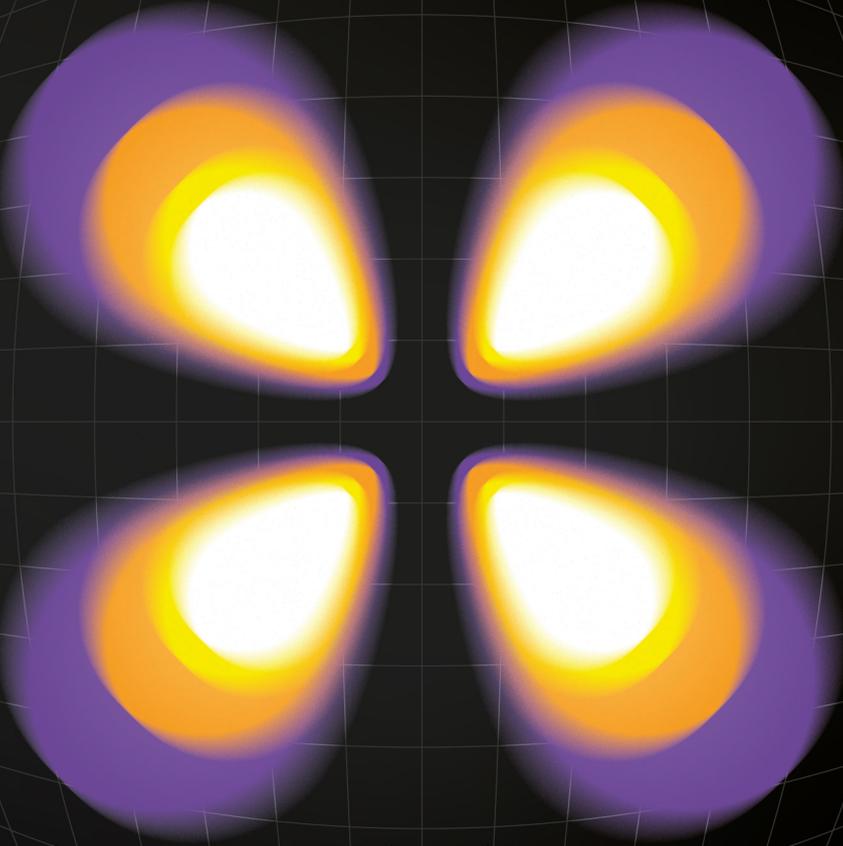


120TC

120 años de las ideas
basales que dieron origen
a la teoría de los cuanta



Julián Félix
Coordinador



Akademia

En este tributo reunimos a cuatro autores, académicos, profesionales de la física y sus fundamentos para que expongan, por separado, sus exploraciones de la teoría del quantum. Hacemos un recuento de las ideas que llevaron a la formulación de la teoría cuántica por Max Planck, y su posterior aplicación. Queremos conmemorar la publicación de la teoría cuántica pues es una marca indeleble en la historia del pensamiento científico y tecnológico universales, establece un antes y un después en la concepción del devenir de la naturaleza y es la base e inicio de la revolución científica y de pensamiento más importante de nuestros tiempos.

120 TC
120 años de las ideas basales que dieron origen
a la teoría de los cuanta



Colección Akademia
Ciencia y Tecnología

120 TC

120 años de las ideas basales
que dieron origen
a la teoría de los cuanta

Julián Félix
Coordinador

UNIVERSIDAD DE
GUANAJUATO



Ediciones
Universitarias

120 TC.

120 años de las ideas basales que dieron origen a la teoría de los cuanta

Primera edición digital, 2022

D. R. © Universidad de Guanajuato
Lascuráin de Retana núm. 5, Centro
Guanajuato, Gto., México
C. P. 36000

Producción:
Programa Editorial Universitario
Mesón de San Antonio
Alonso núm. 12, Centro
C. P. 36000
editorial@ugto.mx

Formación y diseño de portada: Jaime Romero Baltazar
Corrección: Fabiola Correa Rico

Esta obra fue sometida a un proceso de dictaminación a doble ciego por especialistas en la materia y, aprobada por el Comité Editorial de la Universidad de Guanajuato, dentro de la Convocatoria de Publicaciones Académicas 2022.

Todos los derechos reservados. Queda prohibida la reproducción o transmisión parcial o total de esta obra bajo cualquiera de sus formas, electrónica o mecánica, sin el consentimiento previo y por escrito de los titulares del *copyright*.

ISBN DIGITAL: 978-607-441-955-9

Hecho en México
Made in Mexico

Índice

Motivación.	9
De los autores.	15
120TC	
120 años de las ideas basales que dieron origen a la teoría de los cuanta.	17
Introducción	
Julián Félix.	27
Los orígenes de la Teoría cuántica	
Fernando Quevedo.	29
La teoría de Planck de la radiación	
Juan Maldacena.	57
El efecto fotoeléctrico	
Julián Félix.	75
La Teoría Atómica de Niels Bohr	
Octavio Obregón.	99
Cierre.	123
Recapitulación	
Julián Félix.	131
Referencias.	135

Motivación

La celebración que hoy nos ocupa es la de los 120 años de la Teoría cuántica y de las ideas basales que dieron origen y sustento a esta teoría. Este pequeño tributo al nacimiento de la teoría del quantum, o teoría de los quanta (también cuanta), gestada a partir de las investigaciones desarrolladas por Max Planck sobre el espectro de radiación del cuerpo negro, lo hacemos desde un pequeño rincón del mundo, como lo es la Universidad de Guanajuato, pero que está en todas partes de las civilizaciones por concurso de las tecnologías de la información y comunicación de las que actualmente disponemos de forma casi libre y sin costo; sabemos que hemos llevado esta celebración a muchas ciudades y comunidades, de manera casi instantánea, principalmente a las Américas de habla hispana de público joven y universitario, pero también a otros países que no hablan oficialmente el español como Estados Unidos de Norteamérica, Alemania, Canadá, Reino Unido, Brasil, Turquía, Rusia, China, entre otros. Estuvimos con esta celebración en prácticamente todo el orbe. Bien merecido este reconocimiento universal.

Lo que nos mueve a realizar esta celebración-recordatorio es muy variado. Me centro en algunos puntos que considero los más importantes, y son los siguientes:

Difundir la teoría del quantum entre las jóvenes generaciones. En los cursos formales casi no se le da importancia a esta teoría, si es que se le da alguna importancia, para formar las nuevas generaciones de físicos. Esta situación no es privativa del país; es una situación similar en muchas partes del mundo. Podemos retomar su importancia física e histórica y aprender mucho de la teoría de quantum.

Resaltar la importancia que esta teoría tiene para la humanidad en muchos ámbitos del quehacer humano de todos los días. La gran mayoría de todos los desarrollos tecnológicos que disfrutamos actualmente tiene su simiente en la teoría cuántica. Pensemos en la luz LED, la tenemos por todos lados en estos

tiempos. En algunos letreros monumentales del municipio de León, Guanajuato, México, se lee: “el 75% del alumbrado en este municipio es luz LED”. El alumbrado público y privado, y todo el alumbrado, a base de luz LED gesta una revolución en la iluminación que vemos a diario. Y la base física es la teoría cuántica. Con más cuidado nos damos cuenta de la importancia económica que la teoría cuántica tiene: la luz LED es más económica de producir porque la producción es más eficiente. La generación de calor es mínima, casi cero. En algunos automóviles contemporáneos los fanales están hechos a base de LEDs. El dispositivo para generar luz LED azul mereció para sus autores —Isamu Akasaki, Hiroshi Amano, y Shuji Nakamura— el Premio Nobel en Física en 2014 “por la invención del eficiente diodo emisor de luz azul que ha propiciado fuentes de luz blanca brillantes y ahorradoras de energía”.

Hay que enfatizar que no debe confundirse Teoría cuántica con Mecánica cuántica. Se llega a confundir, los estudiantes lo aprenden de esa forma, y conservan esta confusión a lo largo de sus carreras. La primera es el basamento de la segunda; la segunda es todavía más profunda que la primera. Con la segunda sabemos tratar el devenir de los sistemas cuantizados y la exploración de los alcances no termina hoy en día. Con la primera podemos explicar los sistemas a nivel atómico y subatómica, a nivel de sistema elemental, que normalmente están cuantizados en sus niveles y en sus procesos; pero no podemos explicar o describir los cambios o procesos que ocurren entre esos estados. Con la mecánica cuántica sí podemos, para eso fue formulada. Luego, teoría cuántica o teoría del quantum y mecánica cuántica o mecánica del quantum tampoco son lo mismo. El estudiante debe meditar sobre estas dos propuestas y llegar a determinar los alcances de cada una. La publicación de la teoría cuántica es una marca indeleble en la historia del pensamiento científico y tecnológico universales, establece un antes y un después en la concepción del devenir de la naturaleza; es piedra angular de las explicaciones contemporáneas de ese devenir; es la base e inicio de la revolución científica y de pensamiento más importante de nuestros tiempos. Entonces, Teoría cuántica y

Mecánica cuántica son dos propuestas diferentes, la segunda contiene a la primera.

Mostrar que la teoría del quantum es el inicio de una revolución todavía más profunda en el entendimiento y explicación del mundo, como lo es la mecánica cuántica. Explicar las bases y las ideas basales que dieron origen a la teoría del quantum para clarificar entre teoría del quantum y mecánica cuántica. Verla como una continuidad de las ideas clásicas hasta un punto de rompimiento y separación, para generar luego la teoría del quantum.

Clarificar e ilustrar cómo se llega a construir el conocimiento del mundo natural, en este caso la teoría cuántica. La generación de la teoría del quantum es un ejemplo de cómo construir una teoría acerca de la naturaleza; cómo se propone, cómo se fundamenta, y cómo se verifica observacional y experimentalmente. Estudiándola aprenderemos mucho de esta metodología. Para el estudiante puede ser una fuente de inspiración para continuar con sus estudios e iniciarse como científico.

Encausar a las nuevas generaciones por el estudio de la naturaleza, e iniciarse en la ciencia, tal como lo hacen los constructores de la ciencia, en este caso de la física. A la distancia en la historia podemos apreciar el gran valor de la teoría cuántica y la influencia que tiene en la vida diaria. Es simplemente un ejemplo, un muy buen ejemplo, de cómo se procede en la construcción de teorías acerca de la naturaleza, vemos varios maestros en la construcción de la física en acción: Planck, Einstein, Bohr, entre otros. El estudio de la naturaleza y los conocimientos que podemos construir bien valen la dedicación devota y pragmática de los estudiantes. Yo nunca me he arrepentido de haber seguido este camino. Siempre me maravillo ante los procesos de la naturaleza, ante la forma en que podemos conseguir las explicaciones, ante las explicaciones mismas, y ante las consecuencias tecnológicas.

Patentizar nuestro aprecio a los creadores de la teoría cuántica —M. Planck, A. Einstein, y N. Bohr, y otros muchos— por las ideas construidas y por los métodos delineados en la construcción de la teoría cuántica. Mostrar que fueron personas

como cualquiera de nosotros, pero con una enorme disciplina y disposición por aprender y estudiar la naturaleza. No solo la estudiaron, sino que crearon también las metodologías y las conceptualizaciones para estudiarla, entenderla y aplicarla para calar más hondo en su entendimiento. Los trabajos pioneros, con los que se busca transformar el clima de opinión imperante en el momento, siempre tienen oposición. Las propuestas de Planck, Einstein y Bohr no fueron la excepción. Planck escribió, en referencia a las oposiciones con las que topan las nuevas ideas para ser aceptadas, lo siguiente: “una nueva verdad científica no triunfa por convencer a sus oponentes [...] sino porque los oponentes terminan muriendo”. Son las nuevas generaciones, educadas en las nuevas evidencias, las que se ocupan de asimilar, profundizar, y explorar las nuevas propuestas. Esta situación la podemos ver en la historia de la teoría del quantum.

Recalcar y ejemplificar la importancia de aprender a hacer ciencia, de seguir metodologías en el estudio de la naturaleza, y conseguir resultados nuevos. En nuestros países no hacemos ciencias porque en general no se enseña ni se aprende a hacer ciencia. No sabemos hacer ciencia. Pero las historias de la ciencia, como la historia de la teoría cuántica, son buenas historias para extraer las enseñanzas para poder llegar a hacer ciencia. Las metodologías científicas para hacer ciencia están plasmadas, con mucho detalle, en la historia del quantum. Esta es una invitación para extraer esas enseñanzas y metodologías de la forma de hacer ciencia, de hacer física, en particular.

Explorar y exponer los conceptos que dieron pauta a esta revolución, aunque hay muchos excelentes estudios publicados a nivel mundial, en diferentes contextos, concepciones, y perspectivas, escritos por muy ilustres autores, pero no en el contexto que en esta obra exponemos. En este tributo reunimos a cuatro autores, académicos, profesionales de la física y sus fundamentos para que expongan, por separado, sus exploraciones de la teoría del quantum. Hacemos un recuento de las ideas en la concepción de la naturaleza que los físicos tenían antes de 1900, cuando fue formulada la teoría cuántica por Max Planck, las ideas basadas en la electrodinámica de Maxwell, Lorentz y

otros, y la termodinámica de Kirchhoff, Boltzmann, Helmholtz y otros. Luego la exposición de las ideas de Planck para resolver el problema del espectro de energía de la radiación del cuerpo negro, que dieron origen a la teoría de los cuanta. Enseguida la explicación del efecto fotoeléctrico y aplicación de Einstein de la teoría cuántica de Planck para resolver este problema. Para cerrar, la presentación del problema del átomo y las ideas de Niels Bohr, basadas en la teoría cuántica, para resolver el problema de los espectros atómicos, el problema de la estabilidad de los átomos, enlaces químicos, formación de compuestos, propiedades físicas de los elementos, y muchos otros.

Con los trabajos de Einstein y de Bohr, y con las confirmaciones experimentales a toda prueba, la teoría cuántica de M. Planck quedó firmemente constituida, asentada, generalizada, y fundamentada, a prueba de toda duda. Quedaron listos los pasos siguientes en la construcción de una mecánica del quantum. Teoría cuántica y mecánica cuántica no son lo mismo. La segunda contiene a la primera.

Para cerrar las exposiciones resumimos y damos las conclusiones generales de este trabajo, que consideramos podrá ser de gran valía para las nuevas generaciones de estudiantes de física y estudiosos en general.

De los autores

Fernando Quevedo

Adscrito al Departamento de matemáticas aplicadas y física teórica (Department of Applied Mathematics and Theoretical Physics) de la Universidad de Cambridge, Reino Unido. Exdirector del Centro Internacional de Física Teórica (International Centre for Theoretical Physics) en Trieste, Italia. Doctorado en Física por la Universidad de Texas Austin, Texas, EUA. Ganador del premio APS 2020 y el premio Wolfson, entre otros muchos.

Juan Maldacena

Adscrito al Instituto de Estudios Avanzados (Institute of Advanced Studies) de la Universidad de Princeton, EUA. Licenciatura en el Instituto Balseiro, Argentina. Doctorado en la Universidad de Princeton. Profesor Asociado a Harvard desde 1996. Dentro de sus contribuciones se encuentra la Dualidad de Maldacena o AdS/CFT en la Teoría de Cuerdas. Ganador de varios premios internacionales incluyendo el Breakthrough Prize, 2012.

Julián Félix

Adscrito a la Universidad de Guanajuato, miembro del Sistema Nacional de Investigadores nivel III, México. Doctorado por la Universidad de Guanajuato en colaboración con la Universidad de Massachusetts, EUA; Maestría en Ciencias por el Cinvestav IPN. Profesor asociado a Fermi National Accelerator Laboratory desde 1990; fundador a cargo del Laboratorio Internacional de Partículas Elementales, Universidad de Guanajuato. Descubridor de la polarización de Λ en reacciones pp exclusivas. Desarrollador de varias formas de detección de radiación. Premio Nacional de Física, México. Premio Noroeste de Física. Premio de Física por la Universidad de Sonora. Es autor de varios libros, tanto de referencia como de divulgación, y ha sido nominado a varios premios internacionales.

Octavio Obregón

Adscrito a la Universidad de Guanajuato, profesor Emérito del Sistema Nacional de Investigadores, México. Doctorado en la Universidad de Constanza, Alemania. Entre sus contribuciones se cuenta con modelos en los que muestra la dualidad S en teorías de norma de gravitación. Ganador de varios premios internacionales incluyendo Premio Nacional de Ciencias y Artes en el área de Ciencias Fisicomatemáticas y Naturales otorgado por la Presidencia de la República, México

120TC

120 años de las ideas basales que dieron origen a la teoría de los cuanta

La presente obra surge del seminario homónimo realizado en celebración del aniversario de las ideas basales que dieron origen a la teoría cuántica. El acto inaugural contó con la presencia de autoridades de los sectores académico y administrativo de varias instituciones de México. Entre las que contamos las siguientes personalidades:

Beatriz Paredes Rangel. Senado de la República mexicana, presidenta de la Comisión de Relaciones Internacionales para América Latina y el Caribe, México.

Carmen Enedina Rodríguez Armenta. Secretaría de Educación Pública, titular de la Dirección de Educación Intercultural.

David Delepine. Universidad de Guanajuato, director de la División de Ciencias e Ingenierías, Campus León.

Julián Félix. Universidad de Guanajuato, profesor Investigador SNI nivel III, División de Ciencias e Ingenierías, Campus León, a cargo del Laboratorio Internacional de Partículas Elementales de la Universidad de Guanajuato.

En agradecimiento al apoyo que brindaron a esta actividad, desarrollada desde la Universidad de Guanajuato, en favor de la divulgación y avance de la Ciencia se transcriben sus palabras del acto inaugural:

Dr. Julián Félix

Laboratorio Internacional de Partículas Elementales

Buen día a todas las personas que nos acompañan en esta breve ceremonia de apertura. Autoridades de diferentes sectores de la administración pública relacionada con la educación, la ciencia

y la tecnología quienes nos acompañan virtualmente. Estudiantes, colegas e investigadores nacionales e internacionales, especialmente de todas las Américas.

Mencionamos y rememoramos, en esta ocasión, los 120 años de la formulación de la teoría cuántica por Max Planck, lo hacemos para todos ustedes porque la idea de quantum o cuanta en plural, es la idea más profunda en la física del siglo xx y de muchos siglos. Lo hacemos para que no lo olvidemos y no lo pasemos por alto, sino que la mantengamos en la memoria y sepamos que muchas de las tecnologías que vivimos en estos días tuvieron su origen en esta idea, en apariencia muy simple pero que generó cambios radicales en la forma en que concebimos y explicamos el devenir de la naturaleza.

La Teoría del Quantum es tan profunda que la exploración del mundo material desde esta hipótesis no termina en nuestros días, sino que cada vez se profundiza más. La Teoría del Quantum nace a raíz de ajustar de primeros principios datos experimentales obtenidos por Kirchoff y otros físicos. Planck la propuso como una medida desesperada, según sus propias palabras, para predecir los datos experimentales que no podían ser interpretados por medio de las teorías clásicas como la termodinámica y la electrodinámica clásicas.

La Teoría del Quantum fue perfeccionada y aplicada por Albert Einstein para explicar el efecto fotoeléctrico y por Niels Bohr, para explicar las estructuras y espectros atómicos. Con esos trabajos, de dos genios del siglo xx, la Teoría del Quantum quedó firmemente establecida y fue aceptada universalmente.

En este seminario que llamamos 120 Años de la Teoría del Quantum, tuvimos la oportunidad de escuchar cuatro presentaciones, las dos primeras a cargo de Fernando Quevedo, de la Universidad de Cambridge, y Juan Maldacena, de la Universidad de Princeton y las siguientes el 11 de noviembre a cargo de Octavio Obregón y Julián Félix de la Universidad de Guanajuato.

Gracias por acompañarnos en esta celebración de las ideas basales que dieron origen a la Teoría del Quantum, que transformaron la física del siglo xx, y por ende a la humanidad entera.

Nos congratulamos por el honor de la presencia de cada uno de ustedes. Gracias por acompañarnos en este seminario.

Senadora Beatriz Paredes Rangel

Presidenta de la Comisión de relaciones internacionales para América Latina y el Caribe

Muchas Gracias, muy buenos días a todos, saludo con gusto y admiración al Dr. Julián Félix, aprecio la gentileza de la convocatoria, la gentileza de su invitación. Saludo a las autoridades de la Universidad de Guanajuato y del laboratorio y del área de ciencias físicas matemáticas de la Universidad de Guanajuato, a todos los académicos que participan en este evento y a los estudiantes que están conectados para coparticipar en esta conmemoración.

Debo decirles que yo recibí esta amable invitación cuando aún era presidenta de la comisión de ciencia y tecnología del senado. Ése es el motivo de la convocatoria, por razones profesionales en el senado me relevaron de la comisión de ciencia y tecnología y me incorporé a la comisión de América Latina y del Caribe, sin embargo, mi compromiso con la ciencia, con el desarrollo científico, y la innovación tecnológica, y con quienes dedican su vida al conocimiento sigue siendo vigente, ése no tiene qué ver ni con funciones específicas, ni con puestos.

En ese sentido, subrayaré a la comunidad científica y académica de Guanajuato, del Bajío, y de toda la región, que estaremos atentos a seguir sumándonos a sus esfuerzos y a respaldar en el ámbito de nuestras competencias la consecución de sus aspiraciones y de sus sueños.

Me parece fantástico que hayan decidido conmemorar los 120 años de la Teoría cuántica. Lamentablemente yo no soy física, no podré hacer una disquisición de fondo sobre la trascendencia de la teoría cuántica, pero para los jóvenes estudiantes que nos están escuchando, sí quiero compartir algunas reflexiones sobre el valor de la ciencia, reflexiones que se han multiplicado ante la difícil circunstancia que está enfrentando la comunidad mundial por la presencia del COVID.

Ni duda cabe que si la humanidad es lo que logra hacer en esta época ha sido gracias a la ciencia y particularmente a dos grandes revoluciones: la revolución en las ciencias médicas que permitió la existencia de vacunas, y con ello multiplicó las posibilidades de vida de los seres humanos, cambió la esperanza de vida de los seres humanos y la revolución que gracias a la física y a los elementos de la física mezclado con las matemáticas y el análisis de los espectros eléctricos con el genio de Einstein y otros hizo la gran revolución en las telecomunicaciones.

La verdadera gran revolución de finales del siglo xx es la revolución en las telecomunicaciones, nosotros nos podemos comunicar de manera instantánea. Por primera vez, el mundo que era un conjunto de espacios separados por los grandes océanos se convirtió en una entidad donde todos los seres humanos podemos compartir ideas, conocimientos, reflexiones, comunicación, entretenimiento.

El desarrollo científico es el que está marcando las posibilidades de evolución de las diversas regiones del mundo, por eso es tan trascendental que en la Universidad de Guanajuato se haya decidido y hayan podido desarrollar el Laboratorio Internacional de Partículas Elementales que ahora es uno de los ejes de esta celebración.

Yo quiero felicitar la presentación del Dr. Julián Félix de las características del laboratorio. Es esencial que en nuestro país apoyemos la ciencia en las regiones, es fundamental que haya una visión de la descentralización de la investigación y de respaldo a los académicos que comparten el compromiso con sus regiones y con los estados.

