

EL PRINCIPIO DE INDETERMINACIÓN

Miguel Hernández González
Catedrático de Física y Química
(I.B. Rafael Arozarena)

*¡No se puede conocer a alguien a la luz de la
justicia y a la luz del amor al mismo tiempo!*
Bohr

Aquella tarde Heisenberg no pudo "resistir más la presión a que lo sometía Bohr y rompió a llorar"¹; probablemente por su mente pasarían las imágenes, no tan lejanas en el tiempo, de un Schrödinger enfermo perseguido por el implacable danés. El motivo de la discusión, dura y muy desagradable, no era otro que la interpretación de lo que luego pasaría a denominarse Principio de Indeterminación.

El origen inmediato de la disputa había que buscarlo en el desafío que, para los cuánticos de la escuela de Bohr, había supuesto la formulación de la Mecánica Ondulatoria de Schrödinger y la prueba de equivalencia matemática entre este formalismo y el de la Mecánica de Matrices; y las razones de su carácter violento, en la importancia del asunto que estaba en juego: la naturaleza de lo real, la conformación de una "radical y nueva manera de ver el mundo".

Antes de que pasemos a exponer al lector los contrapuestos puntos de vista sostenidos por Heisenberg y Bohr, quizás convendría ponerlo en antecedentes

¹ Interview with Heisenberg on February 25, 1963. Archive for the History of Quantum Physics



sobre algunos de los hechos más significativos, tanto de esta accidentada y extraña historia de "los cuantos" como de la época en la que se gestó un cambio radical en ciencia.—del que la discusión que relatamos formó parte—.

ANTECEDENTES

Los inicios del siglo XX contemplaron cómo Max Planck, un afamado físico al que no cabe catalogar como rupturista, se veía obligado a introducir una suposición de consecuencias imprevisibles (los intercambios energéticos entre materia y radiación se producen en "cuantos", en paquetes discretos) a fin de obtener una expresión matemática mediante la que se diera cuenta de la forma de la curva de radiación espectral del "cuerpo negro". Poco después, en 1905, un oscuro funcionario de una oficina de patentes en Berna, de nombre Albert Einstein, publicaba tres artículos de contenido variado (movimiento browniano, efecto fotoeléctrico y teoría especial de la Relatividad) pero de enorme influencia en el desarrollo posterior de la Física.

Todo ello ocurría sobre un trasfondo de inquietud socio política que repercutía en todos los aspectos de la actividad humana y que, sin duda, anunciaba una nueva época.

En 1902 un revolucionario profesional, Vladimir Ilich Ulyanov "Lenin" publicaba un libro de título "*¿Qué hacer?*", en el que teorizaba sobre la necesidad de crear un partido que se convirtiera en la "*vanguardia del proletariado*". En 1905 estallaba en Rusia una revolución que, aunque fallida, mostraba claramente la inestabilidad de un orden que hacía aguas por todas partes.

En 1911 el físico neozelandés Ernest Rutherford, después del análisis de los experimentos de deflexión de partículas α de velocidades elevadas por láminas delgadas de oro, dió a la luz su modelo nuclear y planetario para el átomo. Atraído por la efervescencia y la actividad científica del Cavendish Laboratory llega a Cambridge el danés Niels Bohr quien en tres artículos publicados los años 1913, 1914 y 1915 en la Philosophical Magazine introduce en un sustrato clásico, de modo audaz, hipótesis de cuantificación en el átomo a fin de "dar cuenta" del misterioso comportamiento de las líneas espectrales. Sommerfeld generaliza, durante los años 1915 y 16, el modelo de Bohr para el átomo de Hidrógeno extendiendo las condiciones de cuantificación a sistemas periódicos con más grados de libertad y dando cuenta así de la estructura fina de las líneas espectrales. La "vieja mecánica cuántica" está prácticamente concluida².

² La distinción básica entre la "vieja mecánica cuántica" y las nuevas ideas que introducirá Heisenberg hay que buscarla en la transición desde modelos mecánicos del átomo,- aunque sean simbólicos-, a observables de laboratorio como fundamento de la teoría.



En 1914 se inicia la 1.^a Guerra Mundial y una profunda oleada de nacionalismo anega Europa. Las organizaciones socialistas se alinean con sus respectivos gobiernos a pesar de sus previas proclamas internacionalistas y antiimperialistas. Lenin clama por la constitución de una 3.^a Internacional que declare "*muerta la 2.^a, traidores a los socialistas pertenecientes a ella*" y propone como tarea inmediata de los verdaderos revolucionarios "*la transformación de la guerra imperialista en guerra civil*". En 1917 explica, en *El imperialismo, fase superior del capitalismo*, su punto de vista sobre el carácter y las causas de la Gran Guerra, las razones del abandono del internacionalismo por los socialistas y el modo en cómo acabar con aquélla por medio de la revolución. Revolución que estalla en Rusia en Octubre de ese mismo año y que acaba con el zarismo.

En 1918 tiene lugar la disolución de la monarquía de los Hausburgo y el desmembramiento del imperio austro-húngaro, la flota alemana se niega a zarpar de Kiel, los marineros enarbolan e izan banderas rojas y se extienden por todo el país los consejos de trabajadores y soldados. El Kaiser abdica y huye a Holanda, el 9 de noviembre los ministros socialdemócratas proclaman la República, se constituye un nuevo gobierno y el 11 del mismo mes se firma el armisticio que, ratificado posteriormente, en Junio de 1919, en el Tratado de Versalles, impone duras compensaciones a los países derrotados. Los brotes revolucionarios son sofocados con dureza (Rosa Luxemburgo y Karl Liebknecht son asesinados en Alemania en enero de 1919) y se fomenta la contrarrevolución y la guerra civil en una Rusia sometida a cerco. El miedo al socialismo se extiende por toda Europa, las masas adquieren protagonismo creciente y el "orden burgués" se ve amenazado.

Todo parece posible y todo parece acabado³, no es extraño pues que se produzca una eclosión total en casi todos los ámbitos y que esta época aparezca simultáneamente como el crisol de las vanguardias más rupturistas y de los movimientos políticos más reaccionarios, que en ella coexista la ciencia más audaz y creativa con las más variadas y diversas pseudociencias y que se proclame al mismo tiempo, desde el ámbito de la filosofía, su propia reconstrucción "al modo de la ciencia" o, por el contrario, su despliegue como negación de ésta.

³ El libro de Joseph Roth "La marcha de Radetzky" describe magistralmente el declinar de una época: "En aquel entonces, antes de la Gran Guerra,... no era aún indiferente que alguien muriera o viviera. No se encontraba fácilmente un sustituto para el que desaparecía del mundo de los vivos, ni se olvidaba al muerto para ocupar su lugar, sino que durante mucho tiempo se hacía notar el vacío por él dejado, y tanto los inmediatos como los lejanos testigos de su muerte, enmudecían al advertirlo... Todo cuanto crecía necesitaba mucho tiempo para terminarse; todo cuanto desaparecía necesitaba mucho tiempo para ser olvidado, Cuando una vez había existido, dejaba siempre rastros de su presencia, y se vivía de recuerdos, de la misma manera que en los tiempos actuales se vive de la facultad de olvidar".



Parecía llegado el momento de pasar revista a un entramado de valores, conceptos, etc., en suma, a una cultura (de la que la ciencia forma parte esencial) que, incapaz de culminar expectativas, había arrojado a los pueblos a la barbarie y que ya no era de "estos tiempos".

Después de apuntado, en forma sumaria, el "tono de la época", vamos a restringir, aún más, nuestro análisis al campo de la ciencia y a rastrear en qué medida y por qué razones (o sinrazones) se cuestionó de un modo radical el modelo clásico de ciencia. Nuestro estudio será esencialmente "internalista" aunque admitamos la posible influencia, en el discurso, las interpretaciones, etc., de la ciencia física, de todo lo que Forman denomina "*el ambiente intelectual de la época de Weimar: antirracionalista, de exaltación de la lebensphilosophie (filosofía de la vida) y de rechazo del positivismo, mecanicismo y materialismo encarnados en la noción de causalidad*"⁴. La influencia del libro de Spengler "*La decadencia de Occidente*", donde, desde una concepción cuasi biológica de "las épocas culturales", se proclama la consunción y la vejez de la nuestra, resulta paradigmática⁵.

LA VISIÓN CLÁSICA DEL MUNDO

Hasta el advenimiento de la Teoría de la Relatividad y la Física Cuántica, la visión mecánica de Newton complementada con la teoría del campo electromagnética de Faraday-Maxwell dominaba,—pese a críticas más o menos atinadas pero puntuales—, el escenario de la ciencia física y mediante su amalgama se "explicaba el mundo real".

Los presupuestos sobre los que descansaba esta visión del mundo podrían resumirse del modo siguiente:

- 1.- La materia, que es discontinua en su estructura, se mueve a través del espacio según las leyes estrictas de la mecánica.
- 2.- Todas las diferencias aparentemente cualitativas de la naturaleza se deben a las diferencias de configuración o movimiento de estas unidades básicas o de sus agregados.

⁴ "Uno también está cansado de tener solamente interrelaciones de causa y efecto demostradas una y otra vez de acuerdo a los métodos de conocimiento racionales, y cansado de efectuar tales demostraciones uno mismo; soy de la opinión de que en la humanidad y en la vida existe mucho más que un aparato de causalidad mecánica. Uno se ha cansado de conocer y está sediento de vivir"

⁵ Consultar el libro de Forman " Cultura en Weimar, causalidad y teoría cuántica 1918-1927" para constatar la influencia del libro de Spengler en la cultura de la época y en particular en la ciencia y los científicos.



- 3.- Todos los cambios aparentemente cualitativos son meramente efectos superficiales del desplazamiento de las unidades elementales o de sus agregados.
- 4.- Toda acción recíproca entre los corpúsculos básicos se debe exclusivamente a su impacto directo entendido éste si no entre cuerpos macroscópicos, al menos entre las partículas elementales del medio intermedio (el éter electromagnético de Maxwell es una de sus elaboraciones más sofisticadas pero sus antecedentes se remontan a Descartes entre otros). La acción a distancia es pues una simple figura de dicción⁶.
- 5.- La variedad cualitativa, así como la transformación cualitativa, son adiciones psíquicas de la mente humana perceptora. No pertenecen, en consecuencia, a la naturaleza de las cosas.

