

ANYS D'HERÈNCIA EINSTEINIANA

CONFERENCIAS

Ed: Pedro González Marhuenda

Gesetz von der Äquivalenz von Masse und Energie ($E = mc^2$)

In der relativistischen Physik gab es zwei voneinander unabhängige
bezw. Bilanzgesetze, die strenge Gültigkeit beanspruchten, nämlich

- Satz von der Erhaltung der Energie
- Satz von der Erhaltung der Masse.

Gesetz von der Erhaltung der Energie, welches schon ^{im 19. Jahrhundert} von Leibniz
vollständigen Allgemeinheit als gültig vorausgesetzt wurde, entwickelte

im 19. Jahrhundert wesentlich als eine Folge eines Satzes der Mechanik,

beschreibt ein Pendel, dessen Masse zwischen
den Punkten A und B hin und her schwingt,

in B) verschwindet die Geschwindigkeit
die Masse ^m hebt nun h höher als
den tiefsten Punkt C der Bahn. Im C



Hubhöhe verloren gegangen; dafür aber hat die Masse hier eine
Geschwindigkeit v . Es ist, wie wenn sich Hubhöhe in Geschwindigkeit
verlustlos verwandeln könnten. Die exakte Beziehung

$$mgh = \frac{m}{2} v^2,$$

CIENT AÑOS DE HERENCIA EINSTEINIANA

CONFERENCIAS



Exposición 100 años de herencia Einsteiniana. Universitat de Valencia 2005.

Cien Años de Herencia Einsteiniana. Conferencias.
Ed: Pedro González Marhuenda

Cátedra Divulgación de la Ciencia
Universitat de Valencia

Portada, diseño gráfico y maquetación: L3C

© De la edición: Cátedra Divulgación de la Ciencia, Universitat de Valencia
© De los textos: los autores
© De las imágenes: los autores

Imprenta:
ISBN:
DL:

Como resultado de la iniciativa de un renombrado conjunto de personalidades de la Física, la UNESCO declaró el año 2005 como "Año Mundial de la Física" para conmemorar el centenario de la publicación de los artículos de Einstein que supusieron una de las mayores revoluciones científicas de la historia, no sólo en el campo de la Física, sino en toda la Ciencia.

Como tantas otras instituciones de todo el mundo, también la Universitat de València, a través de la Facultat de Física, organizó actos conmemorativos en recuerdo de tan memorable acontecimiento. Como núcleo fundamental de las actividades que se llevaron a cabo, junto a una exposición sobre la vida y la obra de Einstein, figuraba un ciclo de conferencias titulado "Cien Años de Herencia Einsteniana." El libro que tienen en sus manos es una recopilación de las conferencias dictadas por excelentes investigadores que conocen profundamente la obra de Einstein y sus implicaciones en el pensamiento científico posterior.

El que el libro sea una recopilación no equivale a que se haya llevado a cabo una simple yuxtaposición de las conferencias, tal como fueron impartidas. El ciclo tuvo un hilo conductor bien establecido gracias al impecable trabajo desarrollado por el profesor Pedro González Marhuenda, que dedicó muchas horas a que el acontecimiento que celebrábamos tuviera la relevancia adecuada y respondiera a las expectativas que en él se habían depositado. No se trataba de establecer sólo un calendario para la impartición de las conferencias sino que se realizó un trabajo previo de preparación con cada conferenciante y -cómo no- un trabajo posterior para que, finalmente, todas las conferencias figuren en este libro en el lugar adecuado.

Escribo estas líneas a modo de presentación del libro porque, cuando tuvo lugar el ciclo de conferencias, organizado en estrecha colaboración con la Cátedra de Divulgación de la Ciencia de nuestra universidad, tenía el honor de ser el decano de la Facultat de Física. Como decano, no me cabe más que expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas que contribuyeron al éxito del ciclo.

Estoy convencido que el libro será acogido con interés por toda la comunidad científica por la innegable calidad de los autores y por la selección de los temas desarrollados en cada una de sus contribuciones. No me cabe la menor duda que este libro servirá y ayudará, sobre todo a las jóvenes generaciones aunque no sólo a ellas, a entender mejor la obra de Einstein y su trascendencia.

Carlos Ferreira García
Catedrático de Óptica

ÍNDICE

Introducción

Pedro González Marhuenda7

Del efecto fotoeléctrico a los láseres de attosegundos

L. Roso y Ramon Vilaseca14

Últimos avances en el movimiento browniano: orden a partir del desorden

R. Toral43

Einstein 1905-55; CERN 1955-2005: from atoms to quarks

F. Close65

Einstein: Zurich 1905

T. Glick75

Albert Einstein as the father of solid state physics

M. Cardona85

Einstein's dream and the challenges of 21st century physics

M. A. Vázquez115

Des intuitions d'Einstein à l'information quantique: les stupéfiantes propriétés de l'intrication

A. Aspect et Philippe Grangier137

Relativa mente excepcional.

O. Vilarroya153

INTRODUCCIÓN

Entre los meses de junio y noviembre del año 1905, Albert Einstein, un joven de 26 años, oficial de tercera clase en la Oficina Suiza de Patentes, en Berna, y prácticamente desconocido en el mundo científico, publicó en la revista alemana *Annalen der Physik* cuatro artículos de investigación en Física Teórica que marcaron el comienzo de una revolución conceptual que ha cambiado la imagen física de nuestro universo, tanto a nivel global como a nivel de sus constituyentes.

Para conmemorar el centenario de este *annus mirabilis* la UNESCO declaró el 2005 como “Año Mundial de la Física”. Con tal motivo se celebraron en todo el mundo actos institucionales, a la vez que seminarios, conferencias y exposiciones sobre la figura de Albert Einstein. La Facultad de Física de la Universidad de Valencia (UVEG), con la colaboración de la Cátedra de Divulgación de la Ciencia, se sumó a estas celebraciones programando un ciclo de conferencias y una exposición conmemorativa.

La exposición, titulada *Einstein: el hombre y la obra*, abierta al público entre los meses de abril y diciembre de 2005 en el vestíbulo de la Facultad de Farmacia del Campus de Burjassot de la UVEG, proponía, a través de veinte paneles expositivos, un recorrido por la biografía del personaje, haciendo énfasis en sus líneas de pensamiento, en el contenido científico de sus artículos de 1905 y en las repercusiones científicas y sociales derivadas de su obra.

El ciclo de conferencias, titulado *Cien Años de Herencia Einsteiniana*, se desarrolló, entre marzo y junio de 2005, en el Salón de Actos Interfacultativo del Campus de Burjassot. La filosofía general, subyacente en la programación de las conferencias “de contenido físico” del ciclo, era la de exponer, a partir de contribuciones de Einstein de carácter seminal, los progresos realizados en los últimos cien años en diversos campos de la Física. Con carácter complementario se programaron dos conferencias, una en la que las propias contribuciones seminales de 1905 fueron analizadas desde una perspectiva histórico-científica, y otra en la que se daba cuenta de los estudios realizados sobre el cerebro de Einstein.

En 1922 Einstein recibió el premio Nobel de Física de 1921 por “*sus méritos en el campo de la física teórica, especialmente por el descubrimiento de la ley que rige el efecto fotoeléctrico*” (el efecto fotoeléctrico consiste en la emisión de electrones por la superficie de un metal cuando ésta es iluminada con luz de frecuencia mayor que una frecuencia umbral determinada por las características del metal). Tal explicación, basada en la interacción de cuantos de luz, o fotones, con los átomos del metal, desligando electrones de éstos, había sido propuesta en un artículo publicado en el mes de junio de 1905. Desde entonces, los progresos en el conocimiento de la interacción de la luz,

o más generalmente de la radiación electromagnética, con la materia, han sido, tanto a nivel teórico como experimental, extraordinarios (el mismo Einstein publicó unos años más tarde, en 1917, un artículo en el que trataba el proceso de emisión estimulada de la radiación que constituye el fundamento de la producción de la luz láser).

En la conferencia titulada *Del efecto fotoeléctrico a los láseres de attosegundos*, Luis Roso describió algunos de estos avances, en particular la ionización (extracción de electrones de un átomo) debida a varios fotones o a la acción de luz láser intensa, mostrando cómo los electrones extraídos pueden ser empleados, a su vez, para generar pulsos luminosos de attosegundos (un attosegundo es la trillonésima parte de un segundo). El desarrollo de láseres en esta escala temporal abre la puerta a aplicaciones espectaculares como la fotografía, paso a paso, de los procesos a nivel atómico (de hecho ya se puede llegar a fotografiar la nube electrónica de moléculas sencillas en el proceso de disociación o vibración).

Luis Roso, catedrático de la Universidad de Salamanca (US), es especialista en las tecnologías de desarrollo de láseres y dirige en la actualidad el Servicio Láser de dicha universidad.

En julio de 1905, un mes después de su artículo sobre efecto fotoeléctrico, Einstein publicó un artículo explicativo del movimiento browniano, es decir del movimiento errático de partículas en suspensión en un fluido. El calificativo browniano hace honor al botánico escocés R. Brown, que lo estudió por primera vez de forma sistemática, tras observarlo para partículas en granos de polen suspendidos en agua. Los importantes desarrollos en Mecánica Estadística que siguieron a tal explicación, hasta el estado de conocimiento actual, fueron expuestos por Raúl Toral en una conferencia titulada *Últimos avances en el movimiento browniano: orden a partir del desorden*. En particular se trató el mecanismo de “resonancia estocástica” por el cual un sistema amplifica señales débiles con la ayuda de ruido (el ruido representa el efecto sobre el sistema de una fuerza estocástica, es decir de una fuerza que no se puede conocer con precisión). Este mecanismo, presente por ejemplo en el sistema nervioso de muchos animales y de los humanos, permite incrementar su percepción sensorial.

Raúl Toral, catedrático de la Universitat de les Illes Balears, desarrolla su investigación en Física Estadística y No Lineal, con aplicaciones a sistemas biológicos y sociales.

En septiembre de 1905 Einstein publicó el primer artículo sobre la teoría de la relatividad, por la cual llegaría a ser el científico más famoso, a nivel del público en general, de todos los tiempos (la revista *Times* lo consideró como el personaje más relevante del siglo XX). En él establecía las bases de la Teoría Especial de la Relatividad, basada en una nueva concepción del espacio y del tiempo (o, más precisamente, del espaciotiempo cuatridimensional frente al espacio y tiempo absolutos independientes de la mecá-

nica no relativista) para observadores inerciales (en movimiento relativo uniforme). Dos meses después, en noviembre, publicó un artículo complementario, en el cual establecía que la masa de un sistema corresponde a su energía en reposo. La Teoría Especial de la Relatividad nos permite describir el comportamiento de partículas elementales que viajan, con respecto a nosotros, a velocidades próximas a la de la luz en el vacío. También nos permite entender los procesos de producción de energía a nivel nuclear (en una central nuclear o en una bomba atómica de fisión, una pequeña cantidad de masa del “combustible” nuclear (habitualmente uranio) se transforma en energía de movimiento de los productos resultantes de la fisión nuclear). Los progresos, durante el siglo XX, en este campo de la física, han sido espectaculares. En la conferencia titulada *Einstein 1905-55; CERN 1955-2005: from atoms to quarks*, Frank Close relató un viaje al mundo subatómico que comenzó a principios del siglo XX con el descubrimiento del electrón y del núcleo atómico, y que continúa en la actualidad con la investigación de los constituyentes elementales del universo y de sus interacciones, en los grandes aceleradores de partículas. En éstos la validez de la teoría especial de la relatividad, y sus consecuencias más sorprendentes derivadas de la estructura del espaciotiempo (dilatación temporal, contracción de longitudes), se comprueban a diario.

Frank Close es “Professor of Theoretical Physics” en Oxford University. Autor de numerosos libros de texto y divulgativos sobre Física, ha recibido entre otros premios y reconocimientos, la Institute’s Kelvin Medal en 1996 por sus contribuciones a la comprensión pública de la física y la Order of the British Empire (año 2000) por sus “servicios a la investigación y a la divulgación de la ciencia”.

Los artículos de Einstein de 1905 fueron precedidos por extraordinarios descubrimientos científicos, en los últimos años del siglo XIX y los primeros del siglo XX (rayos X, rayos catódicos, radiactividad, ley de cuerpo negro,...). Estos descubrimientos sugerían la necesidad de un cambio de pensamiento respecto al sentido de completitud de la ciencia (“todas las leyes físicas han sido ya descubiertas”) que había sido aceptado, para la física clásica, por científicos relevantes del momento. En la conferencia titulada “*Einstein: Zurich 1905*”, Thomas Glick analizó la controversia generada en la filosofía de la ciencia en tal periodo y las aportaciones de Einstein a la clarificación de las inconsistencias entre paradigmas físicos existentes mutuamente incompatibles. Thomas Glick es “Professor of History” en Boston University en dicha Universidad. Es un especialista en estudios comparativos sobre la recepción de la teoría de la relatividad. Es autor, entre otros, del libro *Einstein y los españoles: ciencia y sociedad en la España de entreguerras*.

Aunque la fama científica de Albert Einstein comenzó poco después de 1905, no fue fundamentalmente debida, en principio, a sus artículos en dicho *annus mirabilis* sino a

un artículo posterior, publicado en 1907, sobre la teoría de la radiación de Planck y el calor específico de los sólidos (el calor específico de un sólido es la cantidad de calor que hay que comunicarle a un sólido para que aumente en un grado su temperatura). En éste Einstein postuló que el almacenamiento de calor en el sólido estaba asociado a las vibraciones de su red cristalina. La validez de la fórmula de Einstein para la variación del calor específico con la temperatura, obtenida a partir de la ley de Planck para la radiación de cuerpo negro, fue pronto verificada experimentalmente. Este artículo, juntamente con el de 1905 sobre el efecto fotoeléctrico, constituyen hitos en el estudio de los sólidos. En la conferencia titulada *Albert Einstein as the father of solid state physics*, **Manuel Cardona** hizo un recorrido exhaustivo por las contribuciones de Einstein a la física del estado sólido, o más en general a la física de la materia condensada (incluyendo líquidos). Dicho recorrido abarcó desde sus primeras poco conocidas publicaciones de 1900, hasta sus trabajos de los años 1920-25 sobre condensación de Bose-Einstein, superfluidez y superconductividad, resaltando los recientes desarrollos teóricos y aplicaciones, derivadas de tales contribuciones, en este campo de la física.

Manuel Cardona es profesor emérito en el Instituto Max Planck de Estado Sólido en Stuttgart del que fue director. Especialista en física del estado sólido, ha recibido multitud de premios y otros reconocimientos, en particular el Premio Príncipe de Asturias de Investigación Científica y Técnica en el año 1988 *“por sus importantes descubrimientos en Física de Materiales, base de muchas de las nuevas tecnologías, y porque su obra combina interesantes aportaciones a la ciencia básica con ideas claves para aplicaciones posteriores”*.

En 1909 Einstein renunció a su plaza en la Oficina de Patentes para incorporarse al mundo académico, primero en la Universidad de Zurich y luego en la de Praga, volviendo en 1912 a Zurich, ahora como profesor en la Escuela Politécnica en la cual había estudiado entre 1897 y 1900. En el año 1913 publicó, conjuntamente con su amigo y antiguo compañero de estudios M. Grossman, una primera versión de la Teoría General de la Relatividad, la cual completó en solitario a finales de 1915 en Berlín, a cuya universidad se había incorporado en 1914 y en la cual permanecería hasta 1933. Dicha teoría generalizaba la teoría especial de la relatividad para todo tipo de sistemas (inerciales y no inerciales), a la vez que suponía una nueva teoría del campo gravitatorio. Esta nueva teoría permitía resolver problemas pendientes de solución en la teoría de la gravitación de Newton como la predicción precisa del periodo de precesión de la órbita del planeta Mercurio. Más aún, se predecían nuevos fenómenos que no tenían cabida en el marco newtoniano. El Royal Observatory de Greenwich organizó en 1919 una expedición, comandada por el astrónomo A. S.

Eddington, para comprobar uno de estos fenómenos: la desviación de la luz procedente de una estrella al pasar cerca de una masa interpuesta entre la estrella y el observador. La medida del cambio en la posición aparente de una estrella durante el eclipse de Sol de 1919 permitió confirmar dicha predicción y establecer experimentalmente la validez de la teoría. La interpretación de los resultados obtenidos en la expedición tuvo gran difusión en los medios de comunicación, lo que convirtió a Einstein en un personaje mundialmente famoso.

Poco después de completar la formulación de la Teoría General de la Relatividad, Einstein se propuso la tarea de intentar establecer una teoría unificada de la gravitación y del electromagnetismo. Aunque sus esfuerzos no tuvieron éxito, la idea de que los distintos tipos conocidos de interacción (gravitatoria, electromagnética, fuerte y débil) representan los efectos de una única interacción fundamental, ha servido de hilo conductor de gran parte del progreso en la Física de Altas Energías durante el siglo XX.

En la conferencia titulada *Einstein's dream and the challenges of 21st century physics*, Miguel Ángel Vázquez revisó el sueño unificador de Einstein a la vista del éxito de su Teoría General de la Relatividad y analizó las razones por las cuales no se pudo ver cumplido. Haciendo un repaso del enorme progreso que se ha producido en el siglo XX en cuanto a la descripción física del universo a partir de sus constituyentes elementales, estableció los avances conseguidos en cuanto a unificación de las interacciones y la posibilidad de que el sueño de Einstein pueda ser realizado en el futuro.

Miguel Ángel Vázquez es Profesor Titular en la Universidad de Salamanca y desarrolla su investigación en Física Teórica, en el campo de la Física de Altas Energías, siendo un especialista en teorías de unificación.

En el año 1933 Hitler fue elegido Canciller de Alemania y Einstein decidió abandonar Berlín para trasladarse a Estados Unidos, al Institute for Advanced Study (IAS) en la Universidad de Princeton. Este mismo año Einstein, que había visitado España en 1923, rechazó una oferta del gobierno español para ocupar una cátedra en la Universidad Central (en la actualidad Complutense).

Desde finales de los años 1920 Einstein, aun estando convencido de la validez y coherencia interna del formalismo de la mecánica cuántica, desarrollado entre otros por Schrödinger, Dirac y Heisenberg, había mostrado su insatisfacción por el carácter probabilístico de sus predicciones. Este carácter era para él, y en contra de la interpretación propugnada por la Escuela de Copenhague cuyo principal representante era Niels Bohr, una señal de la no completitud de la teoría. En 1935 Einstein publicó, en colaboración con Boris Podolsky y Nathan Rosen, un artículo en el cual, utilizando pares de partículas fuertemente correlacionadas ("entrelazadas"), ponía de manifiesto la no separabilidad de la descripción cuántica (la medida sobre una partícula del par puede afec-

tar a la probabilidad de obtener un resultado cuando se mide posteriormente sobre la otra partícula, aunque no haya habido conexión dinámica entre ambas partículas) interpretándola como prueba de no completitud. En la conferencia titulada *From Einstein intuitions to quantum bits: a new quantum revolution?*, **Alain Aspect** revisó el “debate teórico Bohr-Einstein”, el cual continuó hasta la muerte de ambos en los años 1950, y la aportación fundamental del físico irlandés John Bell, en 1964, para replantearlo sobre una base experimental. Los experimentos con pares EPR (Einstein-Podolsky-Rosen) realizados en los años 1980 por el propio A. Aspect mostraron que la idea de no completitud de Einstein (basada en una visión realista local del universo) era equivocada. A su vez, la resolución experimental del debate abrió un nuevo campo de aplicaciones potenciales a partir del uso de sistemas entrelazados, en particular en el dominio de la información cuántica (criptografía, computación...), que podría llegar a significar una nueva revolución científico-tecnológica.

Alain Aspect es el Director del Grupo de Óptica Atómica del Institut d'Optique en Orsay (Paris) donde desarrolla actualmente su actividad investigadora sobre láseres y óptica cuántica. Ha recibido entre otros galardones internacionales el premio Max Born de la Optical Society of America y el premio Holweck del Institute of Physics (UK) y de la Société Française de Physique.

En 1945 Einstein se jubiló aunque conservó su despacho en el IAS hasta su muerte, en 1955, en el Princeton Hospital. Tenía 76 años. Su cadáver fue incinerado exceptuando su cerebro que, semiclandestinamente, fue cortado en pedazos y conservado personalmente por el médico forense. En la conferencia titulada *Relativa mente excepcional*, Óscar Vilarroya relató las peripecias ocurridas con el cerebro de Einstein y los estudios realizados sobre el mismo. Tales estudios han mostrado que el cerebro de Einstein, femenino en su aspecto global, estaba particularmente desarrollado en áreas de razonamiento espacial y tenía un exceso (respecto a un cerebro promedio) de ciertas células cerebrales de soporte. La inteligencia general, apoyada por unas habilidades excepcionales en el pensamiento matemático y espacial, y combinada con una gran creatividad, hicieron de Einstein un pensador único.

Óscar Vilarroya es investigador en neurociencia cognitiva en la Universitat Autònoma de Barcelona. Es autor de numerosos artículos y libros de divulgación. El año 2003 ganó el Premio Europeo de Divulgación Científica “Estudi General” de la Universitat de València.

Espero que las páginas que siguen puedan servir al lector para apreciar la enormidad de la contribución científica de Einstein y su legado a la física contemporánea.

Pedro González Marhuenda

CONFERENCIAS

DEL EFECTO FOTOELÉCTRICO A LOS LÁSERES DE ATTOSEGUNDO

Lluís Roso^{*} y Ramon Vilaseca^{**}

** Servicio Láser, Universidad de Salamanca, España.*

*** Departament de Física i Enginyeria Nuclear, Universitat Politècnica de Catalunya, España.*

RESUMEN

En el 2005 se ha cumplido el centenario de la publicación del trabajo de Albert Einstein en el que se dió por primera vez una interpretación adecuada del efecto fotoeléctrico, descubierto pocos años antes. Por ello Einstein recibió el premio Nobel de Física de 1921. En cien años, las cosas, cómo no, han cambiado enormemente y ahora nuestra concepción de efecto fotoeléctrico es mucho más amplia, abarcando aspectos insospechados hace un siglo. Aquí repasamos los hitos principales que se han ido sucediendo en estos cien años y, a su vez, damos una idea de la situación actual del tema. El desarrollo de los láseres, basados también en una predicción teórica de Einstein sobre la emisión estimulada publicada en 1917, en general, y la introducción de la tecnología CPA, en particular, han llevado la fotoionización de nuevo a las fronteras de la Física. Y lo que es más llamativo, han abierto nuevas aplicaciones de la fotoionización, como los pulsos láser de attosegundo.

INTRODUCCIÓN

La emisión de electrones por metales al ser iluminados (efecto fotoeléctrico) fue observada por vez primera por Heinrich Rudolf Hertz a finales del siglo XIX, probablemente por casualidad, en el marco de sus experimentos sobre fenómenos eléctricos. Pocos años después Philipp Eduard Anton von Lenard refinó los experimentos y mostró la existencia de un umbral de frecuencia para cada metal. Se vio que si la luz no llegaba a ese umbral de frecuencia no ionizaba absolutamente nada y si era de mayor frecuencia que este umbral, entonces sí ionizaba. Además con las fuentes disponibles a principios del siglo XX la presencia de este umbral era independiente de la intensidad de la luz.

Tal experimento fue motivo de controversia por no adecuarse a las interpretaciones vigentes hasta que Albert Einstein publicó, en el año que ahora conmemoramos de 1905, su famoso trabajo titulado *Un punto de vista heurístico sobre la producción y transformación de la luz*¹. En dicho trabajo, de índole puramente teórica², y mediante una simple y al mismo tiempo elegante (pues lo simple suele ser siempre lo más elegante) comparación entre la expresión de la fórmula de la variación de la entropía en función del volumen, en el caso de la radiación electromagnética y en el caso de un conjunto de partículas independientes, Einstein señaló que la luz, por lo menos a algunos efectos (termodinámicos, estadísticos), se comporta de forma similar a la de un conjunto de partículas independientes. Entre las posibles consecuencias de esta constatación, y a modo de ejemplo, Einstein sugirió que el efecto fotoeléctrico podía explicarse a partir de estos *quanta* de luz. La genial conclusión final de Einstein es que los *quanta* de luz tienen una energía E que depende sólo de su frecuencia, ν , a través de la relación $E=h\nu$, siendo h la constante de Planck.

Posteriormente Robert Andrews Millikan realizó experimentos muy refinados para su época que le llevaron a comprobar la validez de la ley del efecto fotoeléctrico tal como la había propuesto Einstein. Además Millikan realizó, entre 1912 y 1915, la primera determinación fotoeléctrica de la constante de Planck.

Ese mismo año de 1905, Einstein publicó su teoría especial de la relatividad. Esta teoría le dió rápidamente gran fama universal. El punto sorprendente es que la fama se la dió inicialmente más como filósofo que como físico, pues en aquel entonces la relatividad no estaba confirmada experimentalmente. Quizás es una visión personal y simplista de los autores de este escrito, pero nos da la impresión de que la sociedad tenía ganas de dar a Einstein el Premio Nobel por la teoría de la relatividad.

Es curioso analizar que Einstein recibió el Premio Nobel “*por sus servicios a la Física Teórica y especialmente por su descubrimiento de la ley del efecto fotoeléctrico*”, sin mención explícita de la relatividad. Aún es más sorprendente analizar que en la entrega del Premio Nobel (celebrada el 10 de diciembre del 1922) en el discurso de presentación realizado por Svante August Arrhenius³, éste dijera textualmente: “*No hay otro físico actual cuyo nombre haya llegado a ser tan ampliamente conocido como el de Albert Einstein. La mayor parte de la discusión se centra en su teoría de la relatividad. Esto pertenece esencialmente a la epistemología y por ello ha sido el sujeto de un vivo debate en los círculos filosóficos. No es secreto que el famoso filósofo Bergson⁴ de París ha retado esta teoría, mientras otros filósofos la han aclamado incondicionalmente. La teoría en cuestión tiene también implicaciones astrofísicas que están siendo rigurosamente examinadas en la actualidad*”. Desde luego si Einstein no

hubiese propuesto la teoría de la relatividad no habría recibido el Premio Nobel, por lo menos tan pronto. Pero a su vez la teoría de la relatividad no había sido verificada experimentalmente y por ello la comunidad científica era algo reticente a darle el premio tan claramente. Puede que el descubrimiento de la ley del efecto fotoeléctrico fuese la genial excusa para la Fundación Nobel. Igualmente relevante del grado de controversia en aquellos apasionantes años en la Física, es el hecho de que, en el texto arriba citado de concesión del premio Nobel, tampoco se mencionen los *quanta* de luz, sino únicamente aquello que era claramente irrefutable para todo el mundo, en aquel momento: la explicación del efecto fotoeléctrico.

Se han dado otros dos Premios Nobel en Física muy relacionados con el efecto fotoeléctrico: uno a Lenard, justamente en 1905, por sus trabajos en rayos catódicos, y otro a Millikan, en 1923, por sus trabajos sobre la carga elemental del electrón y sobre el efecto fotoeléctrico. Millikan validó experimentalmente la ley propuesta por Einstein, a pesar de que Millikan dedicó más de una década a un intenso trabajo experimental convencido de que iba a demostrar la incorrección de la ecuación $E=h\nu$. Millikan comprobó que la energía cinética de los fotoelectrones era la energía de un fotón menos la energía de ligadura del electrón (o la función de trabajo). En otras palabras, si el fotón tiene energía en exceso para ionizar, esta energía se traduce en energía cinética del electrón emitido.

En la figura 1 representamos esquemáticamente el efecto fotoeléctrico einsteiniano. La signatura típica de este efecto es que el número de electrones

libres es directamente proporcional a la intensidad. Por cada fotón puede haber un electrón emitido, y el número de fotones es proporcional a la intensidad. Hemos empleado una notación algo más habitual, $\mathbf{E} = \hbar\omega$ donde $\omega = 2\pi\nu$ y $h = 2\pi\hbar$. En la figura 1, I_p

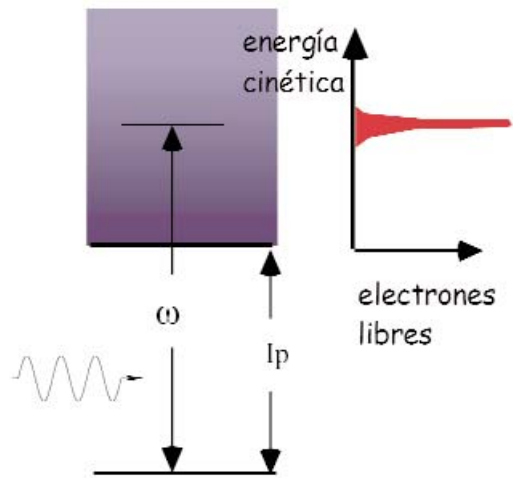


Figura 1: Efecto fotoeléctrico einsteiniano. La signatura de un proceso de este tipo es que el número de electrones libres es directamente proporcional a la intensidad. Por cada fotón puede haber un electrón emitido, y el número de fotones es proporcional a la intensidad. La escala vertical corresponde a energía. La línea horizontal inferior corresponde al estado fundamental, mientras que el rectángulo superior sombreado indica el continuo de estados libres. I_p indica la energía de ionización, para un átomo, o bien la función de trabajo, para un metal. La energía del fotón absorbido es $\hbar\omega$.

indica la energía que el fotón ha de superar, es decir, la energía de ionización, para un átomo, o bien la función de trabajo, para un metal.

FOTONES O QUANTA

Suele ser habitual oír que Einstein fue quien introdujo el fotón, a través de su ecuación, $E=h\nu$. Esta ecuación, que relaciona la frecuencia con la energía, es sin duda una de las grandes genialidades de Einstein y abre la puerta a la actual concepción de la cuantificación de la luz. Sin embargo él no fue quien introdujo la palabra fotón. Einstein en su trabajo de 1905 habló de la similitud con un conjunto de partículas en el contexto de la generación y transformación de la luz. Utilizó la denominación de *quanta* de energía luminosa y posteriormente empleó simplemente el nombre de *quanta* de luz (*lichtenergiequanta*). Planck, Einstein, Bohr, hablaban de un *quanta* de luz.

El nombre fotón no apareció en la literatura hasta el año 1926. Fue introducido por C. N. Lewis⁵ para indicar un concepto muy diferente. En una letter a *Nature*, Lewis propuso que el nombre de *photon* fuese aceptado para describir el *quanta* de luz: “Sería inapropiado hablar de una de estas hipotéticas entidades como una partícula de luz, un corpúsculo de luz, un quantum de luz, o un quanta de luz, si suponemos que pasa una mínima fracción de su existencia como portador de energía radiante mientras que el resto del tiempo queda como un elemento estructural sin importancia dentro del átomo. También sería confuso llamarle meramente un quantum, puesto que luego sería necesario distinguir entre el número de dichas entidades presentes en un átomo y el, así llamado, número cuántico”. En conclusión, Lewis pensaba en una partícula real que podía estar ligada al átomo y específicamente rechazaba que fuese el *quanta* de Planck. Todo esto está excelentemente explicado en un artículo de uno de los padres del láser, Willis E. Lamb Jr.⁶ quien es bastante crítico con el nombre de fotón y donde da un repaso, con visión moderna, a la evolución de este concepto tan básico en la Física actual. Hoy en día denotamos con el nombre de fotón el concepto de *quanta* de energía luminosa introducido por Einstein. Es decir, conservamos el nombre introducido por Lewis, pero con un significado próximo al del *quanta* de luz del que hablaba Einstein.

LA TEORÍA DEL EFECTO FOTOELÉCTRICO

A mediados de los años veinte se produjo una nueva etapa de gran progreso de la Física con los trabajos de Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger y Paul A. M. Dirac

que desarrollaron la mecánica matricial, la mecánica ondulatoria y la mecánica cuántica e introdujeron el concepto de función de onda y su interpretación probabilística. Eso completó la concepción heurística de Einstein y permitió una descripción mucho más afinada del efecto fotoeléctrico que sigue vigente en la actualidad.

Lo más notable es que se demostró rápidamente⁷ - al contrario de lo que se indica en muchos libros de texto actuales- que para explicar correctamente el efecto fotoeléctrico no es necesario introducir el concepto de fotón o de cuanto de energía. Ya en 1929⁸ se publicaba sobre distribuciones de fotoelectrones con modelos relativistas basados en la ecuación de Dirac. Ahora todavía seguimos dando vueltas a modelos conceptualmente similares, sólo que mucho más desarrollados. Por ejemplo, en Salamanca se han realizado recientemente una serie de tesis doctorales sobre este tema^{9, 10, 11}.

Una onda electromagnética clásica, con su oscilación a una frecuencia determinada, que se acopla a un átomo cuántico en el formalismo de la ecuación de Schrödinger dependiente del tiempo es un excelente modelo para entender, describir y hacer predicciones sobre fotoionización. La derivación original de la ecuación de Schrödinger dependiente del tiempo es también una parte interesante de la historia de la Física ya que su autor primero obtuvo la ecuación independiente del tiempo. Para Schrödinger la ecuación independiente del tiempo era una ecuación fundamental de la mecánica ondulatoria, mientras que la ecuación dependiente del tiempo fue introducida de forma marginal para describir perturbativamente la influencia de un entorno clásico¹².

La complejidad de la ecuación de ondas dependiente del tiempo resultante, en la aproximación dipolar eléctrica, es algo así:

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \phi(\vec{r}, t) = \left\{ \frac{1}{2m} \vec{p}^2 + V(\vec{r}) - e \vec{r} \cdot \vec{E}_0(t) \sin \omega t \right\} \phi(\vec{r}, t)$$

No pretendemos entrar en detalles muy específicos sobre esta ecuación dependiente del tiempo, ni en analizar sus términos, que son los habituales en problemas de interacción luz-materia en la denominada aproximación dipolar eléctrica¹³. Lo interesante y divertido es que se trata de una ecuación de ondas no separable. La función de ondas $\phi(\vec{r}, t)$ no es separable en producto de una función espacial por otra temporal. Eso complica la resolución y a la vez implica una dinámica extraordinariamente rica. No hay forma de resolverla analíticamente en los casos de interés. Las simulaciones tridimensionales realistas no han sido posibles hasta hace poco más de una década, pues implican una red de puntos extraordinariamente grande para poder describir el electrón ionizado que puede haberse alejado mucho del ion.

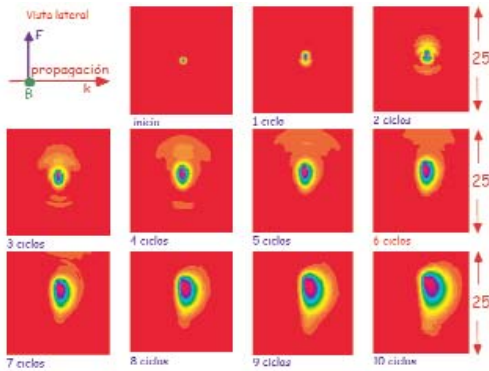


Figura 2: Evolución temporal de la función de onda atómica obtenida a partir de la integración numérica de la ecuación de Schrödinger dependiente del tiempo. Los dibujos son la proyección de la densidad de probabilidad en el plano del dibujo. El encendido del campo se ha realizado mediante una rampa de seis ciclos. A partir de entonces la amplitud es constante. El campo eléctrico oscila en la dirección vertical, el campo magnético oscila perpendicularmente al plano del dibujo. La componente de la fuerza de Lorentz debida al campo magnético va en la dirección de propagación (hacia la derecha del dibujo). Extraída de la referencia 9, esta figura corresponde a hidrógeno atómico a un campo linealmente polarizado de 7×10^{18} W/cm² de intensidad (irradiancia) y con fotones de 27,2 eV de energía. En esta secuencia se observa que el electrón se ioniza pues, al no estar ligado a la nube de probabilidad, se va expandiendo con el tiempo. El electrón tiene un movimiento en la dirección vertical debido al campo eléctrico del láser y una deriva hacia la derecha debido al campo magnético.

Como ejemplo, mostramos en la figura 2 la proyección en un plano de la evolución temporal de la función de onda atómica tridimensional obtenida a partir de la integración numérica de la ecuación de Schrödinger dependiente del tiempo que representa un átomo de hidrógeno irradiado por una onda electromagnética linealmente polarizada de 7×10^{18} W/cm² de intensidad (irradiancia) y 27.2 eV/h de frecuencia. De hecho la ecuación aquí integrada es ligeramente más compleja que la mostrada pues incluye también los efectos del campo magnético. El electrón comienza ligado al átomo, por eso su función de onda está localizada en el centro del primer dibujo (el ion está fijo en el centro). Conforme avanza el tiempo, el láser ioniza el electrón y eso se traduce en que la nube de probabilidad se extiende por el espacio y se aleja del ion. En los tres primeros ciclos la ionización es debida exclusivamente al campo eléctrico. Por eso el electrón se mueve en dirección vertical. Conforme avanza el tiempo, el encendido progresa y llega-

mos a intensidades en las que el acoplamiento con el campo magnético es importante. En este punto el electrón adquiere una deriva en la dirección de propagación del láser (hacia la derecha del lector). Esta desviación hacia la derecha unida a la oscilación en dirección vertical es la signatura más característica de este tipo de procesos.

LA REVISIÓN DEL EFECTO FOTOELÉCTRICO EINSTEINIANO

La ley del efecto fotoeléctrico, como toda ley que se formule en física, tiene un rango de validez. El problema con esta ley es que al haber sido formulada por Einstein y al

haber recibido por ello el Premio Nobel, se le suele dar mucha más importancia. De ahí se puede caer fácilmente en un dogmatismo en el cual esta ley se saque de contexto. Es habitual encontrar escritos en los que se indica que el fotoelectrón aparece si la frecuencia de la luz supera un determinado umbral, **independientemente de su intensidad**. Desde luego eso es cierto a bajas intensidades, pero no es necesariamente cierto en cualquier situación.

Siguiendo con el razonamiento basado en fotones, si éstos no tienen suficiente energía para superar el umbral de ionización igualmente pueden ionizar, pero mediante procesos a dos o más fotones. Entonces, si la suma de las energías de los dos fotones excede la energía de ligadura, el exceso de energía será la energía cinética del electrón emitido. Esta se podría considerar como la primera modificación seria al efecto fotoeléctrico einsteniano, y se debe a Maria Göppert-Mayer¹⁴ quien introdujo la idea de proceso a dos fotones. Göppert-Mayer debe ser considerada como la iniciadora de la teoría multifotónica. Hicieron falta muchos años y nuevas fuentes de radiación (como el láser) para que estas ideas fuesen confirmadas experimentalmente.

En la figura 3 se muestra esquemáticamente la modificación del efecto fotoeléctrico einsteniano, propuesta por Göppert-Mayer. Es posible la fotoionización aún cuando la energía del fotón sea menor que la energía de ligadura del electrón, $\hbar\omega < I_p$, pero en lugar de absorber un fotón, Göppert-Mayer propuso que bien podrían absorberse q fotones, siendo q el menor entero tal que $q\hbar\omega > I_p$. Mediante teoría de perturbaciones se puede justificar que en este régimen la probabilidad de ionización es proporcional a I^N , siendo N el número mínimo de fotones para llegar al umbral de ionización.

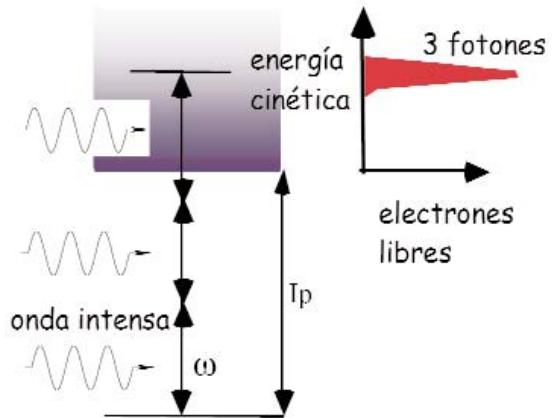


Figura 3: La primera modificación del fotoeléctrico einsteniano, estudiada por Maria Göppert-Mayer. Es posible la fotoionización aún cuando la energía del fotón, $\hbar\omega$, sea menor que la energía de ligadura del electrón, I_p . En lugar de absorber un fotón, se propuso que bien podrían absorberse q fotones, siendo q el menor entero tal que estos q fotones sumados superen la energía de ligadura. En este caso el espectro de electrones emitidos tiene una energía cinética bien determinada que corresponde al exceso de energía $3\hbar\omega - I_p$.

EL LÁSER

El láser, es decir el amplificador de luz por emisión estimulada de radiación -una idea asimismo introducida por Einstein- ha representado una revolución en nuestra concepción de la interacción luz-materia y, en consecuencia, en nuestra concepción del efecto fotoeléctrico. Señalemos en primer lugar que Einstein, en 1917, descubrió cuáles eran los fenómenos más básicos¹⁵ de interacción entre la luz y la materia y describió sus propiedades fundamentales, otra vez basándose únicamente en una (elegante) comparación entre fórmulas ya conocidas, y en la consiguiente exigencia de compatibilidad entre ellas. Así, Einstein estudió el equilibrio termodinámico, en un determinado recinto del espacio, entre unos átomos (descritos mediante el entonces reciente modelo de Bohr) y la radiación electromagnética, y trató de imponer la compatibilidad entre las fórmulas fundamentales que se les aplican, es decir: la ley de Planck (para el campo electromagnético), la ley de Boltzmann (para la distribución de la población en los niveles de energía atómicos) y la fórmula de Maxwell (para la distribución de velocidades de los átomos), imponiendo además la estacionariedad de las poblaciones de los niveles atómicos y la asunción de que sólo un *quantum* de luz interviene en cada proceso básico de interacción entre un átomo y la radiación. Como resultado, se encontró con que la única manera de que tal compatibilidad era posible consistía en establecer que los procesos básicos de interacción luz-materia eran necesariamente tres: el de absorción, el de emisión espontánea y el de emisión estimulada.

Los tres procesos tenían características sorprendentes, por ejemplo su carácter probabilista o estocástico, y además resultaba que el último de ellos no había sido nunca observado con anterioridad (se observaría por primera vez en 1928, por Landenburg y Kopfermann). Einstein dedujo la estructura de la fórmula que da la probabilidad por unidad de tiempo de que se produzca cada uno de los procesos, así como la magnitud de los intercambios de energía ($\hbar\omega$) y de momento ($\hbar\mathbf{k}$) que se producen entre el átomo y la radiación, en cada proceso. Además, con ello, y de rebote, Einstein acababa de completar el carnet de identidad del *quantum* de luz.

Observemos que Einstein no dudó en romper con el determinismo de la Física Clásica, tan bien establecido hasta aquel momento (sólo la recientemente observada existencia de las emisiones radiactivas, que también ocurren en instantes al azar, constituía una excepción, la cual seguramente le sirvió de apoyo para atreverse a lanzar sus atrevidas conclusiones)¹⁶, así como no dudó en aceptar la teoría de Bohr que, de alguna manera, por aquel entonces, parecía afrontar el rigor de las ecuaciones de Maxwell. Einstein ya no profundizó mucho más en el estudio de estos fenómenos, pero las

bases que sentó han sido fundamentales. La explicación profunda de la emisión espontánea requiere, como se vio más tarde, la teoría cuántica de la radiación (aquí sí se precisa introducir el concepto de fotón, excepto si se consideran modelos alejados de las corrientes centrales de la Física). Por otra parte, la emisión estimulada, con las propiedades cruciales de que la probabilidad del proceso es proporcional a la intensidad de la luz incidente, y de que la luz que se genera es de características absolutamente idénticas a las de la luz incidente, constituye un proceso ideal para la amplificación de haces de luz, o de radiación electromagnética en general. En ello se basan el máser y el láser.

Con los trabajos de Charles H. Townes de 1954 sobre el máser de amoníaco, y con el desarrollo por Theodor Maiman en 1960 del láser de rubí, primero, y por Ali Javan, William Bennet y Donald Herriot del láser de helio-neón, poco después, se abrió la puerta a un amplísimo nuevo campo experimental que ha seguido desarrollándose incesantemente. La realización constante de nuevos tipos de láseres con propiedades cada vez más controlables ha abierto muchas nuevas líneas en la electrodinámica cuántica y ha cambiado nuestra concepción del efecto fotoeléctrico. Señalemos que el desarrollo de los láseres se ha producido en varias direcciones, todas ellas extraordinariamente interesantes y que conllevan numerosas aplicaciones científicas y técnicas: por una parte, hacia la consecución de radiación cada vez más monocromática (lo cual exige, como contrapartida, tiempos de emisión largos), y, por otra parte, hacia la consecución de tiempos de emisión (pulsos de luz) cada vez más cortos (lo cual exige menor monocromaticidad). En ambos casos, además, se ha ido avanzando en la dirección de más potencia.

A continuación vamos a analizar los principales hitos que se han ido produciendo en la segunda de las direcciones. En concreto, en la generación de pulsos de luz cada vez más cortos y más potentes. Vamos a ver cómo láseres con estas características han cambiado nuestra concepción de la fotoionización. Finalmente veremos cómo el control alcanzado sobre los propios fotoelectrones está permitiendo que ahora los empleemos para generar nuevos tipos de láseres.

LOS LÁSERES CON *MODE LOCKING*

Pocos años después del desarrollo de los primeros láseres se vio el interés por generar pulsos cortos e intensos, es decir, por concentrar la energía en el tiempo de la misma forma que una lupa al focalizar nos permite concentrar la energía en el espacio. Las primeras técnicas de generar pulsos se basaban en un brusco cambio del

denominado factor de calidad de la cavidad, para lograr una especie de estado sobreexcitado que radiase de golpe al hacer la cavidad suficientemente buena. Estas técnicas se suelen denominar *Q-switching*, indicando que se modifica el factor de calidad, Q , de la cavidad. El *Q-switching* no permite ir más abajo del nanosegundo.