En esa medida, el que las universidades jueguen un rol de liderazgo, el que puedan desarrollar investigación aplicada, el que existan los laboratorios con los doctorados y doctorales comprometidos con el desarrollo regional es fundamental. Este es un momento en donde es evidente la necesidad de combinar el gran conocimiento universal, el avance del pensamiento científico en todas las áreas de punta con el desarrollo regional, es un momento en donde es indispensable que la política científica de carácter mundial tenga su reflejo, sus espejos, sus gemelos

en experiencias de carácter local y para ello es esencial que los estados tengan el compromiso con respaldar la posibilidad de arraigo de los académicos y de los científicos en las regiones de nuestro país y para eso se requieren laboratorios, se requieren equipamientos, se requieren ingresos suficientes, se requieren becas suficientes para los educandos, por eso estimados amigos, al participar en esta inauguración, quiero desearles el que este evento resulte todo lo aleccionador, todo lo incitante para la mente, de nuestros jóvenes universitarios y les reitero el compromiso de impulsar el desarrollo regional de la investigación y de la ciencia en nuestro país.

Muchísimas gracias.

Dra. Carmen Enedina Rodríguez Armenta

Titular de la Dirección de Educación Intercultural en la Secretaría de Educación Pública

Muy buen día, me da muchísimo gusto saludarlos y agradezco en todo lo que vale la invitación.

A la senadora Beatriz Paredes Rangel, efectivamente, siempre ha sido una gran aliada en los temas de investigación y en los de ciencia, celebro que esté con nosotros, no importa que ahora sea presidenta de la comisión de relaciones exteriores, que gusto que esté aquí y por supuesto al Dr. Julián Félix y a todas las autoridades de la querida Universidad de Guanajuato, de verdad ¡Qué agrado! y ¡qué gusto! que estén celebrando estos 120 años de las ideas basales que dieron origen a la Teoría cuántica.

Esta universidad que cuenta con más de 70 años de historia y más de 70 años de formar a ciudadanos y ciudadanas a través de la educación superior, en el marco de esta valiosa conmemoración, reflexionamos y repensamos la importancia de la ciencia y del conocimiento científico en la sociedad, yo quisiera comenzar recordando por supuesto a Max Planck que ya lo mencionaron aquí y que siempre ha sido un elemento fundamental para todos aquellos que nos dedicamos a la ingeniería y que nos dedicamos al tema de la ciencia.

Y bueno, si bien, en el siglo pasado fue cuando destacó el descubrimiento de su constante fundamental, que es utilizada precisamente para calcular la energía del fotón, abre un precedente este elemento para todas las investigaciones. Bueno, yo me dedico al tema de las telecomunicaciones, yo sólo quisiera mencionar que generalmente, ahora, que estamos hablando acerca de la computación también acerca de la computación cuántica, es un paradigma distinto de la informática clásica, de la computación clásica donde solo hablamos de ceros y unos.

Ahora, el poder mantener unos qbits donde pueda tener una parte de la materia dos estados simultáneos, abre posibilidades infinitas si de por sí, ustedes, los que nos observan y los que nos ven en este momento, nacimos el siglo pasado, podemos ver como las computadoras han revolucionado de manera fundamental, las actividades del ser humano, y como ahora por ejemplo, o anteriormente cuando nosotros hablábamos por teléfono teníamos que levantarnos, ir al teléfono y tomarlo, marcar en un círculo, ahora lo tenemos aquí, podemos hacer videollamadas, podemos platicar, podemos estar en este diálogo a través de la distancia, podemos vernos, la verdad es que la ciencia y la tecnología han modificado la manera en que los seres humanos nos comunicamos y en realidad cómo vivimos.

Esto es fundamental porque la sociedad aprehende a las tecnologías, las utiliza, es decir aprehende (con h intermedia), hace suya la tecnología, y cuando hacemos nuestra la tecnología, cuando hacemos nuestra la ciencia es cuando se modifican de manera sustancial estos avances científicos y sustancialmente modifica nuestro quehacer cotidiano.

Los hallazgos y avances científicos, estos que me refería, han sido por siglos los cimientos de las grandes transformaciones de la sociedad y del mundo. Pero es importante que sean visiones de hombres y mujeres trabajando por los ideales; aquí quisiera resaltar la unión de estas visiones femeninas y masculinas porque son las aportaciones que contribuyen a los cambios.

Esta revolución que nos hace avanzar como sociedad. Quisiera destacar y recordar la primera científica de la historia que fue Hipatia de Alejandría. Quien destacó en la ciencia, en los

campos de las matemáticas y de la astronomía. No puedo omitir el trabajo de investigación de Marie Curie, por ejemplo, que fue la primera mujer que ganó un Premio Nobel de Física, de hecho, gana dos Nobel, que en conjunto con Pierre Curie en 1903 ganan el Premio Nobel de Física. Y bueno, también Ada Lovelace, quien trabaja con la máquina de Charles Babbage, programan la primera computadora. Este trabajo conjunto de hombres y mujeres es fundamental que ambos géneros participen y se involucren en el cambio y en el deseo por el gusto de explorar y aprender.

Considero que, desde la Secretaría de Educación Pública, debemos hacer que los niños, las niñas y los jóvenes no vean en las actividades científicas un trabajo. Sino la vocación de vida. Es decir, están en constante descubrimiento del mundo maravilloso que nos rodea. Y hoy en día la participación de las mujeres en ciencia, aunque sigue siendo limitada y con ella es importante que veamos que nos estamos perdiendo la mitad de la visión del mundo. Aunque ha tenido avances, pero todavía sigue siendo limitada, puesto que, de acuerdo con la Unesco, el 31% de los investigadores en el mundo son mujeres.

Y bueno, en México si bien en 1984, en el Sistema Nacional de Investigadores, solamente el 18% eran mujeres, ahora el 37% de los miembros del SNI somos mujeres, pero en la Academia de Ingeniería, por ejemplo, las mujeres representamos 4.5% de los miembros titulares, imagínense la brecha, imagínense cómo las mujeres que somos ingenieras miembros de la Academia de Ingeniería solamente representamos el 4.5%. Hay todavía mucho que hacer en esta brecha, sí porque como sociedad, desde la trinchera en que nos encontramos debemos analizar los factores y las barreras que impiden, no solamente que las mujeres no se interesen y participen de la ciencia, sino también, porque también, es importante que trabajemos en conjunto para poder superar estos elementos de las brechas de género que tenemos.

En fin, yo quisiera cerrar mi intervención destacando desde la Secretaría de Educación Pública la relevancia que tienen estos 120 años de la Teoría cuántica, en el mundo, en el cotidiano, pero, sobre todo, en lo que cada ser humano representa,

porque el que nos dé gusto por aprender, por descubrir, por reconocer este mundo maravilloso que tenemos, debe ser fundamental desde la primaria, desde que el niño está pequeño, el niño y la niña están pequeños, y que empiezan a descubrir. Eso es algo que nunca debemos de perder y como científicos y como profesores y profesoras estamos obligados a redescubrir en nuestros estudiantes esta maravillosa oportunidad que tenemos de conocer, reconocer el mundo y de nombrar estas cosas que apenas estamos viendo. En fin, nuevamente muchísimas gracias. Agradezco en todo lo que vale, a Guatemala, a la Universidad de Guanajuato, felicidades por estar haciendo estas actividades de gran relevancia para la ciencia en México.

¡Muchísimas gracias!

David Delepine

Director de la División de Ciencias e Ingenierías, Campus León,
Universidad De Guanajuato

Buenos días. Antes que todo quiero darle las gracias a la senadora Beatriz Paredes Rangel, a la doctora Carmen Enedina Rodríguez Armenta por estar con nosotros, y en nombre del doctor Luis Felipe Guerrero, rector general, y del doctor Carlos Hidalgo, rector del campus, les agradezco mucho por su presencia, y que para nosotros significa mucho recibir su apoyo, su presencia en este evento; es un evento que tiene un significado muy particular para nosotros como División de Ciencias e Ingenierías. Por eso, nada más para recordar que la División de Ciencias e Ingenierías se fundó no como División de Ciencias e Ingenierías, se fundó en 1986 que Clicerio Avilez llegó aquí de la UNAM y quería construir un laboratorio experimental de altas energías, de física de partículas.

Desafortunadamente, su fallecimiento inesperado, unos años después, puso en peligro el proyecto, lo retomó el doctor Octavio Obregón a inicios de los 90 para fundar el Instituto de Física de la Universidad de Guanajuato, con el apoyo de la UAM. Y desde entonces, el Instituto de Física se desarrolló,

amplió sus líneas de investigación, no solamente física de altas energías, física de partículas, mecánica cuántica, gravitación, mecánica estadística y física médica, también. Entonces hasta 2008-2009 cuando la Universidad modificó su ley orgánica y cambió su estructura a campus y división, es cuando la División de Ciencias e Ingenierías reemplazando el de Instituto de Física, con un propósito importante que es apoyar al desarrollo en León y en el estado de las ingenierías, por eso digamos, desde 2009 hemos abierto programas no solamente en física, sino licenciatura en biomédica y licenciatura en ingeniería química sustentable. Hemos pasado de un manejo de estudiantes del orden 300-400 para postgrado y licenciatura, y hoy en día tenemos unos 850 estudiantes en nuestros 7 programas, 3 de postgrado y cuatro de licenciatura.

Por eso, este evento, tiene un significado muy particular para nosotros, porque el doctor Julián Félix nos permite retomar nuestro sueño original. Vamos a decir, el hecho de poder contar con un laboratorio experimental de física de partículas, de altas energías con un impacto no solamente regional, pero nacional e internacional, fue siempre un sueño para lo que era el Instituto de Física, el grupo de partículas y claramente para la división.

En realidad, como responsable de la División para mí es un gran honor y un orgullo muy profundo poder agradecer al doctor Félix por haber logrado cumplir con este sueño; además de ser director de División, yo soy físico, físico teórico digamos, trabajando en físicas de altas energías y hay algo que la teoría cuántica no deja de decirnos, tiene 120 años y literalmente cada día no deja de sorprendernos. No solamente, digamos, hemos visto que muchos efectivamente de los descubrimientos relacionados con la Teoría cuántica tienen una aplicación inesperada, pero todavía más de 100 años después, todavía hacemos descubrimiento, nos sorprende lo que nos dice, lo que podemos descubrir en relación con la teoría y todavía con un manejo de aplicación, que ni siquiera podemos imaginar el alcance al que se puede llegar.

Realmente, ¿entendemos la mecánica cuántica el día de hoy? ¿Hemos “terminado” con la mecánica cuántica? Cómo en

física de altas energías, en física gravitación, generalmente trabajamos en teoría cuántica de campos que es digamos en teoría de cuerdas, ¿generalmente eso significa que se terminó la mecánica cuántica? Yo creo que no, yo creo que todavía tenemos mucho que descubrir, muchas aplicaciones que todavía podían revolucionar las telecomunicaciones claramente, pero también, por ejemplo, los sistemas de computación, se habla mucho de la próxima generación de computadora cuántica, que digamos que es un sueño también, pero que hoy en día no estamos tan lejos de su realización práctica o es un tema muy amplio muy detallado y como físico claramente es un sello digamos en la formación de los físicos. También la manera de pensar la mecánica cuántica no deja de sorprender, nos obliga a repensar los mecanismos de pensamiento lógico que usualmente estamos acostumbrados.

No voy a durar más tiempo. De verdad quiero reiterar mi agradecimiento a la senadora Beatriz Paredes Rangel, muchísimas gracias por esas palabras. Dra. Carmen Rodríguez, nos da mucho gusto que ustedes *sean* con nosotros; sí, nos hubiera gustado poder invitarle en persona en Guanajuato, pero es el fondo de pantalla, el fondo emblemático de la Universidad de Guanajuato que se encuentra en la ciudad de Guanajuato y queremos invitarlos cuando se pueda, ya que acabe la contingencia, en una invitación abierta para visitar aquí en León el Laboratorio del Dr. Julián, las instalaciones de la división, somos conscientes de que sus agendas son muy cargadas y que con la situación sanitaria no podemos realizar eventos en presencial, pero esperamos que luego que eso termine poder invitarlos de manera presencial para poder hacer algo en vivo y ver los logros del doctor Julián y de su laboratorio.

Muchísimas gracias a todos.

Introducción

Julián Félix

Agradecemos las palabras de las personas que nos acompañan en esta conmemoración, en su compromiso reconocemos y nos apropiamos de la necesidad de fortalecer la experimentación en lugares propicios para fomentar la generación de conocimientos.

Reconocemos la fortaleza de las alianzas con instituciones internacionales y nacionales para generar las sinergias que lleven a la equidad y a la creación de conocimiento que fomenta el desarrollo humano. Su presencia fortalece nuestros esfuerzos para incentivar la investigación y experimentación científicas.

A través de motivar vocaciones científicas en los jóvenes de nuestro país y de todas las Américas, la historia del quantum ilustra muy bien la historia del quehacer científico, la ciencia, en particular la física, que nace como una colección de observaciones y datos experimentales obtenidos con la propia tecnología. Luego hay una labor de pensamiento abstracto y simbólico por parte de los físicos para interpretar bajo los esquemas conocidos la colección de datos.

Si lo logran sus teorías se fortalecen, si fallan sus teorías se amplían en unas nuevas. Las repercusiones de estos esfuerzos se ven en la profundización del conocimiento de la naturaleza, en la creación de nuevas tecnologías, en la expansión de los mercados y el fortalecimiento de la economía de los países.

Esta es la esencia y propósito de la investigación científica de la naturaleza, de esta forma deberíamos aprender y enseñar las ciencias.

El día de hoy nos acompañan Fernando Quevedo ex director del International Centro Internacional de Física Teórica en Trieste, Italia; profesor del DAMPT Cambridge; ganador de la medalla Abdus Salam 2018; Premio John Weatly de la APS, 2021 y otros reconocimientos internacionales. Sus contribucio-

nes en la física de cuerdas son importantes y reconocidas internacionalmente.

También nos acompaña Juan Maldacena. Entre sus muchos aportes se encuentra la denominada conjetura de Maldacena; la correspondencia AdS/CFT; ganador del Breakthrough Prize; las medallas Yuri Milner, Lorentz y Galileo Galilei.

A continuación, Fernando Quevedo nos hablará de la física que dio origen a la Teoría cuántica.

Posteriormente tendremos a Juan Maldacena con la Teoría cuántica.

Muchas gracias.

Los orígenes de la Teoría cuántica

Fernando Quevedo

120 años de la Teoría cuántica es una celebración muy importante. Para mí, la mecánica cuántica es la gran revolución de la Física de todos los tiempos. Tuvimos hace un par de meses una actividad en Inglaterra, organizada por la Facultad de Filosofía de la Ciencia en Oxford, donde invitaron a cuatro premios Nobel, y a los cuatro les preguntaron cuál era el descubrimiento más importante del siglo xx. Tres dijeron que era la mecánica cuántica; el cuarto, que era la expansión del universo. Para ponerlo en perspectiva, ninguno mencionó la relatividad de Einstein, por ejemplo; de aquí vemos el gran impacto que tiene la física cuántica en el desarrollo de la Física.

Hace un par de semanas me informaron que me tocaba escribir de lo que pasó antes de la mecánica cuántica, entonces vamos a dejar a Juan el placer de hablar sobre ella y yo me concentro en el preámbulo.

Sí, yo comparto la opinión sobre la importancia que tiene la Física Cuántica, es fundamental para todas las aplicaciones que se han encontrado, pero también por lo que conceptualmente significa; y como dicen, es tal vez la teoría más fundamental que tenemos hasta ahora. Todas las demás que se han creado —física atómica, nuclear, el modelo estándar de la física de partículas, teorías más especulativas como las cuerdas— son basadas en los principios cuánticos. Entonces, la mecánica cuántica es uno de los grandes descubrimientos en la historia de la ciencia, que, además, para la gente joven es importante que le llena a uno ese detalle de algo fascinante y misterioso, fuera de toda intuición. En principio, como decía Feynman, realmente nadie la entiende, pero todos la disfrutamos y siempre nos está ofreciendo más cosas, tal vez al tratar de entenderla mejor.

Empezaré con darles algunas ideas de qué pasó antes de la mecánica cuántica. Algunos puntos que enfatizar son los siguientes:

1. La naturaleza continua o discreta de la materia. Es una discusión de más de 27 siglos.
2. La discusión acerca de la luz, si era onda o partícula. Es una discusión de muchos siglos.
3. Los fundamentos teóricos y experimentales. Estos son la base para entender el formalismo de la mecánica cuántica.
4. El determinismo en las leyes de la Física. Esto es algo fundamental en la mecánica clásica y que no se cumple en mecánica cuántica. Las leyes de la mecánica cuántica son no deterministas.

Voy a dar un bosquejo histórico, a través de los siglos, enfatizando esos temas que ya mencioné. En la historia está el mundo antiguo, egipcios, indios, griegos, árabes, mayas, aztecas, etc. quienes tenían sus propias ideas de lo que era el concepto fundamental de la materia. Luego, en los siglos XVI y XVII vino la revolución científica que puso a la ciencia en el lugar que estamos ahora. El preámbulo para la mecánica cuántica son los siglos XVIII y XIX.

No voy a poder cubrir todo, porque realmente es mucho material, pero sí voy a enfatizar los puntos fundamentales.

Prehistoria

Para el desarrollo histórico, me permito recomendarles un libro que escribió Steven Weinberg (2015) hace unos años que se llama *Explicar el mundo: El descubrimiento de la ciencia moderna* (To Explain the World: The Discovery of Modern Science). Es un libro de historia de la ciencia escrito por un científico y no un historiador. Tiene dejos de irreverente, sobre todo cuando relata la historia del Mundo Antiguo, pero está lleno de detalles sobre lo que pasó en la historia de la ciencia.

La historia de los griegos, por ejemplo, la aborda en la forma que lo hace un físico, no como un historiador; por eso es irreverente a los historiadores no les parece su forma de presen-

tarla, porque él la presentó basado en los prejuicios de nuestro tiempo. Expone, desde esta perspectiva, qué ideas funcionaron y qué ideas no funcionaron del mundo griego.

Mientras que un historiador juzga a la historia no basado en su tiempo, sino basado en los tiempos de los eventos, S. Weinberg dice ¡Qué bueno! Yo no soy historiador. Soy físico, y como tal, dado que la ciencia avanza, se pueden discriminar las ideas que funcionaron sobre las que no funcionaron.

Hay frases increíbles donde dice, aparte de las referencias, cuando se refiere a los griegos, este es un pequeño ejemplo: “Aristóteles era muy ingenuo y generalmente estaba equivocado, pero por lo menos no era ridículo como lo era Platón”. Esta frase a mí me parece demasiado irreverente; pero le hace a uno pensar en por qué dice esas cosas. Algo concreto que sobrevivió de las ideas de los griegos fue primero la pregunta básica de Tales (esencialmente si existe una sustancia fundamental en la naturaleza de la que están compuestas todas las demás) y las ideas de Demócrito sobre la naturaleza discreta de la materia. Así que les recomiendo este libro de Weinberg, por si tienen algún tiempo. Es muy bueno.

En general, antes del siglo xvii se discutió el detalle de la naturaleza discreta o continua de la luz y de la materia. Los griegos habían empezado con la propuesta de Demócrito de los componentes discretos indivisibles, de donde viene la palabra átomo, que literalmente significa indivisible. Pero la propuesta era muy vaga. Demócrito no tenía ningún argumento para decir que su idea era mejor que la de otros; como Tales, decía que el agua era lo más fundamental, etc.; Demócrito tomó la idea de pensadores más antiguos. Pero, le pegó de alguna forma, es decir, tuvo éxito. La idea de los átomos fue la que tuvo más impacto en la historia, y fue apoyada o rebatida por los pensadores, filósofos, y físicos que le siguieron en los siglos venideros, especialmente desde el Renacimiento.

Siglo xvii

Después de los griegos, en parte por la influencia de Aristóteles y de la iglesia católica, la idea de los átomos no fue muy popular. No se hablaba de esta idea. La revivió uno de los pocos pensadores de esta institución, el sacerdote Pierre Gassendi. También en el siglo xvii, luego científicos como Newton y otros estuvieron pensando en este concepto. Y fue punto de debate hasta principios del siglo xx.

Empiezo aquí con personajes muy ilustres: primero, el pionero físico-teórico C. Huygens —quien también tenía formación matemática, valga la redundancia—; él hizo muchas contribuciones: el reloj de péndulo, el péndulo, estudios de la luz, astronomía, entre otras; se le recuerda principalmente por sus argumentos para explicar la luz como una onda, por la Teoría ondulatoria de la luz, en contraposición a la Teoría corpuscular de Newton.

En un frente de ondas, el Principio de Huygens lo estableció diciendo que cuando la onda se propaga, cada punto es una fuente de ondas que se propagan como la onda original; y con este principio pudo explicar la refracción de la luz, y otras características de la luz y el sonido. Huygens establece esta analogía: que la luz, igual que el agua cuando se perturba un poco, o cualquier otro medio elástico como el aire, una barra metálica, etc., es una ondulación del medio y se propaga en el medio. Así, también por analogía, la luz se mueve en un medio especial, de acuerdo con la visión mecanicista del mundo; en su tiempo, los físicos hablaban del éter como el medio que ondula para dar origen a la luz.

Generalmente Huygens y Newton no compartían las mismas ideas. Newton estaba en contra de la propuesta de Huygens, proponía que la luz es de naturaleza corpuscular, la luz es un corpúsculo o partícula. Pero también, Newton, el más grande de los físicos matemáticos, no sólo hablaba de la luz, también formuló sus famosas leyes de movimiento —que todo estudiante de educación media básica aprende—.

Aquí las escribo:

1. Primera ley. Todo cuerpo en estado de reposo, o movimiento rectilíneo y uniforme, permanecerá en ese estado a menos que una fuerza externa lo obligue a cambiar de ese estado.
2. Segunda ley. La fuerza ejercida sobre un cuerpo es igual a la variación del *momentum* del cuerpo en el tiempo. El *momentum* es esencialmente el producto de la masa por la velocidad. Así la formulamos:

$$\mathbf{F} = \frac{d\mathbf{p}}{dt}, \quad \mathbf{p} = m\dot{\mathbf{x}}. \quad (1)$$

\mathbf{F} es la fuerza; \mathbf{p} , el momentum; $\dot{\mathbf{x}}$, la velocidad; m , la masa.

3. Tercera ley. A toda acción ejercida por un cuerpo A sobre un cuerpo B corresponde una reacción del cuerpo B sobre el A de igual magnitud, pero de sentido contrario.

Volviendo a la Segunda Ley. Se dice que Newton nunca escribió la famosa ecuación, que podemos escribir de la forma en que todos los estudiantes la conocen:

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a} \quad (2)$$

\mathbf{F} es la fuerza; m , la masa; \mathbf{a} , la aceleración

La fuerza ejercida sobre un cuerpo es igual a la masa por aceleración del cuerpo; todos la aprendemos desde muy jóvenes. Y hay algo más: cuando uno lee los *Principia*, así se le conoce a la obra cumbre de Isaac Newton *Los Principios matemáticos de la Filosofía Natural* (2011), nota que la menciona con palabras, pero no la escribió. Pero mencionarla y escribirla en taquigrafía simbólica es casi lo mismo.

