

Reflexiones acerca de la Filosofía del Universo

Alberto Ruiz Jimeno

Catedrático de Física Atómica, Molecular y Nuclear
Universidad de Cantabria



Editorial
Universidad
Cantabria

Reflexiones acerca de la Filosofía del Universo

Colección FLORILOGIO # 81: Lecciones 40



CONSEJO EDITORIAL

Dña. Sonia Castanedo Bárcena

Presidenta. Secretaria General, Universidad de Cantabria

D. Vitor Abrantes

Facultad de Ingeniería, Universidad de Oporto

D. Ramón Agüero Calvo

ETS de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación, Universidad de Cantabria

D. Miguel Ángel Bringas Gutiérrez

Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales, Universidad de Cantabria

D. Diego Ferreño Blanco

ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Cantabria

Dña. Aurora Garrido Martín

Facultad de Filosofía y Letras, Universidad de Cantabria

D. José Manuel Goñi Pérez

Modern Languages Department, Aberystwyth University

D. Carlos Marichal Salinas

Centro de Estudios Históricos, COLMEX

D. Salvador Moncada

Faculty of Biology, Medicine and Health, The University of Manchester

D. Agustín Oterino Durán

Neurología (HUMV), investigador del IDIVAL

D. Luis Quindós Poncela

Radiología y Medicina Física, Universidad de Cantabria

D. Marcelo Norberto Rougier

Historia Económica y Social Argentina, UBA y CONICET (IIEP)

Dña. Claudia Sagastizábal

IMPA (Instituto Nacional de Matemática Pura e Aplicada)

Dña. Belmar Gándara Sancho

Directora, Editorial Universidad de Cantabria

Reflexiones acerca de la Filosofía del Universo

LECCIÓN DE APERTURA DEL CURSO ACADÉMICO 2020-2021

Alberto Ruiz Jimeno

Catedrático de Física Atómica, Molecular y Nuclear
Universidad de Cantabria



Editorial
Universidad
Cantabria

Ruiz Jimeno, Alberto, autor

Reflexiones acerca de la filosofía del universo : lección de apertura del
Curso Académico 2020-2021 / Alberto Ruiz Jimeno. – Santander : Editorial
de la Universidad de Cantabria, [D.L. 2020]

38 páginas ; 21 cm. – (Florilégio. Lecciones ; 40)

D.L. SA. 461-2020

1. Física-Filosofía. 2. Física-Historia.

53:1

53(091)

THEMA: PH, QD

Esta edición es propiedad de la EDITORIAL DE LA UNIVERSIDAD DE CANTABRIA; cualquier forma de reproducción, distribución, traducción, comunicación pública o transformación solo puede ser realizada con la autorización de sus titulares, salvo excepción prevista por la ley. Diríjase a CEDRO (Centro Español de Derechos Reprográficos, www.cedro.org) si necesita fotocopiar o escanear algún fragmento de esta obra.

© Alberto Ruiz Jimeno
© Editorial de la Universidad de Cantabria
Avda. Los Castros, 52
39005 Santander
www.editorial.unican.es

DOI: <https://doi.org/10.22429/Euc2020.032>

Hecho en España - *Made in Spain*
Santander, 2020

Sumario

Física y su relación con la Filosofía Natural	10
La Naturaleza, el Universo. Filosofía del Universo	12
El método científico	13
El paradigma de Newton	14
Causalidad-determinismo de Laplace	15
Einstein y la relatividad especial y general	16
La flecha del tiempo	18
La revolución cuántica	20
La teoría cuántica de campos	22
Cosmología	23

Materia y energía oscura	25
Gravedad cuántica	25
Notas	27

El filósofo natural, en la acertada analogía de Francis Bacon, no debe actuar como una hormiga recolectora de hechos ni como una araña tejedora de pensamientos, sino como una abeja sintetizadora de conceptos consecuentes con los hechos. El filósofo, por esta analogía, es más como un humilde gorrión revoloteando en el lugar de trabajo del científico. Para algunos científicos, parece de poca importancia. Sin embargo, su chirrido le recuerda al científico la presencia de suposiciones, que se encuentran en el núcleo de toda empresa científica. Hay verdaderas preocupaciones filosóficas en el corazón de la actividad científica, apuntando, como una señal de distancia desde las búsquedas puramente científicas a los lugares de descanso contemplativo de al lado.

Friedel Weinert, «*The scientist as philosopher*»,
Springer 2005.

Rector magnífico, autoridades, comunidad universitaria, amigos. Es un gran honor, para mí, dar esta lección inaugural en mi propia Universidad, donde inicié mi doctorado hace 46 años y dónde he sido partícipe del gran salto en la adquisición y difusión del conocimiento a la sociedad, así como de los 50 años de la Facultad de Ciencias que ha logrado colocarse, por sus avances científicos, su transferencia de conocimientos y su difusión popular, como

una de las más importantes a nivel nacional e internacional. ¡Feliz cumpleaños!

Con esta lección inaugural me gustaría homenajear, particularmente, a los científicos que realizan investigación básica, que desarrollan ideas y conceptos o diseñan experimentos para el avance del conocimiento puro. Si en algo se distingue la especie humana, del resto de las especies vivas, es en su capacidad de generar conocimiento. Sin ello, no es posible el progreso social ni la sociedad del bienestar. Pero no debemos olvidar que la innovación y la transferencia solo son posibles si existe la semilla del conocimiento puro, de la investigación básica. La aplicación podrá venir más tarde, pero no siempre es previsible, ni se puede acotar en el tiempo. Sin embargo, nuestra tecnología moderna surgió como consecuencia del desarrollo lento y profundo de ideas básicas de conocimiento, como ahora relataré algunas.

Física y su relación con la Filosofía Natural

La física es la ciencia cuyo dominio de estudio es la Naturaleza o, en un sentido más claro, el Universo. Bebe en sus fuentes del conocimiento antiguo denominado Filosofía Natural¹.

Los filósofos presocráticos^{1 II} se plantearon cuestiones racionales acerca de la observación de los fenómenos natu-

1 G. Holton & S. G. Brush, «Physics, the human adventure», Rutgers University Press, 2006.

H. S. Kragh, «Conceptions of cosmos», Oxford University Press, 2007.

rales, dando explicaciones cualitativas. La escuela pitagórica lo relacionaba con la numerología, Parménides de Elea decía que solo puede ser real lo que puede ser inteligible para las personas. Los atomistas defendieron la inteligibilidad del movimiento como cambio, considerando que las cosas estaban compuestas de elementos indivisibles^{III}.

Las primeras escuelas pre-científicas, en Atenas^{IV}, introdujeron aspectos cuantitativos. La escuela de Platón, idealista, obtenía las leyes naturales del puro pensamiento, las observaciones eran apariencias de la realidad. La escuela de Aristóteles, interesándose por el origen temporal del cosmos^V, concebía un solo universo finito y eterno, con movimientos perfectos circulares en las esferas celestes e inexistencia del vacío («natura abborret vacuum»). La materia se componía de cuatro elementos naturales (agua, tierra, aire y fuego), con sus tendencias naturales de movimiento, de cambio, en contraposición al éter (quintaesencia), inmutable, de las esferas celestes. Ambas escuelas ligan el concepto de tiempo al de movimiento².

Apenas hay nuevas aportaciones «científicas» por parte de la cultura romana, más dedicados a la ingeniería y arquitectura. Solo sobrevivió, en parte, en Alejandría^{VI}, donde Claudio Ptolomeo escribió su monumental tratado astronómico geo centrista, «El Almagesto», de enorme influencia hasta el Renacimiento.