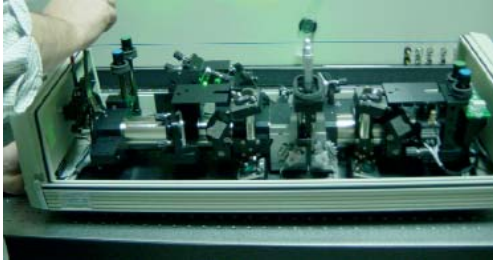


Figura 4: El láser de Ti:Zafiro (cuyo medio activo es un cristal de zafiro *dopado* con titanio) con *mode locking* se ha convertido ya en habitual en muchos laboratorios.

En la búsqueda de la región temporal de picosegundo o menor, es evidente que no se deben emplear láseres muy monocromáticos. Cuanto más corto es el pulso tanto más ancho es su espectro, por ello necesitamos pensar en láseres no monocromáticos. Afortunadamente, la cavidad de un láser no soporta un solo modo, excepto si es de menos de una micra de longitud. Cavidades habituales de decenas de

centímetros trabajan con modos de orden muy alto. Hay un peine de posibles modos de la cavidad que pueden ser amplificados si la anchura del elemento amplificador del láser lo permite. Un peine de muchos modos, en general, va a dar una señal aparentemente aleatoria. Sin embargo, si los modos están en fase entre ellos, entonces se produce un tren de pulsos muy cortos. Los pulsos son tanto más cortos cuantos más modos hay implicados, pues a menor duración temporal mayor ha de ser el contenido espectral. Para lograr este ajuste de las fases que es necesario existen diversas técnicas que pueden emplear efectos no lineales o bien inyección externa de modulaciones. Se denomina *mode locking* a esta situación en la que la fase relativa de los modos está fijada.

Los láseres con *mode locking* han permitido obtener con relativa facilidad pulsos muy cortos y han representado durante más de tres décadas la frontera de los láseres. Desde hace más de veinte años se obtienen láseres de picosegundo. Como pulso ultracorto implica banda de frecuencias muy ancha, la investigación ha ido hacia la búsqueda de medios activos para láseres que tengan una banda de emisión cada vez más amplia. Inicialmente se trabajó con moléculas orgánicas de colorante. Ahora la estrella son los láseres vibrónicos de estado sólido, y entre ellos el Ti:Zafiro, un cristal de zafiro (corindón) sintético *dopado* con titanio, es el más usado, Fig. 4. Los iones titanio triple o cuádruplemente ionizado por efecto de los oxígenos que los rodean en la estructura cristalina son los responsables de la emisión láser. La característica que nos interesa del Ti:Zafiro es que la banda de fluorescencia es muy ancha, más de 100 nanómetros. El problema es que esta banda está centrada en los 800 nanómetros, es

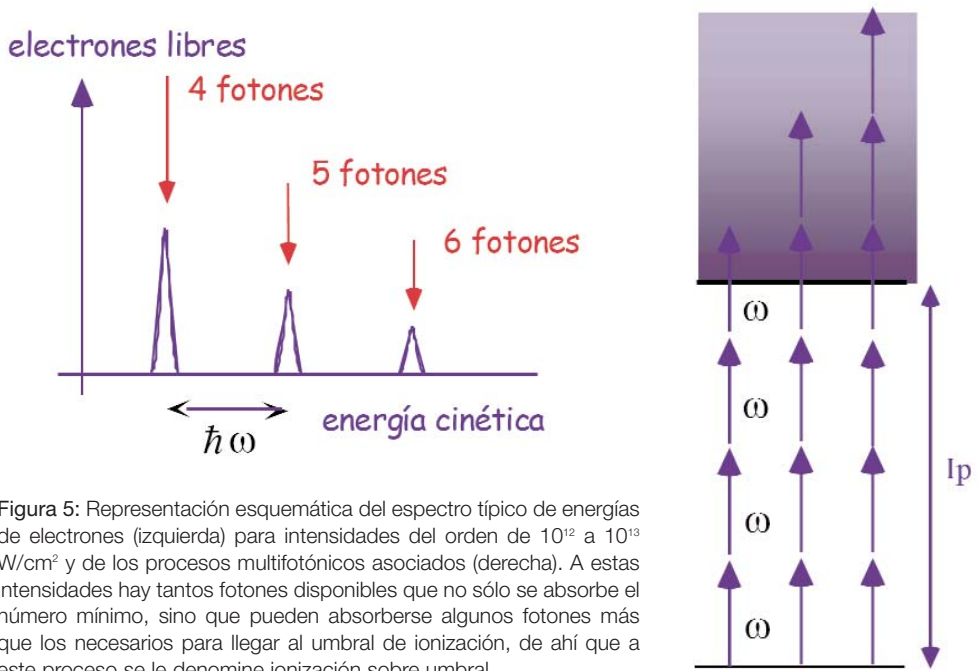


Figura 5: Representación esquemática del espectro típico de energías de electrones (izquierda) para intensidades del orden de 10^{12} a 10^{13} W/cm^2 y de los procesos multifotónicos asociados (derecha). A estas intensidades hay tantos fotones disponibles que no sólo se absorbe el número mínimo, sino que pueden absorberse algunos fotones más que los necesarios para llegar al umbral de ionización, de ahí que a este proceso se le denomine ionización sobre umbral.

decir, está en el infrarrojo cercano. Al ser la banda tan ancha la cola de longitudes de onda cortas entra en el visible, por eso el cristal tiene una fluorescencia rojiza.

Con el láser de Ti:Zafiro y con los correspondientes desarrollos en el control de las fases para lograr el *mode locking*, se ha entrado de lleno en la zona femtosegundo. Los pulsos de 100 femtosegundos son algo standard en la actualidad, y como una longitud de onda central de 800 nanómetros corresponde a un periodo de 2,6 femtosegundos, eso significa que esos pulsos son de unas cuarenta oscilaciones. Recordemos que 100 femtosegundos de duración por el principio de incertidumbre corresponden a una anchura espectral de unos 10 nanómetros. Además estos láseres han llegado a una región, por debajo del picosegundo, inalcanzable por métodos electrónicos y han permitido la “fotografía” estroboscópica llevada al límite abriendo campos de investigación conceptualmente nuevos, como la femtoquímica.

Los láseres con *mode locking* han alcanzado intensidades mucho más elevadas y permitieron a lo largo de la década de los ochenta la revisión del efecto fotoeléctrico, con una fenomenología completamente nueva que demostraba la validez de las ideas de Göppert-Mayer, ¡propuestas cincuenta años atrás! La figura 5 muestra un esquema del espectro típico de fotoelectrones para intensidades del orden de 10^{12} a 10^{13} W/cm^2 y

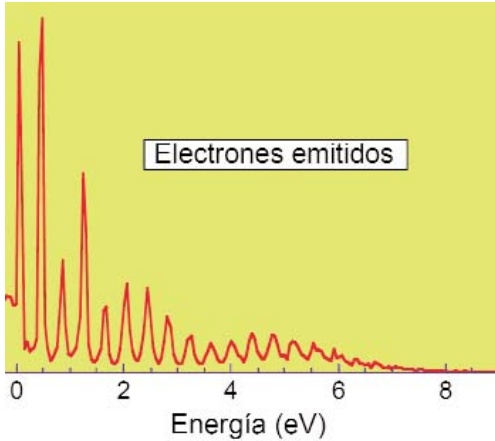


Figura 6: Espectro de fotoelectrones producido en la ionización del electrón externo de un átomo de sodio mediante un láser infrarrojo, de 3200 nm de longitud de onda e intensidad por debajo de la supresión de barrera, 2×10^{13} W/cm². Lo representado es una simulación numérica tridimensional muy realista de dicho átomo¹⁷. Este espectro concuerda muy bien con los obtenidos experimentalmente.

muestra también los correspondientes procesos multifotónicos a que se asocian. A estas intensidades la densidad de fotones es lo suficientemente elevada como para que el electrón justo tras haberse ionizado encuentre más fotones que absorber antes de alejarse del ion (pues en el régimen no relativista, cuando el electrón está alejado del ion no puede absorber de forma neta más fotones). En la figura 6 se muestra un espectro típico calculado numéricamente para la ionización del electrón externo de un átomo de sodio. Ahora ya se entienden razonablemente bien los espectros de fotoelectrones y también las distribuciones angulares de los electrones emitidos.

LA TECNOLOGÍA CPA (CHIRPED PULSE AMPLIFICATION)

Como sucede habitualmente en física, una revolución como la propiciada por el *mode locking* resulta rápidamente insuficiente. Así hace más de veinte años se planteó la pregunta de cómo amplificar más los pulsos de *mode locking*. En principio, podemos amplificar a base de bombear más energía (mediante otro láser), pero llega un punto en el que no se puede bombear más porque ya se llega al umbral de ruptura del cristal.

En este punto surgió una idea sencilla y acertada para poder seguir amplificando por encima del umbral de daño. Este truco fue inicialmente propuesto y realizado por Gerard Mourou en Rochester en el año 1985. La idea básica es aprovechar el efecto bien conocido de que en un medio dispersivo diferentes frecuencias se mueven a diferentes velocidades. Así se aumenta la duración del pulso y al ser más largo se puede amplificar más. El pulso estirado tiene una propiedad peculiar, es un pulso con *chirping*, Fig.7. Es decir es un pulso en el que sus diferentes componentes de frecuencia están localizadas en diferentes zonas del pulso (una partícula cuántica libre y con masa se describe también

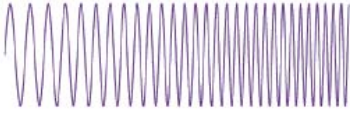


Figura 7: Representación esquemática de un pulso con chirping, es decir de un pulso en el que la frecuencia de la onda va variando con el tiempo. La escala horizontal del dibujo corresponde al tiempo o al espacio.

por un paquete de ondas con chirping). En consecuencia, la etapa de amplificación en un láser CPA, Fig. 8, consta de tres partes:

- Expansión del pulso, hasta una duración del orden del nanosegundo. Esto puede realizarse mediante unas redes de difracción, mediante un sistema de prismas, mediante una fibra óptica, o mediante pares de espejos multicapa adecuados (espejos con chirping).
- Amplificación del pulso, empleando un amplificador relativamente convencional, puesto que ahora la intensidad es baja. El único problema es que para proporcionar adecuadamente la energía a este amplificador se necesitan varios láseres “convencionales” de longitud de onda inferior.
- Recomprimión del pulso, empleando el procedimiento inverso al del expansor. Esto es la etapa más delicada, pues una vez comprimido el pulso es tan intenso que difícilmente puede ser manipulado

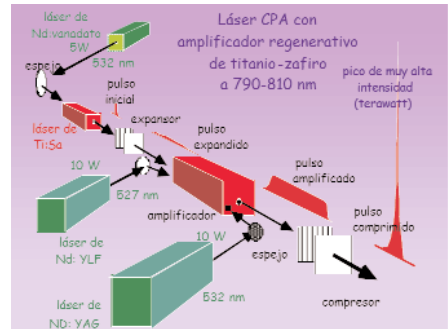


Figura 8: Representación esquemática de las componentes más habituales de un sistema láser CPA (Chirped Pulse Amplification). Las cajas en rojo indican el oscilador de Ti:Zafiro inicial y la línea de amplificación. Las cajas en verde indican los láseres de bombeo. Se necesita un láser para bombear el oscilador y uno o más láseres para las etapas de amplificación.

Así, al obviar el problema de la ruptura del material, la posibilidad de amplificación se ha extendido extraordinariamente, Fig. 9. Eso ha llevado a una revolución de nuestra concepción de la fotoionización, pues podemos alcanzar el umbral de daño de cualquier material y llegar a zonas donde los átomos pierden su entidad.

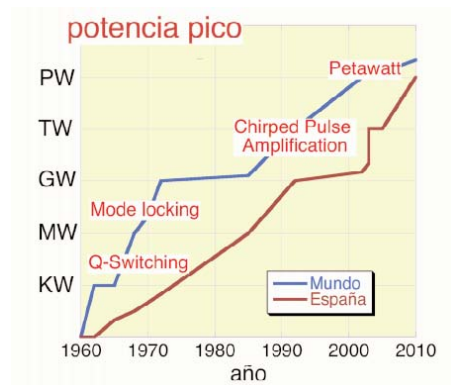


Figura 9: Evolución histórica de los picos de potencia láser alcanzables. Ahora potencias pico de Gigavatio son relativamente convencionales, los láseres de Teravatio empiezan a proliferar en muchos laboratorios (incluso tenemos uno en España) y los láseres de Petavatio representan la frontera.

IONIZACIÓN POR EFECTO TÚNEL

Podemos seguir repasando la fenomenología de la fotoionización conforme aumentamos la intensidad, Fig.10. Para intensidades superiores a los 10^{14} W/cm², comienza un nuevo tipo de ionización en el que todas estas cuentas de si se necesitan varios fotones para llegar al umbral de ionización dejan de tener razón de ser. La ionización por efecto túnel fue muy llamativa a principios de los años noventa, pues suponía hablar de ionización de una forma conceptualmente nueva sin tener que pensar en procesos resonantes de absorción de fotones. A estas intensidades lo que domina es el efecto del campo eléctrico del propio láser. El campo eléctrico distorsiona el potencial coulombiano y aunque va oscilando con un periodo de pocos femtosegundos, este periodo es largo comparado con las escalas atómicas, y puede dar tiempo al electrón a escapar por efecto túnel. Al suceder en tiempos muy cortos y no tener necesidad de resonancia, la característica más importante desde el punto de vista experimental, es que el espectro de los electrones es muy ancho. Ya no se distinguen picos asimilables a la absorción de fotones individuales.

Si aumentamos la intensidad esta barrera de potencial se va haciendo más pequeña, hasta llegar a una intensidad del orden de 10^{15} W/cm² (dependiendo del átomo ionizado) para la cual, en el momento en que el campo eléctrico alcanza su máximo, la barrera desaparece. Es como si el potencial coulombiano que atrapa al electrón fuese una jaula con dos puertas, una a cada lado en la dirección de polarización del campo

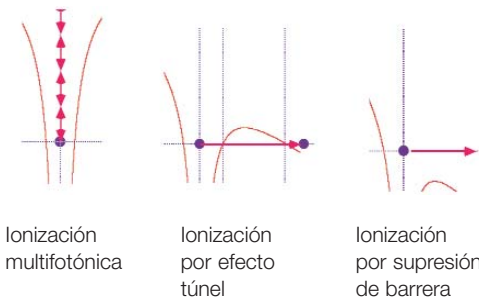


Figura 10: Representación esquemática de la fenomenología de la fotoionización. La línea en forma de embudo indica el potencial coulombiano atómico, que se va curvando cada vez más por efecto Stark debido al campo eléctrico del propio láser. Aproximadamente, hasta 10^{14} W/cm² (dependiendo del átomo), se tiene ionización multifotónica, luego ionización por efecto túnel y, por encima de los 10^{15} W/cm², se tiene ionización por supresión de la barrera coulombiana.

eléctrico. Cuando el campo pasa por su máximo, se abre una puerta, luego se cierra y cuando pasa por el mínimo, se abre la puerta del otro lado. Y así sucesivamente. El electrón tiene una cierta probabilidad de escapar y, si la puerta se abre un tiempo suficientemente largo -si estamos bastante por encima de la supresión de barrera- la primera vez que se abra la puerta, el electrón se ionizará casi totalmente. En consecuencia, por encima de los 10^{16} W/cm², los átomos pierden su entidad. La interacción de los electrones con el núcleo es menor que la interacción con el láser y se forma un plasma en pocos femtosegundos.

EFECTOS RELATIVISTAS

Por encima de los 10^{18} W/cm², para la longitud de onda del Ti:Zafiro, el campo electromagnético es tan intenso que los electrones alcanzan velocidades relativistas en tiempos del orden del femtosegundo (es decir, en una fracción del periodo de la onda).

En la figura 11 se aprecia la trayectoria (relativista) de un electrón libre movido por una onda electromagnética plana (polarizada en la dirección vertical) para un láser de 800 nm y 10^{19} W/cm². Este movimiento, muy característico se traduce en el plano. Cuando este movimiento se lleva a un sistema de referencia que se mueve con la velocidad promedio del electrón aparece la bien conocida “figura en forma de ocho”, una estructura típica en estos casos. En el sistema de referencia del laboratorio esta trayectoria tiene un forma peculiar, con una serie de cúspides muy características. Entender esta trayectoria es razonablemente sencillo y puede ayudar a ver como obvias muchas de las cosas sorprendentes que tiene la relatividad especial¹⁸.

Ahora ya sabemos abordar numéricamente este tipo de situaciones en el marco de la ecuación de Dirac y se está estableciendo una conexión entre la electrodinámica cuántica relativista y la mecánica cuántica ondulatoria relativista muy interesante. Se están haciendo con mecánica cuántica cálculos a intensidades extremas que implican procesos tan complejos (multifotónicos de orden enorme) que no se pueden calcular empleando electrodinámica cuántica. Cálculos de Zitterbewegung o nuevas fenomenologías debidas a la paradoja de Klein, entre otras cosas, empiezan a encontrarse ya en la literatura de láseres intensos y suelen ser objeto de controversia debida a diferentes visiones de los fundamentos de la mecánica cuántica. No sabemos si eso servirá para iniciar otra revolución

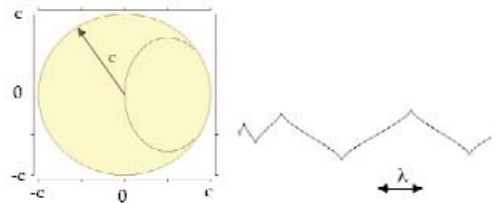


Figura 11: Trayectoria de un electrón movido por una onda electromagnética linealmente polarizada. El campo eléctrico está en la dirección vertical y causa por tanto un movimiento vertical. El campo magnético queda perpendicular al plano del papel y combinado con la componente vertical de la velocidad genera una fuerza en dirección horizontal y hacia la derecha del dibujo, en la dirección de propagación de la onda. El movimiento es plano, en el plano del papel. El movimiento debido al campo eléctrico es oscilatorio. Sin embargo, el movimiento debido al campo magnético siempre va en la dirección de propagación de la onda, es lo que llamamos la deriva magnética. En el dibujo de la izquierda se aprecia la traza de la velocidad, una letra C muy cerrada. En el dibujo de la derecha se muestra la trayectoria. El electrón comienza desde la izquierda y adquiere una deriva muy fuerte hacia la derecha.

de la Física como la que surgió a principios del siglo pasado, pero sí sabemos con total certeza que de esta discrepancia entre dos visiones distintas y complementarias está surgiendo un nuevo campo de frontera de nuestro conocimiento.

En la actualidad se han construido varios láseres de Petavatio, 10^{15} Vatios, aunque por lo complicado de la amplificación tan enorme no son los que alcanzan el récord de intensidad. Según nuestros datos, ver tabla 1, el récord de intensidad los tiene actualmente el grupo de Gerard Mourou (quién realizó el primer sistema CPA en Rochester) que ahora está en Michigan. Para establecer un récord de intensidad se necesitan dos cosas: una son muchos teravatios, desde luego, y la otra es que provengan de un haz de buena calidad para que se pueda focalizar bien. Mourou ha empleado un láser relativamente modesto de “sólo” 45 Teravatios, pero con una muy buena calidad del haz obtenida a base de óptica adaptativa¹⁹, y ha llegado a los 10^{22} W/cm².

$< 10^8$ W/cm ²	efecto fotoeléctrico “convencional”	1900 - 1920
10^{10} W/cm ²	ionización sobre umbral	1975 - 1985
10^{14} W/cm ²	ionización por efecto túnel,	1989 - 1992
10^{15} W/cm ²	ionización por supresión de barrera	1990 - 1995
10^{18} W/cm ²	electrones a velocidades relativistas	1995 - 2000
10^{22} W/cm ²	fusión nuclear, óptica nuclear	2000 - 2005
10^{29} W/cm ²	campo crítico de la QED (vacío inestable)	futurible

Tabla 1: Resumen de la fenomenología fotoeléctrica según la intensidad. Para las longitudes de onda infrarrojas habituales (1 μ m del Nd YAG, 800 nm del Ti:Zafiro) indicando el periodo en que se analizó el correspondiente dominio de intensidades.

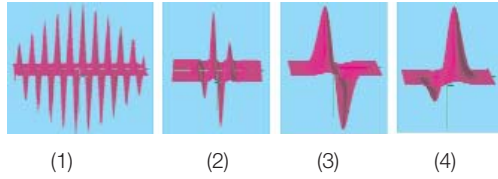
A estas intensidades se ha penetrado ya en el dominio de la física nuclear, y ya se sabe inducir procesos nucleares por láser. Esto es un campo amplísimo que se acaba de abrir y está aún por colonizar. Una de las posibilidades más esperanzadoras es la desactivación de residuos nucleares, que ya se ha demostrado a nivel de laboratorio pero que tiene muchos puntos por resolver antes de llegar a ser una técnica comercialmente aplicable.

PULSOS ULTRACORTOS

No sólo la intensidad es lo importante, también la duración tiene aplicaciones. Por ejemplo, en los láseres para fusión nuclear por confinamiento inercial, el combustible ha de estar comprimido un tiempo lo más largo posible para llegar a alcanzar la con-

dición de Lawson, que es un compromiso entre la duración del pulso y la densidad, de forma que a menor densidad se necesita mayor duración. Por eso los láseres para la fusión nuclear son monstruos megajoule de dudosa retanbilidad energética.

El límite ultracorto y ultraintenso es mucho más atractivo. Un Petavatio corresponde a diez julios en diez femtosegundos. Eso es una potencia enorme pero no a base de una energía monstruosa sino a base de llevar la tecnología de amplificación de pulsos ultracortos al límite.



(1) 30 femtosegundos. (2) 5 femtosegundos. (3) 3 femtosegundos. (4) No vale como onda.

Figura 12: Pulsos progresivamente más cortos (el eje horizontal representa tiempo y el vertical campo eléctrico E). El pulso de la izquierda tiene algo más de diez oscilaciones, es decir es la estructura típica de un pulso del orden de 30 femtosegundos. El segundo pulso tiene un par de ciclos, es decir sería un pulso de alrededor de 5 femtosegundos. El tercer pulso tiene una única oscilación. El pulso de la derecha sería de menos de un ciclo, pero no es una onda pues el promedio temporal de E(t) es no nulo, o sea, tiene una componente electrostática.

Si queremos tener una onda electromagnética (sin componente estática) hemos de garantizar que el promedio temporal del campo eléctrico E(t) sea nulo. Eso implica que es imposible bajar de un ciclo (2.6 femtosegundos para el láser de Ti:Zafiro a 800 nm), Fig. 12. Como siempre en física cuando alguien dice esto es imposible, diez más buscan la forma de llevarle la contraria. Ahora, afortunadamente, sabemos que es posible bajar del femtosegundo. Eso se hace a base de combinar muchos armónicos de esta frecuencia.

HARMÓNICOS DE ORDEN ELEVADO

Uno de los problemas más fundamentales del electromagnetismo es el de conocer la respuesta de un medio material a un campo. Habitualmente se supone que la respuesta es proporcional al campo y a eso es a lo que se denomina régimen lineal. Sin embargo, cuando el campo aplicado es muy intenso, la respuesta puede dejar de ser proporcional al campo aplicado, a eso es a lo que se denomina régimen no lineal. De forma general, y sin entrar en detalles, podemos decir que la polarización P generada por un campo E es de la forma:

$$P = \epsilon_0 \left(\chi^{(1)} E + \chi^{(2)} EE + \chi^{(3)} EEE + \chi^{(4)} EEEE + \chi^{(5)} EEEEE + \dots \right)$$

El primer término es el denominado término lineal. En el caso lineal la polarización -a una frecuencia- es proporcional al campo -a esa frecuencia-. En el caso no lineal, vamos teniendo acoplamientos a orden progresivamente mayor entre los campos, que posibilitan la generación de nuevas frecuencias.



Figura 13: Un láser de Nd:YAG, a 1064 nm, doblado en frecuencia. A la izquierda, la tapa está quitada y se aprecian las lámparas de flash y el elemento doblador de frecuencia, en primer plano a la izquierda del todo. En este caso el elemento doblador es un cristal de KDP, que se encuentra en una cavidad sellada por ser hidrófilo. A la derecha, se aprecia la salida del haz doblado en frecuencia, a 532 nm, de color verde intenso.

La propagación en este régimen no lineal ha permitido una serie de nuevos efectos y tecnologías²⁰, entre ellas la generación de nuevas frecuencias, armónicos de la radiación incidente. La generación de segundo armónico, es decir un proceso en EE , en la que la suma de un campo que oscila a una frecuencia más otra vez ese campo genera un nuevo campo que oscila a doble frecuencia, es algo ya común desde hace bastantes años.

Los elementos dobladores de frecuencia, como se denominan, son habituales actualmente a todas las escalas. Un ejemplo se muestra en la figura 13.

Si aumentamos la intensidad, podremos tener procesos no lineales de orden más alto. Con los láseres tan intensos que hemos comentado, no sorprendería pensar en el tercer armónico, en el cuarto, etc... Lo peculiar de estos láseres intensos es que con ellos se puede llegar a armónicos de orden realmente muy alto, cincuenta, cien o incluso más. A eso es a lo que se denomina generación de armónicos de orden muy alto. Además, aunque hemos empezado con un láser infrarrojo, estos armónicos de orden tan alto quedan en el ultravioleta de vacío y se aproximan a los rayos X.

Para entender los procesos físicos que dan lugar a estos armónicos de orden tan alto, no es suficiente con analizar procesos perturbativos de orden progresivamente mayor como los que acabamos de exponer. Ahora es necesario describir la dinámica de los electrones ionizados, pues los armónicos de orden muy alto se deben a que los electrones después de ionizarse, son acelerados hasta llegar a energías muy altas. Al incidir un láser intenso (por encima de la supresión de barrera) sobre un átomo, lo que hace es arrancar (casi más que ionizar) los electrones externos de los átomos. Estos electrones están fuertemente acelerados por el propio láser y empiezan a describir un movimiento oscilatorio. En este proceso oscilatorio pueden sufrir colisiones con el ion del que proce-

dían, o con todo lo que encuentren en el camino. Estas colisiones van a representar una aceleración/frenado de la carga y van a generar campos electromagnéticos.

La generación de radiación por una carga en movimiento viene determinada por su aceleración. La generación de radiación detectable en un experimento es la suma coherente de la radiación generada por cada una de las cargas en movimiento. Además, cuando la carga está descrita por una función de ondas cuántica, en el límite dipolar, podemos asociar la aceleración de la carga al valor esperado dependiente del tiempo del operador aceleración. De su espectro podemos extraer el espectro de nuevas frecuencias generadas.

Los primeros experimentos sobre generación de armónicos de orden alto, en gases nobles, fueron realizados en el CEA de Saclay (Francia) entre 1985 y 1990¹³. En estos veinte años, el campo ha ido madurando y ahora la generación de armónicos de órdenes entre 30 y cien se considera algo standard y bien establecido, a la vez que los límites se están extendiendo hacia los rayos X. Los armónicos son coherentes con el láser infrarrojo que los ha generado. Es decir, son radiación láser. Esta es una de las técnicas más prometedoras para alcanzar láseres en la región de los rayos X, aunque hay otras en principio mucho más potentes que están actualmente en desarrollo²¹.

Ahora sabemos que la generación de armónicos puede describirse de forma totalmente satisfactoria a partir de la resolución numérica de la ecuación de Schrödinger dependiente del tiempo. Eso para el caso de un átomo monoeléctrico es ahora razonablemente sencillo, Fig. 14. La cosa se complica para átomos de más electrones, aunque en la descripción de los espectros de armónicos los efectos de correlación electrón-electrón no son demasiado importantes.

En la búsqueda de modelos más sencillos y directos, el de más éxito es el modelo de

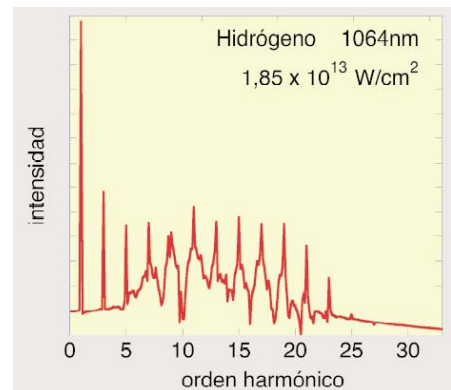
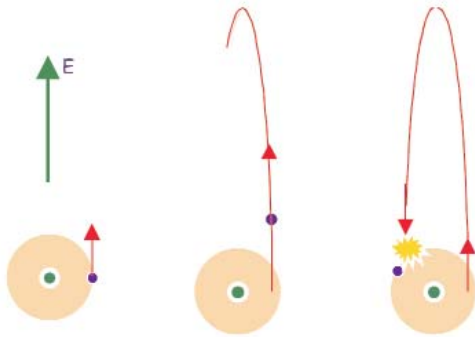


Figura 14: Representación de los armónicos generados por un átomo de hidrógeno irradiado con un láser intenso, calculados mediante integración numérica de la ecuación de Schrödinger dependiente del tiempo. Este espectro muestra la típica estructura de meseta, con una región entre los armónicos 5 y 27 de amplitudes aproximadamente iguales. A partir del armónico 31 la intensidad decrece rápidamente. Por razones de simetría, solamente los armónicos impares son posibles.



Primera etapa: el electrón se ioniza dentro del haz láser por efecto túnel.

Segunda etapa: el electrón se acelera en el láser. Cuando la fase inicial es la adecuada, el electrón puede volver a las proximidades del punto inicial.

Tercera etapa: el electrón se recombina con el ion del que había salido y genera un fotón de ultravioleta o de rayos X.

Figura 15: Representación esquemática de las tres etapas básicas de la generación de armónicos de orden alto por recombinación de un electrón recién fotoionizado. Los tratamientos mecánico-cuánticos exactos han validado plenamente este modelo de tres etapas.

El electrón (si está en régimen no relativista) sólo puede emitir armónicos en las cercanías del núcleo, pues es en esa zona donde su aceleración tiene muchas componentes armónicas. Sin el efecto del núcleo (o de otro átomo o ion con el que colisione) el electrón sólo absorbe y emite estimuladamente (a la frecuencia del láser y con su misma dirección y polarización).

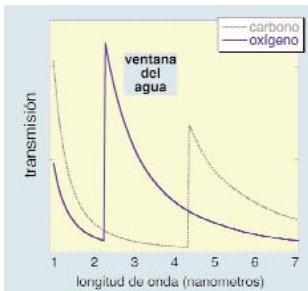


Figura 16: Transmisión de rayos X a través del agua (oxígeno) y del carbono. Las unidades del eje vertical son arbitrarias, pero en ambos casos (carbono y oxígeno) la densidad es la misma. La ventana del agua es una zona entre los 2,2 y los 4,3 nanómetros en la que el agua absorbe mientras que el carbono no absorbe. Esto es de interés biológico, pues los átomos de carbono absorben mucho más que los átomos de oxígeno (integrantes de las moléculas de agua, lo más abundante en un ser vivo). Así se tiene una forma "diferencial" de obtener distribuciones de proteínas en el interior de células, pues cuando se irradia en la ventana del agua, las partes con más contenido de carbono aparecen más oscuras.

tres etapas propuesto a mitad de los 90, Fig. 15. La idea consiste en pensar que la ionización se produce siguiendo las tasas de ionización por efecto túnel indicadas por la física cuántica, pero luego el movimiento de los electrones es esencialmente clásico hasta que vuelven a colisionar con el átomo -si es que colisionan- y entonces generan un fotón de frecuencia elevada. La energía que tiene el electrón en esta recollisión es sencillo demostrar que no puede superar las 3.2 veces la energía ponderomotriz. La energía ponderomotriz es la energía cinética que en promedio tiene un electrón en el seno de una onda y es proporcional a la intensidad e inversamente proporcional al cuadrado de la frecuencia (por una vez, vemos que es bueno trabajar en el infrarrojo, puesto que cuanto más lentamente varía el campo, más tiempo tenemos para que se acelere el electrón).

Los armónicos de orden alto se comienzan a plantear como un complemento a la radiación del sincrotrón. El sincrotrón es una fuente de rayos X muy intensa pero muy poco coherente. El disponer de una fuente comparativamente débil, pero coherente, abre una serie de posibilidades -tipo espectroscopía de bombeo y prueba- que están empezando a ser consideradas seriamente en la actualidad (uno de estos casos es la colaboración de este tipo planteada entre el futuro sincrotrón de Barcelona y el Servicio Láser de Salamanca). En la figura 16 se muestra una región de los rayos X conocida como ventana del agua. Hasta ahora sólo se llegaba a la ventana del agua empleando sincrotrones. Actualmente, con la generación de armónicos de orden elevado se está empezando a llegar a la ventana del agua.

UNA APLICACIÓN INESPERADA: LOS PULSOS DE ATTOSEGUNDO

Ahora que ya estamos más o menos convencidos que con uno de estos láseres se pueden generar armónicos de orden alto, podemos volver a la idea del *mode locking* pero dando un paso más allá. Si tenemos una serie de frecuencias, y escogemos algunas de ellas que queden en la región de meseta como la mostrada en la figura 14, entonces, si las fases son las adecuadas, podremos generar pulsos cortos.

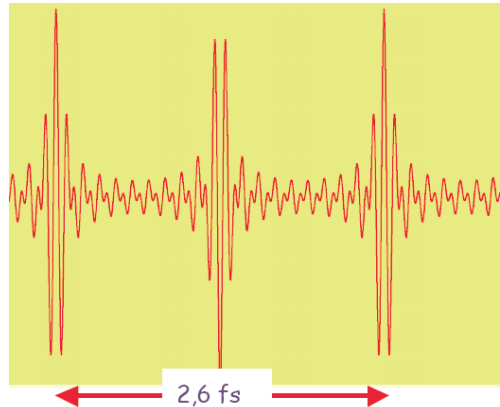


Figura 17: Suma de 10 armónicos consecutivos, del 21 al 41 (sólo los impares), todos ellos con la misma fase. Se aprecia claramente la formación de un tren de picos subfemtosegundo. El periodo del láser es de 2.6 femtosegundos (longitud de onda 800 nm). Típicamente la anchura de cada pico es del orden de 100 attosegundos (una décima de femtosegundo).

Veamos un ejercicio básico de series de Fourier. Si sumamos una serie de armónicos, impares, todos de la misma amplitud y con las fases relativas adecuadas, el resultado que obtendremos es un tren de pulsos muy estrechos (menores que el periodo fundamental). Por ejemplo, sumando los armónicos 21, 23, ... 39 y 41 obtenemos un tren de picos como el mostrado en la figura 17.

Como sucede a menudo, ahora se repiten las ideas que llevaron al *mode locking*, pero a una escala temporal más de tres órdenes de magnitud más corta. Eso es la entrada a los pulsos de attosegundos y representa la actual frontera de la física

LÁSER DE ATTOSEGUNDOS

Supongamos que ya tenemos controlado cómo generar muchos armónicos y que sabemos cómo van sus fases relativas. Supongamos que sabemos filtrarlos convenientemente para quedarnos con una región de fases y amplitudes adecuada. Todo eso hoy en día es algo que está razonablemente controlado. El problema es que así tenemos un tren de pulsos de attosegundo como el mostrado en la figura 17. El reto actual no es el de un tren de pulsos, sino el logro de un único pulso subfemtosegundo. Veamos como obtenerlo.

Para tener un pulso único de attosegundos es fundamental comenzar por un pulso de muy pocos ciclos. Las técnicas de *mode locking* en láseres de Ti:Zafiro se han llevado al límite y es posible lograr ahora pulsos de entre cinco y diez femtosegundos, del tipo de los mostrados en la figura 12. Para dar una idea de lo que esto representa, hay que tener presente que un pulso de diez femtosegundos tiene una anchura espectral de aproximadamente cien nanómetros. Por tanto la anchura espectral de estos pulsos es comparable a la anchura de la banda visible del espectro, sólo que está centrada en el infrarrojo.

Cuando estamos considerando pulsos de tan pocos femtosegundos, la fase de la portadora respecto a la envolvente del pulso comienza a ser importante. En la figura 18 se ilustra esto. Los dos pulsos (centro y derecha) tienen la misma envolvente y, por tanto, la misma duración. Sin embargo la fase de la portadora es diferente en ambos casos. En el que hemos llamado pulso seno, la fase es tal que el campo es cero justo en el máximo de la envolvente. A su vez, en el que hemos denominado coseno, el campo es máximo en el máximo de la envolvente. Uno y otro pulso van a dar dinámicas de los fotoelectrones muy diferentes. Ahora se empieza a poder controlar la fase de la portadora y hay unos cuantos laboratorios en el mundo capaces no sólo de

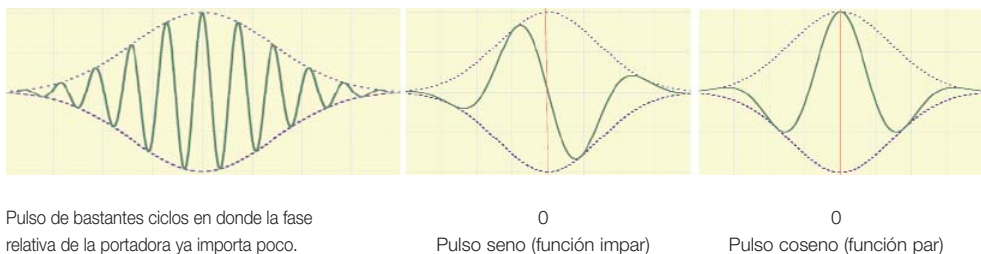


Figura 18: Cuando los pulsos tienen más de 10 ciclos (30 femtosegundos) la fase de la portadora respecto a la envolvente importa poco (a la izquierda). Sin embargo, cuando el pulso es del orden de dos ciclos, entre cinco y 10 femtosegundos, la fase de la portadora respecto de la envolvente es básica para entender el perfil del campo eléctrico (como se ve en los dibujos central y de la derecha).

crear pulsos por debajo de los diez femtosegundos, sino pulsos con la fase controlada.

¿Por qué es tan importante la fase? Pues porque en el caso del pulso seno mostrado en la figura 18 vamos a tener electrones ionizados hacia un lado por la primera mitad de la oscilación y luego electrones ionizados hacia el otro lado por la segunda mitad de la oscilación. Sin embargo en el caso del pulso coseno, tenemos un único gran máximo del campo. Es decir, en este caso vamos a tener un paquete electrónico ionizado debido al máximo central del

campo, tal que cuando este paquete recolisione generará un paquete de armónicos de duración subfemtosegundo mucho más importante que el que puedan generar los dos mínimos que hay justo antes y justo después. Esta es la clave para el pulso único de attosegundos, como se indica en la figura 19. El récord actual está en pulsos entorno a una décima de femtosegundo, o sea 100 attosegundos²². Otro gran problema que ha tenido el desarrollo de los pulsos de attosegundo es su detección. Cien attosegundos es la señal temporal más corta que se ha generado en la física de forma intencionada y controlada, y no había ningún detector capaz de llegar a esta escala. No vamos a entrar en el problema de los detectores subfemtosegundo, sólo decir que hay ya formas de hacerlo pero este tema todavía necesita consolidación.

ATTOFÍSICA

Imaginemos por un momento que ya tenemos realmente un láser de attosegundos comercializado y perfectamente operativo. La siguiente pregunta es qué hacer con él. El desarrollo de los pulsos de 100 femtosegundos abrió rápidamente el campo denominado femtoquímica, pues los átomos resultantes de la ruptura de una molécula se mueven a escalas de nanómetros por femtosegundo. A escalas de attosegundo, lo más obvio de encontrar son los periodos orbitales de los electrones atómicos.

La pregunta es muy sencilla, aunque posiblemente un poco heterodoxa desde el punto de vista de la mecánica cuántica: si un electrón atómico orbita alrededor del

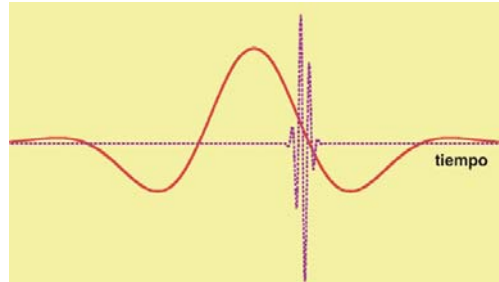


Figura 19: Campo eléctrico en función del tiempo para representar esquemáticamente la forma en la que se genera un pulso único de attosegundos. El pulso infrarrojo ultracorto (línea roja continua) ioniza y acelera los electrones en su pico de amplitud. Estos al recombinarse generan un único pulso de duración mucho menor (línea violeta punteada).

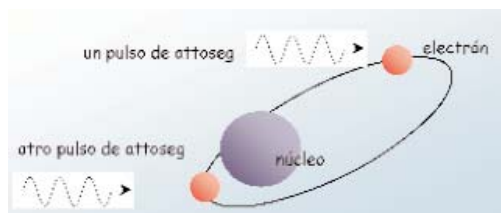


Figura 20: Representación esquemática de un posible experimento futuro con pulsos de attosegundo para detectar un paquete de ondas cuántico electrónico en órbita alrededor de su núcleo.

núcleo, ¿podemos detectarlo en una escala de tiempos menor que el tiempo orbital? En este caso podríamos detectar el electrón a un lado o al otro del núcleo, sin hacer un promedio en la órbita, como sucede ahora. Una representación esquemática de lo que se podría hacer aparece en la figura 20, donde el objetivo es enviar pulsos que tengan una duración mucho menor que el tiempo orbital. Así cada

pulso de attosegundos detectaría el paquete electrónico en un punto diferente de la órbita. También se podrían emplear para excitar electrones internos y ver su recombinación. Ahora se excita un electrón con un pulso que dura más que la vida del hueco de la capa interna que se produce. Así la recombinación de los electrones externos comienza antes que haya finalizado el propio pulso de excitación. El resultado vuelven a ser *fotos movidas*, es decir se detectan señales (espectros) que mezclan varias cosas. Con un pulso de attosegundos se podría excitar un electrón interno de forma mucho más limpia, es decir, de forma que cuando haya acabado el pulso de excitación, la probabilidad de recombinación sea todavía despreciable.

Estos experimentos a nivel atómico todavía no son totalmente factibles, pues justo hemos atravesado la frontera subfemtosegundo. Lo que sí empieza a ser viable son muestreados de la nube electrónica de moléculas sencillas en proceso de disociación o de vibración. Por ejemplo imaginemos una molécula biatómica sencilla que vibre. Como el movimiento de los iones es más lento que el de los electrones, podemos suponer que los electrones se ajustan instantáneamente a la distancia interiónica (algo así como la aproximación de Born-Oppenheimer). Lo que ahora se puede obtener son fotos de esta nube electrónica para diferentes distancias interiónicas durante esta vibración. Es decir, se están haciendo las primeras fotos en tiempo real de paquetes de onda electrónicos. La attofísica ha comenzado ya. Aunque no sabemos a dónde nos llevará, lo que es seguro es que estamos explorando una frontera de la física, la frontera de lo ultrarrápido.

CIENCIA Y LEYES

Es lógico que los cambios legislativos lleven un cierto retraso, pero a veces eso resulta en cosas curiosas, como la definición de radiación ionizante. Debido a que hay que

fijar estándares y dosimetría para radiaciones por sus implicaciones sanitarias, es necesario tener definiciones precisas y validadas legalmente.

En el BOE del jueves 26 de julio del 2001 en las páginas 27.285-27.393, aparece un extenso Real Decreto por el que se aprueba el Reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes. En concreto, en la página 27.300 se define: "*Radiación ionizante: transferencia de energía en forma de partículas u ondas electromagnéticas de una longitud de onda igual o inferior a 100 nanómetros o una frecuencia igual o superior a 3×10^{15} hertzios, capaces de producir iones directa o indirectamente*". O sea, que nosotros, con láseres de Ti:Zafiro (800 nanómetros de longitud de onda) no cumplimos esta ley puesto que **ionizamos con radiación no ionizante**. Diga lo que diga el BOE, nosotros ionizamos. Desde luego hay que tomar precauciones sanitarias. La radiación a 800 nanómetros no es tan peligrosa como la radiación ultravioleta, pero cuando la intensidad llega a los límites tan enormes que hemos presentado aquí, la cosa cambia.

CONCLUSIONES

A partir lo que hemos visto, podemos afirmar que nuestra concepción del efecto fotoeléctrico ha evolucionado profundamente en estos cien años. La interpretación propuesta por Einstein en 1905 abrió un camino totalmente innovador. Posteriormente esta interpretación fue ajustada tras la consolidación de la física cuántica. Recientemente la fenomenología relacionada con el efecto fotoeléctrico ha tenido una evolución explosiva gracias a los avances de los láseres y especialmente a la tecnología de los láseres CPA. Estos láseres han permitido una incursión extraordinariamente fructífera en el territorio de los campos electromagnéticos ultraintensos y en el territorio de los efectos ultrarrápidos. Ambos campos están actualmente en continua expansión y es previsible que las últimas ideas aquí expuestas queden anticuadas en breve tiempo, o quizás ya lo estén.

AGRADECIMIENTOS

No queremos finalizar sin manifestar nuestro agradecimiento a Pedro González y a Carlos Ferreira por la organización de estas jornadas y por darnos la posibilidad de participar en ellas.