Conviene hacer algunas precisiones sobre el conjunto de presupuestos anteriores a fin de aislar los conceptos y nociones esenciales que subyacen en lo que Millic Capek denomina, "–por propia elección de la palabra"–, *cuadro clásico* a fin de remarcar su carácter pictórico⁷.

Encontramos en este cuadro clásico los conceptos de espacio, tiempo, materia, movimiento y causalidad y, aunque cada uno de ellos exigiría un tratado, vamos a intentar señalar de qué modo son concebidos en esta visión del mundo. Añadiríamos además para completar el panorama, que en Física clásica existe, de acuerdo con el más elemental sentido común, un mundo objetivo "ahí fuera". Un mundo que evoluciona de un modo claro y determinista, gobernado por leyes formuladas exactamente mediante ecuaciones diferenciales. La realidad física existe, pues, independientemente de nosotros mismos y el modo exacto de "ser" del mundo no está afectado por cómo decidimos observarlo. Nuestros cuerpos y nuestros cerebros van a ser ellos mismos parte de este mundo y están, por tanto, sometidos a evolución en términos de las mismas ecuaciones clásicas exactas y deterministas.

⁶ Cuando el vínculo material directo entre los cuerpos distantes que actúan recíprocamente parecía estar ausente, la imaginación de los filósofos y los científicos lo proporcionó en forma de un agente mecánico intermedio que se compone de partículas demasiado sutiles para ser percibidas por los sentidos humanos. Millic Capek op. cit.

⁷ "Pregunta a tu imaginación si la quiere aceptar" afirmaba John Tyndall en su alocución de Liverpool a los físicos de la era victoriana como criterio fidedigno de las teorías científicas satisfactorias, o sea, pregúntate a tí mismo si puedes dibujar un cuadro mental del fenómeno en cuestión; recházalo si no se puede construir un diagrama visual, un modelo mecánico.



A) El concepto de espacio

Newton formulaba su noción de espacio en los siguientes términos: *"El espacio absoluto, en su propia naturaleza, sin consideración hacia ninguna cosa externa, permanece siempre similar e inmóvil"*. Este concepto ya se hallaba prefigurado en el viejo atomismo de Leucipo y Demócrito donde se había establecido por primera vez la distinción explícita entre la materia definida como plenum o espacio ocupado en franco contraste con el vacío o espacio desocupado. El Universo quedó configurado desde entonces, en términos de un recipiente inmutable e independiente y de un contenido físico, material, variable (*"sólo existen los átomos y el vacío y aquellos se mueven en éste"*). Nunca se enfatizará suficientemente el poder de la concepción atomista⁸, su capacidad explicativa.

El tema de la precedencia temporal y lógica del espacio sobre la materia aparece repetidamente en la reflexión de filósofos y poetas, la nada parece ser autosuficiente y autoafirmativa, en tanto que el Ser parece requerir una razón suficiente para su propia presencia⁹.

El espacio atomista es homogéneo y de esta homogeneidad se derivan sus propiedades esenciales: independencia, inmutabilidad, infinidad, continuidad matemática, inacción causal. Toda heterogeneidad hay que buscarla en la materia que ocupa el espacio y que se desplaza en él. Al espacio sólo pertenecen las relaciones de yuxtaposición, o como Locke lo expresaba: *"el espacio es el principium individuationis, que nos permite distinguir dos sensaciones simultáneas cualitativamente idénticas, dos objetos simultáneamente percibidos sólo pueden ser numericamente distintos si están en dos lugares diferentes"*. Todas las posi-

⁸ "Si en algún cataclismo fuera destruido todo el conocimiento científico y solamente pasara una frase a la generación siguiente de criaturas, ¿qué enunciado contendría el máximo de información en el mínimo número de palabras?. Yo creo que sería la hipótesis atómica: que todas las cosas están formadas por átomos,- pequeñas partículas que se mueven con movimiento perpetuo, atrayéndose unas a otras cuando están separadas por una pequeña distancia, pero repeliéndose cuando se las trata de apretar una contra otra". (Feynmann R. Lectures on Physics 1963).

⁹ "...La existencia me parece como una conquista sobre la nada. Me digo que puede existir la nada, que realmente debe existir, y entonces sospecho que existe algo. O me imagino toda la realidad extendida sobre la nada como sobre una alfombra: al principio era la nada, y el ser fue sobreañadido después" escribirá Bergson en 1907.

Paul Valery lo expresará de un modo poético:

"Que l'univers n'est qu'un défaut dans la pureté du Non-Etre!"

y Heidegger lo dramatizará mediante su aforismo existencial: ¿Por qué existe cualquier ser y no precisamente la nada?



ciones en el espacio son cualitativamente idénticas, su única distinción se debe a sus relaciones de yuxtaposición o coexistencia¹⁰.

Ya en ponencias anteriores hemos argumentado en favor de la relación entre este espacio físico atomista y el espacio abstracto de la geometría griega (el espacio de Euclides), por lo que aquí nos limitamos a recordar que, pese a la aceptación del espacio heterogéneo de Aristóteles como el espacio de lo físico (impelidos sin duda por la necesidad de explicar el orden en términos de finalidad, de diseño), siempre que se matematizó el mundo natural (en Astronomía con Aristarco, en Mecánica con Arquímedes, etc.) se trató el espacio físico "al modo atomista". Esta argumentación, que podría ser discutible en el ámbito de la ciencia griega, resulta incontrovertible cuando nos referimos a la ciencia de Newton: la geometrización y aritmetización del espacio físico resulta ser una consecuencia lógica de la algebrización de la geometría que Descartes y Fermat materializaron en el siglo XVII. Existe una identificación indiscutible entre el espacio euclídeo y el espacio del mundo de los procesos físicos¹¹. Identificación que sólo más tarde se volverá problemática cuando se descubran las geometrías no-euclídeas y se suscite la cuestión de cual, de los ahora diversos espacios matemáticos, corresponde al espacio real de la física.

B) El concepto de tiempo

También podemos utilizar la formulación newtoniana como eje de nuestra reflexión sobre la idea de tiempo en la física clásica: *"El tiempo verdadero y matemático absoluto, de por sí y por su propia naturaleza, fluye uniformemente, sin consideración a ninguna cosa externa. También se llama duración. El tiempo rela-*

¹⁰ Porque apenas es posible dar otra definición de espacio: el espacio es lo que nos permite distinguir unas de otras un número de sensaciones idénticas y simultáneas, es así un principio de diferenciación distinto al de diferenciación cualitativa, y, por consiguiente, es una realidad sin ninguna cualidad- (H. Bergson, Time and free will).

Todos los puntos son cualitativamente similares, y se distinguen por el mero hecho de estar situados unos fuera de otros. (B. Russell, Essay on the foundations of Geometry).

¹¹ La geometría de Euclides y la mecánica de Newton se basan ambas en hábitos profundamente arraigados de la imaginación y el pensamiento cuya fuerza es mucho mayor de lo que generalmente nos hallamos dispuestos a reconocer. A Kant le impresionaba tanto esta fuerza que la consideraba como manifestación de la estructura a priori inmutable de la mente humana; Herbert Spencer, a pesar de su epistemología radicalmente distinta, coincidía finalmente con Kant, al menos en cuanto a la inmutabilidad de la estructura intelectual de Newton y Euclides. Esta estructura sería, según Spencer, el resultado final y definitivo de un largo proceso de ajuste en el que el mundo externo creó, por decirlo así, su réplica exacta en la mente humana en forma de la imagen de la naturaleza que contemplaban Euclides y Newton...: la ciencia clásica era considerada como ajuste final y completo de las facultades cognoscitivas humanas al orden objetivo de las cosas.



tivo, aparente y vulgar es cierta sensible y externa medida del tiempo absoluto, estimada por los movimientos de los cuerpos, ya exacta o desigual, y comúnmente se utiliza en vez del tiempo verdadero (tal como una hora, un día, un mes, etc.)".

El tiempo, al igual que sucedía con el espacio en otra forma, fluye, cambie o nó alguna cosa; los cambios están en el tiempo pero no son el tiempo. Si la relación esencial del espacio era la yuxtaposición, la relación básica en el tiempo es la sucesión. Es ésta relación de sucesión la que hace posible distinguir dos estados cualitativamente idénticos de una sóla e idéntica entidad. Se trata pues, al igual que el espacio, de un principio de diferenciación de un género distinto al cualitativo.

La homogeneidad del tiempo, conectada con el flujo uniforme, implica para éste unas propiedades de tipo similar a las que ya hemos comentado en relación a la homogeneidad del espacio: independencia, infinitud, continuidad matemática e inacción causal.

El tiempo, al igual que el espacio es recipiente de toda la materia, es receptáculo de todos los cambios e incluso, como señaló Whitehead, *"el tiempo es receptáculo no sólo del material físico variable sino también del propio espacio"*. El espacio no es realmente intemporal y más que hablar de un espacio que subsiste ajeno al tiempo tenemos que hablar de una serie infinita de espacios instantáneos sucesivos que, aunque cualitativamente idénticos, aún difieren por sus posiciones en el curso universal e inexorable del tiempo.

C) El concepto de materia

Desde los lejanos tiempos de Leucipo y Demócrito la noción de materia se nos representa como negación de la Nada y a sus elementos constitutivos, los átomos, les atribuimos la propiedad esencial de "llenar espacio". Éste ser "espacio lleno" los dota de propiedades de impenetrabilidad, indestructibilidad, rigidez y homogeneidad.

La historia de la "hipótesis atómica" muestra como una y otra vez la negación práctica de alguna de las propiedades antes enumeradas en los, hasta ese momento considerados, elementos últimos, obligó a buscar en un nivel más profundo unidades más pequeñas y básicas en las que esos rasgos esenciales volvieran a recuperarse. Se aceptaba lo que ha venido a denominarse "el tema de Gulliver"¹².