2 «el tiempo es el número del movimiento según el antes y el después» (Aristóteles, Física, IV, 11, 219b).

La Naturaleza, el Universo. Filosofía del Universo

Las ideas conceptuales de los filósofos griegos han influido enormemente en el pensamiento occidental y continúan en la Física Contemporánea^{VII}. Incluso contextos formales tan discrepantes, en cuanto a la concepción idealista o realista de la Naturaleza, se encuentran en las filosofías de la Ciencia y en la Cosmología contemporáneas.

En la Edad Media destacaré el pensamiento filosófico de San Agustín³ y su concepción «idealista» del tiempo, creado por Dios, pero no eterno, pues requiere «cambio» para su existencia. Su relación antes-después fue adoptada y modificada por Leibniz. Kant adoptaría su idea haciéndola objetiva, frente al subjetivismo de San Agustín^{VIII}.

No hay grandes ideas de filosofía natural en la alta edad media, en Occidente^{IX}. En el Islam coincide con su Edad de Oro⁴, donde se desarrolla la astronomía, física, medicina, alquimia y las matemáticas, y se traducen al árabe los textos griegos^X.

A partir del siglo VII comenzó lentamente un estudio más extendido de la filosofía griega, más notable a partir del siglo XII, como la traducción del árabe al latín de los «Elementos» de Euclides, los tratados de filosofía natural de Aristóteles y el «Almagesto» de Ptolomeo, por Gerardo de Cremona, de la Escuela de Traductores de Toledo.

3 F. Weinert, «The scientist as philosopher», Springer 2005, pp. 147-151.

4 Wikipedia, https://es.wikipedia.org/wiki/Ciencia_isl%C3%A1mica.

Así apareció la Escolástica⁵, una filosofía cristianizada, corriente fundamentalmente teológica, que incentivaba el razonamiento y la discusión^{XI}. Tomás de Aquino, en su célebre frase «Creatio non est mutatio»⁶, resuelve el dilema entre la eternidad del Universo creado por Dios y la realidad del cambio de las cosas, preconizada por la filosofía natural^{XII}. La mezcla de razón y fe es característica del pensamiento cristiano de la época.

El declive de la Escolástica, con la separación entre filosofía y teología, vino de la mano de la escuela franciscana^{XIII}, dándose cada vez mayor importancia al empirismo.

El método científico

El Renacimiento trae el modelo heliocéntrico de Nicolás Copérnico^{XIV}, las observaciones astronómicas de Tycho Brahe y Johannes Kepler^{XV}, que introduce leyes descritas matemáticamente y a Galileo Galilei⁹, considerado como el padre del método científico. En su libro principal, «Diálogos sobre los dos máximos sistemas del mundo»^{XVI}, establece las bases físicas para un sistema heliocéntrico, utilizando el método inductivo basado en la observación expe-

5 Wikipedia, <https://es.wikipedia.org/wiki/Escol%C3%A1stica>.
H. S. Kragh, citado previamente.

6 Tomás de Aquino, «De aeternitatis mundi», 1270.

7 H. S. Kragh, *ibid*, p. 47 y ss.
G. Holton & S. G. Brush, citado previamente, p. 17 y ss.

8 *Ibid.*, p. 40 y ss.

9 *Ibid.*, p. 50 y ss.

rimental. En su libro «Discursos sobre dos nuevas ciencias», aborda el movimiento de los cuerpos en caída libre^{XVII} y el movimiento uniformemente acelerado y establece el principio de inercia^{XVIII} y de relatividad del movimiento.

La filosofía natural se desarrolla en dos escuelas diferenciadas. La racionalista de René Descartes, que establece la duda metódica como primera regla acerca del conocimiento^{10 XIX}, y la empirista de Francis Bacon¹¹, que aporta el método inductivo^{XX} frente al deductivo dominante en la época.

El paradigma de Newton

A sí, el s. XVII nace con una filosofía racional crítica, plena de inventos y resultados experimentales y una herramienta matemática fuerte. Las sociedades científicas están en pleno apogeo y las publicaciones científicas permiten la discusión y expansión de los conocimientos.

En este ambiente, Isaac Newton¹² desarrolla su gran obra, los «Principios Matemáticos de la Filosofía Natural»¹³, aún joven^{XXI}, antes de dedicarse más a la Teología o la Alquimia. Los «Principia» perduraron más de dos siglos como teoría efectiva y aproximada para la descripción del movimiento y de la relación gravitacional mutua entre dos cuerpos^{XXII}.

10 R. Descartes, «Discurso del método», 1637.

11 F. Bacon, «Novum Organum», 1620.

12 G. Holton & S. G. Brush, citado previamente, p. 103 y ss.

13 I. Newton, «Philosophiae Naturalis Principia Mathematica», Cambridge, Trinity College, 5 de Julio de 1686.

El concepto de masa inercial, no bien definido en su teoría^{XXIII}, es una propiedad inherente al cuerpo, diferente del peso debido a la aceleración gravitatoria, pero ambas masas, inercial y gravitatoria, tienen el mismo valor.

Establece un tiempo y espacio¹⁴ universales y absolutos, independientes del estado de movimiento y de la materia, y un tiempo y espacio medidos, imperfectos. Distingue el movimiento absoluto, con respecto al espacio absoluto, del movimiento relativo entre dos cuerpos^{XXIV}.

Su contemporáneo y competidor Gottfried Leibniz, apoyándose en el Principio de Razón Suficiente, defiende un espacio y tiempo relacionales, ligados a la materia y, también, universales. Para él, el tiempo físico, un orden antes-después de los sucesos, era diferente del tiempo humano, el cual se obtenía como una abstracción que marca el pasado, presente y futuro^{XXV}.

Causalidad-determinismo de Laplace

Otro gran concepto clásico es el determinismo, la capacidad de predecir el estado futuro de un sistema físico a partir de las condiciones presentes iniciales y de las leyes físicas. Su relación con la causalidad se debe al Marqués de Laplace^{XXVI} 15, que imagina un «demonio con una inteligencia superior» externo al Universo, prediciendo

14 F. Weinert, citado previamente, p. 112 y ss.

15 F. Weinert, citado anteriormente, p. 196 y ss.

el futuro con absoluta seguridad. Entonces el Universo es estático. Pasado, presente y futuro no se distinguen^{XXVII}.

Otro concepto importante es el de «acción a distancia», que el propio Newton rechaza, sin saber darle una explicación razonable^{XXVIII}. Michael Faraday^{XXIX}, ya en el s. XIX, introduce el concepto clásico de campo eléctrico, colocándolo en el espacio y resolviendo en parte el problema.

Maxwell recoge las ideas de Faraday, y otros, en sus famosas ecuaciones que unifican electricidad y magnetismo^{XXX}, así como la óptica, caracterizando a la luz como ondas electromagnéticas que se desplazan a velocidad constante en un medio, el éter, que actúa como referencia absoluta y no es capaz de definir^{XXXI}. La demostración experimental de la inexistencia del éter provoca una inconsistencia entre electrodinámica y mecánica.

Einstein y la relatividad especial y general

En 1905, el Principio de Relatividad de Einstein^{XXXII} ¹⁶ establece que las leyes de la electrodinámica y la óptica son independientes de que el sistema esté fijo o se mueva a velocidad constante (sistemas de referencia inerciales), y son compatibles con la constancia de la velocidad de la luz en todos los sistemas de referencia.

En su planteamiento, observa que el concepto de simultaneidad es relativo^{XXXIII}, depende del sistema de referencia.

16 Una recopilación interesante de artículos originales sobre Relatividad se encuentra en «The principle of Relativity», Dover Publications, 1952.

