

ROLF TARRACH

De la materia al cosmos



«Transmite la pasión de un científico que sabe contar,
contextualizar y tender puentes entre ciencia y cultura»
J. IGNACIO CIRAC (Instituto Max Planck)



De la materia al cosmos

Rolf Tarrach

De la materia al cosmos

El siglo de la física cuántica y relativista

Prólogo de J. Ignacio Cirac

en
sayos



Primera edición: noviembre de 2025

© Rolf Tarrach, 2025

© del prólogo: J. Ignacio Cirac, 2025

© de la presente edición: Editorial Funambulista, 2025
c/ Flamenco, 26 - 28231 Las Rozas (Madrid)

www.funambulista.net

IBIC: PH

ISBN: 979-13-990383-7-8
Dep. Legal: M-23168-2025

Maquetación de interiores y cubierta: Gian Luca Luisi

Motivo de la cubierta: *Damero magnífico*
(créditos en la sección «Créditos fotográficos»)

Impresión y producción gráfica: Safekat

Impreso en España

«Cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública o transformación de esta obra solo puede ser realizada con la autorización de sus titulares, salvo excepción prevista por la ley. Diríjase a CEDRO (Centro Español de Derechos Reprográficos) si necesita fotocopiar o escanear algún fragmento de esta obra (www.conlicencia.com; 91 702 19 70 / 93 272 04 47)»

Reservados todos los derechos. No se permite reproducir, almacenar en sistemas de recuperación de la información ni transmitir parte alguna de esta publicación, cualquiera que sea el medio empleado —electrónico, mecánico, fotocopia, grabación, etc.— sin el permiso previo por escrito de los titulares del *copyright*.

De la materia al cosmos

A Maribel

UN SIGLO DE TEORÍAS ENTRELAZADAS

(prólogo de J. Ignacio Cirac)

Muchos científicos sostienen que el siglo xx fue el siglo de la física. En apenas unas décadas, teorías y experimentos revolucionaron nuestra manera de concebir lo que son el espacio, el tiempo, la materia y el propio Universo. De hecho, nunca antes en la historia de la humanidad se habían producido transformaciones científicas y tecnológicas de semejante magnitud, ni se había alterado de manera tan radical nuestra comprensión de la Naturaleza. El impacto fue tan profundo que no solo afectó a la ciencia, sino que transformó para siempre la sociedad en su conjunto.

Este libro nos invita a recorrer esas revoluciones, a comprender su lógica interna y sus consecuencias, de la mano de un guía excepcional: Rolf Tarrach. Conocido internacionalmente por sus aportaciones en física teórica, Tarrach no solo ha sido un espectador privilegiado de estos avances, sino también un protagonista

activo que ha contribuido al progreso científico en varios campos. Además, su visión amplia y profunda permite al lector disfrutar de un relato en el que se «entrelazan» los distintos fenómenos descubiertos en ese siglo, con los conceptos y paradigmas desarrollados para entenderlos. Y todo ello aderezado con notas históricas, anécdotas y reflexiones profundas que consiguen hacer que la lectura sea sencilla y entretenida.

Las dos revoluciones científicas del siglo xx más decisivas fueron, sin duda, la teoría de la relatividad y la física cuántica. Con la primera, el espacio y el tiempo dejaron de ser absolutos. La relatividad especial y la relatividad general revelaron que su manera de transcurrir depende del movimiento del observador y de su entorno (más concretamente, del campo gravitatorio al que está sometido). De ellas nacieron ideas tan fascinantes como la posibilidad de viajar al futuro, la existencia de agujeros negros, la explicación del Big Bang o la expansión del Universo. Con la segunda, la física cuántica, el mundo microscópico se nos mostró radicalmente distinto a lo que se había imaginado: electrones, átomos, moléculas o fotones se comportan de maneras insólitas, sometidos a principios que desafían el sentido común y que incluso ponen en cuestión conceptos filosóficos como el determinismo y el realismo. La física cuántica, además, describe cómo las partículas elementales forman átomos, y estos, moléculas, que se unen para generar todo lo que nos rodea, desde el aire, hasta el mar o, incluso, hasta nosotros mismos. Y todo ello con una exquisita precisión. Más aún, esta teoría ha permitido el desarrollo de tecnologías que hoy son imprescindibles: desde la electrónica moderna a los láseres, o las nuevas tecnologías cuánticas.