¹² "De esta manera, observan los naturalistas que una pulga tiene pequeñas pulgas que en ella hacen presa; y éstas tienen otras más pequeñas todavía que las pican, y así proceden ad infinitum"

Swift J. On poetry, a rhapsody



Este atomismo "radical y esencial" adquirió su expresión más acabada, no en el modelo de Dalton que contemplaba la existencia de átomos con propiedades cualitativamente diferentes, sino en la teoría del electrón que aparentemente consiguió reducir, en línea con los postulados del atomismo filosófico, casi todas las diferencias cualitativas de la naturaleza a diferencias de complejidad y agregación de los corpúsculos básicos homogéneos: los átomos de electricidad. A finales del siglo XIX e incluso a principios del XX se soñaba con cubrir, en un nivel más profundo (el de la omnimoda unidad del éter), los huecos que aún persistían en el cuadro mecánico del mundo: la dualidad de materia y electricidad, así como la doble polaridad (cargas + y -) de ésta.

Este concepto de "éter" tiene también una larga historia en la que no vamos a detenernos. Mencionaremos aquí que, en nuestro contexto y bajo el ropaje del éter electromagnético de Maxwell, sirvió como medio que garantizaba la acción recíproca por contacto entre cuerpos distantes y que, en desarrollos posteriores o colaterales, se pretendió utilizarlo como sustrato desde el que sería explicable no sólo la acción recíproca entre los propios cuerpos sino también la propia individualidad de las partículas básicas.

D) El concepto de movimiento

Los viejos atomistas reconocieron que el movimiento no se podía derivar de la materia y tampoco del espacio o el tiempo (cuya inacción causal ya hemos mencionado) y, aunque estas ideas fueron reformuladas con posterioridad¹³ de un modo más elaborado, en su modelo prefiguraron, de un modo implícito, tanto la ley de conservación de la masa como la de conservación del movimiento al conceptualizar a la materia y al movimiento como "*cantidades sustanciales que se conservan a través del tiempo, mientras cambia su distribución espacial*".

La formulación explícita de estas leyes tuvo que esperar al siglo XVIII (Lavoisier y Huygens) y en ese largo camino se tuvo que destruir un prejuicio profundamente asentado —"el principio de conservación del lugar" íntimamente conectado con la falsa idea de que "todo movimiento necesita un motor"—, y sus-

¹³ "Puesto que el cuerpo no es nada más que materia y figura y puesto que la causa del movimiento no se puede comprender a base de materia o figura, la causa del movimiento debe estar necesariamente fuera del cuerpo" Leibniz (1668)

"Supongamos eterno, grande o pequeño, cualquier paquete de materia; no lo encontraremos en sí capaz de producir nada...; si no hubiese otro ser en el mundo, ¿no debe permanecer eternamente así, terrón muerto e inactivo? ¿Es posible concebir que puede añadir movimiento a sí mismo, siendo pura materia, o producir cualquier otra cosa? La materia, pues, por su propia fuerza no puede producir nada; el movimiento que tiene también debe proceder de la eternidad, o, si no, ser producido o añadido por algún ser más poderoso que la materia..." Locke (1688)



tituirlo por la ley de inercia donde existe movimiento en ausencia de fuerzas y en el que se le da sustancialidad a aquél.

Las leyes de conservación en sus diversas manifestaciones (momento, energía, masa, etc.) son variaciones de un mismo tema: *"los sucesivos estados del Universo son simples redistribuciones espaciales de cantidades sustanciales que en conjunto son constantes"*. Estos estados sucesivos están, además, prefigurados en los estados anteriores y, dada la supuesta finitud de los elementos constitutivos del Universo, no sólo no está excluida la posibilidad de un retorno cíclico sino que tal retorno aparece como inexorable. Nietzsche lo expresaba como queja agónica en su libro *"La voluntad de poder"*: *"... el Universo es un movimiento circular que ya se ha repetido un infinito número de veces, y que sigue su juego a través de toda la eternidad"* y Poincaré extendía su certificación de validez mediante su Teorema de recurrencia en el espacio de fases: *"un sistema mecánico (del tipo de los que concibe el modelo clásico que aquí comentamos) regresará, dado un tiempo suficientemente largo, a un estado que se halla infinitamente próximo a la configuración inicial"*. Todo parece escrito desde siempre, determinado, como muy bien sintetizó Laplace: *"Una inteligencia que conociera, en un instante dado de tiempo, tanto las fuerzas que actúan en la naturaleza como las posiciones (y velocidades) de todas las cosas que existen en el Universo, sería capaz de abarcar en una sólo fórmula,—lo suficientemente potente como para someter todos los datos a análisis—, los movimientos de los cuerpos más grandes del Universo y los de los átomos más ligeros. Para ella nada resultaría incierto y tanto el pasado como el futuro estarían presentes ante sus ojos"*.

EL CUESTIONAMIENTO DEL MODELO CLÁSICO

A) La teoría de la Relatividad

a.1 Apuntes históricos

Los desarrollos de la ciencia de la Electricidad y el Magnetismo se habían concluido prácticamente, al menos en sus aspectos fundamentales, con la formulación de las ecuaciones de Maxwell (que describen la evolución espacial y temporal de los "campos electromagnéticos" mediante los que puede darse cuenta de las acciones eléctricas y magnéticas). A partir de ellas fué posible mostrar la propagación de esas acciones mediante ondas cuya velocidad coincidía con la de la luz. Una nueva síntesis, que recordaba la unificación newtoniana entre física celeste y terrestre, apareció en el horizonte inmediato: la escurridiza luz pareció finalmente quedar atrapada por el intelecto humano.



Ya hemos señalado con anterioridad como se integró esta teoría, en el modelo clásico. El edificio aparecía espléndido y acabado a pesar de que aún faltaran "algunos adornos". Uno de estos adornos, –el medio en el que se propagaban las ondas electromagnéticas, la luz: el "éter electromagnético" de extrañas propiedades (rígido a fin de soportar veloces ondas transversales y sutil para no actuar de freno a los observados movimientos de los objetos celestes)–, resultó difícil de acoplar (¡no había modo de encontrarlo!).

Por otra parte, la detección de este medio podría servir como prueba de existencia de un sistema inercial privilegiado (¡el espacio absoluto!) distinguible del resto de los sistemas inerciales porque sólo en él se cumplirían las ecuaciones de Maxwell¹⁴. Recordemos que el hecho de que se verificara el Principio de Relatividad¹⁵ de Galileo (al menos para la Mecánica) mostraba las dificultades que existían en la identificación de un pretendido espacio absoluto. En efecto, todos los sistemas inerciales serían dinámicamente equivalentes y si existiera tal espacio absoluto sin movimiento, su existencia sería mecánicamente inverificable. Tal imposibilidad no se aplicaría, sin embargo, a las experiencias ópticas y que al no ser idénticas las leyes que rigen el electromagnetismo (y por tanto también la óptica) en los diferentes sistemas inerciales conectados mediante las transformaciones de Galileo tampoco lo serían sus acciones. El sistema inercial privilegiado (el correspondiente al espacio absoluto) sería, pues, aquél en el que el éter (medio soporte de la propagación de las ondas electromagnéticas) está en reposo y en el que la velocidad de las ondas resulta ser la "verdadera velocidad".

¹⁴ Las razones hay que buscarlas en el hecho de que, de acuerdo con el Principio de Relatividad de Galileo, las leyes de la Mecánica de Newton son invariantes (siguen siendo las mismas) en todos los sistemas inerciales (que se mueven con velocidad V constante) conectados por las leyes de transformación:

$$r = r' + V t$$

$$t = t'$$

y, por el contrario, las leyes del electromagnetismo (las ecuaciones de Maxwell) no lo son.

¹⁵ El propósito de cualquier teoría física es describir de una manera concisa una gran variedad de fenómenos. En muchos casos esto necesitará, como parte de la teoría, una prescripción para aplicar la teoría a sistemas que se encuentren en estados de movimiento diferentes. Una prescripción de este tipo, es decir, una especie de código de traducción, consistirá generalmente en un sistema matemático de leyes de transformación. Perteneció a la naturaleza de las leyes de transformación el cambiar la mayor parte de las cantidades y el dejar invariantes algunas de ellas. Estas últimas son los denominados invariantes de la transformación y sirven para definir su carácter. Una afirmación en el terreno de la Física de cuales son estos invariantes se denomina principio de relatividad, y las ecuaciones fundamentales de una teoría definen generalmente el principio de relatividad que le es aplicable. Bondi H. Rept. Progr. Phys., 22, (1959)



Los físicos de la época (finales del XIX y principios del XX) concentraron gran parte de sus esfuerzos a la detección de movimientos respecto al éter. Los resultados, contradictorios y extraños, suscitaron una polémica, (preludio de la que unos años más tarde constituiría uno de los núcleos de la teoría cuántica) en torno a la verdadera naturaleza (¿onda o corpúsculo?) de la escurridiza luz.

En el cuadro adjunto se recogen las evidencias a favor y en contra de los dos modelos básicos (corpuscular y ondulatorio) sobre la naturaleza de la luz.