Además, las medidas del tiempo y el espacio no son iguales para el sistema fijo o el móvil, son relativas. La ley de composición de velocidades no cumple el principio de relatividad de Galileo, siendo la velocidad de la luz una velocidad límite imposible de superar^{xxxiv}.

El tiempo y espacio absolutos, de Newton, se contradice con el nuevo esquema conceptual¹⁷. Tampoco se mantiene el orden antes-después de los sucesos, dada la relatividad de la simultaneidad^{xxxv}.

Hay equivalencia entre masa y energía, siendo la masa de un sistema su energía propia, en su sistema de referencia en reposo, $E=mc^2$ ^{xxxvi}.

Minkowski^{xxxvii} propone un espacio-tiempo de cuatro dimensiones, cuyos puntos son sucesos. A partir de un suceso hay un cono hacia el futuro y un cono hacia el pasado, los «conos de luz», dentro de los cuales podemos dibujar «líneas de mundo» que describen posibles movimientos hacia futuro o pasado. Las generatrices del cono, «líneas de mundo» de la luz, limitan los sucesos que pueden conectarse entre sí, pues con el resto no es posible definir unívocamente ni la simultaneidad, ni la ordenación temporal entre pasado y futuro.

Más tarde, Einstein desarrolla su Teoría de la Relatividad General que establece la equivalencia de las leyes físicas, vistas desde cualquier sistema de referencia, independientemente del tipo de movimiento^{xxxviii}. Es una auténtica

17 F. Weinert, citado previamente, p. 125 y ss.

Hans Reichenbach, «The direction of Time» Dover Publications, 1956.

Carlo Rovelli, «El orden del tiempo», Anagrama, 2018.

teoría del espacio-tiempo como campo gravitatorio local, dinámicamente relacionado con la distribución de materia y energía^{XXXIX}. Los conos de luz se curvan hacia la zona de mayor densidad de energía-materia (hasta tal punto, por ejemplo, que nada puede salir, ni la luz siquiera, más allá del horizonte de un agujero negro).

Ambas teorías^{XL} son observables, verifican la hipótesis de falsabilidad de Karl Popper, y han dado lugar a grandes discusiones filosóficas. El concepto de tiempo absoluto se pierde^{XLI}; ¿qué podemos decir de la objetividad, en el sentido kantiano, del concepto intuitivo de tiempo?. ¿Por qué percibimos una flecha temporal entre pasado y futuro, si las leyes de Einstein, como las de Newton, no se modifican ante un cambio de signo en el tiempo^{XLII}? Nuestra percepción de asimetría pasado-futuro procede de observaciones habituales de irreversibilidad de muchos procesos. ¿Y qué dice la ciencia?

La flecha del tiempo^{XLIII}

Sadi Carnot^{XLIV} observó que, espontáneamente, el flujo de calor va de cuerpo caliente a cuerpo frío. Rudolf Clausius^{XLV} lo formula con la segunda ley de la Termodinámica (la primera es la ley de conservación de la energía), postulando el nuevo concepto de entropía, la cual tiende siempre a crecer en un sistema aislado, definiendo así una asimetría temporal^{XLVI}.

Ludwig Boltzmann^{XLVII} encuentra un mecanismo para compatibilizar la simetría temporal en las leyes microscó-

picas de las partículas del sistema y la flecha del tiempo termodinámica, macroscópica. Demuestra que el crecimiento de la entropía es un aumento del desorden en las velocidades de las partículas del sistema^{XLVIII}. Es una ley estadística, no fundamental y no implica directamente un orden temporal en la evolución del Universo^{XLIX}, salvo que haya un instante inicial, ordenado, improbable^L. La cosmología moderna va en esa línea, en el modelo del Big-Bang^{LI}.

La discusión sigue abierta¹⁸. Hay otra flecha del tiempo fundamental en la teoría cuántica de campos relacionada con la observación de un comportamiento asimétrico de materia y antimateria^{LII}.

Hasta aquí hemos reflexionado sobre conceptos fundamentales en física clásica y Relatividad. Conceptos absolutos de espacio, tiempo y simultaneidad clásicas, que deben ser revisados a la luz de la Relatividad especial y General, y como la distribución de energía y momento diseña la estructura local del espacio-tiempo. Hemos visto la equivalencia entre masa y energía y la igualdad entre los valores de masa inercial y gravitatoria. Hemos visto que el concepto de campo permite definir la interacción, mejor que el concepto de acción a distancia. Y hemos visto como trata la Mecánica Estadística la flecha del tiempo introducida en la Termodinámica y como resolver las contradicciones existentes entre la simetría antes-después de las

18 Jill North, «Time in Thermodynamics», en «The Oxford Handbook of Philosophy of Time», Oxford University Press, 2014.

leyes fundamentales y la percepción intuitiva del devenir temporal.

La revolución cuántica

Hay otra revolución científica del s. XX, la Mecánica Cuántica, que removerá estos conceptos y otros, además de proporcionar el marco adecuado para el estudio del mundo microscópico.

En 1900¹⁹ Max Planck crea un artefacto matemático para resolver un problema termodinámico existente^{LIII}, proponiendo que la radiación electromagnética de un cuerpo negro se emite de forma discontinua^{LIV}.

A partir de ahí se suceden nuevos hallazgos y teorías. La observación, por Einstein, de que la luz tiene propiedades de onda y de partícula^{LV}; la ley probabilística de la desintegración radiactiva^{LVI}, sin cabida en el contexto determinista de la física clásica, por Rutherford; su nuevo modelo de átomo planetario^{LVII}; el modelo de Bohr^{LVIII}, con los electrones en órbitas estables de energía discreta en torno al núcleo^{LIX}, rompiendo con las leyes de la electrodinámica clásica; la hipótesis de De Broglie, generalizando la dualidad onda-partícula a todas las partículas^{LXLI}.

Se establece una dicotomía entre localidad y no-localidad, se pierden los conceptos de continuidad y de trayec-

19 Hay muchos textos sobre la historia de la Física Cuántica y sus implicaciones filosóficas. Aquí seguimos los textos, ya citados anteriormente, de F. Weinert y G. Holton.

toria de la mecánica clásica, y el comportamiento de los sistemas cuánticos resulta claramente indeterminista^{LXII}.

En 1926, Erwin Schrödinger propone la ecuación de evolución de las funciones de onda, que caracterizan al sistema físico^{LXIII}. Poco después es complementada por la teoría matricial de Werner Heisenberg. Son dos modelos consistentes, alternativos, que Bohr expresa con su Principio de Complementariedad^{LXIV}:

o nos enfocamos en la causalidad, a través de la evolución de la función de ondas, pero no podemos hacer observaciones de la posición y el tiempo

o nos enfocamos en la localización espacio-temporal y sacrificamos la causalidad

Heisenberg lo postula, claramente, con su famoso Principio de Incertidumbre, según el cual pares de observables (como posición y momento lineal, energía y tiempo...) no pueden determinarse simultáneamente^{LXV}.

La interpretación de la mecánica cuántica de la Escuela de Copenhague propone que la función de onda es una función de probabilidad esencial, no estadística^{LXVI}.

La operación de medida es fundamental en la física cuántica. En ella, la función de onda colapsa a uno de los estados superpuestos que la definen, con diferentes probabilidades predecibles. Hay sistemas cuánticos entrelazados, que pueden dar lugar a sucesos sin posible información entre sí, pero correlacionados en las medidas, lo que estaría prohibido por el determinismo clásico^{LXVII}.

Esto da un carácter de realismo no-local^{LXVIII}, que fue utilizado por Einstein^{LXIX}, en sus famosas discusiones con

Bohr, acerca de su creencia en la incompletitud de la cuántica y dio lugar a otras interpretaciones más conservativas, como la teoría de «variables ocultas», desconocidas, de David Bohm. Varios experimentos han fortalecido la interpretación ortodoxa de Copenhague^{LXX}.