El siglo xx fue también un tiempo de descubrimientos experimentales extraordinarios. No se trató solo de construir teorías, sino de explorar nuevas fronteras para encontrar fenómenos inéditos

y sorprendentes. Ejemplos paradigmáticos son la superconductividad, la superfluidez, los semiconductores, la observación de la expansión del Universo o de la radiación de fondo. Estos avances fueron posibles gracias a científicos y científicas que no dudaron en romper con los paradigmas heredados, que se enfrentaron a incomprendimientos y dificultades y que, con perseverancia, abrieron las puertas a un nuevo mundo.

Este libro, sin embargo, no se limita a describir conceptos y resultados. También da vida a las personas que estuvieron detrás de esos logros. Muchos de ellos recibieron el Premio Nobel y protagonizaron historias humanas plagadas de pasión, creatividad, errores, intuiciones brillantes y esfuerzos titánicos. El lector encontrará en estas páginas no solo la explicación rigurosa de teorías y fenómenos, sino también la narración de los contextos, las discusiones, las anécdotas y las curiosidades que acompañaron a esos descubrimientos. El texto está magníficamente escrito, y «entrelaza» ideas y episodios de manera fluida, ligera y, al mismo tiempo, exhaustiva.

Rolf Tarrach aporta a esta tarea no solo su talento científico, sino también una experiencia vital y académica de primer nivel. Fue catedrático de Física Teórica en la Universidad de Barcelona, presidente del Consejo Superior de Investigaciones Científicas y primer rector de la Universidad de Luxemburgo. Conoce a fondo el mundo universitario y de la investigación, y posee una sólida formación cultural que le permite tender puentes entre la ciencia, la historia, la literatura y el arte. Esa amplitud de intereses se percibe en cada página de este libro.

Tuve la fortuna de conocer a Rolf en Almagro en 1997, en una conferencia sobre óptica cuántica y teoría cuántica de la información —campos en los que se incluyen la criptografía y la computación cuántica— organizada gracias a la estrecha colaboración

que existía entre la Universidad de Innsbruck y la Universidad de Castilla-La Mancha. Entre los asistentes estaba Rolf, que había iniciado una nueva línea de investigación en ese terreno tras una destacada carrera en física de altas energías, en particular en cromodinámica cuántica, disciplina que estudia las fuerzas que mantienen unidos los núcleos atómicos. Me impresionó que científicos con una trayectoria tan sólida y ya consolidada tuvieran el coraje de abrir un nuevo camino, con todos los riesgos que ello conlleva. La reunión de Almagro resultó un éxito y marcó el inicio de importantes colaboraciones europeas en investigación cuántica. De hecho, de allí surgió la idea de organizar una conferencia en 1998 en el Centro de Ciencias de Benasque Pedro Pascual, evento que, desde entonces, se celebra cada dos años y es referente mundial en teoría cuántica de la información.

Ese encuentro fue el inicio de una relación científica y personal muy enriquecedora. Rolf nos visitó en la Universidad de Innsbruck en 1999 y, desde entonces, pude apreciar más de cerca su extraordinaria personalidad. Aparte de sus contribuciones a la cromodinámica cuántica, había escrito artículos profundos sobre fundamentos de la mecánica cuántica y poseía un conocimiento amplio y sólido de la historia de la física del siglo xx. Podía conversar con igual soltura sobre las discusiones que precedieron la formulación del modelo estándar, su encuentro con Richard Feynman, o acerca de temas de literatura y arte. En reuniones con colegas como Peter Zoller, Rainer Blatt, Artur Ekert o Anton Zeilinger, Rolf solía situarse en el centro de la conversación, aportando su visión lúcida y estimulante.

En este libro, Rolf ha tenido la generosidad de poner a disposición de los lectores no solo su vasto conocimiento científico, sino también su perspectiva histórica, cultural y sociológica. Se trata de

una obra completa que abarca tanto los aspectos fundamentales como los más anecdóticos de la física del siglo xx. Aunque no sigue un orden estrictamente cronológico, ofrece siempre el contexto en que surgieron los avances, describe la vida de los protagonistas e incorpora detalles y curiosidades que enriquecen la lectura.