REFERENCIAS

- ¹ A. Einstein, *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt*, Annalen der Physik 17 (1905) 132. Este mismo trabajo está reimpresso, junto a los restantes trabajos de A. Einstein en Annalen der Physik, en un suplemento conmemorativo del centenario: Annalen der Physik (Leipzig) 14 Supplement (2005) 164. Existen diversas traducciones al inglés, al castellano y al catalán.
- ² No obstante, Einstein siempre estuvo al corriente de los experimentos más relevantes en Física que se realizaban en el momento, el significado y consecuencias de los cuales sabía captar muy bien.
- ³ La forma más directa de acceso a toda esta información es a través de la web: <http://nobelprize.org/physics/>
- ⁴ ¿Quién se acuerda ahora de él?
- ⁵ G. N. Lewis, *The conservation of photons*, Nature 118 (1926) 874
- ⁶ W. E. Lamb Jr., *Anti-Photon*, Applied Physics B 60 (1995) 77; W. E. Lamb, W. P. Schleich, M. O. Scully y C. H. Townes, *Laser physics: Quantum controversy in action*, Reviews of Modern Physics, 71, Centenary 1999 S0034
- ⁷ G. Wentzel, Zeitschrift für Physik 40 (1926) 574 y 41 (1926) 828; G. Beck, Zeitschrift für Physik 41 (1927) 443. Son los que demostraron que la "nueva teoría cuántica" podía describir el efecto fotoeléctrico sin emplear fotones o *quanta* de luz, usando sólo un campo electromagnético clásico dependiente del tiempo. También fue pionero A. Sommerfeld, *Atombau und Spektrallinien, Wellenmechanisches Ergänzungsband*, Friedr. Vieweg & Sohn: Braunschweig 1929.
- ⁸ S. E. Szczenionwski, *The spatial distribution of photoelectrons*, Physical Review 35 (1929) 347.
- ⁹ Javier Rodríguez Vázquez de Aldana, *Interaction of atoms with intense laser fields: theoretical study and numerical methods*, Tesis Doctoral, Universidad de Salamanca, 2001
- ¹⁰ Julio San Román Álvarez de Lara, *Relativistic Quantum Electrons in Strong Laser Fields*, Tesis Doctoral, Universidad de Salamanca, 2003
- ¹¹ Camilo Ruiz Méndez, *Few particle systems interacting with a strong laser field*, Tesis Doctoral, Universidad de Salamanca, 2005.
- ¹² J. S. Briggs y J. M. Rost, *On the derivation of the time-dependent Schrödinger equation*, Foundations of Physics 31 (2001) 693
- ¹³ M. Gavrila, editor, *Atoms in Intense Laser Fields*, Academic Press, 1992. Consta de once capítulos escritos por investigadores de diversos grupos. Da una visión muy completa del tema a la fecha de publicación, aunque los diferentes capítulos conectan poco entre sí. La generación de armónicos está revisada en el capítulo *High-order harmonic generation in rare gases*, por A. L'Huillier, L.-A. Lompré, G. Mainfray y C. Manus, de este libro.
- ¹⁴ M. Göppert-Mayer, Ann. Phys. L 9 (1931) 273; J. H. Eberly y J. Javanainen, *Above-threshold ionization*, European Journal of Physics 9 (1988) 265. Puede verse también N. B. Delone y V. P. Krainov, *Multiphoton Processes in Atoms*, Springer Series on Atoms and Plasmas, vol 13, 1994, un excelente libro que describe todo lo que se sabe hacer desde el punto de vista teórico/analítico.
- ¹⁵ Nos referimos a fenómenos de primer orden. Años más tarde, se descubrirían también los fenómenos de orden superior (o "a varios fotones", como por ejemplo el que hemos tratado hasta ahora), los cuales sólo se presentan para intensidades de luz suficientemente elevadas.
- ¹⁶ Con el paso del tiempo, Einstein pensó que la incertidumbre sobre el instante en que se produce cada proceso de interacción luz-materia existe únicamente porque los humanos todavía no conocemos sufi-

cientemente bien la naturaleza, y nos quedan aún "variables ocultas" por descubrir. Tal suposición fue refutada en los años posteriores por la Física Cuántica, pero la postura escéptica de Einstein al respecto fue fructífera en el sentido de que impulsó profundas discusiones que nos han ayudado a todos a llegar a comprender lo sorprendente que es el mundo cuántico (es decir, nuestro mundo real).

- ¹⁷ José Antonio Pérez, *Strong field ionization of alkaline atoms*, Tesis Doctoral en preparación. Universidad de Salamanca.
- ¹⁸ La solución analítica ha sido calculada en varios trabajos, por ejemplo: E. S. Sarachik y G. T. Schappert, *Classical Theory of the Scattering of Intense Laser Radiation by Free Electrons*, Phys. Rev. D **1**, 2378 (1970); J. H. Eberly, en *Progress in Optics 7*, editado por Wolf (North-Holland, Amsterdam, 1969).
- ¹⁹ G. A. Mourou, Ch. P. J. Barty y M. D. Perry, *Ultrahigh-Intensity Lasers: Physics of the Extreme on a tabletop*, Physics Today, January 1988 pag 22; S.-W. Bahk, P. Rousseau, T. A. Planchon, V. Chvykov, G. Kalintchenko, A. Maksimchuk, G. A. Mourou, and V. Yanovsky, *Generation and characterization of the highest laser intensities (10^{22} W/cm²)*, Optics Letters **29** (2004) 2837
- ²⁰ El trabajo pionero de su campo es, J. A. Armstrong, N. Bloembergen, J. Ducuing y P. S. Pershan, *Interactions between light waves in a nonlinear dielectric*, Physical Review A **127** (1962) 1918; una excelente recopilación está en N. Bloembergen, *Nonlinear Optics*, Addison-Wesley, 1992.
- ²¹ J. Mompert, R. Corbalán y R. Vilaseca, *Giant pulse lasing in three-level systems*, Physical Review A **59** (1999) 3038; J. Mompert, R. Corbalán y R. Vilaseca, *Lasing without inversion in the V-type three-level system under the two-photon resonance condition*, Optics Communications **147** (1998) 299; J. Mompert y R. Corbalán, *Lasing without inversion*, Journal Optics B: Quantum and Semiclassical Optics **2** (2000) R7.
- ²² G. A. Reider, *XUV attosecond pulses: generation and measurement*, J. Phys D: Appl Phys **37** (2004) R37; P. Agostini and L. DiMauro, *The physics of attosecond light pulses*, Reports on Progress in Physics, **67** (2004) 813; T. Fujii, J. Rauscheberger, Ch. Gohle, A. Apolonski, Th. Udem, V. Yakovlev, G. Tempea, Th. W. Hänsch and F. Krausz, *Attosecond control of optical waveforms*, New Journal of Physics **7** (2005) 116; M. Drescher y F. Krausz, *Attosecond physics: facing the particle-wave duality*, Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics **38** (2005) S727

ÚLTIMOS AVANCES EN EL MOVIMIENTO BROWNIANO: ORDEN A PARTIR DEL DESORDEN

Raúl Toral

Instituto Mediterráneo de Estudios Avanzados (IMEDEA). CSIC-Universitat de les Illes Balears, Palma de Mallorca, España

Para muchas personas, la física es el paradigma del determinismo: es posible utilizar las leyes de la física para predecir la futura evolución de un sistema. El ejemplo emblemático es el de los movimientos planetarios que se pueden anticipar con mucha antelación y precisión y donde cualquier desviación de las predicciones teóricas se atribuye a factores no tenidos en cuenta. Así, las discrepancias entre las observaciones de la órbita de Urano y las leyes de la gravitación se resolvieron con el descubrimiento del planeta Neptuno, a partir de cálculos de Urbain Leverrier. Ello nos puede llevar a creer que todo movimiento futuro está firmemente impreso en unas leyes de la naturaleza.

Este punto de vista, que es exagerado en la enseñanza tradicional de la física, tiene su máxima expresión en las palabras de Pierre Simon de Laplace quien en la introducción de su tratado *Teoría analítica de las probabilidades* escribe en 1814:

“Debemos considerar el estado presente del universo como el efecto del estado anterior y como la causa del que le seguirá. Una inteligencia que en un instante dado conociera todas las fuerzas presentes en la naturaleza y la situación respectiva de los seres que la componen, y que fuera por otra parte suficientemente amplia como para someter esos datos al análisis, incluiría en la misma fórmula los movimientos de los cuerpos mayores del universo, así como los del átomo más ligero; nada sería incierto para ella y tanto el futuro como el pasado le sería visible.”

La visión determinista del universo se puede expresar más alto, pero no más claro. Sin embargo, este punto de vista no se considera correcto hoy en día. Existen al menos tres factores que echan por tierra la visión determinista de Laplace.

En primer lugar, la mecánica cuántica, a través del principio de incertidumbre de Heisenberg, pone límites a la precisión con la que podemos conocer las velocidades y posiciones de cualquier sistema. Esta limitación es inevitable y nace del hecho de que el proceso de medida necesariamente perturba aquello que se quiere medir. Ciertamente, la imprecisión puede ser pequeña para sistemas macroscópicos pero, en cualquier caso, nos limita el conocimiento arbitrariamente preciso de las condiciones iniciales.

El segundo factor es el de la existencia de movimientos caóticos para los que una pequeña imprecisión en la condición inicial tiene unas enormes consecuencias en la evolución a largos tiempos. Es costumbre, a la que no puedo sustraerme, el ejemplarizar el caos mediante el efecto mariposa: “*el batido de las alas de una mariposa en Brasil puede generar un tornado en Texas*” tomado de una conferencia que Edward Lorenz dictó en 1972. ¡No debemos extrañarnos de que sea tan difícil predecir el tiempo atmosférico! Sabemos hoy que el comportamiento caótico o sensibilidad a las condiciones iniciales es genérico para muchos sistemas no lineales.

El tercer y último factor que echa por tierra el determinismo de Laplace es de orden puramente práctico. El número de constituyentes de cualquier sistema macroscópico es inimaginablemente alto y no es posible de ninguna manera el recoger y procesar la información sobre las condiciones iniciales de todos los constituyentes. Es incluso dudoso que pueda existir una “inteligencia suficientemente amplia” ya que ella misma tendría también un número ingente de constituyentes (posiblemente mayor que el número de partículas que quiere describir) cuya evolución también debiera incluir en sus cálculos. El orden de magnitud del número de átomos que forman un gramo de un sistema macroscópico es el número de Avogadro, o alrededor de 10^{23} . Es difícil hacerse una idea de la magnitud de este número que es comparable al número de granos de arena en una playa de varios kilómetros de longitud. Tenemos que aceptar que no es posible siquiera conocer las condiciones iniciales de todas esas partículas. El darse cuenta de la imposibilidad de una descripción detallada, determinista, de un sistema macroscópico, nos abre las puertas para otras descripciones más útiles y, quizás paradójicamente, con más poder de predicción efectivo. Einstein, en uno de los artículos de su *annus mirabilis* de 1905 introdujo una de tales descripciones para tratar el problema del llamado movimiento browniano, un problema que durante muchas décadas había permanecido sin resolver.

Robert Brown fue un botánico escocés que a principios del siglo XIX estaba estudiando la polinización de un cierto tipo de planta, *Clarkia pulchella*, para lo que observaba bajo

el microscopio una suspensión de granos de polen en agua. Observó que había unas pequeñas partículas alrededor de los granos de polen (posiblemente provenientes de la superficie de los granos mismos) que estaban en constante e irregular movimiento. Como corresponde a un buen científico, no se contentó con observar, sino que quiso describir y ver hasta qué punto este movimiento que veía en el microscopio era atribuible a alguna propiedad del polen o era algo más general. Preparó, pues, suspensiones de diversas sustancias finamente pulverizadas en agua y otros líquidos y comprobó que en todas ellas podía observar ese incesante movimiento cuyo origen no supo explicar. En palabras del propio Brown traducidas de su artículo *Sobre la existencia general de moléculas activas en cuerpos orgánicos e inorgánicos* de 1829, leemos:

“Que partículas extremadamente pequeñas de materia sólida, obtenidas a partir de sustancias orgánicas o inorgánicas, cuando están suspendidas en agua pura, o en algún otro fluido acuoso, muestran movimientos que no sé explicar, y que en su irregularidad y aparente independencia, se parecen remarcablemente a los movimientos menos rápidos de algunos de los animáculos más sencillos en infusiones. Que las partículas más pequeñas observadas, y que he llamado moléculas activas, parecen ser aproximadamente esféricas y tienen un diámetro entre 1 y 2 micras, y que otras partículas mayores y de diversos tamaños, del mismo o diferente aspecto, también presentan movimientos análogos en circunstancias parecidas.”

Se ha comprobado que otros investigadores con anterioridad habían visto el movimiento browniano, pero nadie antes que Brown había considerado que valía la pena llevar a cabo un estudio detallado del fenómeno que, justamente, lleva su nombre.

La explicación del origen del movimiento browniano tuvo que esperar mucho tiempo. Parece ser que Boltzmann dio en el clavo cuando escribió en 1896: *“Pequeñas partículas en un gas ejecutarán movimientos debidos a que la presión en la superficie de las partículas puede fluctuar.”* Esas fluctuaciones en la fuerza que actúa sobre las partículas es debida a los impredecibles choques de las moléculas del fluido con la partícula. No sabemos si Einstein conocía este artículo de Boltzmann cuando escribió en 1905¹:

“[...] según la teoría cinético-molecular del calor, cuerpos de tamaño visible pero microscópico suspendidos en un fluido efectuarán movimientos de tal magnitud que se puedan observar fácilmente en un microscopio. Es posible que esos movimientos sean idénticos al denominado movimiento molecular browniano.”

Imaginemos la situación (ver figura1): una “partícula browniana” con un tamaño de, digamos, una micra (10^{-6} m) está rodeada de moléculas con un tamaño miles de

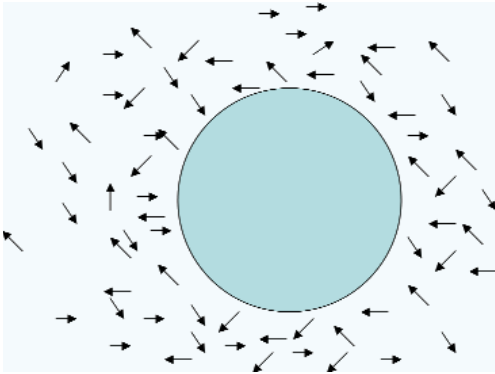


Figura 1: Una partícula browniana sometida a choques con las moléculas del fluido.

ciones y son tantas las moléculas involucradas, su efecto neto debiera ser cero (tantos choques de arriba a abajo como de abajo a arriba, tantos de derecha a izquierda como de izquierda a derecha, etc.). Sin embargo, hay diferencias debidas al azar

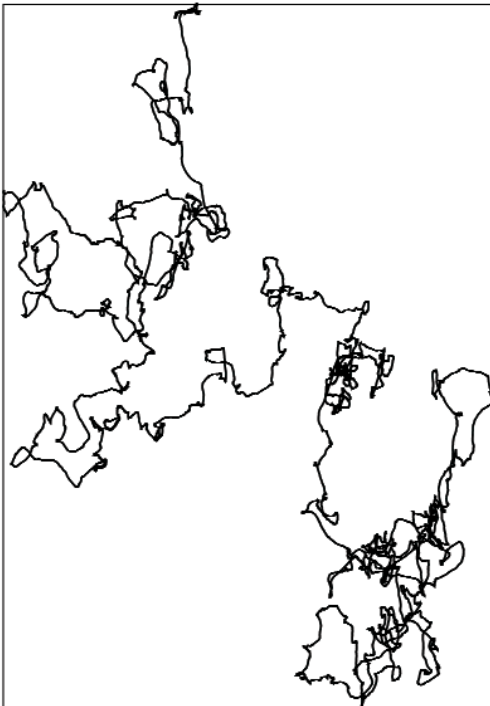


Figura 2: Trayectoria característica de la partícula browniana.

en el número de colisiones en ambos sentidos y se produce el movimiento errático típico de la partícula browniana, véase la figura 2. Laplace nos diría que si fuéramos capaces de conocer las posiciones y velocidades detalladas de todas las moléculas alrededor de la partícula y conociéramos exactamente las fuerzas que provocan las colisiones, podríamos predecir exactamente el movimiento de las moléculas y, por consiguiente, el de la partícula. Einstein fue el primero en darse cuenta de que esa descripción maximalista de Laplace era imposible y en sugerir una descripción alternativa del movimiento browniano.

La formulación de Einstein sustituye la descripción determinista por otra probabilística. Para ello se fija en la variación de la posición de la partícula

browniana a intervalos de tiempo τ . Si tomamos instantáneas separadas por un tiempo τ veremos que la posición de la partícula cambia de una a otra en un desplazamiento $\vec{\delta}$ que no es constante sino que fluctúa de observación a observación. Es esencial que el intervalo temporal τ sea mayor que los tiempos típicos de colisión que son del orden de 10^{-12} s, pero a su vez que sea menor que los tiempos macroscópicos de observación (del orden del segundo o algo inferior). Digamos que τ es del orden de 10^{-6} s. Einstein introduce la función densidad de probabilidad, $f(\vec{\delta})$, de manera que $f(\vec{\delta})d\vec{\delta}$ representa la probabilidad de que la variación de la posición al cabo de un tiempo τ esté en el intervalo $(\vec{\delta}, \vec{\delta} + d\vec{\delta})$. No es necesario intentar describir la forma detallada de $f(\vec{\delta})$. Podemos intuir, debido a la ley de los grandes números, que tendrá una forma gaussiana, pero realmente lo único que nos hace falta suponer es que es simétrica en las tres direcciones espaciales o, lo que es lo mismo, que las colisiones no favorecen ninguna dirección o sentido, de manera que

$$\int d\vec{\delta} \vec{\delta} \cdot f(\vec{\delta}) = 0$$

Ahora Einstein considera la densidad de probabilidad, $n(\vec{r}, t)$, definida de manera que la probabilidad de que la partícula browniana esté en el intervalo $(\vec{r}, \vec{r} + d\vec{r})$ en el tiempo t es $n(\vec{r}, t)d\vec{r}$. Es fácil escribir la manera en la que cambia $n(\vec{r}, t)$ entre instantáneas:

$$n(\vec{r}, t + \tau) = \int d\vec{\delta} f(\vec{\delta}) n(\vec{r} - \vec{\delta}, t)$$

Traducida a palabras, esta ecuación nos dice que la probabilidad de que una partícula esté en el lugar \vec{r} en la foto tomada en el tiempo $t + \tau$ es igual a la probabilidad de que estuviera en el lugar $\vec{r} - \vec{\delta}$ en el tiempo t multiplicada por la probabilidad de que se haya desplazado una distancia $\vec{\delta}$ en el intervalo de tiempo τ , integrada para todas las distancias $\vec{\delta}$. Esta ecuación, que expresa con una pasmosa sencillez la evolución de la probabilidad de observación de la posición de la partícula browniana, se conoce con el nombre de ecuación de Chapman-Kolmogorov.

Desarrollando en doble serie de Taylor (en \vec{r} y t) la anterior ecuación, Einstein llega a la ecuación de difusión:

$$\frac{\partial n(\vec{r}, t)}{\partial t} = D \nabla^2 n(\vec{r}, t)$$

estando relacionado el coeficiente de difusión D con el segundo momento de la distribución $f(\vec{\delta})$. Con otro tipo de argumentos, Einstein relaciona el coeficiente de difusión con otras propiedades tales como la temperatura del fluido, el coeficiente de fricción y la constante de Boltzmann. La solución de la ecuación de difusión, que está explicada en muchos libros de física, se comporta como uno espera intuitivamente: al no haber una dirección privilegiada, la partícula browniana no se mueve en promedio:

$$\langle \vec{r}(t) \rangle = 0$$

Sin embargo, a medida que pasa el tiempo aumenta la probabilidad de que la partícula esté en lugares cada más alejados de punto inicial donde empezó el movimiento. El cálculo detallado lleva a que el desplazamiento cuadrático medio es proporcional al tiempo:

$$\langle \vec{r}(t)^2 \rangle = 6Dt$$

una predicción teórica comprobada experimentalmente por Jean Baptiste Perrin, entre otros. Es fácil dejarse engañar por la aparente sencillez de este resultado. La predicción de que el desplazamiento cuadrático medio de la partícula browniana sea proporcional al tiempo constituye uno de los resultados más importantes de la física puesto que este efecto es una causa **directa** de la existencia de los átomos. En una época en que la naturaleza atómica de la materia se explica en los libros de texto de primaria, no hay que olvidar que la polémica sobre la existencia de los átomos se originó en la Grecia clásica, y que todavía a principios del siglo XX, físicos muy respetables (por ejemplo Ernst Mach, cuya filosofía tanto influyó en los trabajos del joven Einstein sobre la teoría de la relatividad, por otra parte) negaban la existencia de los átomos y, a lo más, les otorgaban una especie de entidad como “representación mental” útil de la realidad, pero no como la realidad misma. La verificación experimental de la predicción de Einstein constituyó el espaldarazo definitivo a la teoría atómica. Además, la fórmula de Einstein decía a los experimentalistas en qué debían fijar su atención. Hasta entonces, los esfuerzos experimentales se habían centrado en caracterizar la velocidad de la partícula, un trabajo abocado al fracaso debido a su carácter errático.

Fue Paul Langevin quien en 1907 reinterpretó los resultados de Einstein mediante la introducción de una fuerza aleatoria. El razonamiento de Langevin divide el efecto de las innumerables colisiones de los átomos contra la partícula browniana en una componente determinista que tiende a frenar la velocidad de dicha partícula (y que se puede aproximar por una fuerza de rozamiento proporcional a la velocidad, $-\gamma \vec{v}$, siendo γ el coeficiente de rozamiento) y una componente aleatoria, $\vec{\zeta}(t)$, que da cuenta

del hecho de que no conocemos en detalle las interacciones que se están produciendo en cada instante de tiempo. Langevin escribe así la ecuación de movimiento de Newton “fuerza igual a masa por aceleración” como

$$m \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = -\gamma \vec{v} + \vec{\zeta}(t)$$

una ecuación que hoy en día lleva el nombre de Langevin y en la que a la parte estocástica de la fuerza se la conoce como “ruido”. El ruido representa aquella componente de la fuerza que no se puede conocer con toda precisión debido a la falta de conocimiento detallado de las posiciones y velocidades de los átomos en todo momento. Se abandona otra vez una descripción maximalista *à la Laplace*, y la componente estocástica de la fuerza se describe probabilísticamente, dando sus propiedades estadísticas. Esta descripción es particularmente sencilla: dado que el ruido es una fuerza debida a la acción de un gran número de contribuciones, invocamos el teorema del límite central para utilizar una distribución gaussiana para cada una de las componentes de $\vec{\zeta} = (\zeta_x, \zeta_y, \zeta_z)$, y es sabido que para caracterizar una distribución gaussiana basta dar el valor medio y las correlaciones. Según la discusión general, el valor medio de cada componente de la fuerza ha de ser cero, $\langle \zeta_x(t) \rangle = \langle \zeta_y(t) \rangle = \langle \zeta_z(t) \rangle = 0$, ya que no se favorece ninguna dirección espacial. Las diferentes direcciones x, y, z son independientes entre sí. Por último, debido a la invariancia temporal, la correlación entre el valor de la fuerza en dos tiempos sólo puede ser una función de la diferencia de tiempos, $\langle \zeta_i(t) \zeta_i(t') \rangle = C(t-t')$. Como los valores de la fuerza sólo pueden estar correlacionados a una escala temporal τ_0 del orden del tiempo característico de una colisión, la función de correlación del ruido se aproxima mediante un decaimiento exponencial con el tiempo característico τ_0 :

$$C(t-t') = \frac{G}{\tau_0} e^{-\frac{|t-t'|}{\tau_0}}$$

Aquí G es una constante que mide la intensidad del ruido. Dado que el tiempo de correlación τ_0 es mucho menor que el tiempo característico de observación del movimiento de la partícula browniana, como hemos discutido con anterioridad, se toma la aproximación $\tau_0 \rightarrow 0$, que lleva a que la función de correlación sea una delta de Dirac:

$$C(t-t') = 2G\delta(t-t')$$

En esta aproximación, se dice que $\vec{\zeta}$ es un ruido “blanco”². Resolviendo la ecuación

de Langevin es posible obtener que las fluctuaciones en la posición de la partícula browniana crecen linealmente con el tiempo $\langle \vec{r}(t)^2 \rangle = \frac{6G}{\gamma^2} t$, como en el tratamiento de

Einstein, de manera que el coeficiente de difusión es $D = \frac{G}{\gamma^2}$. Un razonamiento basado en el teorema de equipartición de la energía permite llegar a que la intensidad de ruido G es proporcional a la temperatura $G = \gamma kT$, con lo que se deduce $D = \frac{kT}{\gamma}$, la misma fórmula obtenida por Einstein y que permitió una medida de la constante de Boltzmann k , dando el espaldarazo definitivo a la teoría atómica.

La formulación de Langevin, que escribe una ecuación para las trayectorias con una componente estocástica de la fuerza, y la de Einstein, que trata directamente con las probabilidades de encontrar a la partícula browniana en un determinado punto del espacio, ofrecen dos puntos de vista alternativos y son completamente equivalentes en cuanto a predicciones y resultados. Ambos puntos de vista se siguen utilizando hoy en día, aunque el de Langevin es más intuitivo al permitir visualizar trayectorias de partículas individuales mediante una integración numérica de las ecuaciones de movimiento.

Desde estos trabajos pioneros de Einstein y Langevin se escucha ruido en todas partes. Si buscamos en la base de datos del ISI encontramos más de 50,000 referencias con la palabra *noise* en el título. Una búsqueda en las revistas de la Sociedad Americana de Física, nos da más de mil artículos conteniendo *noise* en el título o en el resumen. Algunas de las áreas en las que aparecen dichos artículos son: circuitos electrónicos, circulación oceánica, modelos de predicción del tiempo, emisión de luz láser, crecimiento de superficies, dinámica de poblaciones y epidemias, reacciones químicas, neuronas, etc. No podemos de ninguna manera dar una descripción, aunque sea somera, de todos y cada uno de los temas en los que aparece el concepto de ruido, pero vamos a centrarnos en algunos de ellos.

La idea de ruido tuvo una de sus primeras aplicaciones en los circuitos eléctricos. Las corrientes eléctricas son el resultado del movimiento de electrones en un conductor. En ese movimiento los electrones interactúan (“chocan”) con los átomos del conductor (y entre los mismos electrones) de una manera que no se puede describir en

detalle debido al número ingente de variables en consideración. Este “ruido” electrónico provoca fluctuaciones medibles en la intensidad que circula por el circuito. Estas fluctuaciones aumentan con la temperatura y provocan que cuando el circuito se conecta a un altavoz, se escuche un murmullo de fondo, que es el origen del término “ruido” aplicado a la fuerza estocástica. Aparte de esta fuente intrínseca de impredecibilidad, de ruido, existen otras componentes estocásticas debidas a agentes externos, tales como una soldadura defectuosa, interferencias electromagnéticas, fluctuaciones en el voltaje proporcionado por la fuente de alimentación, etc. Todas estas componentes se conocen con el nombre genérico de “ruido externo” a diferencia del ruido anterior de carácter intrínseco o “ruido interno”. Normalmente, como el ruido externo tiene un origen en algún otro componente macroscópico del sistema, no suele ser cierto que su tiempo característico sea mucho menor que el tiempo de observación y la aproximación de ruido blanco no es siempre adecuada.

Veamos otro ejemplo de presencia de ruido en un ámbito completamente distinto. Los modelos más sencillos de propagación de epidemias dividen a la población en personas susceptibles de ser infectadas (S), infectadas (I) y recuperadas de la infección y, por tanto, inmunes (R). Estos modelos SIR consideran en primera aproximación que los ritmos de crecimiento de las poblaciones S, I o R dependen unívocamente del número de personas S, I o R. Así el ritmo de crecimiento del número de infectados es proporcional al número de contactos S-I. Sin embargo, es bien sabido que un contacto entre una persona susceptible y una infectada no lleva necesariamente a que la persona sana se infecte, sino que hay una cierta componente estocástica en el proceso de contagio. Esta componente estocástica se incorpora a la descripción, mediante unos términos de ruido adecuados en las ecuaciones de ritmo, en la manera como nos enseñó Langevin.

Otro ejemplo, la circulación de corrientes oceánicas es un complejo proceso donde intervienen fuerzas macroscópicas bien determinadas (la fuerza de Coriolis, por ejemplo) con otras componentes que no se pueden determinar con precisión debidas, por ejemplo, al forzamiento de los vientos sobre la superficie marina, irregularidades en el fondo marino, etc. Otra vez, estas componentes estocásticas se describen mediante ecuaciones de Langevin con unos términos de ruido adecuados.

Veamos un último ejemplo: nuestro cerebro consta de un gran número de neuronas altamente interconectadas. Las neuronas se envían entre ellas pulsos eléctricos que son responsables de las funciones cerebrales. Aunque existen buenas descripciones del comportamiento de una neurona aislada, lo cierto es que debido al alto número de conexiones es imposible conocer con toda precisión las corrientes eléctricas que

entran en una neurona en un momento determinado y, por consiguiente, la manera precisa en que una neurona emitirá pulsos a su vez. Este desconocimiento se plasma en la adición de términos de ruido a las ecuaciones. Así por ejemplo, el modelo de FitzHugh-Nagumo para el potencial eléctrico, v , en un axón, se escribe en la forma:

$$\varepsilon \frac{dv}{dt} = v(v-a)(1-v) - \omega$$

$$\frac{d\omega}{dt} = v - w - b + \zeta(t)$$

ω es una variable auxiliar relacionada con la concentración de iones; a , b y ε son parámetros de este modelo neuronal. Aquí reconocemos otra vez nuestro ya familiar término de ruido $\zeta(t)$.

Nos está pasando como a Monsieur Jourdain, quien hablaba en prosa sin saberlo. ¡Acabamos de aprender el concepto de ruido y ahora resulta que está presente en casi todas partes y nadie nos lo había dicho! Nuestra idea general es que, a pesar de esta ubicuidad, el ruido es fuente de imprecisión y, en el fondo, es algo que nos gustaría eliminar o reducir al máximo posible. Veamos, por ejemplo, el caso de los circuitos eléctricos. Cualquier melómano estará de acuerdo en que conviene reducir al máximo los términos de ruido (sean externos o internos) de manera que la señal sea lo más “limpia” posible y no introduzca componentes aleatorias indeseadas cuando el circuito eléctrico sea usado, por ejemplo, para amplificar pequeñas corrientes que almacenan la información sobre una grabación musical. De hecho hay fabricantes de amplificadores que se jactan de reducir el nivel de ruido al “térmico”, o sea al ruido interno que no se puede eliminar por muy perfecta que sea la construcción del amplificador; por cierto, que el precio de eliminar el ruido es muy alto: estos amplificadores son especialmente caros.

Utilizando un dicho inglés muy popular podemos afirmar que “no hay ruido que sea bueno” y estaríamos muy contentos si pudiéramos minimizar en lo posible las fuentes de ruido. Sin embargo, en los últimos veinte y pocos años se han encontrado situaciones en las que la presencia de un cierto nivel de ruido puede, sorprendentemente, mejorar las prestaciones de un sistema, tal como una mejor respuesta a un estímulo externo. También es posible utilizar una fuente de ruido para inducir algún tipo de movimiento ordenado en un sistema. Estas situaciones se han etiquetado como “efecto carraca” (“ratchets”) o “rectificación de fluctuaciones”, “resonancia estocástica”, “coherencia estocástica” o “resonancia de coherencia”, “sincronización inducida por ruido”, “transiciones de fase inducidas por ruido”, etc. Todos estos resultados muestran situaciones en las que la presencia de ruido “mejora” en algún sentido la conducta de un sistema.

Otra vez, el tema ha crecido demasiado como para poder relatar aquí, aunque sea brevemente, todos estos efectos. No me resisto a mencionar que se ha propuesto un mecanismo biológico para el transporte vesicular a lo largo de microtúbulos utilizando el ruido al que está necesariamente sujeto un vesículo y el hecho de que el microtúbulo tiene una estructura asimétrica. De confirmarse este mecanismo, resultaría que la presencia de ruido es fundamental para la posible realización de los fenómenos de transporte más elementales y para la misma existencia de la vida.

El tema en el que quisiera centrarme en adelante es el conocido como “**resonancia estocástica**”, un mecanismo por el cual un sistema amplifica o reacciona mejor a un estímulo externo cuando hay un nivel de ruido adecuado. Se ha demostrado que este mecanismo está presente en el sistema nervioso de muchos animales de manera que la percepción sensorial se ve incrementada por la presencia de ruido, algo extremadamente contraintuitivo.

Para explicar este fenómeno de resonancia estocástica, debemos remontarnos al año 1981 en el que dos grupos de científicos, independientemente, propusieron el mismo mecanismo de amplificación en presencia de ruido para explicar la existencia de épocas glaciales y cálidas en la historia de la Tierra^{3,4}. Es conocido que estas épocas se suceden con una periodicidad aproximada de unos 100,000 años y la sencilla pregunta (que siempre se hace la Ciencia) es ¿por qué?

Existe, efectivamente, un mecanismo por el cual la radiación recibida del Sol oscila con un periodo aproximado de 100,000 años. La trayectoria de la Tierra alrededor del Sol no es perfectamente circular, sino elíptica y los ejes de la elipse se deforman por la influencia gravitatoria combinada del resto de los planetas de manera que la distancia media al Sol, y por consiguiente la radiación recibida, cambia con ese periodo ya mencionado. El problema es que esa variación periódica en la radiación solar recibida es demasiado pequeña para poder inducir un cambio de un clima cálido a un clima glacial o viceversa. Hace falta un mecanismo que amplifique esa pequeña señal. El mecanismo que se propuso, denominado “resonancia estocástica”, requería la presencia de fluctuaciones, de ruido, en definitiva.

Para poder explicar la resonancia estocástica, vamos a considerar el sistema biestable más sencillo posible⁵. Este sistema corresponde a una única variable x (representando la temperatura media de la Tierra, por ejemplo) cuya evolución es tal que prefiere estar en uno de dos estados, digamos $x = +1$ o $x = -1$. La ecuación dinámica más sencilla que tiene este comportamiento es:

$$\frac{dx}{dt} = x - x^3$$

En efecto, si la condición inicial es $x(t = 0) > 0$ entonces la dinámica lleva en $t \rightarrow +\infty$ a $x = +1$, mientras que $x(t = 0) < 0$ lleva a $x = -1$ en el mismo límite de tiempos grandes. Es posible visualizar la trayectoria de $x(t)$ si nos damos cuenta de que se puede escribir la evolución como

$$\frac{dx}{dt} = -\frac{dV(x)}{dx}$$

con un potencial

$$V(x) = -\frac{x^2}{2} + \frac{x^4}{4}$$

Es fácil demostrar que V siempre decrece durante la evolución dinámica, es decir

$$\frac{dV}{dt} = \frac{dV}{dx} \frac{dx}{dt} = -\left(\frac{dV}{dx}\right)^2 \leq 0$$

de manera que la dinámica se puede interpretar como la trayectoria de una canica rodando en el perfil $V(x)$ con una alta fricción de manera que caiga hacia los mínimos de $V(x)$, como corresponde a la estabilidad de ambos estados $x = \pm 1$, ver figura 3.

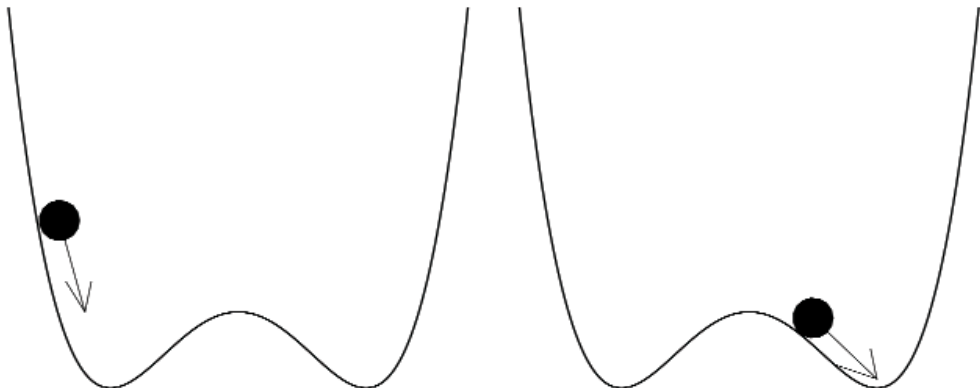


Figura 3: Visualización de la dinámica del sistema biestable como la relajación de una partícula en un

potencial $V(x) = -\frac{x^2}{2} + \frac{x^4}{4}$

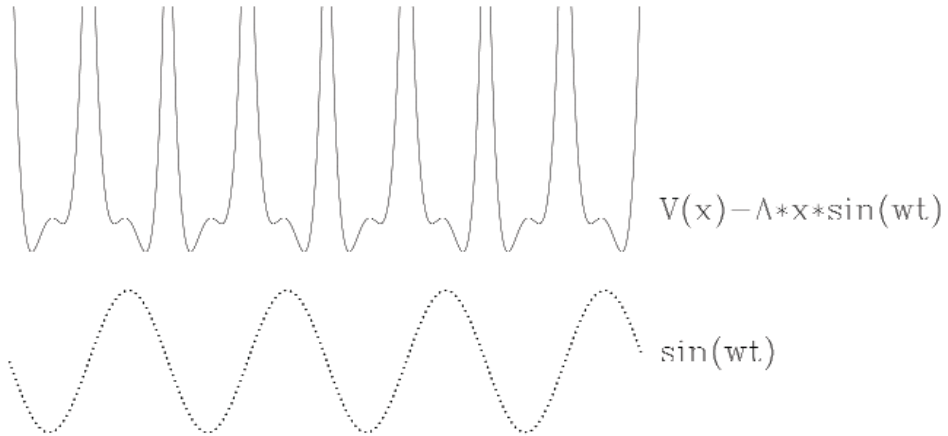


Figura 4: Mecanismo de la resonancia estocástica. Mostramos en esta figura la perturbación externa $\sin(\omega t)$

y su efecto en el potencial $V(x) = -\frac{x^2}{2} + \frac{x^4}{4} - Ax \sin(\omega t)$. Obsérvese que en los máximos de la

perturbación, el potencial es tal que favorece el salto hacia la derecha, mientras que en los mínimos de la perturbación es más fácil el salto inverso.

Si ahora aplicamos una perturbación periódica, de periodo $T = \frac{2\pi}{\omega}$, en la forma

$$\frac{dx}{dt} = x - x^3 + A \sin(\omega t)$$

el resultado es equivalente a una modificación periódica del potencial,

$$V(x, t) = -\frac{x^2}{2} + \frac{x^4}{4} - xA \sin(\omega t)$$

y el efecto es el de modificar periódicamente la altura relativa de los mínimos de $V(x)$, figura 4. Para aquellos tiempos t para los que $\sin(\omega t) > 0$ se tendrá que el mínimo en $x = +1$ se hace más profundo, mientras que para $\sin(\omega t) < 0$ es el mínimo en $x = -1$ el que se hace más profundo. Imaginemos que en un tiempo inicial, $t = 0$, la partícula está en $x = +1$ y que introducimos el forzamiento $A \sin(\omega t)$. Para el primer semiperiodo $t < T/2$ es $A \sin(\omega t) > 0$ y la partícula se reafirma alrededor del mínimo $x = +1$, cuando $T/2 < t < T$ ese mínimo se hace menos profundo y la partícula tiende hacia $x = -1$. Si la amplitud A no es suficientemente grande, el mínimo en $x = +1$ no puede abandonarse. Un razonamiento parecido aplica cuando la condición inicial es en $x = -1$. Por

tanto, para un forzamiento *débil* (concretamente para $A < 0.38$, aproximadamente) no es posible que el forzamiento externo nos obligue a cambiar de mínimo. Es la situación del clima global de la Tierra para el que el débil forzamiento externo no permite pasar de climas cálidos a glaciales o viceversa.

Imaginemos ahora que a la dinámica en cuestión se le añade un término de ruido:

$$\frac{dx}{dt} = x - x^3 + \zeta(t)$$

Si interpretamos $\zeta(t)$ como la fuerza de Langevin, la dinámica es tal que la trayectoria x va evolucionando mediante dos efectos: mientras que el potencial $V(x)$ todavía fuerza a buscar los mínimos de $V(x)$ en $x = \pm 1$, el término de ruido hace que la partícula se mueva aleatoriamente a derecha e izquierda. Eventualmente y debido a esta componente estocástica del potencial, será posible que una trayectoria que comience en $x = +1$ acabe en $x = -1$ y viceversa⁶. El tiempo medio necesario T_s para pasar de un mínimo a otro fue calculado por Kramers en el límite de ruido blanco y es

$$T_s \propto e^{\frac{\Delta V}{G}}$$

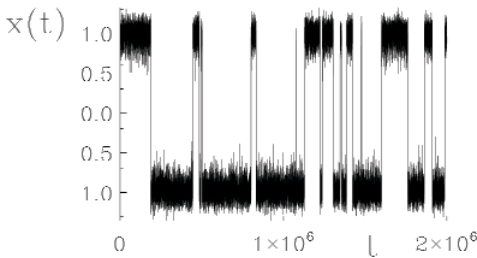


Figura 5: Trayectorias en el pozo biestable inducidas únicamente por ruido.

siendo ΔV la altura de la barrera de potencial necesaria para pasar de un mínimo a otro y G la intensidad del ruido. Como es de esperar, aunque para ruidos más intensos, el tiempo de salto entre estados es menor, cualquier intensidad de ruido hará que, eventualmente y si esperamos suficiente tiempo, tengamos la posibilidad de saltar de un mínimo a otro, véase la figura 5.

En el caso de la Tierra las componentes estocásticas en la dinámica tienen su origen en las fluctuaciones de la radiación recibida del Sol, debidas, entre otras causas, a las manchas y erupciones solares, la dinámica turbulenta de la atmósfera terrestre, etc. Si este fuera el mecanismo dominante para el paso de un clima glacial a uno cálido o viceversa, no cabría esperar ninguna periodicidad bien determinada en los saltos entre periodos cálidos y glaciares, contrariamente al periodo de 100,000 años observado. Imaginemos ahora que combinamos ambos efectos: un forzamiento débil y un término de ruido. Es decir, consideremos la ecuación:

$$\frac{dx}{dt} = x - x^3 + A \sin(\omega t) + \zeta(t)$$

Imaginemos que empezamos en $x = +1$. Cuando la profundidad del pozo alrededor de $x = +1$ es máxima, para $\sin(\omega t) = +1$, $t = T/4$, es muy difícil que los términos estocásticos nos lleven de $x = +1$ a $x = -1$ porque hay que saltar una barrera alta de potencial. Cuando $\sin(\omega t) = -1$, para $t = 3T/4$, sin embargo, la barrera de potencial se ha reducido a su mínimo valor y es más fácil que los términos estocásticos de ruido nos hagan saltar a $x = -1$. Una vez estamos en el otro mínimo, $x = -1$, el razonamiento se aplica de manera parecida. Ahora será más fácil que los términos estocásticos nos hagan saltar a $x = +1$ cuando $\sin(\omega t) = +1$. Intuitivamente esperamos (y así confirman unos cálculos algo más complejos de lo que nuestro sencillo razonamiento hace entender) que cuando $T_s = T/2$ habrá un acoplamiento óptimo entre los saltos inducidos por ruido y la variación periódica del potencial. Puesto que T_s depende de la intensidad de ruido, existe un valor de G para el que se cumple la condición de resonancia y los saltos entre mínimos siguen óptimamente la fuerza externa, véase la figura 6. Esta es una resonancia inducida por ruido y se ha llamado *resonancia estocástica* a este mecanismo de amplificación de débiles señales externas inducidas por el ruido.

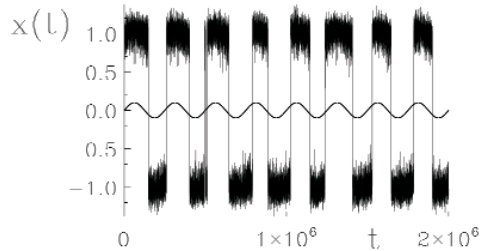


Figura 6: Trayectorias en el pozo biestable inducidas por ruido en presencia de una perturbación periódica.

Aunque no se ha demostrado completamente que la resonancia estocástica sea realmente la explicación de la alternancia entre periodos cálidos y glaciares en la Tierra, lo cierto es que el mecanismo es genérico y no requiere más que un sistema biestable en presencia de ruido y una perturbación externa. La primera demostración experimental fue debida a Fauve y Heslot⁷ quienes utilizaron un sencillo circuito electrónico biestable al que forzaron periódicamente y añadieron ruido, obteniendo efectivamente que había un valor del ruido óptimo para la amplificación de la señal periódica, tal y como se había predicho para el sencillo sistema biestable. A este resultado experimental le siguieron otros. En particular, McNamara, Wiesenfeld y Roy demostraron en 1988⁸ la existencia de resonancia estocástica en un láser en anillo. En este caso, la biestabilidad se refiere a la posibilidad de que la luz láser recorra el anillo en sentido horario o antihorario. Se encontró de manera inequívoca que los cambios de sentido se sincronizan mejor a un forzamiento periódico cuando se añade la cantidad correcta de ruido.

La idea que subyace a la resonancia estocástica es que **es posible tener un sistema que amplifique señales débiles con la ayuda de ruido**. Este comportamiento inusual del ruido llamó inmediatamente el interés de muchos investigadores y hoy en día se cuentan por cientos los artículos que se han publicado sobre este tema, bien de carácter teórico o experimental, extendiendo el fenómeno a otras situaciones (ruido de color, perturbaciones no periódicas, sistemas no biestables, sistemas caóticos, etc.)^{9,10}. Una aplicación particularmente interesante desde mi punto de vista es la que sugiere la posibilidad de tener resonancia estocástica en modelos de formación de opinión en sociedades^{11,12}. En este caso, el sistema biestable representa la opinión, favorable o desfavorable, que pueden tener los individuos de una sociedad sobre un determinado tema; la señal externa es la publicidad que se hace en favor de una u otra posición; y el ruido corresponde al libre albedrío, es decir aquellas personas que adoptan una posición u otra independientemente de lo que diga el resto de la sociedad o la propaganda.

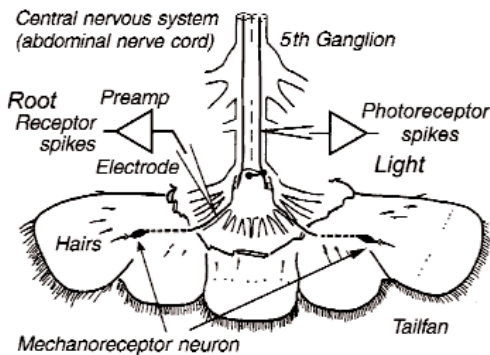


Figura 7: Esquema de la cola de langosta usada en los experimentos de resonancia estocástica. Reproducida de la referencia 14.