La teoría cuántica de campos

La introducción del concepto de campo al formalismo de la cuántica relativista dio lugar a la Teoría Cuántica de Campos que rige el estudio de las partículas elementales y fuerzas fundamentales del Universo, excluida la fuerza gravitacional²⁰. Sus leyes vienen determinadas por simetrías que dan lugar a leyes de conservación^{LXXI}.

Si la simetría es local aparecen directamente los campos de fuerza correspondientes. Es el caso de la electrodinámica cuántica^{LXXII}, interacción fundamental entre partículas cargadas eléctricamente, mediante intercambio de fotones^{LXXIII}. Su modelo se ha tomado como ejemplo para las interacciones nucleares, mediadas por los bosones W y Z, y gluones.

Las partículas que interactúan son los leptones y los quarks, cuantos de campos fermiónicos^{LXXIV}. Además de las partículas de materia existen las de antimateria, que tienen sus «cargas» con el signo contrario.

20 Un texto divulgativo recopilatorio de la física de partículas es el siguiente: Stephán Narison, «Particles and the Universe», World Scientific, 2015.

Durante la década de 1960 se desarrolló un modelo unificado de interacción electromagnética y débil nuclear^{LXXV}. En este modelo, Peter Higgs, Robert Brout y Francois Englert propusieron añadir otro campo más, el campo de Higgs, mediante un proceso llamado «rotura espontánea de simetría»^{LXXVI}. La masa de las partículas elementales y bosones de interacción resultan de la interacción con este campo. El fotón y los gluones se mueven libremente en el campo de Higgs y su masa es nula. Sin embargo, quarks y leptones sienten efecto y adquieren masa^{LXXVII}.

El «vacío» deja de tener sentido. Se denomina «vacío cuántico» al estado fundamental del Universo, poblado de todos los campos de materia, antimateria, Higgs y fuerzas fundamentales.

La observación experimental del bosón de Higgs, mediante un proceso violento que provoca una excitación del vacío cuántico del Universo, lo logramos en 2012^{LXXVIII}.

Cosmología

Hemos reflexionado sobre conceptos fundamentales vistos desde el prisma de la mecánica newtoniana, de la mecánica relativista y cuántica y la teoría cuántica de campos. Pero las discusiones no se refieren al Universo cómo un todo, sino a sus partes. Si bien la importancia de las interacciones mutuas, entre los elementos del Universo, quedan reflejadas en las leyes que rigen estas teorías, no es suficiente para describir el cosmos como un todo. De hecho, muchas de las implicaciones filosóficas adquieren aspectos estadísticos o probabilísticos, como es el caso, por ejemplo,

de la flecha del tiempo termodinámica. Estas reflexiones, al considerar al Universo en su globalidad, deben ser abordadas de forma diferente.

El contexto del Universo en su globalidad, su origen, estructura y evolución, es el objeto de la Cosmología^{LXXIX} 21. Einstein, influenciado por Mach, propuso un Universo continuo y estático en el tiempo, conteniendo una cantidad finita de materia y cerrado espacialmente, con geometría esférica (Riemann y Gauss ya habían desarrollado geometrías diferentes de la euclídea). Para lograrlo, introdujo una «constante cosmológica» Λ de densidad de materia en el Universo, que introduce una fuerza de repulsión que compite con la fuerza de atracción gravitatoria, produciendo un Universo estático^{LXXX}.

Georges Lemaitre propuso un Universo en expansión^{LXXXI}. Edwin Hubble, observando el corrimiento al rojo de la radiación electromagnética procedente de galaxias, demostró que es proporcional a la distancia^{LXXXII}, validando las hipótesis de Lemaitre.

La idea del Big-Bang procede de Georges Gamow, físico nuclear que, en 1948, propuso un Universo inicial muy denso y caliente, en expansión y enfriamiento. Los estudios, con ese modelo, de la evolución térmica del Universo, predecían correctamente la abundancia relativa de los elementos que se forman en los procesos estelares.

21 Algunos libros de introducción a la cosmología son: H. Kragh, ya citado previamente.

B. Ryden, «Introduction to Cosmology», Cambridge University Press, 2018.

La observación^{LXXXIII}, por azar, del ruido electromagnético correspondiente a la radiación cósmica de fondo (CMB), debida, en dicho modelo, al desacoplo con la materia cuando el Universo tenía 300.000 años^{LXXXIV}, iniciaron la etapa presente de estudios cosmológicos.

Materia y energía oscura

Los estudios finos de CMB y del movimiento de estrellas y galaxias indican que el Universo solo contiene 4% de la materia del modelo estándar de partículas^{LXXXV}, un 26% de materia oscura, cuyo comportamiento gravitacional es similar a la otra, y un 70% de energía oscura, responsable de su expansión acelerada, que se corresponde con la constante cosmológica.

El Universo es plano (o esférico, de curvatura nula), y suponemos que sufrió un proceso de inflación inicial en el que su escala de tamaño creció exponencialmente en, aproximadamente, 30 órdenes de magnitud. No conocemos su causa, ni la dinámica que provocó ligeras fluctuaciones de densidad, origen de las estructuras actuales a gran escala.

Gravedad cuántica

La física de partículas nos permite simular el Universo hasta escalas temporales limitadas por el tiempo de Planck, 5.39×10^{-44} seg., donde la fuerza de la gravitación es del mismo orden que las otras fuerzas y no puede despreciarse.

Por ello es necesario una teoría cuántica de la gravedad²². Hay varios intentos. Al ser una teoría del espacio-tiempo, su geometría debe ser dinámica, como en la Relatividad General, y no estática, como en las teorías cuánticas conocidas^{LXXXVI}.

En algunos modelos^{LXXXVII}, el tiempo no existe, solo hay una red estática de interacciones, incluidas las gravitatorias, que conforma el espacio. El tiempo emerge en la aproximación semiclásica, como espacio-tiempo clásico. Es el caso de Wheeler-de Wyt, o de las teorías de lazos o bucles²³.

En otros modelos, como las teorías de cuerdas aún no está resuelto el concepto de tiempo, habiendo diversas interpretaciones²⁴.

Hoy nos enfrentamos a una crisis en la cosmología. Los modelos requieren ajuste fino^{LXXXVIII}. Las condiciones iniciales del Universo son singulares y difíciles de explicar objetivamente^{LXXXIX}. La observación de los agujeros negros^{XC} podría ofrecernos resultados empíricos para seleccionar los modelos de gravedad cuántica.

Muchas gracias por su atención.