También hay detalles curiosos en los *Principia*. Por ejemplo, parece que en su libro cuando habla de la gravitación él describe cómo funciona, cómo funcionan las mareas y otros

fenómenos. Pudo explicar las mareas, pero parece que nunca estuvo en el mar. Es difícil pensar que Newton habiendo nacido en una isla no conociera el mar, y sin embargo pudo explicar las mareas.

Pero también había, y esto es interesante, gente que no estaba de acuerdo con él. Huygens era uno; Hooke, otro. Realmente no congeniaban muy bien. Discutían, por un lado, la paternidad de las leyes de Newton, a ver quién se llevaba el crédito de su formulación. También con Leibnitz, con quien discutía, para ver quién era el que originó el cálculo, por ejemplo, ya sea Leibnitz o Newton.

Dejando de lado estos descalabros, también Newton nos dio esa perspectiva, que, con sus ecuaciones, por ejemplo, a la hora de escribir la gravitación, nos dio esta visión de que se puede entender la naturaleza. Por ejemplo, la caída libre de un cuerpo en la tierra y el movimiento de los planetas. Esta es toda una revolución conceptual; hay una explicación concreta que se puede formalizar con ecuaciones concretas. La famosa ecuación de la gravitación universal. La fuerza entre dos objetos (F) es igual al producto de sus masas (m_1 y m_2) dividido entre el cuadrado de la distancia que separa las masas (r^2); \mathbf{n} es el vector unitario que va de una masa a la otra masa, indicamos con él únicamente dirección y sentido. Las fuerzas gravitatorias son siempre atractivas.

$$\mathbf{F} = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \mathbf{n} \quad (3)$$

Que nos da esa visión de que realmente el Universo se puede entender y se puede plasmar en ecuaciones y confirmar experimentalmente.

Esto es una buena parte de la gran revolución científica de Newton. También, en parte, está en desacuerdo con otros pensadores de la época.

Newton decía que se apoyaba en los hombros de gigantes. Claro, en parte, decían que era una broma, porque Hooke era bajito. Pero en esto se refiere también a Galileo, por ejemplo,

quien era un gigante. Además, estaba Kepler, Copérnico, como otros ejemplos complementarios, quienes no entran en esta historia porque son de siglos anteriores.

Sí, quería compartir los siguientes escritos, para que los lean a detalle; son sobre Newton y la gran plaga de su época, un tema de mucha actualidad en estos momentos. Durante la plaga, en los años 1665 y 1666, Newton estaba aquí en Cambridge y lo mandaron a su pueblo para escaparse de los contagios, porque estaba la gran pandemia, como estamos en estos días, y en esos dos años, aquí está lo que escribió él: todo lo que hizo en gravitación, en el cálculo, y en la óptica, etc. Así que esta es una forma de motivar a los jóvenes y decirles que hay puntos positivos cuando nos tienen encerrados por la plaga. Así lo relata Newton:

A principios del año 1665 descubrí el método para la aproximación de series y la regla que permite reducir cualquier dignidad (potencia) de cualquier binomio a una serie tal (teorema del binomio). Ese mismo año, en mayo, encontré el método de las tangentes de Gregory y de Sulzius, y en noviembre obtuve el método directo de las fluxiones (es decir, los elementos del cálculo diferencial), y en enero del siguiente año completé la teoría de los colores, y a continuación, en mayo, conseguí acceder al método inverso de las fluxiones (esto es, el cálculo integral), y durante ese año comencé a pensar sobre la gravedad, extendiéndola hasta la órbita de la Luna (habiendo descubierto cómo estimar la fuerza de un globo que gira dentro de una esfera presiona la superficie de la esfera...) y a partir de la regla de Kepler de que los periodos de los Planetas están en una proporción sesquiáltera de sus distancias desde el centro de sus orbes, deduje que las fuerzas que mantienen a los planetas en sus orbes debe ser recíprocamente como los cuadrados de sus distancias desde los centros alrededor de los cuales giran y por tanto comparé la fuerza requerida para mantener a la Luna en su Orbe con la fuerza de gravedad en la superficie de la tierra y encontró que respondía casi. Todo ello sucedió a lo largo de dos años, 1665 y 1666, puesto que por aquel tiempo me encontraba en la flor de la vida para la creación, invención y las matemáticas y la filosofía, más que en ningún otro momento desde entonces (Westfall, 2015).

El impacto de Newton fue fundamental, no solo en la física sino en todas las ciencias en general y hasta en los orígenes de la Ilustración que ha influenciado hasta la forma de estructurar pensamiento crítico, gobiernos democráticos, derechos civiles, etc.

¡Newton fue increíblemente genial!

Siglo XVIII

En el siglo XVIII hay otros personajes que me gusta enfatizar, el siguiente es un ejemplo: Pierre Simon, marqués de Laplace. El tema de Laplace es pertinente para hablar sobre el determinismo en la física. Tomando como base la propuesta de Newton, y ya formalizándola, Laplace llevó todo el formalismo de Newton, la mecánica clásica en general, al extremo analítico y de aplicaciones. Laplace escribió:

Hemos de considerar el estado actual del universo como el efecto de su estado anterior y como la causa del que ha de seguirle. Una inteligencia que un momento determinado conociera todas las fuerzas que animan la naturaleza, así como la situación respectiva de los seres que la componen, si además fuera lo suficientemente amplia como para someter a análisis tales datos, podría abarcar en una sola fórmula los movimientos de los cuerpos más grandes del universo y los del átomo más ligero; siempre que su intelecto fuera lo suficientemente poderoso como para someter todos los datos y análisis, nada le resultaría incierto y tanto el futuro como el pasado estarían presentes ante sus ojos. La perfección que la mente humana ha sido capaz de dar a la astronomía no ofrece más que un débil esbozo de tal inteligencia (1951).

Lo anterior es como pensar cómo lo haría alguien ahora, con una gran computadora, con técnicas de *machine learning*: lo que sea que haya que describir, es decir, un sistema físico cerrado, dadas las ecuaciones de movimiento de cada partícula que compone el sistema y las condiciones iniciales, uno puede iniciar la descripción de todos los sistemas físicos y describir cada uno de

los estados posteriores posibles; incluso la descripción es reversible, pero no lo es el sistema físico.

Esto es a lo que llegó Laplace al plantear y describir un determinismo en el funcionamiento de los sistemas físicos; y es algo que va a poner en duda, y soterrar la mecánica cuántica después.

Luego, Thomas Young demuestra experimentalmente que la luz es una onda, o que tiene características de onda, mediante su célebre experimento que lleva su nombre. Los físicos, y los científicos, concuerdan que Young es esencialmente el último hombre en saberlo todo, porque era una persona que sabía de todo, era científico, pero también especializado en lenguajes, en historia antigua, en egiptología, etc. Él propone el experimento de Young, experimento de la doble rendija, que después se ha usado mucho en mecánica cuántica también; pero aquí es para, de forma concreta e indiscutible, demostrar que real e indubitablemente, la luz es una onda.

En este experimento se incide un rayo de luz incoherente sobre un colimador con dos agujeros o rendijas —para hacer dos rayos coherentes—, que después, al final, llegan a una pantalla recorriendo caminos ópticos diferentes. La imagen, que se puede ver sobre la pantalla, consiste en máximos y mínimos de intensidad de la luz, alternados, en diferentes puntos sobre la pantalla. Este hecho se interpreta como que ha habido interferencia constructiva y destructiva de la luz saliendo de los dos agujeros —de los dos rayos—. Entonces este resultado no hubiera ocurrido si la luz estuviese constituida de partículas, o es muy difícil de explicar si consideramos que la luz está constituida de partículas; lo más sencillo de suponer, para explicar los resultados, es que la luz está constituida por ondas, o que la luz es una colección de ondas, es un fenómeno ondulatorio. Entonces él, Thomas Young, estableció, de una vez por todas, aunque provisionalmente, que la luz es, efectivamente una onda, o que, bajo ciertas circunstancias, tiene características de un fenómeno ondulatorio. En mecánica cuántica resulta ser que este mismo experimento se puede hacer con partículas (como los electrones) en lugar de la luz y el resultado es el mismo: un comportamiento

ondulatorio. Este fue, en ese momento, uno de los grandes logros de la ciencia de todos los tiempos, en particular de la física; a mí me impresionó profundamente este resultado, mandó a la ciencia en otra dirección, porque es un gran logro de la ciencia y de la metodología científica, en particular de la física.

Como un detalle curioso, si ustedes conocen la piedra Rossetta, fue él, Thomas Young, quien descifró los jeroglíficos que están en el Museo Británico, donde él, además de ser un gran científico, conocía suficientemente de los lenguajes para poder traducir estos jeroglíficos, llegando descifrar buena parte de los jeroglíficos egipcios.

Luego otros físicos producen importantes resultados científicos, que también son importantes, en este recuento, para entender la ciencia que tenemos ahora, para saber que la ciencia avanza no solo verticalmente sino horizontalmente. En este tenor, físicos ilustres como Lagrange, Hamilton, Jacobi y otros, proponen una reformulación de la mecánica de Newton que la hace mucho más clara, también mucho más profunda, y con nuevas visiones y perspectivas. Se entienden mejor las propuestas de descripción de la naturaleza, pero además fue lo que al final dio lugar a que pueda aplicarse más a la Mecánica cuántica.

Entonces, como ejemplo, les pongo acá la mecánica de Lagrange, donde el objeto fundamental es lo que se llama la *acción*, S . La integral en el tiempo del lagrangiano, \mathcal{L} , que depende de la posición y velocidad de las partículas que conforman el sistema físico, por ejemplo

$$S = \int \mathcal{L}(x, \dot{x}) dt \quad (4)$$

El principio que se usa es el principio variacional, lo que se llama en Cálculo de Variaciones, y lo desarrollaron físicos matemáticos como Jacob Bernoulli, Euler y otros físicos excepcionales; y se establece que la variación de la acción sea cero

$$\delta S = 0 \quad (5)$$

Está planteando, por principio, que la acción es un extremo —ya sea mínimo o máximo—, al devenir del proceso físico; de esta manera se obtienen ecuaciones para el término en el integrando, que es el lagrangiano, y son estas ecuaciones de este tipo:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{x}_i} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x_i} = 0 \quad (6)$$

y con esto, entonces, usan la integral. La acción puede tener muchas trayectorias, en el tiempo inicial y el tiempo final, la partícula puede seguir muchas trayectorias, pero hay una que se sigue en el proceso físico que es la que minimiza la acción y es la que satisface estas ecuaciones. De esta forma, eligen una sola trayectoria comparada con las demás.

Esto también es importante para la mecánica cuántica por dos razones: una, es que la mecánica cuántica en la formulación de Feynman no se escoge una trayectoria fundamental, sino que *todas las trayectorias son posibles*, pero al final, en el límite clásico se reduce a una, que es la más probable. Esta es una de las situaciones más raras de la mecánica cuántica. Todas las trayectorias son posibles, y hay que sumar sobre todas las trayectorias posibles. Y entonces, usando este formalismo de Lagrange es mucho más claro que usando la mecánica de Newton; y aquí, por ejemplo, para un caso: uno puede escribir el lagrangiano como la diferencia de energía cinética menos la potencial, y al obtener las ecuaciones de Lagrange lo que obtenemos son las ecuaciones de Newton. Recuperamos, u obtenemos la formulación de Newton

$$\mathcal{L} = K - V(x) = \frac{1}{2} m \dot{x}^2 - V(x) \Rightarrow \frac{d}{dt} (m\dot{x}) = -\frac{\partial V}{\partial x} = F(x) \quad (7)$$

Entonces es una forma de ver cómo este formalismo incorpora las ecuaciones fundamentales que tenía Newton, pero no solo eso, sino que también incorpora *esencialmente cualquier otra ecuación que conocemos en la naturaleza*.

Como ejemplos: las ecuaciones de Maxwell del electromagnetismo, las ecuaciones de Einstein de la gravitación, y cualquiera otra ecuación se puede derivar en base a un principio variacional, siguiendo este formalismo de Lagrange y Euler-Lagrange. Entonces, mediante este formalismo conseguimos un conocimiento mucho más profundo de lo que es la dinámica de los sistemas físicos. No avanzamos en la historia de la Física Clásica, pero lo haremos enseguida.

Siglo XIX

Ahora vamos del siglo XVIII al XIX. En este siglo me gustaría empezar con Fourier.

Fourier y la dualidad

Fourier fue un fisicomatemático, por alguna razón era muy cercano a Napoleón, y lo llevaba a sus conquistas a Egipto, y situaciones así, donde le asignaba trabajos. Fourier, estudiando el calor, descubrió lo que se llama el formalismo de Fourier para la transmisión del calor. Creo que en ese tiempo lo habían nombrado gobernador de Grenoble, Francia, la capital de los Alpes franceses. Imagínense que nuestros gobernantes fueran así tan conocedores de la física y la matemática, sería una maravilla. Así como lo fue Fourier, Benjamín Franklin o hasta el mismo Jefferson hacían experimentos cuando tenían tiempo. Pero sí se veía que Fourier era una persona de muchas cualidades, también fue el que descubrió el efecto invernadero, del que tanto se habla ahora por el cambio climático.

Pero siguiendo con Fourier, lo que necesito para esta presentación, son las famosas series de Fourier que obtuvo de sus estudios sobre el calor.

¿Qué es una serie de Fourier? Cualquier función, periódica, que se manifiesta en la naturaleza en muchas formas, oscilaciones, ondas, etc., se puede descomponer como una suma

de senos y cosenos. Uno tiene una función x y al tener la suma de senos y cosenos con diferentes frecuencias que al sumarlos todos reproducen la función periódica en cuestión.

Se escribe la función periódica de esta forma:

$$f(x) = f(x + 2L), \text{ para todo } x \quad (8)$$

Escrita como una serie de Fourier es de la siguiente forma:

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{+\infty} \left[a_n \cos\left(\frac{n\pi x}{L}\right) + b_n \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \right] \quad (9)$$

Donde los coeficientes son estas integrales dada la función como sumas de senos y cosenos.

$$a_0 = \frac{1}{L} \int_{-L}^L f(x) dx \quad (10)$$

$$a_n = \frac{1}{L} \int_{-L}^L \cos\left(\frac{n\pi x}{L}\right) f(x) dx \quad (11)$$

$$b_n = \frac{1}{L} \int_{-L}^L \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) f(x) dx \quad (12)$$

De aquí, podemos deducir que la función se puede expresar de dos formas: 1. Como una función de x , que puede ser la posición o el tiempo, lo que sea la variable. 2. Como una función de las frecuencias en la descomposición de Fourier. *Entonces hay dos representaciones, cada una es en un espacio diferente y complementario.* Tal vez eso se ve más claro en lo que es la transformada de Fourier, donde trabajamos en dos espacios.

El límite cuando el período se hace pequeño, se hace cero, la suma se vuelve una integral, entonces los coeficientes se

vuelven funciones digamos en este caso, en base a tiempo y frecuencia

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt \quad (13)$$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega)e^{i\omega t} d\omega \quad (14)$$

Expresado en tiempo y frecuencia (t y ω) o se puede escribir en espacio y *momentum* (p y x). Hay dos representaciones del mismo fenómeno. Hay dos diferentes espacios uno con la función F en el espacio de las ω y uno con la función f minúscula en el espacio de las t . Entonces hay dos diferentes espacios canónicos conjugados —de las coordenadas x y momentos p —, digamos, y otro de las frecuencias y tiempos. en mecánica cuántica son la posición y los números de onda (\mathbf{x} , \mathbf{k}), o la posición y el momento (\mathbf{x} , \mathbf{p}); y el tiempo y la energía (t , E), o el tiempo y la frecuencia (t , w). Es su representación dual. Al par de variables se les llama *canónicamente conjugadas*.

Algo fundamental en la mecánica cuántica es la *dualidad onda-partícula*. Que se manifiesta, y aquí la transformada de Fourier la da muy claro, en la naturaleza. Sencillamente se tiene una función de distribución gaussiana, muy estrecha en el espacio de posición, y en el espacio de Fourier de los momentos, o número de onda, nos queda una gaussiana más ancha. Si la original es ancha, en el espacio de Fourier es estrecha. Entonces así se sabe muy bien, dónde están ubicadas, la función, un pulso de onda o lo que sea estrecha. Si uno sabe exactamente su posición en el tiempo, entonces está muy disperso en la posición en el espacio de las frecuencias. Esta es la base del principio de incertidumbre en mecánica cuántica. Analizar la figura siguiente:

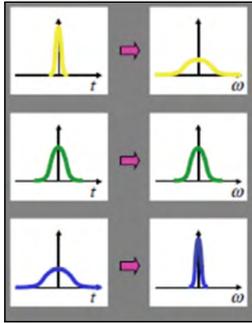


Figura 1. Dualidad, principio de incertidumbre (Diarmseven, s.f.)

Faraday y los campos

En seguida llegamos a otro gigante, tal vez el más grande de los fisicoquímicos experimentales en la historia, Michael Faraday. Una persona sin educación oficial, pero con una capacidad de trabajo y una pasión por la ciencia incomparables. Tuvo la suerte de que lo asignaron como asistente de un profesor que hacía experimentos, y él se “apoderó” de los experimentos y al final superó a todo el mundo. Él era el mejor experimental, con muchos experimentos y descubrimientos, ideas y conceptos.

La idea de inducción electromagnética, campo electromagnético, líneas de campo, electrólisis, cátodo, ánodo, etc. se deben a Faraday. No tenía muy buena formación matemática, tampoco tenía mucha educación formal, pero hablaba muy bien; era muy buen divulgador de las ideas. Entonces daba clases, regularmente en Londres en el Instituto Real, que eran así como espectáculos artísticos. La gente pagaba para verlo dar sus presentaciones como ahora para ir al cine, al teatro; estas se han continuado, actualmente se llaman Lecciones de Faraday y son toda una tradición en Londres. En lo que nos concierne, él fue quien introdujo la idea de ánodo y cátodo, se produce si hay una diferencia de voltajes, en este caso en el tubo que da origen a los rayos catódicos, que después descubrió Plucker y Crookes. Son los instrumentos que jugaron una parte fundamental para

descubrir el electrón, los rayos X, los rayos catódicos, por mencionar algunos ejemplos.

El siguiente es un detalle histórico interesante: él introdujo los conceptos de ánodo, de cátodos, de electrolisis; la electrolisis es, en parte, una forma de darse cuenta de que había una carga fundamental que se estaba intercambiando, lo que funciona a favor de la hipótesis de que la materia es discreta. La forma en que creó los conceptos ánodo y cátodo es la siguiente:

Hace un par de años uno de mis colegas me llevó a ver a la excepcional biblioteca del Trinity College —por ahí han pasado muchos científicos— donde están muchos de los originales documentos de Newton, de Hooke, etc. y también resguardan la serie de cartas que Faraday le escribió a William Whewell, que era el máster del Trinity College en esa época.

Whewell era una persona con mucha educación oficial, conocía mucha historia, lenguas, etc. Faraday lo consultaba frecuentemente porque quería darle nombre apropiado a sus descubrimientos y conceptos; por ejemplo, la palabra ánodo, la palabra cátodo se las dio este señor William Whewell, le decía “ah, eso quiere decir esto en griego o latín” y entonces describía muy bien lo que Faraday estaba descubriendo y conceptualizando.

Resulta que esta carta a la que me refiero subraya la palabra *científico*, está hablando que a él le gustaba que a la persona que haga ciencia se le llamara *científico*, parece que eso no era muy común, o no se notaba.

También, introdujo —y esto sí es cierto, pues hay constancia de que es la primera vez que se utilizó—, la palabra *físico* al inglés: “el que hace Física hay que darle un nombre y en inglés le diría *Physician*, pero eso ya lo tomaron los médicos, entonces no se podía, otro nombre es *Physicist*” (Whewell, 1847). Le cuesta mucho pronunciarla y además suena muy raro, entonces no le gustaba. Pero precisamente por eso se volvió esa la palabra oficial, o sea que Faraday también contribuyó al nombre de los físicos.

Maxwell, electromagnetismo y óptica

Luego viene el gran gigante Maxwell. Cuando los académicos preguntan ¿quién ha sido el mejor físico de la historia? Hay una disputa entre Newton y Einstein, generalmente gana Newton. El que nadie disputa es el número 3 que es Maxwell. Maxwell, con todo su formalismo matemático, retomó a Faraday y fue él quien logró unir lo que es el electromagnetismo como lo conocemos ahora. También, realizó un gran trabajo en la mecánica estadística, con la teoría cinética; se le reconoce con términos como la distribución de Maxwell-Boltzmann, que también es una gran contribución; Maxwell estaba ya asumiendo la estructura discreta de la materia, pese a que todavía estaba en disputa; físicos como él, Boltzmann y otros ya estaban convencidos y seguían adelante en sus investigaciones.

Y recordando la frase de Newton, Einstein dijo: “no me apoyo sobre los hombros de Newton, sino sobre los hombros de James Clerk Maxwell” (Hawking, 2004). Por eso el lugar número 2, apoyado sobre el número 3. Esto, para ver el valor que Einstein le daba a Maxwell.

Así como las ecuaciones de Newton, Maxwell tiene sus famosas cuatro ecuaciones. Estas son las siguientes:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 4\pi\rho \quad (15)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (16)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (17)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{J} + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (18)$$

Esta es una forma de escribirlas. Hay otra forma mucho más elegante de hacerlo en un par de líneas, usando lenguaje tensorial. Hagamos un paréntesis: los físicos discuten, y preguntan cuáles son las ecuaciones más bellas de la ciencia, y las ecuacio-

nes de Maxwell siempre están entre las primeras dos o tres. Las de Einstein también las califican con altas notas. Y la expresión debida a Euler

$$e^{i\pi} + 1 = 0 \quad (19)$$

También gusta mucho en las matemáticas, tener los números fundamentales $1, 0, e, i, \pi$ en una ecuación. Un colega, Joe Polchinski (recientemente fallecido) decía que la favorita de él es ADS=CFT. Para terminar, la ecuación favorita de Stephen Hawking es la relación entre una cantidad termodinámica, la entropía S y una cantidad geométrica, el área del horizonte (A) de un agujero negro, que es la única que incluye todas las constantes fundamentales.

Siguiendo con esta historia, las ecuaciones de Maxwell nos dan mucha información; una es la unificación de la electricidad y el magnetismo y, además, nos describen, y esto, confirmando todo lo que se sabía en esa época, que la luz simplemente es un cambio de campos eléctricos y magnéticos, moviéndose a una velocidad, c , que es la velocidad de la luz en el vacío, que es precisamente que las fluctuaciones de campos eléctricos y magnéticos en diferentes secciones, da una onda electromagnética que se mueve a la velocidad de la luz. De donde deducimos que la luz es una onda electromagnética. De aquí, toda una rama de la física, la óptica, se reduce simplemente a una aplicación de las ecuaciones de Maxwell.