Quiero, en la parte final de este artículo, presentar algunos casos de interés en biología para los que se ha demostrado que existe resonancia estocástica. El primer ejemplo fue presentado por Frank Moss y colaboradores en 1994^{13,14}. Estos autores midieron el potencial de acción en una neurona de la cola de un tipo de langosta (*Procambarus clarkii*), figura 7. Esta neurona conecta directamente un pelo del sistema receptor al ganglio abdominal. La cola de la langosta (separada del cuerpo)

se puso en una solución salina en la que se provocaron ondas de baja amplitud y periodicidad de unas decenas de Herzios. Estas ondas eran tan débiles que no produjeron respuesta en el sistema mecanorreceptor de la langosta. Se añadió entonces ruido a las oscilaciones de la solución salina para observar cómo la señal oscilatoria era transportada a lo largo de la neurona de manera óptima para una intensidad de ruido correcta. Ésta fue la primera observación de resonancia estocástica en un sistema neuronal receptor del movimiento. Fue natural entonces especular si la evolución del sistema nervioso del animal había sido tal que permitiera optimizar este efecto. Si bien el trabajo determinó sin ningún tipo de dudas la existencia de resonancia estocástica en el sistema receptor de la langosta, lo cierto es que no se pudo determinar si el animal realmente utilizaba ese mecanismo como defensa frente a la acción de otros depredadores. La

idea es que el animal vive en un entorno ruidoso y puede así captar de manera óptima una oscilación del agua que corresponda supuestamente a un depredador que se acerque, de manera que puede tomar las acciones de defensa adecuadas.

Un trabajo posterior^{15,16} avanzó en esta dirección al estudiar la resonancia estocástica en el pez espátula, *Polyodon Spathula*. Este pez vive de un plancton llamado Daphnia cuya presencia reconoce mediante la detección de un débil campo eléctrico (del orden de $\mu\text{V}/\text{mm}$) que genera Daphnia. Se puso al pez espátula en presencia de Daphnia entre dos electrodos que añadían al campo eléctrico del plancton una componente estocástica, demostrándose que el pez espátula era capaz de acertar más veces a comerse el plancton cuando el ruido tenía la intensidad adecuada. Se había demostrado que un animal vivo puede usar el mecanismo de resonancia estocástica para optimizar su ritmo de captura de presas, véase figura 8.

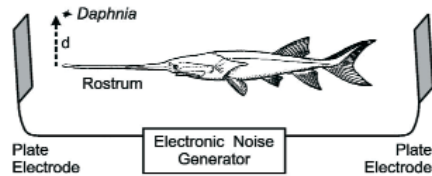


Figura 8: El pez espátula tiene centenares de células electrorreceptoras que detectan mejor el campo eléctrico generado por el plancton Daphnia si se aplica una cierta cantidad de ruido entre los electrodos. Reproducido de la referencia 16.

La idea tomó una dirección fascinante cuando un equipo dirigido por J. Collins empezó a hacer medidas de la capacidad de detección táctil en humanos¹⁷. Tomaron voluntarios determinando primero su umbral de detección, véase figura 9. Para ello aplicaban un pulso mediante una aguja a un dedo del sujeto de manera que dicho pulso estaba justo por debajo del nivel de sensibilidad y no era, por tanto, detectado por el sujeto. A continuación se añadió una componente aleatoria al pulso y se determinó en qué porcentaje de ocasiones se identificaba claramente la señal

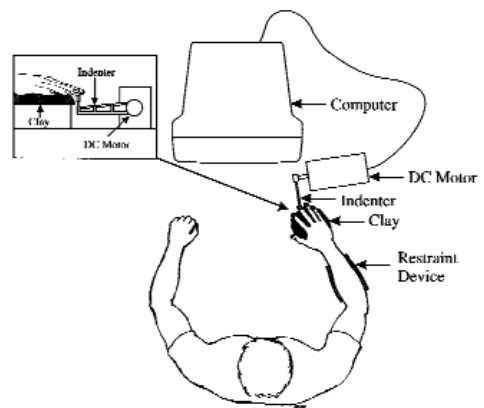


Figura 9: Esquema del experimento sobre la detección táctil de señales en presencia de ruido. Reproducido de la referencia 17.

en la yema del dedo como un pulso producido por la aguja. Se llegó a la conclusión de que el porcentaje de pulsos acertados era otra vez óptimo cuando el ruido tenía la amplitud adecuada. Concluyen los autores que el ruido puede mejorar la detección de señales

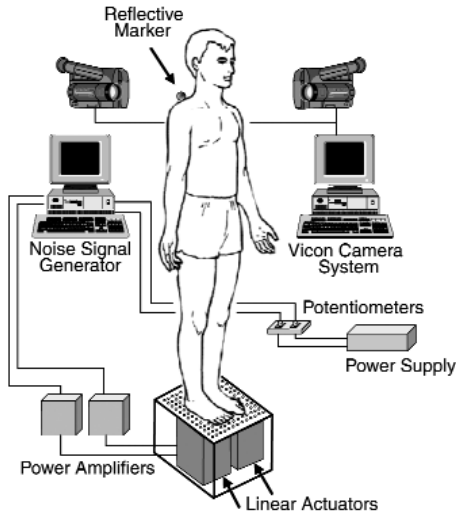


Figura 10: Esquema del experimento sobre la mejora del balance en presencia de ruido. Reproducido de la referencia 18.

en la espalda del sujeto. A continuación aplicaron a la persona “ruido en los pies”. Esto se consiguió aplicando presión mecánica en la forma de pequeños pinchazos con un gran número de agujas en la planta de los pies. Se vio que el sentido del balance era mayor cuando se le aplicaba la cantidad correcta de ruido en los pies.

Una serie de resultados avanzan en la dirección de que la resonancia estocástica está presente en muchos otros modelos de interés biológico. Sirvan como últimos ejemplos los trabajos sobre estabilización del sistema barorreflector, la resonancia estocástica que se produce en el cerebro al procesar impulsos visuales, una interesantísima interpretación del fenómeno de la *frecuencia fantasma* que se produce cuando el oído escucha una tercera frecuencia como combinación de dos de entrada (un fenómeno conocido por los fabricantes de órganos que para producir una nota muy baja, que hubiera requerido un tubo excesivamente largo, combinaban dos notas de una tesitura más alta), la resonancia estocástica en la percepción visual (figura 11); etc.



Figura 11: Un ejemplo de resonancia estocástica en el sistema visual. La débil imagen (izquierda) se observa mejor cuando se añade una cierta cantidad de ruido (centro); un ruido adicional excesivo vuelve a empeorar la calidad de la percepción (derecha). Reproducido de la referencia 19.

débiles e incluso sugieren la construcción de unos guantes con ruido añadido para mejorar la percepción en aquellas personas que, por el motivo que sea, tienen disminuidas sus capacidades sensoriales de detección.

Un grupo de investigación, también dirigido por J. Collins, estudió el efecto del ruido en el balance del equilibrio¹⁸. Tomaron voluntarios a quienes dijeron que cerraran los ojos y trataran de mantener el equilibrio estando de pie, véase figura 10. Si el lector lo intenta, verá que es inevitable un ligero balanceo que estos autores registraron mediante la reflexión de la luz de un puntero láser en un pequeño espejo

en la espalda del sujeto. A continuación aplicaron a la persona “ruido en los pies”. Esto se consiguió aplicando presión mecánica en la forma de pequeños pinchazos con un gran número de agujas en la planta de los pies. Se vio que el sentido del balance era mayor cuando se le aplicaba la cantidad correcta de ruido en los pies.

Una serie de resultados avanzan en la dirección de que la resonancia estocástica está presente en muchos otros modelos de interés biológico. Sirvan como últimos ejemplos los trabajos sobre estabilización del sistema barorreflector, la resonancia estocástica que se produce en el cerebro al procesar impulsos visuales, una interesantísima interpretación del fenómeno de la *frecuencia fantasma* que se produce cuando el oído escucha una tercera frecuencia como combinación de dos de entrada (un fenómeno conocido por los fabricantes de órganos que para producir una nota muy baja, que hubiera requerido un tubo excesivamente largo, combinaban dos notas de una tesitura más alta), la resonancia estocástica en la percepción visual (figura 11); etc.

interpretación del fenómeno de la *frecuencia fantasma* que se produce cuando el oído escucha una tercera frecuencia como combinación de dos de entrada (un fenómeno conocido por los fabricantes de órganos que para producir una nota muy baja, que hubiera requerido un tubo excesivamente largo, combinaban dos notas de una tesitura más alta), la resonancia estocástica en la percepción visual (figura 11); etc.

la resonancia estocástica en la percepción visual (figura 11); etc.

El camino iniciado por Einstein hace ahora 100 años sigue abierto. La inclusión de elementos probabilísticos en la descripción de la evolución de un sistema ha demostrado ser un método prolífico que nos ha aportado más avances que el punto de vista determinista extremo de Laplace. Creo haber dado suficiente evidencia de que, lejos de ser indeseado, el ruido puede ayudarnos en la mejora de la percepción sensorial y puede ser determinante en la misma existencia de la vida. Así aunque “no haya ruido bueno” podemos concluir que “algunos ruidos son mejores que otros”.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco la invitación del profesor Pedro González para impartir la conferencia en la que se basa este artículo, así como el amable trato dispensado durante mi estancia en Valencia. Mi investigación en estos temas es financiada por el Gobierno español y los fondos Feder de la Unión Europea a través de los proyectos FIS2004-5073-C04-03 y FIS2004-953.

REFERENCIAS

- ¹ A. Einstein, *Sobre el movimiento requerido por la teoría cinético molecular del calor, de pequeñas partículas suspendidas en un líquido estacionario*, Ann. Der Phys 17, 549 (1905).
- ² El nombre de “ruido blanco” hace referencia a la ausencia de una escala temporal característica en la fuerza estocástica, de la misma manera que la luz blanca no tiene ninguna frecuencia característica, porque las tiene todas. Como contraposición, cuando la aproximación $\tau_0 \rightarrow 0$, no es válida y es comparable a los tiempos de observación, se habla de un ruido de “color”.
- ³ R. Benzi, A. Sutera, A. Vulpiani, *The mechanism of stochastic resonance*, J. Phys. A14, L453(1981); R. Benzi, G. Parisi, A. Sutera, and A. Vulpiani, *Stochastic resonance in climatic change*, Tellus 34, 10 (1982).
- ⁴ C. Nicolis, *Stochastic aspects of climatic transitions - Response to a periodic forcing*, Tellus 34, 1 (1982).
- ⁵ Recuérdese la tradición de la física de simplificar problemas con la famosa “vaca esférica y sin masa”.
- ⁶ Este movimiento aleatorio a derecha e izquierda se conoce en la literatura científica como “el perfecto borracho”. Si le damos suficiente tiempo, el “perfecto borracho” será capaz de encontrar, por puro azar, el camino que lleva del bar a su casa.
- ⁷ S. Fauve, *F. Heslot, Stochastic resonance in a bistable system*, Phys. Lett. A97, 5 (1983)
- ⁸ B. McNamara, W. Wiesenfeld, R. Roy, *Observation of Stochastic Resonance in a Ring Laser*, Phys. Rev. Lett. 60, 2626 (1988).
- ⁹ Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop: *Stochastic Resonance in Physics and Biology*. F. Moss, A. Bulsara, M. F. Shlesinger, eds. J. Stat. Phys. 70 (1993).
- ¹⁰ L. Gammaitoni, P. Hänggi, P. Jung, F. Marchesoni, *Stochastic resonance*, Rev. Mod. Phys. 70, 223 (1998).
- ¹¹ M. Kuperman, D. Zanette, *Stochastic resonance in a model of opinion formation on small-world networks*, Eur. Phys. J.B 26, 387 (2002).

- ¹² C. Tessone, R. Toral, *System size stochastic resonance in a model for opinion formation*, Physica A351, 106 (2005).
- ¹³ J. K. Douglass, L. Wilkens, E. Pantazalou, F. Moss, *Noise enhancement of information transfer in crayfish mechanoreceptors by stochastic resonance*, Nature 365, 337 (1993); K. Wiesenfeld, D. Pierson, E. Pantazalou, C. Dames and F. Moss, *Stochastic resonance on a circle*, Phys. Rev. Lett. 72, 2125 (1994).
- ¹⁴ S. Bahar, F. Moss, *The Nonlinear Dynamics of the Crayfish Mechanoreceptor System*, Int. J. Bif. Chaos 13, 2013 (2003).
- ¹⁵ P. E. Greenwood, L. M. Ward, D.F. Russell, A. Neiman, F. Moss, *Stochastic Resonance Enhances the Electrosensory Information Available to Paddlefish for Prey Capture*, Phys. Rev. Lett. 84, 4773 (2000).
- ¹⁶ D. F. Russell, L. Wilkens, F. Moss, *Use of behavioural stochastic resonance by paddle fish for feeding*, Nature 402, 291 (1999).
- ¹⁷ J. Collins, T. Imhroff, P. Grieg, *Noise-enhanced tactile sensation*, Nature 383, 770 (1996); *Noise mediated enhancements and decrements in human tactile sensation*, Phys. Rev. E 56, 923 (1997).
- ¹⁸ A. Priplata, J. Niemi, M. Salen, J. Harry, L. Liptiz, J. Collins, *Noise-enhanced human balance control*, Phys. Rev. Lett. 89, 238101 (2002).
- ¹⁹ E. Simonotto, M. Riani, C. Seife, M. Roberts, J. Twitty, F. Moss, *Visual perception of stochastic resonance*, Phys. Rev. Lett. 78, 1186 (1997).

EINSTEIN 1905-55; CERN 1955-2005: FROM ATOMS TO QUARKS

F. E. Close

Rudolph Peierls Center for Theoretical Physics, Oxford University, UK.

We are celebrating the centenary of Einstein's great year, 1905. He died in 1955, exactly 50 years ago, and it was in that same year that CERN began its experimental work. So today I will review our changing image of matter in the universe with these two anniversaries in mind. In 1905 the basic "elements" were atoms. Scientists also knew of electrons and Einstein had that year introduced the photon, so there were already hints of the richness to come.

Thomson had discovered the negatively charged electron, a fundamental particle common to all atomic elements, in 1897. The overall neutrality of matter implied that there must be positive charge somewhere in the atom and it was Rutherford who famously deduced that it resides in the compact atomic nucleus. He did so by using alpha (α) particles as bullets. Their positive charge caused them to be repelled by the atomic nucleus and occasionally even turned back through 180 degrees. In such a case he used simply the conservation of energy to compute the distance of closest approach to the nucleus. When the α was far from the nucleus its energy is totally kinetic: $\frac{1}{2} m v^2$. As it gets nearer, its speed slows until it momentarily stops. At this point its energy is totally potential: the product of the nuclear charge and the α charge divided by the distance of closest approach, b .

Rutherford then used the conservation of energy to equate these, so $\frac{1}{2} m v^2 = \frac{2 N e^2}{b}$ ($N|e|$: nucleus charge, $2|e|$: α charge). From this he worked out the magnitude of b and found it to be an astonishingly tiny fraction of the size of an atom: about 1/10,000th in fact. He wrote that "*the distance of approach to charged centre is very small compared to the radius of the atom*", and his excitement is apparent by the "*very small*" being written so fast that it hardly leaves the horizontal line¹.

By 1955 the atomic nucleus had been further resolved to contain neutrons and protons. The perfect counterbalance of the electric charges of electron and proton suggested a profound unity at the heart of matter, but attempts to formulate the unified

theory failed. The electron and proton share few other similarities: they differ in mass by about a factor of 2000 and in size by 10,000. Three forces were recognised that operated in and around atoms: the electromagnetic, that governed the outer electrons, the strong that gave stability to the nucleus and the weak which caused certain radioactive decays. These also appeared to be utterly different from one another. There was not yet enough known to enable a unified theory to be constructed.

The discovery in cosmic rays of strange particles led to the simulation of their effects in laboratories with the development of modern high energy physics. This is an interesting story in its own right, but for our celebration of Einstein today, the cosmic rays show also a property of Einstein's relativity. Particles known as muons, which are like electrons but some 207 times more massive, are produced in collisions high in the atmosphere and can reach ground level. As a muon lives for only about 10^{-6} seconds, and hence even at the speed of light could only travel 300 metres, it is remarkable that muons manage to travel all the way from kilometres above us down to ground level (and as we shall see, even underground). The reason is due to time dilation: it lives only 10^{-6} seconds in its rest frame but, moving at high speed, it appears to an observer on the ground to live much longer, indeed, plenty long enough to make the journey. Viewed from the perspective of the muon, by whose clock it has indeed only 10^{-6} seconds to live, it is length contraction that does the trick: the ground appears to be only a few metres away rather than kilometres. The passage of cosmic ray muons through detectors on the ground, and even beneath ground, is a testimony to Einstein.

Rutherford's discovery of the atomic nucleus by the violent scattering of naturally occurring α particles, was matched 60 years later by the discovery that the nuclear particles themselves are built from yet more fundamental pieces - quarks.

The beam consisted of electrons accelerated through 30 billion volts in a 3km long tube at Stanford in California (Fig. 1). At these energies the electrons are able to resolve



Figure 1: SLAC 3km electron accelerator

distances down to some 10^{-18} m, a thousand times smaller than a proton. The violent scattering of the electrons was a high energy analogue of what Rutherford had done years before.

So far we have seen the scattering of beams by targets that sit in the laboratory awaiting them.

Today at the HERA accelerator in



Figure 2: HERA: Accelerator (left), detector (center) and image of collision (right). Electron enters from left and bounces back violently. Proton from right has its quarks produce particles that shoot off to bottom left.

Hamburg we can fire the electron beam at a counter-rotating beam of protons. This has a much more powerful effect such as when cars collide. If a car hits the rear of one that is stationary, the target car recoils and the damage is limited. However, were those two to collide head on the damage could be catastrophic. Thus we now increasingly focus on colliding beams. The point where they collide is surrounded by a cylindrically shaped detector of electronics. The electron and proton enter along its central axis and leave no trail (it is only when particles shoot through its outer regions that they leave a record). In the image (Fig. 2) the proton has entered from the right and been shattered into pieces - strongly interacting particles that are the progeny of its constituents. The electron has been turned back in its tracks. This is the most violent example of a modern version of Rutherford's scattering experiment. There are millions of examples of these. Most often the electron goes on, hardly disturbed. There are fewer where it scatters through a large angle and only a handful where it is turned around like this. However, it turns out that the distribution of the images as a function of the angle that the electron is scattered agrees with what would be expected if the quark has no discernible substructure. To the best resolution that we have, quarks and electrons appear to be truly fundamental.

So by 2005 our picture of the atom had developed to the point that we realised the proton and neutron are made of quarks. And at last a hint of unity begins to emerge. The up and down quarks that make the proton have similar masses to the electron, essentially the same size and spin. As we shall see, the way that they respond to the forces also appears similar to that of the electron.

The forces too began to show similarities. The electromagnetic and weak are now seen to be two faces of a single "electroweak" force; the strong force is a remnant of an even more powerful force acting on the quarks, known as the colour force, described by the theory of quantum chromodynamics, QCD.

We also now realise the significance that the increasing energy of our experiments has revealed changing patterns, as follows. Atoms are encoded by Mendeleev's Periodic table, a pattern. This is realised at temperatures below some thousands of degrees or energies below 10 eV: above this, atoms are ionised into plasma, and the pattern dissolves away. Nonetheless, atomic nuclei survive.

The strongly interacting particles, "hadrons", exhibit a pattern, the Eightfold Way of GellMann. This is relevant for energies up to several GeV, above which the quark degrees of freedom are manifest. Today we have the six quarks, leptons (the family of six that includes the electron) and the forces, whose properties are themselves subsumed in a pattern that we call the Standard Model. This pattern is caused by mass, which I shall explain in a moment; theory suggests that at energies in excess of 1000 GeV, or 1TeV, the mass that is the origin of this pattern will also be manifested in the form of the Higgs Boson and supersymmetry but whether this is indeed true will be for experiment to tell.

The idea of changing patterns or symmetries is familiar. Think of the snowflake with its sixfold discrete symmetry below 0 degrees Celsius (Fig. 3).

Above this temperature the snowflake melts, and the water molecules can take up any orientation: there is complete rotational symmetry. Thus do we see the transition from

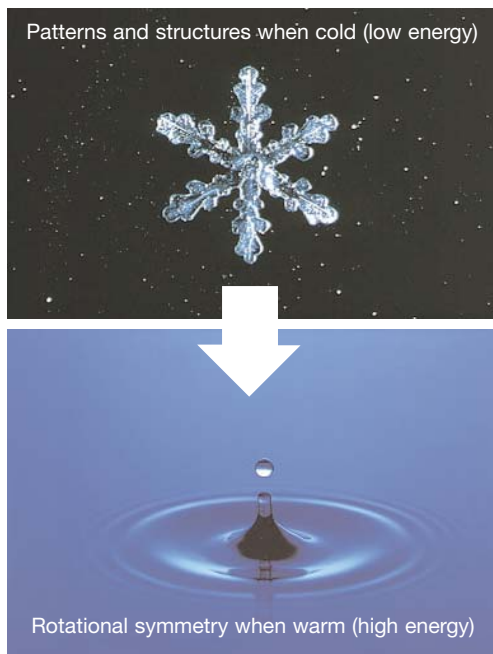


Figure 3

higher symmetries at high energy to discrete patterns at lower temperature where the underlying symmetry (rotation in this case) is hidden. We have already seen an example of this in the nature of the forces. Let's see this by returning to Einstein.

In 1905 Einstein had introduced the photon. By 1955 this was known to be the entity that transmits the electromagnetic force. It is a massless boson with spin one. Beta (β)-Radioactivity was known to be due to the weak force in 1955 but it was only later that it was shown to be transmitted by W and Z bosons. The Z boson is electrically neutral and essentially identical to the photon but for the fact that it is massive, 90 GeV. The W is also mas-

sive at around 80 GeV. We now see how it is these masses that cause the apparent “weak”-ness of their effects relative to the electromagnetic counterpart. At room temperature, with an ambient energy of under 1eV, it is easy for massless photons to transmit the electromagnetic force, but the massive W and Z at O(100 GeV) are effectively frozen out. Their effects are enfeebled; the resulting force appears weak. But now see what happens at energies above 100 GeV: at such energies it is easy for the W and Z to do their work and the resulting force is effectively as powerful as the electromagnetic. The similarities of photon, W and Z in all but mass leads to the idea that there is a single electroweak force at high energies but at lower energies, where the different masses play their roles, the force fragments into the “electromagnetic” and “weak”.

The similarities go deeper. The quarks carry electric charge but also a further charge known as colour. This follows the same rules as electric charge: like colours repel, unlike attract; the force is transmitted by gluons, analogues of photons or W and Z bosons. The similarities are profound and too extensive to describe here (see my article in Contemporary Physics²) but the message is clear: all these forces read the same rules. The suspicion is that all the forces are united at extreme energies, perhaps at the order of 10^{15} GeV, which is far beyond the ability of laboratory accelerators to test directly.

In parallel to studying what matter consists of, we have learned much about where it all comes from. This is really $E=mc^2$ at work: the concentration of energy immediately after the Big Bang was so huge that its conversion into matter, matched by antimatter, spawned our material universe. At CERN electrons and their antiparticle opposites, positrons, were sped round a 27 km ring and then collided head on. The resulting annihilation created in the laboratory a mini analogue of the early universe. From these “mini bangs” we see the basic seeds of matter (and antimatter) emerge (Fig. 4). Modern matter is the frozen endproduct of this; however, why there is no antimatter in bulk as far as we can tell, is still a mystery.

Modern high energy physics began with cosmic rays and it is interesting that this subject is now undergoing a renaissance of its own.

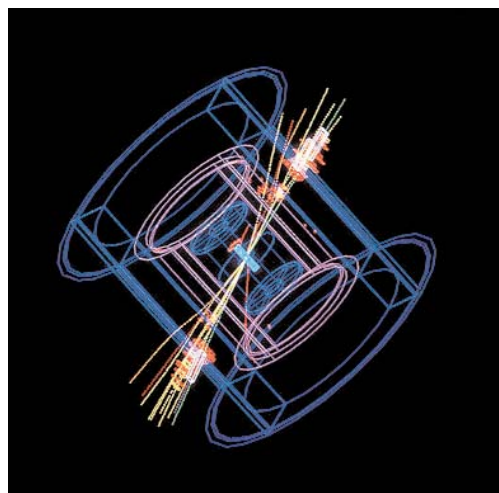


Figure 4: Mini Big Bang at LEP 1990s

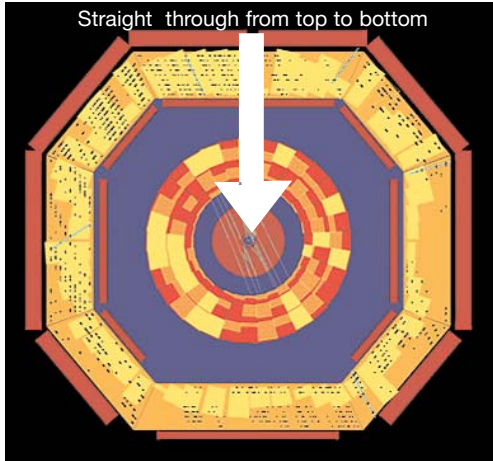


Figure 5: Cosmic rays....underground at LEP !

ground courtesy of relativity, but have penetrated 100 m of rock and, by chance, passed through the detector!

The fact that we can detect muons underground like this gives rise to some interesting physics.

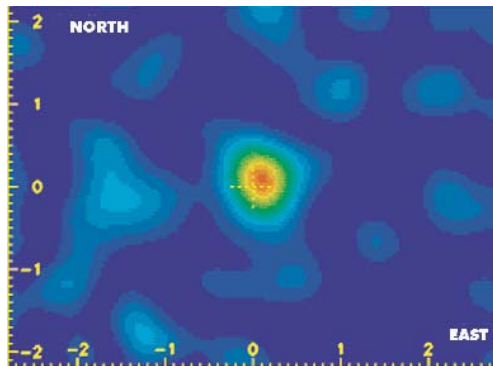


Figure 6: Moonshadow - in muons

Here is an image of trails in one of the experiments at LEP viewed from the front face of the cylindrical detector.

Normally one would expect an explosion of particles and antiparticles to emerge from a point - the mini bangs mentioned above.

However, in this case there is no sign of the usual mini Bang explosion (Fig. 5). This is because LEP was not running when this image was taken! So what caused these trails? It transpires that these are caused by muons, the result of a cosmic ray shower high above the earth. Not only have they reached

A shadow cast by the Moon has been detected (Fig. 6) in the Soudan 2 detector, 700 m underground in Minnesota! The shadow occurs in the “rain” of cosmic rays - particles from outer space which create charged muons when they collide with the Earth’s atmosphere. The shadow results from approximately 120 muons missing from a total of 33 million detected over 10 years of operation.

Neutrinos also can be detected underground.

The Sun shines in neutrinos – up through our beds by night as bright as by day. The image (Fig. 7) captures the Sun in “neutrino light”, as recorded over a period of 500 days by the Super-Kamiokande detector in Japan.

We hope someday to “see” a supernova by its neutrinos. A supernova is a star that has

exploded and emitted its contents -the periodic table of elements- out into the cosmos. It has cooked these elements from its earlier fuel, which is ultimately hydrogen, protons. In so doing many neutrinos are produced. We can detect those from our Sun and thereby proved that the sun is a fusion reactor. This is yet again $E=mc^2$ at work. The protons of hydrogen fuse together building up nuclei of the next heaviest element, helium.

The mass of a helium nucleus is less than the masses of the protons and neutrons that went into making it.

The “spare” mass is manifested as energy courtesy of $E=mc^2$. Ultimately this energy is what warms the planet and gave birth to life. To detect those from a distant supernova will need a huge detector, far bigger than we could build in a laboratory. A novel idea is to use the naturally occurring ice of the Antarctic as a detector and a series of experiments is currently being commissioned down there.

As we said earlier, we suspect that it is mass that hides the deeper underlying symmetry at work in nature. We do not really understand what mass is: it is the “m” in “ $E=mc^2$ ”, but we simply put that into the equation by hand: where it comes from is still something of a mystery. We suspect that it is created by the “Higgs mechanism”, named after its discoverer, Peter Higgs.

According to theory the first proof of this will come with the observation of a Higgs Boson, possibly at the LHC, Large Hadron Collider, currently being built at CERN and due to start work two years from now. According to theoretical simulations of what to look out for, one possible sighting could be an image like this (Fig. 8), so watch out for it!

Science has come a long way since

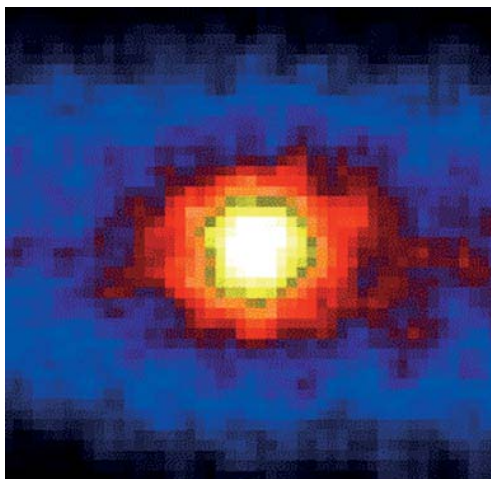


Figure 7: Neutrino Sunshine

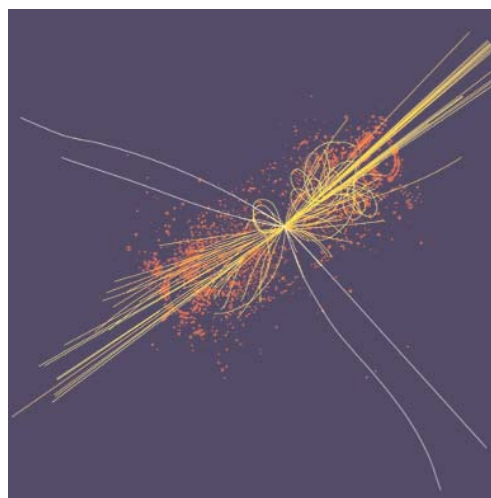


Figure 8: 2015: Higgs Boson at LHC?

1905, even since 1955. At the time of Einstein's death and CERN's beginning, the questions focussed on: "How" is matter made. Fifty years later in 2005 we are asking: Why is there a material universe at all? What happened to all the antimatter? What is origin of mass?

Why do particles have "magic" masses that enable protons to be stable, stars to make fusion, elements to form? Why do the forces have disparate strengths that are finely balanced so that the Sun burns fast enough to provide warmth, but slow enough that there has been enough time for intelligent life to develop? Are forces and particles unified in Supersymmetry? These are the questions that now face us.

If I can jump forward another 50 years I wonder: What will be in the textbooks in 2055 that none has yet thought of? It is ironic to realise that future students will take them for granted even though today we have no idea what they are.

Someone has yet to discover them, and it could be you! (If you want to see originals of these images, some of which cannot be reproduced here for copyright reasons, and many more examples of the beauty of particle physics, see note 1).

ACKNOWLEDGMENTS

This work is supported, in part, by grants from the Particle Physics and Astronomy Research Council, and the EU-TMR program "Euridice" HPRN-CT-2002-00311.

NOTES

¹ F. E. Close, M. Marten and C. Sutton, *The Particle Odyssey* (Oxford University Press; 2004).

² F. E. Close, *Contemporary Physics*, vol. 38, pag 1 (1997) and vol. 47, pag. 67 (2006).

EINSTEIN: ZURICH 1905

Thomas Glick

Department of History. Boston University, USA.

INTRODUCTION

The nineteenth century, during which the practice of science had assumed, for the most part, the institutional form it still has today, nevertheless concluded with a feeling that something was awry with the Newtonian worldview which had, in the course of the same century, become a cornerstone of western thought. Not that there weren't claims to the contrary. Two famous physicists, indeed, claimed that the program of their discipline had essentially been completed and only the loose ends needed to be tied up. Thus Albert Michelson, in a much-quoted line from his *Lowell Lectures* of 1899 asserted that "*The more important fundamental laws and facts of physical science have all been discovered, and these are now so firmly established that the possibility of their ever being supplanted in consequence of new discoveries is exceedingly remote*"¹. That is not to say that new discoveries are not made, just that they result from "*the increasing order of accuracy made possible by improvements in measuring instruments*". The British physicist Lord Kelvin (Sir William Thomson), articulated the same thought in an address to the British Association for the Advancement of Science in 1900: "*There is nothing new to be discovered in physics now*", said, "*All that remains is more and more precise measurement*"². Michelson and Kelvin were certainly representing the views of an older generation of experimental physicists, speaking just before the contradictions of the Newton/Maxwell system generated a new wave of theorization. Maxwell himself had realized that the sense of completeness of science that was common in the late nineteenth century, had to do with experiments centered on precise measurements (of the kind executed by Michelson and Lord Kelvin), which lent support to the notion that if exactitude could be extended a few more decimal points, all problems would be solved.³

In any event, others were far less sanguine. For those who were convinced that

European civilization had entered an inexorable state of decline, the turn of the century held apocalyptic significance.⁴ What they perceived as the intrusion of uncertainty into scientific theory that had, just a few years before, appeared rock solid, was added evidence of decline. The apocalyptic vision of science in 1900 is clearly laid out by the American historian Henry Adams (1838-1918), a cantankerous Bostonian Yankee whose outlook at this time might be characterized as that of an apocalyptic positivist. Adams, grandson and great-grandson of presidents (John Quincy Adams and John Adams), who were members of the great self-consciously Newtonian generation of Northamerican leaders, was seized with a fear that the theoretical unity that nineteenth century physics had displayed was replaced by a chaotic system presaged by research of William Crookes (1832-1919) on cathode rays (which turned out to be electrons, but which Crookes claimed blurred the line between matter and force), Wilhelm Roentgen (1845-1923) and Marie Curie (1867-1934) in the mid 1890s. Adams had previously viewed the kinetic theory of gas as the centerpiece of an orderly physical system, opined that by 1900 it had become “*an assertion of ultimate chaos*”⁵. He located the revolution chronologically between 1893 (which he habitually misremembered as the year of Roentgen’s discovery of x-rays, an event that actually took place two years later) and 1900. Adams was clear about the overturn that had occurred: “*In these seven years man had translated himself into a new universe which had no common scale of measurement with the old. He had entered a supersensual world, in which he could measure nothing except by chance collisions of movements imperceptible to the senses, perhaps even imperceptible to his instruments, but perceptible to each other, and so to some known ray at the end of the scale*”. He goes on to say that the atrophysicist Samuel Langley (1834-1906, another Bostonian, who was probably the source of most his information about physics) had issued repeated warnings on the threat that the “*anarchical*” behavior of x-rays and radioactivity represented. “*Langley seemed prepared for anything*”, Adams comments, “*even for an indeterminate number of universes interfused - physics stark mad in metaphysics*”. Adams’ comments reflected Langley’s research on solar radiation measured through an instrument — the bolometer — which he invented and whose data was later used to explain black-box radiation. Langley found radiation curves displaying the features of asymmetry and a shift of wavelength with increasing temperature which later research made intelligible. Langley must have been communicating his puzzlement to Adams. This kind of defense of classical physics is one that scientists would make repeatedly in the first decade of the new century. Radium therefore constituted a “*metaphysical bomb*”, blurring the distinction between matter and energy and Ernst Mach, in Adams’ views had gone so far as “*to reject matter altogether*” and equate it with motion.⁶ Adams’s invocation of Mach demonstrates his sensibility to current European philoso-

phy of science, although his understanding of Mach's position was not quite correct. Mach's philosophical problem was, in part, an attack against the Newtonian concepts of mass (as a measure of matter) and force. It was mass, not matter itself, that Mach wanted to redefine kinematically, because motion was an observable property of it. Mach was likewise opposed to the concept of force because it was the product of two unobservable properties. If mass were redefined kinematically, however, it removed some of the metaphysical obscurity of force as well.⁷

Adams, although weak in mathematics, also detected analogous danger signals in renewed *fin-de-siècle* interest in non-Euclidean geometry and the geometry of n -dimensions, which struck many sober souls like Adams as contrary to common sense. His fears were given substance by his reading of French mathematician Henri Poincaré's book *La Science et l'Hypothèse* [Science and Hypothesis] of 1902. Poincaré, in observing that the notion held by mathematicians of the mid-nineteenth century, that science acts through simple laws, was no longer sustainable. Rather the process of discovery now seemed layered: simple laws proved to conceal complexity, which in turn could be explained by more simple laws, ad infinitum. "*A mathematical paradise of endless displacement promised eternal bliss to the mathematicians*", Adams observed ironically, "*but turned the historian green with horror*". For Poincaré, Euclidean geometry —to which Adams looked for conceptual unity— was simply conventional, the most convenient of available geometries.⁸

What Adams had perceived, in fact, were inconsistencies among three competing and mutually incompatible physical paradigms. These were first, statistical mechanical models of electrodynamics as in the kinetic theory of gases, which presumed the existence of atoms (Hermann von Helmholtz, Ludwig Boltzmann, J. Williard Gibbs); second, a phenomenological or mathematical theory of heat that does not require atoms (associated with Rudolph Clausius), in which the heat present in any substance is a function of the substance's state⁹; and third, Maxwell's electrodynamics, as formalized by Hertz and then extended by H. A. Lorentz to include the molecular nature of electricity.¹⁰ The interaction between the three models (which Adams perceived as confusion) led to the overthrow of classical physics. Poincaré, to cite one of Adams' sources, expressed the tension between Maxwell's and Newton's mechanics, in the period between 1899 and 1904, when he gave a famous lecture at the St. Louis World's Fair, an event that Adams attended and which left him feeling gloomy since he detected none of America's traditional optimism there.¹¹ Adams most likely heard Poincaré's lecture, but not that of Boltzmann who also spoke at the Fair.

Of course the tension was soon to be resolved when the acceptance of the reality of atoms made it clear that all three approaches were the same. Einstein, prescient from the start, saw it in 1900, as he wrote to his fiancé:

"[Boltzmann's book] is magnificent. I have almost finished it. He is a masterly expounder. I am firmly convinced that the principles of the theory are right, which means that I am convinced that in the case of gases we are really dealing with discrete mass points of definite finite size [that is, atoms], which are moving according to certain conditions. Boltzmann very correctly emphasizes that the hypothetical forces between the molecules are not an essential component of the theory, as the whole energy is of the kinetic kind. This is a step forward in the dynamic explanation of physical phenomena".¹²

By 1901, Jean Perrin had already suggested that the atom was alike a solar system in miniature and in the middle of the decade both he and Einstein had published epochal papers on Brownian motion (the random collision of molecules) which demonstrated the existence of atoms.

All this added up to a revolutionary, millenarian overthrow of the entire cognitive world: "*The year 1900 was not the first to upset schoolmasters*", Adams proposes. "Copernicus and Galileo had broken many professorial necks around 1600; Columbus had stood the world on its head towards 1500; but the nearest approach to the revolution of 1900 was that of 310, when Constantine set up the Cross [that is, when by converting, Constantine effectively made the Roman Empire Christian].¹³ The rays that Langley disowned, as well as those which he fathered [referring to Langley's studies of solar radiation], were occult, supersensual, irrational; they were a revelation of mysterious energy like that of the Cross; they were what, in terms of medieval science, were called immediate modes of the divine substance".¹⁴ Adams's observations were prescient: numerous scientists would soon enough brand relativity as irrational and mystical.

For Adams, the latest reports from the world of physics was just more evidence that western culture was in decline. For Adams, a new view of history expressive not of the unity of human history but of its multiplicity—a view that he lamented, because it represented cultural decline—had been imposed by science. For this theory, he continued sardonically, "Adams felt himself in no way responsible".¹⁵ Science, for Adams, was not science unless it guaranteed "*unity*" (referring apparently to the unified world view offered by Newtonian or Greek science, for example), and "Modern science guaranteed no unity",¹⁶ while religion still did, a conclusion that created an intolerable dilemma for Adams—who believed in a mechanistic, Newtonian universe.

What is extraordinary about Adams's comments on *fin-de-siècle* science is that he was not a scientist, but at best a science-watcher (albeit one whose perceptions were colored by a profound cultural pessimism), and that the conclusions that he drew were remarkably prescient for a non-scientist.¹⁷

If theoretical confusion filled Adams with anxiety, so did a string of striking experimental discoveries in physics that came one after another, beginning with W. C. Roentgen's dis-

covery of penetrating X-rays in 1895. As the same time, Perrin demonstrated that cathode rays were not disturbances caused in waves of ether, but rather streams of corpuscles—electrons, as they came to be called and whose velocity and charge/mass ratio had been measured by J. J. Thomson in 1897, the same year that Wilhelm Wien found that cathode rays were in fact particles, emitted at a very high velocity, another finding which supported the atomic theory. It was in a series of similar experiments on radiations from a uranium salt that acted like X-rays that had led Henri Becquerel to discover radioactivity in 1896, which in turn set Pierre and Marie Curie on the road to discovering new radioactivity elements. Becquerel then showed in March 1900 that Thomson’s “corpuscles” were the same as the electrons emitted by radioactive decay.¹⁸

In a paper that has had considerable influence on historians of science, Paul Forman suggested that the cultural insecurity of post-world War I intellectuals was shared by, or transmitted to, scientists, who in turn projected that insecurity into probabilistic views of physics, the uncertainty principle, and so forth. While scientists of course participate in a broader cultural and social world than merely that of the laboratory and must reflect their environment, my own research has tended to show that Forman has the directionality wrong. The notion that relativity was “*incomprehensible*”, for example, did not arise among intellectuals who could not understand theoretical physics. Rather, it originated with experimental physicists, supported by engineers in most countries, who complained that the abstract nature of relativity (particularly the general theory) was akin to abstract mathematics and even to metaphysics, and therefore “*incomprehensible*”.

The case of Henry Adams is valuable because of Adams’ ability to identify the nature of the low prospects of science as he conceived them. The doubts arose from the scientists themselves: Langley, who had “trapped” rays whose nature he did not understand; from average scientific consternation over x-rays and radioactivity; from Poincaré who had already voiced doubts about the Newtonian time and space well in advance of Einstein.

As 1900, that emblematic year, drew to a close, the physicist Max Planck, in a famous address to the German Physical Society announced a new law to express the “*distribution of radiating energy over all areas of the normal spectrum*”. This was the famous explanation of black box radiation – the box being a metal container with a hole in it. When heated until it is glowing, light bounces around inside and will stream out through the hole. Planck’s theory didn’t apply to light itself, but “*resonators*” –electrons that he supposed emitted the light. Planck found that the exchange of energy between electrons and enclosed radiation took place in discrete bursts—*quanta*—rather than in waves undulating in all directions continuously as Maxwell and Hertz had established for all elec-

tromagnetic radiation.¹⁹ But the exact nature of the exchange was not understood when Albert Einstein proposed that light itself is composed of *quanta*, discrete particles (which we now call photons). It was the recognition of wave-particle duality that set the new physics on its way.

ZURICH: 1905

Einstein published five papers in 1905. The first, which appeared in March, was that on quantum (usually identified as the paper on the photoelectric effect). He does not mention the ether here, but clearly he was already thinking that light particles do not require a medium of transmission. The second paper, published in April, was his doctoral thesis on molecular dimensions. It is an extrapolation of the kinetic theory of gases to liquids, and therefore relates to the reality of molecules. The third paper (May) was on Brownian motion, which demonstrated the existence of molecules. The fourth (June) was on special relativity, but without the famous equation stating the equivalence of mass and energy. The fifth and final paper, published in September, was on the equivalence of mass and energy. It contains the famous equation $E=mc^2$. It also addresses one of Adams' concerns: free radiation. If a body releases energy in the form of radiation, it must be losing mass.

Two of these papers touched on phenomena that had caused Henry Adams such great perplexity. Einstein's March paper dealt with Adams' concern about free radiation. It is interesting to note that the March paper is usually identified by its solution of the "photoelectric effect" (when light shines on a metal, electrons can be ejected from its surface: inasmuch as the tiny portion of a wave of light contacting an electron would not have enough energy to dislodge it, light must be particulate). But since the last great public discussion of Einstein in 1979—his centennial year—there has been a tendency among historians of science to characterize this paper (as one has recently done) as "The Revolutionary Quantum Paper". The first sentence of the paper, however, alludes to another of Adams's concerns. Einstein writes: "*There exists a profound formal difference between the theoretical conceptions physicists have formed about gases and other ponderable bodies, and Maxwell's theories of electromagnetic processes in so-called empty space*".

Einstein liked to pose problems in terms of contradictory generalizations. Here, Einstein in effect suggests that the statistical approach to gases proposed by Boltzmann and others suggested a solution to other problems associated with radiation and, beyond it, light. He says that if light were considered as composed of discrete particles then Boltzmann's approach could be applied to it. The laws of thermodynamics could

explain the relationship between volume and temperature as accounting for the total energy of radiation in a cavity, but not the distribution of such energy over different frequencies. Planck's law described the frequency distribution, but nature of the exchange energy between matter and radiation was unexplained.²⁰

Einstein's May paper, on Brownian motion, also addressed Adams' doubts about the statistical approach to gases. The random trajectories of molecules by which Einstein explained the movement of microscopic particles observed by Robert Brown could be predicted statistically. Einstein sensed that if Brownian motion is as he said it was, then Boltzmann's probabilistic interpretation of entropy must be true and classical thermodynamics was no longer wholly valid, because Boltzmann had understood that the thermodynamic laws were true only in the statistical sense: that is, the observed properties of a gas are determined by the average behavior of its constituent atoms.²¹

Einstein had a knack for synthesis, for linking up one aspect of his thought with another. So special relativity also explained one of the attributes of radium. In May 1905, Einstein wrote to his friend Konrad Habicht: "*One more consequence of the paper on electrodynamics has also occurred to me. The principle of relativity, in conjunction with Maxwell's equations, requires that a mass be a direct measure of the energy contained in a body; light carries mass with it [$E=mc^2$]. A noticeable decrease of mass should occur in the case of radium. The argument is amusing and seductive; but for all I know, the Lord might be laughing over it and leading me around by the nose*".²²

Einstein became a renowned physicist soon after 1905; but his early fame owed not to relativity, not to photons (an idea that was tolerated, but not taken very seriously). It was Einstein's quantum paper of 1907 titled *Planck's Theory of Radiation and the Theory of Specific Heat* that not only made Einstein famous but which put quantum theory in the mainstream of physics. In this paper, he applied the quantum principle to crystalline solids and explained thereby the low specific heat of such solids at low temperatures. The verification, by experimentalists, of Einstein's formula was what made most physicists aware of quantum.²³

Einstein wrote to the French mathematician Jacques Hadamard that "*The words of the language, as they are written or spoken, do not seem to play any role in my mechanism of thought. The psychical entities which seem to serve as elements in thoughts are certain signs and more or less clear images which can be "voluntarily" reproduced and combined*". This "*combinatory play*", he continues, "*seems to be the essential feature in productive thought—before there is any connection with logical construction in words or other signs which can be communicated to others*".²⁴ It was this distinctive mental process, I think, that underlay the conceptual unity of the 1905 papers.