22 C. Kieffer, «Time in Quantum Gravity», en «The Oxford Handbook of Philosophy of Time», Oxford University Press, 2014.

23 C. Rovelli, citado previamente, p. 90 y ss.

24 Lee Smolin, «The singular universe and the reality of time», Cambridge University Press, 2015.

Notas

- I Se desarrolló, hacia el siglo sexto «antes de Cristo», por los filósofos griegos y, posteriormente, por la escolástica medieval, hasta la llegada del Renacimiento, que introdujo el método científico que ha perdurado hasta el presente.
- II como Anaximandro, Anaxágoras y Empédocles, en los siglos quinto y sexto antes de Cristo.
- III En la escuela pitagórica consideraban la tierra esférica, al contrario del resto de filósofos presocráticos. Parménides de Elea estableció el Principio de Inteligibilidad. Su discípulo Zeno utilizó el principio para proponer la famosa paradoja de «Aquiles y la tortuga» y defender la imposibilidad real del movimiento. Los atomistas, Leucipo y Demócrito, consideraban la materia compuesta de los átomos (en su propia acepción, no la que hoy sustentan las teorías modernas sobre la estructura de la materia), los cuales podían estar sometidos al movimiento, manteniendo su identidad.
- IV a partir del año 400 AC.
- V y estableció un corpus doctrinal englobando diversas disciplinas, desde la teología a la física, se ocupó sobre todo del estudio conceptual del Universo, desarrolló la lógica, que sería acogido por la escolástica para aplicarla, fundamentalmente, en la teología. De acuerdo con su maestro, Eudoxio de Cnidos, adoptó un modelo homocéntrico para el movimiento de las esferas celestes, pero dándole un carácter físico, interconectando y modelizando el movimiento de los planetas.
- VI La Escuela de Alejandría floreció por su aportación a la cultura occidental. Entre sus aportaciones más importantes está la de Euclides, cuyos «Elementos» contienen los fundamentos de la Geometría. Otro personaje importante fue Aristarco de Samos por su modelo heliocéntrico que influiría, posteriormente, en las ideas de Copérnico. Las matemáticas, herramienta fundamental como lenguaje de las ciencias, floreció también gracias a Arquímedes de Siracusa y otros pensadores griegos. Otras figuras notables fueron Apolonio, Hiparco y, finalmente, ya en el siglo II, Claudio Ptolomeo.
- VII El aborrecimiento al vacío de la escuela aristotélica ha tenido adeptos y detractores, pero se encuentra, de alguna manera, en los fundamentos de la teoría cuántica de campos que describe la estructura elemental de la materia. La composición de la materia, a partir de elementos fundamentales se encuentra, si bien en un contexto diferente, en la física de las partículas elementales. La estructura en partículas indivisibles de los atomistas está reflejada, de alguna manera, en la física microscópica. Las interacciones fundamentales de la física actual encuentran su correspon-

- dencia en la idea de las tendencias naturales de la materia de Aristóteles. La lógica aristotélica es la base de la lógica matemática.
- VIII La filosofía cristiana, representada por S. Agustín, del siglo IV-V, se expresa en su libro «Las Confesiones». La creación del Universo se realizó por Dios, a partir de la nada, sin eximirle por ello de la eternidad de su existencia. A diferencia de Platón, el tiempo no está constituido por el movimiento de los cuerpos celestes, existe independientemente de la materia y se mide en la conciencia de cada persona. El pasado no existe y el futuro está por venir, luego solo existe el presente, pero éste no tiene duración, luego ¿cómo percibimos la medida del tiempo? Está en nuestras conciencias. Los pensamientos de San Agustín tuvieron una influencia importante en la filosofía moderna, como Leibiniz y Kant. Su concepción de divisibilidad infinita chocará, de alguna manera, con los conceptos de la física cuántica posterior.
- IX El acogimiento absoluto a las Sagradas Escrituras impidió tener la mente abierta a nuevas interpretaciones del cosmos.
- X En el siglo XI, Alhazen preconiza el método científico, dando importancia a la experimentación, particularmente en su «Libro de Óptica» que tuvo gran influencia en los científicos del renacimiento, incluido Galileo. Al-Juarismi y Al-Kindi desarrollaron la Aritmética; Al-Juarismi y Al-Karaji desarrollaron el Álgebra.
- XI no exento de enormes conflictos entre filosofía y religión, provocando la condena por herejía de muchos de sus actores.
- XII De ese modo, diferencia entre la posibilidad del comienzo del Universo en el tiempo (que él creía, no obstante, que era eterno) y la creación del mismo.
- XIII a partir del s. XIV.
- XIV Nicolás Copérnico publica su gran obra «De revolutionibus orbium coelestium libri sex», en 1543, el mismo año de su muerte (no se atrevió a publicarlo antes por miedo o conflicto con el dogma religioso que establecía la geocentricidad del Universo). Establece un modelo heliocéntrico, con carácter aparentemente computacional, pero buscando la simplicidad frente a la complicación excesiva, si bien de gran precisión, del modelo de Ptolomeo.
- XV Entrado el s. XVI, la observación astronómica alcanza resultados importantes y precisos de la mano de Tycho Brahe y su discípulo Johannes Kepler. Éste se declaraba copernicano convencido y amante de la simetría y simplicidad del Universo. Conocedor de la obra de Apolonio, propuso la trayectoria elíptica de los planetas, ya introducida por el filósofo griego, con el Sol en el foco, logrando, en su Primera Ley, corregir los resultados de Copérnico (que estaba obsesionado con los movimientos perfectos, puramente circulares). Su segunda ley trata de dar una explicación razo-

nable a la ley empírica del movimiento elíptico, para lo que propone una atracción solar y una serie de suposiciones, basadas más en la intuición que en un estricto razonamiento matemático (pues no disponía del cálculo infinitesimal). Finalmente, en su tercera y última ley establece una relación entre los períodos de rotación y las distancias al Sol, la denominada Ley Armónica, por su belleza.

- XVI En 1632. Su descubrimiento del telescopio le ayudó enormemente en la extracción de datos experimentales que, posteriormente, desarrolló con argumentos racionales, concluyendo la veracidad de la teoría copernicana frente a las aristotélicas dominantes en la época. Su prohibición por la Inquisición es bien conocida.
- XVII demostrando su independencia con el peso, en contraposición a la teoría de Aristóteles.
- XVIII la velocidad se mantiene si no hay causas de aceleración.
- XIX propone el razonamiento, como único método para alcanzar la verdad. Su gran contribución a la geometría analítica tuvo una gran influencia en Newton y otros científicos posteriores.
- XX basado en la experimentación.
- XXI A sus 45 años, tras varios años de dedicación intensa al cultivo de las ciencias, entre las que destacan, además, sus estudios de Óptica.
- XXII Los «Principia» de Newton conforman un compendio estructurado de la Mecánica Moderna, que aún sigue en vigor por sus aplicaciones. El arraigo en la sociedad fue tan fuerte que entorpece, hoy en día, la cultura de los nuevos paradigmas que surgieron en el s. XX, de la mano de la Relatividad y la Mecánica Cuántica y, en mayor medida aún, en el establecimiento de una nueva Cosmología unificada para la descripción del Universo. El tratado se inicia con las ocho definiciones y el escolio, en el que establece sus conceptos de tiempo, espacio y movimiento, constituyendo el aparato doctrinal filosófico del paradigma newtoniano. Con un lenguaje axiomático introduce las leyes del movimiento: las dos primeras tomadas de Galileo, como son la fuerza de inercia y el cambio de movimiento producido por la aceleración; finalmente establece el principio de acción y reacción. En esta tercera ley establece la relación gravitacional mutua entre dos cuerpos. El desarrollo de sus teorías lo realiza en tres libros, el primero dedicado al movimiento de los cuerpos, el segundo al movimiento en medios resistentes y el tercero dedicado al sistema del mundo.
- XXIII aparece, más bien, como una consecuencia de su segunda ley, como una relación entre la fuerza y la aceleración producida.
- XXIV Estas concepciones metafísicas chocarían con las nuevas teorías del s. XX y entorpecerían el establecimiento de una teoría descriptiva del Universo en su conjunto, una Cosmología moderna.