	<i>Modelo corpuscular</i>	<i>Modelo onda/éter</i>
1. La luz viaja en línea recta	Correcto	Válido si long. de onda << anchura del rayo
2. Efectos de interferencia y difracción	No ofrece explicación convincente	Correcto
3. Polarización de la luz	No ofrece explicación convincente	Correcto
4. La velocidad de la luz independiente de la velocidad de la fuente	Desacuerdo claro	Correcto
5. La velocidad de la luz mayor en el aire que en el agua	Desacuerdo claro	Correcto
6. Experimento de Fizeau y experimento de Airy (con el telescopio lleno de agua)	Requiere un arrastre parcial de la luz por el medio	Requiere un arrastre parcial de la luz por el medio
7. Aberración estelar (Bradley)	Correcto	Válido si la Tierra se mueve respecto al éter
8. Experimento de Michelson-Morley	Correcto	Implica que la Tierra <i>no</i> se mueve respecto al éter

Conviene hacer aquí referencia a los importantes experimentos de Michelson (1881), y de él mismo en colaboración con Morley, en los que haciendo uso de un montaje interferométrico obtiene un inesperado y sorprendente resultado nulo para el movimiento de la Tierra a través del hipotético éter (ver Banesh Hoffmann "*La relatividad y sus orígenes*". Labor, págs. 76 y sig.). Teóricos del Electromagnetismo como Fitzgerald, Lorentz, etc., proponen diversas soluciones (acortamiento real de longitudes en la dirección del movimiento y, en el caso de Lorentz, introducción de un tiempo local en el sistema de referencia móvil-cuyo ritmo sea más lento) con las que, manteniendo la fidelidad a la hipótesis del éter y al modo clásico de ver el mundo, se "salven las apariencias". Para Lorentz es justamente la existencia de este éter con su acción sobre la "materia ordinaria" la que permite entender tanto el acortamiento real de longitudes como la dilatación real de los intervalos temporales medidos por relojes que ven alterados sus ritmos periódicos en los sistemas de referencia móviles. Seguiría existiendo, sin embargo en esta concepción, un tiempo absoluto cuyo discurrir coincidiría con el de los relojes en reposo en el medio estacionario (en el espacio absoluto). La visión absolutista, pero también la relacional sobre el espacio y el tiempo parecen estar planeando en la concepción lorentziana.

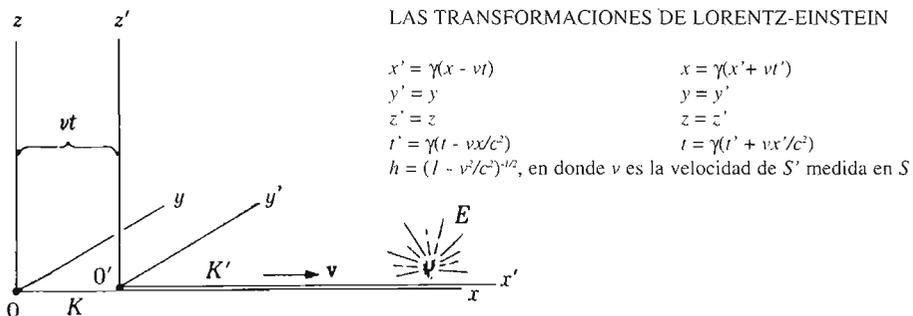


En 1905, como ya apuntamos anteriormente, Einstein publica su famosísimo artículo *“Sobre la electrodinámica de cuerpos en movimiento”* donde, a partir de consideraciones sobre la absurda asimetría explicativa de fenómenos electromagnéticos corrientes y sobre la imposibilidad de detección de cambios en el valor de la velocidad de la luz medida desde diferentes sistemas de referencia (aunque sin conceder especial relevancia al resultado de Michelson), introduce modificaciones radicales en nociones hasta entonces admitidas sin discusión.

Einstein construirá toda su teoría de la Relatividad Especial sobre dos postulados que parecen, en términos de nuestras concepciones clásicas, contradictorios:

- 1) Las leyes de la física (las de la mecánica y las del electromagnetismo) son válidas en todos los sistemas inerciales.
- 2) La velocidad de la luz en el vacío es constante e independiente del estado de movimiento del cuerpo emisor.

A lo largo de ese artículo Einstein someterá, en primer lugar, a análisis el concepto de simultaneidad (ver Robert Resnick, *“Introducción a la Teoría especial de la Relatividad”*. Limusa, págs. 47 y sig.), que en la formulación clásica parecía hallarse exento de contradicciones y aquí devendrá problemático, para, a continuación, obtener el conjunto de transformaciones entre sistemas inerciales que tenga como invariantes (en el sentido que le atribuye Bondi H. en la nota a pie de página n.º 15) las leyes del Electromagnetismo (o de otro modo el Postulado 2 de constancia de la velocidad de la luz). Estas transformaciones recibirán el nombre de Transformaciones de Lorentz y su formulación es la que sigue para el caso sencillo de Sistemas de Referencia que se mueven paralelamente según el eje X y cuyos orígenes coincide en los instantes $t = t' = 0$:



El resto del artículo lo dedica a extraer consecuencias físicas tanto para la cinemática (contracción aparente de cuerpos en movimiento inercial al ser medidos por un observador en otro sistema inercial, dilatación temporal) como para la electrodinámica (encontrando aquí la clave de las aparentes asimetrías con las que había dado comienzo a su artículo) y la mecánica (cuyas leyes hay que



enmendar; aparece así una dependencia de la masa con la velocidad de la que parece inferirse la famosa ecuación $E = mc^2$ que sólo se hará explícita en un artículo posterior).

En 1916 Einstein publica en *Annalen der Physik* el artículo "*Los fundamentos de la teoría de la relatividad general*" donde da cima a sus trabajos sobre como incorporar la Gravitación (o los sistemas acelerados) al esquema conceptual explicitado en su teoría especial de la Relatividad. En fecha tan temprana como Noviembre de 1907 Einstein exclamará: " Estaba sentado en una silla de la oficina de patentes en Berna cuando, súbitamente, se me ocurrió la idea más feliz de mi vida: ¡si una persona cae libremente, no sentirá su propio peso!". Sobre esta idea Einstein articuló lo que suele denominarse Principio de Equivalencia y cuyo enunciado podemos expresar así: En un sistema de referencia de dimensiones reducidas que cae libremente en nuestro campo gravitatorio, las leyes de la física deben ser las mismas que para un sistema de referencia en un idealizado universo libre de gravitación (o en otras palabras: un sistema en caída gravitacional libre me permite eliminar la gravitación). La razón de esta especial propiedad reside en la igualdad entre la masa inercial y la masa gravitatoria y cuya expresión más obvia, pero no por ello menos enigmática, se manifiesta en la ley de caída de los cuerpos (discutida ya por Galileo en sus famosos Discorsi): todos los cuerpos caen en el vacío con idéntica aceleración. Así, pues, 1) toda aceleración simula la gravedad y 2) la gravedad puede desaparecer en un sistema de referencia acelerado convenientemente.

No resulta sencillo transmitir de modo intuitivo, visualizable, (no olvidemos la paulatina destrucción del confortable "cuadro clásico" que hemos ido llevando a cabo) esta geometrización de la mecánica y esta mecanización de la geometría que la Relatividad General comporta. La idea básica es que: 1) cualquier cuerpo moviéndose en un campo gravitatorio (por ejemplo el terrestre que supondremos uniforme por simplificar) ejecuta trayectorias que, por un lado son independientes de la masa del objeto móvil (cualquier objeto lanzado desde el mismo sitio con igual velocidad inicial describe idéntica trayectoria) y por otro, que cualquiera de las infinitas trayectorias que puedan imaginarse variando las condiciones iniciales poseerá la misma curvatura (curvatura que obviamente sí es dependiente de la intensidad del campo gravitatorio) en el espacio-tiempo, es decir, 2) el movimiento de cualquier masa se verá guiado a lo largo de geodésicas, en todos los casos por igual, por la geometría (la curvatura) de ese espacio-tiempo de un modo que sólo pálidamente refleja la analogía del movimiento de un objeto constreñido a desplazarse sobre los círculos máximos de la superficie de una esfera.

La búsqueda de Einstein a lo largo de ese período que va desde 1907 a 1916 se dirige a la obtención de las ecuaciones que reflejen cómo la materia (en su



sentido relativista de masa-energía) distorsiona ("arruga") el espacio-tiempo. Expresado en un lenguaje más técnico diríamos que las ecuaciones de campo de Einstein escritas, de modo definitivo en ese artículo de 1916, no hacen más que relacionar el tensor curvatura y el tensor energía-impulso colocando entre ellos un signo de igualdad: ¡la materia crea la curvatura, la curvatura hace mover a la materia!. La materia dicta al espacio-tiempo cómo debe curvarse, el espacio dicta a la materia cómo debe moverse.

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = -\frac{8\pi}{c^2}GT_{\mu\nu}$$

Es evidente que con el breve resumen anterior no hemos pretendido agotar las implicaciones que para nuestra reflexión tiene esta teoría. En todo caso sólo hemos destapado ligeramente el velo de la Teoría de la Relatividad Einsteiniana a fin de entrever algunas de las consecuencias destructoras, que, para nuestras clásicas nociones de espacio, tiempo, materia y movimiento, comporta.

a.2 Consecuencias filosóficas

Probablemente una de las consecuencias más profundas de esa teoría haya que buscarla en la negación del espacio absoluto sin movimiento de Newton.

La física clásica consideraba toda la historia del mundo físico como una sucesión continua de configuraciones materiales instantáneas. Cada una de estas configuraciones representa "un estado del mundo en un instante dado", siendo cada una de estas configuraciones una "sección transversal instantánea" del proceso universal espaciotemporal. Puede hablarse del estado presente del Universo en cada instante porque el concepto de simultaneidad es absoluto.

Hay que hacer la necesaria consideración de que el descubrimiento de la finitud de la velocidad de la luz cambió la noción de "ahora visto, ahora existente", pero ello no modificó la noción fundamental de que para la física clásica *"hay sucesos reales, no sólo en la luna y en la estrella polar, sino también en todos los cuerpos celestes, que son verdadera y objetivamente simultáneos con nuestra percepción presente del cielo"*. Tal noción no puede mantenerse después de la abolición de la simultaneidad para sucesos separados espacialmente. Las "secciones transversales instantáneas" son diferentes para los diferentes sistemas inerciales, el "ahora" inferido por mí es diferente para otros observadores que se muevan: no existe un instante cósmico universal y por tanto no puede definirse ningún "estado presente" absoluto para el universo, no hay un espacio universal en el que se hallen localizados todos los "sucesos verdaderamente simultáneos". El espacio-tiempo de la relatividad no es ya posible



concebirlo como una sucesión continua de espacios instantáneos, de hecho, como señala Capek, *"estos espacios instantáneos no existen literalmente; o, expresado en lenguaje menos provocativo, se hallan contenidos en el continuum espaciotemporal dinámico, del que son tallados únicamente por medio de operaciones artificiales"*. Las palabras de Hermann Minkowski en 1908, a las que Einstein no concedió, en principio, demasiada atención resultarían proféticas: *"Los puntos de vista sobre el espacio y el tiempo que deseo presentar ante ustedes, brotaron del seno de la física experimental, y de ahí proviene su solidez. Son radicales. Desde ahora el espacio en sí y el tiempo en sí están condenados a las sombras y sólo una especie de unión de los dos mantendrá una realidad independiente"*.