NOTES

- ¹ A. A. Michelson, *Light Waves and Their Uses* (Chicago, University of Chicago Press, 1902; new ed., 1961), pp. 23-24.
- ² Cited by, P. C. W. Davies and Julian Brown, *Superstrings: A Theory of Everything?* (Cambridge, Cambridge University Press, 1988), pp. 4-5. In 1909, Kelvin, in the context of the completeness of science debate said that recent discoveries had had the effect of dispelling pessimism, as has happened in the Renaissance; Lawrence Badash, *The Completeness of Nineteenth-Century Science*, *Isis*, 63 (1972), 48-58, on p. 55.
- ³ Badash, *Completeness of Science*, p. 50.
- ⁴ On the *fin-de-siècle* and late nineteenth century intellectual apocalypticism, see Jan Romein, *The Watershed of Two Eras: Europe in 1900* (Middletown, Wesleyan University Press, 1978); John Stokes, ed., *Fin de Siècle/Fin du Globe: Fears and Fantasies of the Late Nineteenth Century* (New York, St. Martin's, 1992); and Arthur Herman, *The Idea of Decline in Western History* (New York, The Free Press, 1997). On *fin-de-siècle* science, see Carl Gustaf Bernhard et al., eds., *Science, Technology and Society in the Time of Alfred Nobel* (Oxford, Pergamon Press, 1982); and Mikulas Teich and Roy Porter, eds., *Fin de Siècle and its Legacy* (Cambridge, Cambridge University Press, 1990).
- ⁵ Henry Adams, *The Education of Henry Adams* (London: Penguin, 1995), p. 427. In a letter to Samuel P. Langley in Adams's *annus horribilus* of 1893, Adams confesses that he "cannot drive the kinetic theory" of gases into his brain. The letter implies that Adams feared that the reduction of physics to kinematics placed in doubt commonplace concepts like matter and energy as generally understood; *The Letters of Henry Adams*, ed. J. C. Levenson et al., 6 vols. (Cambridge, Harvard University Press, 1988), IV, 99-101. Similar fears were later aroused by Einstein's special theory of relativity.
- ⁶ *Education*, pp. 428-429.
- ⁷ See Mario Bunge, *Mach's Critique of Newtonian Mechanics*, in *Ernst Mach—a Deeper Look* (Dordrecht, Kluwer, 1992), pp. 243-261, on pp. 250-251.
- ⁸ Adams, *Education*, pp. 430-431.
- ⁹ Edward E. Daub, *Rudolph Clausius*, *Dictionary of Scientific Biography* [DSB], 3, 303-311, on p. 304.
- ¹⁰ Paul Feyerabend, *Consolations for the Specialist*, in *Criticism and the Growth of Knowledge*, Imre Lakatos and Alan Musgrave, eds. (Cambridge, Cambridge University Press, 1970), pp. 197-230, on pp. 207-208. I have made Feyerabend's overly vague scheme more concrete.
- ¹¹ Adams, *Education*, pp. 440-443. Whether Adams attended Poincaré's lecture he does not say.
- ¹² *The Collected Papers of Albert Einstein, Volume 1: The Early Years, 1879-1902*. English Translation (Princeton, Princeton University Press, 1987), p. 149.
- ¹³ But Adams was a cultural pessimist. In an opposite, optimistic sense, J. J. Thomson observed in 1909, in the context of the completeness of science debate, that recent discoveries had an effect similar to that of the Renaissance (see Badash, *Completeness*, p. 55).
- ¹⁴ Adams, *Education*, p. 363.
- ¹⁵ *Ibid.*, p. 435.
- ¹⁶ *Ibid.*, p. 407.
- ¹⁷ On Adams as a cultural pessimist, see Arthur Herman, *The Idea of Decline in Western History* (New York, The Free Press, 1997), pp. 153-165.
- ¹⁸ Christa Jungnickel and Russell McCormach, *Intellectual Mastery of Nature: Theoretical Physics from Ohm to Einstein. Volume 2. The Now Mighty Theoretical Physics 1870-1925* (Chicago, University of Chicago Press, 1986), p. 211; Alfred Romer, *Henri Becquerel*, *Dictionary of Scientific Biography*, I, 558-561.

- ¹⁹ I. Bernard Cohen, *Revolutions in Science* (Cambridge, Harvard University Press, 1985), pp. 420-422; Jungnickel and McCormmach, *Theoretical Physics*, p. 262.
- ²⁰ John Stachel, *Einstein's Miraculous Year: Five Papers that Changed the Face of Physics* (Princeton: Princeton University Press, 1998), p. 4.
- ²¹ John S. Rigden, *Einstein 1905: The Standard of Greatness* (Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1905), p. 60; David Lindley, *Boltzmann's Atom* (New York: The Free Press, 2001), pp. 210-213.
- ²² Stachel, *Einstein's Miraculous Year*, p. 5.
- ²³ John Stachel, *1905 and all that*, *Nature*, 20 January 2005, pp.3-5, on p.5.
- ²⁴ Jacques Hadamard, *An Essay on the Psychology of Invention in the Mathematical Field* (New York: Dover, 1954), p. 142.

ALBERT EINSTEIN AS THE FATHER OF SOLID STATE PHYSICS

Manuel Cardona

Max-Planck-Institut für Festkörperforschung, Stuttgart, Germany

Einstein is usually revered as the father of special and general relativity. In this article, I shall demonstrate that he is also the father of Solid State Physics, or even his broader version which has become known as Condensed Matter Physics (including liquids). His 1907 article on the specific heat of solids introduces, for the first time, the effect of lattice vibrations on the thermodynamic properties of crystals, in particular the specific heat. His 1905 article on the photoelectric effect and photoluminescence opened the fields of photoelectron spectroscopy and luminescence spectroscopy. Other important achievements include Bose-Einstein condensation and the Einstein relation between diffusion coefficient and mobility. In this article I shall discuss Einstein's papers relevant to this topic and their impact on modern day condensed matter physics.

1900-1904

Einstein's first publication

Albert Einstein started his career as a scientific author on Dec. 13, 1900 when he submitted an article to the *Annalen der Physik*, at that time probably the most prestigious and oldest physics journal. He was then 21 years old. The author's byline lists him simply as "Albert Einstein", Zürich, without mentioning any affiliation. The article was rapidly accepted and it appeared the following year.¹ He had come across, while searching the literature, a collection of data on the surface energy of a number (41) of complex organic liquids containing several of the following atoms: C, O, H, Cl, Br, and I (e.g. benzylchloride: C_7H_5OCl). He proceeded to develop a phenomenological theory for fitting all 41 surface energies of these liquids on the basis of a small number of adjustable

parameters (6) associated with the six atoms present. He reasoned as follows: The energy of the liquid with or without a surface is obtained by summing the contributions of all possible pairs of molecules which interact with each other through a molecular pair potential. The pairs to be summed will be different inside the liquid and at the surface. The difference constitutes the surface energy. He now assumes that the pair energy is given by a universal function of the intermolecular distance, with a prefactor which is the sum of corresponding numbers characteristic of the atoms involved, six different ones for the cases under consideration. In this manner, by adjusting the 6 atomic coefficients, he obtained a rather good fit to the surface energies of all the liquids under consideration.

This article, like most of his publications prior to 1933, was written in Einstein's very elegant German [I found two articles in English published before his forced emigration in 1933. One appeared in *Nature* in 1921, the other in the *Physical Review* in 1931]. It has been cited 38 times (as of July, 2006) and it is still being cited to date². Its subject falls into the category of physical chemistry and exemplifies the fact, found not only in his first paper, that Einstein would tackle anything that he felt he could make an impact on, regardless of how pedestrian. Later on, we find that he works on simple problems before or after tackling the most sublime ones for which he is known. His first publication could already be considered to be in the realm of Condensed Matter Physics (liquids). It contains what is probably the first example of the use of pair potentials in condensed matter physics.

In 1902 Einstein submitted his first and second articles as a PhD thesis to the University of Zurich. The reviewer, Prof. Kleiner, rejected them.

Einstein's second publication

Einstein's second article was submitted to and appeared in the *Annalen* in 1902.³ It also corresponds to the field of physical chemistry. In contrast to his first paper, where he develops a semiempirical theory to interpret extant experimental data, in this article he develops a theory, based on thermodynamics, which should have been helpful to interpret a large number of experiments concerning contact potentials between metals and their fully dissociated salts in solution. He uses the method of Ref.1 (intermolecular forces) to calculate the effect of the solvent on the contact potentials. This rather long (16 pages) and comprehensive article has not received much attention, having been cited only 10 times. Einstein himself seems to have had a premonition of the reduced interest this article may trigger. He closes it with a statement, again in rather flowery but poignant German, expressing his feelings. The closest I can come up with in English is:

In conclusion, I feel the urge to apologize for the fact that I have only developed in this article a clumsy plan for a painstaking investigation without having contributed to its experimental solution; I am simply not in a position to do it. However, this work will have reached its aims if it encourages some scientist to tackle the problem of molecular forces with the method I have suggested.

Present day physics editors would most likely not allow such tirades involving a combination of hard core science and personal feelings. Such statements are not unusual in other publications of Einstein and give us a glimpse into his psyche and/or sense of humor that we miss in the current literature.⁴

Einstein's three additional publications in the *Annalen* before the *annus mirabilis*

Einstein submitted and published three articles in the *Annalen* during the years 1902-1904. They dealt with kinetic theory, the foundations of thermodynamics and the general molecular theory of heat.^{5,6,7} These papers resulted from his attempts at teaching himself the disciplines of thermodynamics, kinetic theory and statistical mechanics. His knowledge of the work of Boltzmann was rather fragmentary and he does not seem to have been aware, at that time, of the treatise of J.W. Gibbs (Elementary Principles of Statistical Mechanics, 1902). So, he rediscovered much of the material already existing on these subjects. In accepting these papers, the responsible editor of the *Annalen* does not seem to have been aware of those works either. Nevertheless, the published articles by Einstein reveal his unique way of arriving to the basic concepts of thermodynamics and kinetic theory, in particular entropy and the second principle. Following the tempers of the times (and Einstein's) these papers contain very few citations, only to Boltzmann and to Einstein himself. I found particularly interesting the treatment of energy fluctuations in a system in thermal equilibrium with a reservoir (Ref. 6), which he masterfully applied in many subsequent papers.^{4,8}

In autobiographical notes published in 1949⁹ Einstein wrote "*Unacquainted with the investigations of Boltzmann and Gibbs, which had dealt exhaustively with the subject, I developed statistical mechanics and the molecular-kinetic theory of thermodynamics...*".

In 1910 Einstein had already written that had he known of Gibbs's book he would not have published Refs. 5-7.¹⁰

ANNUS MIRABILIS: 1905

Apparently in his “spare time”, while working at the Swiss patent office in Bern, Einstein wrote five revolutionary papers and submitted them to the *Annalen*. Except for one, which he withheld for a few months in order to incorporate in it the most recent experimental data¹¹, they were quickly accepted and published. Reference 11 was submitted to the University of Zurich as a PhD thesis. This time Prof. Kleiner approved it and Einstein became a doctor.

The topics of the five famous papers submitted in 1905 to the *Annalen* and the corresponding references are given below:

1. The quantum of light, the photoelectric effect and photoluminescence¹²
2. The theory of Brownian motion¹³
3. Special Relativity¹⁴
4. The dependence of the inertial mass on energy¹⁵
5. Determination of the size of a molecule and Avogadro’s number¹¹

The quantum of light, the photoelectric effect and photoluminescence

This work was published in Ref. 12. It is actually the work that was mentioned in the citation of the 1921 Nobel prize (...for your work on theoretical physics and, in particular, for your discovery of the law of the photoelectric effect). This citation already appeared in the notification from the Nobel Foundation he received by cable on November 10, 1922. The telegram, however, mentioned explicitly that his work on the theory of relativity had not been considered for the award (see Ref. 9, p. 503). The award of the 1921 prize had been deferred, probably because of pressure to honor the theory of relativity, a possibility which was not acceptable to some conservative members of the Nobel committee. Once the proposal of the photoelectric effect was on the table, objections vanished and Einstein was belatedly awarded the 1921 Prize in 1922.¹⁶

The possible lack of courage, or understanding of the revolutionary relativity theory, reflected by the actions of the committee, has puzzled historians and physicists for many years. More recently, however, commentators have reached the conclusion that Ref. 12 was indeed even more revolutionary than the special relativity article (Ref. 14). The mathematical underpinnings of the latter had been largely worked out by Lorentz and Poincaré. Einstein provided its philosophical underpinnings and derived the famous law of equivalence of mass and energy¹⁵:

$$E=mc^2 \tag{1}$$

In Ref. 12, however, Einstein introduces, for the first time, the quantization of the electromagnetic energy (light), something that was not explicitly done by Planck when developing his famous law of the black body radiation:

$$\rho_\nu = \frac{8\pi\nu^2 h\nu}{c^3} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} \tag{2}$$

While Planck assumed “as an act of desperation” that the electromagnetic energy was distributed in finite amounts ($E_\nu=h\nu$) among a large number of fictitious harmonic oscillators, Einstein considered the high frequency limit of Eq. 2, the so-called Wien’s law, and derived the corresponding entropy. He then showed that this entropy equals that of an ensemble of non-interacting point-like particles with energy $E_\nu=h\nu$. While recognizing that ondulatory phenomena impose wave character to light, he realized that a number of contemporary experiments (e.g. photoemission) could only be explained by assuming that light consists of particles whose energy is proportional to the nominal frequency of the radiation:

$$E_\nu=h\nu \tag{3}$$

These particles had to wait 20 years before being given the name of *photons*.¹⁷ The wave- particle duality of “photons” introduced in Ref. 12 is viewed by many as an even more revolutionary step than the special theory of relativity, a fact which, in retrospect, justifies the citation which accompanied Einstein’s Nobel Prize. Be it as it may, Refs. 12 and 14 firmly establish Einstein as the father of the two main tenets which revolutionized physics in the early 20th century: relativity and energy quantization. As we shall see below, both these tenets were to have a profound influence in condensed matter physics.

Typical of Einstein, he searched the experimental world for facts that would support his theory of light quantization. Reference 12 contains a “large” number of references, unusual for an Einstein publication and also for the customs of the times: two to Planck, three to Lenard and one to Stark, plus the mention of a few other colleagues in the text (Boltzmann, Drude, Wien).¹⁸

Lenard’s experiments had shown that electrons were only emitted from metals (the photoelectric effect) when the frequency of the impinging light was larger than a given

value, which was *independent of the light intensity but may vary from metal to metal*. This simple experimental fact cannot be explained on the basis of the wave nature of light. Its explanation is straightforward under the corpuscular assumption: the energy of each light corpuscle (photon) $E_\nu = h\nu$ must be larger than the minimum energy I it takes to remove an electron from the metal, the so-called work function of the metal. The maximum energy E_e of a photoemitted electron must be positive and given by

$$E_e = h\nu - I \tag{4}$$

For photoemission to occur $h\nu \geq I$. For $h\nu > I$ the maximum energy of the photoemitted electrons increases linearly with ν . The photoelectron current depends on the light intensity but not its energy distribution. Equation (4) is the basis of a large number of spectroscopic techniques nowadays essential for the investigation of solids, in particular for the highly topical high T_c superconductors.¹⁹

Before moving to the next phenomenon dealt with in Ref. 12, I would like to give two examples of the current use of photoemission thresholds, as represented by Eq. 4. This equation may be interpreted as meaning that for photon frequencies such that $h\nu < I$ no electrons whatsoever will be emitted, i.e. that the emitted current will show a sharp step for $h\nu = I$. In spectroscopy, sharp steps seldom occur: they are usually

smeared out either by the experimental resolution, by impurities and disorder, or by thermal fluctuations. The latter are represented in metals by the Fermi-Dirac distribution function (1926), a fact which was unknown to Einstein in 1905. Figure 1 shows the photoelectric yield of gold (in a logarithmic scale) vs. the energy of the exciting photons (in eV, measured at 300 K). Below the so-called Fermi energy E_F , which corresponds to the work function, the yield plummets rather steeply, falling down by 2 orders of magnitude for every 0.1 eV. The thick red line represents a calculation based on the convolution of an infinitely steep edge ($T = 0$) and the

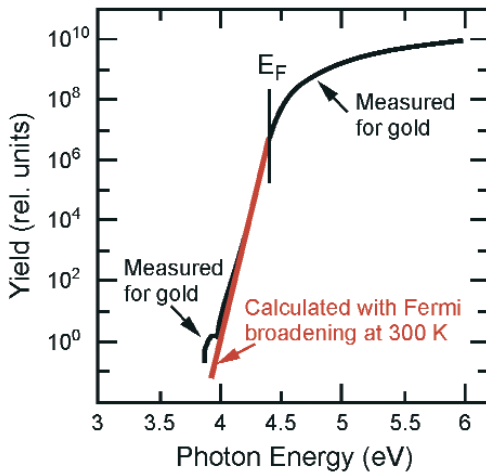


Figure 1: Photoelectric yield near the threshold for electron emission of gold. The broadening below E_F , encompassing eight decades of yield, is due to the thermal smearing of the Fermi distribution at 300K. From ref. 20.

Fermi-Dirac function for 300 K. Figure 1 confirms that the corpuscular theory of light, coupled to the Fermi-Dirac distribution, represents rather well the photoemission threshold of gold. The threshold spectrometer used for the work²⁰ in Fig. 1 has a very large dynamical range (ten decades). In its construction, currents produced by spurious electrons must be carefully avoided. This type of instrument is used nowadays to investigate impurity, surface and defect states within the gap of semiconductors.²¹ But perhaps the most spectacular application of photoelectron spectroscopy is the so-called angular resolved photoemission spectroscopy (ARPES). In this technique, the electrons escaping along a certain space direction are measured for several directions of momentum space. A threshold corresponding to the Fermi surface is seen in the spectra vs. electron energy (Fig. 2).

The transition from a normal metal to a superconductor is accompanied by the opening of an energy gap around the Fermi surface and the concomitant shift of the photoemission threshold. Limited resolution of ARPES instruments hinders their application to conventional superconductors. It has been, however, very useful for the investigation of high T_c materials because of their larger gap. Figure 2 indicates that the superconducting gap $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_y$ is strongly anisotropic, a fact which seems to be crucial for understanding these materials.¹⁹

Einstein's publication on the quantum nature of light also discusses two other experimental results. The first one has to do with the light emitted by a solid upon illumination, the so-called photoluminescence. It was known at that time that the emitted light had a frequency somewhat smaller than that of the exciting radiation, independent of the strength of the latter. Einstein realized that this so-called Stokes rule

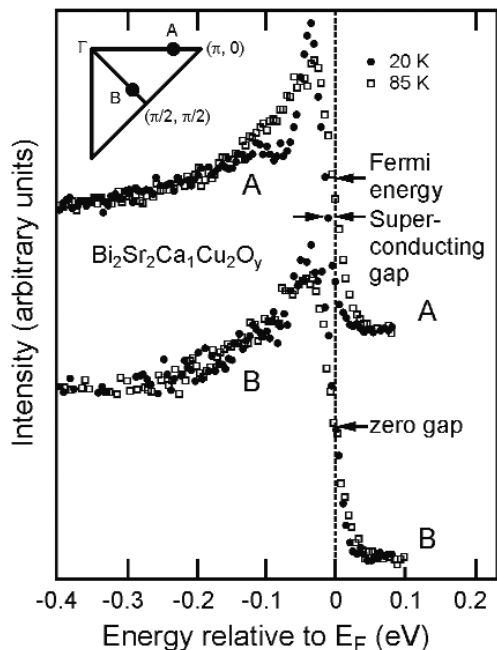


Figure 2: Photoelectron spectra of a high T_c superconductor ($\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_y$) obtained with a high resolution angle resolved spectrometer above T_c (85 K) and below T_c (20 K). The sharp thresholds correspond to the Fermi energy. The shift of this threshold from 85 K to 20 K represents the opening of the superconducting gap. Note that this shift does not appear in the lower curves, a fact that signals the anisotropy of the superconducting gap, one of the most striking properties of these materials. From Ref. 19.

follows immediately from the corpuscular theory of light: a photon with energy $h\nu$ impinging on matter, will produce an elementary excitation with energy equal to or smaller than $h\nu$. Conversion of this excitation energy into light will generate photons of energy (i.e. frequency) lower than that of the incident photon. Hence, the Stokes rule follows. Einstein concludes the corresponding section of the paper by pointing out that violations of the Stokes rule may occur (today we speak of anti-Stokes radiation). He mentions two possible mechanisms:

1. Thermal excitation at sufficiently high temperature which will provide a higher excitation energy than that of the incident photons.
2. Nonlinear optical effects: the outgoing photon may result from the merger of two or more excitations if high intensity light is impinging on the material.

It is most remarkable that Einstein would have thought about nonlinear optical processes. It took more than 50 years, and the advent of lasers, to be able to effect such nonlinear processes which are now standard manipulations in nonlinear optics.

Finally, Einstein mentions the ionization of gases by ultraviolet radiation, which is also easily accounted for by the corpuscular theory. Here he uses again experimental data by Lenard and also experiments on ionization by applied electric fields performed by Stark (i.e. Aryan Physics).

The theory of Brownian motion

The manuscript on the corpuscular nature of light has an entry at the end signifying that it was finished on March 17, 1905. Four lines below it there is a byline saying that the manuscript was received by the editors of the *Annalen* on March 18, 1905. Not a clue as to how this was possible. It took Einstein 6 weeks to finish his doctoral thesis based, as already mentioned, on Ref. 11.²² On May 11, 1905 his manuscript on Brownian motion was received at the editorial office of the *Annalen*.

Einstein meticulously avoids calling the work in Ref. 13 Brownian motion. He nonetheless writes: *“possibly this motion is identical with the so-called Brownian motion, however the information available to me is so imprecise that I cannot make a judgment”* Again, I doubt that present day editors would be willing to print such a statement.

In this article, with ~1700 citations one of his most highly cited ones, Einstein derives an expression for the average distance traveled by a suspended particle under the

influence of collisions with the solvent molecules in a time t :

$$\langle r^2 \rangle^{1/2} = (6Dt)^{1/2} \quad (5)$$

D is the diffusion coefficient for the suspended particles, for which he derives the famous expression

$$D = \frac{RT}{N} \cdot \frac{1}{6\pi\eta a} \quad (6)$$

where R is the gas constant, η the viscosity of the solvent, a the average radius of the suspended particles and N Avogadro's number, a number which seems to have fascinated Einstein as it embodied the corpuscular theory of matter.

He then proceeds to estimate the diffusion length $\langle r^2 \rangle^{1/2} = 6 \mu\text{m}$ for $t = 1$ min. at $T = 17^\circ\text{C}$ using the viscosity of water and the value $N = 6 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ obtained from the kinetic theory of gases.

In the abstract he mentions that agreement of his prediction of the diffusion length with experiment would be a strong argument in favor of the corpuscular theory of heat. Conversely, if experiments do not confirm his predictions, it would be a strong argument against such theory. He concludes this article with a typical Einstein statement: *Let us hope that soon a researcher will decide among the questions presented in this paper, which are very important for the theory of heat.*

A later article²³, submitted again to the *Annalen* in Dec. 1905, starts by mentioning that the phenomenon treated in Ref. 13 was indeed the so-called Brownian motion. An article by Gouy²⁴, in which the random motion was attributed to the thermal motion of the fluid, had been brought to Einstein's attention by a colleague from Jena (C. Siedentopf). Having thus exculpated himself of omitting to cite Gouy's work, he takes up the Brownian motion again and calculates the angular fluctuations of a spheroidal particle in suspension as induced by the thermal agitation. He then points out that Eq. 5, and the equivalent one for angular fluctuations, is only valid at sufficiently large times. He then estimates the minimum time at which it should remain valid, giving the value of 10^{-7} sec. for typical particles of $1 \mu\text{m}$ diameter.

A new determination of the molecular dimensions¹¹

As already mentioned, Einstein seems to have had a fixation with Avogadro's number

N . He suggested ~ 8 different methods for its determination from experimental data. In Ref. 11 he presents a method to determine both, N and the radius a of a molecule. This work was submitted as a doctoral dissertation and accepted by the University of Zürich. With ~1700 citations, it is the most cited of Einstein's papers with the exception of his rather late (1935) paper on the incompleteness of quantum mechanics, the so-called EPR paradox.²⁵

Reference 11 describes a very ingenious technique to simultaneously determine N and the molecular radius a from experimental data. For this purpose Einstein uses measurements of the increase in viscosity effected by dissolving sugar into water. By means of a non-trivial hydrodynamic calculation he finds for the viscosity η^* of such a solution

$$\eta^* = \eta [1 + (5/2) \varphi] \quad (7)$$

where φ represents the fraction of the solution volume occupied by the molecules, taking into account that in solution a layer or more of water is attached to the molecule (one may speculate how he figured this out without having been exposed to much chemistry!). The original article does not contain the factor (5/2) because of an error, which Einstein admits, in the rather complex hydrodynamic calculation.²⁶ Adding the ~1000 citations to this erratum to those of Ref. 11, we find 2700 citations, now even higher than those received by the EPR article.²⁵ The determination of φ from the experimentally observed increase in viscosity using Eq. 7 provides a relationship between Avogadro's N and the molecular radius. A second relation is needed in order to determine N and a separately. For this purpose, Einstein used the viscosity of the suspended molecules as given in Eq. 6.

From the point of view of the solid state physicist, Eq. 6 is rather important. The viscosity η represents thermal losses which take place when the solute moves in the solvent, i.e. the inverse of the mobility μ of the molecules in the solvent when propelled by an external force. Equation 6 can thus be written in the following way, more familiar to semiconductor physicists,

$$D = \mu T R / N e \quad (8)$$

which is the famous Einstein relation between diffusion coefficients of carriers and their mobility in semiconductors, governing the diffusion of carriers in transistors and other devices. Equation 6, and correspondingly Eq. 8, can be viewed as the first expression

in the literature of the rather important fluctuation-dissipation theorem, the diffusion coefficient D describing fluctuations and the viscosity η describing dissipation.

The theory of special relativity^{14,15}

It is often believed that relativity is of little importance in the fields of chemistry and condensed matter physics²⁷. This is not correct: the motion of electrons in solids can reach, in certain cases, velocities close to that of light. Neglecting relativistic effects in calculations can lead to serious errors. There is copious recent literature illustrating the incorrectness of Dirac's statement.²⁸

Special relativity is also the basis of important experimental techniques such as synchrotron radiation.²⁹ About 40 synchrotrons are now available world wide dedicated to spectroscopic investigations of solids, including photoelectron spectroscopy.

Semiconductor physicists are familiar with the fact that while germanium and silicon are semiconductors (characterized by an energy gap between occupied and unoccupied electronic band states) grey tin, HgSe, and HgTe, belonging to the same family, are semimetals. This has been attributed³⁰ to the relativistic increase of the electron mass near the core of the heavy elements Sn and Hg. This increase lowers the energy of the s-like conduction states, thus closing the gap and transforming the semiconductor into a semimetal.^{31, 32}

The energy bands of narrow band semiconductors such as InSb are non-parabolic, i.e., their corresponding mass increases with increasing velocity.³³ This effect is similar to that postulated by Einstein¹⁵ for relativistic free electrons. For narrow gap semiconductors, however, the electrons and holes near the gap are neither relativistic nor free. They are

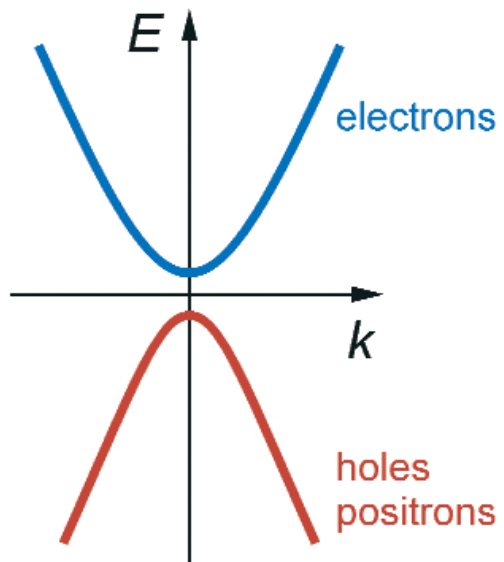


Figure 3: Conduction and valence bands of a narrow gap semiconductor (e.g. InSb) around a gap at $k=0$, according to 9. The upper curve represents conduction electrons (free electrons in the relativistic case) whereas the lower curve represents holes (positrons in the relativistic case).

affected by the periodic potential of the crystal lattice. Curiously, the mass of such classical electrons has properties rather similar to those of free relativistic electrons. A simple calculation using the “ $k \cdot p$ method”³⁴ leads to the following “non-parabolic” expression for the energy bands near the gap (see Fig. 3):

$$E = \pm \sqrt{\left[\left(\frac{E_g}{2} \right)^2 + \left(\frac{\hbar P}{m} \right)^2 k^2 \right]} \quad (9)$$

This equation is isomorphous to that which applies to Dirac’s relativistic electron and positron, $(E_g/2)$ corresponding to the rest mass of those particles. In Eq. 9 the + sign corresponds to conduction electrons and the – sign to valence holes (equivalently, electrons and positrons in Dirac’s relativistic electron theory). The use of Eq. 9 has become standard in modern semiconductor physics and electronics.

THERMAL PROPERTIES OF SOLIDS

After the *annus mirabilis* Einstein spent considerable time trying to develop a microscopic theory of the thermal properties of solids, a complex which was then, and still is, central to the field of solid state physics. This was, in the early 1900s, a rather difficult task. The static crystal structures of simple materials (e.g. diamond) were becoming available but basically, nothing about their dynamical properties (e.g. phonon dispersion relations) was known. Fermi-Dirac statistics, and the details of electronic excitations in metals, only became known in 1926. Einstein’s work on thermal properties thus applies to insulators although in several of his papers he contrasts his results against existing data for metals. We shall discuss here his pioneering work on the specific heat (of insulators), still relevant today, and his (by his own admission) unsuccessful attempt to develop a theory of the thermal conductivity.

The specific heat of insulators³⁵

Einstein realized that atoms in solids vibrate around their equilibrium positions on account of their thermal energy. He assumed, for simplicity, that there was only one vibrational frequency, taking it to be an average if more than one frequency was present. This average frequency is now called the Einstein frequency ν_E and one speaks of the Einstein single oscillator model. All that was known at that time concerning the specific heat C_V is that at high temperatures it tends asymptotically to the Petit and Dulong’s

value of 5.9 calories/mole K, for all substances.³⁶ Available data for diamond indicated a sharp drop in C_v for $T < 1000$ K (see Fig. 4).

Einstein explained this behavior by assuming an ensemble of harmonic oscillators of frequency ν_E equal to 3 times the number of present atoms. Using Planck's ansatz for the thermal energy of one mole of these oscillators he found, for the average thermal energy, the expression

$$\langle E \rangle = 3R \frac{\beta \nu_E}{e^{\frac{h\nu_E}{k_B T}} - 1} \quad (10)$$

where R is the gas constant (per mole). In present day's notation we would set $\beta = h/k_B$. By differentiating the energy $\langle E \rangle$ with respect to T Einstein obtained

$$C_v = \frac{d\langle E \rangle}{dT} = 5.9 \frac{e^{\frac{h\nu_E}{k_B T}} (h\nu_E / k_B T)^2}{\left(e^{\frac{h\nu_E}{k_B T}} - 1 \right)^2} \quad (11)$$

Equation 11 yields the Petit-Dulong³⁶ limit for $T \gg h\nu_E/k_B$. Einstein also mentioned in Ref. 35 that, at least around room temperature, the contribution of free electrons (e.g., in metals) to C_v should be negligible.

Einstein fitted existing data for diamond with Eq. 11, using the Einstein frequency as an adjustable parameter which turned out to be 1310 K (in units of temperature, corresponding to 909 wavenumbers (wn) or 11.0 μm wavelength). Towards the end of Ref. 35 Einstein mentions that diamond should show infrared absorption at this wavelength, but such absorption was not known. Obviously, he knew very little about the nature of the ir absorption due to lattice vibrations, which now we know is "dipole forbidden" for the diamond structure. Raman scattering by these vibrations is, however, allowed, having been observed at 1330 wn (7.5 μm), a frequency considerably higher

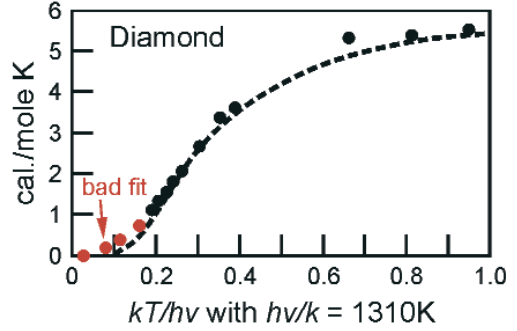


Figure 4: Specific heat of diamond vs. $kT/h\nu_E$. The points are experimental, the dashed curve represents a fit with a single Einstein oscillator ($\nu_E/c = 909 \text{ cm}^{-1}$). The experimental points lie above the fitted curve for $kT/h\nu_E < 0.2$. This discrepancy becomes smaller when two oscillators are used for the fit³⁹. It disappears when using the Debye model³⁸. From Ref. 35.

than the Einstein frequency (909 wn) which corresponds to an average frequency whereas, now we know, the Raman frequency is close to the maximum phonon frequency of diamond (1330 wn).³⁷

The fit displayed in Fig. 4, is rather good for $h\nu/k_B T > 0.2$. For lower values of T the values of C_V obtained from the fit lie below the experimental points. This results from the assumption of a single oscillator. Five years later P. Debye introduced the elastic vibrations (Debye's) model³⁸ which represents a continuum of vibrational frequencies extending all the way to zero frequency. In 1911, however, Nernst and his graduate student Lindemann had already improved matters by performing a fit with two oscillators.³⁹ One may say "big deal"; two adjustable parameters will always give a better fit than one. However, Nernst (1920 Nobel prize for chemistry) and Lindemann (Chief scientific adviser of Churchill during WW II) were smarter than that. They used two oscillator frequencies but constrained one of them to be half the other, a fact which boiled down to using a single adjustable parameter. The two frequencies, we now know, correspond to two averages of the acoustic and optic phonon frequencies (see Fig. 5b). The Debye, Nernst-Lindemann, and Einstein fits to experimental data for diamond are shown in Fig. 5a.

In 1911⁴⁰ Einstein realized that the hypothesis of a single oscillator frequency was only a rather rough approximation. Because of the wide amplitude of the atomic vibrations in a solid, he reasoned, there should be considerable interaction between them which should transform the single frequency into bands. He then conjectured that the atomic vibrations must be strongly anharmonic. In a footnote to Ref. 40 he goes as far as to say "*Our mechanics is not able to explain the small specific heats observed at low temperatures*". While writing Ref. 40, he got from Nernst the proofs of Ref. 39, with the two-frequency model. He seems to have liked it: after all, it got rid of most of the discrepancy between his model and the experimental data. He comments "*...the N-L ansatz is equivalent to assuming that the atoms vibrate half of the time with a frequency ν and the other half with the frequency $\nu/2$. The important deviation from the monochromatic behavior thus finds in this way its most primitive⁴¹ expression*". In the next paragraph he realizes that crystals must have two kinds of vibrations: acoustic and optic. In the former, he says, an atom vibrates against all neighbors whereas in the latter, a given atom vibrates against the nearest neighbors, i.e. in the opposite direction to them; not bad as a qualitative description of lattice dynamics!

Having taken a liking to Lindemann⁴² Einstein considered the famous Lindemann's theory of melting⁴³ which enabled him (and before him Nernst) to derive average vibra-

tional frequencies from the crystal's melting temperature. He is then pleasantly surprised by the good agreement of these frequencies with those obtained through fits of the temperature dependence of C_V . He expresses some displeasure at the fact that the Lindemann frequency agrees better with the specific heat vs. T than the frequencies he obtained by comparing the optical vibrations with the bulk modulus.⁴⁴ Because of its simplicity, I shall spend a few words on the method used in Ref. 44 to relate the bulk modulus to the "Einstein frequency", as illustrated in Fig. 6.

Einstein represents a solid as a periodic array (Fig. 6(a)). He then connects the central atom with its nearest neighbors by equal springs. The force constant of the springs can be determined from the bulk modulus, which corresponds to a uniform compression of Fig. 6(a). Once the force constant is known, it is trivial to obtain the frequency of vibration of the central atom against the surrounding ones. Somehow Einstein seems to have regarded the summation over all 8 nearest neighbors as too menial and tedious, so he replaced the peripheral atoms by a sphere, smearing their masses uniformly over the sphere. It is then trivial to obtain the relationship between the "Einstein" frequency and the bulk modulus. Einstein mentions having picked up this idea from a

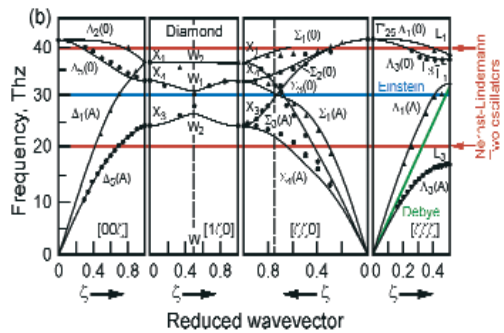
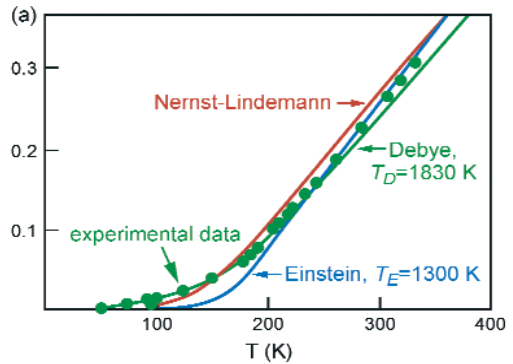


Figure 5a: The measured specific heat of diamond (dots) as compared with three fits: Einstein (blue line), Nernst-Lindemann (red line) and Debye (green line). Figure 5b: The phonon dispersion relation of diamond as compared with the two single frequencies used in the Nernst-Lindemann model. From Ref. 74.

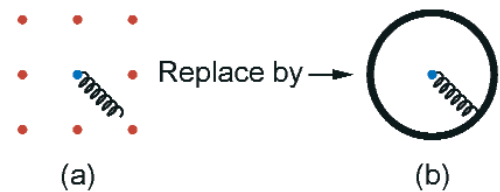


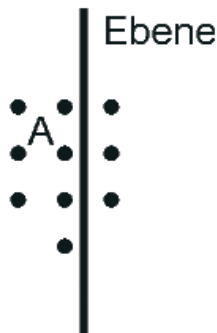
Figure 6. (a): Schematic diagram of a fictitious crystal used by Einstein⁴⁴ in order to derive a relationship between the bulk modulus and the Einstein frequency. (b): Similar to (a), but symmetrized in order to simplify the calculation.⁴⁴

paper by Sutherland⁴⁵. After Ref. 44 appeared, Einstein realized that already Madelung had derived a quantitative relationship between elastic constants and the “Einstein” frequency.⁴⁶ For reasons unbeknownst to me, Einstein assigns to Madelung the priority⁴⁷ for the discovery of what he calls “*this fundamental and important relation between the elastic and the optical behavior of solids*”. Reference 47 appeared in the *Annalen* as a regular article; nowadays it would be simply a comment or an erratum. One should mention at this point that Einstein’s publications list contains many such short articles correcting errata, priorities, or presenting complementary aspects which had been omitted in the main articles.

Thermal conductivity⁴⁰

After having successfully tackled the problem of the specific heat of insulators, Einstein tries to develop a theory of heat transport, i.e. of the thermal conductivity $\kappa(T)$. This is a much more complex problem and too many building blocks were missing at the time for Einstein to make significant progress. Even now, first principles calculations of the thermal conductivity of simple solids are rather incomplete.⁴⁸ Einstein assumed that the heat transport takes place through the interaction between a thermally excited atom and its nearest neighbor down the temperature gradient (Fig. 7). He had attributed the width of the vibrational frequency band to this coupling so he now estimated the coupling from the conjectured bandwidth. He then derives an expression for $\kappa(T)$ which is proportional to the specific heat. Using Petit and Dulong’s value³⁶ for the latter, Einstein reaches the conclusion that the thermal conductivity should be, at room temperature, much smaller than the measured one. It should also be, in

Figure 7: Diagram used by Einstein in order to illustrate the origin of the thermal conductivity. *Ebene*, which means “plane” in German, represents a plane that separates the hotter region from the colder region.⁴⁰



the Petit and Dulong region, independent of T , contrary to the decrease with T that had been experimentally observed. He concludes with one of his typical statements: “*We must thus conclude that mechanics is not able to explain the thermal conductivity of insulators. Moreover, the assumption of a quantized energy distribution does not help...*”

After using some rather scurrilous dimensional arguments he is able to derive the $\kappa \sim T^{-1}$ law proposed by Eucken but, surprisingly, concludes with the statement:

“*The task of the theory will be to modify molecular mechanics in such a way that it can*

account for the specific heat as well as the apparently so simple laws governing the thermal conductivity”.

We now know that the laws governing the thermal conductivity and its dependence on temperature and isotopic mass are not so simple.^{48,49} A curve illustrating the standard behavior of the thermal conductivity of an insulator vs. temperature $\kappa(T)$ is shown in Fig. 8. The curve shows three distinct regions, one at low T , proportional to T^3 , the high temperature region, in which $\kappa(T)$ decreases rapidly with increasing T , and a maximum which can be varied by changing the isotopic composition of the crystal (isotopes were unknown to Einstein in 1907!).

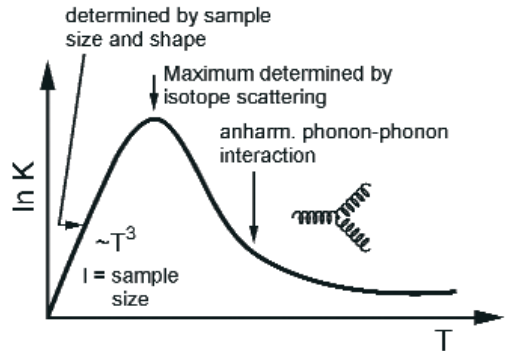


Figure 8: Schematic diagram of the thermal conductivity of an insulator. The low- T part ($\sim T^3$) corresponds to ballistic phonon transport, whereas the high temperature part corresponds to anharmonic processes, mostly of Umklapp-type.⁴⁹

In order to describe the effects leading to these three regions, we write the thermal conductivity as

$$\kappa(T) = \frac{1}{3} C_v v l \quad (12)$$

where v represents an average velocity of the acoustic phonons and l their mean free path. In the low temperature region, l would be larger than the sample dimensions (ballistic heat transport). It thus becomes of the order of those dimensions and temperature independent. The T^3 law is obtained by considering that v and l are independent of temperature whereas the specific heat C_v is, according to Debye, proportional to T^3 . At high temperatures the mean free path of the phonons which transmit the heat decreases rapidly with increasing T because these phonons collide with thermally excited phonons through anharmonic interactions. The maximum between these two regions is due to phonon scattering by the fluctuation of atomic masses resulting from the presence of different (stable) isotopes. All these processes are certainly not as simple as Einstein had envisaged them. A few decades had to elapse before all theoretical ingredients required to explain $\kappa(T)$ became available. Having realized the difficulties involved, Einstein moved to greener pastures and left the theory of thermal conductivity to future generations.

THE BOSE-EINSTEIN STATISTICS

The zero-point energy

In an article coauthored with Otto Stern (1943 Nobel laureate in physics)⁵⁰ Einstein proposed a rather ingenious way of deriving the zero-point energy of an oscillator. This proposal is particularly remarkable: we now believe the zero point motion to be a consequence of quantum mechanical uncertainty which was totally unknown in 1913. When it was established in 1924, Einstein became very skeptical about it (“*God does not play dice!*”) in spite of the fact that he had introduced the concept and made early use of it.

