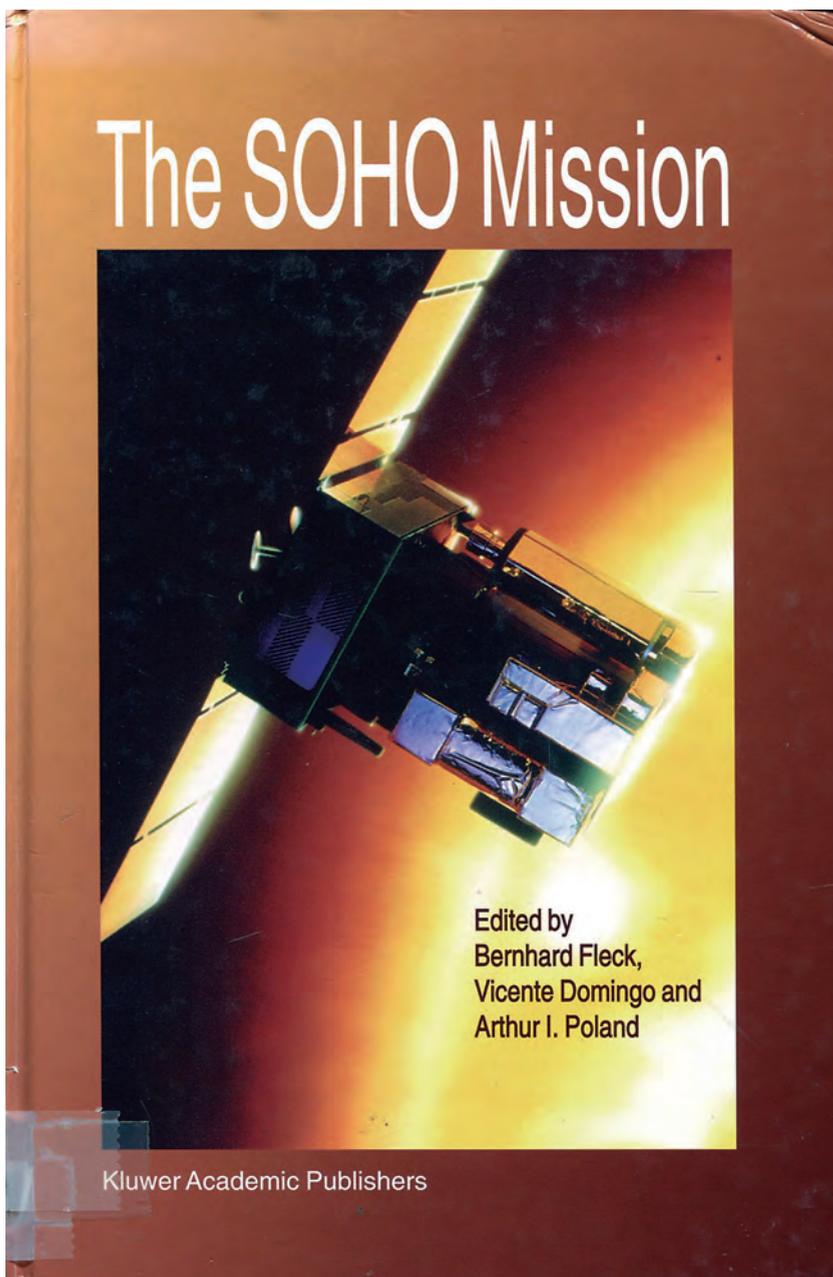
Agustín Sánchez-Lavega



SÁNCHEZ-LAVEGA, Agustín. *An introduction to planetary atmospheres*.
Boca Raton: CRC Press, 2011.