¿Cuál es el significado de esta fusión relativista de espacio y tiempo que anuncia Minkowski pero que ya se halla implícita en las transformaciones de Lorentz?

A veces esta fusión es entendida como una "espacialización del tiempo" probablemente como consecuencia de las representaciones geométricas (espaciales) que el propio Minkowski introdujo en el artículo al que hemos hecho referencia con anterioridad. Hablar de un Universo de cuatro dimensiones y representar el eje temporal como un eje geométrico adicional induce al equívoco de considerar que en ese eje los sucesos "pasados", "presentes" y "futuros" se hallan yuxtapuestos (propiedad esencial del espacio) en lugar de aparecer en sucesión¹⁶.

Es cierto que la simultaneidad y la sucesión aparecen cuestionadas en la teoría de la relatividad y que en esa línea podríamos aventurar que el tiempo y la sucesión pierden sus status objetivo, pero, si se profundiza algo más en lo que realmente afirma la teoría de la relatividad, resulta no ser cierto que la simultaneidad y la sucesión de sucesos sean pura e ilimitadamente relativas.

Puede verse con facilidad que a) la simultaneidad y la sucesión de sucesos que se producen en el mismo lugar siguen manteniéndose para cualquier observador concebible, b) lo que sí es plenamente relativo es la simultaneidad de sucesos espacialmente separados o, expresado de otro modo, la yuxtaposición es relativa y c) la sucesión de sucesos distantes no es relativa si esos sucesos están

¹⁶ Con Minkowski, el espacio y el tiempo se convierten en aspectos particulares de un concepto individual de cuatro dimensiones: se pierde la distinción entre ellos como modos separados de correlacionar los fenómenos, y el movimiento de un punto en el tiempo se representa mediante una curva estacionario en un espacio de cuatro dimensiones. Ahora bien, si todos los fenómenos de movimiento son considerados desde este punto de vista, se hacen fenómenos intemporales en el espacio de cuatro dimensiones. Toda la historia de un sistema físico queda planteada como un todo invariable. Cunningham, *The Principle of Relativity*



conectados causalmente, sí lo es si tal conexión causal no puede establecerse porque su separación espacial es mayor que el producto de la velocidad de la luz por el intervalo temporal.

Concluiríamos del análisis precedente que *"aunque no hay yuxtaposición de sucesos que sea yuxtaposición para todos los observadores (espacialidad absoluta), hay ciertos tipos de sucesión que lo siguen siendo en todos los sistemas de referencia y a ellos hay que atribuirles una auténtica y objetiva realidad independiente de la elección convencional del sistema de referencia (temporalidad absoluta)"*. La noción de espacio (en el sentido clásico del término) se ve así más seriamente cuestionada que la noción de tiempo de tal modo que, parafraseando a Whitehead, *"las relaciones espaciales deben extenderse a través del tiempo", pues "lo que llamamos distancia ya no es la relación entre "aquí-ahora" y "allí-ahora" sino entre "aquí-ahora" y "allí-entonces"*.

Este cuestionamiento de las nociones, no sólo espaciales y temporales sino también las que se refieren a la materia, del universo clásico se hace aún más radical en la Teoría General de la Relatividad cuando recordamos que entre las propiedades del espacio clásico se encontraba la de ser "receptáculo de la materia e independiente de ella y de sus cambios" y que en esta nueva concepción, como ya indicamos en el epígrafe anterior, *"la materia y la curvatura local del espacio son una sola e idéntica realidad"*. La distinción e independencia entre espacio, tiempo y distribución cambiante de materia se ve negada y todas estas entidades aparecen, en la Relatividad General, fusionados en una realidad dinámica nueva: el continuum no euclidiano con curvatura espacio-temporal que varía de un punto a otro.

¿Qué sentido tiene ya hablar de masa, de corpúsculos, cuando esta masa ha perdido su persistencia y ya no es posible mantener su conservación al aparecer disuelta en una nueva entidad de la que forma parte su contenido energético? ¿Y qué decir de este concepto cuando ya ni siquiera podemos hablar de la masa como separada del espacio en la que se mueve sino, utilizando la expresión de Emile Meyerson, como *"reabsorbida en el espacio (espacio-tiempo)"*?

Al mismo tiempo, poco queda ya del concepto clásico del movimiento en el que se hacía uso tanto del *"sujeto invariable de movimiento como del recipiente invariable del mismo"*. Ni uno sólo de los conceptos que apoyaban esa noción clásica queda en pie (entidades corpusculares sustanciales, espacio en el que se despliega el movimiento, tiempo como receptáculo de los cambios, continuidad espaciotemporal que se deduce de la homogeneidad de ambos, relación externa entre movimiento y materia)

Los atributos básicos del modelo pictórico clásico han quedado difuminados y no han resistido la radical crítica de las teorías especial y general de la Relatividad. El asalto cuántico aún hizo más profunda esa destrucción.



B) La física cuántica

b.1. La historia inmediata del Principio de Indeterminación

El Principio de Indeterminación aparece como pieza central en muchas exposiciones en las que se habla de la quiebra del modo clásico de ver el mundo o del fin de la ilusión de Laplace.

En lo que sigue vamos a trazar su historia inmediata intentando encontrar por un lado las razones por las que ocupa esa posición de privilegio en el cuerpo teórico de la Mecánica Cuántica y, por otro, aclarar algunos de los malentendidos que a su alrededor se han producido.

Resulta necesario presentar una cronología, inevitablemente incompleta, de los "momentos" más relevantes que precedieron a la publicación del artículo de Heisenberg *"On the perceptual content of quantum theoretical kinematics and mechanics"* en el que se expone por primera vez ese Principio que lleva su nombre.

En septiembre de 1925 el mismo Heisenberg publica en el *Zeitschrift für Physik* un artículo con el título *"On a quantum-theoretical reinterpretation of kinematic and mechanical relations"* cuyo objetivo ambicioso era *"establecer una base para la mecánica cuántica teórica, fundada exclusivamente sobre relaciones entre magnitudes que son, en principio, observables"*. Se apostaba, de un modo decidido, por una estrategia de aproximación a la ciencia de lo microfísico guiada por el mismo método que había usado Einstein en su teoría de la Relatividad.

En ese mismo mes, Born (con el que Heisenberg trabajaba) y Jordan envían, a la misma revista, su artículo *"On Quantum Mechanics"* en el que desarrollan de modo sistemático la teoría expuesta por Heisenberg, haciendo uso de la formulación matricial.

En noviembre del mismo año se recibe en la sede de los Proceedings de la Royal Society el trabajo de Dirac *"The fundamental equations of Quantum Mechanics"* y ese mismo mes, Born, Heisenberg y Jordan, completan y extienden el formalismo matricial a sistemas microfísicos más complejos, en el artículo *"On Quantum Mechanics II"* de la *Zeitschrift für Physik*.

En marzo de 1926 Heisenberg y Jordan publican *"The application of Quantum Mechanics to the problem of the anomalous Zeeman effect"* en el que hacen uso de la hipótesis del spin del electrón. La Mecánica Cuántica había encontrado una formulación potente mediante el que podían abordarse de modo sistemático los fenómenos atómicos.

Justamente entonces aparece el primero, de una serie de cuatro artículos escritos por Schrödinger, en el que bajo el título *"Quantization as an eigen value*



problem" se aborda la obtención de un formalismo para la Mecánica Cuántica desde una perspectiva radicalmente distinta de la de los constructores de la Mecánica de Matrices. Como el mismo autor se encargaba de enfatizar *"mientras (ellos) acentúan la existencia de saltos cuánticos, la pérdida de visualización de los movimientos atómicos, el positivismo, etc., yo intento justamente lo contrario: una transición desde la mecánica clásica puntual hacia una teoría continua. El futuro desarrollo de la física cuántica se vería así mejor servida, práctica e intelectualmente, por la adherencia a una mecánica ondulatoria casi visualizable en vez de hacerlo por la sujeción a una teoría sobre la dinámica atómica en la que se suprime la intuición y se opera sólo con conceptos abstractos tales como probabilidades de transición, niveles de energía, etc."*. Las resonancias del "modo clásico" de ver el mundo son obvias y el rechazo de la posición positivista en ciencia también¹⁷. Las ondas de materia reemplazan a los problemáticos electrones (bolas de materia discreta) y los modos de vibración armónicos de las ondas de materia hacen lo mismo con los extraños estados estacionarios de la teoría atómica de Bohr. Las transiciones continuas entre modos de vibración sustituirían finalmente a los saltos cuánticos discontinuos entre estados estacionarios de la mecánica matricial.

En Mayo de 1926 un Schrödinger en plena euforia creativa publica una prueba en la que se muestra la equivalencia matemática de su formalismo ondulatorio y el matricial de la escuela de Gotinga-Copenhague. A partir de ese momento las diferencias se centran en las interpretaciones físicas que subyacían en ambas formulaciones y que, en última instancia, aunque fuera de un modo no excesivamente articulado, las habían inspirado. Esta controversia constituye el sustrato de lo que luego acabará plasmándose en la interpretación canónica de Copenhague y en la contestación de los heterodoxos.

El desafío de Schrödinger recibe el aplauso de la comunidad de físicos, incómodos con la radical aproximación de Bohr y su escuela¹⁸, e impulsa a estos últimos a elucidar de un modo definitivo la situación interpretativa de la Mecánica Cuántica. Heiseberg decide, pese a otras ofertas, ir a Copenhague para trabajar con Bohr.