Einstein and Stern reasoned as follows: By expanding Eq. 10 in the high temperature limit we find, for a single one-dimensional harmonic oscillator,

$$E = \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{k_B T}} - 1} \rightarrow k_B T - \frac{h\nu}{2} \quad (13)$$

When comparing Eq. 13 with the result obtained from classical statistics $E \rightarrow k_B T$, which should be valid at high temperatures, they were disturbed by the presence of

the negative energy $-h\nu/2$. So they added to the r.h.s. of Eq. 13 the term $+h\nu/2$, in an *ad hoc* manner (see Fig. 9, copied verbatim from Ref. 50 so as to illustrate the kind of figures used those days; figures are rare in Einstein’s papers anyhow). For $T \rightarrow 0$, Eq. 13 then remained finite and equal to $+h\nu/2$. They interpreted this fact as signaling the existence of “thermal” motion in a harmonic oscillator even for $T \rightarrow 0$, ten years before Heisenberg derived this result from his celebrated uncertainty principle.⁵¹

Einstein (and Stern) as usual, tried to find some experimental verification of the zero-point energy.^{50, 51} They had come across recent data on the spe-

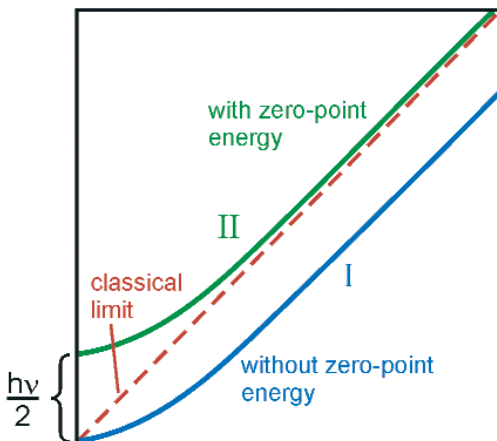


Figure 9: Diagram used by Einstein and Stern to illustrate the need of a zero-point vibrational energy ($h\nu_e$) in order to bring the Bose-Einstein distribution to agree with the classical one in the high temperature limit (dashed line).

cific heat of hydrogen at low temperature which they thought was due to the energy accumulated in a rigid rotator (the H_2 molecule). Knowing nothing about quantum mechanics, they equated the rotational energy to the vibrational energy of a harmonic oscillator with vibrational frequency equal to the rotational frequency of H_2 , with and without zero-point energy. They used these relationships to determine ν , and the corresponding energy, vs. T . The specific heat vs. T obtained by differentiating the so-obtained rotational energy vs. T agreed better if the zero-point energy was added to the corresponding harmonic oscillator:

$$E = \frac{J}{2} (2\pi\nu)^2 = \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{k_B T}} - 1} + \frac{h\nu}{2} \quad (14)$$

We now know that this procedure is not correct. The quantum rigid rotator is not equivalent to a harmonic oscillator; among other differences it has no zero-point energy.⁵²

The experimental $C_v(T)$ is now known to be strongly affected by spin statistic and transitions from ortho- to para-hydrogen. The existence of spin, and the corresponding two modifications of H_2 , was of course unknown to Einstein and Stern: Eq. 14 has to be regarded as another “act of desperation”, in this case an unsuccessful one. Nevertheless, the incorrect hypothesis represented by Eq. 14 has generated considerable literature (72 citations), especially in recent years. For a detailed discussion, see Ref. 52. In spite of the shortcomings of Ref. 50 just discussed, the correct derivation of the zero point energy of an oscillator, without prior knowledge of the uncertainty principle, is certainly an admirable *tour de force*.⁵²

The quantum theory of radiation⁵³

Until 1907 Einstein published all his articles in the *Annalen*. In 1907 he begins to diversify⁵⁴ using the *Annalen* less and less and, increasingly, the *Proceedings of the Royal Prussian Academy of Sciences*, of which he became a member in 1913, with 21 positive votes and a negative one (see Ref. 9). From 1908 on he also used the *Physikalische Zeitschrift* as a medium: I am not aware of the reason for his moving away from the *Annalen*. Some of the work he published in the *Zeitschrift* is of a more applied nature, including an article in which he proposes the use of Zn and Cd (two metals with a rather small work function, $I \sim 4.1$ eV) as photocathodes for ultraviolet photometry.⁵⁵ In 1917 he published in the *Zeitschrift* a much-celebrated paper under the title *The quantum theory of radiation*⁵⁶. Quantum theory was slowly approaching but had not yet arrived. In this

paper Einstein used semi-classical arguments to develop some of the most important concepts and equations of the quantum theory of radiation. Einstein realized that atoms or molecules are excited in the presence of radiation of the “right phase” and frequency. Such systems, if excited, can be de-excited under the presence of radiation of the “wrong phase”. These two processes of excitation and de-excitation are now known as absorption and stimulated emission of light. Atoms and molecules can also be de-excited spontaneously, without the presence of external radiation, thus leading to the concept of spontaneous emission. We now know that spontaneous emission is effected by the zero-point electromagnetic energy, a concept not available in 1917. For the radiation of frequency ν to be in thermal equilibrium the absorption processes must equal the sum of the two types of emission processes and Planck’s black body distribution must hold.

Einstein describes the strength of the absorption and the stimulated emission by a coefficient labeled B which he finds to be the same for both types of processes. He represents the spontaneous emission by a coefficient A which he finds to be related to B through the famous *Einstein relation* (one of many relations that bear his name. See e.g. Eq. 8):

$$A = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} B \quad (15)$$

Lasers, invented several decades later, are based on the phenomenon of stimulated emission first predicted by Einstein.

Einstein, Bose, and Bose –Einstein statistics.

On June 4th, 1924, Satyendra Nath Bose, a 30 years old reader (associate professor) at the University of Dacca (then India, now Bangladesh) sent Einstein a manuscript in English with a covering letter full of praise, asking him, in no uncertain terms, to translate it into German and submit it for publication to the *Zeitschrift für Physik*. Rumor has it that the manuscript had been rejected previously by the Philosophical Magazine. Einstein was very pleased by the manuscript and proceeded to do as requested. The paper appeared in print on July 7, 1924. The logistics of this case puzzles me a bit: the manuscript was sent to Einstein from Dacca, a provincial town (I presume by mail, the only rather dubious alternative would have been cable) and it appeared in print one month later after having been translated by Einstein himself. Modern day editors, take heed! Bose’s work derives the Planck (from now on called Bose or Bose-Einstein) distribution without superfluous interactions with additional particles or radiation, making simply use of statistics and the assumption of the indistinguishability of particles: pairs

of particles AB and BA count as a single state, not two. At the end of the printed article⁵⁷, and having identified himself as a translator, not a coauthor, Einstein added:

Note of the translator: *“Bose’s derivation of Planck’s formula represents, in my opinion, real progress. The method used in this paper also can be used to derive the quantum theory of ideal gases, as I shall show elsewhere”*.

This is probably the most encomiastic praise Einstein ever wrote concerning the work of a colleague.

So far so good. Encouraged by his success, Bose sent within a short time, a second paper to Einstein which the latter also translated and submitted for publication to the *Zeitschrift für Physik*. The logistics here is even more puzzling. The publication⁵⁸ bears the date of receipt of July 7, 1924, and the presumable date of mailing of June 14, 1924. Blanpied,⁵⁹ however, claims that this second paper was sent to Einstein on Oct. 26, 1924, which would make much more sense, having given Bose time to have heard about the acceptance, let alone publication, of the first paper. Unfortunately, it seems to have occurred to Bose that there should be no such thing as “stimulated emission of radiation”, an idea that he buttressed with erroneous algebra. No stimulated emission would have meant no lasers! In the published paper, Einstein, without identifying himself as the translator, added a signed note (a full page!) blasting at Bose and showing that there must indeed be stimulated emission, by means of two simple arguments. The first one is especially simple and appealing: in the classical theory of interaction of a resonant dipole with electromagnetic radiation, absorption as well as stimulated emission appears on the same footing. Depending on the phase of the radiation, absorption takes place. For the opposite phase emission of radiation occurs. Einstein points out that the classical theory is simply a limiting case of the quantum theory and therefore the absence of stimulated emission proposed by Bose must be wrong. It may sound strange that Einstein would translate this paper and endorse it for publication, while adding a note to the printed article saying, in no uncertain terms, that it was wrong. It seems that he also wrote a letter to Bose mentioning the pitfalls of the work and that Bose answered that he was preparing a manuscript in which Einstein’s objections would be dispelled. This correspondence, however, is not extant.⁵⁹

In spite of his long life (1894-1974, he even lived to see the advent of the laser), Bose hardly published anything of relevance after his groundbreaking 1924 paper. He is highly revered in India and most Indian biographical material simply glosses over the existence of the “second paper”.^{59, 60}

Upon reading Ref. 57, it must have dawned upon Einstein that the Bose-(Einstein) distribution law applied to massless particles (photons, vibrons, phonons) whose number increases with increasing temperature. He then generalized it to massive particles (of the type now called Bosons) whose number is conserved (the difference between Bosons and Fermions was not known to Einstein at the time). In three articles he presented at separate meetings of the Prussian Academy^{61, 62, 63} he describes the generalization of Bose's derivation to apply to massive particles. In spite of the irritation which must have caused Bose's "second paper"⁵⁸ he gives ample credit to the latter for having derived Planck's formula on the basis of the indistinguishability of particles. He points out that, by means of this assumption, one is able to rescue "Nernst's theorem" (the third principle of thermodynamics): at $T=0$ there is only one state if the particles are indistinguishable and therefore the entropy vanishes. He ends Ref. 61 in a typical Einstein way, mentioning a paradox "which he has been unsuccessful in solving". He considers two slightly different kinds of molecules. Since they are distinguishable, their statistical behavior will be different than if the molecules were the same (i.e. indistinguishable). He then expresses his difficulties in understanding the discontinuous transition from a set of equivalent molecules to two sets of slightly different ones.

Einstein's distribution function for a set of N equivalent massive molecules is

$$f(E) = \frac{z(E)}{e^{\frac{E-\alpha}{k_B T}} - 1} \quad (16)$$

where $z(E)dE$ is the number of states with energy between E and $E + dE$. The "chemical potential" α is determined from the condition:

$$\int_0^{\infty} f(E)dE = N \quad (17)$$

Einstein realized that for $T=0$ all molecules are in the lowest energy state and, *because of indistinguishability*, they correspond to only one statistical state. As T increases, molecules begin to evaporate from this state and to occupy a range of energies, whereas the lowest energy state remains multiply occupied up to a temperature T_{BE} . This experimentally somewhat elusive phenomenon is called Bose or Bose-Einstein condensation (although the idea occurred to Einstein alone, after reading Ref. 57). In Ref. 62 he suggested as possible candidates for the observation of the BE condensation H_2 and

^4He . The condensation should appear as a sharp decrease in the viscosity. He even used the term “*superfluidity*” and estimated that T_{BE} should be about 40 K.

Superfluidity in ^4He ($T_S = 2.17$ K) was discovered by Kapitza in 1937⁶⁴ (Nobel laureate, 1978). Tisza suggested in 1938 that superfluid ^4He is a Bose-Einstein condensed gas⁶⁵, but it has been pointed out that ^4He is not an ideal gas: the ^4He atoms interact strongly.⁶⁶ For a detailed discussion of the modern theory of ^4He , see Ref. 67. Since the 1960s there has been considerable activity trying to prove the presence of Bose-Einstein condensation in insulators.⁶⁸ The particles that should condense are either excitons or polaritons. Among the most investigated crystals are CuCl and Cu_2O . Although some evidence of the formation of a coherent condensate of these particles, similar to a Bose-Einstein condensate, has been obtained, this evidence is not yet conclusive. Conclusive evidence was obtained ten years ago for highly diluted rubidium vapor at extremely low temperatures.⁶⁹

SUPERCONDUCTIVITY

We have seen above that Einstein tackled usually, but not always successfully, almost all important problems of condensed matter physics. He even dealt with superfluidity. It is therefore surprising that no Einstein publication concerning superconductivity appeared in the “standard” literature. He felt tempted to get involved in 1922, on the occasion of the 40th anniversary of H. Kamerlingh Onnes having become a professor at Leiden (he had discovered superconductivity in 1911 and received the Nobel Prize in 1913). Einstein wrote an article on the theory of superconductivity which was published in the Kamerlingh Onnes’s 40th anniversary Festschrift.⁷⁰ At that time Fermi statistics was not known but this did not deter Einstein. He noticed that even in normal metals the electrical resistance should vanish for $T \rightarrow 0$ but this is not the case. He gives credit to K.O. for having realized that the residual resistance depends strongly on residual impurities. He presents some interesting considerations on the nature of electrical conduction revealing, through a glass darkly, the phenomenon of band conduction and Mott transitions. He concludes that superconductivity must be related to the existence of a coherent state connecting the outer electrons of an atom with those of its neighbors. He then postulates that impurities must destroy that coherence, in particular when a foreign atom interrupts a superconducting chain.

Again typical of Einstein, he mentions, in a *note in proof* that the aforementioned speculations have been laid to rest by a recent experiment of Kamerlingh Onnes who has

shown that a junction between two superconducting metals (lead and tin) also exhibits zero resistance, i.e. superconductivity.

RECENT APPLICATIONS OF EINSTEIN'S EARLY WORK

The diffusion-mobility relation

It has been mentioned that the diffusion-mobility relation [Eq. 8] has become rather important in the realm of semiconductor technology. There have therefore been recent efforts to generalize it to cases not covered by Einstein's original considerations.^{71, 72} Equation 8 was derived under the assumption of Boltzmann statistics, which applies to lightly doped (non-degenerate) semiconductors. The simplest generalization concerns the use of Fermi statistics and, in particular, its degenerate limit.

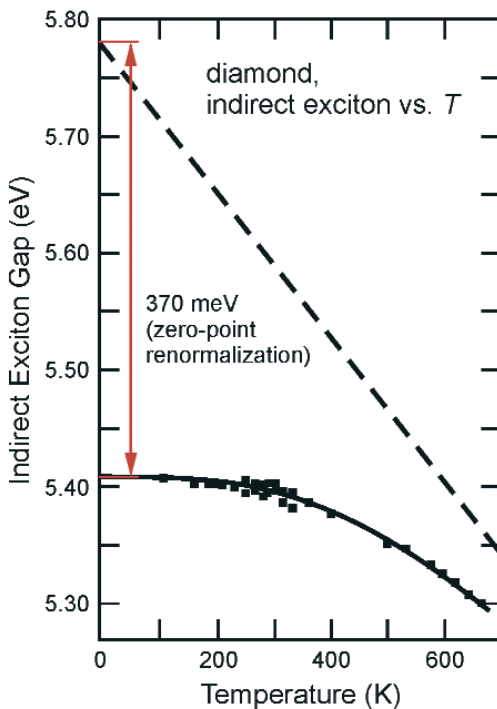


Figure 10: Temperature dependence of the photoemission at the indirect exciton energy of diamond. The points are experimental, the solid line a fit with a single Einstein oscillator. The dashed line represents the classical result extrapolated to $T = 0$. This extrapolation yields the zero point gap renormalization (370 meV). From Ref.74.

Band non-parabolicity (Fig. 3) can also be important. Appropriately generalized expressions are given in Table 1 of Ref. 71. Very recently, a publication with generalizations of the Einstein relation to lower dimensional systems and nanostructures has appeared.⁷²

The Einstein oscillator model for the temperature dependence of physical properties on temperature^{73, 74}

We have discussed above the use of a Bose-Einstein term, involving an average frequency, to represent the temperature dependence of the specific heat of insulators, the so-called Einstein oscillator model. We have also mentioned the generalization to two oscillators³⁹ and the Debye ansatz to describe the specific heat at very low temperatures ($C_V \sim T^3$). Similar terms have been used to describe the temperature dependence of other physical

properties such as the elastic constants, the phonon frequencies, the thermal expansion, the optical energy gaps, etc. Einstein fits have been used to obtain the renormalization of such properties by the thermal agitation at $T \rightarrow 0$.^{73,74} I display in Fig. 10 the measured temperature dependence of the indirect exciton frequency of diamond, together with a single oscillator fit with the fitted Einstein frequency of 1080 cm^{-1} (~1580 K). From this fit, the zero-point exciton renormalization of 370 MeV is obtained. This number has been used to estimate the hole-phonon interaction which turns out to be rather large as compared with that in Ge and Si.⁷⁴ It has been suggested⁷⁴ that this large hole-phonon interaction is responsible for the superconductivity recently observed in boron-doped diamond, with a critical temperature close to 10 K.^{75, 76}

CONCLUSIONS

When I started working on this manuscript, I had in mind reading a few of Einstein's publications (in the German original, of course) pertaining to what we now call Solid State or Condensed Matter Physics. It soon became clear to me that this work would have to cover much more ground than I originally had in mind. Correspondingly, a power point presentation would go well over one hour, the typical limit granted for an Einstein talk in this *annus mirabilis*. It has turned out to be a fascinating task, not only from the physics point of view, but because of providing me with interesting insights into the way Einstein worked, thought and chose his problems. I found that some results I rederived recently, had already been derived by Einstein nearly 100 years ago in exactly the same manner (e.g., the zero-point energy of the harmonic oscillator). I believe that the reader will agree with me that Einstein well deserves to be called the father of Condensed Matter Physics.

ACKNOWLEDGMENTS

I would like to thank Karl Syassen for a critical reading of the manuscript and the Fond der Chemischen Industrie for financial support.

REFERENCES

- ¹ *Consequences of the observations of capilarity phenomena*, Ann. d. Physik 4, 513 (1901).
- ² *Calculation of surface enthalpy of solids from an ab initio electronegativity based model: case of ice*, J.M. Douillard and M. Henry, J. Colloid and Interface Science 263, 554 (2003).
- ³ *On the thermodynamic theory of the potential difference between metals and fully dissociated solutions of their salts and on an electrical method to investigate molecular forces*, Ann. d. Physik 8, 798 (1902).

- ⁴ See, for instance: *Theory of the opalescence of homogeneous fluids and mixtures of fluids near the critical state*, Ann. d. Physik, 33, 1275 (1910). Cited 696 times.
- ⁵ *Kinetic theory of thermal equilibrium and the second principle of thermodynamics*, Ann. d. Physik 9, 417 (1902), cited 35 times.
- ⁶ *A theory of the foundations of thermodynamics*, Ann. d. Physik 11, 170 (1903). Cited 52 times.
- ⁷ *Concerning the general molecular theory of heat*, Ann. d. Physik 14, 354 (1904). Cited 38 times.
- ⁸ M. von Smoluchowski, Ann. d. Physik 25, 205 (1908).
- ⁹ See E. Pais, *Subtle is the Lord...* (Oxford Univ. Press, Oxford, 1982), p.55.
- ¹⁰ A. Einstein, Ann. d. Physik 34, 175 (1911).
- ¹¹ *A new determination of the molecular dimensions*, Ann. d. Physik 19, 289 (1906) Cited 1697 times!
- ¹² *On the production and transformation of light according to a heuristic point of view*. Ann. d. Physik 17, 132 (1905), cited 442 times.
- ¹³ *On the motion of particles suspended in a liquid at rest, as required by the molecular-kinetic theory of heat*. Ann. d. Physik 17, 549 (1905), cited 1677 times.
- ¹⁴ *On the electrodynamics of moving bodies* Ann. d. Physik 17, 891 (1905) cited 756 times
- ¹⁵ *Does the inertial mass of a body depend on its energy content?* Ann. d. Physik 18, 639 (1905). Cited 115 times
- ¹⁶ On Dec. 10, 1922, the day of the presentation of the Nobel Prizes, Einstein was traveling in the Far East. The prize was received on his behalf by the German ambassador to Sweden.
- ¹⁷ G. N. Lewis, Nature 118, 874 (1926).
- ¹⁸ Einstein used in Ref. 12 Lenard's data on photoemission and Stark's data on the ionization of gases by uv light. Lenard was awarded the Nobel Prize for 1905 whereas Stark received the award for 1919. Through the vagaries and ironies of history both Lenard and Stark became the leading representatives of the Aryan Physics movement which accompanied the groundswell of Nazi sentiment in Germany. As an example I quote from a newspaper article coauthored by both physicists in 1924, well before de Nazi access to power: "...a racially alien spirit has been busily at work for over 2000 years. The exact same force is at work, always with the same Asian people behind it that had brought Christ to the cross, Jordanus Brunus to the stake..." See K. Hentschel, *Physics and National Socialism* (Birkhäuser Verlag, Basel, 1996) p.7.
- ¹⁹ Z. X. Shen et al., Science 267, 343 (1995).
- ²⁰ J. Schäfer et al., Rev. Sci. Inst. 64, 653 (1993).
- ²¹ C. Sebenne et al., Phys.Rev.B 12, 3280 (1975).
- ²² Actually one should say that Ref. 11 was based on his thesis which was submitted to the University of Zürich on April 30. 1905. Ref. 11 did not appear till 1906.
- ²³ *On the theory of Brownian motion*, Ann. d. Physik, 19, 371 (1906), cited 530 times.
- ²⁴ M. Gouy, J. de Physique, 7, 561 (1888).
- ²⁵ *Can quantum-mechanical description of reality be considered complete?* A. Einstein, B. Podolsky, and N. Rosen, Phys. Rev. 47, 777 (1935). Cited 2648 times.
- ²⁶ A comment on Ref.11. Ann. d. Physik 34, 591 (1911). Cited 1080 times. Apparently Einstein could not find the error in his calculation. It was found, at his request, by one of his few collaborators, L. Hopf.
- ²⁷ P. A. M. Dirac, Proc. Roy. Soc. London, Ser. A 123, 714 (1929). Here Dirac states that relativistic effects do not affect the atomic and molecular structure. If this were correct, similar conclusions would apply to solids.
- ²⁸ *Relativistic effects in the properties of gold*, P. Schwerdtfeger, Heteroatom Chemistry 13, 578 (2002)
- ²⁹ *On the classical radiation of accelerated electrons*, J. Schwinger, Phys.Rev. 75, 1912 (1949). Cited 665 times
- ³⁰ F. Herman, in Proc. Int. Conf on the Physics of Semiconductors (Dunod, Paris, 1964) p.2-22.
- ³¹ P. Y. Yu and M. Cardona, *Fundamentals of Semiconductors*, third edition (Springer, Heidelberg, 2005) p.95.

- ³² *Relativity and the periodic system of the elements*, P. Pyykkö and J. P. Desclaux, *Accounts of Chemical Research*, 12, 276 (1979); *Why is mercury liquid? - Or, why do relativistic effects not get into chemistry textbooks?* L.J. Norrby, *J. Chem. Education*, 68, 110 (1991).
- ³³ W.G. Spitzer and H.Y. Fan, *Phys. Rev.* 106, 882 (1957).
- ³⁴ Ref. 31, p.105.
- ³⁵ *Planck's theory of radiation and the theory of the specific heat*, *Ann. d. Physik* 22, 180 (1907). Cited 308 times.
- ³⁶ A. T. Petit and P.L. Dulong, *Ann. Chim. Phys.* 10 395 (1819).
- ³⁷ C. Ramaswamy, *Indian J. Phys.* 5, 97 (1930); *Nature* 125, 704 (1930).
- ³⁸ P. Debye, *Ann. d. Physik* 39, 789 (1912). Cited 500 times.
- ³⁹ W. Nernst and F. A. Lindemann, *Z. Elektrochemie* 17, 817 (1911). Cited 144 times.
- ⁴⁰ *Elementary considerations about thermal motions of molecules in solids*, *Ann. d. Physik* 35, 679 (1911), 82 citations.
- ⁴¹ The word "primitiv" in German does not have exactly the same meaning as in English. It probably would be better translated as "simple". Not knowing exactly what Einstein had in mind, I left the word "primitive" in the translation.
- ⁴² F. A. Lindemann, Viscount Cherwell, an Englishman of German ancestry, was the thesis adviser of R.V. Jones, who was the thesis adviser of W. Paul, my thesis adviser.
- ⁴³ F. A. Lindemann, *Physik. Zeitschr.* 11, 609 (1910), cited 1098 times.
- ⁴⁴ *A relation between the bulk modulus and the specific heat in monatomic solids*, *Ann. d. Physik* 34, 170 (1911). Cited 97 times.
- ⁴⁵ W. Sutherland, *Phil. Mag.* 20, 657 (1910).
- ⁴⁶ E. Madelung, *Physik. Zeitschr.* 11, 898 (1910).
- ⁴⁷ *Comments on my work: "A relation between the elastic behavior..."* *Ann. d. Physik* 34, 590 (1911). Cited 24 times, some of the citations being very recent. Not bad for a paper whose only purpose is to set priorities straight.
- ⁴⁸ A. Sparavigna, *Phys. Rev. B* 67, 144305 (2003).
- ⁴⁹ M. Asen-Palmer et al., *Phys. Rev. B* 56, 9431 (1997).
- ⁵⁰ *Some arguments in favor of the existence of molecular agitation at zero temperature*, *Ann. d. Physik* 40, 551 (1913). Cited 72 times. This is one of the very few coauthored papers of Einstein.
- ⁵¹ The existence of a zero-point energy had also been conjectured by Planck. See M. Planck, *Ann. d. Physik* 37, 642 (1912). Cited 32 times.
- ⁵² J. P. Dahl, *J. Chem. Phys.* 109, 10688 (1998).
- ⁵³ *The quantum theory of radiation*, *Physik. Zeitschrift* 18,121 (1917). Cited 741 times.
- ⁵⁴ *Theoretical remarks on the Brownian motion*, *Zeitsch. für Elektrochemie*, 13, 41 (1907), cited 28 times.
- ⁵⁵ *The use of photoelectric cadmium and zinc cells for ultraviolet sunlight photometry*, *Physik. Zeitsch.* 15, 176 (1914). Cited 10 times. I had some difficulties in obtaining a copy of this article. When it arrived I was dismayed to see that there was a serious error in the WoS data bank. This publication of Einstein has nothing to do with photocathodes (too bad!). Its correct title is "Basic remarks on general relativity and the theory of gravitation" (makes more sense, doesn't it?). The article on photocathodes actually exists. It was authored by Elster and Geidel and appeared in *Physik. Z.* 15, 1 (1914). I have alerted the ISI and hope that, in due course, the error will be corrected.
- ⁵⁶ A. Einstein, *Physik. Zeitsch.* 18, 121 (1917). Cited 733 times.
- ⁵⁷ *Planck's law and the hypothesis of light quanta*, S.N. Bose, *Z. Physik*, 26, 178 (1924). Cited 226 times.
- ⁵⁸ *Thermal equilibrium in the radiation field in the presence of matter*, S.N. Bose *Zeitsch. für Physik* 27, 384

- (1924). Cited 17 times.
- ⁵⁹ Satyendranath Bose: *co-founder of quantum statistics*, W.A. Blanpied, Am. J. Phys 40, 1212(1972).
- ⁶⁰ See, however, Theimer and Ram, Am. J. Phys. 45, 242 (1977).
- ⁶¹ *Quantum theory of the monatomic ideal gas*, Sitzber. Preuss. Acad. 2, 261 (1924). Cited ~100 times.
- ⁶² *Quantum theory of the monatomic ideal gas II*, Sitzber. Preuss. Acad. 3,1925. Cited~140 times.
- ⁶³ *On the quantum theory of the ideal gas*, Sitzber. Preuss. Acad. 18, 1925. Cited ~60 times.
- ⁶⁴ P .L. Kapitza, Nature 141, 74 (1938). Cited 112 times.
- ⁶⁵ L. Tisza, Nature 141, 913 (1938). Cited 145 times.
- ⁶⁶ L. Landau, Phys. Rev. 60, 356 (1941).
- ⁶⁷ G. D. Mahan, *Many-Particle Physics* (Plenum Press, N.Y., 1990).
- ⁶⁸ D. Snoke, Science 298, 1368 (2002).
- ⁶⁹ M. H. Anderson et al., Science 269, 198 (1995). Cites 2659 times!. Two coauthors, C.A. Wieman and E.A. Cornell were awarded for this work, together with W. Ketterle, the Nobel Prize in Physics for 2001.
- ⁷⁰ A. Einstein, *Theoretical considerations concerning superconductivity in metals (in German)*, Festschrift in honor of H. Kamerlingh Onnes on the occasion of the 40th anniversary of his professorship (Eduard Ijdo, Leiden, 1922) p.429. Cited 8 times.
- ⁷¹ P. T. Landsberg, *Einstein and statistical thermodynamics III: the diffusion-mobility relation in semiconductors*, Eur. J. Phys. 2, 213 (1981).
- ⁷² L. J. Singh et al., *The Einstein relation in nanostructured materials: simplified theory and suggestion for experimental determination*. Electrical Engineering, 87, 1 (2005).
- ⁷³ M. Cardona, Phys. Stat. Sol. (a) 188, 1209 (2001).
- ⁷⁴ M. Cardona, Solid State Commun., 133, 3 (2005).
- ⁷⁵ E. A. Ekimov et al., Nature 428, 542 (2004).
- ⁷⁶ Y. Takano, Private communication.

EINSTEIN'S DREAM AND THE CHALLENGES OF 21ST CENTURY PHYSICS

Miguel A. Vázquez-Mozo

Departamento de Física Fundamental e Instituto Universitario de Física Fundamental y Matemáticas, IUFFyM, Universidad de Salamanca, España.

UNIFICATION AS AN AIM OF PHYSICS

Physics as a science aims to uncover the basic rules that govern the Universe. This quest is not a simple collector's activity where physical laws are piled up. Physics aims also at the *understanding* of the workings of Nature and to provide a conceptual framework in which these laws can be understood.

Because of this, we can say that the final aim of physics is not only to explain and understand all natural phenomena, but also to reduce as much as possible the number of fundamental principles that have to be assumed to achieve this understanding. This trend has shown itself many times along the history of physics. The first instance can be found in its very birth as an experimental science. The 17th century witnessed the formulation of the first physical laws in mathematical form, both in astronomy and mechanics. To Johannes Kepler we owe the three laws of planetary motion that, for the first time in history, reduced the motion of the planets to mathematical terms. Almost at the same time Galileo Galilei described the motion of projectiles in terms of simple mathematical principles. Celestial and terrestrial physics were seen at that time as two different realms ruled by different laws. It was one of the greatest achievements of Isaac Newton to realize that these two separated spheres were governed by the same set of physical rules: both Kepler's laws for the planetary orbits and Galileo's principles ruling the motion of projectiles were consequences of the law of gravity and the three laws of motion. Hence, both celestial and terrestrial physics are nothing but just that, physics.

The unification of terrestrial physics with astronomy in terms of the laws of mechanics was only a first step. Around the middle of the 19th century James Clerk Maxwell real-

ized that the multiplicity of electric and magnetic phenomena that had been the subject of study for more than two hundred years from Gilbert to Faraday, as well as the science of optics initiated by Huygens and Newton and developed by Fresnel and Young, could be understood as a consequence of the physical principles ruling the dynamics of the electromagnetic field. This reduced electricity, magnetism and optics to the theory of electromagnetism.

Next ones on the list were the laws of thermodynamics. These were regarded as general principles whose validity was independent of the internal structure of matter, an idea that Einstein found very attractive. By the last years of the 19th century the kinetic theory of matter showed how these principles could be understood as statistical laws derived from the dynamics of systems composed by a large number of molecules.

THE SUCCESS OF EINSTEIN AND HIS DISCONTENT

By the beginning of the 20th century most of the physical phenomena could be understood from the laws of mechanics and electromagnetism. Even the difficulties derived from applying Maxwell equations to moving bodies disappeared with the formulation of special relativity. Only the explanation of the recently discovered quantum phenomena remained elusive within this conceptual framework, but for the time being this problem was overlooked.

At the end of 1915 Einstein succeeded in his ten year quest of a generalization of special relativity that led him to formulate what would be the new theory of the gravitational field. Special relativity had shown that our three-dimensional space and time should be intertwined in a four-dimensional space-time whose points correspond to every past, present and future event. However, the geometry of space-time is quite different from the one we are used to in the three-dimensional space: it is *non-Euclidean*. This means that the distance between two points in space-time, i.e. two events, with coordinates (t_1, x_1, y_1, z_1) and (t_2, x_2, y_2, z_2) is not given by the Pythagorean theorem,

$$d^2 \neq (t_2 - t_1)^2 + (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2 \quad (1)$$

Instead, the space-time distance, or interval, is defined by

$$d^2 = (t_2 - t_1)^2 - (x_2 - x_1)^2 - (y_2 - y_1)^2 - (z_2 - z_1)^2 \quad (2)$$

All the interesting consequences of special relativity follow from the non-Euclidean character of space-time.

The presence of gravity complicates the situation, since then the space-time distance between two points given by Eq. 2 is only valid when the two corresponding events are infinitesimally close to each other. This is because gravity reflects the curvature of space-time. Einstein did not only realize of this fact, but actually provided a set of equations relating the degree of curvature of space-time with its energy-density content:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} \quad (3)$$

Geometry = Matter

For “weak” gravitational fields the previous equations reduce to the old Newton’s law.

We are not interested in the mathematical properties of Einstein’s equations, only in their physical meaning. What they tell us is that the geometry of space-time (the left-hand side of the equations) is determined by the amount of energy-matter the space-time contains (the right-hand side). How curvature can produce the effect of gravitational attraction is easy to grasp in a two-dimensional analogy. The presence of a mass like the Sun results in a curvature of space-time, a depression or bowl, like in Fig. 1. A second mass passing nearby (for example a planet) will feel this curvature and as a consequence its trajectory will bend towards the Sun, producing the orbits that we see.

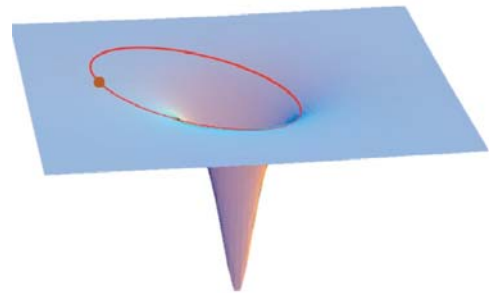


Figure 1: The presence of a mass produces a curvature of the space-time continuum and makes the trajectories of other masses to bend when passing close to it.

General relativity was a very successful theory from its very formulation. It explained a riddle that had puzzled astronomers for fifty-six years since Urbain Jean Joseph Le Verrier noticed in 1859 that the perihelium of Mercury was rotating around the Sun at a speed that could not be explained by Newtonian mechanics. After taking into account the perturbations on Mercury’s orbit produced by the gravitational attraction of all nearby planets it was found that the rotation of the perihelium had an excess of 43 arc seconds per year that could not be accounted for. Lots of explanations had been ventured to explain this anomaly within the Newtonian theory, among them the existence of another fictitious planet, christened Phaeton, that would orbit the Sun at a closer distance than Mercury. Einstein’s general relativity was able to explain not only

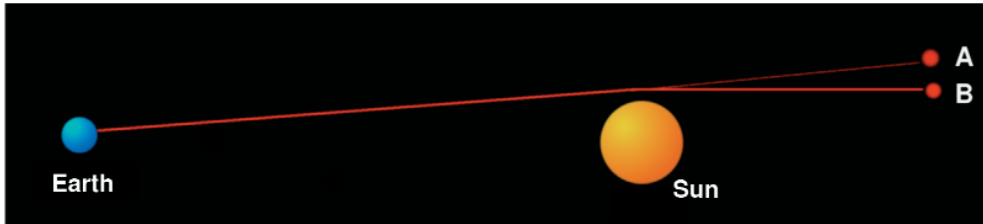


Figure 2: Deflection of light rays passing near the Sun. The light coming from the B is deflected by the Sun. As a result an observer on the Earth would see the star at position A .

this excess in the rotation of the perihelium, but to reproduce exactly the value found by Le Verrier.

The second big success of the theory came a few years after its publication in 1916. Because of the equivalence of mass and energy, the gravitational field does not only affect matter but any kind of energy as well. In particular, a light ray passing near the Sun or any other massive celestial object would suffer a deflection due to its gravitational attraction (Fig. 2). On May 29th, 1919 an observation of the position of some stars near the Sun during a total eclipse in the gulf of Guinea was carried out by an expedition led by Arthur Eddington. The result was a confirmation of the value predicted by Einstein for the change in the apparent position of these stars due to the deflection of the light rays by the Sun.

The news of this confirmation of the general theory of relativity made its way to the headlines of the press and Einstein became suddenly a media celebrity. He was, nevertheless, far from being completely satisfied with the final formulation of general relativity. On the one hand, he considered that his equations for the gravitational field (3) presented an unnatural asymmetry. The left-hand side of these equations contained only data about the geometry of space-time which could be described in terms of fields. At the same time the right-hand side is constructed by adding the contribution from the matter particles that act as sources of the gravitational field.

Einstein did not like at all this mixed character (field-particle) of the theory. What he wanted was to formulate a theory of gravity solely in terms of fields. In his view, particles should not be fundamental entities but emerge as nonsingular solutions of the field equations without sources.

The second problem that Einstein found in his formulation of general relativity was closely related to this one and concerned the relationship between gravity and electromagnetism. If the equations of the gravitational field could be written only in terms of field quantities from which the elementary particles would be derived, and since these particles interact through their electromagnetic field, it seems natural to look for a unified theory that would treat gravity and electromagnetism on the same footing.

Electrons and protons should be regular solutions to the equations of this unified field theory with the appropriate electric charge.

Here we should keep in mind that by the time Einstein started thinking about the unified field theory, gravity and electromagnetism were the two only interactions that were required to understand essentially all known physical phenomena. Even nuclear physics, that started being developed about that time, relied on electromagnetism to explain the structure of atomic nuclei. Until the neutron was discovered in 1932, the nucleus of the atom was thought to be composed only of protons and electrons: a nucleus of mass number A and atomic number Z was supposed to be made out A protons and $(A - Z)$ electrons¹. These latter ones were believed to be responsible for holding the nucleus together by electromagnetic interaction. The inclusion of electrons among the constituents of the nucleus came suggested by the emission of these particles in radioactive processes (β -decay).

In spite of all this, electromagnetism and gravity have completely different dynamics. While the gravitational field is understood through the Einstein equations (3) to be a consequence of the geometry of space-time, the electromagnetic interaction is governed by Maxwell equations:

$$\begin{aligned}
 \bar{\nabla} \cdot \bar{E} &= \rho \\
 \bar{\nabla} \cdot \bar{B} &= 0 \\
 \bar{\nabla} \times \bar{E} &= -\frac{1}{c} \frac{\partial \bar{B}}{\partial t} \\
 \bar{\nabla} \times \bar{B} &= \frac{1}{c} \bar{j} + \frac{1}{c} \frac{\partial \bar{E}}{\partial t}
 \end{aligned} \tag{4}$$

which have no obvious geometrical interpretation. The effect of electromagnetic fields could be included on the right-hand side of Einstein's equations, but any attempt to find regular solutions to the system (3)- (4) that could be identified with a particle failed. Although Einstein was not the only one pursuing a unified field theory of gravitation and electromagnetism (both Hermann Weyl and Erwin Schrödinger were for a time involved in the search for such a theory), for him it became a real quest that lasted for the rest of his life. During this time he tried about every possible extension of general relativity that could allow to understand electromagnetism as a result of the geometry of space-time. Einstein was even more ambitious. Although he acknowledged the success of quantum mechanics in the description of atomic and subatomic physics, he always doubted the fundamental character of the probabilistic features of this theory. In his view probabili-

ties in quantum mechanics should have the same origin as probabilities in statistical physics: they parametrize our partial ignorance about an otherwise deterministic system. For these reasons Einstein pursued the idea that one should be able to derive the quantum rules from a perfectly deterministic unified field theory of gravity and electromagnetism. In his mind this theory would explain both matter and quantum mechanics.

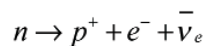
WHY EINSTEIN COULD NOT FULFILL HIS DREAM

Einstein died in 1955 without fulfilling his dream of unifying gravity and electromagnetism, matter and fields into a classical unified field theory from which quantum mechanics would be derived. Einstein's failure was nevertheless unavoidable for a number of reasons:

- For all we know, quantum mechanics provides the rules of the game. Any attempt to derive it from an underlying classical field theory looks quite hopeless.

- Electromagnetism and gravity are not the whole story. With the development of quantum mechanics it was noticed that certain properties of nuclei could not be explained in the proton-electron model. The discovery of the neutron in 1932 made unavoidable the conclusion that the structure of the nucleus required the existence a new force that would hold it together overcoming the electrostatic repulsion between the protons.

The study of β -decay was another source of riddles for the current nuclear models. In the 1930s Fermi provided the final explanation of this process as the disintegration of a neutron into a proton, an electron and an antineutrino:



In Fermi's theory neither the electron nor the antineutrino existed as constituents of the nucleus, but were created in the decay process. This was the final blow to a variety of nuclear models that considered electrons and/or neutrinos as present somehow in the nucleus. At the same time it pointed out the existence of a new interaction responsible for β -decay, that would later be called weak interaction.

- Finally, the simple picture of the fundamental constituents of matter that physicist had at the beginning of the 1920s also changed radically with the discovery of new subatomic particles. For example, in 1940 only five elementary particles were known, the proton, the neutron, the electron, its antiparticle the positron, and the muon. By

1964 the number of “elementary” particles detected has increased to around 30. Soon the question arose of whether every single element of this particle menagerie was actually fundamental or the proliferation of subatomic particles was indicating the existence of more fundamental building blocks. A key hint turned out to be the fact that most of the particles discovered were subject to the strong interaction, whereas the number of them that do not interact through this force was very small, being essentially reduced to the electron, the muon, the neutrinos and the corresponding antiparticles.

All these facts announced a much more complicated structure of the world than the one of elementary protons and electrons interacting through electromagnetic and gravitational forces envisaged by Einstein. His quest for the unified field theory was doomed from the onset.

OUR VIEW OF THE WORLD

Since Einstein’s times we have learned a lot about how the Universe is made. We know that there are four, not two, fundamental forces: gravitation, electromagnetism, and the strong and weak nuclear interactions. At the same time our knowledge about the elementary building blocks of Nature has evolved a long way from the picture of electrons and protons as basic elements.

Quarks and leptons

During the 1960s it became more and more evident that the proliferation of strong interacting particles (called hadrons) had to be interpreted as a hint of their non-elementary character. Studying their properties, Murray Gell-Mann and George Zweig postulated in 1964 that hadrons were composites of some elementary particles, named *quarks* by Gell-Mann. Hadrons with integer spin, called mesons, were considered to be a bound state of a quark and an antiquark whereas baryons, i.e. hadrons with half-integer spin, were made out of three quarks. With this hypothesis it was possible to understand the proliferation of hadrons in the same way that Bohr’s atomic model made it possible to achieve a more profound understanding of the chemical properties of the elements codified in the periodic table.

Although originally thought to be mathematical abstractions intended to classify hadrons according to their physical properties, the reality of quarks was being reinforced along the years until their existence was finally proved experimentally. Today we know that there are six different types:

u up d down	c charm s strange	t top b bottom
--------------------	--------------------------	-----------------------

and the corresponding antiquarks. All hadrons are bound states of three quarks (baryons) or a quark-antiquark pair (mesons). An interesting property of quarks is their fractional charge: the u , c and s quarks have electric charge $(2/3)e$, where $e = 1.6 \times 10^{-19}$ C is the elementary charge, whereas d , s and b have charge $-(1/3)e$. However, combinations of three quarks or of a quark and an antiquark always have charges which are integer multiples of e . The quarks feel all interactions in Nature: strong, weak, electromagnetic and gravitational.

In addition to quarks there are also six elementary particles that are insensitive to the strong interactions. These particles, called *leptons*, are:

ν_e electron neutrino e^- electron	ν_μ muon neutrino μ^- muon	ν_τ tau neutrino τ^- tau particle
---	---	--

The three neutrinos have no electric charge and are only subjected to gravitational and weak nuclear forces. On the other hand the electron, the muon and the tau particle, which have electric charge equal to $-e$, interact through gravitational, weak and electromagnetic interactions.

Interactions

Maxwell's equations (4) for the electromagnetic field can be written in terms of the scalar and vector potentials $\varphi(t, \vec{x})$ and $\vec{A}(t, \vec{x})$, where the electric and magnetic fields are given respectively by

$$\begin{aligned}\vec{E} &= -\vec{\nabla}\varphi - \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \\ \vec{B} &= \vec{\nabla} \times \vec{A}\end{aligned}\quad (5)$$

However, the values of \vec{E} and \vec{B} do not uniquely determine the scalar and vector potentials. Indeed, if instead of $\varphi(t, \vec{x})$ and $\vec{A}(t, \vec{x})$ we take

$$\begin{aligned}\varphi'(t, \vec{x}) &= \varphi(t, \vec{x}) + \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \eta(t, \vec{x}) \\ \vec{A}'(t, \vec{x}) &= \vec{A}(t, \vec{x}) - \vec{\nabla} \eta(t, \vec{x})\end{aligned}\quad (6)$$

we find exactly the same values for the electric and magnetic field for any choice of the function $\eta(t, \vec{x})$. This is dubbed a *gauge freedom* in our choice of the potentials and the replacements (6) are called *gauge transformations*. An important point about these transformations in the case of electromagnetism is that they are *commutative*: if we perform two successive gauge transformations with gauge functions $\eta_1(t, \vec{x})$ and $\eta_2(t, \vec{x})$ the result is equivalent to a single gauge transformation with function $\eta_1(t, \vec{x}) + \eta_2(t, \vec{x})$. Therefore the final values of $\varphi(t, \vec{x})$ and $\vec{A}(t, \vec{x})$ do not depend on the order in which these two gauge transformations are made. This is summarized by saying that electromagnetism is an example of an *abelian gauge theory*.

This construction can be generalized to theories with several “electric” and “magnetic” fields where gauge transformations are parametrized by more than one independent gauge function. More importantly, unlike the case of electromagnetism, in these generalization of Maxwell's theory the gauge transformations may not commute, i.e. the final value of the potentials may depend on the order in which two successive gauge transformations are performed. Theories with this property are called *nonabelian gauge theories* and are the cornerstone of our knowledge of how elementary particles interact.

Electromagnetism and the weak force combine themselves into a nonabelian gauge theory. Physically this means that what at the energies typical of everyday life appear as two different interactions get mixed into an electro-weak force when the energies of the particles involved in a physical process are high enough. This idea was developed by the end of the 1960s by Sheldon L. Glashow, Abdus Salam and Steven Weinberg into the $SU(2) \times U(1)$ electroweak model, called in this way because of the group of gauge transformations. One of its key predictions was that, apart from the well-known photon γ which carries the electromagnetic force, there should be three massive charged spin-1 particles mediating the weak nuclear interaction: the Z^0 boson which has zero electric charge, and two charged particles W^+ and W^- . In 1983 the W^\pm and Z^0 bosons were detected at CERN by an experimental group led by Carlo Rubbia. From then on, the Glashow-Salam-Weinberg model became the accepted description of electroweak interactions.

The strong nuclear force is described by the theory of *Quantum Chromodynamics* (QCD), a nonabelian gauge theory where gauge transformations form the group $SU(3)$. The strong force between the quarks is carried by eight massless spin-1 particles, the gluons. QCD is a very interesting theory which has to account for the fact that quarks are not seen as isolated particles. Although a fully analytic proof of this is still missing, numerical calculations show that QCD indeed explains the confinement of quarks to form the observed mesons and baryons. Quantum chromodynamics also gives an explanation for experimental results showing that quarks behave as quasi-free particles inside the hadrons they form.

