

JOSÉ MANUEL SÁNCHEZ RON

# EL MUNDO DESPUÉS DE LA REVOLUCIÓN

La física de la segunda mitad del siglo xx

PASADO & PRESENTE

PASADO & PRESENTE  
BARCELONA

# ÍNDICE

<i>Introducción</i> . . . . .	9
<b>1. REVOLUCIONES EN LA FÍSICA (PRIMERA MITAD DEL SIGLO XX)</b> . . . . .	21
El germen de una revolución: de Maxwell a Lorentz . . . . .	21
La revolución: la teoría de la relatividad especial . . . . .	26
Un mundo de cuatro dimensiones. . . . .	28
La revolución se extiende: la teoría general de la relatividad . . . . .	29
Cosmología . . . . .	33
La importancia de la tecnología: nuevos telescopios para observar el Universo. . . . .	37
La expansión del Universo: Vesto Slipher y Edwin Hubble . . . . .	41
Relatividad y filosofía . . . . .	46
Una nueva revolución: la física cuántica. . . . .	56
La revolución (cuántica) se extiende: la química cuántica. . . . .	66
Paul A. M. Dirac: física, matemáticas y «belleza». . . . .	74
Revoluciones dentro de una revolución: la ecuación de Dirac y la antimateria . . . . .	79
Partículas elementales, Yukawa y la fuerza nuclear . . . . .	88
Una nota sobre Japón . . . . .	95
La electrodinámica cuántica, la segunda cuantización, renormalización y la teoría cuántica de campos . . . . .	97
La física estadounidense y la tradición empírica. . . . .	115
Richard Feynman, puente de unión entre las dos mitades del siglo XX . . . . .	115
<b>2. GRAVITACIÓN Y UNIVERSO</b> . . . . .	121
I. ¿Universo eterno o sempiterno? El nacimiento de la radioastronomía. . . . .	122

El origen cosmológico del tiempo y los problemas de su verificación. . . . .	122
La cosmología del estado estacionario . . . . .	125
Del radar a la radioastronomía . . . . .	133
La radioastronomía y la cosmología del estado estacionario . . . . .	140
Interludio: las telecomunicaciones, la Guerra Fría y el <i>Sputnik</i> . . . . .	143
La consolidación del Big Bang: el fondo de radiación de microondas. . . . .	154
Cuásares. . . . .	159
Púlsares y estrellas de neutrones . . . . .	164
II. Nueva vida para la relatividad general . . . . .	179
Búsqueda de una teoría del campo unificado . . . . .	179
Albert Einstein: la irresistible atracción de las matemáticas . . . . .	185
Otros matemáticos «relativistas». . . . .	187
La relatividad, una física «poco interesante». . . . .	190
Un viejo mundo nuevo: singularidades en el espacio-tiempo relativista. . . . .	200
Interludio: matemáticas y física. . . . .	211
Los agujeros negros: dinámica y realidad física . . . . .	213
Radiación gravitacional y lentes gravitacionales . . . . .	220
III. Nuevas ventanas abiertas al Universo. . . . .	222
Nuevos instrumentos astronómicos . . . . .	222
Inflación. . . . .	230
Arrugas en el tiempo . . . . .	236
Materia y energía oscuras . . . . .	241
Planetas extrasolares . . . . .	244
3. EL MUNDO CUÁNTICO . . . . .	249
I. Partículas «elementales»: la física de altas energías. . . . .	249
Rolf Wideröe, Ernest Lawrence y el ciclotrón . . . . .	249
Sociopolítica de la física de altas energías . . . . .	255
Nuevos aceleradores, nuevos elementos, nuevas partículas elementales . . . . .	261
El CERN . . . . .	270
Partículas y más partículas: los quarks como «principio unificador». . . . .	280