Vamos a ver después que en Mecánica cuántica cuestionan el carácter ondulatorio de la luz. Usando el formalismo y propuestas de Maxwell, Hertz descubrió las ondas electromagnéticas, y en todo el espectro, el espectro visible, pero también las ondas de radio, rayos X, que no se habían descubierto hasta el momento, incluyendo la parte del ultravioleta al visible, al infrarrojo.

Boltzmann y la Mecánica Estadística

Luego está la formulación de la Termodinámica a partir de la Mecánica Estadística. Los trabajos de Bernoulli, Clausius que introdujo el concepto de entropía, también trabajos de Maxwell, que ya lo mencionamos, y Boltzmann, y Gibbs. Según parece, Einstein escribió sus dos primeros artículos sin conocer las aportaciones de Gibbs, y se dio cuenta que si las hubiera conocido no hubiera escrito esos artículos. En particular, las aportaciones de Boltzmann son originalísimas y profundas.

El punto que nos ocupa es entender otra vez la naturaleza discreta de la materia, y de la energía. Que conceptos macroscópicos como la temperatura, presión, y otros, se pueden entender base a partículas en movimiento. Si tenemos una distribución de partículas y la calentamos, las partículas se mueven más rápido, y al moverse más rápido la temperatura, por consiguiente, es más alta. Esto es necesariamente usando la teoría cinética y sus propuestas, lo que eventualmente se llega a llamar la Mecánica Estadística en nuestros días, donde usando mecánica y teoría de probabilidades, se pueden describir los fenómenos macroscópicos de tipo mecánico. Otra vez, es usar la naturaleza discreta de la materia y de la energía.

Luego está la segunda ley de la termodinámica, que fue la obsesión de Boltzmann, donde se establece que esencialmente la entropía siempre crece en el devenir de los fenómenos naturales. Se puede explicar este principio aquí de una forma probabilística. Que la entropía es una medida del desorden, es el número posible de estados de una distribución de partículas. Si están todas juntas, es muy poco probable; si están todas dispersas, es más probable. Entonces, eso es, mientras más dispersas son más probables y esto explica lo que observamos, que la entropía siempre aumenta en el devenir de los fenómenos naturales. Al aumentar la entropía aumenta el desorden.

Esto es fundamental, y es lo que obsesionó a Boltzmann, porque también es donde realmente se cuestiona la naturaleza determinística de la física.

Aquí la probabilidad juega un papel preponderante, y esto es fundamental para la mecánica cuántica o para las probabilidades. El gran héroe en esta historia es Boltzmann; así como Newton nunca escribió $F=ma$, Boltzmann nunca escribió la ecuación que lleva su nombre.

Es por lo que todo mundo lo recuerda, está grabada en su tumba:

$$S = k \log W \quad (20)$$

La entropía S es k por el logaritmo de W que es el número de estados. La $k=1.38 \times 10^{-23}$ J/K se llama constante de Boltzmann; no la introdujo él, fue Planck, en un tiempo se le llamó constante de Planck hasta que él mismo corrigió y dijo “esto viene de las ideas de Boltzmann”; pero la obsesión de Boltzmann era demostrar la segunda ley de la termodinámica, el famoso teorema H, que él llamaba.

Boltzmann tuvo mucha oposición precisamente porque él estaba convencido de la naturaleza discreta de la materia y de la energía, y de las propiedades probabilísticas de los fenómenos físicos. Gente como Mach y como Osmond se reían de él. Fue una disputa bastante seria y muy enconada. A muerte.

Boltzmann tuvo una vida muy interesante, era una persona con mucho talento, muy simpático de joven, aunque se le veía un poco enojado en las imágenes que nos presentan. Terminó suicidándose cerca de Duino, ciudad en la costa adriática, en la provincia de Trieste. Era una gran persona y un gran profesor, daba unas clases excepcionales. Su gran problema era que no hablaba bien el inglés y cuando se fue a Estados Unidos ocurrió el desastre porque nadie le entendía; en su idioma natal, el alemán, era una maravilla. Parte de su profunda depresión fue causada por la oposición en contra de sus ideas de la Mecánica Estadística. Le frustró mucho. En un momento se mudó de Alemania a Austria (Viena) y casualmente ahí estaba Mach, quien era uno de sus oponentes acérrimos.

Le costó mucho sentar progresos, pero creo que fue de los personajes más importantes en la historia de la ciencia y su

nombre se menciona día a día, cada vez más. Muchas de sus ideas están renaciendo. Ahora, por ejemplo, si se busca por título unos cuantos artículos con título Boltzmann y se revisa el número de veces que es citado tal vez compite solo con Einstein; es increíble todo el impacto que tiene, y por ello figura entre los mejores de la historia.

Desarrollos paralelos

En parte de todo este desarrollo de ideas y de resultados, hay que enfatizar que hubo otras personas que fueron haciendo progreso en diferentes direcciones. Una dirección en la investigación científica es la espectroscopía inventada por Kirchhoff y Bunsen. Kirchhoff se dio cuenta que los elementos que los físicos y los químicos estaban estudiando emiten radiación en diferentes colores arreglados en líneas espectrales. Al fin había una forma de determinar el espectro de cada elemento, e identificarlo por este. Los amarillos del sol, las líneas espectrales, etc.

Entonces, de los espectros atómicos también se inducía la idea de que había “algo”, que los elementos estaban compuestos de estructuras más fundamentales; una idea inducida, indirectamente, acerca de la composición de la materia.

En la química también se hicieron progresos; en esta época la química y la física no estaban separadas como dos disciplinas independientes. Había científicos que estudiaban las dos, pero separadamente. Dalton contribuyó profusamente a la teoría atómica; siguiendo el trabajo de muchos otros, Lavoisier y colegas estimaron los pesos atómicos relativos de los elementos; en base a este resultado se determina que hay elementos y compuestos, donde los compuestos son combinaciones de dos o más elementos y los elementos ya no son reducibles a algo más simple. Estos estudios concluyen en la Tabla Periódica de Mendeléiev.

Hay un libro muy bonito que se los voy a recomendar *El Sueño de Mendeléiev, de la alquimia a la química* (Strathern, 2001). Donde Strathern, de forma erudita y entretenida, cuenta la his-

toria de cómo fueron los físicos y los químicos descubriendo los elementos y cómo llegó a su conclusión Mendeléiev en su Tabla Periódica que hoy todos conocemos.

El 2020 fue el año de la Tabla Periódica, que ahora se puede explicar gracias a la Mecánica Cuántica. Antes, no; antes, era solamente algo cualitativo que los físicos habían ido clasificando, ordenando los elementos por peso atómico, propiedades, etc. Sin realmente decir qué eran, por qué los elementos tienen tantos electrones, tantos neutrones, tantos protones...; estas propiedades y otras se explicaron después con base en la Mecánica Cuántica. Fue un gran logro.

Rayos X, radioactividad y el electrón

Para cerrar, presentamos y explicamos algunos experimentos relevantes. Al final del siglo XIX, experimentos fortuitos, gente con mucha suerte, para la época, como Roentgen, Becquerel y otros.

Roentgen descubre los rayos X en 1895; toma radiografías de su mano, sin saber qué tan peligrosos son los rayos X. Un experimento fortuito, para después entender los rayos X y cómo funcionan, también es parte importante de la mecánica cuántica.

Becquerel descubre la radioactividad un año después del descubrimiento de los rayos X; él estaba haciendo otro experimento, muy diferente a la radioactividad. Él estaba tratando de entender los rayos X, como Roentgen, y se puso a hacer un experimento de la activación de la fluorescencia en el uranio por medio de la luz solar, para ver si los rayos X eran un tipo de fluorescencia: dejó una pieza de uranio con la que estaba trabajando, la envolvió en un trapo negro junto con una placa fotográfica envuelta en papel negro; dejó todo en una gaveta a oscuras, porque el día estaba nublado; cuando regresó otro día, seguía nublado; decidió revelar la placa, y notó que la placa estaba velada, pero sin la supuesta fluorescencia activada por luz solar; una emanación del uranio había atravesado el papel

y velado la placa. Se dio cuenta de algo nuevo y empezaron a investigar qué era; así se descubrió la radioactividad. El uranio es radiactivo. Nació la Física del siglo xx.

Dos años después, Pierre y Marie Curie empezaron a estudiar la radioactividad más en serio con otros elementos, e investigar si había otros elementos con las propiedades radiactivas del uranio. Estos descubrimientos y estudios son uno de los preámbulos más importantes de la Mecánica cuántica, la radioactividad, y el descubrimiento de elementos inestables. No solamente los físicos ya estaban aceptando que la materia está hecha de átomos, sino que también se percataron que algunos elementos son inestables, se rompían espontáneamente en otros.

Aunque algunos físicos y filósofos como Mach y Oswald seguían criticando la teoría atómica, los físicos mencionados antes ven más lejos y profundamente, no solo ven átomos, sino que ven átomos romperse en otros más pequeños.

Luego, un año después, usando los rayos catódicos que ya mencioné cuando hablé de Faraday, J. J. Thomson descubre que estos siguen trayectorias particulares y puede medir la relación entre la carga y la masa del objeto que son los electrones. Es la primera partícula elemental que se descubre, realmente, ya no quedaba duda de la existencia de las partículas elementales. Las trazas se veían como rayos, son las partículas y son los electrones. Es la primera partícula detectada y es curioso, una historia que contamos mucho en Cambridge, donde él estaba, que de esta forma descubrió que los rayos catódicos eran una partícula, pues resulta ser que su hijo, años después, quiso hacer experimentos de difracción con electrones, entonces su hijo demostró que el electrón es una onda. Entonces esta pareja de padre e hijo encontraron las dos manifestaciones de los electrones, como partícula y como onda.

Planck y el comienzo de la historia

Luego, al final, la radiación de cuerpo negro. La gente ya estaba estudiando termodinámica, cómo los cuerpos radiaban, el cuer-

po absorbe o emite, sale la curva de la radiación de cuerpo negro, que a diferentes temperaturas tenemos la diferente intensidad, cuando lo grafican con la longitud de onda, la frecuencia y dependiendo de la temperatura da diferentes curvas. Planck tenía años tratando de entender este proceso.

Lo que se conocía bastante bien era la Ley de Wien donde se establece que esta intensidad dependía de la frecuencia por el exponencial

$$u(\nu) = \frac{8\pi\alpha}{c^3} \nu^3 e^{-\beta\nu/T} \quad (21)$$

Con u la densidad volumétrica de energía; T , la temperatura en escala absoluta; ν , la frecuencia de la radiación; c , la velocidad de la luz en el vacío; α , un parámetro geométrico; β , un parámetro de valor fijo.

Resulta que Planck estaba tratando de entenderlo. Hay una historia muy divertida. Está, si la quieren ver, en el libro de *Sutil es el Señor*, la biografía de Einstein (Pais & Goldberg, 1984). La cuenta muy bien mi amigo Luis Orozco. Hace un año en un seminario en el Colegio Nacional de México, la historia es la siguiente: parece que Planck, estaba el 7 de octubre de 1900 de fiesta. Invitó a Hermann Rubens, quien era su colega, a su esposa y a Wien también. Lo invitaron a tomar café a su casa, a refaccionar como diríamos en Guatemala. Ahí Rubens le comentó sus resultados sobre su experimento del cuerpo negro y él andaba buscando la ecuación, y la Ley de Wien realmente no le estaba funcionando. Entonces Planck se pasó la noche pensando de una forma como probamos todos. Con ecuaciones estimó cuál función debía funcionar para que le encajara mejor con los experimentos

$$u(\nu) = \frac{A\nu^3}{(e^{\beta\nu/T}) - 1} \quad (22)$$

Entonces vino con esta ecuación, que era muy parecida a la de Wien. En esta ecuación si el cociente del exponencial es mucho

mayor que 1, se puede despreciar el 1 en el denominador y se llega a la ecuación de Wien. Si no, hay que expandirlo en una serie de Taylor y ver qué queda. Haciendo eso, Planck sí reprodujo muy bien los experimentos. Claro que el experimento es importante, el espectro visible está en el rango de temperaturas 4000-5000 K dependiendo de qué temperatura, el pico estará en el violeta, rojo amarillo, verde. Eso es muy curioso. A mí siempre me llama la atención que esas temperaturas son las temperaturas del Sol, la razón de que nuestros ojos pueden detectar estas frecuencias no debe ser casualidad. Siguiendo a Darwin de alguna forma evolucionamos para detectar las frecuencias a donde más está produciendo el sol. Claro hay algunos animales que ven un poco más del pico del rojo o del violeta, pero esencialmente los picos del Sol son esos.

Y está plasmado en la gráfica de cuerpo negro. Entonces la fórmula de Planck encajaba mejor con los experimentos, el 19 de octubre la presentó. Imagínese, el 7 de octubre habló con Rubens, y ya para el 19 tenía su artículo. Escribió su ecuación, y la presentó no sé dónde. El 14 de diciembre trató de explicar por qué esta ecuación es así. Porque solo la había puesto adivinando qué fórmula le daba esto y el 14 de diciembre de hace 120 años, entre octubre, y diciembre. Y él dice que después de varias semanas del trabajo más intenso de toda su vida, la oscuridad se levantó y tuvo una vista inesperada que empezó a aparecer para entender realmente esta fórmula. Y esta fórmula funcionaba si la energía estaba cuantizada en unidades de

$$E = h\nu \quad (23)$$

Donde $h = 6.62607015 \times 10^{-34}$ Js, se conoce como constante de Planck. Claro no demostró que la luz era una partícula, eso lo haría Einstein después, la energía sí estaba cuantizada, todo encaja, y escribir la constante universal fue sencillo.

Es curioso, pero casi inmediatamente de descubrir esta constante, él se dio cuenta que podía utilizarse como una de las constantes básicas, como la velocidad de la luz, la constante de

gravitación y de aquí propone en ese mismo año las famosas unidades naturales de Planck, que son las unidades que estamos usando todos en la física.

La longitud de Planck:

$$l_p = \left(\hbar G/c^3\right)^{1/2}, \text{ con un valor de } l_p = 1.6162 \times 10^{-35} \text{ m} \quad (24)$$

El tiempo de Planck:

$$t_p = l_p/c = \left(\hbar G/c^5\right)^{1/2}, \text{ con un valor de } t_p = 5.3911 \times 10^{-44} \text{ s.} \quad (25)$$

La masa de Planck:

$$m_p = \hbar/(c^2 t_p), \text{ con un valor de } m_p = 2.1765 \times 10^{-8} \text{ kg} \quad (26)$$

Esto es, usando solamente las tres constantes naturales: \hbar (Mecánica Cuántica), c (Relatividad Especial) y G (Gravitación) se pueden encontrar unidades de longitud, tiempo y energía (o masa) fundamentales. Con significado muy relevante: si no sabemos cómo describir la gravitación a nivel cuántico no podemos saber lo que sucede a distancias menores que la longitud de Planck, o tiempos menores que el tiempo de Planck (después del Big Bang) o energías mayores a la energía (masa) de Planck. Estos son consecuencias muy profundas del análisis dimensional de Planck.

Entonces, esto es realmente el final del preámbulo de la Mecánica cuántica.

He aquí algunas citas curiosas de varios científicos: “A pesar de los grandes éxitos de la teoría atomista en el pasado, finalmente tendremos que renunciar a ella y decidírnos a favor del supuesto de materia continua” (Wilson, 1958).

Planck en 1882, en contra de la teoría atomista, que después cambió. Boltzmann es la estrella de hoy y veamos qué le

dijo a Planck en 1891: “No veo ninguna razón por la que la energía no deba considerarse dividida atómicamente”.

No es que Planck le robara la idea, son cosas diferentes, pero Boltzmann ya podía tener la visión, su visión de la mecánica estadística que era una respuesta de las críticas a las ideas originales de Boltzmann.

Hay una frase muy famosa que se asigna a Lord Kelvin quien tiene muchas contribuciones: “En física ahora no hay nada nuevo por descubrir; todo lo que queda por hacer son medidas cada vez más precisas” (2010).

Esto antes que la Mecánica cuántica. Resulta ser que parece que Kelvin nunca lo dijo. Pero lo que sí descubrí es que hay un artículo del 27 de abril de 1900, donde Kelvin dio una de las charlas en honor a Faraday, sobre las nubes que nublaban la física del siglo XIX, el problema quedaba abierto y dijo que se resolvían con la Mecánica cuántica y la Relatividad.

No siempre Kelvin estuvo en lo correcto, dijo que los aviones no iban a volar. También había estimado la edad de la tierra y le salió que la Tierra era mucho más joven para que la teoría de Darwin funcionara, era una crítica que tenía contra la teoría de Darwin, pero él hizo estimaciones sin saber de la radioactividad (y la Mecánica cuántica), lo que hizo estaba bien, pero al incluir la radioactividad todos los estimados cambian y ganó Darwin.

Y la última es la que dijo Michelson, que es más o menos parecida:

todas las leyes fundamentales y hechos más importantes de la ciencia física han sido descubiertos, y están tan firmemente establecidos que la posibilidad de que sean sustituidos como consecuencia de nuevos descubrimientos es cada vez más remota (1903).

Claro, eso fue un poco antes de que terminara el siglo XIX, y antes de que ocurriera toda la revolución cuántica.

Y así empieza el siglo XX.

La teoría de Planck de la radiación

Juan Maldacena

Algo básico es que objetos calientes emiten radiación. Por ejemplo, si tenemos una estufa y ponemos la mano a una cierta distancia sentimos la radiación que nos calienta la mano. Si calentamos un pedazo de hierro, poniendo un alfiler en una llama, lo vemos cambiar de color a medida que se calienta. A distintas temperaturas la radiación cambia de color. Si está muy caliente se ve blanco, en unas partes menos calientes, naranja, luego más rojo, hasta llegar a una parte donde no emite radiación, al menos visible. Podemos ver la lava de los volcanes, podemos ver que está caliente porque está emitiendo radiación. El Sol y las estrellas, también están muy calientes. Dependiendo de su temperatura, hay estrellas de distintos colores, unas más azuladas, otras más anaranjadas, más rojas, etc.

Algo útil para pensar en la radiación es el cuerpo negro. Muchas veces se habla de la radiación de un cuerpo negro, pero ¿qué es un cuerpo negro? Un cuerpo negro es un objeto que absorbe toda la radiación que le llega. Una manera de hacer un cuerpo negro es, por ejemplo, tener una esfera y hacerle un pequeño agujerito, de manera tal que de la radiación que entra, una parte es absorbida por las paredes y otra parte se refleja hacia otras paredes donde otra parte es absorbida, etc., hasta que eventualmente toda la energía inicial va a ser absorbida por ese cuerpo.

Lo importante del cuerpo negro es que, dentro de ese cuerpo, cuando está a una cierta temperatura, la radiación llega a estar en equilibrio térmico con el cuerpo.

Desde el siglo XIX, pensamos en el campo electromagnético como una especie de sistema mecánico que puede vibrar. Tiene distintas maneras de vibrar y al estar en equilibrio térmico, todas esas vibraciones en cierto sentido se van produciendo a un cierto nivel.

Cuando el cuerpo negro entra en equilibrio térmico con la radiación calienta el campo electromagnético en el interior. La

radiación sale del cuerpo negro a través del pequeño agujerito es esa radiación que está en equilibrio térmico, a una temperatura igual a la temperatura del cuerpo negro, de la misma manera que cuando tenemos dos cuerpos en contacto, ambos llegan a la misma temperatura. Por ejemplo, si ponemos una taza de agua fría y una taza de agua caliente en contacto, eventualmente se va a equilibrar la temperatura y llegan a estar a la misma temperatura.

De esta misma manera, si tenemos el cuerpo negro y la radiación en el interior, estos se equilibran y llegan a estar a una dada temperatura. Cuando hacemos el agujerito y vemos la radiación que sale estamos viendo cómo es la radiación a esa temperatura.

La radiación viene con distintas longitudes de onda. Uno puede pensar que el campo electromagnético contiene ondas con distintas frecuencias o distintas longitudes. Cuando vemos, por ejemplo, la luz visible, a las ondas más largas las vemos rojas y a medida que la onda de la luz se hace más pequeña, vamos hacia la parte más azul o violeta del espectro. Lo importante es que distintos colores corresponden a distintas longitudes de onda.

Algo fundamental es que cuando un objeto está más caliente, más energía emite. De hecho, la energía total que se emite es proporcional a la temperatura a la cuarta potencia, después vamos a hablar un poco más sobre esa fórmula. Y otra cosa importante es que a medida que el cuerpo se calienta cambia el color (como el pedazo de hierro), las partes más calientes emiten una luz más blanca y las partes no tan calientes emiten una luz más roja.

Esa es otra característica importante de la radiación. El cambio de color significa que las frecuencias o longitudes de onda de la radiación van cambiando al cambiar la temperatura. Hablar de la frecuencia o de la longitud de onda es básicamente lo mismo ya que las ondas se propagan a una velocidad que es siempre la misma, la velocidad de la luz.

Vemos que un cuerpo negro emite radiación en distintas frecuencias y el tipo de frecuencias que emite cambia de acuerdo con la temperatura. Por supuesto el espectro electromagnético es muy grande, además de lo visible, puede haber rayos infra-

rojos, ultravioletas, etc. Para objetos a las temperaturas ordinarias la radiación dominante está en la zona de rayos infrarrojos.

Algo importante es descomponer a esta radiación emitida en las distintas longitudes de onda o en las distintas frecuencias.

Entonces tenemos que las longitudes de onda más grandes corresponden al infrarrojo y las longitudes de onda más cortas a la luz visible, todavía más cortas, a la luz ultravioleta, etc. Supongamos que tenemos un cuerpo que está a 3000 K, una temperatura bastante alta, como la de un filamento de una lamparita incandescente. Este cuerpo emite radiación a distintas frecuencias. Un poco de la energía tiene longitudes de onda larga, hay un máximo de la energía en la luz visible, y finalmente a longitudes de onda muy corta se emite muy poca energía.

Esto es lo que se observa experimentalmente (la curva del espectro de radiación de cuerpo negro). Hacia finales del siglo XIX este espectro fue medido con gran detalle en forma experimental. Podemos ver estas curvas en la Figura 2 que indica la cantidad de energía que se emite en función de la longitud de onda.

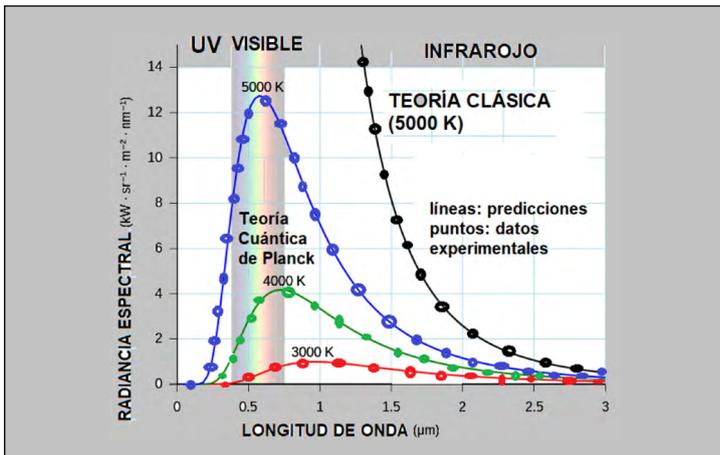


Figura 2. Espectro de radiación de cuerpo negro (Wikiwand, s.f.)