El texto puede disfrutarse desde varias perspectivas. Por un lado, es accesible a personas sin formación en física, que encontrarán una explicación clara de en qué consistieron las revoluciones científicas del siglo pasado, en qué contexto aparecieron y qué consecuencias tecnológicas han tenido. El número de fórmulas es mínimo, y los pasajes más técnicos pueden omitirse sin perder el hilo. Por otro lado, quienes estudian o han estudiado física descubrirán una exposición brillante que conecta entre sí los distintos avances y los explica con precisión y sencillez. Finalmente, los expertos hallarán en estas páginas una síntesis rigurosa y clara, enriquecida con aspectos históricos, anecdóticos y conceptuales de gran interés.

Estoy seguro de que todos los lectores, sean cuales sean sus conocimientos previos, disfrutarán con este libro. En él se transmite la pasión de un científico que sabe contar, que sabe contextualizar, que sabe tender puentes entre ciencia y cultura. Una obra que, como pocas, nos conduce al corazón de las ideas que marcaron el siglo xx y que siguen, hoy, alimentando el pensamiento científico y las tecnologías del futuro.

J. IGNACIO CIRAC
Garching, 29 de agosto de 2025

INTRODUCCIÓN

El siglo xx fue el escenario de las tres grandes revoluciones de la física, basadas, respectivamente, en la constancia absoluta de la velocidad de la luz en el vacío; en la imposibilidad de distinguir inercia y gravitación; y en el descubrimiento de que los conceptos de la física clásica, tan brillantemente desarrollada por Galileo, Newton, Maxwell, Boltzmann y muchos otros, no sirven para entender los átomos y los núcleos, y por ello no sirven para entender ni la materia ni la energía.

Las dos primeras revoluciones llegaron de la mano de Albert Einstein, y la tercera fue iniciada por Max Planck, continuada por el propio Einstein, refinada por Niels Bohr, y alcanzó su cénit con los *jóvenes* Heisenberg, Dirac y Pauli y el no tan *joven* Schrödinger, y ha sido continuamente ampliada y extendida hasta nuestros días.

Esta última revolución, la denominada cuántica, consta de una serie de ideas insólitas y contraintuitivas que describen perfectamente lo que observamos, y cuyas predicciones se han verificado

siempre, si bien sus grandes artífices consideraban que quedaban probablemente más allá de una comprensión total por parte de nuestro minúsculo —aunque complejísimo— cerebro de mero *Homo sapiens*.

Cada capítulo de este libro se construye alrededor de uno o unos pocos científicos, todos ellos excepcionales. Dicha selección podría ser considerada sesgada, y, sin duda —de una cierta forma—, lo es. Sin embargo, el valor de las contribuciones de cada uno de ellos es indudable, y estas forman parte del que se ha dado en llamar consenso científico.

Más allá de una breve descripción del nuevo conocimiento científico aportado por estos científicos y de su contexto, he incluido notas biográficas e históricas, reflexiones filosóficas e interpretativas, comentarios metodológicos... y alguna que otra anécdota. Las notas biográficas e históricas me han puesto a veces en una situación difícil cuando dos fuentes, de autores reconocidos, tienen versiones contradictorias. El papel de Pauli en el artículo revolucionario de Heisenberg es un ejemplo. El origen del apodo «marcianos» para los físicos y matemáticos superdotados de origen húngaro es otro. No siendo historiador, he optado en cada caso por la versión que me parecía la más probable, o la más significativa, incluyendo preventivamente algún «quizás» o expresión análoga.

La presentación es aproximadamente cronológica. La comprensión de las nuevas ideas y su flujo y mutuas influencias aspiran a ser el hilo conductor de la obra.

Algunos conceptos *prerrevolucionarios*, por llamarlos de algún modo, jugarán un papel central: la energía y la entropía; las simetrías, sus invariancias y algunas leyes de conservación; la información; la simplificación y la unificación; el Universo y el vacío, que, por cierto, no es la nada.

Los nuevos conceptos se explicarán de la manera más didáctica posible, con la ayuda de unas pocas fórmulas —muy sencillas todas ellas— que ayudarán a la comprensión. Suele decirse que cada fórmula divide por dos el número de lectores potenciales. ¡No estoy de acuerdo! La primera tal vez puede dividirlos por dos, pero no las siguientes. Modestamente creo que la ganancia en claridad compensa esa pérdida. La decisión de no incluir ninguna fórmula con derivadas ni integrales tiene como consecuencia la ausencia de todas las ecuaciones dinámicas —las que dan la evolución en el tiempo— de las cuatro interacciones fundamentales. He intentado lidiar de la mejor forma posible con esta limitación.