El descubrimiento del neutrino . . . . .	287
La saga de las simetrías: «La simetría dicta la interacción» . . . . .	293
Teorías de unificación . . . . .	305
Cruce de caminos: física cuántica, cosmología y la nucleosíntesis estelar . . . . .	315
Psico-¿patología? moral del físico nuclear y de altas energías . . . . .	319
II. Entrelazamiento y multiuniversos. . . . .	330
El entrelazamiento cuántico . . . . .	330
Multiuniversos. . . . .	343
III. Fenómenos cuánticos macroscópicos . . . . .	347
Condensados de Bose-Einstein y superfluidez . . . . .	347
Superconductividad. . . . .	351
IV. Hijos de la física cuántica: ciencia y tecnología en el mundo cuántico . . . . .	353
La física del estado sólido, transistores, <i>chips</i> y circuitos integrados . . . . .	353
Chips y circuitos integrados . . . . .	371
Microscopios y nanotecnología. . . . .	377
Máseres y láseres . . . . .	380
4. Y LA FÍSICA CAMBIÓ EL MUNDO . . . . .	391
La Sociedad de la Información . . . . .	393
Internet y la <i>World Wide Web</i> . . . . .	398
Energía nuclear (I): política . . . . .	404
Energía nuclear (II): industria . . . . .	408
Física y físicos en las ciencias de la vida . . . . .	417
El Reino de las Imágenes. . . . .	417
Medicina nuclear . . . . .	422
Difracción de rayos X en el Laboratorio Cavendish . . . . .	426
Físicos en biología (1): Niels Bohr y Max Delbrück. . . . .	430
Físicos en biología (2): Erwin Schrödinger, teórico de la vida. . . . .	435
Físicos en biología (3): Francis Crick, de la física a la biología. . . . .	438
La estructura del ADN . . . . .	441
La física, una ciencia interdisciplinar . . . . .	443
El ojo que nos acompaña: el GPS . . . . .	443

Física y geología: la tectónica de placas . . . . .	444
La física no lineal . . . . .	448
La física y la extinción de los dinosaurios . . . . .	451
Epílogo . . . . .	455
<i>Bibliografía</i> . . . . .	457
<i>Índice alfabético</i> . . . . .	507

PASADO & PRESENTE

## INTRODUCCIÓN

Gracias a las estructuras triunfantes de la investigación y la teoría científica, el siglo xx será recordado como una era de progreso y no únicamente de tragedias humanas.

ERIC HOBSBAWM (2012: 550)

Nací en 1949, y aunque ya llevó vividos casi tres lustros del siglo xxi mi siglo es y será, básicamente, el xx. Cuando comencé mi camino por la vida, en lo que entonces era un oscuro país, España, ya habían tenido lugar algunas de las grandes revoluciones del siglo: las asociadas a las dos guerras mundiales (1914-1918 y 1939-1945), la revolución rusa de octubre de 1917, que dio origen a la Unión Soviética, y las dos revoluciones científicas, la relativista y la cuántica (no así la biológico-molecular y médica, que fue alumbrada con fuerza a partir de 1953, con el descubrimiento de la estructura en doble hélice del ADN, la molécula de la herencia y, por tanto, de la vida). La revolución rusa, que tanto prometió —baste recordar aquellas hermosas frases de Karl Marx (*Crítica del programa de Gotha*, 1875): «De cada cual, según sus capacidades; a cada cual, según sus necesidades», que los verdaderos revolucionarios de entonces buscaban cumplir—, terminó prostituyéndose y difuminándose, independientemente de que sus consecuencias aún afecten, y ayuden a comprender el mundo actual, lo mismo que sucede con las dos guerras mundiales, sin las cuales no es posible entender la configuración geopolítica mundial. Sin embargo, según vaya transcurriendo el tiempo, es de suponer que el «recuerdo», la «presencia» de esas revoluciones políticas irá disminuyendo hasta terminar siendo un capítulo de los libros de historia, como ahora lo son, por mucho que algunos pretendan lo contrario, hechos que tuvieron lugar hace si-