Por otro lado, la teoría clásica del electromagnetismo y junto con la mecánica estadística, hace una predicción específica para esta curva, también mostrada en la Figura 2 para una tempera-

tura de 5000 K. Lo importante es que la curva observada difiere de la curva calculada de acuerdo con la física clásica. La curva clásica tiene una patología muy importante y es que se hace muy grande a longitudes de onda muy corta, de tal manera que, si uno calcula la energía total emitida, daría infinita. Esto no está de acuerdo con lo básico de lo que se observa de la radiación. La teoría clásica da un resultado fundamentalmente inconsistente, aún en un sentido cualitativo, con la realidad. Está muy mal la teoría clásica. No es un detalle. Es algo muy importante. Esto fue llamado “la catástrofe ultravioleta”. Ver Figura 2.

Este era un problema importante, esa “nube en el horizonte” que mencionaba Kelvin. Era uno de los problemas que había en la física del siglo XIX. Una cosa interesante es que el máximo del espectro de cuerpo negro se va moviendo al aumentar la temperatura. La frecuencia del máximo es proporcional con la temperatura. La longitud de onda donde la distribución es máxima va como $1/T$.

Vamos a hablar un poco más ahora sobre el campo electromagnético. Está compuesto, para lo que nos interesa aquí, por ondas electromagnéticas que se propagan dentro de esa cavidad que habíamos mencionado antes. Y las podemos separar en distintas longitudes de onda o frecuencias o, más precisamente, modos de oscilación. De tal manera que, si uno tuviera una cuerda de violín estirada, que puede oscilar, con distintos modos de oscilación, el campo electromagnético es similar y también puede oscilar de todas estas maneras.

Cada modo de oscilación lo podemos pensar como un oscilador armónico, simplemente una masa suspendida de un resorte o un péndulo. Ese es el sistema dinámico de cada uno de estos modos de oscilación. O sea que en realidad podemos pensar al campo electromagnético como un montón de resortes o un montón de osciladores armónicos, cada cual con una frecuencia distinta. Y como las ondas se pueden superponer, si uno tiene una onda propagándose uno le puede superponer otra onda y el conjunto de las dos ondas, también es una solución posible. Uno puede pensar el sistema realmente como un conjunto muy grande de estos osciladores.

Entonces tenemos que hablar sobre qué ocurre con un oscilador cuando está en equilibrio térmico. Creo que Fernando discutió que la temperatura se debe al movimiento microscópico de las componentes del sistema. Y cada componente se mueve de una cierta manera. Todas las partes entre sí intercambian energía y llegan a un cierto equilibrio estadístico, donde todos tienen parte de esa energía. Según la mecánica estadística cada configuración posible del sistema ocurre con una probabilidad que depende de la energía. Más precisamente, la probabilidad es proporcional a una exponencial de la energía

$$p(E) \propto \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \quad (27)$$

Esta es la probabilidad de cada configuración microscópica del sistema. Si uno tiene un oscilador armónico, uno básicamente tiene una configuración por cada energía. Si oscila con más amplitud tiene más energía, y ésta es una configuración posible y cada una de esas configuraciones tiene una probabilidad de este tipo. Eso en particular implica que, si uno calcula la energía promedio, esta va a ser proporcional a la temperatura. En particular, la energía promedio de cada oscilador es independientemente de la frecuencia del oscilador. O sea, un oscilador que tiene más frecuencia tendrá una amplitud más pequeña pero la energía total va a ser la misma.

Si pensamos en los resortes que decíamos antes, uno puede poner un resorte que sea muy blando y un resorte muy duro, ambos van a estar oscilando, el resorte más blando va a estar oscilando con mayor amplitud, el resorte más duro con menor amplitud, pero ambos van a tener la misma energía promedio. Eso es lo que la Física Clásica nos dice que ocurre con un sistema en equilibrio térmico.

Y eso da lugar al problema que mencionamos para el campo electromagnético. Como hay un número infinito de posibles frecuencias, la cantidad total de energía sería infinita.

Uno podría decir “Ah, bueno, quizá lo que pasa es que nunca llegamos al equilibrio térmico”. Pero, independiente-

mente de cuánto tiempo pasa, un cuerpo negro siempre emite igual, no emite más energía cuando más tiempo pasa.

Para solucionar este problema Planck hizo la hipótesis de que la energía de un oscilador no es continua, sino viene dada en incrementos discretos:

$$E = hv \quad (28)$$

donde ν es la frecuencia del oscilador y h es una constante, la constante de Planck. O sea, el oscilador puede tener energía 0, o $h\nu$ o dos veces h por la frecuencia ($h\nu$) donde h es una constante muy pequeña (6.62×10^{-34} Js).

$$E = 0, h\nu, 2h\nu, 3h\nu, \dots \quad (29)$$

Se dice que Planck era muy conservador y que llegó a esta idea revolucionaria muy a su pesar en cierto sentido. Que a él le hubiera gustado explicar todo esto con la física clásica y que le disgustaba esta idea tan extraña. Pero con esta idea pudo explicar los experimentos.

Entonces, si calculamos la energía promedio, la podemos calcular con la misma fórmula que habíamos visto antes, la ecuación 28. La única diferencia es que las energías están cuantizadas, como en 30. Entonces, si calculamos la energía promedio, la podemos calcular con la misma fórmula que habíamos visto antes

$$P(n) \propto x^n \quad (30)$$

La probabilidad de poblar una configuración como esta, la probabilidad de tener n excitaciones, recuerden que el número de cuanta de energía que uno tiene, la energía está cuantizada y viene en unidades de ν :

$$x = e^{-\frac{h\nu}{kT}} \quad (31)$$

Estas fórmulas vienen de la mecánica estadística. Sumamos la probabilidad y la normalizamos y cuando calculamos esto, nos queda la expresión que tenemos acá

$$\langle E \rangle = hv \frac{\sum_{n=0}^{\infty} nx^n}{\sum_{n=0}^{\infty} x^n} = hv \frac{x}{1-x} = \frac{hv}{e^{kT} - 1} \quad (32)$$

Esta es una fórmula y cuando uno tiene una fórmula puede hacer el gráfico para ver qué pinta tiene, y lo que hice fue tomar la energía por la constante de Boltzmann por la temperatura, en la teoría clásica esto sería igual a 1, en la forma cuántica sería la gráfica verde, que tenemos graficada. La variable horizontal es el cociente entre hv/T .

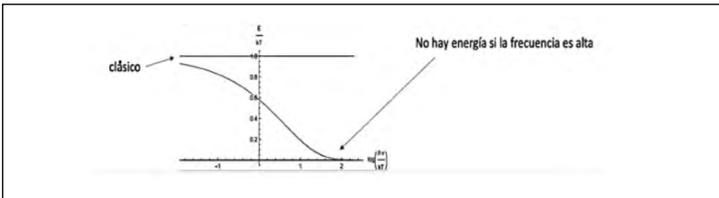


Figura 3. Energía promedio dividida por la temperatura, en función de la temperatura (elaboración J. Maldacena).

Para frecuencias muy pequeñas este efecto de la cuantización no es algo muy importante, el cuanto de energía es muy pequeño, n va a ser muy, muy alto y vamos a llegar al sistema clásico. Si seguimos este gráfico hacia la izquierda llegamos al límite clásico. La desviación con respecto a lo clásico se produce a temperaturas que hacen que el exponente sea igual de orden uno, $hv \sim kT$. Entonces es, en esas temperaturas, que se reduce la cantidad de energía del oscilador. Esto es muy importante porque no tenemos ahora la catástrofe ultravioleta ya que para frecuencias altas (o longitudes de onda muy cortas) la energía total de los osciladores se hace muy pequeña.

Lo que ocurre es que, a frecuencias altas, simplemente no se excita el oscilador, el oscilador tiene una cantidad de energía muy, muy pequeña. Siempre hay una pequeña probabilidad de excitarlo, pero la probabilidad es exponencialmente pequeña.

Cuando juntamos todos los osciladores armónicos que tenemos en el campo electromagnético lo que obtenemos es

$$\frac{dE}{dv} \propto hv^3 \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad (33)$$

Esta es parecida a la fórmula de cada oscilador. El factor de adelante aparece porque estamos en 3 dimensiones. Es un factor geométrico sencillo. Lo importante es el segundo factor donde tenemos la diferencia entre la teoría clásica y la teoría cuántica. Éste es el factor que es responsable que el espectro se haga pequeño a pequeñas longitudes de onda (la parte izquierda en la Figura 2). Con este factor tenemos el espectro correcto. En la teoría clásica, en lugar de (33) tendríamos

$$\left. \frac{dE}{dv} \right|_{\text{clásica}} \propto kTv^2 \quad (34)$$

Para entender mejor la diferencia entre la teoría clásica y la cuántica, vamos a hacer una analogía económica. Para esta analogía, vamos a suponer ciertas reglas económicas que no son válidas para la economía real pero sí son válidas para la física. El objetivo es explicar la física y no la economía.

Todos ustedes saben que en distintos países se usan distintas monedas, y vamos a usar eso para la analogía económica. Digamos que hay un mercado de monedas extranjeras: dólares, pesos mexicanos, pesos argentinos, etc. Y digamos que hay un inversionista que tiene un dinero inicial y lo quiere repartir en forma más o menos igual entre todas las monedas. Quiere tener lo que en economía se llama un portafolio balanceado.

Algo que resulta más o menos claro, es que, si quiere tener una cantidad real igual en todas las monedas, va a tener una cantidad nominal mayor en las monedas menos valiosas y menos valor nominal en las monedas más valiosas.

Entonces la analogía de la física clásica sería lo siguiente: la teoría clásica sería equivalente a decir que uno divide todo el dinero que uno tiene de manera tal que uno tiene el mismo

valor en todas las monedas. Vamos a dar un ejemplo para que sea todavía más claro.

Digamos que sólo hay 3 monedas en total, el dólar, el peso mexicano y el peso argentino y digamos que los tipos de cambio son

$$1 \text{ dólar} = 20 \text{ pesos mexicanos} = 200 \text{ pesos argentinos.}$$

Entonces digamos que el inversor empieza con 60 pesos argentinos en total. Lo divide en 3 grupos de 20 pesos argentinos y compra las distintas monedas.

Se va a quedar con 20 pesos argentinos, compra 2 pesos mexicanos y 0.1 dólar. De esta manera tiene la misma cantidad real de valor en las 3 monedas y eso sería la configuración final.

En esta analogía, la temperatura sería análoga al valor real del dinero en cada moneda. Noten que aquí todas las monedas tenemos la misma cantidad, si hubiéramos empezado con más pesos argentinos sería como empezar con más energía y tendría en total una distribución con mayor cantidad en cada una de las monedas, pero de manera tal que tomando en cuenta el tipo de cambio todas tienen el mismo valor real.

Ahora vamos a hacer la analogía económica de la física cuántica. Pero ahora supongamos que hay una nueva regla económica, ésta no es realmente del mundo real, pero vamos a inventarla. La regla dice que lo mínimo que uno puede comprar de cada moneda es una unidad. Uno puede comprar un dólar, o 0 dólar, uno no tiene derecho a comprar 0.1 dólar. Por ejemplo, analicemos de nuevo el sistema anterior, pero con esta nueva regla.

¿Qué haría el inversionista con esta nueva regla? Tendríamos el mismo tiempo de cambio que teníamos antes:

$$1 \text{ dólar} = 20 \text{ pesos mexicanos} = 200 \text{ pesos argentinos,}$$

y lo que pasaría es que el inversionista no podría comprar ninguna de las monedas muy caras. O sea que tendría que distribuir de acuerdo con el dinero que tenga, tendría que distribuir entre

las monedas más baratas. Del ejemplo anterior, no podría comprar ningún dólar ya que sería menos de una unidad. O sea que a los 60 pesos argentinos originales los va a dividir en dos partes iguales entre pesos mexicanos y pesos argentinos.

0 dólar, 3 pesos mexicanos; 30 pesos argentinos.

Lo importante acá es que no tiene ninguna de las monedas caras. A medida que el inversionista tiene más dinero también puede empezar a comprar las monedas más caras. Imagínense que hay una distribución muy grande de monedas, monedas muy baratas como los pesos argentinos y monedas muy caras, llegando a monedas carísimas y de esa manera cuando tiene una cantidad de dinero inicial va a poder comprar cierto número de monedas, pero no todas ellas. No podría comprar las carísimas.

Entonces si relacionamos este modelo económico con la física podemos decir que el valor de ese dinero total que uno tiene es energía.

Los tipos de monedas serían las distintas frecuencias de la luz o de la radiación, que viene en distintas unidades.

El valor de cada unidad de esa moneda sería igual a $h\nu$, sería la energía que uno necesita para excitar un cuanto.

La cantidad de unidades de cada moneda (número de pesos o dólares, etc.) sería igual al número de cuantos de energía.

El hecho de no comprar monedas caras es lo mismo a decir que no hay energía en las frecuencias más altas, aun cuando el número de estas monedas caras puede ser infinito.

Hasta ahora, el modelo no es exactamente igual a la física, si uno lo quiere hacer exactamente igual a la física, uno debería decir que el inversor compra monedas con una probabilidad que es proporcional al precio sobre una cosa que podemos llamar la temperatura, si uno da T un precio base y uno va a ir comprando las distintas monedas con esta probabilidad:

$$p \propto e^{-(\text{precio}/T)} \quad (35)$$

y en este modelo probabilístico esto es realmente idéntico a distribución de Planck de la energía.

Ahora explicaremos mejor la formula final (la ecuación 33). Para ellos tenemos que ver cuántas frecuencias tenemos en el campo electromagnético. Por ejemplo, consideremos el campo electromagnético en una caja cúbica. En cada una de las dimensiones el uno quiere tener un numero entero de longitudes de onda. Ver la Figura 4. La frecuencia de cada una sería un número entero dividido por el tamaño de la caja (estamos poniendo la velocidad de la luz = 1). Esto en cada una de las 3 dimensiones.

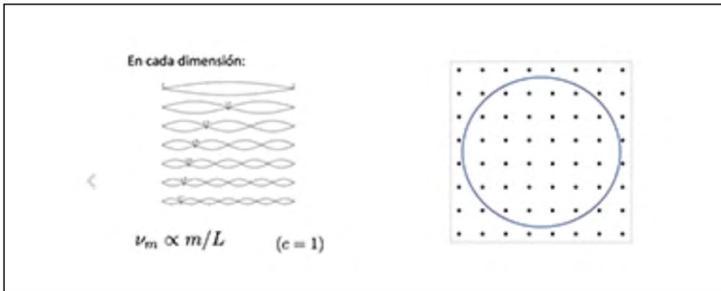


Figura 4. Número de frecuencias (elaboración J. Maldacena).

El número total que tenemos de frecuencias para una temperatura dada va como νL . Tenemos que contar todos los puntos que tenemos dentro de esa esfera que va como νL , ver la Figura 4. El volumen de esa región va como $(\nu L)^3$ y de ahí, es de donde sale ese factor 3 que teníamos antes y que vimos en la fórmula originalmente de

$$\frac{dE}{d\nu} \propto \nu^3 \frac{1}{e^{kT} - 1} \quad (36)$$

O sea que ésa es una derivación completa de la fórmula de Planck.

De nuevo enfatizamos el hecho que la radiación que tenemos es finita.

En la física clásica teníamos que cada modo tenía una energía kT , y a frecuencias muy altas contribuyen mucho y daría un resultado infinito.

En la física cuántica tenemos un resultado finito y calculable en términos de la constante de Planck.

Noten que a veces la gente dice que la física cuántica es sólo importante para los átomos y no es muy importante para la vida cotidiana. Pero si uno piensa en la radiación que sale de un objeto caliente, la física cuántica es muy importante.

Y la potencia total emitida por unidad de área de un cuerpo negro está dada por esta fórmula:

$$\frac{P}{A} = \sigma T^4 \quad (37)$$

Nos dice que es proporcional a la temperatura a la cuarta. Esto simplemente viene de sumar esta energía que se emite por unidad de frecuencias.

$$\frac{dE}{d\nu} \propto h\nu^3 \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad (38)$$

Si sumamos todas las frecuencias, tenemos un resultado que va como el número de frecuencias al cubo, y la energía que tenemos de cada una es proporcional a ν o sea que va básicamente como ν a la cuarta. Y el valor de ν que tenemos que poner es proporcional a la temperatura que es cuando la ocupación de los modos comienza a decrecer.

Entonces tenemos esta fórmula:

$$\frac{P}{A} = \sigma T^4 \quad (39)$$

La constante delante depende de las constantes de la física como la constante de Boltzmann, la constante de Planck, y la podemos calcular en base a primeros principios.

Ahora vamos a hablar de algunas aplicaciones de la fórmula de la radiación de Planck, alguna de ellas básicas.

Una de ellas es entender por qué la Tierra tiene la temperatura que tiene. Vamos a ver que la temperatura de la Tierra, bajo ciertas suposiciones, está determinada simplemente por constantes básicas de la física y por la temperatura del Sol. Ésta se basa única y exclusivamente en la fórmula, la fórmula de radiación de un cuerpo negro.

Vamos a asumir que el Sol está caliente, y se llega a un equilibrio térmico entre la radiación y los átomos del Sol, y está emitiendo como un cuerpo negro, a una cierta temperatura y vamos a llamarle la temperatura del Sol, T_{sol} .

Esta energía que el Sol emite se distribuye en forma esféricamente uniforme hasta que llega hacia la tierra. Esta radiación le transite energía a la tierra. Pero la tierra al calentarse también se transforma en un cuerpo caliente que emite radiación como un cuerpo negro.

Entonces si la temperatura de la Tierra fuera muy pequeña, emitiría muy poca radiación térmica y la energía que recibe del Sol sería más grande, entonces se empieza a calentar.

Si se calienta demasiado, emitiría más radiación hacia el espacio y se enfriaría. De esta manera llega a una temperatura de equilibrio, que llamamos T_{tierra} . Nos gustaría entender cuál es esa temperatura de equilibrio.

Primero notamos que el área de la Tierra no importa, porque si el área de la Tierra fuera más grande, emitiría más radiación, pero también capturaría más radiación del Sol.

¿Qué es lo importante? Toda la radiación que sale del sol se distribuye en un área de una esfera del radio de la órbita de la tierra. Por unidad de área de esa esfera la radiación que llega a la tierra es igual a la energía total que sale del sol dividida por el área la esfera del tamaño de la órbita de la tierra. Esto sería

$$\frac{E}{\text{área}} \propto \frac{T_{sol} R_{sol}^2}{R_{orbit}^2} \quad (40)$$

Esta va a ser la energía de la radiación por unidad de área que cae sobre la tierra. La constante que aparece acá se va a cancelar en este balance porque aparece tanto en la radiación que emite la Tierra como en la radiación que emite el Sol. Cuando hacemos este balance vamos a tener una ecuación de este tipo:

$$T_{\text{tierra}}^4 = 4f_{\text{abs}} T_{\text{sol}}^4 \frac{R_{\text{sol}}^2}{R_{\text{orbit}}^2} \quad (41)$$

El factor de 4 tiene que ver con el hecho que acá la sección eficaz de la Tierra va como πR^2 como un disco, mientras que la emisión de la Tierra va como una esfera con un área superficial de $4\pi R^2$ y de ahí viene el factor 4.

El factor f_{abs} tiene que ver con la cantidad de luz que absorbe la Tierra, o sea si la Tierra fuera exactamente un cuerpo negro, este factor sería igual a 1. No existe perfectamente un cuerpo negro, parte es reflejada por el agua, las nubes, etc. Este factor en promedio es un poco menor a 1.

$$T_{\text{tierra}} = T_{\text{sol}} \sqrt[4]{\frac{R_{\text{sol}} \sqrt{f_{\text{abs}}}}{2R_{\text{orbit}}}} \sim 250 \text{ K} \sim -19^\circ \quad (42)$$

Entonces en base a toda esta ecuación simplemente se despeja la temperatura de la Tierra y nos da que debería ser del orden de los 250 K sabiendo cuál es la temperatura del Sol. Como pregunta, ¿Cómo uno sabe la temperatura del Sol?

La calculamos con la fórmula del cuerpo negro, mirando el color del Sol y el espectro del Sol, podemos calcular la temperatura del Sol. No necesitamos ir ahí y poner un termómetro.

En base a este argumento simple podemos calcular cuál debería ser la temperatura teórica de la Tierra. ¿Qué asumimos en esta fórmula? La radiación que se emite, radiación infrarroja de la Tierra, ¿Por qué digo que es radiación infrarroja? Porque la temperatura de la Tierra es baja, comparada con las temperaturas necesarias para emitir luz visible que son miles de grados.

Entonces toda la radiación que sale va a ser radiación en longitudes de onda infrarrojas.

Esa fórmula que nos da una temperatura de -19° centígrados. Ésta es menor que la que tenemos en promedio. La diferencia se debe al efecto invernadero. Parte de esta radiación que es reflejada por la superficie de la tierra se refleja en la atmósfera nuevamente a la tierra. Entonces, la Tierra se calienta un poco más de lo que uno esperaría. Incluyendo el efecto invernadero la temperatura promedio es 14° .

Noten que se habla mucho del efecto invernadero en el contexto del cambio climático. Pero el efecto invernadero nos lleva de -19° a 14° . Es un efecto bastante grande e importante. Lo que usualmente se habla del calentamiento global, son efectos adicionales que modifican ese efecto invernadero inicial que tiene la Tierra y lo llevaría a subir, 1° , 2° , 6° , por encima de la temperatura actual. Lo cual es un problema.

Otra aplicación que vamos a discutir es el universo en sí mismo.

El Universo estaba muy caliente en el pasado. El universo se está expandiendo en este momento y se viene expandiendo desde hace mucho tiempo. El Universo ahora tiene 13 000 millones de años. Durante los primeros 300 000 años estaba tan caliente que estaba en un equilibrio térmico con la materia. En esa época el universo era muy uniforme y consistía en un gas caliente de iones de hidrógeno y electrones (un plasma).

Estaba la radiación en equilibrio térmico con la materia. Después de los 300 000 años, el Universo se vuelve transparente a la radiación, y la radiación siguió por su lado. La materia hizo sus cosas, formó los planetas, las estrellas, las galaxias, etc. Pero la radiación producida en este momento siguió viajando. Debido a la expansión del universo la radiación se enfrió, como unas mil veces. Ahora, a esa radiación la vemos como una radiación en frecuencias de microondas que llamamos la Radiación Cósmica de Fondo.

Fue detectada por primera vez en Nueva Jersey, medio de casualidad, por un par de investigadores que estaban tratando de entender cómo eran las propiedades del espectro electro-

magnético en esas frecuencias. Vieron que había una fuente de ruido que no lograban entender y resultó ser esta Radiación Cósmica de Fondo.

Esta radiación cósmica de fondo a veces se llama el cuerpo negro más perfecto que existe. El satélite COBE midió la radiación a distintas frecuencias. Figura 5.