Mi condición de físico teórico cuántico, durante casi 30 años —hasta el cambio de siglo—, se reconocerá fácilmente. La considero un privilegio. El carácter sobrio del texto es, también, consecuencia de dicha condición. Durante los últimos 25 años, mi actividad profesional me alejó de la física, si bien colateralmente aprendí mucho de la ciencia en general y algo de su relación con la filosofía. Así que con este libro vuelvo a mi primer amor, con unas perspectivas más amplias y, sobre todo, con mucha ilusión.

Espero que el lector disfrute tanto como yo del inmenso monumento conceptual e intelectual que es la física moderna (y contemporánea) y de sus aplicaciones a los astros y al cosmos, así como al cada vez más presente mundo de la información.

El libro queda dividido en cinco secciones. La primera, la del **balbuceo cuántico** y la de las dos revoluciones relativistas, la **relatividad especial** y la **relatividad general**, que tuvieron como escenario el primer cuarto del siglo xx, corresponde a los seis primeros capítulos. La sección relativa a la madurez cuántica, que empieza en 1925 y acaba 40 años más tarde, es la de la **mecánica cuántica**. La tercera sección es la de la construcción de las **teorías**

cuánticas de campos (o de la segunda cuantización), que arranca en los años 1930 y acaba en la década de 1980. Ambos periodos ocupan conjuntamente los siguientes cuatro capítulos. Las últimas dos secciones corresponden a la **astrofísica** y a la **cosmología**, que son aplicaciones de mucho de lo tratado anteriormente, y a la **información cuántica**, esto es, el traslado de las ideas cuánticas a las teorías y tecnologías de la información, comunicación y computación. Constituyen los cuatro capítulos finales. En conclusión, el lector que nos haya acompañado en esta aventura del saber hallará una coda y un epílogo, con reflexiones complementarias y, para recapitular, dónde estamos hoy y hacia dónde podríamos ir.

Algunas partes de la física recibirán más o menos atención que otras en el libro. Es debido a lo que, personalmente, entiendo como ideas *revolucionarias*, algo que, sin duda alguna, reflejará algún que otro sesgo. La perspectiva general del libro es la de la teoría, con su cohorte de conceptos, dejando un poco en segundo plano la observación y la experimentación, y sus tecnologías de instrumentación, absolutamente extraordinarias e ingeniosas, y sin las cuales —no debemos olvidarlo nunca— no habría avances en el ámbito de la teoría. Rige pues aquí el *Trust, but verify*: confía, pero comprueba. La teoría, la observación, la experimentación y la instrumentación se entrelazan en un baile de cronología aparentemente aleatoria, en el que se van turnando los papeles de iniciador, madurador, ejecutor y finalista.

El nivel de la obra es el de la divulgación ambiciosa. Esto quiere decir que considero que una persona sin estudios de física, pero curiosa y con un fino barniz de conocimientos científicos, debería de estar en condiciones de poder disfrutar de su lectura, ojalá tanto como lo he hecho yo con su escritura. Lo mismo debería darse con los científicos que no son físicos. Asimismo, he tenido muy presen-

tes a los estudiantes interesados en la física. También confío en que hallen información interesante mis colegas físicos, e, incluso, quizás algunos que son investigadores.

Con todo, es posible que lectores que no pertenezcan a ninguna de las anteriores categorías, en particular los más jóvenes, sean los que le saquen el máximo provecho a la lectura de este libro.

Una rápida lectura del apéndice B antes de empezar puede ser útil para facilitar la comprensión posterior, y para tener en mente cuándo volver a él. En el mismo sentido, una segunda lectura de varios capítulos —tras haber acabado el libro— sin duda redondeará y ayudará a profundizar la comprensión de esta maravillosa aventura de la física.

Los verdaderos protagonistas del libro son los más de cien premios Nobel de Física mencionados, la mitad de todos los que han recibido el de Física desde que se otorga.

El glosario recoge todos los conceptos más importantes que aparecen en la obra en letra negrita.

Vivo en Luxemburgo, país que vio nacer en el siglo XIX a un premio Nobel de Física, Gabriel Lippmann. Nací en España, y allí viví la mayor parte de mi vida y allí aprendí a soñar. Soñar es importante. Mi sueño es que la lectura de este pequeño libro aumente, siquiera un poco, la probabilidad de tener en los próximos cincuenta años un Premio Nobel de Física otorgado por una investigación hecha en España.