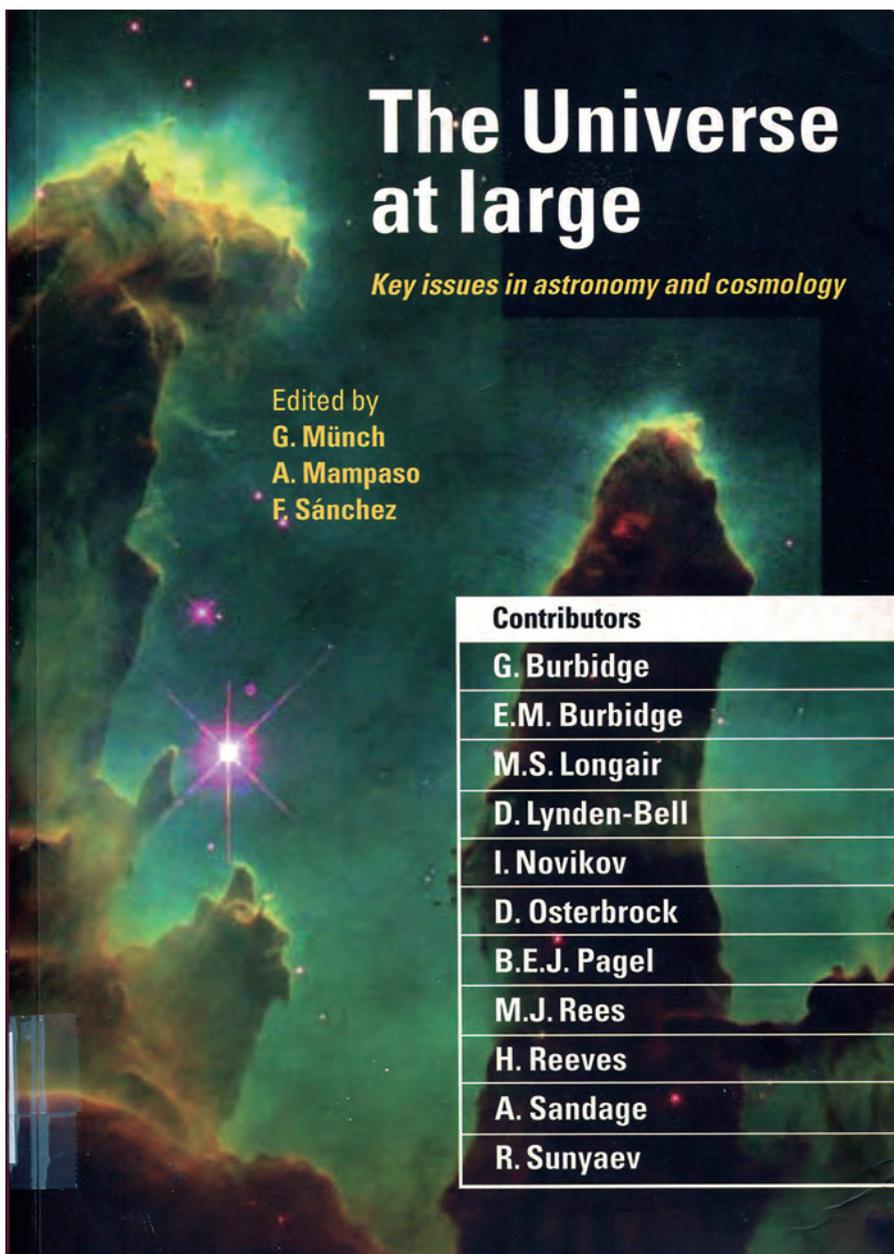


SANDAGE, Allan; BEDKE, John. *The Carnegie atlas of galaxies*.
Washington, D. C.: Carnegie Institution of Washington
with the Flintridge Foundation, 1994.



Kluwer Academic Publishers

The Soho mission. [Editores] B. Fleck, V. Domingo, A. Poland.
Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1995.



The universe at large: key issues in astronomy and cosmology.

[Editado por] Guido Münch, Antonio Mampaso, Francisco Sánchez.
Cambridge: University Press, 1997.



ULL | Universidad
de La Laguna