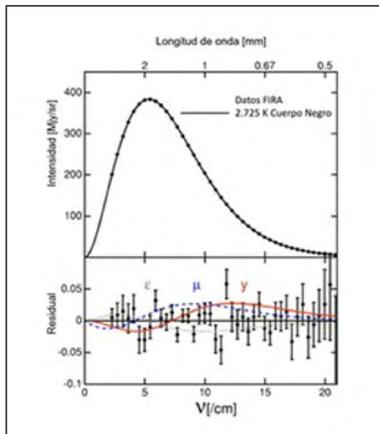


Figura 5. Medición de COBE de la radiación cósmica de fondo (NASA, 2015).

La medición coincide muy bien con la predicción teórica de un cuerpo negro a una cierta temperatura. La curva de abajo muestra la diferencia entre las mediciones experimentales y la curva de Planck. Las desviaciones son muy pequeñas ya que son del orden de 0.05 comparado con un valor que es del orden de 400 (cerca del pico). Esta desviación es consistente con el error experimental que está representado por las barras verticales en la Figura 5. Es una desviación mínima comparado con la curva teórica. Estas desviaciones se pueden deber a un error experimental, u otros procesos que pueden haber ocurrido en el Universo y que hayan cambiado la estructura del espectro. De hecho, se espera que haya pequeños cambios en la estructura térmica del espectro, pero son tan pequeñas que todavía no se han podido medir.

Y finalmente vamos a hablar de algo un poco más actual, que es cómo medir la temperatura de un cuerpo humano. Algo

que ahora, con el COVID, se ha estado haciendo mucho. Justamente los termómetros sin contacto miden la radiación infrarroja que sale de un paciente y usando la fórmula de Planck, se calcula la temperatura.

Vamos a terminar con ciertos problemas para el futuro, y voy a hablar sobre un sólo problema.

Vimos que al final del siglo XIX había un problema ya que la Física Clásica predecía una energía infinita para el campo de radiación a cualquier temperatura.

En la física cuántica tenemos un efecto un poco similar. El problema es que un oscilador armónico en realidad tiene una energía mínima que es

Cuando hablamos antes sobre la cuantización de Planck estamos hablando de la energía por encima de esta energía mínima.

$$E = \frac{1}{2} h\nu \quad (43)$$

Normalmente esto no es muy importante porque sólo medimos energía relativas al vacío. En la teoría cuántica ordinaria uno pensaría que el vacío tiene una cierta energía que se debe al movimiento cuántico de todos estos osciladores, debido a que un oscilador cuántico tiene una pequeña energía irreducible.

Entonces para efectos ordinarios esta energía no es importante. Pero sí es importante cuando uno considera la gravedad, porque esta energía contribuye a la expansión del universo.

Si uno trata de estimar esta energía ¿cuál sería la energía del campo electromagnético? Uno debería sumar estas energías para todos los osciladores. Deberíamos incluir todas las frecuencias posibles del campo electromagnético. Sabemos que hay frecuencias muy altas, como la de los rayos gamma (y aún todavía más altas observadas en los aceleradores de partículas). Sumando todas ellas la energía del vacío sería

$$E_{\text{vacío calculada}} \propto v_{\text{max}}^4 \gg E_{\text{vacío observada}} . \quad (44)$$

Donde, para obtener un resultado finito, hemos asumido que hay una frecuencia máxima posible. Esto es parecido a la “catástrofe ultravioleta”, nos daría infinito si considerásemos frecuencias arbitrariamente altas. Es natural asumir que hay una frecuencia máxima, como por ejemplo de la masa de Planck, de la cual hablaba Fernando. Pero esto nos da un valor muchísimo más grande del observado. El valor observado es el que se mide experimentalmente a través de la expansión del Universo.

Las mediciones recientes de la expansión del Universo nos dicen que hay una energía del vacío mismo, aún en el caso de ausencia de materia.

Y este es un misterio, el misterio de la Constante Cosmológica. Un problema quizás comparable a ese problema que había a finales del siglo XIX. ¡Quizás a alguno de ustedes se le va a ocurrir una manera de resolver este problema!

Conclusiones

- Vimos cómo la hipótesis de Planck explica las propiedades de la radiación de un cuerpo negro.
- Explicamos una analogía económica.
- Vimos algunas aplicaciones:
 - * Temperatura de la Tierra.
 - * Temperatura del cuerpo humano.
 - * Temperatura del Universo.

El efecto fotoeléctrico

Julián Félix

Planck publicó su revolucionaria solución al espectro de radiación del cuerpo negro en 1900, un 14 de diciembre, para mayor exactitud, aunque ya había publicado versiones previas en octubre del mismo año. En estas publicaciones estableció que la energía de intercambio entre las paredes del cuerpo negro y el campo de radiación electromagnética se efectúa de forma discreta, y no continua como debería suponerse usando los principios de la electrodinámica de Maxwell, que era ampliamente aceptada y ya había sido confirmada experimentalmente varias veces, especialmente en los experimentos de difracción, propagación, refracción e interferencia, y creación y detección de ondas electromagnéticas.

La energía de esa porción discreta de energía, propuesta por Planck, está dada por

$$E = h\nu \tag{45}$$

ν es la frecuencia de la radiación electromagnética y h es el parámetro de Planck; h es una constante de la naturaleza, tiene las unidades de acción, o de momento angular, y es uno de los descubrimientos más profundos de M. Planck.

La acción de un sistema físico, los físicos la definen como la integral en el tiempo del lagrangiano del sistema físico. El lagrangiano de un sistema físico es la energía cinética menos la energía potencial del sistema físico. Los procesos físicos, los cambios de los estados físicos del sistema, se realizan de tal forma que la acción es un extremal, ya sea máximo o mínimo; de todas las trayectorias o serie de configuraciones posibles, la evolución en el tiempo de los sistemas físicos se da en una particular, aquella donde la acción es mínima, éste es uno de los principios más profundos en la formulación de la física; por qué ocurre así, nadie lo sabe, simplemente funciona, es

decir, se obtienen predicciones que coinciden con los resultados observacionales o experimentales correspondientes. Las unidades de la acción son energía-tiempo, Joule segundo (Js), por ejemplo.

La propuesta de Planck

Planck no la generalizó a toda la radiación electromagnética, y en todas las circunstancias experimentales, sólo en el caso de intercambio de energía entre la materia y la radiación en equilibrio termodinámico, esto es, a una determinada temperatura fija; y en un inicio de su planteamiento sólo en una dirección: de los osciladores al campo de radiación, es decir, la emisión de radiación únicamente; pero después el planteamiento fue que, el intercambio de energía se lleva a cabo en ambos sentidos: del campo de radiación electromagnética a los osciladores y viceversa, todo por razones de simetría y simplicidad —en los procesos físicos hay absorción y emisión de radiación—; los mismos cuanta de energía emitidos por los osciladores (átomos), y que conforman el campo de radiación, son absorbidos por los mismos osciladores. El proceso de emisión-absorción llega a un estado de equilibrio termodinámico.

Planck imaginaba, e hipotetizaba, a los átomos como pequeños osciladores lineales que vibraban a una determinada frecuencia, les llamaba osciladores de Hertz, que podían intercambiar energía con el campo de radiación electromagnética sólo de forma discreta, no continua como en un oscilador mecánico que podemos construir con una masa y un resorte, y en equilibrio termodinámico con el campo de radiación, la frecuencia de este oscilador no cambia con el campo electromagnético externo. De esta forma, Planck pensaba a la hipótesis de cuantización como un mero artilugio, como un recurso matemático, sin existencia o contraparte física, para explicar el espectro de radiación de un cuerpo negro. Y a decir del mismo Planck, esta hipótesis la consideraba temporal mientras conseguía sustituirla por otra más acorde a los principios termodinámico-clásicos y a las ideas

de continuidad imperantes en esos tiempos. Sin embargo, todo esfuerzo resultó en vano; nunca pudo volver atrás.

A pesar de las precauciones y del tacto de Planck, esta propuesta significó un avance muy revolucionario en la concepción de la forma en que deviene la naturaleza, especialmente en la forma en que se lleva a cabo el intercambio de energía, o interacción, entre la materia y los campos de radiación electromagnética. Sólo conocía un problema que se podía resolver con su hipótesis de cuantización, el espectro de radiación del cuerpo negro. Pero después aparecieron otros, o fueron identificados otros. Einstein identificó nueve fenómenos distintos, por ejemplo, donde aplicó la hipótesis de los cuanta para explicarlos. Uno de ellos, el más celebrado, es el efecto fotoeléctrico.

No había razones, o datos, experimentales para hacer esta generalización en el tiempo en que Planck trabajaba en el problema del espectro de energía del cuerpo negro, o al menos los físicos no los habían identificado. Sin embargo, su artilugio resultó no tal, y la hipótesis de cuantización fue generalizada por otros físicos como A. Einstein, porque resultaba muy conveniente para explicar y describir otros fenómenos de la naturaleza, como el efecto fotoeléctrico en el caso de Einstein.

La generalización y fundamentación experimental de la teoría cuántica de Max Planck fue dada por A. Einstein y Niels Bohr, al aplicar la teoría cuántica de Planck para explicar otros fenómenos naturales y resultados experimentales, como el efecto fotoeléctrico y los espectros de emisión y absorción atómica, respectivamente. Estos trabajos no solo apoyaron, confirmaron, y fundamentaron la hipótesis de Planck, sino que la extendieron y además sentaron las bases para desarrollos posteriores, como la búsqueda o identificación de nuevos fenómenos que pudieran explicarse usando la hipótesis del quantum.

La idea del quantum fue, sin lugar a duda, la idea más importante formulada en la ciencia del siglo xx, en sus albores primeros, y se ha extendido hasta nuestros días. Trastocó para siempre, y consideramos que, para bien de la humanidad, toda la vida diaria de las sociedades, y todavía después de 120 años de haber sido formulada no se agotan las enormes posibilidades e

implicaciones de esta idea. La naturaleza deviene en todos los procesos físicos vía procesos cuánticos.

Como apoyo fundamental y extensión a la teoría cuántica de Max Planck se tiene la descripción del efecto fotoeléctrico por Albert Einstein. La propuesta de cuantización de Einstein tiene ya no una cualidad de artilugio, como la propuesta de cuantización de Planck, sino una cualidad de existencia, tal como deben de estar ocurriendo los procesos físicos; una existencia y confirmación experimental como la tienen las canicas, los planetas, los átomos, etc. y sistemas físicos análogos. Pero la localización y la posición de estos entes, los cuanta, resultarían muy diferentes a lo que podemos visualizar en las canicas, los planetas, las pelotas y objetos similares.

El efecto fotoeléctrico fue descubierto por H. Hertz e investigado experimentalmente a nivel cualitativo y cuantitativo, cuando lograba configurar y mantener el sistema experimental apropiado, por Phillippe Lenard en sus estudios de los rayos catódicos, y descrito formalmente —en base a la teoría del quantum— por Albert Einstein, y corroborado cualitativa y cuantitativamente por R. Millikan en todos los aspectos y predicciones realizados por A. Einstein.

Con estos estudios, el logro en el avance del conocimiento del mundo externo fue fenomenal. La teoría cuántica de Max Planck quedó confirmada, generalizada y firmemente establecida. A partir de estos logros, ya nadie dudó en lo correcto de la teoría, y en la validez de la propuesta del quantum a nivel experimental. La teoría cuántica de Max Planck es general y universalmente válida.

Lenard, Einstein, y Millikan recibieron el Premio Nobel en Física por sus contribuciones: Lenard, en 1905 por su trabajo de los rayos catódicos donde describe la generación de rayos catódicos por incidencia de luz o radiación electromagnética; Einstein, en 1921, por sus contribuciones a la física teórica en especial por su descripción del efecto fotoeléctrico; y Millikan, en 1923, por sus estudios experimentales y observacionales del efecto fotoeléctrico. Y por supuesto, Max Planck en 1918 por el descubrimiento del quantum de energía, aunque le fue otorga-

do hasta 1920. En sus respectivas disertaciones Nobel, cada uno cuenta su historia propia relacionada con el quantum, excepto Einstein que elige hablar de la Teoría Especial de la relatividad.

Con los trabajos de A. Einstein y N. Bohr, la revolución del conocimiento acerca de la radiación electromagnética se estableció, y la teoría cuántica de Max Planck quedó firmemente establecida.

M. Planck, en su disertación del Nobel de 1920, ofrece evidencias para validar experimentalmente su teoría cuántica entre las que se encuentra el efecto fotoeléctrico. Sus palabras escritas fueron las siguientes:

La producción de fotones por el impacto de electrones aparece como el proceso inverso a aquél donde ocurre la emisión de electrones por la irradiación de luz, —rayos Roentgen—, o rayos gammas y de nuevo aquí, el quanta de energía, determinado por el quantum de acción y por la frecuencia de vibración, juega un papel característico, como puede ser reconocido, ya en un tiempo temprano, del hecho muy notable que la velocidad de los electrones emitidos no es determinada por la intensidad de la radiación, si no que sólo del color de la luz incidente sobre la substancia. También del aspecto cuantitativo, las ecuaciones de Einstein con respecto al quantum de luz han sido probadas como verdaderas en todas sus formas, como lo estableció R. A. Millikan, en particular, por las medidas de la velocidad de escape de los electrones emitidos, mientras que la significancia del fotón para la iniciación de reacciones fotoquímicas fue descubierta por E. Warburg (Planck, 1920).

Ahora sabemos que la radiación en forma de fotones emitida por electrones desacelerados en la materia (radiación por frenado, o la locución en alemán *Bremsstrahlung*) no es el fenómeno inverso al efecto fotoeléctrico, donde un electrón es expulsado del metal por luz incidente con el fotón absorbido completamente por el átomo. La forma de producción de los fotones en el primer caso, por electrones desacelerados, no es la forma inversa a la expulsión de electrones por la incidencia de fotones, se le parece en el sentido que hay fotones y electrones involucrados en el proceso, pero no lo es, son fenómenos completamente distintos. La pro-

ducción de la radiación electromagnética observada se basa en este hecho observacional: toda carga eléctrica acelerada, ya sea negativa o positivamente, radia energía en forma de fotones. En la radiación por frenado los electrones están libres y con energía cinética muy alta, y cuando se produce radiación en forma de fotones por su frenado en la materia no quedan como parte de un átomo, que es el estado inicial en el efecto fotoeléctrico. Luego Planck no tenía la información completa. La información completa se obtiene por observación, experimentación y labor de pensamiento para sistematizar y encuadrar la información.

Quizá las primeras ideas de cuanta se deben al maestro de Planck en la Universidad de Berlín, Helmholtz. Lenard en su disertación Nobel habla del trabajo de Helmholtz que ofreció en memoria de Faraday.

Años antes, Helmholtz en su lección en memoria de Faraday había notado que el fenómeno de la electrólisis podría sugerir que la electricidad es dividida en piezas de tamaño constante, justo como la materia es dividida en átomos. Esta fue la indicación ya disponible concerniente a la estructura de la electricidad, la existencia de átomos eléctricos, quanta elementales de electricidad, como Helmholtz los llamó. (Recuerdo haberle oído usar esta expresión muchas veces en su lección demostrativa de la estancia de verano de 1885) (Helmholtz, 1881).

En las siguientes páginas relato cómo la explicación del efecto fotoeléctrico por Einstein y la corroboración experimental por Millikan contribuyeron a cimentar la teoría cuántica de Max Planck, y sentaron las bases para el estudio y la exploración de la universalidad del quantum en la naturaleza y en los procesos de devenir de la naturaleza.

El efecto fotoeléctrico

El efecto fotoeléctrico no debe confundirse con el efecto fotovoltaico. Aunque relacionados ambos efectos, no son iguales. Para producir uno u otro efecto se requiere la incidencia de fotones

sobre el material, ya sea metal o semiconductor. En el segundo caso los fotones son absorbidos por los átomos del material y se produce una diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos del material, este es el principio del funcionamiento de las celdas fotovoltaicas muy de moda en nuestros días a nivel doméstico e industrial. En el primer caso, los fotones son absorbidos y se produce la expulsión de electrones del material sin que se genere una diferencia de potencial eléctrico, éste es el principio del funcionamiento de los ojos electrónicos o tubos fotomultiplicadores o de los diodos fotomultiplicadores, también muy usados en la industria de detección de fotones hoy en día.

Los orígenes del fenómeno conocido como efecto fotoeléctrico son estos:

Heinrich Rudolf Hertz cuando investigaba experimentalmente las predicciones de la teoría electromagnética de Maxwell —la generación y propagación de ondas electromagnéticas— encontró fenómenos que no pudo explicar y dejó para investigación a su ayudante Philippe Lenard: un cuerpo electrificado se deselectrifica más fácilmente cuando sobre él incide luz ultravioleta, según lo anotó H. R. Hertz. O de otra manera: cuando sobre un electrodo incide luz ultravioleta la descarga eléctrica ocurre más rápido.

En 1887, H. R. Hertz trabajaba produciendo y recibiendo ondas electromagnéticas en su laboratorio, con herramienta y equipo muy incipientes, que normalmente era diseñado y construido por los mismos físicos, en este caso por Hertz, para probar la teoría electromagnética de Maxwell. Su receptor consistía en una antena tipo bobina con electrodos separados cierta distancia, micrométrica y ajustable, para producir una chispa eléctrica cuando se recibía una señal electromagnética producida por el generador de ondas electromagnéticas. El generador era simplemente un par de bobinas, tipo transformador, disparadas por la descarga de un capacitor. La chispa en el receptor se producía más fácilmente cuando sobre los electrodos Hertz incidía luz ultravioleta, es decir la chispa era más larga, o la distancia entre los electrodos era más grande; si introducía una lámina de vidrio entre la fuente de luz y los electrodos, la

chispa se acertaba, pero no sucedía así cuando introducía una lámina de cuarzo. Lo primero sucede porque el vidrio absorbe la radiación ultravioleta; y lo segundo, porque el cuarzo no absorbe la luz ultravioleta. Estos hallazgos Hertz los reportó como informe de investigación, con lo que se acreditó la confirmación experimental de la predicción, en la teoría electromagnética de Maxwell, de la existencia de las ondas electromagnéticas y el descubrimiento del efecto fotoeléctrico, (Hertz, 1887).

Lo paradójico de esta confirmación de H. Hertz —existencia de ondas electromagnéticas y la luz como una onda electromagnética— y de este hallazgo —desprendimiento de electrones del metal por acción de la luz ultravioleta— es que al confirmar que la radiación electromagnética es una onda también se topó con el hecho que la luz está compuesta de partículas, los fotones; o, dicho de otra forma, la radiación electromagnética está compuesta de entes que tienen propiedades de ondas y de partículas, pero no simultáneamente. En unas circunstancias experimentales tiene propiedades de partículas; y en otras, propiedades de ondas.

Hertz sugirió a su asistente P. Lenard estudiar este efecto, el efector fotoeléctrico, con todo detalle. Para ello, Lenard inventó el tubo al vacío para producir los rayos catódicos por descarga eléctrica, en 1893. Posteriormente lo modificó para incluir una ventana de cuarzo para introducir luz ultravioleta, y dos electrodos para aplicar voltajes negativos y frenar los electrones expulsados por la acción de la luz ultravioleta. La innovación de introducir dos electrodos en el tubo de descarga al vacío es de Lenard, para aplicar un potencial electrostático y estudiar los rayos catódicos salientes por incidencia de luz ultravioleta.

H. Hertz murió en 1894 sin completar los estudios del efecto fotoeléctrico.

El tubo de Lenard tuvo amplia aceptación por la comunidad científica de esa época en Europa. Usando el tubo de Lenard, Roentgen descubrió los rayos X en 1895, radiación de muy corta longitud de onda. En 1897, Thomson descubrió el electrón, usando un tubo al vacío similar al de Lenard. Ambos físicos recibieron el Premio Nobel de Física por estos descu-

brimientos. Los rayos catódicos son partículas, electrones, con carga eléctrica negativa. Los rayos X son radiación electromagnética de longitud de onda muy corta, del orden del tamaño de los átomos.

Lenard continuó los estudios de los rayos catódicos producidos por la incidencia de luz ultravioleta, en los años subsiguientes. En 1899 publicó sus resultados en el artículo “Producción de Rayos Catódicos por Luz Ultravioleta” (Lenard, 1900), demostró que rayos catódicos son producidos por la incidencia de luz ultravioleta.

En su disertación del Premio Nobel de Física 1905, Lenard apunta lo siguiente:

un descubrimiento hecho por Hertz cerca de 1887 completado después por Hallwachs, ha mostrado que por sola exposición a rayos de luz ultravioleta las placas de metal expelen electricidad negativa al aire. Este hecho notorio -en estos días normalmente referido como el efecto fotoeléctrico- inmediatamente capturó mi interés en ese tiempo y todavía lo hace hasta nuestros días. Experimentos realizados en colaboración con el astrónomo Wolf me mostraron primero que nada que la luz ultravioleta degrada y pulveriza los materiales.

Subsecuentes experimentos, sin embargo, me inclinaron a pensar que muy probablemente las cargas eléctricas no son transportadas por partículas metálicas fuera de la placa metálica. En el tiempo en que realizaba mis primeros experimentos sobre rayos catódicos, cuando hube descubierto que el aire enfrente de la ventana de aluminio se volvía conductor me formé la idea que los rayos catódicos podrían ser expulsados de la placa al aire por luz ultravioleta. En ese entonces y después realicé vanos intentos de detectar los posibles rayos en el vacío sobre pantallas fluorescentes. Solamente mi decisión -basada en los trabajos de Righi- para usar el electrómetro en vez de la pantalla fluorescente reveló la existencia de esos rayos. El aparato usado es ilustrado en la Figura 10 (de la disertación Nobel de Lenard, ver referencia [4]). U es la placa para ser irradiada y está en vacío completo; el sello de cuarzo en B admite luz ultravioleta. Los rayos catódicos empiezan en U y un haz angosto es separado por la perforación en la placa de enfrente E. Este haz choca con la pequeña placa α que colecta la carga negativa

traída por el haz e indica la existencia de radiación en el electrómetro. Trajimos un magneto o bobina indicada por la línea quebrada cerca del tubo en una forma que las cargas eléctricas golpearan sobre la plaquita β en lugar de la α indicando que los rayos invisibles son deflectados por el magneto y en la dirección apropiada para los rayos catódicos. Cuando realizamos cuantitativamente la observación, el experimento mostró que la deflexión es también del grado correcto, y que la misma razón se obtiene entre la masa y la carga de los quanta como en el caso de los rayos generados por tubos de descarga.

P. Lenard continúa en su disertación Nobel:

Inmediatamente fue establecido fuera de toda duda de esta forma que los rayos catódicos son producidos por luz ultravioleta y que su comportamiento ha llegado a ser muy bien conocido, que ya había detectado sobre la pantalla fluorescente, y que los había seguido y usado. Me referiré a esos aspectos más tarde. Lo siguiente debe ser notado concerniente a la generación actual.

Primeramente —un punto importante para experimentos puros— también ocurre en vacío completo donde los métodos usuales fallan. Un gas no necesita estar presente pero no interfiere con la generación de los rayos. Lo que está involucrado es la acción directa de la luz sobre la placa de metal. Las velocidades iniciales con las cuales los quanta abandonan la placa son tan pequeñas que una carga negativa de solamente unos voltios en la placa de enfrente es suficiente para rechazar los rayos incidentes completamente y evitar que llegue a la placa. Ellos entonces retornan a la placa irradiada de la misma manera como una piedra tirada hacia arriba regresa al suelo.