¹⁷ El principio-guía de la formulación de Schrödinger hay que buscarlo en las ideas sobre ondas de materia expuestas por de Broglie. Si las ondas electromagnéticas se comportan como partículas, por simetría parece lógico pensar que las partículas deben comportarse bajo ciertas condiciones como ondas de materia. Y si ello es así, pensó Schrödinger, debe existir una "ecuación de ondas" que represente la evolución o propagación de estas ondas de materia expresables por medio de una función de ondas.

¹⁸ "Ahora que Schrödinger ha probado de una vez por todas lo absurdo de los saltos cuánticos y ha puesto punto final a teorías basadas en esas nociones, sólo será cuestión de tiempo resolver los restantes problemas por medio de la Mecánica Ondulatoria" Wilhelm Wien



A finales de Julio de 1926 se produce en Munich el "encuentro" entre Heisenberg y Schrödinger con motivo de una conferencia en la que éste expuso su teoría ondulatoria. Allí Heisenberg manifiesta sus objeciones a la nueva teoría que, a su juicio, *"no puede explicar fenómenos cuánticos básicos como la fórmula de radiación de Plank, el efecto Compton, etc.,"*; fenómenos todos ellos en los que parece requerirse la discontinuidad y los saltos.

En Septiembre de este año Schrödinger es invitado al Instituto Bohr y allí se confrontan las dos interpretaciones en un debate que no acercó posiciones y que forzó a Bohr y Heisenberg a plantearse como tarea ineludible *"clarificar la relación entre la mecánica cuántica y los datos de la experiencia"*. De esta tarea de clarificación, —en la que jugó un papel importante la interpretación probabilista de la función de ondas introducida por Born en Julio de 1926—, surgirá tanto el Principio de Indeterminación como el Principio de Complementariedad. Todos estos elementos acabarían configurando la llamada "interpretación de Copenhague".

Heisenberg y Bohr se plantearon clarificar la relación entre los datos de la experiencia y la mecánica cuántica. Relación que se había convertido en problemática en términos que podrían hacerse explícitos acudiendo a un ejemplo: la traza de un electrón podía observarse en una cámara de niebla y su explicación en una u otra versión de la Mecánica Cuántica presentaba dificultades ya que, por un lado, en su formulación matricial negaba el concepto de órbita o camino y por otro, en la formulación ondulatoria, cualquier "paquete de ondas" que representara la partícula sufriría una dispersión al evolucionar, incompatible con las dimensiones de la traza observada.

Heisenberg, en Febrero de 1927, se vio forzado a un replanteamiento del problema que contemplara, por un lado, el hecho de que el formalismo de la Mecánica Cuántica era demasiado exitoso como para prescindir de él, y por otro, el que las observaciones de "la trayectoria" eran incontestables. ¿Cómo conciliar estos extremos?. En sus reminiscencias de aquellos años Heisenberg menciona que una y otra vez acudió a su mente una frase que Einstein había intercalado en uno de sus encuentros: *"Es la teoría la que decide lo que podemos observar"*. Guiado por ella y por su convicción de que un análisis operacional (también a "lo Einstein") de los conceptos de posición y velocidad, o más exactamente su reinterpretación, jugarían en la mecánica de los micro-objetos el mismo papel que el análisis de la simultaneidad había jugado en la mecánica de los fenómenos de alta velocidad¹⁹, Heisenberg encaró el problema en los siguientes términos: 1) ¿Incluye el formalismo el hecho de que la posición de una partícula y su

¹⁹ "Well, is it not so that I can only find in nature situations which can be described by quantum mechanics"... "Then I asked, What are those situations which you can define?... Then I found very soon



velocidad son determinables en un instante dado sólo con un grado de precisión limitado? y 2) ¿sería tal imprecisión, si la teoría la admite, compatible con la precisión óptima obtenible por medidas experimentales?.

El Principio de Indeterminación tuvo sus orígenes en la teoría de transformaciones de Jordan-Dirac que Heisenberg utilizó para responder a la primera de las preguntas planteadas anteriormente obteniendo, a partir de ella, las famosas relaciones:

$$(\delta x).(\delta p) \geq \frac{h}{2\pi}$$

De hecho alguno de los aspectos cualitativos de esta relación de indeterminación habían sido anunciados por los autores de esta teoría²⁰, quienes sabían de la imposibilidad de asignar valores precisos a p y q. La tarea fundamental de Heisenberg fue el determinar el alcance de esta imposibilidad, cuantificándola.

Para dar respuesta a la segunda cuestión, Heisenberg analizó lo que desde entonces ha pasado a denominarse el "experimento del microscopio de rayos gamma" (Ver "*The physical Principles of the Quantum Theory*". W. Heisenberg. Dover, págs. 21 y sig.). En este experimento se plantea el definir operacionalmente (en línea con su concepción de la física a "lo Einstein") el concepto de "posición" y, a pesar de un error (posteriormente corregido a instancias de Bohr y al hilo de su famosa controversia), concluye con un resultado que corrobora la relación teórica obtenida anteriormente.

Es éste el momento en que la polémica entre Bohr y Heisenberg adquiere su mayor crudeza. Bohr intenta persuadirlo para que no publique el artículo en la forma en que lo ha escrito porque, a su juicio, pone el énfasis no en lo sustancial, sino en lo accesorio. Bohr no discute la validez de las relaciones de indeterminación sino el soporte conceptual e interpretativo que le da Heisenberg.

Para Heisenberg la indeterminación aparece como una limitación de la aplicabilidad de las nociones clásicas de posición o momento a los fenómenos microfísicos, para Bohr estas relaciones son una indicación, no de la inaplicabilidad de uno u otro lenguaje (de la física de partículas o de la física ondulatoria), sino más bien de la imposibilidad de usar ambos modos de expresión simultá-

that these are situations in which there was this Uncertainty Relation between p and q. Then I tried to say Well, let us assume there is only this possibility of having $p \cdot q > h/2$. Does this make a consistent statement? Can I then prove that my experiments never give anything different?."

²⁰ " No se puede responder a ninguna cuestión en mecánica cuántica que se refiera a valores numéricos para q y para p al mismo tiempo" Dirac.

"Para un valor dado de q, todos los valores de p son posibles" Jordan.



neamente a pesar de que sólo su uso combinado nos dé una descripción completa del fenómeno físico.

Mientras que para el primero la razón de la indeterminación está en la discontinuidad, expresada en términos del lenguaje corpuscular u ondulatorio, para el segundo la razón hay que buscarla en la dualidad onda-corpúsculo (núcleo de lo que más tarde articulará como Principio de Complementariedad).

b.2 Consecuencias filosóficas

El mismo Heisenberg se encargó de explicitar en su artículo y en publicaciones posteriores algunas de las profundas consecuencias que tanto para la física, entendida como ciencia de lo real como para la indagación humana, tenían, su Principio de Indeterminación y las nociones de Complementariedad desarrolladas por Bohr.

En primer lugar afirmó que el formalismo de Jordan y Dirac sobre la Mecánica Cuántica –en el que había apoyado su demostración– era completo y acabado. Las relaciones de indeterminación eran pues irrefutables desde la perspectiva teórica.

En segundo lugar, y como consecuencia de la completitud del formalismo y de su irrefutable interpretación en términos de la indeterminación, todos los experimentos realizados y por realizar no alterarían nunca la validez de la Mecánica Cuántica ni podrían sobrepasar los límites de precisión impuestos por las relaciones de indeterminación.

Heisenberg, consciente de las implicaciones de sus relaciones de indeterminación, no dudaba extraer las siguientes conclusiones: *"... en la formulación fuerte de la causalidad " Si conocemos el presente con exactitud, podemos predecir el futuro", no es la conclusión sino la premisa la que es falsa. No podemos conocer, como cuestión de principio, el presente en todos sus detalles"*.

Estas implicaciones, matizadas e incluso en ocasiones reformuladas por Bohr, se convirtieron en el sello interpretativo de lo que se conoce como interpretación de Copenhague.

El tercer pilar de esta interpretación-, que acabaría convirtiéndose en canon después del V Congreso Solvay de 1927 sobre "Electrones y fotones" en el que Bohr y Einstein hicieron explícita sus discrepancias sobre la completitud de la descripción cuántica y, más en profundidad, sobre la esencia de la Ciencia y la objetividad del mundo²¹ –era el Principio de Complementariedad y a él vamos a dedicar algunos comentarios.

²¹ "...The classical world view, so passionately espoused by Einstein, accords well with common sense by asserting the objective reality of the external world. It recognizes that our observations



La aguda controversia con Heisenberg sobre como interpretar las relaciones de indeterminación acabó impulsando a Bohr a poner en claro lo que había sido objeto de profundas reflexiones durante el período que se extiende desde Julio de 1925 hasta septiembre de 1927. En esta fecha y con motivo de una reunión en memoria de Volta celebrada en Como, plantea la necesidad de desarrollar un concepto de largo alcance, el principio de complementariedad, con el que pueda interpretarse de un modo acabado y coherente la nueva teoría cuántica. Estas son sus palabras: *"La misma naturaleza de la teoría cuántica nos fuerza a considerar la coordinación espacio-temporal y la expresión de la causalidad, cuya unión caracteriza a la teoría clásica, como características complementarias pero excluyentes de la descripción, simbolizando, respectivamente, la idealización de la observación y la definición.*

Este principio reconoce como inherente a los sistemas cuánticos la ambigüedad esencial de que el mismo sistema pueda mostrar propiedades aparentemente contradictorias. Un electrón, como claramente muestra el experimento de la doble rendija desarrollado en el Capítulo 1 del Volumen 3 *"Lectures on Physics"* de Richard P. Feynmann, puede por ejemplo comportarse como onda y como partícula y para Bohr ello sólo indica que estas manifestaciones son facetas complementarias, (¡no contradictorias!) de una única realidad: un experimento nos puede revelar la naturaleza ondulatoria del electrón y otro la corpuscular, pero, ambas no pueden manifestarse a la vez; la elección del experimento a realizar determina cual de las dos naturaleza va a mostrarse. De modo similar, la posición y el momento son complementarios, aunque en un sentido

inevitably intrude into and disturb that world but that this disturbance is merely incidental and can be made arbitrarily small. In particular, the microworld of atoms and particles is considered to differ on scale, but not in ontological status, from the macroworld experience. Thus an electron is a scale-down version of an idealized billiard ball, sharing with the latter a complete set of dynamical attributes, such as being somewhere (i.e. having position), moving in a certain way (i.e. having momentum) and so on. In a classical world our observations do not create reality: they uncover it. Thus atoms and particles continue to exist with well defined attributes when we do not observe them.