The Standard Model.

The electroweak theory and QCD furnish together the *Standard Model* of particle physics. This model is extremely successful in explaining the results of the experiments carried out in particle accelerators. Morally speaking, we can summarize the Standard Model in the “postmodern” periodic table of Fig. 3. The first three columns show the fundamental bricks of matter, whereas the last column includes all the particles responsible for carrying the electromagnetic, weak and strong interactions.

u	c	t	γ
d	s	b	W^{\pm}
ν_e	ν_μ	ν_τ	Z^0
e^-	μ^-	τ^-	g

Figure 3: Postmodern version of the periodic table. It include the matter elementary particles (quarks and leptons) and the carrier of the Standard Model interactions: the photon, the W^{\pm} and Z^0 bosons and the eight gluons.

Along the years the Standard Model has passed with flying colors all kinds of tests. In particular the experiments carried out at the Large Electron-Positron (LEP) Collider at CERN during the 1990's have confirmed its predictions with astonishing precision. However, there is still a last piece missing in the puzzle: as we have explained above, the electroweak theory includes the spin-1 massive W^{\pm} and Z^0 bosons. Here lies the problem, since in general it is not possible to construct a consistent quantum theory of a massive interacting spin-1 particle. Moreover, all matter particles (quarks and leptons) should be massless for the gauge theory in which the Standard

Model is based to be consistent, unlike the case of the observed quarks and leptons.

The way out to the dilemma is to have massless particles that, however, looks somehow like massive ones. This can be achieved through the *Higgs mechanism*. Although technically involved, the essence of this mechanism is not difficult to grasp in physical terms using the following analogy. In classical mechanics the mass is a measure of the inertia of a body: it measures the response (acceleration) to an action (force). Suppose now that we have an object of mass m that can move on a horizontal surface in the absence of friction. If we apply a horizontal force F on this object it will accelerate in the same direction of the force with acceleration a : the mass is just the ratio between the action (the force) and the response (the acceleration), $m = F/a$. Suppose now that we repeat the same experiment but underwater. Because of the friction due to the liquid, under the action of the same force F the body will suffer a smaller acceleration a' . We can still define the effective mass m^* as

the quotient between the applied force and the acceleration, $m^* = F/a' > m$. As a result of the friction exerted by the liquid on the ball, its mass gets replaced by a larger effective mass, which is the one measuring now the inertia of the body in the new medium.

Keeping this analogy in mind we can understand how the Higgs mechanism manages to give mass to a particle that is really massless. The idea is to introduce a field, the Higgs field, that behaves as some kind of “fluid” interacting with the originally massless particles. As a result of this interaction the particles acquire an effective mass which is different from zero. This all-filling Higgs field can also have its own excitations, ripples that behave like a particle and that because of its interaction with the Higgs field acquire a certain mass. This particle is called the *Higgs boson*.

This solution to the problem of the mass in the Standard Model works because the gauge bosons and matter particles in fact remain massless, their “apparent” masses being an effect due to their interaction with the Higgs field. Therefore there are no problems with the quantum theory in the electroweak sector of the Standard Model.

In spite of the theoretical success of the Higgs mechanism, we still miss a direct detection of the Higgs particle. There is, however, the generalized belief that this particle will be seen in the new Large Hadron Collider (LHC) that will start running in 2007 at CERN. If this is the case the last element of the Standard Model would have been tested at last.

THE FUTURE OF A DREAM

From our previous discussion one can get the feeling that, once the expected detection of the Higgs particle is made at LHC, the Standard Model would be complete and we would have reached a final and complete understanding of the physics of elementary particles.

But is this the end of the story? In spite of its impressive successes, the Standard Model has also some features that are widely considered to be unsatisfactory. One of them concerns the number of parameters needed in the model. In order to make predictions the Standard Model requires around 30 parameters to be specified. These include the masses of the different particles and the values of the coupling constants. However, one would expect that in a truly fundamental theory the number of parameters in terms of which all other physical quantities are derived should be small.

A second problem is that the Standard Model does not really unify the interactions. In particular electromagnetism and the weak nuclear force are not unified into a single interaction characterized by only one coupling constant. The two forces only mix with each other at high energies but it is still necessary to specify two different coupling constants in terms of which the electromagnetic and weak couplings are written. In the case of the strong nuclear force it does not even mix with the other two.

Finally, although the Standard Model is very successful in describing the electromagnetic, weak and strong interactions of elementary particles, it has nothing to say about gravity. The gravitational interaction is far too much weaker than the other three and its effect is completely negligible in the experiments carried out in particle accelerators. It can be argued that all these shortcomings of the Standard Model are purely aesthetic and that they do not provide any hard evidence that the model should be modified at higher energies. However, there are other hints pointing towards the existence of new phenomena at energies higher than the one explored so far and that cannot be accounted for by the Standard Model. These signs come mainly from two sources: cosmological observations and high energy experiments.

Signs in the sky

The last decade has witnessed the coming of age of Cosmology as an experimental science. Among the most interesting results of recent observations is the confirmation that the present energy density of the Universe is very close to the critical value $\rho_{crit} = 1.9 \times 10^{-26} h^2 \text{ kg m}^{-3}$ (with $h = 0.73 \pm 0.03$) required for the Universe to be spatially flat. This can be written in terms of the density parameter Ω as

$$\Omega \equiv \frac{\rho}{\rho_{crit}} = 1 \pm 0.1 \quad (7)$$

These are good news for inflationary cosmology, since it is a general prediction of these models that the total density of the Universe should be very close to the critical one. However the problem arises after noticing that observations also show that most of the matter-energy of the Universe is not visible. In particular it is found that the contribution of matter to Ω is about 30% whereas at most 1% of the total energy of the Universe corresponds to visible matter that can be seen with the current telescopes:

$$\begin{aligned} \Omega_{matter} &\approx 0.33 \\ \Omega_{visible} &\approx 0.01 \end{aligned} \quad (8)$$

These results pose a double riddle. On the one hand we have to explain what *dark matter* is made of, i.e. what the origin of the contribution of $\Omega_{matter} - \Omega_{visible}$ to the total density parameter Ω is. There are many pieces of evidence indicating that we are missing most of the matter content of the Universe. For example, from the study of the rotation of spiral galaxies one can conclude that if the only matter contained in them would be the one we see, the rotational speed of the spiral arms should

decrease when the distance to the galaxy center increases. The observations show otherwise, since the velocity of the galaxy arms remains more or less constant for a large range of distances to the center. This indicates that there is more mass in a galaxy than the one we can see.

The situation is even more puzzling, since for various reasons we know that most of this dark matter cannot be “standard”. Actually the contribution of ordinary “baryonic” matter to the density parameter is $\Omega_{\text{baryon}} \approx 0.04$. This baryonic dark matter might be, among other possibilities, in the form of “failed stars”, large balls of gas that did not have enough mass to start the thermonuclear fusion in their cores (some kind of Jupiters). The remaining $\Omega_{\text{nonbaryon}} \approx 0.29$, i.e. most of the dark matter, has to be in some exotic form we do not know yet. A first problem is to look for suitable candidates for exotic dark matter.

Particle physics can provide several dark matter candidates. The first one are massive neutrinos. As we will discuss below, recent experiments have showed that neutrinos have small nonzero masses. A consequence of this is the existence of sterile neutrinos that only interact gravitationally and that are good candidates for dark matter. Another possible candidate is the axion, an exotic particle with small mass of order² 10^{-6} to 10^{-4} eV. In more speculative scenarios, like supersymmetry, one can find good candidates like the lightest supersymmetric particle with mass in the range between 50 and 500 GeV. In any case, the resolution of the dark matter problem requires the introduction of particles that are not in the Standard Model. This applies even to massive neutrinos, since the introduction of mass terms for this particles requires a (minimal) modification the model. So much for dark matter. The second question we face regarding the matter-energy content of the Universe is how to understand that most of it, up to 70%, is not in the form of matter:

$$\Omega_{\lambda} \approx 0.7 \tag{9}$$

This energy is detectable only through its influence in the expansion of the Universe and for that reason is called *dark energy*. To understand the physical origin of dark energy is one of the open problems of cosmology and particle physics.

Shortly after the formulation of general relativity, Einstein tried to apply it to the Universe as a whole. Using the so-called cosmological principle, that states that all points in the Universe are equivalent, he could not find any solution in which the physical distances between galaxies would be independent of time. This was a problem at the time because there was no observational evidence of an expanding Universe. In order to solve this difficulty, Einstein modified the equations of general relativity by introducing a constant λ that he named the *cosmological constant*:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}(R - 2\lambda) = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu} \quad (10)$$

Physically, λ can be interpreted as some kind of energy associated with space-time itself rather than with the matter-energy it contains. What Einstein found was that using these modified equations it was possible to find static solutions by tuning the value of λ properly. However, after Edwin Hubble discovered in 1929 that the Universe was expanding, the cosmological constant lost its purpose and Einstein dubbed its introduction “*the biggest blunder of my life*”.

On physical grounds, there is no reason why the cosmological constant should be set to zero in the Einstein equations from the start. Actually, in quantum field theory all fields contribute to the value of λ . We can understand this if we think that quantum fields are composed of an infinite number of harmonic oscillators. Quantum mechanics teaches us that a harmonic oscillator has a zero-point energy, $\frac{1}{2}\hbar\omega$, where ω is its frequency. In the case of a quantum field the zero-point energy of each of its oscillators contributes to the cosmological constant with a value that can be estimated to be

$$\lambda_{QFT} \simeq \frac{c^3}{\hbar G} \sim 10^{69} m^{-2} \quad (11)$$

On the other hand, if we interpret the observed value of $\Omega_\lambda \simeq 0.7$ as due to a cosmological constant, λ should be of the order of

$$\lambda_{obs} \simeq 10^{-52} m^{-2} \quad (12)$$

We find here a mismatch between the quantum field theory value of the cosmological constant and the one that is measured. In general the observed value of λ should be the result of adding λ_{QFT} to the “bare” value of the cosmological constant, i.e. its value before including the contribution of quantum fields:

$$\lambda_{obs} \simeq \lambda_{bare} + \lambda_{QFT} \quad (13)$$

Therefore, in order to reproduce the observed cosmological constant (12) we need to tune λ_{bare} up to 121 decimal places! This is a classical example of a fine tuning problem in physics. Although there is nothing fundamentally wrong with fine tuning, one expects the dimensionful quantities involved in a problem to take values of the same order of magnitude as the corresponding typical scales involved. In the context of the cosmological constant it is not really understood why its observed value is so small

compared to its “natural” one, which in this case is the one set by λ_{QFT} . This is the *cosmological constant problem* that has been haunting theoretical physics for decades and that up to now has not found any satisfactory solution. It is likely that this fine tuning issue is a hint indicating that there is some element of physics that is being missed. A second alternative to explain dark energy is that it is not due to a veritable cosmological constant, but to a time-varying vacuum energy. This is a bit more involved to implement, since the consistency of Einstein equations requires λ to be a constant. The problem can be avoided by replacing the cosmological constant by a classical field, called *quintessence*, that varies with time. Although this alternative is interesting in the study of cosmology, from the point of view of explaining dark energy it does not eliminate the fine tuning. The reason is that the potential energy of the quintessence field has to be properly tuned to reproduce the observed value of Ω_λ . Hence this does not solve the cosmological constant problem but just reformulates it in a different guise.

Here we have just mentioned some of the riddles posed by modern cosmology and pointing towards the existence of new degrees of freedom that are not captured by the Standard Model. Next we turn our eyes from the sky to the underground particle physics experiments.

Signs from the underground

Experimental particle physics has obtained in recent years a number of results that can be interpreted as smoking guns for a modification of the Standard Model at higher energies. We have already mentioned massive neutrinos as candidates for dark matter. One of the most interesting developments in particle physics in recent years has been the experimental evidence that neutrinos have a mass. In the Standard Model neutrinos are massless particles that only interact via the weak nuclear force. The realization that they have small but nonvanishing masses actually requires a small extension of the model. These modifications can be interpreted as a low energy remnant of new physics at a higher energy scale. From the observed values of the neutrino masses this scale can be estimated to be

$$\Lambda_{\text{new-physics}} \simeq 10^{15} \text{ GeV} \quad (14)$$

If this interpretation is correct, the Standard Model should be substantially modified at energies of this order.

Actually, a similar value for the energy scale at which new physics can be expected emerges also in a completely different way. In the Standard Model, as in any quantum field theory, the values of the effective coupling constants (charges) that one measures in a collision experiment depend on the energy carried by the colliding particles. Using

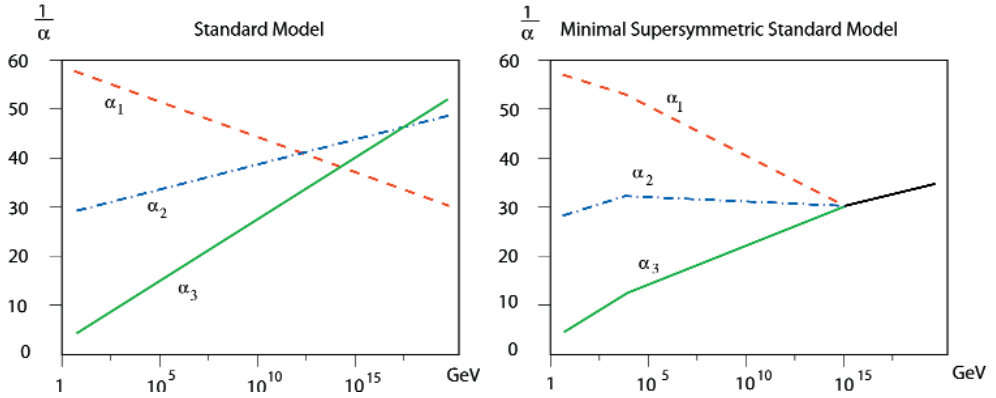


Figure 4: Running of the coupling constants. α_1 is the electromagnetic coupling constant, while α_2 and α_3 are the corresponding ones for the weak and strong nuclear forces. On the left plot we have the values for the Standard Model, whereas on the right the values are shown for its minimal supersymmetric extension.

the Standard Model it can be proved that the values of the three coupling constants get close together when the energy is increased, but do not converge to a common value at any energy (see Fig.4).

Supersymmetry is a very peculiar type of symmetry because it implies that for every boson in the theory there should be a fermion with exactly the same mass, and vice versa. In our low energy world we do not see such a symmetry. For example, the electron has mass $m_e = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$, but there is no evidence of a spin-0 or spin-1 particle with the same value of the mass. This means that supersymmetry is badly broken at the energies accessible to the particle accelerators.

Nevertheless, there are good reasons to think that supersymmetry is somehow realized in Nature but broken at low energies, so it would become explicit only if experiments are performed at high enough energy. The Standard Model actually admits a supersymmetric generalization, the Minimal Supersymmetric Standard Model or MSSM, where each quark and lepton is accompanied by its supersymmetric partner, spin-0 particles called *squark* and *slepton* respectively, while the gauge bosons have spin-1/2 partners, the *gauginos*. The “ordinary” nonsupersymmetric Standard Model is reproduced at low energies by introducing interactions between particles which do not treat democratically the particles and their supersymmetric partners.

One interesting feature of the MSSM is that the calculation of the running of the coupling constants with energy shows that, unlike in the Standard Model, the three coupling constants converge to a single value at an energy scale of order

$$\Lambda_{GUT} \approx 10^{16} \text{ GeV} \quad (15)$$

This suggests the onset of some grand unified theory at that scale in which there is a single coupling constant in terms of which the three couplings of the Standard Model at low energies can be expressed. This grand unified theory is presumably a supersymmetric gauge theory with a large gauge group that embeds $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$, for example $SU(5)$ or $SO(10)$.

It is interesting to notice that the scale of grand unification, $\Lambda_{GUT} \simeq 10^{16} \text{ GeV}$, is very close to the scale of new physics suggested by the masses of the neutrinos $\Lambda_{\text{new-physics}} \simeq 10^{15} \text{ GeV}$. This reinforces the idea that the Standard Model is not valid all the way to infinite energy but is actually replaced by some other theory at energies around these scales.

And gravity?

In all our previous discussion gravity has been deliberately ignored. Indeed, the gravitational interaction is too weak to play any rôle in the context of accelerator experiments. However, the study of gravity itself shows also hints of the onset of new physics at some high energy scale.

Black holes are very interesting laboratories for gravity because of the interesting phenomena associated with them. In the Universe they are produced, for example, as the result of the collapse of dying stars under their own gravity. As the star shrinks, the gravity on its surface becomes stronger and stronger. This results in the increase of the escape velocity for an object on the star's surface, until it reaches the speed of light when the radius of the star has shrunk to the value

$$R_h = \frac{2GM}{c^2} \quad (16)$$

From that time on, light would be unable to escape from the star's surface and the collapsing star would become black to any observer watching from far away.

Actually, the heuristic, nonrelativistic argument leading to (16) dates back to Pierre Simon de Laplace. The interesting thing is that a rigorous analysis using the general theory of relativity confirms the rough qualitative features of the picture described above. What is found is that as a result of the gravitational collapse of a star of mass M , a black hole is formed. This is a region bounded by an event horizon, a sphere of radius R_h , such that nothing can escape from inside this sphere, not even light. In its center there is a space-time singularity where the gravitational field diverges. This singularity, however, is cloaked from any outside observer by the event horizon. Once an unfortunate astronaut has fallen inside the horizon there is no way that he or she could escape or send a signal to a colleague outside. Actually our astronaut is doomed, since in a finite time he or she will be torn apart by the divergent gravitational field at the singularity.

Classically a black hole is faithful to its name. However, much to everybody's astonishment, Stephen Hawking proved in 1975 that black holes ain't so black after all. Because of the quantum fluctuations around the horizon the black hole emits a stream of particles as if it were a black body with temperature given by

$$T_{Hawking} = \frac{\hbar c^3}{8\pi kGM} \quad (17)$$

where M is the mass of the black hole and k is the Boltzmann constant. This is a quantum mechanical result, as it is shown by the presence of \hbar in the expression. Only if we take the classical limit $\hbar \rightarrow 0$, we recover the classical, "absolutely black" hole.

This phenomenon, called *Hawking radiation*, leads to a very interesting riddle. If a black hole is emitting like a black body, the total energy emitted per unit time and unit surface is given by the Stefan-Boltzmann law, $\sigma T_{Hawking}^4$. Energy conservation requires then that the mass of the hole has to decrease as it radiates. Since the radius of the black hole (16), called the Schwarzschild radius, is proportional to the mass, this can be seen as an evaporation process, in which the black hole radiates and at the same time its size decreases. Actually, provided that this picture of the evaporation process is valid all the time, the black hole will evaporate its whole mass in a finite time proportional to the cube of the initial mass M .

What happens when the black hole evaporates completely? Let us suppose nothing is left behind. Then the black hole would have completely evaporated into thermal radiation. This, however, poses a problem. Before the formation of the black hole, there is a large amount of information stored in the quantum state of the system of particles that constitute the collapsing star. However, if the final fate of the black hole is to be converted into thermal radiation all this information would be lost, since the black body radiation does not carry any information apart from its temperature. This is a weird situation, because quantum mechanics forbids information to be lost during the time evolution of a system.

There are several possible solutions to this riddle. One radical possibility is that quantum mechanics breaks down at some time during the evaporation of a black hole. However due to the fact that general relativity predicts the existence of a singularity in the center of the black hole, it seems more likely that the problem lies in extrapolating this picture of the evaporation all the way until the black hole disappears.

Using the three fundamental constants \hbar , c and G there is only one way to combine them to form a quantity with dimension of energy:

$$E_{Planck} = \sqrt{\frac{\hbar c^5}{G}} \approx 10^{19} GeV \quad (18)$$

This is called the Planck energy and it is the scale at which we expect the quantum nature of the gravitational field to become important. If this picture is correct, the analysis of Hawking radiation presented above should be changed once the mass of the evaporating

black hole gets close to the Planck mass, $M_{\text{Planck}} = \frac{E_{\text{Planck}}}{c^2} \approx 2.18 \times 10^{-8} \text{ kg}$. Actually, we

can expect the picture of the black hole evaporation discussed here to be corrected even before the mass of the black hole reaches M_{Planck} , once the back reaction is taken into account.

We find here another reason to think that the Standard Model is not the whole story. At energies of about 10^{19} GeV, the gravitational force that has been negligible in the interaction of particles up to that energy becomes important and its quantum properties start showing up. What physics looks like at those energies is still anybody's guess. The laws governing quantum gravity are still a mystery and we can only imagine that maybe space and time as such will become derived concepts.

From our previous discussion we can extract a possible qualitative picture of how physics can be expected to be above the energies already explored by particle accelerators. We can expect the Standard Model, with minimal modifications like supersymmetry, to be valid all the way to the scale of grand unification, $\Lambda_{\text{GUT}} \approx 10^{16} \text{ GeV}$. At that scale the three interactions described by the Standard Model would become one, governed by a grand unified theory with a single coupling constant. However, not far away, at the Planck energy scale $\Lambda_{\text{Planck}} \approx 10^{19} \text{ GeV}$, quantum gravity should start dominating the physics. What might happen then remains a mystery.

CONCLUDING REMARKS

Einstein's dream is still at large. We have a beautiful theory of the interactions between the elementary particles, the Standard Model, that in spite of its success is far from being a realization of the old dream of Einsteinian unification. Our hope is that this model embeds into a grand unified theory that, eventually, is unified with gravity at the energy scale where quantum effects of this latter force become important.

String theory is a popular candidate for a realization of Einstein's dream. The basic idea is simple and beautiful, and its consequences far reaching. The starting point is to assume that elementary particles are no longer pointlike but tiny one-dimensional objects with a size of about 10^{-33} cm (Fig. 5). Like a classical violin string, this quantum string can vibrate in a variety of modes. Each of these modes represents a different elementary particle: an electron, a quark, a gauge boson, a muon, etcetera. However, the most interesting aspect of string theory is that gravity comes out automatically: there

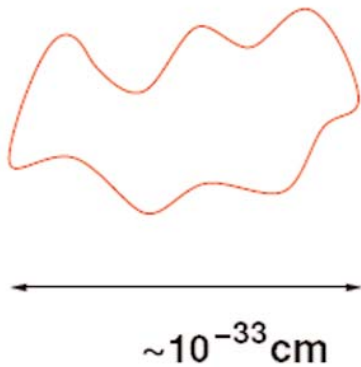


Figure 5: According to string theory, elementary particles are tiny strings like the one depicted here. When seen from far away, these strings look like pointlike objects and their vibrational energy is interpreted as the mass of the corresponding particle.

is a vibration mode of the string that has the same quantum numbers as the particle that is presumed to carry the gravitational interaction, the *graviton*. Studying the way these gravitons couple to themselves and to the rest of the particles, i.e. other strings in different vibrational modes, results at low energies in Einstein's equations for the gravitational field.

If realized in Nature, string theory would indeed be a realization of Einstein's dream. It unifies matter and forces. Gauge interactions and gravity appear as different aspects of a single interaction between quantum strings. Moreover, it provides an

apparently consistent way to quantize gravity, free of the problems faced in a direct quantization of Einstein's general relativity. String theory has achieved some technical successes like accounting for the number of degrees of freedom of a certain type of black holes. However, in spite of its good looking features there is still no hard evidence that string theory has something to do with the real world. One of the most frequent criticisms that this theory has received is that so far it has not produced a single distinctive prediction that could be used to falsify it, being thus deprived from the status of scientific theory. In any case it seems likely that, even if Nature has not taken the side of string theory, some of its elements would be present in a final theory of everything.

Whether string theory is the final answer is something we cannot decide at this stage. The problem of fulfilling Einstein's dream is still out there, waiting for new generations of scientists with fresh ideas to tackle the problem. The challenge is tough, but the reward makes it worth taking it: to achieve a complete understanding of the workings of Nature at its simplest level.

ACKNOWLEDGMENTS

It is a pleasure to thank the organizers of *Cent Anys d'Herència Einsteiniana*, and specially Pedro González, for their kind invitation to deliver this talk. I would also like to thank Luis Álvarez-Gaumé and Kerstin Kunze for useful discussions.

FURTHER READING

- Luis Álvarez-Gaumé and Miguel A. Vázquez-Mozo, *Einstein y la Geometría*, Revista Española de Física 19 (2005) No. 1, 25 (physics/0503150)
- Albert Einstein, *Autobiographical Notes*, in *Albert Einstein. Philosopher-Scientist*, edited by Paul Arthur Schilpp, Open Court 1949.
- Sheldon L. Glashow, *The Charm of Physics*, Simon Schuster 1991.
- Brian Greene, *The Elegant Universe*, Vintage 2000.
- Brian Greene, *The Fabric of the Cosmos*, Vintage 2004.
- Gerard 't Hooft, *In Search of the Ultimate Building Blocks*, Cambridge 1997.
- Helge Kragh, *Quantum Generations*, Princeton 1999.
- Andrew Liddle, *An Introduction to Modern Cosmology*, Wiley 1999.
- Abraham Pais, *'Subtle is the Lord...' the Science and the Life of Albert Einstein*, Oxford 1982
- Martinus Veltman, *Facts and Mysteries in Elementary Particle Physics*, World Scientific 2003.
- Steven Weinberg, *Dreams of a Final Theory*, Vintage 1993.
- Francisco J. Ynduráin, *Electrones, Neutrinos y Quarks*, Crítica 2001.

NOTES

- ¹ More complicated models were also proposed in which α -particles (helium nuclei) were also among the constituents.
- ² We can measure masses using energy units by using Einstein equation $E = mc^2$.

DES INTUITIONS D'EINSTEIN À L'INFORMATION QUANTIQUE: LES STUPÉFIANTES PROPRIÉTÉS DE L'INTRICATION

Alain Aspect et Philippe Grangier

Laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'Optique, Orsay , France.

EINSTEIN ET LA RÉVOLUTION QUANTIQUE

Le développement de la physique quantique, au XX^{ème} siècle, est l'une des aventures intellectuelles les plus extraordinaires de l'humanité. Cette théorie physique a modifié de fond en comble notre conception du monde, en nous forçant, par exemple, à accepter qu'une particule puisse se trouver à la fois ici et là, où qu'une porte quantique puisse être à la fois ouverte et fermée. Et elle a tout autant bouleversé notre mode de vie avec ses innombrables applications: lasers, transistors, circuits intégrés, composants de base des technologies de l'information et de la communication...

On connaît le rôle séminal d'Einstein dans l'émergence de la théorie quantique puisque dès 1905, il proposait d'interpréter l'effet photoélectrique en introduisant explicitement la quantification de la lumière, considérée comme formée de grains indivisibles d'énergie, que l'on devait appeler plus tard les photons. C'est ce travail qui valut à Einstein de recevoir le prix Nobel de 1921.

Mais on sait aussi que dès la fin des années 1920 Einstein s'est opposé à Niels Bohr sur l'interprétation à donner à la théorie quantique. Le débat a duré jusqu'à la fin de la vie de ces géants, se concentrant à partir de 1935 sur la question soulevée dans le fameux article d'Einstein, Podolsky et Rosen, qui présente pour la première fois une situation où la mécanique quantique prédit des corrélations particulièrement fortes entre deux particules éloignées, préparées dans un état quantique autorisé par la théorie mais aux propriétés surprenantes, appelé aujourd'hui "état intriqué" ou "état EPR".

Ces débats laissèrent à la plupart des physiciens le sentiment que Bohr et ses élèves (l'École de Copenhague) avaient totalement clarifié le sujet en répondant aux objections d'Einstein. Mais de façon inattendue, c'est à partir des objections d'Einstein qu'une nouvelle phase de progrès majeurs a débuté dans les années 1960 avec les

travaux de John Bell, suivis d'expériences de plus en plus fines. La violation des inégalités de Bell a apporté l'évidence irréfutable de l'inséparabilité quantique, propriété extraordinaire d'une paire d'objets intriqués qui se comportent comme un système quantique unique, même si les deux objets sont très éloignés l'un de l'autre. C'est à la même époque que l'on a appris à manipuler un par un des électrons, des ions, des atomes ou des photons. Il a alors fallu clarifier la façon d'appliquer le formalisme quantique -fondamentalement probabiliste-, à des objets individuels, et pas seulement à de très grands ensembles, répondant ici encore au questionnement d'Einstein. Il n'est probablement pas exagéré de dire que ces deux avancées conceptuelles de la fin du XX^{ème} siècle -la compréhension de l'importance des états intriqués, la compréhension de la dynamique des objets quantiques individuels- signent le début d'une nouvelle révolution quantique. Au delà des progrès conceptuels, cette nouvelle révolution s'accompagne d'une floraison de travaux théoriques et expérimentaux visant à utiliser ces propriétés quantiques dans des applications qui pourraient à leur tour bouleverser notre société. C'est la révolution de l'information quantique, où l'on distingue aujourd'hui deux thèmes: la cryptographie quantique, dont les premiers démonstrateurs existent déjà, et l'ordinateur quantique, dont on reparlera dans la dernière partie de cet article. N'est-il pas remarquable que les deux ingrédients de cette nouvelle révolution quantique soient précisément les points qu'Einstein ne cessa de mettre en avant - certes pour les contester, mais dont il avait compris le caractère stupéfiant plus que tout autre?

L'ÉMERGENCE DE L'INTRICATION QUANTIQUE

Le débat Bohr-Einstein et l'article EPR

La mécanique quantique n'a pu se construire qu'au prix de révisions radicales et douloureuses des concepts qui s'étaient imposés en physique classique. Ainsi, pour prendre en compte la dualité onde-particule, la mécanique quantique a dû renoncer au concept classique de trajectoire. On traduit ce renoncement par les célèbres relations de dispersion de Heisenberg (appelées aussi "relations d'incertitude") traduisant par exemple l'impossibilité d'avoir un état quantique où vitesse et position auraient simultanément des valeurs parfaitement précises. Ce renoncement était si radical que plusieurs physiciens, au premier rang desquels Einstein et de Broglie, n'admettaient pas son caractère inéluctable, à la différence de Bohr qui en avait fait la clef de voûte de l'interprétation qu'il donnait de la nouvelle théorie, avec ses élèves de "l'Ecole de Copenhague". Aux congrès Solvay de 1927 et 1930 Einstein lança contre cette interprétation une série d'attaques mémorables, basées sur des "expériences de pensée" c'est à dire des schémas compatibles avec les lois fondamentales de la physique

même s'ils semblaient totalement irréalisables en pratique au vu des moyens expérimentaux de l'époque. On sait qu'en fait Bohr put répondre de façon convaincante à ces attaques, et il semble qu'à partir de 1930 Einstein ait été convaincu de la validité et de la cohérence interne du formalisme quantique.

En fait, s'il ne remettait plus en cause le formalisme mathématique de la mécanique quantique, ni ses prévisions, Einstein restait profondément insatisfait par la théorie quantique telle qu'elle était présentée par Bohr et ses disciples. Il pensait, semble-t-il, que les renoncements mis en avant dans l'interprétation ne traduisaient que l'état d'inachèvement de la théorie. Cette position allait donner lieu à un nouveau débat avec Niels Bohr, qui débuta avec la publication, en 1935, de l'article d'Einstein Podolsky et Rosen (EPR) dont le titre pose la question: "La description quantique de la réalité physique peut-elle être considérée comme complète?" Dans cet article, Einstein et ses coauteurs introduisent des états quantiques particuliers de deux particules - *les états intriqués*, pour lesquels le formalisme quantique prédit de très fortes corrélations entre les deux particules. En partant de cette prédiction l'article EPR conclut que la théorie quantique n'est pas complète. Nous allons présenter les corrélations EPR sur des paires de photons corrélés en polarisation, systèmes qui ont permis de vérifier expérimentalement les propriétés de l'intrication.

Paires de photons EPR corrélés en polarisation

On sait que la lumière peut être polarisée, c'est à dire qu'elle vibre suivant une direction particulière, perpendiculaire à sa direction de propagation. Cela s'observe à l'aide d'un polariseur, que l'on place sur le faisceau lumineux, et qui laisse sortir la lumière soit dans la voie notée +1 dans la figure 1 (et qui correspondrait au rayon ordinaire pour

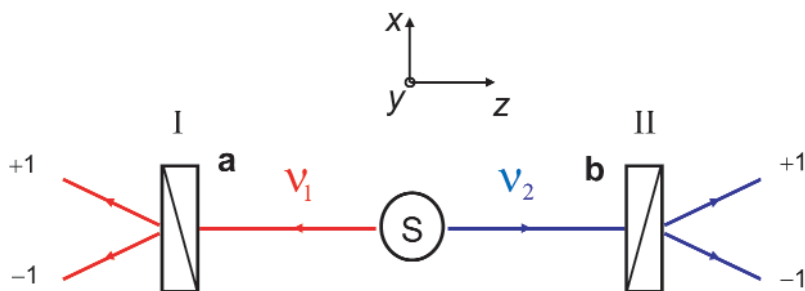


Figure 1: Expérience de pensée EPR avec des paires de photons corrélés en polarisation. Les photons v_1 et v_2 d'une même paire sont analysés en polarisation suivant les directions a et b par les polariseurs I et II (les vecteurs a et b qui caractérisent les orientations des polarisations sont perpendiculaires à Oz). Les résultats des mesures permettent de mettre en évidence les corrélations de polarisation.

un cristal biréfringent), soit dans la voie notée -1 (rayon extraordinaire). Dans le premier cas la lumière est polarisée suivant la direction d'analyse du polariseur, repérée par la direction notée \mathbf{a} pour le polariseur I de la figure 1. Au contraire, de la lumière polarisée perpendiculairement à \mathbf{a} sort suivant la voie -1 .

Considérons maintenant (Figure 1) une paire de photons ν_1 et ν_2 émis simultanément vers la gauche et vers la droite, et effectuons sur ces photons, à l'aide des polariseurs I et II orientés suivant \mathbf{a} et \mathbf{b} , des mesures conjointes de polarisation. Pour un état EPR, du type introduit par Einstein et ses collègues dès 1935, la Mécanique Quantique prédit que des mesures effectuées par des polariseurs alignés suivant la même direction ($\mathbf{a} = \mathbf{b}$) seront totalement corrélées, alors que prises séparément elles donnent des résultats aléatoires. Plus précisément, si on obtient $+1$ pour ν_1 (ce qui arrive dans 50% des cas) alors on obtient avec certitude $+1$ pour ν_2 , et si on obtient -1 pour ν_1 alors on obtient avec certitude -1 pour ν_2 .

Comme les deux photons sont très éloignés l'un de l'autre au moment de la mesure, le résultat de la mesure sur l'un ne saurait influencer le résultat de la mesure sur l'autre, car sinon cette influence devrait se propager plus vite que la lumière, ce qui est en contradiction avec le principe de causalité relativiste. La corrélation parfaite entre les résultats ne semble alors pouvoir se comprendre qu'en admettant que chaque photon possède, avant la mesure, une propriété qui détermine le résultat de la mesure par exemple une polarisation bien définie, déterminée au moment de l'émission. Si les deux photons d'une même paire possèdent la même polarisation, on comprend aisément que les mesures de polarisation conjointes donnent des résultats corrélés. Mais la mécanique quantique n'attribue aucune propriété de ce type à chaque photon pris séparément. C'est donc, nous disent EPR, que le formalisme de la Mécanique Quantique est incomplet, qu'il ne rend pas compte de la totalité de la réalité physique. Il faut donc s'attacher à essayer de le compléter.

Niels Bohr fut, semble-t-il, bouleversé par l'argument EPR qui s'appuie sur le formalisme quantique lui-même pour en démontrer le caractère incomplet, provisoire. Ses écrits révèlent la conviction profonde que si le raisonnement EPR était correct, compléter le formalisme quantique ne serait pas suffisant, c'est toute la physique quantique qui s'effondrerait. Bohr contesta donc immédiatement le raisonnement EPR, en affirmant que dans un état intriqué, on ne peut parler des propriétés individuelles de chaque particule, et cela même si elles sont très éloignées l'un de l'autre. Einstein ne fut absolument pas convaincu par cette réponse, et le débat dura jusqu'à la fin de la vie des deux géants de la physique du XX^{ème} siècle, dans les années 1950.

On pourrait penser que cette controverse eut un immense écho chez les physiciens. En fait, lors de la publication en 1935 de l'article EPR, la Mécanique Quantique allait de succès en succès et la plupart des physiciens ignorèrent ce débat qui leur parais-

sait académique: il semblait que l'adhésion à l'une ou l'autre des positions fût une affaire de goût personnel (ou de position épistémologique) sans aucune conséquence pratique sur la mise en oeuvre du formalisme quantique, ce qu'Einstein lui-même ne semblait pas contester. Il fallut attendre près de trente ans pour voir un démenti à cette position relativement consensuelle, avec la parution, d'un court article qui allait modifier radicalement la situation.

Le théorème de Bell

C'est en 1964 que paraît l'article de John Bell, physicien théoricien irlandais travaillant au CERN à Genève. En quelques lignes de calcul, il montre que pour deux particules intriquées les prédictions quantiques sont incompatibles avec un modèle où on introduit explicitement des variables supplémentaires spécifiant par exemple la polarisation de chaque photon dès son émission dans la source, ce qui fournirait une explication simple des corrélations, analogue à l'explication en terme de chromosomes identiques pour les corrélations bien connues chez les jumeaux vrais (ressemblance physique, pathologies identiques). Certes en prenant des paramètres supplémentaires identiques pour les deux photons on peut rendre compte des corrélations totales prévues par le formalisme quantique lorsque les deux polariseurs sont orientés suivant la même direction d'analyse. Mais cette possibilité ne s'étend pas à la totalité des situations possibles, et aucun modèle à paramètres supplémentaires ne peut donner la valeur prédite par la mécanique quantique *pour l'ensemble des orientations* envisageables pour les deux polariseurs. Il n'est donc pas possible de "comprendre" dans leur totalité les corrélations EPR en complétant le formalisme quantique dans l'esprit suggéré par Einstein.

Nous ne tenterons pas ici d'explicitier le théorème de Bell. Nous nous contenterons d'indiquer qu'il établit des inégalités qui imposent une limite aux corrélations descriptibles en termes de paramètres communs. Or on constate que les corrélations de polarisation prévues par la mécanique quantique pour les paires EPR violent ces inégalités: on ne peut rendre compte des corrélations EPR par un modèle à paramètres supplémentaires.

Ce résultat a une portée conceptuelle que l'on ne saurait surestimer. La violation des inégalités de Bell par les prédictions quantiques démontre explicitement que les corrélations quantiques EPR sont d'une nature irréductible aux concepts classiques. L'autre conséquence, tout aussi importante, du théorème de Bell, est la possibilité qu'il ouvre de *trancher par l'expérience le débat entre Einstein et Bohr*. Il suffit en principe de mesurer les corrélations dans une situation où la mécanique quantique prédit une violation des inégalités de Bell pour savoir s'il faut renoncer à une interprétation "à la Einstein", où si au contraire on a identifié une situation où la mécanique quantique est prise en défaut (c'est le destin normal des théories physiques de rencontrer un jour une limite de validité).

Les tests expérimentaux de la condition de localité

Dès son article fondateur, John Bell insistait sur le fait que la démonstration d'inégalités, et donc la contradiction avec les prédictions quantiques, repose sur une hypothèse de localité: par exemple, le résultat de la mesure par le polariseur I ne peut pas dépendre de l'orientation b de l'autre polariseur (II), et vice-versa. De même, l'état des photons lors de leur émission ne saurait dépendre des orientations a et b des polariseurs qui effectueront ultérieurement les mesures sur ces mêmes photons.

Pour naturelle qu'elle soit, la condition de localité ne découle d'aucune loi fondamentale: rien n'interdit qu'une interaction inconnue permette à l'orientation du polariseur II d'influencer le polariseur I. Mais Bell ajoutait aussitôt que si on pouvait réaliser *une expérience dans laquelle les orientations des polariseurs sont modifiées rapidement* pendant la propagation des photons entre la source et les polariseurs, alors c'est la *causalité relativiste* d'Einstein qui empêcherait une hypothétique interaction d'un polariseur sur l'autre d'arriver à temps, puisque aucune interaction physique ne peut se propager plus vite que la lumière.

Ainsi, à condition d'y ajouter la possibilité de changer très vite et aléatoirement l'orientation des polariseurs, l'expérience de pensée de la figure 1 permet de tester l'ensemble des idées qu'Einstein ne cessa de mettre en avant dans le contexte des corrélations EPR: d'une part la possibilité (ou même pour Einstein la nécessité) de compléter le formalisme quantique; d'autre part l'impossibilité d'une interaction directe à une vitesse supérieure à celle de la lumière. *C'est donc bien le conflit entre la vision du monde défendue par Einstein et la mécanique quantique que l'on va mettre à l'épreuve dans les expériences de tests des inégalités de Bell.*

Après une succession de progrès réalisés au cours d'une première génération d'expériences (1972-1981), cette hypothèse de localité fut testée pour la première fois en 1982 à Orsay. Dans cette expérience, les polariseurs étaient suffisamment éloignés l'un de l'autre (figure 2) pour pouvoir mettre en oeuvre le schéma ultime suggéré par Bell. Il fallait pour cela modifier aléatoirement l'orientation de chaque polariseur à une cadence assez élevée pour que la causalité relativiste interdise toute dépendance directe entre le choix de l'orientation d'un polariseur et la mesure par l'autre. Comme il n'est pas question de modifier physiquement l'orientation de polariseurs massifs en quelques nanosecondes (aucun matériau n'y résisterait), l'équipe d'Orsay a contourné la difficulté en développant des "commutateurs optiques" rapides capables soit de laisser passer la lumière vers un premier polariseur, soit de l'aiguiller vers un deuxième polariseur dans une orientation différente (figure 3). L'ensemble constitué d'un commutateur et de deux polariseurs est équivalent à un seul polariseur basculant entre deux orientations, à une cadence limitée seulement par le commutateur. Dans cette expé-

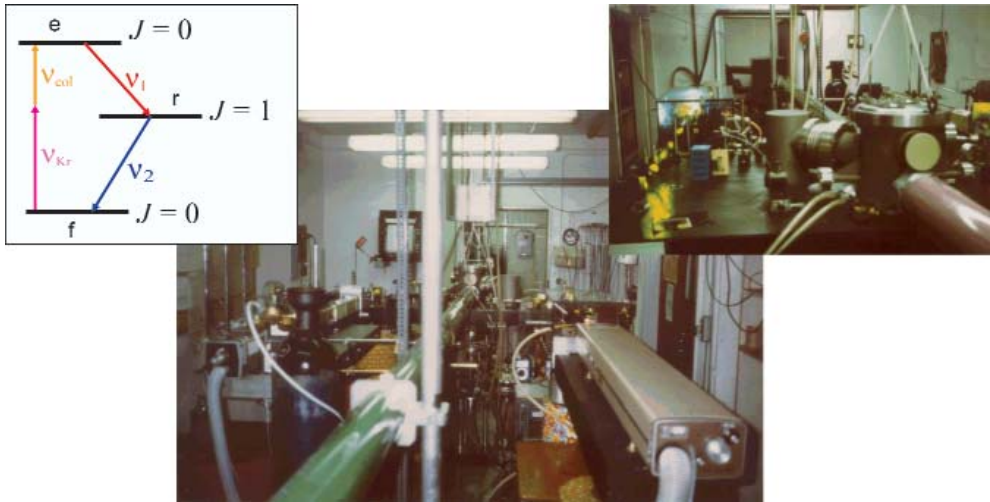


Figure 2: Expériences d'Orsay (1982): la source de photons intriqués. On distingue les lasers permettant d'exciter (par absorption non linéaire des deux photons v_{cr} et v_{co}) la cascade radiative atomique émettant la paire de photons intriqués v_1 et v_2 . Cette source d'une efficacité sans précédent a permis d'effectuer des mesures de corrélation de polarisation avec une précision de 1% en moins de 2 minutes, autorisant la mise en oeuvre de schémas expérimentaux nouveaux de plus en plus proches de l'expérience de pensée. Les photons étaient émis dans des faisceaux opposés, peu divergents, de quelques centimètres de diamètre seulement, ce qui a permis d'éloigner les polariseurs à 6 mètres de la source de photons située dans l'enceinte à vide qu'on distingue au centre de la photo. Il a alors été possible de mettre en oeuvre des analyseurs de polarisation variables, dont l'orientation change à une cadence plus rapide que le temps de propagation de la lumière entre source et détecteur.

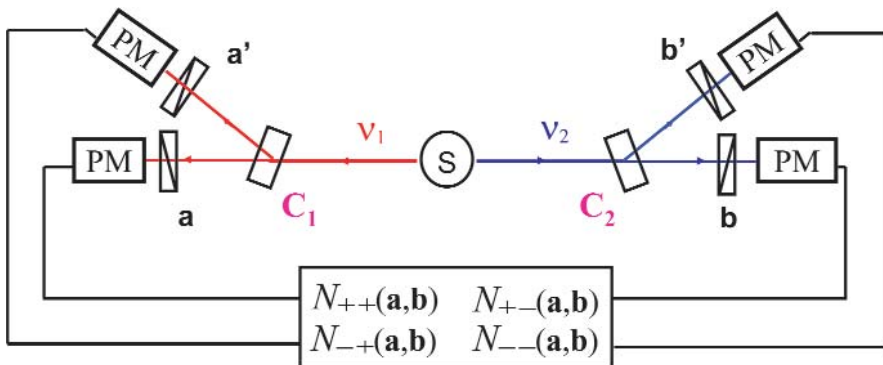


Figure 3: Expérience avec polariseurs variables (Orsay, 1982). Dans cette expérience, le commutateur optique rapide C_1 permet d'aiguiller le photon v_1 soit vers un polariseur orienté suivant a , soit vers un polariseur orienté suivant a' : l'ensemble est équivalent à un polariseur unique basculant rapidement (toutes les 10 nanosecondes environ) entre a et a' . Un système analogue réalise un polariseur variable basculant entre b et b' , pour analyser v_2 . Les deux commutateurs étant distants de 12 mètres, les changements d'orientation sont séparés au sens relativiste, puisque un signal se propageant à la vitesse de la lumière mettrait 40 nanosecondes pour aller d'un commutateur à l'autre.