De aquí, por lo tanto, nosotros obtenemos rayos catódicos extremadamente lentos; más rápidos pueden ser producidos meramente cargando la plaquita de enfrente positivamente. La velocidad de los rayos puede ser controlada libremente por el nivel del voltaje de la plaquita de enfrente.

Segundamente, considerando el efecto de la luz ultravioleta en la placa, nosotros podemos imaginar que las ondas de luz hacen vibrar los átomos del interior de la placa de metal. Hemos mencionado que previamente el descubrimiento de

Zeeman ha mostrado que los átomos contienen electricidad negativa capaces de vibrar. Si la covibración del quantum negativo en el interior del átomo con las ondas de luz llega a ser muy violenta, el quantum escapa del átomo, y de esta forma de la placa; tenemos un rayo catódico.

La velocidad de escape hemos mencionada en muy pequeña. He encontrado que la velocidad es independiente de la intensidad de la luz ultravioleta (M), y entonces concluido que la energía al escapar no viene de la luz de ninguna manera, sino del interior del átomo en particular. La luz sólo tiene un efecto de iniciar la acción, como lo que ocurre en el martillo de un arma de fuego cargada. Encontré esta conclusión importante desde que de ésta aprendimos que no sólo los átomos de Radio -las propiedades de los cuales estamos apenas discerniendo en mayor detalle en estos días- contienen reservas de energía, pero también los átomos de los otros elementos; éstos también son capaces de emitir radiación y al hacerlo quizá se rompan completamente, como corresponde a la desintegración y degradación de las substancias en la luz ultravioleta. Este punto de vista ha sido corroborado en el Instituto Kiel por experimentos especiales que también mostraron que el efecto fotoeléctrico ocurre con velocidades iniciales sin variación aún a temperaturas del aire líquido.

Y sigue de la siguiente forma:

No podemos considerar la acción de la luz como restringida solamente al estado sólido de agregación. Las moléculas, o átomos de gases experimentan un efecto completamente análogo bajo la acción de la luz ultravioleta; es razonable asumir que los quanta escapan de ellos; el gas entonces llega a ser eléctricamente conductivo de una manera que discutiremos más adelante en gran detalle. Si el gas contiene oxígeno como el aire, Ozono se forma como un producto secundario.

Esta misma acción de la luz, llamada la producción de rayos catódicos, la vibración de los átomos y la expulsión de los quanta por esta acción está también relacionada en la fosforescencia y de que también en la fluorescencia, quizá, también en todos los efectos fotoquímicos. Sin olvidar que nosotros hemos detectado transformación de energías del interior de los átomos asociadas con el efecto fotoeléctrico, no deberíamos

sorprendernos en un futuro quizá encontremos fenómenos del mismo tipo actuando como fuentes de energía no introducidas desde afuera.

Debe ser mencionado también que la investigación desarrollada por Curie y Sagnac, y también aquella por Dom indica que, en común con luz ultravioleta, los rayos X también tienen el efecto de generar rayos catódicos. Esto es consistente con su habilidad de hacer los gases eléctricamente conductores e inducir efectos fosforescentes y fluorescentes.

Escasamente se había mostrado que la luz ultravioleta es apta para la producción de los rayos más lentos cuando la solución del problema de cómo los rayos más rápidos se generan fue encontrada. Los rayos emitidos por el Uranio y el Radio fueron ya conocidos; Becquerel, P. Curie y M. Curie estaban muy concentrados en continuar mucho más estos descubrimientos hechos por ellos mismos. Aplicando a estos nuevos rayos los métodos desarrollados como son descritos por los rayos catódicos de los tubos de descarga, y sorprendentemente los rayos catódicos de casi o enteramente la velocidad de la luz.

La explicación que Lenard ofrece a este fenómeno, en su disertación Nobel, en que la expulsión de los electrones, rayos catódicos, son expulsados por la energía del interior de los átomos y que la luz incidente no altera el fenómeno, sólo funciona como un disparador. Esta explicación no es correcta, en el sentido de que no coincide con la evidencia observacional y experimental, pero en base a la información que Lenard colectó, es justificable.

Valga mencionar que él diseñó y construyó los sistemas experimentales para estudiar el efecto fotoeléctrico. Era un hábil físico experimental. Sus instrumentos, herramientas de laboratorio, eran muy limitados, aun con ellos logró increíbles avances. Esta es una característica constante de los físicos de frontera y pioneros en alguna área de la ciencia.

Los trabajos de Hallwachs citados por Lenard consisten en los siguientes resultados: Hallwachs incidió luz ultravioleta a una placa de zinc muy pulida; conectó un electroscopio a la placa y observó. Si inicialmente la placa está descargada, la placa se cargaba positivamente; si inicialmente estaba cargada positivamente, la placa se volvía más cargada positivamente; si

inicialmente estaba cargada negativamente, se descargaba y se volvía positivamente cargada. De estas observaciones Hallwachs concluyó que cargas negativas eran expelidas de la placa de zinc por la incidencia de luz ultravioleta, en concordancia con la evidencia experimental.

Lenard demostró experimentalmente que en el efecto fotoeléctrico se producen rayos catódicos, hoy llamados también electrones.

En resumen, estos son los resultados experimentales conocidos por Lenard, del efecto fotoeléctrico, y que reporta:

- Se produce por incidencia de luz ultravioleta. Hay expulsión de electrones, rayos catódicos. Se conoce haciendo incidir luz ultravioleta sobre una placa metálica en una cámara de vacío.
- Hay una velocidad, o energía cinética, máxima de los electrones salientes. Esta se determina aplicando un voltaje inverso en la placa, o electrodo, opuesta para rechazar los electrones salientes.
- La velocidad de los electrones salientes no depende de la intensidad de la luz. La velocidad se determina aplicando una intensidad de luz y un voltaje de frenado total, e incrementando la intensidad de la luz.
- La velocidad de los electrones salientes depende de la frecuencia de la luz incidente. A mayor frecuencia de la luz, mayor es la velocidad de los electrones salientes.
- El número de electrones salientes, corriente eléctrica medida, depende de la intensidad de la luz. A mayor intensidad de la luz, mayor corriente eléctrica observada.

Esta información parecería muy limitada, cuando A. Einstein supo de ella, y empezó a pensar en el fenómeno de transformación y la emisión de la luz, pero no lo es. En ella se basó Einstein para crear su teoría del efecto fotoeléctrico. Fue la evidencia experimental que explicó, y que además predijo otras características del efecto fotoeléctrico, como veremos enseguida.

La explicación del efecto fotoeléctrico

Einstein trabajó en la explicación del efecto fotoeléctrico, propuso una visión revolucionaria de la luz, en el sentido que la propuesta contradecía a la aceptación más común que la luz está conformada por ondas del tipo electromagnético y no de tipo mecánico. La luz a nivel fundamental es una partícula, un quantum de energía, con energía $E=h\nu$. Donde h es la constante de Planck y ν es la frecuencia de la luz. Al interactuar la luz con el átomo, el sistema átomo absorbe completamente una cantidad de luz y como consecuencia hay un electrón saliente y un átomo ionizado. La imagen que tenemos de partícula funciona bien para explicar este proceso.

Einstein se basó en la misma tesis —en este caso hipótesis— que Planck había propuesto para explicar los datos experimentales del espectro de radiación térmica del cuerpo unos cinco años antes. Pero Einstein la propuso para la luz en general, aun en el proceso de propagación de la onda electromagnética; pero esta no es más que una hipótesis de Einstein; cómo es la radiación electromagnética cuando se propaga no lo sabemos hasta que la detectamos, aquí una especie de círculo vicioso.

Sobre el artículo de Lenard citado anteriormente, Einstein escribió a su pareja, posteriormente su esposa, Mileva Maric: “justo acabo de leer un artículo maravilloso escrito por Lenard sobre la generación de rayos catódicos producidos por luz ultravioleta. Bajo la influencia de esta hermosa pieza estoy lleno de tal felicidad y regocijo que debo absolutamente compartirla contigo” (Stachel, 2021).

Einstein no explica a su pareja el porqué de su regocijo y entusiasmo desbordados. Pero es posible aventurar que haya entendido de un solo vistazo la importancia de los resultados experimentales de Lenard, y la posible explicación de éstos usando la teoría de los cuanta de M. Planck, en el año 1905, pero usada de forma más amplia a como Planck la había propuesto.

En su artículo “Concerning an Heuristic Point of View Toward the Emission and Transformation of Light” (Considerando un punto de vista heurístico de la emisión y transfor-

mación de la luz) Einstein (1905) describe las propiedades y las características de la teoría ondulatoria de la luz; establece que esta teoría sirve muy bien para describir los fenómenos de interferencia, refracción, polarización, difracción, propagación, dispersión, etc.; pero que se llegan a contradicciones, o inconsistencias, cuando se le aplica para explicar fenómenos de emisión, absorción o transformación de la luz.

Y luego propone las ventajas de considerar a la luz como un quantum de energía. Einstein, en el mismo artículo escribe:

Me parece que las observaciones asociadas con la radiación del cuerpo negro, la fluorescencia, la producción de rayos catódicos por luz ultravioleta, y otros fenómenos relacionados con la emisión y transformación de la luz son más fácilmente entendibles si uno asume que la energía de la luz es discontinuamente distribuida en el espacio. En concordancia con la suposición para ser considerada aquí, la energía de un rayo de luz desparramándose hacia afuera desde un punto fuente es no distribuida sobre un espacio creciente, sino que consiste en un número finito de quanta de energía que están localizadas en puntos en el espacio, que se mueven sin dividirse, y que pueden solamente ser producidos y absorbidos como unidades completas.

Luego, Einstein ofrece pruebas y evidencias que lo llevaron a formular este tipo de hipótesis y que puede aplicar y usar en 9 fenómenos en apariencia distintos, pero conectados en su forma más fundamental, donde se incluye lo concerniente a la emisión de los rayos catódicos a través de la iluminación de los cuerpos sólidos y gaseosos.

Einstein considera los siguientes fenómenos, o problemas, para explicar usando la hipótesis de los cuanta:

1. El problema de la radiación del cuerpo negro.
2. La determinación de Planck de las constantes fundamentales.
3. La entropía de la radiación.
4. La forma asintótica para la entropía de la radiación monocromática a baja densidad.

5. La investigación teórica-molecular de la dependencia de la entropía de gases y soluciones diluidas en un volumen.
6. La interpretación de la expresión para la dependencia sobre el volumen de la entropía de la radiación monocromática en acuerdo con el principio de Boltzmann.
7. Lo concerniente a la regla de Stokes.
8. Lo concerniente a la emisión de rayos catódicos a través de la iluminación de cuerpos sólidos.
9. Lo concerniente a la ionización de gases por luz ultravioleta.

Einstein escribió al referirse a la luz, en su propuesta de explicación del efecto fotoeléctrico:

De acuerdo con la suposición para ser contemplada aquí, cuando la luz se está desparramando desde un punto, la energía no es distribuida continuamente sobre los espacios siempre incrementándose, sino que consiste de un número finito de quanta de energía que están localizados en los puntos del espacio, se mueven sin división, y pueden ser absorbidos o generados solamente como un todo.

Este punto de vista se cataloga como muy revolucionario, de acuerdo con los conocimientos que se tenían de la luz en la época, alrededor de 1904, y publicado en 1905. Es la primera propuesta que la luz tiene propiedades de onda y propiedades de partícula. Pero no ambas en el mismo sistema experimental, en las mismas circunstancias experimentales. Son mutuamente excluyentes, pero complementarias; y en la explicación, o formulación, aparecen conjuntadas. Por ejemplo, una onda electromagnética tiene un momento asociado, como lo tiene una partícula completamente localizada —como una canica—. Aunque Einstein no llegó hasta este punto.

El desarrollo de la explicación del efecto fotoeléctrico es como sigue:

En la parte lo concerniente a la emisión de rayos catódicos a través de la iluminación de cuerpos sólidos, sección 8, del artículo “Concerning an Heuristic Point of View Toward the

Emission and Transformation of Light”, Einstein establece que “la concepción usual que la energía de la luz se distribuye continuamente sobre el espacio a través del cual se propaga, encuentra serias dificultades cuando uno intenta explicar el fenómeno fotoeléctrico, como lo ha sido expuesto en el artículo pionero del Señor Lenard”. Y continúa en el mismo artículo:

De acuerdo con el concepto que la luz incidente consiste en quanta de energía de magnitud $h\nu$, sin embargo, podemos concebir que la eyección de electrones por la luz es de la siguiente forma: Los quanta de energía penetran la capa superficial del cuerpo, y su energía es transformada, al menos en parte en energía cinética de los electrones. La forma más simple de imaginar esto es que un quantum de luz deja su energía total en un electrón: podríamos asumir que esto es lo que ocurre. La posibilidad no debe excluirse, sin embargo, que los electrones pueden recibir su energía solamente en parte del quantum de luz.

Agrega:

Un electrón al que se le ha impartido energía cinética en el interior del cuerpo va a perder algo de su energía para cuando alcance la superficie. Más aún, podríamos asumir que en el inter de abandonar el cuerpo cada electrón debe hacer un trabajo W característico de la substancia. Los electrones eyectados que abandonan el cuerpo con la velocidad normal más grande serán aquéllos que estaban en la superficie. La energía cinética de tales electrones está dada por $h\nu - W$.

Y luego asegura:

Si el cuerpo está cargado a un potencial positivo V y está rodeado por conductores a potencial cero, y si V es suficientemente grande para prevenir pérdidas de electricidad por el cuerpo, se sigue que $Ve = h\nu - W$, donde e denota la carga eléctrica, o $VE = h\nu N - P'$; donde E es la carga de un gramo equivalente de un ion monovalente y P' es el potencial de esta cantidad de electricidad negativa para el cuerpo.

Si uno toma $E = 9.6 \times 10^3$, entonces $V \times 10^{-8}$ es el potencial en voltios que el cuerpo adquiere cuando se radia en el vacío.

Para ver ya sea que la cantidad derivada produce un orden de magnitud consistente con la experiencia, tomamos $P' = 0$, $\nu = 1.03 \times 10^{15}$ (correspondiendo con el límite del espectro solar hacia el ultravioleta) y $h/R = 4.866 \times 10^{-11}$. Obtenemos $V \times 10^7 = 4.3$ volts, un resultado que concuerda con en un orden de magnitud con el del Sr. Lenard.

Si la fórmula derivada es correcta, entonces V , cuando se representa en un sistema de coordenadas cartesianas como función de la frecuencia de la luz incidente, debe de ser una línea recta cuya pendiente es independiente de la naturaleza de la substancia que emite los electrones.

Tan lejos como puedo ver, no hay contradicción entre estas concepciones y las propiedades del fenómeno fotoeléctrico observado por el Sr. Lenard. Si cada quantum de energía de la luz incidente, independiente de cualquier otra cosa, deja su energía en los electrones, entonces la distribución de velocidades de los electrones eyectados será independiente de la intensidad de la luz incidente; por el contrario, el número de electrones que dejan el cuerpo será, si las otras condiciones se mantienen constantes, proporcional a la intensidad de la luz incidente.

Advertencias similares a aquéllas hechas a las desviaciones hipotéticas de la ley de Stokes pueden ser hechas con respecto a los linderos hipotéticos de la validez de la ley propuesta antes.

En lo anterior se ha asumido que la energía que al menos algo de los quanta de la luz incidente es dejada completamente en electrones individuales. Si uno no hace esta suposición obvia, uno obtiene entonces la última ecuación:

$$VE + P' \leq \left(\frac{h}{R}\right) \nu$$

Para la fluorescencia inducida por rayos catódicos, lo que es el proceso inverso a la línea antes discutida, nosotros obtenemos por consideraciones análogas

$$VE + P' \geq \left(\frac{h}{R}\right) \nu.$$

En el caso, en que la substancia investigada por el Sr. Lenard, PE es siempre significativamente más grande que $(h/R)\nu$, des-

de que la diferencia de potencial, que los rayos catódicos deben atravesar para producir luz visible, en algunos casos de cientos y en otros de miles de volts. Es por lo tanto sea asumido que la energía cinética de un electrón va a crear muchos quanta de energía luminosa.

Einstein ya no comenta más. No hay conclusiones generales. En la parte del efecto fotoeléctrico en sólidos, el artículo cierra con los comentarios anteriores.

Con la formulación anterior, Einstein logra explicar las evidencias experimentales obtenidas por Lenard del efector fotoeléctrico. La velocidad, o energía cinética, de los electrones eyectados por la incidencia de luz sobre metales es directamente dependiente de la frecuencia de la luz incidente, y es independiente de la intensidad de la luz. La corriente eléctrica, o número de electrones salientes, es directamente proporcional a la intensidad de la luz incidente, y no depende de la frecuencia de la luz incidente.

Además de las explicaciones anteriores, hay varias predicciones que se obtienen de la formulación anterior:

- La relación lineal entre la energía cinética de los electrones salientes y la frecuencia de la luz incidente. La pendiente de esta línea recta es justamente la constante de Planck; la ordenada en el origen, la función de trabajo. De los datos experimentales es fácil medir la constante de Planck. Lo novedoso de esta forma, y donde se empieza a introducir la universalidad del quantum de acción de Planck, es que h puede medirse no solo en procesos termodinámicos sino también en procesos electromagnéticos. De ahí su universalización.
- El potencial de trabajo es diferente para cada material diferente. Un valor es para el oro; otro, para el cesio; etc. El potencial de trabajo puede medirse midiendo la frecuencia umbral de la luz para producir el efecto fotoeléctrico en el material bajo estudio.
- No hay un tiempo de retardo entre incidencia de la luz y la salida del electrón. No hay un tiempo observable entre

la llegada de la luz al material y la salida del electrón del material. Sin embargo, debe de haberlo, y debe de ser del orden de magnitud que toman las interacciones electromagnéticas en llevarse a cabo. Aun en estos días no tenemos la tecnología para medir estos tiempos, la electrónica actual es muy lenta, pero podemos aspirar a crearla.

- Hay una energía, frecuencia mínima, a partir de la cual se da el efecto fotoeléctrico. Luz con frecuencia menor a esa frecuencia, llamada frecuencia umbral, no produce efecto fotoeléctrico sobre el mismo material.

La supuesta afirmación de Einstein sobre el momento lineal, o cantidad de movimiento, del quantum de energía electromagnética, o fotón, no aparece por ningún lado en el artículo de Einstein de 1905 que estoy describiendo:

$$pc = E = h\nu \quad (46)$$

E y ν son la energía y frecuencia de la onda electromagnética, respectivamente, p es la cantidad de movimiento asociado, y c es la velocidad propagación de la luz en el vacío. La h , como símbolo para referirse a la constante de Planck, Einstein en su artículo no lo usó, es introducción mía en este ensayo, en las traducciones literales de los párrafos del artículo de Einstein anteriores. La expresión $pc=E$, es un resultado clásico, es decir, deducido en la teoría electromagnética de Maxwell. La expresión $E=h\nu$ sí la escribió Einstein en su artículo de 1905, para referirse a la energía del quantum electromagnético, aunque con otra simbología. La expresión para el momento lineal del quantum electromagnético se obtiene igualando ambas expresiones.

La medición del efecto fotoeléctrico por Robert Millikan

En su disertación del Nobel "El electrón y el quantum de luz desde un punto de vista experimental" R. Millikan apuntó (1923):

“la más directa y no ambigua demostración de la existencia del electrón será probablemente admitido ser encontrado en un experimento que por conveniencia llamaré el experimento de la gota de aceite”. Y agrega: “En este dominio yo he estado persiguiendo desde 1904 encontrar algunas pruebas cruciales para la concepción de Thomson-Planck-Einstein de la energía radiante localizada”.

No parece obvio por qué introdujo a Thomson en la triada anterior. Quizá Thomson nunca habló de la energía radiada localizada como lo hizo Planck en 1900 y como lo usó Einstein en 1905. Quizá se confundió con Boltzmann, quien sí hablo de los cuanta. Adicionalmente, en 1904 Einstein era un desconocido, y el trabajo sobre los cuanta de luz lo publicó en 1905; Millikan habla de 1904 como el año cuando empezó sus pesquisas.

La propuesta de Millikan fue verificar experimentalmente los resultados de Lenard sobre el efecto fotoeléctrico, y la relación de Einstein para el efecto fotoeléctrico. En el inter tuvo que medir la carga eléctrica del electrón; y en el proceso, la constante de Planck. Dos logros muy significativos.

Millikan apunta:

Después de 10 años de probar y de cambios y aprendizajes y muchas veces errores, todos los esfuerzos fueron direccionados desde el inicio hacia la determinación experimental de la energía de emisión de los fotoelectrones, ahora como función de la temperatura, ahora como función de la longitud de onda, ahora del material (contacto relaciones e.m.f), este trabajo resultó, contrario a mis propias expectativas, en la primera demostración experimental en 1914 de la validez exacta, dentro de los límites experimentales estrechos, de la ecuación de Einstein, y la primera determinación de la constante de Planck por efecto fotoeléctrico. La precisión fue del 0.5% la que era la mejor de la época (1923).

También hubo confirmaciones a la validez de la ecuación de Einstein por otros autores. D. L. Webster; De Broglie y Ellis; Foote y Mohler; Wood; Davis y Goucher; McLennan, y otros. Con estos resultados la propuesta de Einstein quedó firmemente establecida. Millikan escribió en su disertación Nobel:

En vista de todos estos métodos y experimentos la validez general de las ecuaciones de Einstein es, yo pienso, ahora universalmente aceptada, y todo ello extiende la realidad de los quanta de luz de Einstein y debe ser considerada como experimentalmente establecida. Pero la concepción del quantum de luz localizado fuera del contexto en el que Einstein obtuvo su ecuación todavía debe ser considerada muy lejos de ser establecida. Ya sea que el mecanismo de interacción entre ondas de éter y electrones tiene su asiento en condiciones desconocidas y leyes existentes dentro del átomo, de esta forma debe ser visto para primariamente en la concepción esencial del corpusculo de Thomson-Planck-Einstein como la naturaleza de la energía radiante es absorbente frontera desconocida de la física moderna.

Después en su artículo “Sobre el desarrollo de nuestras opiniones concernientes a la naturaleza y constitución de la radiación” Einstein escribió (1909): “es por lo tanto mi opinión que el siguiente estado en el desarrollo de la física teórica nos traerá una teoría de la luz que pueda ser entendida como una clase de fusión de la teoría ondulatoria de la luz y la teoría de emisión de la luz”.

Cincuenta años después, escribió (French, A. P., 1979): “todos estos 50 años de esfuerzos sostenidos no me han acercado más a responder la pregunta ¿Qué son los quanta de Luz?”.

Nadie sabe por qué en unas circunstancias la radiación electromagnética tiene propiedades de ondas y en otras, excluyentes, tiene propiedades de partículas. Son las propiedades que observamos directamente cuando la radiación electromagnética interactúa con la materia.

Conclusiones

La teoría cuántica fue propuesta por M. Planck para explicar el espectro de radiación del cuerpo negro en estado de equilibrio termodinámico. Inicialmente hipotetizó que la radiación de emisión del cuerpo negro sería la única cuantizada, pero después la generalizó para incluir los procesos de emisión y absorción de la radiación en el cuerpo negro.