glos.<sup>1</sup> No quiero decir, naturalmente, que esas revoluciones, u otros hechos históricos de importancia en el pasado, no hayan configurado la historia: esta no sería la misma sin las Revoluciones Americana y Francesa, sin lo que sucedió en la Grecia de Homero, Sócrates, Aristóteles, Plutarco, Heródoto o Pericles, o en la Roma de Julio César o de Constantino; sin las empresas que acometió Alejandro Magno o si no hubiera existido un revolucionario llamado Jesús de Nazaret, o Jesucristo, que millones y millones de personas consideraron y aún consideran «hijo de Dios», o su «encarnación». Y tantos ejemplos más. Por «configurar la historia», quiero decir que hacen que esta, la historia, cambie de dirección, tome otras rutas dentro de la pluralidad de caminos que, al igual que la evolución de la vida, puede seguir. La historia es, en efecto, similar a cómo ha evolucionado, cómo se ha desarrollado, la vida en la Tierra, un fruto, según nos enseñó Charles Darwin en su inmortal libro de 1859, *On the Origin of Species*, del azar y la necesidad; el azar de la contingencia y la necesidad de no violentar las leyes de la naturaleza. Ahora bien, esos acontecimientos históricos determinaron el futuro, pero no fueron inevitables, y por consiguiente no se pueden asimilar a leyes universales: el emperador Constantino pudo no haber hecho oficial la religión cristiana en 313, y acaso una parte significativa de la historia posterior del mundo habría sido diferente, muy diferente.

Soy consciente, por supuesto, que es posible pensar que existen unas leyes universales, o mejor, un «orden natural», en el devenir sociohistórico; esto es, que las leyes universales no se dan únicamente en los fenómenos naturales. En su espléndido y conmovedor libro, *Rights of Man* (1791), Thomas Paine (1737-1809), un revolucionario donde los haya habido —y autor de otro libro inolvidable, *Com-*

1. Un buen ejemplo de las esperanzas que suscitó la revolución de 1917, y la, todavía existente, estela que terminó dejando, es lo que escribió el historiador británico Eric Hobsbawm (2003: 62) en su autobiografía: «El sueño de la Revolución de Octubre permanece todavía en algún rincón de mi interior, como si se tratara de uno de esos textos que han sido borrados y que siguen esperando, perdidos en el disco duro de un ordenador, que algún experto los recupere. Lo he abandonado, mejor dicho, lo he rechazado, pero no he conseguido borrarlo. Hoy en día me doy cuenta de que sigo tratando el recuerdo y la tradición de la URSS con una indulgencia y una ternura que no siento por la China comunista, pues pertenezco a una generación para la que la Revolución de Octubre representaba la esperanza del mundo, cosa que nunca significó China». *La esperanza del mundo*, decía.

*mon Sense* (1776)— expresó esta idea de la manera siguiente (Paine 1994: 114):

Lo que en el pasado se llamaron Revoluciones, eran poco más que un cambio de personas, o una modificación de circunstancias locales. Surgían y desaparecían como esas situaciones eventuales, que no tienen nada en su existencia o en su destino que pueda influir más allá del lugar en el que se produjeron. Pero lo que ahora vemos en el mundo, en las Revoluciones de América y Francia, constituye una renovación del orden natural de las cosas, un sistema de principios tan universal como la verdad y la existencia del hombre, y combinan moral con felicidad política y prosperidad nacional.

Los principios, las leyes de ese «orden natural de las cosas», eran para Paine tres:

- I. *Los hombres han nacido, y continuarán siempre, libres, e iguales con respecto a sus derechos. Las distinciones civiles, por consiguiente, solo se pueden basar en la utilidad pública.*
- II. *El fin de toda asociación política es la preservación de los derechos, naturales e imprescriptibles, del hombre; y estos derechos son libertad, prosperidad, seguridad y resistencia a la opresión.*
- III. *La Nación es esencialmente la fuente de toda Soberanía; ningún INDIVIDUO, o NINGÚN GRUPO DE HOMBRES, puede adjudicarse una autoridad que no derive expresamente de ella.*

Son, ¿cómo negarlo?, leyes hermosas, ante las cuales nos sentimos inclinados a pensar —como hicieron otros filósofos que asumieron la existencia de «derechos naturales»— que son inevitables, principios universales que terminarán haciéndose realidad. Pero, ¿es así? Si, hermanados como estamos con toda la vida que existe o ha existido en la Tierra, entendemos la vida, de la que nuestra especie forma parte, bajo el trasluz que nos proporcionó Darwin, si contemplamos las idas y venidas de la historia, de los sistemas sociales que se han implantado, y aun reconociendo que, efectivamente, existe una tendencia hacia ese benéfico, más justo, «orden natural», entonces surgen dudas acerca de la existencia de leyes universales a las que se deben ajustar las sociedades humanas.