- XXV Las ideas de Leibniz del carácter relacional del tiempo y el espacio serían adoptadas, dentro de un espíritu empirista extremo, por Ernst Mach, a finales del s. XIX, ejerciendo una gran influencia sobre Einstein. Por su parte, la visión idealista de un tiempo y espacio interior, ligado a la intuición humana, pero a la vez objetivo, se encuentra en la filosofía de Kant, en su obra «Crítica de la Razón Pura», en 1781. Espacio y tiempo son, para Kant, conceptos generales e intuitivos, necesarios «a priori» para la experiencia de los mismos.
- XXVI Pierre Simon, Marqués de Laplace, que en su «Teoría Analítica», de 1774, deriva el determinismo de una concatenación causal de sucesos.
- XXVII Kant adoptó esta forma de determinismo, si bien con carácter dinámico en cuanto a la evolución entre estados. Otros filósofos del s. XX criticaron estos conceptos, particularmente con la introducción de las nuevas teorías cuánticas.
- XXVIII Habrá que esperar al s. XIX, con la introducción del concepto de campo y, sobre todo, al desarrollo de la física de partículas y Relatividad General del s. XX, para tratar el problema.
- XXIX Michael Faraday establece un simbolismo, las líneas de fuerza, como una herramienta apropiada para obviar el problema de la acción a distancia en las interacciones electromagnéticas. Asimismo, introduce el concepto clásico de campo eléctrico, como una función del espacio que identifica la fuerza ejercida por una carga eléctrica sobre otra carga unitaria en cada punto del espacio. El mismo concepto puede aplicarse a la fuerza gravitacional.
- XXX J. C. Maxwell recoge las ideas sobre electricidad y magnetismo desarrolladas en el s. XIX, las mejora introduciendo la corriente de desplazamiento y les da forma mediante sus famosas ecuaciones publicadas en «Una teoría dinámica del campo electromagnético», en 1865. En su desarrollo conceptual, expone como una carga eléctrica móvil envía energía a través del espacio, en todas las direcciones. Con ello dota de contenido al concepto de campo. Aún más, demuestra que esta propagación de energía se comporta como la luz, logrando unificar el electromagnetismo y la óptica. Posteriormente, Heinrich Hertz demuestra, empíricamente, la validez de la teoría de Maxwell.
- XXXI La existencia de este medio, que actúa como una referencia absoluta, permite que la velocidad de la luz sea independiente del sistema de referencia de modo que mantiene la consistencia con el principio de relatividad de Galileo. A. A. Michelson y E. W. Morley realizan, en 1887, un experimento que pretende analizar el movimiento de la Tierra con respecto al éter, con el resultado negativo respecto a la existencia del mismo, lo que daría pie a que H. A. Lorentz, en 1895, iniciara el estudio de la transformación de longitudes, tiempo y masa. Estos estudios se culminan, en

- 1905, con la formulación por parte de Albert Einstein de la Relatividad Especial.
- XXXII Artículo de Einstein en *Annalen der Physik*, «Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento», donde expone sus ideas revolucionarias que constituyen la teoría de la Relatividad Especial.
- XXXIII Propone utilizar la sincronización de relojes mediante señales de luz en puntos separados del espacio. En seguida observa que no es posible obtener un concepto absoluto de simultaneidad, dados los dos principios de su teoría. Como consecuencia, desarrolla una teoría de transformación de longitudes espaciales e intervalos temporales que permitan pasar de un sistema de referencia a otro; el resultado es que, con respecto a un sistema de referencia fijado, hay una dilatación temporal y una contracción espacial para un sistema de referencia móvil respecto al fijado. El factor, en ambos casos, es muy próximo a la unidad cuando la velocidad v del sistema de referencia móvil es muy inferior a la velocidad de la luz, c . Por ello, salvo para casos en que la velocidad v sea grande, las leyes de Newton se cumplen de forma efectiva.
- XXXIV Por tanto, tanto la simultaneidad como las medidas de longitudes y tiempos son relativas, dependen del sistema de referencia. Con el fin de tener parámetros bien establecidos, define el tiempo propio y la longitud propia como medidas correspondientes al sistema de referencia propio de cada observador.
Las consecuencias filosóficas de la relatividad especial de Einstein son muy fuertes.
- XXXV Por otra parte, se mantiene la visión del Universo como bloque, estático, derivado del determinismo laplaciano. De alguna forma el concepto de tiempo queda relegado.
- XXXVI Esta masa-energía modela el propio espacio-tiempo localmente.
- XXXVII En una conferencia dada por H. Minkowski, en 1908, a la Asociación de Física Alemana desarrolla la idea de un espacio-tiempo en cuatro dimensiones, incluyendo la temporal ct , y plantea las relaciones entre sistemas de referencia como transformaciones espacio-temporales. Definitivamente, tiempo y espacio se interconectan entre sí, perdiendo, de alguna forma, su propia identidad.
En el espacio-tiempo de Minkowski, si representamos en un plano horizontal el espacio (reduciéndolo a dos dimensiones con la finalidad de ser más intuitivo) y en un eje vertical perpendicular el tiempo (ct en realidad), cada punto de ese espacio-tiempo indica un suceso.
- XXXVIII Concretamente, lo aplica al caso de los cuerpos sometidos a la fuerza gravitacional. Su teoría resulta ser una teoría del espacio-tiempo, que resulta estar dinámicamente relacionado con la distribución de materia y energía.

- XXXIX De esta forma el problema de la acción a distancia de la gravedad newtoniana queda superado.
- XL Las consecuencias de la teoría de la relatividad, especial y general, son enormes desde el punto de vista conceptual, obligando a revisar los conceptos de espacio, tiempo y causalidad heredados del paradigma newtoniano.
- XLI lo reduce a una variable más en el espacio de cuatro dimensiones de Minkowski.
- XLII como veremos más adelante, las leyes de la mecánica cuántica, son también invariantes ante la inversión temporal.
- XLIII Las primeras impresiones que tenemos acerca de la asimetría temporal, en el contexto de la física, procede de las observaciones de irreversibilidad de muchos procesos, muchas veces habituales, como la rotura de un vaso o el crecimiento de un ser vivo. Pero el tratamiento científico se realizó en el s. XIX, en el contexto de la Termodinámica y Mecánica Estadística.
- XLIV 1824.
- XLV 1850.
- XLVI cuando se aplica al Universo en su conjunto.
- XLVII 1872.
- XLVIII una tendencia a la uniformidad estadística de las velocidades individuales de las partículas del sistema. Llega a una expresión de la entropía del macro estado del sistema en términos de su probabilidad W calculada en el espacio de los micro estados compatibles con el mismo, $S = k \log W$.
- XLIX al mantener el determinismo de los movimientos microscópicos de las partículas componentes del Universo, el «demonio» de Laplace mantiene su poder para hacer un Universo estático, perfectamente determinista. Lo que es peor, si cambiáramos de dirección todas las velocidades de las partículas del micro estado, y por tanto apuntáramos al pasado, de acuerdo con las leyes deterministas de Newton, deberíamos esperar un posible pasado con mayor entropía, en contradicción con la experiencia y la Termodinámica.
- L Este procedimiento introduce la asimetría temporal en las condiciones iniciales.
- LI al predecir un instante especial ordenado al inicio del Universo, pero no ha llegado a explicar la razón del mismo. La idea de un estado inicial del Universo como una sopa cósmica en equilibrio termodinámico no se contradice con que posea una entropía mínima, debido a la gravedad, que es una fuerza atractiva y hace que un estado no agrupado tenga baja entropía. Otra forma incluye leyes dinámicas no invariantes ante la inversión temporal, particularmente adquiridas de la mecánica cuántica, entre ellas teorías del colapso de la función de onda, como la de Ghirardi, Rimini y Webber, o GRW.