By contrast, the Copenhagen interpretation of Q. M. rejects the objective reality of the quantum microworld. It denies that, say, an electron has a well-defined position and a well-defined momentum in the absence of an actual observation of either its position or its momentum (and both cannot yield sharp values simultaneously). Thus an electron or an atom cannot be regarded as a little thing in the same sense that a billiard ball is a thing. One cannot meaningfully talk about what an electron is doing between observations, because it is the observation alone that create the reality of the electron. Thus a measurement of an electron position creates an electron-with-a-position; a measurement of its momentum creates an electron-with-a-momentum. But neither entity can be considered already to be in existence prior to the measurement being made. What, then, is an electron, according to this point of view?. It is not so much a physical thing as an abstract encodement of a set of potentialities or possible outcomes of measurements. It is a shorthand way of referring to a mean of connecting observations via the quantum mechanical formalism. But the reality is in the observations, not in the electrons.



más restringido²², y es el experimentador quien, otra vez, decide cuál de ellos va a observar. Bohr hace residir la complementariedad y la esencia de la Física Cuántica en la dualidad onda/corpusculo y por ello es por lo que polemiza con tanta vehemencia con Heisenberg, quien pone el énfasis interpretativo del Principio de Indeterminación en la "atomicidad de la acción". Bohr no admite que la balanza se incline hacia uno de los aspectos, sustancial eso sí pero incompleto, de la teoría cuántica. Lo novedoso de la formulación de Bohr radica, como expresó Holton, en que a diferencia de lo que había ocurrido hasta entonces en el desarrollo de la ciencia cuando se enfrentaban visiones contrapuestas (conflicto entre "themata") –intento de englobar uno de los "themata" en el otro (al modo en que él mismo había procedido cuando enunció el Principio de Correspondencia)–, Bohr pedía ahora a los físicos que aceptasen tanto una visión como otra, aunque no se considerase a ambas centro de atención al mismo tiempo. No se trataba pues de transformar un thema y otro en una nueva entidad. Lo que sucede más bien es que ambos (continuidad/discontinuidad, onda/partícula) existen en la forma ó uno ú otro dependiendo de la elección de las preguntas teóricas o experimentales que decidamos hacer . Bohr encontraba una verdad básica en la existencia de una paradoja que todos los demás estaban tratando de eliminar."

Sobre las posiciones filosóficas en torno a la ciencia.

A lo largo de la historia de la ciencia, unas veces de modo conscientemente asumido y otras de forma tácita, la mayor parte de los físicos admiten que su disciplina trata del mundo real, del mundo de los objetos, de los cambios. El concepto de lo real es, sin embargo, problemático; está construido a partir de nuestra experiencia inmediata, por un proceso de depuración que no puede, no obstante, desligarse total y radicalmente de sus orígenes. De ahí precisamente nacen muchas de las dificultades que encontramos cuando el objeto de nuestra indagación se aleja de esa región del mesocosmos para la que estamos biológicamente adaptados y de la que hemos entresacado "los conceptos familiares (objeto, posición, instante, etc.) que erigimos en elementos de realidad". De ahí las dificulta-

²² La posición y el momento no son nociones mutuamente excluyentes, puesto que se necesitan ambas para especificar el estado de un sistema, y ambas se pueden medir en un mismo experimento. Pero son complementarias en el sentido restringido de que no se pueden determinar ambas simultáneamente con la precisión que deseamos; es decir, cuanto más precisión consigamos en una medición, menos podremos conseguir en la otra. En contraposición, los aspectos ondulatorios y de partícula que tiene la materia son complementarios y mutuamente excluyentes: una entidad atómica no puede exhibir simultáneamente sus propiedades de partícula y onda. Es ésta la razón por la que se afirma, con frecuencia, que la complementariedad trasciende el principio de indeterminación de Heisenberg.



des interpretativas que surgen en la mecánica de lo muy rápido y de lo muy pequeño y muy grande.

No es extraño que justamente al hilo de la reflexión sobre la teoría de la relatividad y la mecánica cuántica y de las "extrañas y paradójicas" consecuencias que de ambas parecen inferirse, se hayan enfrentado, de un modo radical a veces, dos corrientes de pensamiento que simplifícamamente calificaremos usando la terminología de Bernard d'Espagnat como materialista (o realista) y positivista (o filosofía de la experiencia).

Según la primera de estas concepciones es sensato y justo afirmar que existe una realidad y que es independiente del espíritu humano. Éste puede progresar en la dirección de un conocimiento cada vez mejor de dicha realidad. La consecución de ese conocimiento es precisamente el fin de la ciencia. No puede negarse que esta corriente filosófica hunde sus raíces en la tradición de la física clásica y se ve seriamente contestada por los espectaculares éxitos alcanzados por la posición positivista en el ámbito de la física moderna.

Para la filosofía de la experiencia, o por lo menos para algunos de sus representantes, no es que se afirme la inexistencia de una realidad independiente, sino que de modo más sutil se relega esta noción a un segundo plano afirmándose el hecho evidente de que lo que nosotros podemos conocer es sólomente el conjunto de nuestras observaciones y nuestros actos. Nos pone pues en guardia contra la idea de aparente sentido común consistente en "atribuir nuestras percepciones a una causa y concebir por ello una realidad independiente que desempeña este papel causal". Esta advertencia ha mostrado su fecundidad a lo largo de la historia de la ciencia deshaciendo una y otra vez las nociones de realidad pretendidamente alcanzadas por la ciencia²³. La finalidad de ésta no sería pues el conocimiento de una realidad subyacente a la que no tenemos acceso, sino que, por el contrario, consistiría exclusivamente en hacer una síntesis de las observaciones y proporcionar reglas (matemáticas) que, a partir de las observaciones pasadas, permitan ciertas predicciones en cuanto a los resultados de las experiencias futuras.

Resulta, sin embargo, difícil pensar que la infalibilidad de una receta no tenga una razón de ser, que, (y aquí aparece otra vez ese temido salto desde la apariencia a la esencia²⁴), no sería otra que la existencia de una realidad independiente,

²³ La filosofía de la experiencia encontró apoyo en la crítica efectuada por Einstein a la noción de simultaneidad de sucesos espacialmente separados y al énfasis prestado a la definición operacional de nociones hasta entonces no problemáticas. Mayor apoyo encontró aun en la interpretación ortodoxa de la Mecánica Cuántica.

²⁴ Si apariencia y esencia fueran la misma cosa, no habría necesidad de ciencia (ni de filosofía).



estructurada, cuyas estructuras tendrían además como consecuencia justamente el que la receta deba salir bien, la regularidad. En la visión realista el principal interés que presenta el descubrimiento de una receta que funciona reside en el hecho de que nos da luz sobre las estructuras ocultas de la realidad independiente.

Quisiéramos acabar nuestra exposición con una larga cita de Alastair Rae en su libro *Física cuántica ¿Ilusión o realidad?* que refleja con nitidez la posición adoptada por muchos físicos ante los desafíos planteados por la radicalidad de algunos de los presupuestos de esta extraña teoría: *"Como muchas personas formadas en (o quizás deformadas por) la tradición de Copenhague, yo digo "Sí, es una ilusión. La partícula no tiene posición,- no es realmente una partícula-, si no se diseña un experimento para hacer una medida de esta propiedad". No obstante, soy muy consciente de que esta clase de ideas no surgen fácil y naturalmente sino que parecen ser una consecuencia forzada por el desarrollo de la física cuántica. Algunos investigadores del XIX argumentaban, desde una posición positivista, que la idea de átomo como constituyente de la materia era un postulado que carecía de significado porque no podía ser sometido a prueba directa; sin embargo, todos nosotros aceptamos hoy en día la realidad de la existencia de los átomos como un hecho objetivo directamente verificable. ¿No podría ser que la interpretación de Copenhague nos esté forzando equivocadamente a calificar de ilusiones cantidades que son por completo reales y que serán observadas cuando nuestro conocimiento y tecnología progresen lo suficiente? Pensamientos como éstos son los que harían que la idea de las variables ocultas pareciese plausible y atractiva, ¿si no fuese porque ninguna teoría de variables ocultas (que preserve la localidad) es capaz de predecir los resultados de los experimentos de correlación de pares de fotones (Aspect)! (recuérdese la discusión planteada por el Profesor Sánchez Gómez en su ponencia)... El que esto no haya sucedido (el desarrollo de una teoría de variables ocultas sobre la base de un modelo simple del mundo microscópico) es la razón por la cual yo, junto con muchos otros físicos, he tenido que aceptar las ideas de Copenhague. No porque nos gustasen en particular, sino porque es el único modo de describir de cerca el comportamiento del mundo físico. Como señaló Bohr, muchas veces es la naturaleza misma y no nuestra naturaleza la que nos obliga a adoptar esta nueva y en cierta medida poco confortable manera de pensar".*

BIBLIOGRAFÍA



Sobre la época

Número monográfico de la Revista "DEBATS" dedicado a "Berlín 1905 - 1933" Diciembre 1987.