Figure 4: Expérience de Genève (2000). Dans cette expérience les photons intriqués se propagent dans les fibres optiques du réseau commercial de télécommunication. La source (située à Cornavin) est à plus de dix kilomètres des détecteurs (Bellevue et Bernex).

rience, la distance entre les commutateurs était de douze mètres, ce qui correspond à un temps de propagation de quarante nanosecondes pour la lumière, nettement plus long que l'intervalle de temps entre deux basculements successifs des commutateurs (environ dix nanosecondes). Cette expérience a abouti à une violation convaincante des inégalités de Bell, dans une situation où la condition de localité de Bell n'était plus posée *a priori* comme une hypothèse raisonnable, mais pouvait être déduite du principe de causalité d'Einstein.

Une troisième génération d'expériences.

Ces premiers résultats ont été confirmés depuis, dans des expériences de troisième génération utilisant de nouvelles sources de paires de photons intriqués, basées sur des effets d'optique non linéaire dans des cristaux anisotropes. Le progrès majeur qui en est résulté est la maîtrise de la direction d'émission des photons intriqués, ce qui permet d'injecter les deux membres de chaque paire dans deux fibres optiques dirigées vers des directions opposées. On a ainsi pu réaliser des expériences avec des distances de source à détecteur de plusieurs centaines de mètres, voire de dizaines de kilomètres comme dans l'expérience de Genève qui utilise le réseau commercial de fibres optiques de la compagnie suisse de télécommunications (figure 4). Avec de tel-

les distances entre source et stations de mesure, il devient possible de choisir de façon totalement aléatoire l'orientation de chaque polariseur pendant le temps de propagation des photons depuis la source. Une telle expérience a été réalisée à Innsbruck en 1999, confirmant sans ambiguïté la violation des inégalités de Bell dans une situation où la condition de localité est une conséquence de la causalité relativiste.

D'autres expériences ont été réalisées par une équipe de Boulder (Colorado) en 2001, en intriquant non pas les polarisations de deux photons mais les états quantiques de deux ions. On dispose donc aujourd'hui d'un ensemble impressionnant de données expérimentales qui violent sans ambiguïté les inégalités de Bell, dans des schémas extrêmement variés, permettant ainsi de clore séparément les diverses échappatoires qui ont été envisagées dans des discussions d'un très grande rigueur. De plus, ces expériences ont non seulement montré une violation non ambiguë des inégalités de Bell, mais aussi permis de confronter avec une très grande précision les résultats de mesure aux prédictions de la mécanique quantique. L'accord observé est impressionnant, et il est difficile d'imaginer une "conspiration" d'un monde non quantique capable de simuler les prédictions de la mécanique quantique à ce niveau de précision et de raffinement. Même si une expérience ultime reste souhaitable, nous pouvons raisonnablement considérer que les inégalités de Bell ont été violées, que les prédictions quantiques stupéfiantes relatives aux systèmes intriqués ont été confirmées, et essayer d'en tirer les conséquences.

Un bilan sur la non localité quantique

Quelles conclusions tirer de la violation des inégalités de Bell ? Tout d'abord nous devons accepter l'idée que le monde ne peut pas toujours se concevoir comme formé de sous-systèmes séparés, dont les propriétés physiques seraient définies localement et ne sauraient s'influencer mutuellement lorsque les systèmes sont séparés au sens relativiste. Cette notion de "séparabilité" semblait pourtant tellement fondamentale à Einstein qu'il en avait fait la pierre angulaire de sa démonstration de la nécessité de compléter la mécanique quantique. Aujourd'hui, avec la violation des inégalités de Bell, il nous faut renoncer à la vision "réaliste locale" du monde que défendait Einstein. Afin de ne pas commettre d'anachronisme, il convient de replacer sa position dans une perspective historique: Einstein ne savait pas qu'il y avait une incompatibilité irréductible entre sa vision du monde et les prédictions quantitatives de la mécanique quantique, puisque cette incompatibilité ne devait être établie qu'en 1964 par Bell. Ses écrits montrent au contraire qu'il était convaincu de la possibilité de compléter le formalisme de la mécanique quantique sans en remettre en cause les prédictions au niveau probabiliste. A l'issue d'un voyage de sept décennies, qui nous a mené de l'article EPR (1935) aux inégalités de Bell (1964) et aux expériences qu'elles ont suscitées, on pourrait avoir le

sentiment frustrant d'une conclusion négative: les propriétés avérées de l'intrication quantique nous forcent à renoncer à une vision réaliste locale. En fait, ce renoncement est porteur d'immenses progrès potentiels: on commence à savoir tirer partie des propriétés quantiques que nous venons de voir, dans des concepts nouveaux de traitement et de transmission de l'information, où l'intrication quantique joue un rôle central: c'est le domaine de l'information quantique, que nous présentons maintenant.

L'INFORMATION QUANTIQUE

Introduction

Bien que les implications de la révolution conceptuelle que nous venons de présenter n'aient sans doute pas été encore toutes explorées, il est légitime de se demander quelles peuvent être ses conséquences pratiques. En fait, l'examen approfondi des concepts quantiques a ouvert un nouveau domaine de recherche extrêmement actif, appelé "information quantique". L'idée directrice de l'information quantique est que l'on peut, en utilisant la physique quantique, concevoir de nouvelles façons de calculer et de communiquer, dont les "règles du jeu" ne sont plus celles que l'on connaissait classiquement.

On peut alors développer d'une part de *nouvelles méthodes de cryptographie*, dont la sécurité s'appuie sur les bases même de la physique, et d'autre part de *nouvelles méthodes de calculs*, qui peuvent être exponentiellement plus efficaces. Ces possibilités très originales font que l'information quantique ne concerne pas seulement les physiciens, mais aussi les théoriciens de l'information, les algorithmiciens, et les mathématiciens travaillant sur la théorie de la complexité. Ces recherches ont ainsi permis de proposer de nouveaux algorithmes, et aussi de nouvelles architectures de calcul, basées sur des "portes logiques quantiques" sans équivalent classique.

La cryptographie quantique

De façon générale, le but de la cryptographie est la transmission d'un message secret entre un émetteur (Alice) et un récepteur (Bob), en minimisant les risques qu'un espion puisse intercepter et décoder ce message. La cryptographie classique utilise le plus souvent des algorithmes de codage sophistiqués, qui ne peuvent être "cassés" en un temps raisonnable compte-tenu des moyens de calcul disponibles. La sécurité ainsi obtenue est acceptable, mais elle n'est pas absolue, car elle dépend des moyens mis en jeu par l'adversaire. De plus, elle n'est en général pas démontrable mathématiquement. Il existe cependant une méthode de cryptographie simple et "inconditionnellement sûre" d'un point de vue mathématique, qui repose sur le fait qu'Alice et Bob ont échangé par avance une "clé secrète", c'est à dire une longue suite de caractères aléatoires connus d'eux seuls.

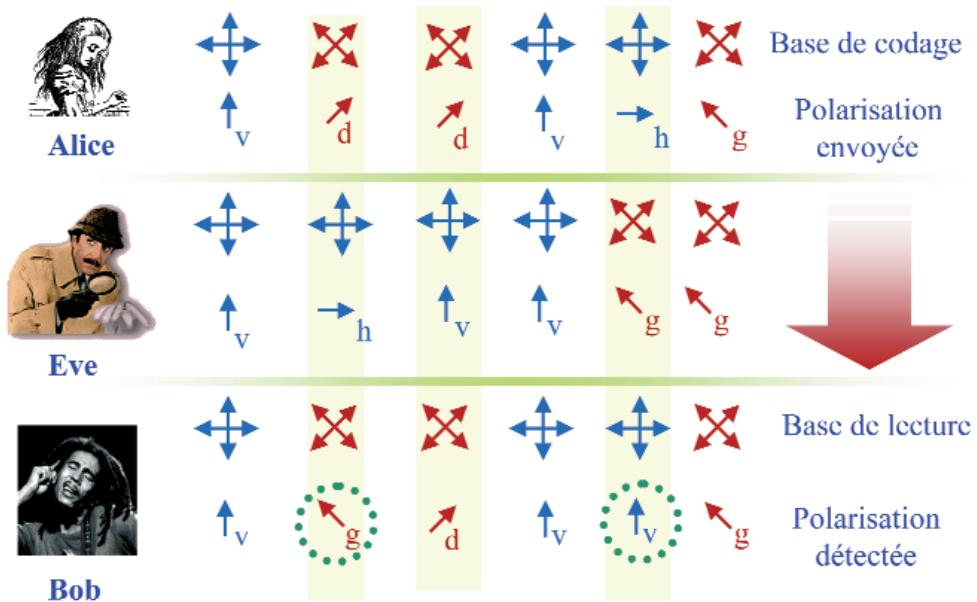


Figure 5: Protocole de cryptographie quantique. Alice et Bob conviennent d'effectuer leurs mesures suivant 4 états de polarisation linéaire, orientés suivant un axe horizontal (h), vertical (v), incliné à 45 degrés à droite (d), ou à 45 degrés à gauche (g). Ils choisissent aléatoirement les "bases" hv d'une part, ou dg d'autre part. En ne conservant que les cas où leurs choix étaient identiques (ils peuvent les connaître après coup par échanges de messages publics), ils disposent de deux clés aléatoires identiques (on n'a illustré que ces cas sur la figure). Si Eve tente une mesure et renvoie un photon polarisé suivant son résultat, elle pourra provoquer une erreur dans le cas où son choix de base était différent de celui d'Alice et Bob. C'est ce qui se passe dans la deuxième colonne, où Alice a détecté un photon d, mais Bob a détecté un photon g. Ce type d'erreur permet à Alice et Bob de détecter la présence d'un espion sur la ligne.

Si cette clé secrète est aussi longue que le message, et si elle est utilisée une seule fois, alors la sécurité absolue du cryptage résulte d'un théorème mathématique, démontré par Claude Shannon en 1948. Ce théorème reporte donc la sécurité de la communication sur la sécurité du partage de la clé. C'est à ce stade qu'intervient la cryptographie quantique : elle permet à Alice et Bob d'obtenir deux copies identiques d'une clé secrète, avec une sécurité garantie par les principes mêmes de la physique quantique! Parmi les nombreux "protocoles" de cryptographie quantique, nous présentons ici une méthode qui découle directement de l'expérience EPR présentée dans la première partie de cet article. Ceci mettra clairement en évidence que "ce qui est transmis" dans une expérience EPR n'est pas un message, mais une suite de nombres aléatoires corrélés, c'est-à-dire précisément une clé secrète! Cette clé pourra ensuite être utilisée pour crypter le "vrai" message, avec une sécurité démontrée mathématiquement. Supposons donc qu'Alice et Bob se partagent des paires de photons intriqués. Ils choi-

sissent entre plusieurs types de mesure qu'ils effectuent sur leurs photons, mais les cas où leurs choix sont les mêmes engendrent deux suites aléatoires identiques qui vont constituer la clé (figure 5). Comme l'espionne (Eve¹) ne peut pas connaître ces choix au moment où le photon est transmis dans la ligne, elle va parfois provoquer des erreurs que Bob et Alice pourront détecter en comparant leurs résultats sur un sous-ensemble de données qu'ils rendent publiques. De façon quantitative, on montre que si Alice et Bob observent une violation des inégalités de Bell, ils sont certains qu'il n'y a pas d'espion effectuant une mesure puis renvoyant un photon correspondant à son résultat de mesure, cette opération équivalant à faire apparaître des paramètres supplémentaires. Eve ne pourrait-elle tenter de contourner cette stratégie en "clonant" le photon qui lui parvient, c'est à dire en faisant une copie à l'identique qui lui permettrait d'effectuer une mesure sans provoquer d'erreur, tout en renvoyant vers Bob le photon original inchangé. L'espionnage serait alors indétectable. Ce clonage d'un état inconnu est (heureusement pour Alice et Bob) impossible en mécanique quantique, en vertu d'un théorème interdisant la duplication d'un état quantique².

Dans une situation réelle, il y aura bien sûr toujours des erreurs sur la ligne, dues le plus souvent à des imperfections techniques. Par prudence, Alice et Bob doivent néanmoins attribuer toutes ces erreurs à un espion potentiel. On pourrait en conclure que la ligne sera alors inutilisable, mais ce n'est pas le cas : en fait, Alice et Bob vont tout d'abord évaluer le taux d'erreur de la ligne, en utilisant des données "tests" révélées publiquement. La connaissance de ce taux d'erreur va leur permettre de borner quantitativement la quantité d'information dont a pu s'emparer un espion éventuel : plus le taux d'erreur est petit, plus l'information sur les photons transmis disponible pour Eve sera petite également. La suite de bits échangés et non divulgués par Bob va alors constituer la base de la clé secrète, à partir de laquelle Alice et Bob pourront "distiller" une clé de taille réduite mais sans erreurs et parfaitement sûre, à condition que le taux d'erreur sur la ligne n'excède pas la valeur de 11%.

Le raisonnement que nous venons de faire s'appuie sur le partage de paires de photons intriqués entre Alice et Bob. En fait, la source EPR peut être placée chez Alice, si bien qu'Eve et Bob n'ont accès qu'au deuxième photon de la paire. On montre alors que rien ne change ni pour Eve ni pour Bob si Alice n'utilise pas la source EPR, mais envoie simplement à Bob un photon polarisé suivant une directions qu'elle a choisie aléatoirement parmi 4 directions séparées de 45 degrés. Cette méthode, proposée par Charles Bennett et Gilles Brassard en 1984, est connue sous l'acronyme de "protocole BB84". On la met en oeuvre avec des sources de photons uniques, apparues dans les années 1980, et qui ne cessent de se simplifier³.

Dans les montages réels, diverses méthodes sont utilisées pour coder de l'information sur les photons: on peut utiliser le codage en polarisation introduit dans le paragraphe

précédent, mais aussi un codage en phase. Les distances de transmission obtenues sont actuellement de l'ordre de quelques dizaine de kilomètres, en utilisant des techniques empruntées aux télécommunications optiques, et en particulier en transmettant les photons dans des fibres optiques. Ces systèmes entrent maintenant en concurrence avec les systèmes cryptographiques conventionnels (non quantiques). En effet, la confiance dans les systèmes conventionnels a été un peu ébranlée en 1994, à la suite d'une découverte spectaculaire effectuée par le chercheur américain Peter Shor, et qui a attiré l'attention sur le calcul quantique.

Le calcul quantique

Les systèmes cryptographiques conventionnels, appelés protocoles algorithmiques, sont souvent fondés sur le fait que certaines opérations mathématiques sont très faciles à réaliser dans un sens, mais beaucoup plus difficiles à réaliser dans l'autre. Par exemple, il est simple et rapide pour un ordinateur de calculer le produit de plusieurs nombres; en revanche, il est beaucoup plus difficile de décomposer ce produit en ses facteurs premiers. La méthode cryptographique "RSA", fondée sur cette observation et initialement proposé par Rivest, Shamir et Adelman, est actuellement très répandue (cartes bancaires, transactions télématiques...), et elle est considérée comme étant extrêmement sûre.

Aussi peut-on imaginer sans peine l'impact qu'a eu un article publié en 1994 par Peter Shor, qui a affirmé qu'un ordinateur quantique pourrait factoriser le produit P de deux nombres premiers en un temps réduit d'un facteur exponentiel par rapport aux ordinateurs classiques. C'en était fait de RSA et peut-être de tous les protocoles de même type! L'effervescence étant maintenant retombée, la situation semble être la suivante : l'algorithme proposé par Peter Shor est correct dans son principe, et apporte bien le gain d'efficacité escompté. Par contre, dans l'état actuel de nos connaissances, la réalisation d'un ordinateur quantique capable de factoriser des nombres de plusieurs centaines de bits apparaît extrêmement difficile, et il s'agit plus d'un enjeu scientifique à long terme (se comptant en décennies) que d'une menace immédiate sur les systèmes de cryptographie algorithmique.

Il est par contre possible aujourd'hui de réaliser des petits "algorithmes quantiques", mettant en jeu quelques bits quantiques ou "qubits", un exemple spectaculaire étant la "téléportation quantique". Il ne s'agit évidemment pas de téléporter un être vivant, ni même un objet, mais de transférer un état quantique d'un système à un autre, ce qui pour un physicien est déjà extraordinaire puisqu'il est impossible de cloner ou de déterminer parfaitement l'état quantique d'un système unique sur lequel on n'a aucune information a priori. Mais est-il possible de "transférer à distance" cet état inconnu? Curieusement, la réponse à cette question est positive, et l'opération correspondante

est connue sous le vocable très médiatique de “téléportation quantique”. Le terme n'est pas totalement usurpé, puisque la téléportation requiert la destruction du système original, et permet de reproduire parfaitement à distance son état, sans jamais le connaître explicitement.

La téléportation quantique d'un qubit a été réalisée avec des photons intriqués, puis avec des ions piégés. Les expériences avec des ions piégés sont particulièrement intéressantes pour notre propos, car elles suivent pas à pas toutes les étapes de l'algorithme de téléportation décrit dans l'article théorique de Bennett et collaborateurs. On peut considérer que la mise en oeuvre d'un tel “mini-algorithme” représente l'état de l'art du calcul quantique en 2005.

CONCLUSION

Une branche active des recherches sur l'ordinateur quantique, qui concerne particulièrement les physiciens, est le développement d'une “ingénierie des objets quantiques”, qui n'existe pas spontanément dans la nature, bien qu'elle soit permise par les lois physiques : ceci est sans doute une bonne définition d'une technologie. En pratique, les idées qui semblent les plus prometteuses pour réaliser cette ingénierie quantique sont clairement reliées à la manipulation et à l'intrication d'objets quantiques individuels (photons, atomes, ions, spins, boîtes quantiques semiconductrices...), ou à des nanocircuits quantiques (jonctions Josephson). A terme il devrait devenir possible d'assembler des tels objets à grande échelle, mais cette étape n'a pas encore abouti, bien que plusieurs approches aient été proposées.

Il est difficile à l'heure actuelle de prédire si l'ordinateur quantique calculera un jour, et dans ce cas s'il ressemblera à ce que l'on peut imaginer aujourd'hui, ou s'il fera appel à des technologies auxquelles personne n'a encore songé. Ce qui est en revanche établi est que l'intrication est un concept extraordinaire, donnant accès à des idées physiques et à des perspectives radicalement nouvelles, dont l'exploration systématique ne fait que commencer.

POUR EN SAVOIR PLUS

Le chapitre 5 du livre *Demain la physique* (éditions Odile Jacob, 2004) présente un panorama de la physique quantique au cours du XXème siècle et des questions ouvertes.

Le chapitre 2 du livre *Einstein aujourd'hui* (EDP sciences, 2005) est une version longue du présent article. Le lecteur y trouvera des développements sur des points traités trop superficiellement ici. S'il veut rentrer plus avant dans le théorème de Bell, et dans les calculs quantiques relatifs aux photons intriqués, il pourra consulter l'article suivant, dont le manuscrit est librement disponible sur la toile (<http://hal.ccsd.cnrs.fr/ccsd-00001079>): A. Aspect, *Bell's theorem: the naive view of an experimentalist*, in *Quantum [un]speakables, from Bell to Quantum*

information, R.A. Bertlmann and A. Zeilinger edit. (Springer 2002). Une traduction française de cet article peut-être téléchargée sur le site de SupOptique (http://www.institutoptique.fr/telechargement/inegalites_Bell.pdf) où l'on trouve la description d'une expérience de test des inégalités de Bell réalisée au laboratoire de travaux pratiques.

Le livre *Speakable and unspeakable in quantum mechanics* (Cambridge University Press, 2^{ème} édition, 2004) est un recueil de textes (peu techniques) remarquables de John Bell sur les problèmes conceptuels de la Mécanique Quantique. On trouvera une introduction (par A. Aspect), qui développe l'idée de deuxième révolution quantique et qui donne un certain nombre de références.

L'article de revue de N. Gisin et al., *Quantum cryptography*, Rev. Mod. Phys. 74, 145 (2002) (<http://fr.arXiv.org/abs/quant-ph/0101098>) est plus technique.

L'ouvrage *Quantum Computation and Quantum Information* de Michael A. Nielsen and Isaac L. Chuang (Cambridge University Press, 2000) est très complet mais ardu. Il en est de même du cours de John Preskill à Caltech (<http://www.theory.caltech.edu/people/preskill>), difficile à l'exception de l'introduction que l'on peut recommander sans réserve.

NOTES

¹ Ce nom apparemment peu politiquement correct est en fait une plaisanterie intraduisible, venant du mot anglais *eavesdropper*, signifiant "celui qui écoute aux portes".

² W. K. Wootters and W. H. Zurek, *Nature* 299, 802 (1982).

³ P. Grangier et I. Abram, *Single photon on demand*, *Physics World* février 2003.

RELATIVAMENTE EXCEPCIONAL

Óscar Vilarroya

Universitat Autònoma de Barcelona, España.

VERANO DE 1978, PRINCETON

El verano de 1978 se presenta especialmente aburrido en la ciudad norteamericana de Princeton. Una ciudad de la costa este, universitaria por excelencia, con una población de quince mil habitantes de clase media alta acomodada. Es una ciudad plácida, sin demasiados altibajos. No hay problemas sociales importantes, baja criminalidad, y la convivencia es bastante agradable. En resumen, una ciudad que no ofrece demasiados atractivos para una revista local.

El New Jersey Monthly es una revista dirigida a un público de clase media alta, educada. Sus contenidos presentan una mezcla de temas, desde la política más *light*, hasta las tendencias de negocio, diseño de interiores, gastronomía, ocio, vacaciones... A finales de primavera, su director, Michel Aron, no sabe qué artículos encargar para el mes de agosto. Por su mesa corre una biografía de Einstein escrita por Ronald Clark. Hojea el libro, empezando por el final, como siempre hace, y entonces se detiene en un detalle. Parece que el cadáver de Einstein fue incinerado, excepto el cerebro. “¿Excepto el cerebro?”, se pregunta el director. “¿Qué demonios hicieron con el cerebro?”. El libro no da respuestas a esta pregunta. Nadie sabe qué pasó con el cerebro de Einstein. “¿Cómo es posible que nadie sepa qué le ocurrió al cerebro del científico más importante de la historia de la humanidad, justo cuando ya estaba reconocido como tal, cuando murió en un hospital de Princeton y en el país más avanzado del mundo?”, se pregunta Aron perplejo. Abre la puerta de su despacho, y grita “¡Steven!”, dirigiéndose a Steven Levy, un periodista joven de la redacción. “Ven aquí, ya tenemos tema para agosto. Me vas a descubrir qué le ocurrió al cerebro de Einstein, y dónde demonios está”.

Steven Levy está entusiasmado. Es una gran ocasión para un periodista que está ávido de encontrar una noticia que le haga salir de la mediocridad de las crónicas mundanas de un Princeton ahogado en su propia complacencia. Se lanza a la aventura. Empieza su investigación, y llega a la sorprendente conclusión de que el cerebro sigue en manos

del forense que realizó la necropsia del cuerpo de Einstein, Thomas Harvey. No le cuesta hallar su paradero actual: Wichita, Kansas. Steven viaja a Kansas. Llega al hospital en donde trabaja el doctor Harvey. Le indican que su despacho está en el sótano. Entra. El despacho es bastante pequeño, lleno de papeles desordenados y libros mal colocados. Hay estantes llenos de tarros con líquidos translúcidos y contenidos que invitan a ser ignorados. La conversación resulta decepcionante al principio. El doctor Harvey habla con elusivas referencias a su responsabilidad en la extracción, almacenamiento y conservación del cerebro de Einstein. La inexperiencia de Levy como periodista está a punto comprometer la entrevista en dos ocasiones. Dos interrupciones milagrosas le salvan en ambas ocasiones. Una administrativa que le pide una firma a Harvey, así como una colega que le pregunta sobre el paradero de un cadáver. De repente, Harvey echa una mirada comprensiva hacia Levy, suspira profundamente, y pregunta: “¿De verdad que quiere saber dónde está el cerebro de Einstein?” Levy sabe que es una pregunta retórica que espera de él no una respuesta, sino un gesto que convenza a Harvey de su buena voluntad. Funciona. “Pues está mucho más cerca de lo que usted podría imaginar. Fíjese en ese tarro”, dice Harvey señalando hacia un estante que está situado a su izquierda. “Allá está el cerebro de Einstein”. Levy no da crédito a sus ojos. “¿Se refiere usted a ese tarro que lleva una etiqueta de ‘Sidra Costa’, que está en medio de otros tarros a medio abrir, y que está sólo a dos centímetros de caer al suelo y romperse en mil pedazos?”, pregunta horrorizado Levy. “Exactamente ése”.

PRINCETON, 12 DE ABRIL DE 1955

Einstein cena en su casa, como cada día. Se retira al salón, en donde pone la radio para oír las últimas noticias. Escucha música clásica durante un rato, pero empieza a sentirse mal. Algo no va bien. Siente un dolor intensísimo en la parte anterior del tórax que se desplaza de manera lacerante hacia la espalda. Empieza a toser, mientras le falta la respiración y tiene dificultades para tragar saliva. Se dirige al baño y se desploma inconsciente. Dos días más tarde, Otto Nathan, su amigo, lo traslada de urgencias al Princeton Hospital. Los médicos no pueden hacer nada. Einstein se les escapa de las manos. A la 1h 15m de la madrugada del día 18 de abril, Einstein respira por última vez. Tiene 76 años.

Thomas S. Harvey es el forense que está de guardia. Debido a la importancia del personaje se decide realizar la autopsia lo más rápidamente posible. Se le diagnostica la rotura de un aneurisma de la aorta, mortal de necesidad. Harvey sabe que no hay tiempo que perder. El tejido neuronal es uno de los que se degrada primero, y la ocasión de conservar el cerebro del científico le obliga a moverse rápidamente. Habla con

Otto Nathan del cual recibe una autorización implícita para salvar el cerebro, que la familia después negará. Para Harvey es suficiente.

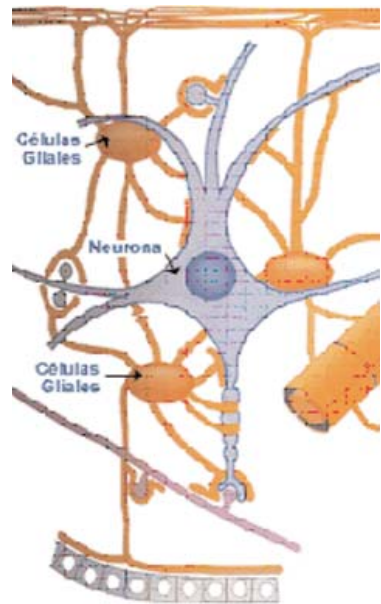
Acompañado por Nathan en la sala de autopsias, extrae el cerebro de Einstein. Lo fotografía desde diferentes ángulos. Lo corta en 240 cubos de un mismo tamaño, con excepción del cerebelo. Los pone en un tarro que tiene vacío, de sidra Costa, lo llena de formaldehído y se lo lleva a casa. Fin de la historia. Nadie pregunta más por el cerebro, y Harvey no hace nada con él. Viajará con él como si fuera un trofeo de caza, o un amuleto de la suerte o, en el mejor de los casos, como un entrañable recuerdo personal. En 1996, lo entregará definitivamente al forense del mismo hospital en donde murió Einstein, el doctor Elliot Krauss, del Hospital Princeton.

EL PRIMER ARTÍCULO

A raíz del artículo en el New Jersey Monthly, Harvey se vio obligado a hacer algo con el cerebro. De ahí que apareciera el primer artículo, pero no antes de 1985. Se titula *On the Brain of a Scientist: Albert Einstein* y se publica en la revista *Experimental Neurology*, y Harvey es uno de los autores.

En este artículo, los investigadores cuentan el número de neuronas y de células gliales en cuatro áreas del cerebro de Einstein. En el cerebro y en la médula espinal hay, además de las neuronas con sus prolongaciones (axones y dendritas), las células gliales. Las células gliales son 10-50 veces más numerosas que las neuronas y las rodean. De hecho, la mitad del peso del cerebro adulto, 1.400 gramos para un hombre, se debe a estas células. Cada una de ellas tiene ramificaciones, a veces muy escasas y cortas que se unen a un cuerpo pequeño. Aunque no se las considera esenciales para el procesamiento y conducción de la información se les atribuye funciones muy importantes para el trabajo neuronal:

- a) soporte mecánico de las neuronas
- b) aislamiento
- c) mantenimiento del microambiente neuronal, eliminando el exceso de neurotransmisores y de iones



d) guía para el desarrollo neuronal

e) funciones nutritivas

Harvey fue al menos sistemático y cada cubito de cerebro einsteniano podía atribuirse a la zona específica de dónde se extrajo el tejido. Las áreas que eligieron los investigadores fueron las áreas 9 y 39 de Brodmann. Brodmann fue un neuroanatomista que examinó la microestructura el cerebro humano y lo dividió en diversas áreas que correspondían a diferentes estructuras. Actualmente se utiliza su clasificación para localizar actividades o alteraciones en el cerebro vivo que se examina, por ejemplo, con técnicas de neuroimagen.

El por qué los investigadores eligieron estas áreas tiene que ver con lo que ya en aquel momento se sabía, gracias a la neuropsicología, de la localización de las funciones cognitivas. El área 9 está situada en el lóbulo frontal y es crucial en tareas de planificación, atención y memoria. El área 39 está situada en el lóbulo parietal y forma parte de la corteza de asociación, muy importante en las funciones de coordinación visuo-motora y del lenguaje.

Lo que hicieron los investigadores fue comparar la proporción entre las neuronas y las células gliales que había en cada zona. Como que por sí mismo este dato no tiene valor, ni hay datos de referencia en la población, lo que hicieron los investigadores fue comparar estos resultados con los de otros cerebros de 11 hombres que murieron a la edad de 64 años.

Los resultados indicaron que en el cerebro de Einstein había mucha más concentración de células gliales que en los 11 cerebros control. No obstante, sólo un área la 39 del hemisferio izquierdo llegó a la significación estadística. Esto sugería un aumento de demanda metabólica de las neuronas del cerebro de Einstein.

Se hicieron varias críticas a este artículo. Una era que los cerebros con los que se comparó el de Einstein eran 12 años más jóvenes. Quizás la proporción de células gliales sea la normal a la edad en que Einstein murió. No se controló tampoco que los individuos cuyos cerebros se examinaron tuvieran una educación o inteligencia siquiera mínimamente comparables a las de Einstein. Además, sólo existía un cerebro "experimental", el de Einstein. Esto trae muchos problemas metodológicos. Finalmente, las áreas estudiadas fueron muy pequeñas, y no está claro que fueran las que correspondían al cerebro de Einstein.

EL SEGUNDO ARTÍCULO

Un segundo artículo se publica... ¡once años después!, en la revista Neuroscience Letters. En esta investigación los autores se centran en describir las propiedades

macroscópicas del cerebro de Einstein. Minuciosamente, cubito a cubito, pesan las 240 piezas cerebrales guardadas (ahora sí) en un recipiente adecuado a su contenido. El resultado es sorprendente. El cerebro de Einstein pesa apenas 1.230 gramos, que es mucho menos de lo que pesa un cerebro adulto de hombre, que está alrededor de 1.400 gramos. De hecho, parece que el cerebro de Einstein pesa más o menos como un cerebro medio de mujer.

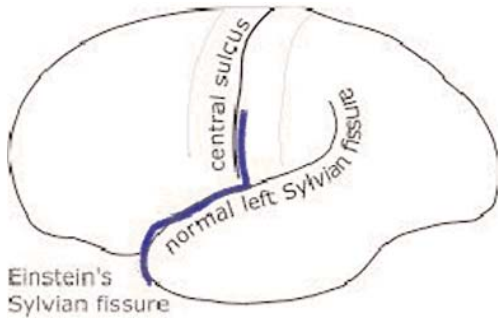
Por otro lado, los investigadores estudian la corteza cerebral del área 9 de Brodmann, la misma que examinaron en el primer artículo. La corteza es la parte más exterior del cerebro y es la que contiene los cuerpos de las neuronas. A causa de su color se denomina también sustancia gris. Pues bien, los científicos examinan el grosor de este área, así como la densidad neuronal. Llegan a la conclusión de que la corteza cerebral de Einstein era más fina que la de cinco cerebros de otros individuos que se usaron como control. Sin embargo, resultaba que la concentración neuronal era superior en Einstein, es decir, que su sustancia gris albergaba más neuronas en una determinada área cerebral en comparación a los cerebros controles.

¿Cómo se interpretaron estos resultados? Los investigadores consideraron que las características macroscópicas, el peso total, y microscópicas, la densidad neuronal y el grosor de la sustancia gris, acercaban el cerebro de Einstein al modelo de cerebro femenino. En otras palabras, parecía que Einstein tenía un cerebro de mujer.

EL TERCER ARTÍCULO

El tercer artículo se publicó en junio de 1999 en *The Lancet*, una revista británica muy antigua y prestigiosa, siendo todavía actualmente la segunda revista médica más importante del mundo. En este estudio, los investigadores se dedicaron a estudiar las superficies externas del cerebro de Einstein a partir de las fotografías que realizó Harvey justo después de extraerlo del cráneo del físico.

Este estudio coincidía con una cierta tendencia en el mundo de la neuroanatomía en que el examen macroscópico de la morfología cerebral externa retomaba cierto interés. Lo cierto es que durante buena parte del siglo XX, este tipo de examen se consideraba “pasado de moda”, ya que se disponía de técnicas cada vez más sofisticadas para estudiar la anatomía microscópica de los cerebros de cadáver, así como la anatomía funcional de los mismos con técnicas de neuroimagen cerebral, como la resonancia magnética o la tomografía por emisión de positrones. Sin embargo, los neuroanatomistas de finales del XX empezaban a considerar que ciertas características de la superficie más externa del cerebro contenían mucha más información de la que se pensaba en cuanto a las propiedades funcionales de los cerebros.



Los investigadores estudiaron minuciosamente las circunvoluciones y las cisuras del cerebro de Einstein y las compararon con la morfología externa de cerebros de 35 hombres y 56 mujeres fallecidos a la edad de 57 años de promedio.

En general, los científicos encontraron que la morfología externa era más o menos normal, pero con una excep-

ción muy notable que implicaba una zona bastante importante de la superficie lateral de ambos hemisferios, sobre todo en lo que se refiere a las cisuras. Las cisuras más importantes de la parte lateral externa de ambos hemisferios son la cisura de Silvio y la de Rolando.

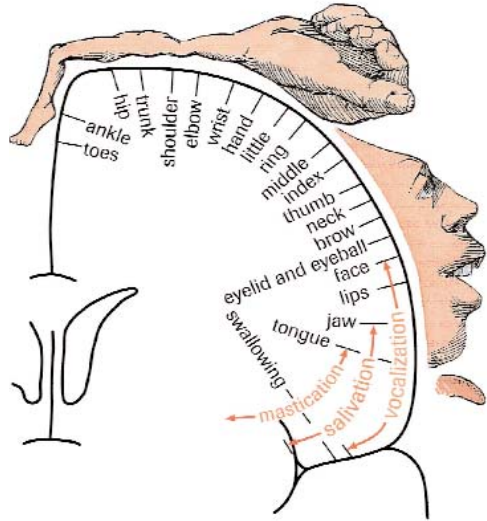
La cisura de Silvio de Einstein estaba desplazada hacia delante y la de Rolando apenas existía. Además, al cerebro de Einstein le faltaba el opérculo parietal. Dicho de otro modo, la zona parietal del cerebro de Einstein se había super-desarrollado (un 15 por ciento más que los cerebros controles) y había desplazado otras regiones cerebrales. Esto sugería que Einstein tenía un cerebro particular desde muy pronto en su desarrollo, seguramente entre los tres y seis meses de embarazo.

Una vez más, la “anormalidad” estadística, o la excepcionalidad cerebral, tenía que ver con el lóbulo parietal, un área que seguramente tiene que ver con las particulares habilidades de pensamiento einsteiniano. La diferencia entre los lóbulos parietales de Einstein y el resto de los mortales no es sutil. Sobre todo en lo que se refiere al hemisferio izquierdo, ya que el área que en el cerebro estándar ocupaba la región para el lenguaje, en el de Einstein estaba ocupada por la región parietal. Quizás esto explique otras particularidades cognitivas de Einstein, como que no habló hasta los 3 años. Muchos niños que tardan en hablar, se convierten en matemáticos o físicos, como Richard Feynman o Edward Teller.

EL LÓBULO PARIETAL

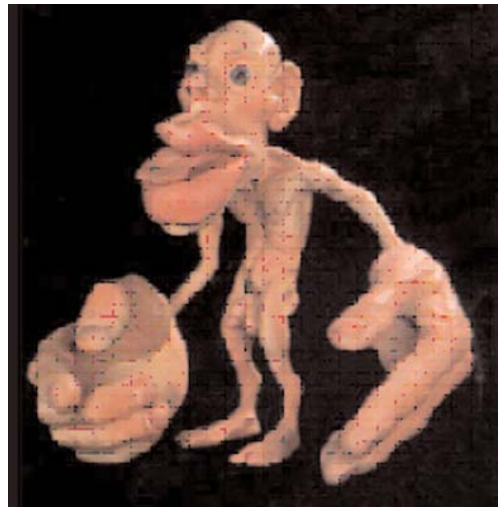
El lóbulo parietal ocupa una buena parte del cerebro, exactamente una quinta parte de la sustancia gris cerebral debe atribuírsele a él. Las primeras funciones con las que se le relacionó, y que representan la mayor parte de su actividad, se refieren al procesamiento de la información que advierte al cerebro sobre la posición de cualquier parte

de nuestro cuerpo (desde el dedo gordo del pie hasta los labios pasando por las articulaciones), y de las sensaciones que recibe (movimiento, dolor, temperatura, etc.). A esta información se la denomina somatosensorial. De hecho, en 1950 el neurocirujano más famoso de la neuropsicología, Wilder Penfield, estimuló los puntos de este área encontrando que sus pacientes describían sensaciones como si les tocasen en varias partes de su cuerpo. Penfield trazó un mapa de la corteza somatosensorial, con la boca y la cara cercana a las sienes y las piernas y pies en la parte superior de la cabeza. Y basándose en ese mapa, y en la cantidad de tejido cerebral dedicado a cada parte del cuerpo, se ha creado una representación ficticia de a qué se parecería un ser humano si a igual cantidad de sustancia gris correspondiera igual cantidad de piel. Es lo que se denomina homúnculo, ver figura abajo.



Sin embargo, el lóbulo parietal no se dedica solamente a procesar la información del esquema corporal, sino que es un área crítica para ciertas actividades de pensamiento abstracto que utilizan información visual, táctil y de movimiento, así como actividades de orientación espacial, como, por ejemplo, las responsables de situar un brazo y la mano en la posición adecuada para coger una pelota al vuelo. Además, se ocupa también del razonamiento matemático, seguramente porque en el núcleo de nuestro concepto de los números y las operaciones matemáticas está nuestra intuición espacial. De hecho, los psicólogos experimentales han demostrado que el razonamiento espacial sirve para un montón de actividades cotidianas, desde conducir un coche, hasta rese-

car un tumor cerebral sin destruir teji-



do sano, diseñar un museo, decidir si una jirafa es más inteligente que un tigre, saber la causalidad de diversos acontecimientos, e incluso decidir si una conclusión se sigue lógicamente de sus premisas.

Estas funciones nos acercan ya al pensamiento propio de Einstein, al pensamiento que utiliza la abstracción más pura y el razonamiento espacial. Veámoslo en sus propias palabras:

“Las entidades psíquicas que parecen servir como elementos en el diseño del espacio virtual en donde pienso son ciertos signos e imágenes que pueden ser voluntariamente reproducidas y combinadas (...) Estos elementos son, en mi caso, de tipo visual y muscular. Las palabras convencionales y otros signos se tienen que buscar laboriosamente sólo en un estadio posterior, cuando el juego asociativo mencionado está suficientemente establecido y puede ser reproducido a voluntad”. (Citado en Ghiselin, *The creative process*, University of California Press, 1985)

De hecho, gracias a que se pudo imaginar a sí mismo montando en un haz de luz y mirando hacia atrás a un reloj congelado, le fue más sencillo (según sus propias palabras) desarrollar el núcleo de la teoría especial de la relatividad. Gracias a que se imaginó dentro de un ascensor que descendía en caída libre sin peso, le fue más fácil desarrollar la teoría general de la relatividad. La teoría de la relatividad depende de conceptualizar el tiempo como una dimensión más, y visualizar el universo como un espacio de cuatro dimensiones necesita quizás de ese tipo de razonamiento.

Pero, ¿es suficiente apelar a su excepcional lóbulo parietal para explicar el genio de Einstein? Seguramente no. Seguramente hay muchos parietales excepcionales paseando por las calles de nuestras ciudades y pueblos, y ninguno de ellos está cerca de contribuir a la física moderna.

CREATIVIDAD E INTELIGENCIA

En 1905 Einstein tiene 26 años. Es un funcionario de patentes en Zúrich, Suiza. La física es un trabajo que tiene que realizar fuera de su horario laboral. Pero no importa. En unas pocas semanas de principio de año desarrolla la teoría especial de la relatividad, con la que demuestra que Newton estaba equivocado. Pecata minuta. Pero no acaba ahí su *annus mirabilis*. En marzo Einstein desarrolla la teoría cuántica de la luz. En abril y en mayo publica dos artículos. En uno inventa una nueva manera de contar el tamaño de los átomos o moléculas en un espacio determinado, en el otro explica el fenómeno del movimiento browniano. En el mes de junio completa la relatividad especial.

En el mes de marzo trataba la luz como una partícula, en el mes de junio la trata como un campo de ondas. Minucias. Un poco más avanzado el año, intuye una extensión de la relatividad especial en donde prueba que la energía y la materia están ligadas: $E=mc^2$. Seguramente es necesario mucho más que un buen parietal para dar con el Einstein de 1905. En el físico de esos meses milagrosos se dieron cita muchos factores que le convirtieron en un pensador único, que combinaba la creatividad con la inteligencia además de unas habilidades excepcionales en el pensamiento matemático y espacial. Porque todo eso es necesario. No sólo inteligencia general, no sólo inteligencia especial, sino también un pensamiento (y un temperamento) creativo.

Porque la inteligencia es una cosa, y la creatividad otra. Cierto, todavía no sabemos definir las. Pero ya sabemos muchas cosas de ellas: identificarlas, medirlas, mejorarlas... Sabemos que la inteligencia sirve para resolver problemas, para adaptarse y aprender de la experiencia (en palabras de Piaget, la inteligencia es lo que usamos cuando no sabemos qué hacer). Sabemos que cuantas más neuronas, más inteligencia, y cuantas más conexiones interneuronales, también. Pero no es suficiente con "más es más": los cerebros inteligentes utilizan el cerebro de manera orquestada, es decir, bien organizada, consiguiendo un equilibrio entre cantidad y articulación de la cantidad.

De la creatividad sabemos que requiere de individuos que piensen de manera divergente, sin censuras, con gran fluidez de ideas, que se combinan de manera inusual y lúdica, que permiten construcción de categorías amplias y cambiantes. Son individuos con gran motivación personal, confianza en sí mismos, egocéntricos, obstinados, entusiastas, adictos al trabajo, algo asociales, y que toman riesgos con facilidad.

La manera de diferenciar la inteligencia de la creatividad se ha resumido en que la inteligencia permite encontrar las respuestas correctas a un problema, mientras que la creatividad encuentra las respuestas innovadoras. En general, la mayoría de gente creativa es inteligente, pero los inteligentes no son necesariamente creativos.

Si a la excepcionalidad de combinar inteligencia y creatividad, le sumamos el momento histórico de las ideas que se barajaban en el campo de la física a finales del XIX y principios del XX que permitían seguramente un gran paso conceptual, podemos decir que el cerebro de Einstein estaba en el momento adecuado, en el lugar justo y con las habilidades apropiadas.

Entre los meses de junio y noviembre del año 1905, Albert Einstein, un joven de 26 años, oficial de tercera clase en la Oficina Suiza de Patentes, en Berna, y prácticamente desconocido en el mundo científico, publicó en la revista alemana *Annalen der Physik* cuatro artículos de investigación en Física Teórica que marcaron el comienzo de una revolución conceptual que ha cambiado la imagen física de nuestro universo, tanto a nivel global como a nivel de sus constituyentes.

Para conmemorar el centenario de este *annus mirabilis* la UNESCO declaró el 2005 como “Año Mundial de la Física”. Con tal motivo se celebraron en todo el mundo actos institucionales, a la vez que seminarios, conferencias y exposiciones sobre la figura de Albert Einstein. La Facultad de Física de la Universidad de Valencia (UVEG), con la colaboración de la Cátedra de Divulgación de la Ciencia, se sumó a estas celebraciones programando un ciclo de conferencias y una exposición conmemorativa. La exposición, titulada *Einstein: el hombre y la obra*, abierta al público entre los meses de abril y diciembre de 2005 en el vestíbulo de la Facultad de Farmacia del Campus de Burjassot de la UVEG, proponía, a través de una serie de paneles expositivos, un recorrido por la biografía del personaje, haciendo énfasis en sus líneas de pensamiento, en el contenido científico de sus artículos de 1905 y en las repercusiones científicas y sociales derivadas de su obra.

El ciclo de conferencias, titulado *Cien Años de Herencia Einsteiniana*, se desarrolló, entre marzo y junio de 2005, en el Salón de Actos Interfacultativo del Campus de Burjassot. La filosofía general, subyacente en la programación de las conferencias “de contenido físico” del ciclo, era la de exponer, a partir de contribuciones de Einstein de carácter seminal, los progresos realizados en los últimos cien años en diversos campos de la Física. Con carácter complementario se programaron dos conferencias, una en la que las propias contribuciones seminales de 1905 fueron analizadas desde una perspectiva histórico-científica, y otra en la que se daba cuenta de los estudios realizados sobre el cerebro de Einstein.

Este libro, que recoge el contenido de las conferencias del ciclo, pretende acercar al lector a un conocimiento en profundidad de parte del enorme legado científico einsteiniano.