La ciencia posee un carácter diferente: las revoluciones científicas —así como, de manera menos radical, el desarrollo normal de la ciencia— desvelan *leyes universales de la naturaleza*. Y aunque esas revolu-



ciones estén condenadas, al menos hasta ahora, a ser superadas en el futuro, permanecen en formas que las revoluciones políticas o sociales no lo hacen. El sistema matemático que elaboró Euclides, la ley de caída de los cuerpos que encontró Galileo Galilei, las leyes del movimiento y de la gravitación que estableció Isaac Newton, la teoría microbiana de la enfermedad que desarrollaron Louis Pasteur y Robert Koch, la cuantificación introducida por Max Planck, la relatividad especial de Albert Einstein, la teoría de la tectónica de placas y tantos y tantos ejemplos más, nos desvelan rasgos inevitables (aunque no sepamos por qué) de la Naturaleza. Desde este punto de vista, es fácil comprender lo que escribió el exquisito matemático inglés Godfrey Harold Hardy en un hermoso libro, *A Mathematician's Apology* (1940; Hardy 1999: 82-83):

Como la historia prueba abundantemente, los logros en matemáticas, independientemente de su valor intrínseco, son los más perdurables. Podemos ver esto incluso en civilizaciones protohistóricas. Las civilizaciones babilónica y asiria han perecido; Hammurabi, Sargón y Nabucodonosor son hoy nombres vacíos, pero las matemáticas babilónicas son todavía interesantes y el sistema sexagesimal de numeración se utiliza todavía en astronomía. Aunque, por supuesto, el ejemplo crucial nos lo proporcionan los griegos. Los griegos son los primeros matemáticos, todavía hoy «vigentes» entre nosotros. Las matemáticas orientales pueden ser una curiosidad interesante, pero las matemáticas griegas son la auténtica realidad. Los griegos utilizaron por primera vez un lenguaje matemático que todavía los matemáticos de hoy pueden entender. Arquímedes será recordado cuando Esquilo haya sido olvidado, porque las lenguas mueren y las ideas matemáticas no.

Viene todo esto a cuento porque es preciso ser cuidadoso con el término «revoluciones», sobre el que tanto se ha escrito y escribirá.<sup>2</sup>

2. Etimológicamente, *revolución* proviene del latín *revolutionem*, acusativo singular de *revolutio*, que en el latín clásico se utilizaba para «desenrollar un documento» (los rollos que había que desenrollar para leerlos), y que terminó significando «girar», «dar vueltas». Si consultamos el primer diccionario de la Real Academia Española, el denominado *Diccionario de Autoridades*, en el tomo V (1737) encontramos: «*Revolución*.- La acción y efecto de revolver o revolverse», mientras que para *Revolver* daba la siguiente definición: «Menear una cosa de un lado a otro, moverla alrededor o de arriba abajo [...] Vale también inquietar, enredar, mover sediciones, causar disturbios y desazones [...] Vale dar una cosa vuelta entera hasta llegar al punto de donde salió».