Cultura en Weimar, causalidad y teoría cuántica, 1918-1927, Alianza, Madrid

Sobre los personajes

Uncertainty The life and science of Werner Heisemberg, David C. Cassidy, Freeman, N. York

El señor es sutil... La ciencia y la vida de Albert Einstein Ariel, Barcelona

Encuentros y conversaciones con Einstein, W. Heisemberg, Alianza, Madrid

Ciencia y conciencia en la era atómica, Max y Hedwig Born, Alianza, Madrid

Sobre Relatividad

The principle of relativity, Einstein, Lorentz..., Dover, N. York

Sobre la teoría de la relatividad especial y general, Einstein, Alianza, Madrid

El origen y desarrollo de la relatividad, J.M. Sánchez Ron, Alianza, Madrid

Relatividad Especial, A.P. French, Reverté, Barcelona

Special theory of relativity, D. Bohm, W.A. Benjamin Inc., N. York

Sobre Física Cuántica



La teoría atómica y la descripción de la naturaleza, N.Bohr, Alianza, Madrid

Sources of Quantum Mechanics, Edited by B.L. van der Waerden Dover, N. York

The physical principles of the Quantum Theory, W. Heisenberg, Dover, N. York

The conceptual development of Quantum Mechanics, Max Jammer, McGraw-Hill, N. York

Physics and philosophy, W. Heisenberg, Penguin Books, London

Continuidad y discontinuidad en física moderna, L. de Broglie, Espasa Calpe, Madrid

Sobre Filosofía de la Física

El impacto filosófico de la física contemporánea, Milic Capek, Tecnos, Madrid

Filosofía de la física, Lawrence Sklar, Alianza, Madrid

En busca de lo real. La visión de un físico, Bernard d'Espagnat, Alianza, Madrid

The philosophy of space and time, Hans Reichenbach, Dover, N. York

The philosophy of Quantum Mechanics, Max Jammer, John Wiley, N. York

CRONOLOGÍA



- 1687 Newton publica sus Principia en los que formula sus conceptos de espacio y tiempo absolutos, así como las leyes del movimiento y la gravitación.
- 1815 Prout afirma que los pesos de los átomos son múltiplos del peso del Hidrógeno.
- 1833 Leyes de Faraday para la electrólisis.
- 1853 Primeras observaciones del espectro del átomo de Hidrógeno.
- 1859 Primeras medidas de frecuencia de líneas espectrales.
Kirchoff afirma que existen trazas de sodio en el sol y obtiene su ley de radiación del cuerpo negro.
- 1864 Maxwell formula las leyes unificadas del Electromagnetismo.
- 1869 Primera versión de la tabla periódica de Mendeléev.
- 1874 Primera estimación de la carga fundamental e
- 1875 Maxwell afirma que los átomos tienen estructura y no son rígidos.
- 1876 Se acuña el término "rayos catódicos"
- 1881 J.J. Thomson introduce la masa electromagnética.
- 1885 Fórmula de Balmer para el espectro del Hidrógeno.
- 1887 Experimento de Michelson y Morley
- 1892 Detección de la estructura fina de las rayas espectrales del Hidrógeno.
- 1895 Introducción de la fuerza de Lorentz.
C.T.R. Wilson comienza a desarrollar la cámara de niebla.
Roentgen descubre los rayos-X.
- 1896 Becquerel descubre la emisión radiactiva del Uranio.



- 1897 J. J. Thomson determina e/m para los rayos catódicos.
- 1898 Descubrimientos en radiactividad (Polonio, Radio)
La radiación emitida por los átomos radiactivos está compuesta de partículas α y β .
- 1899 J. J. Thomson mide e y completa su descubrimiento del electrón.
- 1900 Descubrimiento de los rayos γ
Plank introduce su hipótesis de cuantización.
- 1903 Un átomo de Hidrógeno contiene alrededor de mil electrones; modelo del "pudding de ciruelas".
- 1905 Einstein muestra que espacio y tiempo son relativos y formula las leyes físicas de la relatividad especial
Einstein muestra que las ondas electromagnéticas se comportan en ciertas circunstancias como partículas. Se inicia el concepto de dualidad onda/corpusculo.
- $$E = mc^2$$
- 1906 El número de electrones del átomo de hidrógeno no difiere mucho de uno.
Primeras experiencias de Rutherford con partículas
- 1907 Einstein inicia sus reflexiones sobre Relatividad General; formula el concepto de sistema inercial local, el principio de equivalencia y deduce la dilatación gravitacional del tiempo.
- 1908 Minkowsky unifica el espacio y el tiempo en un espacio-tiempo cuatridimensional absoluto.
- 1909 Observaciones de fuertes retrocesos en la colisión de partículas
- 1911 Modelo nuclear de Rutherford
1ª Conferencia Solvay
- 1912 Einstein se da cuenta que el espacio-tiempo es curvado y que los efectos de marea gravitacional (tidal gravity) son manifestación de esa curvatura.



- 1913 "Trilogía" de Bohr sobre la constitución de átomos y moléculas.
Modelo proton/electrón para el núcleo.
- 1915 Einstein y Hilbert formulan, de modo independiente, las ecuaciones de campo que describen como la masa curva el espacio-tiempo.
- 1916 Schwarzschild descubre soluciones de la ecuación de campo de Einstein que, más tarde, describirán agujeros negros no rotantes sin carga.
- 1916/17 Einstein introduce los coeficientes de emisión y absorción radiativa.
- 1916/18 Nuevas soluciones que describen agujeros negros cargados sin rotación.
- 1921 Existencia de fuerzas de gran intensidad en el núcleo.
Landé introduce números cuánticos semienteros.
- 1923 De Broglie introduce la dualidad onda/partícula para la materia.
- 1924 Teoría B.K.S para los procesos radiativos.
Introducción de la estadística de Bose para los fotones.
Einstein aplica la estadística de Bose a la materia y deduce que ésta debe exhibir propiedades ondulatorias.
- 1925 Principio de exclusión de Pauli.
Primera demostración experimental de la conservación energía-momento en procesos elementales individuales.
Primer artículo de Heisenberg sobre mecánica cuántica.
Artículo de Born-Jordan (Mecánica de Matrices)
Descubrimiento del spin.
Artículo de Born, Heisenberg y Jordan sobre Mecánica Cuántica.
- 1926 Derivación del espectro del Hidrógeno mediante la Mecánica de Matrices.
Primer artículo de Schrödinger sobre Mecánica Ondulatoria.
Equivalencia matemática entre las dos formulaciones.
Primer artículo de Born dando una interpretación probabilista de la función de ondas.
Fowler usa las leyes de la cuántica para mostrar como la "degeneración electrónica" explica el misterio de las enanas blancas.
- 1927 Relaciones de Indeterminación.



Primera detección de la difracción de electrones.
Bohr establece la noción de Complementariedad.

- 1928 La ecuación de Dirac
- 1930 Chandrasekhar descubre la existencia de una masa máxima para las enanas blancas
- 1931 Puesta en funcionamiento del primer ciclotrón.
Dirac propone la existencia del positrón.
Trazas de esta partícula en la cámara de niebla.
- 1932 Descubrimiento del neutrón
Primer proceso nuclear producido en un acelerador.
- 1934 De Broglie introduce el término "antipartícula".
- 1939 Fisión nuclear.
- 1942 Comienza el Proyecto Manhattan
- 1945 EE.UU. hace explotar bombas atómicas en Hiroshima y Nagasaki.

*** He hecho uso de los datos que aparecen en los libros *Inward bound (of matter and forces in the physical world)*, Oxford, de Abraham Pais y *Black holes and time warps*, Norton, de Kip S. Thorne.

SITUACIÓN SOCIAL POLÍTICA Y ECONÓMICA

- 1.- Proceso acelerado de industrialización en zonas nuevas: Estados Unidos, Europa Oriental y Japón.
- 2.- Cambios en el liderazgo industrial en Europa: Emerge Alemania y se inicia el declive Británico.
- 3.- Se produce una profunda revolución en el transporte y en las comunicaciones (navegación a vapor, telégrafo, teléfono y radio)
- 4.- Resurgimiento del Imperialismo Europeo: nuevas potencias coloniales, penetración europea en Asia, partición de África, ascenso de Japón.



5.- 1.ª Guerra Mundial

- 5.1. Crisis serbia. Ofensiva alemana. Guerra de trincheras (nueva tecnología militar: guerra aérea, tanques y guerra química).
- 5.2. Entrada en guerra de Italia, Turquía, Japón y otras naciones: campañas en los Balcanes y en Oriente Medio.
- 5.3. Guerra total y movilización general.
- 5.4. Guerra submarina y entrada de Estados Unidos en la Guerra.
- 5.5. Disolución de los imperios Austro-Húngaro, Ruso y Otomano.
- 5.6. Derrota alemana. Tratado de Versalles. Compensaciones de Guerra.
- 5.7. Revolución Rusa
- 5.8. República de Weimar

6.- Período de entreguerras

- 6.1. Dificultades para la consolidación de gobiernos democráticos en Europa.
- 6.2. Represión de los movimientos revolucionarios.
- 6.3. Establecimiento de la Liga de Naciones: aislamiento de Alemania y Rusia.
- 6.4. Auge del militarismo japonés. Toma de Manchuria. Conflictos civiles en China.
- 6.5. Auge de los fascismos. Marcha sobre Roma. Agresión italiana a Etiopía. Fracaso de la Liga de Naciones como mediadora.
- 6.6. La Gran Depresión.
- 6.7. Los nazis llegan al poder.
- 6.6. Frente Popular y Guerra Civil española

7.- La 2.ª Guerra Mundial

- 7.1. Invasión de Polonia y Francia. Pacto Germano-soviético. La Batalla de Inglaterra. Guerra en el Norte de África. La invasión de la URSS.
- 7.2. Nuevas agresiones japonesas en China. Choque de intereses entre Japón y Estados Unidos en el Pacífico. Ataque a Pearl Harbour. Entrada de EE.UU. en la guerra.
- 7.3. Colapso del frente oriental alemán. Desembarco aliado. Derrota de Alemania.
- 7.4. La derrota de Japón. Hiroshima y Nagasaki.
- 7.5. Reparto del mundo en zonas de influencia. Yalta y Postdan.

8.- Guerra fría.