- LII En el contexto de la teoría cuántica de campos y gracias a un importante teorema, la invariancia CPT, la observación en el comportamiento asimétrico de materia y antimateria (violación CP) implica la violación de la simetría de inversión temporal (T) y, en consecuencia, una flecha del tiempo en las leyes fundamentales. La violación CP está incluida en el modelo estándar de la física de partículas y la hemos observado en diversos experimentos.
- LIII el problema de la catástrofe ultravioleta del cuerpo negro, uno de los escasos problemas por resolver de la Física Clásica en el momento.
- LIV En cuantos de energía, proporcionales a la frecuencia, $h\nu$, siendo h una constante muy pequeña (constante de Planck). La distribución de la radiación la obtiene de la Mecánica Estadística clásica, desarrollada por Maxwell, pero la modifica para incluir este nuevo escenario y logra resolver el problema, obteniendo el valor adecuado de la constante h ($6.626 \cdot 10^{-34}$ J. seg.). Planck no piensa que esté introduciendo un concepto fundamental, sino un artefacto matemático que permita analizar, posteriormente, una solución físicamente razonable al problema del cuerpo negro. Sin embargo, está revolucionando la física y sus consecuencias tendrán un impacto extraordinario en la filosofía del Universo, además de proporcionar el marco adecuado para el estudio del mundo microscópico y de sus aplicaciones, la electrónica moderna en particular, sin la cual no entenderíamos el mundo tecnológico que nos rodea.
- LV Einstein, en su año glorioso de 1905, había descubierto el efecto fotoeléctrico.
- LVI En 1902 Ernest Rutherford y Frederick Soddy formulan la ley de desintegración radiactiva. Durante los años anteriores se habían descubierto los rayos X, en 1895, por William Roentgen, y el fenómeno de la radiactividad, en 1896, por Henry Becquerel. J.J. Thomson había descubierto la primera partícula elemental, el electrón, en 1897. La actividad científica en torno a estas nuevas y extrañas observaciones se hizo febril durante los años siguientes, con personajes de la talla de Marie Stodolska Curie y otros muchos.
- El problema que planteaba la ley de desintegración radiactiva de Rutherford es que era una ley probabilística, estadística, que no encontraba lugar en el contexto de la física clásica, ya que aparecía como un fenómeno ligado a la estructura más elemental de la materia, pero espontáneo, sin un enlace a una ley causa-efecto como las leyes clásicas conocidas. En 1917 Einstein propuso un modelo que unificaba la ley de desintegración radiactiva y la ley de Planck, como una ley no causal de la mecánica cuántica, concepto del que nunca estuvo convencido.
- LVII En 1909 Hans Geiger y Ernest Marsden, colaboradores de Rutherford en Manchester, inician una serie de experimentos de colisión de partículas alpha contra finas hojas metálicas, observando que se producían

desviaciones de dichas partículas alpha que no podían explicarse por la acción coulombiana de los átomos en el modelo diseñado por J. Thomson, que asumía una distribución homogénea y continua de carga positiva y electrones dispersos en la misma. Sus resultados condujeron al modelo atómico de Rutherford, en 1911, con un núcleo en su interior, de carga positiva, rodeado por una nube de electrones.

- LVIII El estudio de los espectros de emisión continua de los cuerpos negros había dado lugar a la ley de Planck, en 1900. Pero, junto a los espectros de emisión continuos ya se habían observado y estudiado, cuidadosamente, espectros discretos de emisión y absorción de gases, durante el s. XIX, de modo que en 1885 Johann Balmer había publicado una fórmula empírica de las líneas del espectro del Hidrógeno.

En 1913 Niels Bohr, conocedor del modelo atómico de Rutherford y la teoría cuántica de la luz de Planck y Einstein, se propuso dar una explicación razonable de las series de Balmer, rompiendo con la electrodinámica clásica para explicar la dinámica de los átomos.

- LIX Bohr propone que los electrones solo existen en órbitas estables en torno al núcleo, caracterizadas por un determinado valor de la energía de enlace. Estas energías de los llamados estados estacionarios adquieren valores discretos. Por otra parte, las transiciones de estados estacionarios de menor energía de enlace a estados de mayor energía de enlace vienen acompañadas de emisión de radiación electromagnética de energía igual a la diferencia entre las energías de dichos estados estacionarios. Las transiciones pueden darse también en el sentido contrario, mediante la absorción de radiación electromagnética de la correspondiente energía. Por su parte, en 1913, Henry Moseley, analizando el espectro de la radiación de rayos X por metales diversos observó que junto a un espectro continuo aparecía un espectro discreto, característico del tipo de metal. Si bien los primeros estudios de Bohr se referían al espectro del Hidrógeno, su modelo se fue refinando, introduciendo números cuánticos para identificar las órbitas correspondientes a los estados estacionarios y aplicándolo a todo tipo de átomos. Las órbitas electrónicas, elípticas, venían identificadas por tres números cuánticos (además del principal, introducido por Bohr, otros dos especificando la forma de la órbita, introducidos por Arnold Sommerfeld). Un nuevo número cuántico identificando un concepto cuántico-relativista, el spin, sería introducido por Wolfgang Pauli posteriormente.

- LX de Broglie, en 1924, asocia la longitud de onda λ con el ímpetu p mediante la expresión $\lambda = h/p$. Rápidamente se comprobó experimentalmente, concretamente con difracción de electrones, en 1926, por Clinton Davisson y Lester Germer. Otros experimentos comprobaron la veracidad de la hipótesis.

- LXI Otro concepto fundamental, que diferencia la mecánica clásica de la cuántica, es la indistinguibilidad intrínseca de partículas idénticas. Por ejemplo, dos electrones son intrínsecamente indistinguibles, no porque no tengamos medios suficientemente precisos para diferenciarlos, sino por su propia esencia. Las consecuencias de ello son inmensas, particularmente si consideramos los efectos estadísticos de un conjunto de partículas idénticas, dando lugar a dos tipos de estadísticas cuánticas determinados por el teorema spin-estadística: la de Bose-Einstein para partículas de spin entero, bosones, y la de Fermi-Dirac para partículas de spin semientero, fermiones. La existencia de la materia, tal como la conocemos, depende de estas estadísticas. Así fenómenos como la superconductividad o superfluidez son consecuencia de la estadística de bosones, mientras que el principio de exclusión de Pauli que da origen a la estadística de fermiones da lugar a la estructura atómica y molecular.
- LXII el experimento de las dos rejillas confirma este aspecto.
- LXIII que encaja perfectamente en la teoría atómica de Bohr y la generaliza. En su teoría, la descripción del estado estacionario del sistema viene determinado por una función del espacio, la «función de onda ψ », de la cual se pueden extraer la energía mediante la acción de un operador, el Hamiltoniano H : $H\psi = E\psi$.
- LXIV En relación con la pérdida del concepto de causalidad en el sentido clásico, Bohr lo estableció en 1927.
- LXV el producto de sus incertidumbres es superior a la constante $h/2\pi$.
- LXVI La primera interpretación, la más aceptada, fue dada por Max Born en 1926. En ella, la función de onda es una función de probabilidad, su módulo elevado al cuadrado da la probabilidad de encontrar al sistema en ese punto del espacio. Pero esta probabilidad es intrínseca, en el sentido de que no es una probabilidad estadística clásica. Por lo tanto, en esta interpretación, los procesos naturales explicados por la mecánica cuántica son intrínsecamente indeterministas.
- LXVII Podemos idear sistemas cuánticos entrelazados, como por ejemplo un par de fotones obtenidos de la misma fuente, cuyos spines están, consecuentemente, correlacionados, aunque no podemos predecir su valor, en una medida, más que desde el punto de vista probabilístico de la mecánica cuántica. Si ambos se separan y realizamos la medida de uno de ellos, provocando el colapso a uno de sus valores posibles, automáticamente tenemos información del otro, como podemos comprobar realizando la medida del mismo. Esto ocurre, aunque ambos sucesos de medición estén separados espacialmente, es decir sin posibilidad de informarse mutuamente.
- LXVIII Einstein y col., tras definir la «realidad local» en el sentido de que «si se puede predecir con precisión el valor de una cantidad física del sistema, sin perturbarlo, ello indica un elemento de realidad en el mismo», al apli-

carlo a un sistema de fotones entrelazados deducían la existencia de un elemento de realidad, antes de la medida, contrariamente a los postulados de la Mecánica Cuántica. Aún más conocida, en ese mismo sentido, es la paradoja del gato de Schrodinger, cuya «solución» cuántica era que estaba, a la vez, vivo y muerto, antes de abrir la caja.