En este libro me voy a ocupar de revoluciones científicas —en concreto de las que tuvieron lugar en la física durante el siglo xx—, pero no lo voy a hacer en un sentido clásico, como, por ejemplo, lo hizo Thomas S. Kuhn (1962) en su libro: *The Structure of Scientific Revolutions*. En él Kuhn ofreció una visión del desarrollo de la ciencia muy atractiva —arrebataudamente atractiva, se podría incluso decir—, y que sin duda contiene numerosos puntos de verdad, pero su idea de lo que son las «revoluciones» científicas adolece de limitaciones. Por un lado, tenemos que algunas de sus caracterizaciones de revoluciones son dudosas: no está claro, por ejemplo, que la «revolución copernicana», a la que incluso dedicó un libro (Kuhn 1957) anterior a *The Structure*, merezca ese nombre, el de Copérnico. La idea de que los movimientos celestes estuvieran centrados en el Sol y no en la Tierra, tenía antecedentes lejanos, en la antigua Grecia; fue sobre todo Johannes Kepler quien introdujo elementos más exclusivos y esenciales —las órbitas elípticas— en la nueva visión del cosmos. Es cierto, por supuesto, que *De revolutionibus orbium coelestium* (1543) constituyó un acontecimiento fundamental, muy influyente, para abandonar la cosmología clásica, la ptolemaica, pero con eso solo no era suficiente: sin las aportaciones posteriores de Kepler, Galileo y Newton, habría quedado en nada, o, mejor, no se habría podido sostener.<sup>3</sup> Y esa insuficiencia en darse cuenta de que la génesis, el establecimiento y la consolidación de las revoluciones científicas necesitan de elementos diversos, que, por así decir, van acumulándose (por utilizar un término especialmente querido por Kuhn), asociándose entre sí a lo largo de un cierto periodo de tiempo, reside, en mi opinión, una de las debilidades de la metodología del desarrollo científico propuesta por Kuhn. Es preciso estudiar la dinámica de las revoluciones, su «estructura fina». Las revoluciones de que me ocupo en este libro, la relativista y la cuántica, merecen, efectivamente, ser consideradas «revolucionarias», pero si las asociamos, o intentamos caracterizar, únicamente en función de los trabajos de Albert Einstein en 1905 y 1915, por un lado, y, por otro, de Bohr, Heisenberg, Schrödinger y Dirac, entre 1913 y 1927, perderemos aspectos esenciales de esas revoluciones. Más aún, puede suceder, sucede de hecho, que de las rupturas revolucionarias iniciales, broten poste-

3. Como ha mostrado Owen Gingerich (2002, 2004), *De revolutionibus* no fue, en modo alguno, «un libro que nadie leyó»; todo lo contrario, fue ampliamente estudiado por la, pequeña sin duda, comunidad de astrónomos de la época.

riormente nuevas «micro»-revoluciones. En los capítulos que siguen, nos encontraremos con algunos ejemplos; novedades revolucionarias que no podían haber sido soñadas por los revolucionarios fundadores, o que si percibieron sus posibilidades, las rechazaron como imposibles. ¿Quién podía imaginar que al desarrollar los principios cuánticos, aplicándolos a otros escenarios, surgiría la posibilidad, después confirmada, de la existencia de «antimateria», casi un contrasentido, un oxímoron? En el caso de Einstein, no olvidemos que, al igual que otros tras él, se dio cuenta de que la teoría de la relatividad general conducía a la predicción de lo que más tarde se denominaron «agujeros negros», posibilidad absurda para él que, sin embargo, ha terminado confirmándose.

Podríamos, de hecho, considerar esas «micro-revoluciones» como revoluciones propiamente dichas, independientes, por mucho que estén relacionadas con ellas, de las «revoluciones madre». Roger Penrose, eminente matemático y físico teórico relativista que nos aparecerá en el capítulo 2, aludió a esta posibilidad cuando escribió (2000: 221): «[En nuestro siglo xx] hemos tenido no una sino *dos* grandes revoluciones en nuestra visión del mundo. De hecho, alguien podría decir que hemos tenido tres, o acaso cuatro de esas revoluciones. Esto significa considerar que las teorías *especial* y *general* de la relatividad representan revoluciones distintas, y también tomar la teoría cuántica y la teoría cuántica *de campos* como representando posiblemente revoluciones separadas».