- LXIX Einstein, Podolsky y Rosen, en 1935, en su famosa paradoja EPR.
- LXX de acuerdo con las previsiones realizadas por John Bell, en 1964.
- LXXI de acuerdo con el teorema establecido por Emily Noether, en 1915 (así, por ejemplo, la ley de conservación de la energía es una consecuencia de la invariancia ante traslaciones en el tiempo).
- LXXII en QED, la invariancia ante transformaciones de fase locales (multiplicación de las funciones de onda por $e^{i\theta(x)}$, donde x representa el espacio-tiempo) da lugar a la aparición del campo electromagnético, cuyo cuanto es el fotón.
- LXXIII Su desarrollo inicial, entre 1930 y 1940, se debe a varios físicos teóricos, entre ellos Richard Feynmann.
- LXXIV Las características de spin de los campos de fuerza es que son de spin entero (spin 1, concretamente), siendo bosones, por tanto. Por su parte la materia que interactúa por intercambio de estos bosones está constituida por fermiones elementales de spin semientero (1/2), que son los leptones y los quarks.
- LXXV Fue fruto de muchos desarrollos previos pero su expresión formal se debe a Sheldom Glashow, Abdus Salam y Steven Weinberg. Sus predicciones han sido objeto de grandes experimentos realizados por grandes instalaciones científicas, como el Laboratorio Europeo de Física de Partículas, el CERN. El modelo, denominado Modelo Estándar Electrodébil, se ha mostrado muy robusto y, si bien sabemos que es una teoría efectiva, incompleta, aún no se ha observado ninguna discrepancia significativa del mismo.
- LXXVI Consiste en el hecho de la existencia de un nuevo campo que, manteniendo la simetría característica de la teoría, su mínimo de energía potencial esté degenerado, es decir no sea único. La elección de uno de los estados fundamentales se puede realizar arbitrariamente, pero la mera elección implica ya una dirección privilegiada, una rotura «espontánea» de simetría. La introducción de este campo, denominado campo de Higgs, en la expresión del operador de energía del Universo, donde se encuentran ya el resto de los campos bosónicos y fermiónicos, produce nuevos términos, entre ellos términos de masa de las partículas elementales y otros de interacción del campo de Higgs con las mismas. Además, aparecen términos asociados a un nuevo bosón de Higgs, con spin cero.
- LXXVII Algunos, como el quark top, tiene una masa muy grande, unas 180 veces la masa de un protón.

- LXXVIII en las colisiones de protones del acelerador LHC, del CERN, más de 50 años después de su predicción teórica.
- LXXIX Para abordarla se requiere tanto del estudio de los astros y de la radiación cósmica primigenia, objeto de la Astrofísica y cuyo marco teórico es la Relatividad General, como del estudio de las partículas elementales y sus interacciones fundamentales, cuyo marco teórico es la Teoría Cuántica de Campos. El primer reto que nos encontramos es que ambos marcos teóricos no están, todavía, consistentemente desarrollados en lo que llamaríamos una Teoría Cuántica de la Gravedad.
- LXXX Einstein lo realizó en 1917. Además, de acuerdo a la Relatividad General, la constante cosmológica define el radio de curvatura del Universo, al ser la densidad de materia media del mismo. Sin embargo, Willem de Sitter, el mismo año 1917, demostró la existencia de una solución con un Universo vacío de materia y espacialmente cerrado, provisto de la constante cosmológica. Si bien esa solución no fue bien acogida por Einstein acabaría teniendo una gran influencia en el modelo estándar, al predecir el movimiento observado «al rojo» de la radiación lumínica de las galaxias espirales.
- LXXXI En 1927, influenciado por ambos modelos estáticos, así como por otros modelos dinámicos introducidos por Alexander Friedmann.
- LXXXII Se conoce como ley de Hubble. Por cierto, que la inversa de dicha constante de Hubble, H , da una estimación del tiempo de existencia del Universo, en el caso de un Universo finito en el tiempo, y vale 14 mil millones de años, aproximadamente.
- LXXXIII En el año 1963 se produjo, por azar, un descubrimiento que iba a revolucionar la cosmología moderna. Arno Penzias y Robert Wilson observan en sus antenas de comunicación de los laboratorios Bell un ruido de fondo, no achacable a la electrónica, correspondiente a un exceso de temperatura en la antena de aproximadamente 4 Kelvin. A su vez, un grupo de cosmólogos de Princeton, encabezado por Robert Dicke, estaban preparando un experimento para detectar la radiación de cuerpo negro correspondiente al desacoplo entre radiación y materia esperada en el modelo de evolución del Universo, antes indicado. Al enterarse, en 1965, de las observaciones de Penzias y Wilson llegaron a la conclusión de que se correspondía con la radiación cósmica de fondo, CMB. Inmediatamente comenzaron estudios finos de la misma, de modo que, en 1970, el valor observado era de 2,7 Kelvin.
- LXXXIV El Universo es, por tanto, opaco a la radiación electromagnética para tiempos anteriores, por lo que los estudios finos de la CMB realizados hasta hoy en día son el método que utilizan los cosmólogos para conocer la evolución del Universo. Estos estudios se complementan con los que realizamos en los aceleradores de partículas, que simulan los instantes iniciales del Universo, tras el Big-Bang.

- LXXXV materia ordinaria, bariónica.
- LXXXVI las teorías cuánticas tienen al tiempo como un parámetro externo, estático, al estilo de la mecánica newtoniana.
- LXXXVII Los modelos más conocidos provienen:
- o de cuantificar la relatividad general, como es el caso de la teoría de Wheeler- De Wytt, la teoría de lazos o la teoría de bucles. En este caso, el tiempo no existe, solo el espacio, y solo emerge, como el espacio-tiempo clásico, en la aproximación semiclásica.
 - o de tratar de unificar las interacciones fundamentales, como es el caso de las teorías de cuerdas o de branas. En este caso no está aún solucionado el problema del tiempo.
- LXXXVIII El modelo estándar de la física de partículas contiene 29 parámetros como las masas de quarks y leptones, con grandes diferencias entre las mismas. Además, muchos de los parámetros tienen valores pequeños, con ajuste fino para el éxito del modelo, lo que se denomina el problema de las jerarquías. Lo mismo ocurre con el modelo cosmológico, con un espacio-tiempo plano, en el que la constante cosmológica observada requiere ajuste fino y es 120 órdenes inferior a la que se obtendría por puro análisis dimensional a la escala de Planck, en el instante inicial tras el Big-Bang.
- LXXXIX incluyendo las pequeñas fluctuaciones térmicas de la radiación cósmica de fondo, su gaussianidad y su invariancia de escala.
- XC El Big-Bang es una singularidad cosmológica, cuya explicación requiere, como ya hemos apuntado, una teoría cuántica de la gravedad. Una singularidad también aparece en los agujeros negros.



Septiembre, 2020

APERTURA
DEL CURSO
ACADÉMICO
2020-21

LECCIONES