Uno de los propósitos del presente libro es estudiar la dinámica de las revoluciones relativista y cuántica, pero centrándome en lo que sucedió en la segunda mitad del siglo xx, aunque también me ocupe —en el capítulo 1 y ocasionalmente en otros— de explicar sus antecedentes en la primera mitad de la centuria. Se trata, en definitiva, de analizar el mundo *después de la revolución*, de las revoluciones, un mundo científico, como se verá, extremadamente variado y plural, aunque yo aquí me haya centrado en la física relativista (gravitación, astrofísica y cosmología) y cuántica. Mientras que existen cientos de obras dedicadas a estudiar o divulgar las revoluciones relativista y cuántica tal y como se produjeron durante, esencialmente, el primer cuarto del siglo xx, muchísimo menos se ha escrito sobre sus «secuelas», en especial las que tuvieron lugar durante la segunda mitad del siglo. Y fue entonces cuando realmente cambió el mundo, el de la ciencia, por supuesto, pero también el «mundo» en su sentido más general, el mundo

de todos (o al menos de muchos, no olvidemos a los más desfavorecidos, aquellos que no tienen nada o casi nada) y de todos los días, configurado, labrado, con los frutos de la ciencia y la tecnología. Precisamente por esto, el último capítulo se titula «Y la física cambió el mundo».

Thomas Kuhn se dio cuenta de que las revoluciones científicas, los nuevos paradigmas que surgen de ellas, cambian el mundo, pero ensimismado como estaba en el contexto puramente científico, sus disquisiciones no incluyeron el apartado social: «Examinando», escribía (Kuhn 1962, 1971: 176), «el registro de la investigación pasada, desde la atalaya de la historiografía contemporánea, el historiador de la ciencia puede sentirse tentado a proclamar que cuando cambian los paradigmas, el mundo mismo cambia con ellos. Guiados por un nuevo paradigma, los científicos adoptan nuevos instrumentos y buscan en lugares nuevos. Lo que es todavía más importante, durante las revoluciones los científicos ven cosas nuevas y diferentes al mirar con instrumentos conocidos y en lugares en los que ya habían buscado antes. Es algo así como si la comunidad profesional fuera transportada repentinamente a otro planeta, donde los objetos familiares se ven bajo una luz diferente y, además, se les unen otros objetos desconocidos. Por supuesto, no sucede nada de eso: no hay trasplante geográfica; fuera del laboratorio la vida cotidiana continúa como antes. Sin embargo, los cambios de paradigmas hacen que los científicos vean el mundo de la investigación, que les es propio, de manera diferente. En la medida en que su único acceso a ese mundo se lleva a cabo a través de lo que ven y hacen, podemos desear decir que, después de una revolución, los científicos responden a un mundo diferente».

Comprendo bien el enfoque —a la postre *desenfocado* más bien— de Kuhn: la historia de los cambios científicos es tan variada y compleja, que es difícil escaparse de ella. Las páginas que siguen constituyen buena muestra de ello, en la medida que predominan sobre todo los hechos y circunstancias puramente científicas. No obstante, como también comprobarán los lectores, me he esforzado por incluir circunstancias, hechos, procedentes del ámbito sociopolítico sin los cuales no es posible entender realmente por qué pasó lo que pasó. No he olvidado, asimismo, dar cabida a la tecnología, el trasfondo necesario en muchos de los avances *puramente* científicos, ni intentar dar a los experimentos el papel, central, que poseen. También en estos puntos el modelo de Kuhn muestra limitaciones. Es cierto que en la *Structure of*



*Scientific Revolutions* se mencionan, por ejemplo, los errores experimentales que se cometieron al estudiar la fisión del uranio, cuán «estrechamente entrelazadas» se encontraban «las novedades fácticas y las teóricas» en el «descubrimiento del oxígeno, o la falta de precisión en los aparatos para detectar el arrastre del éter» (Kuhn 1971: 105, 93, 124). Sin embargo, en todos estos casos Kuhn daba prominencia al lado teórico de la ciencia. Y en lo que se refiere a la incidencia de la tecnología, no encontramos prácticamente nada, si entendemos que la tecnología no está, ni puede estar, al margen de la industria.