La hipótesis del quantum de Planck significó un avance substancial en el conocimiento de la naturaleza, especialmente en el devenir elemental de los procesos físicos. Es quizá la propuesta más importante en la física del siglo xx. Muchos desarrollos tecnológicos se basan en el conocimiento del devenir cuántico de los procesos de los sistemas físicos.

La teoría cuántica fue extendida y aplicada por Einstein para explicar el efecto fotoeléctrico. Con este logro, Einstein cimentó y ayudó a que la teoría cuántica fuera aceptada por todos los físicos como una propuesta válida para describir procesos físicos. A. Einstein identificó y explicó nueve procesos físicos diferentes, pero relacionados, entre los que se encuentra el efecto fotoeléctrico, todos ellos los publicó en el mismo artículo de investigación. El efecto fotoeléctrico es el más connotado y al que los físicos le pusieron más atención.

H. Hertz descubrió el efecto fotoeléctrico cuando investigaba experimentalmente la predicción de las ondas electromagnéticas dentro de la teoría electromagnética de Maxwell. Por acción de luz ultravioleta sobre metales, electrones son expulsados del metal.

Lenard estudió con detenimiento el efecto fotoeléctrico por encargo e iniciativa de H. Hertz, y logra caracterizar sus propiedades básicas. Usó herramental de laboratorio diseñado y construido por él. Esta es una característica y forma de operar de los físicos que trabajan en la frontera del conocimiento.

Einstein logró explicar el efecto fotoeléctrico, en todos los aspectos cualitativos y cuantitativos experimentalmente conocidos, usando una extensión y generalización de la hipótesis de Planck aplicada a la luz o a la radiación electromagnética en general. Ciertamente la propuesta de Einstein significó una revolución en la forma de concebir la radiación electromagnética y la forma en que interactúa con la materia. Y logró predecir algunas otras propiedades del efecto fotoeléctrico, como la existencia de la frecuencia umbral para iniciar el efecto fotoeléctrico, y la relación lineal entre la frecuencia de la luz incidente y la energía de los electrones expulsados. Con esto, logró la generalización buscada a la propuesta de Planck porque dio una

forma de medir la constante de acción de Planck en un sistema no termodinámico sino electromagnético.

Millikan y otros confirmaron experimentalmente las predicciones de la teoría del efecto fotoeléctrico propuesta por A. Einstein. También Millikan diseña y construye sus prototipos experimentales.

Con todas las implicaciones que esto puede tener, la propuesta de cuantización de la luz de Einstein queda firmemente establecida, y la teoría cuántica de Planck reafirmada y universalizada.

La teoría del quantum propuesta por Planck queda establecida con estos resultados experimentales fuera del ámbito de la termodinámica, y su universalización queda asegurada y demostrada experimentalmente.

El quantum de energía tiene validez experimental y universal. La historia de la humanidad ya no volvió a ser la misma.

Los artífices de este monumental e inmortal logro recibieron cada uno, en años distintos, el Premio Nobel de Física: P. Lenard, 1905; M. Planck, 1918 (lo recibió en 1920); A. Einstein, 1921, y R. Millikan, 1923.

La Teoría Atómica de Niels Bohr

Octavio Obregón

Yo no voy a presentar figuras, diagramas, ni algo por el estilo. El presente capítulo va a ser más el de un historiador de la física; léase como una plática de café, como una historia entre amigos; claro, tendrá una explicación especializada y técnica en aras de hacerla más familiar y cercana a ustedes; empero, albergo la esperanza de que en esta “plática de café” les comunique algunas ideas de la teoría atómica, de las formas de trabajo de los físicos, en especial, la personalidad y la influencia de Niels Bohr en la física del siglo xx, sin soslayar la actividad de otros físicos; también acerca de la teoría atómica de Niels Bohr, y de sus trabajos. Voy a dirigirme en este tenor.

Lo primero que deseo mostrar es el libro *Subtle Is the Lord: the Science and the Life of Albert Einstein* (Pais & Goldberg, 1984). Este libro es escrito por un magnífico físico, que después se dedicó a la historia de la física, se llamaba Abraham Pais; al ser más joven que Einstein, fue el encargado, cuando Einstein cumplió 70 años, de hacerle un homenaje: escribir una obra sobre su vida y ciencia. Este libro es considerado como la biografía última de A. Einstein.

En él se mencionan varios premios Nobel. Uno de los primeros fue, precisamente, el ya legendario Robert Millikan. Quizá el último mencionado, que fue invitado a contribuir en el libro para escribir la Introducción de la edición de 2005, recientemente ha recibido el Premio Nobel de Física, Roger Penrose. Así que este libro fue compuesto con la participación de varios Premios Nobel en Física, desde la introducción, hecha por Roger Penrose como ya dije, hasta varios capítulos. Penrose es conocido por sus teoremas matemáticos sobre agujeros negros, su entendimiento y exposición de la física de los agujeros negros; a este tema contribuyó de manera muy importante también Stephen Hawking; estos dos físicos escribieron un libro y un conjunto de artículos sobre los teoremas de agujeros negros.

Este capítulo no es sobre agujeros negros ni acerca de Einstein, es acerca de la mecánica cuántica, la teoría cuántica, y de cómo Niels Bohr aplicó la teoría cuántica para desarrollar su modelo atómico; aunque Einstein, a pesar de que tenía algunas objeciones sobre la mecánica cuántica, contribuyó decididamente a esta, ya después de Werner Heisenberg y de Erwin Schrödinger, y de Niels Bohr inclusive. Einstein contribuyó de manera importante como menciona Julián al aplicar el concepto de quantum de energía de Planck para explicar varios fenómenos físicos, en particular el efecto fotoeléctrico, por el cual Einstein recibió el Premio Nobel en Física —en especial por este trabajo del efecto fotoeléctrico y en general por sus contribuciones generales a la física teórica—.

En este libro se menciona que, en los últimos cuatro meses de 1859, se publicó un artículo de Urbain Le Verrier (astrónomo francés), que envió a la Academia de Ciencias francesa; en ese artículo Le Verrier mostraba que el perihelio de Mercurio —el punto donde el planeta está más cerca del Sol— cuando completa una elipse alrededor del Sol precede un poquito —se adelanta, con respecto al anterior—, es decir, va cambiando con el tiempo, el plano de la órbita del planeta va rotando lentamente con el tiempo, con respecto al fondo de las estrellas “fijas”. Es la famosa precesión del perihelio de Mercurio que permaneció como un misterio a la luz de la Teoría de la Gravitación Universal de Newton; esto es, en base a esta teoría este fenómeno no tiene explicación.

Este fenómeno natural fue explicado hasta 1915-1916 en base a la Teoría General de la Relatividad, por el mismo A. Einstein. Esta teoría es el marco conceptual para entender este fenómeno, que se descubre 55 años antes de su formulación; claro, es la observación que precede a la teoría, en la ciencia muchas veces sucede así, bueno en la mayoría de los casos. Esta es la forma en que se acrecienta la física y la ciencia en general.

Aquí hay otro hecho que se menciona en el libro citado y que es muy curioso: el 24 de noviembre del año que estamos hablando, apareció un libro que se publicó en Londres, que se llamó *Sobre el origen de las especies*, por Charles R. Darwin (1859). Darwin

establece que, por medio de una selección natural, por la manera de preservar las razas y las especies favoritas en la competencia por la vida, es cómo van evolucionando las especies en el mundo natural. Así termina el año 1859. Gran año para la ciencia. Pero falta un hecho más y es el que nos atañe en esta presentación.

En este año Gustav Kirchhoff, a la sazón profesor de la Universidad Heidelberg, Alemania, presentó un artículo sobre cómo es que las líneas del espectro solar se oscurecían cuando ponía una flama de sodio enfrente. Las líneas espectrales de emisión y de absorción de un elemento son iguales, es decir, están distribuidas en el espectro de la misma manera y están localizadas exactamente en las mismas posiciones.

Ustedes saben que todos los elementos tienen una huella, una huella dactilar como nosotros los humanos, que los hace distintivos uno de otros, son el espectro atómico de cada uno de ellos; se obtiene el espectro atómico al calentar de alguna manera cada elemento hasta que emite luz —por ejemplo, pasándole una corriente eléctrica—; y para observarlo se pasa la luz por un espectrómetro, también inventado por G. Kirchhoff en colaboración con su colega Robert Wilhelm Bunsen, que seguro todo estudiante de educación secundaria lo conoce; el espectro se ve como el arcoíris, un arreglo de diferentes colores en el mismo orden (del violeta al rojo), sólo que no continuo, sino en líneas bien definidas, líneas espectrales atómicas. Hay varias maneras de obtener el espectro atómico, como se ve en los libros de texto; el espectro atómico es como una serie de rayitas, una después de otra, a una frecuencia y a una energía determinadas, en una posición fija que corresponde a la frecuencia o a la longitud de onda. Cada uno de los elementos tiene un conjunto de rayitas diferentes, es un espectro diferente. Kirchhoff observó que cuando ponía un gas, obtenido al calentar un elemento con una flama en el mechero de Bunsen, entre la luz solar y el espectrómetro, el espectro cambiaba, se observaba el espectro de absorción del elemento. Por ejemplo, gas de cloro, de sodio, o de hidrógeno, u otro.

Esta observación lo llevó a una idea muy importante: la espectroscopia es clave para entender qué sucede en los áto-

mos. En cierto sentido lo que estoy diciendo es que la Mecánica Cuántica nació en 1859, y vamos a ver con algo de detalle por qué. Claro, estoy exagerando, esto no es así. Pero puede decirse que G. Kirchhoff es el abuelo de las ideas base de todas las ideas de la Mecánica Cuántica; sus observaciones, resultados experimentales y desarrollos tecnológicos son cruciales para los progresos científicos siguientes; todo desde la ciencia de la observación espectroscópica.

Sigamos con la historia, G. Kirchhoff se da cuenta que la energía emitida por el Sol, y la interferencia que se hacía, dividido entre el coeficiente de absorción —se llama así porque representa qué tanto absorbe el material en el camino al anteponerle la flama— es proporcional a una función, la intensidad de la energía radiada, que solo depende de la frecuencia y de la temperatura y no del material del que está hecha la fuente de luz, en este caso el sol.

Recordemos, la frecuencia es un parámetro importante en el estudio espectroscópico; si ustedes ven la luz, el rojo tiene una frecuencia, el azul tiene otra frecuencia, el verde tiene otra frecuencia; hay diferentes frecuencias, una para cada color; si observan el espectro de una estrella, o material incandescente cualquiera, la temperatura a la cual lo tengan juega un papel importante, y el espectro observado depende de esta temperatura. Hay una relación directa entre color-frecuencia, que es un parámetro continuo, y temperatura, que también es un parámetro continuo.

Un resultado importante es que la función de la intensidad de la radiación depende de la frecuencia de la radiación emitida y la temperatura a la que está la muestra o el material que emite radiación. En el libro referido está toda la formulación matemática desarrollada por Kirchhoff sobre este fenómeno de la radiación emitida por un cuerpo incandescente a una temperatura determinada. Es una maravilla. Es un ejemplo de lo que podemos inferir de lo que ocurre en el interior de un cuerpo mediante la observación directa de un par de variables asociadas con el devenir del cuerpo.

La obra de Pais, quien fue una gran autoridad en física, es sobre la vida de Einstein, con quien colaboró por cerca de 10

años. Abraham Pais falleció en el año 2000, y, como establecí, la introducción a esta obra en la edición de 2005 está escrita por Roger Penrose, también un ejemplo de físico connotado.

Entonces esa idea, que se puede tener una función de la frecuencia y temperatura, para representar algo que es como la energía, o densidad de energía radiada, dividida entre el coeficiente de absorción del material, resultó muy fructífera. Cuando ese coeficiente de absorción es uno, logramos la expresión para el caso de un cuerpo negro —la absorción es completa y también la emisión en equilibrio térmico—; no importan para esta explicación las fórmulas, si alguien es físico, las puede consultar en la obra referida. Dividida entre el coeficiente de absorción, el término es equivalente a una intensidad de la radiación emitida; insisto, que depende solo de la frecuencia de la radiación y de la temperatura a la que está el material estudiado. Esto es muy importante y revolucionario, una pieza maestra de la observación y la formulación matemática científica de un fenómeno natural.

Cuando ese coeficiente de absorción se escala de cierta manera, cuando es uno, se dice que el objeto es un cuerpo negro, esta es la definición de cuerpo negro. Un cuerpo negro es un sistema físico que absorbe toda la radiación y radia al mismo ritmo al que la recibe, cuando está en equilibrio termodinámico. Todas las estrellas tienen esta funcionalidad, y son como un cuerpo negro bastante bueno, bastante adecuado, en los términos que hemos descrito.

Esta idea de que la intensidad depende de la frecuencia y la temperatura se concatena, lleva después a la ley de Stefan-Boltzmann (en honor de los físicos austriacos Jožef Stefan y Ludwig Boltzmann). Una temperatura a la cuarta se encuentra que es la forma más concreta de cómo debe ser esa intensidad. Esta es una relación empírica, funciona, pero nadie tenía argumentos para explicar por qué funciona.

Finalmente, se ve que ese es un pedazo de la función total, ya cuando se estudia bien, se ve que ése es un pedazo de la curva de la radiación de emisión del cuerpo negro, y se puede dibujar esa curva para diferentes temperaturas, porque se hace una gráfica de intensidad como función de la frecuencia, se llega

a la curva, o se puede graficar en tres dimensiones —intensidad de la radiación emitida como función de la frecuencia a diferentes temperaturas—; se llega a que esa intensidad se ve más bien como la curva del famoso cuerpo negro que está en los libros de texto. Los datos experimentales son el basamento para esta formulación.

Es una curva que se puede ver de la siguiente manera: en plano coordenado con la densidad de energía en el eje y , y la frecuencia en el eje x , la curva de datos de densidad de energía como función de la frecuencia, a una determinada temperatura, sube rápidamente hasta un máximo, a una frecuencia determinada, luego baja menos rápidamente hasta el infinito donde el eje x es la asíntota de esta curva; a otra temperatura mayor, la curva tiene la misma forma pero los valores de la densidad de energía siempre son mayores que en la primera curva, a las mismas frecuencias, y el máximo se alcanza a una frecuencia mayor; y la curva se repite con estas características a temperaturas mayores. Esa curva de cuerpo negro necesitaba un ajuste. Uno veía experimentalmente cómo estaba, qué pasaba y cómo. Se veía que podía escalar de alguna manera. No es una constante multiplicativa, pero de alguna manera está formulada en términos de una constante que había que meter ahí para entender todos esos comportamientos. De esta manera se llega a la explicación de la distribución de la radiación del cuerpo negro hecha por Planck. La función propuesta concuerda increíblemente bien con la distribución de los datos experimentales. Involucra una de las propuestas más revolucionarias en la física de todos los tiempos, la propuesta del quantum de acción de Planck.

Planck, hombre extraordinario, quien es de los 3, 4, o 5 físicos que Einstein respetaba enormemente, y quien encuentra la explicación de la distribución de la radiación del cuerpo negro, al introducir la revolucionaria Hipótesis del quantum de energía. Planck llevó a Einstein a Múnich a trabajar con él. Según Einstein, los físicos de Múnich pensaban que podía “poner más huevos”, ya había puesto el de la Teoría Especial de la Relatividad, el del efecto fotoeléctrico y otros. Y sí logró poner otros huevos grandes: la Teoría General de la Relatividad

y algunas contribuciones a la Mecánica Cuántica, incluyendo la formulación, o propuesta, de la producción coherente de luz el rayo láser.

En la radiación de cuerpo negro, es necesario introducir una constante, la constante que ahora llamamos Constante de Planck. Esa constante jugó un papel extraordinariamente relevante, la energía del quantum de energía es igual a la constante de Planck multiplicada por la frecuencia de la radiación. Es una constante de acción; tiene unidades de acción, o unidades de momento angular, Joule segundo (Js).

Así que esa constante también nos escala la relación entre frecuencias y energías. Este es un gran logro de Planck, quien plantea por primera vez la existencia del quantum de energía para explicar el espectro de emisión de radiación del cuerpo negro, o el intercambio de energía cuantizada entre las paredes del cuerpo negro y el campo de radiación electromagnética en equilibrio térmico. Necesitamos ahondar de alguna manera en este concepto y planteamiento de Planck; esto quiere decir que no puede haber, por ejemplo, 1.4 $h\nu$ (fracciones de energía del quantum) simplemente enteros puede haber para la energía del quantum; de esta forma, en la propuesta de Planck se escala de cierta manera las energías de los cuanta de la naturaleza.

Planck es una figura extraordinaria en el desarrollo de esta historia del quantum de energía. Desde luego, Einstein es otra figura extraordinaria en la física cuántica, el hombre del efecto fotoeléctrico quien también es extraordinario, de otras muchas personas relacionadas, y hechos observacionales; Niels Bohr es el hombre del átomo cuantizado, también extraordinario, de quien me referiré con más profundidad en los siguientes párrafos.

Tenemos, entonces, la historia de la distribución de la radiación del cuerpo negro en equilibrio termodinámico. Empezamos otra historia que es de los átomos constituyentes de toda la materia con la que podemos interactuar en la vida de todos los días.

La concepción e idea de átomos son planteamientos, y discusiones enormes, que tienen larga historia en la física y la filo-

sofía. Qué si existe el pedazo más pequeño de la materia y cómo lo podemos ver y analizar. El atomismo es toda una historia, física y filosófica, muy compleja en la física que data de muchos siglos.

Podemos decir que entendemos, más o menos, que las cosas del mundo diario que podemos tocar y experimentar son neutras eléctricamente en promedio. Estos pedazos de materia —los átomos— están compuestos de electrones, ya descubiertos por Joseph John Thomson, con carga eléctrica negativa y para que sean neutros los átomos tiene que haber, por ahí dentro del átomos, algunas cosas constitutivas, positivas eléctricamente.

El mismo Thomson propone el primer modelo atómico con esta información, se le llama el Modelo atómico de Thomson o de pudín con pasas, porque recuerda a este pastel de molde, al menos en la conformación de las pasas dentro del pastel de molde. Thomson formula que todas las partículas positivas y negativas eléctricamente están distribuidas dentro del átomo de alguna manera como ustedes ponen pasas en el pudín y el chocolate, de esa manera estarían distribuidas las cargas eléctricas en el átomo de acuerdo con este modelo.

Este modelo de átomo, de la distribución de las cargas eléctricas negativas y cargas eléctricas positivas que tenían que compensar para resultar en un átomo eléctricamente neutro es un avance significativo en la historia de la física y en la historia de la filosofía, pero no duró mucho. El gran Ernest Rutherford lo puso a prueba experimental, y encontró resultados realmente asombrosos. Las predicciones basadas en el átomo de Thomson no concuerdan con las evidencias experimentales, por lo tanto, debería de ser incorrecto. En esta historia hay otros nombres muy importantes, que en el mismo libro antes mencionado se aducen. Están invitados a leerlo para descubrir quiénes son.

Los nombres son muy importantes, sin embargo, no se mencionan nunca en los libros de historia estándar de la física, tampoco en los libros de texto. De esas personas, varias de ellas configuraron otros modelos basados en la información conseguida por Thomson, porque no estaban de acuerdo con Thomson, porque se daban cuenta de algunas deficiencias del mode-

lo, por ejemplo, la estabilidad de la distribución de las cargas eléctricas dentro del pastel de molde. Con su información, con la que desacredita el modelo de Thomson, el gran Rutherford propone su modelo de átomo, que es como un sistema solar con el núcleo en el lugar del sol y los electrones en el lugar de los planetas. Aunque tampoco este modelo está exento de inconsistencias, como veremos luego. Pero es más avanzado y completo que el modelo propuesto por J. J. Thomson.

Es muy interesante que Niels Bohr intenta hacer una estancia de investigación con Thomson, y no se entiende con él; entonces se va a continuar su estancia con Rutherford; ahí aprende la información experimental recabada y perfecciona el modelo atómico de Rutherford.

Y bueno, pues le fue mejor, porque Rutherford estaba en ese momento caminando hacia la dirección en la cual se encuentra la mejor información experimental acerca del átomo. Lo que hace Rutherford, es el “jueguito”, un juego maravilloso, con esta expresión para nada estoy diciendo que es un juego despreciable, ni mucho menos implicándolo. Todo lo contrario, es una maravilla de la metodología científica y ejemplo de un trabajo experimental asiduo. Inventa la forma de estudiar los átomos lanzando partículas alfas sobre los átomos y observado cómo interactúan con los átomos, observado las partículas alfas en el estado final, y midiendo cómo se distribuyen angularmente en el estado final.

A Rutherford se le ocurre disparar partículas alfa sobre algún material, que en este caso eran hojas muy delgadas de oro. Dispara sus partículas alfa, que son partículas eléctricamente positivas. De lo que se da cuenta, cuando dispara las partículas alfa, es que hay ciertas regiones del material donde hay algo concentrado y eléctricamente positivo. Las partículas alfa al ir a través del oro, al atravesar, pero, de cualquier manera, siendo partículas eléctricamente positivas, por la forma en que se dispersan, se infiere que hay algo positivo en algún lado que depende de cómo las lances: si las lanza muy lejos de la región eléctricamente positiva se desvían muy poquito, hacen una vuelta muy suave; si las lanza o dispara muy cerca casi se regresan;

y si las lanza frontalmente, se regresan como si rebotaran con algo sólido. Esto a lo único que puede llevar es a la conclusión de que hay un núcleo masivo eléctricamente positivo, y las cargas eléctricamente negativas (los electrones) están lejos de este núcleo y no tienen gran injerencia en este proceso.

Eso lleva a la conclusión que hay algo muy importante de carga positiva, porque las partículas positivas se repelen entre ellas, es decir esas partículas alfa regresan y salen disparadas. Decía que ese jueguito es un juego maravilloso y es en algún sentido el abuelo o tatarabuelo de la técnica que aplican los físicos de partículas y altas energías en la mayoría de los experimentos alrededor del mundo, especialmente cuando estudian los constituyentes de la materia. A esta técnica se le conoce como técnica de blanco fijo.

Los físicos disparan partículas, u otro material, después de acelerarlas hasta casi la velocidad de la luz, a veces también fotones, o lo que consideren más apropiado, de acuerdo con lo que vayan a estudiar, o en el peor de los casos lo que puedan, y observan el estado final de la interacción —por ejemplo, disparan protones contra hidrógeno líquido y observan el estado final—; con esa información infieren lo que ocurrió, o qué interacción hubo entre partícula y partícula al momento del choque. A la par del desarrollo de los aceleradores, fuentes de partículas, los físicos tienen que desarrollar detectores de partículas o de radiación en general.

Por cierto, el detector llamado la cámara de burbujas, es una de las primeras técnicas para la detección de partículas elementales, aunque ya es obsoleta. Cuando una partícula cargada se dispara contra un blanco se producen otras partículas en el estado final; para detectar estas partículas se usaban las cámaras de burbujas; las cámaras de burbujas funcionan a base de un líquido en punto de equilibrio termodinámico inestable, por ejemplo, hidrógeno; no sé exactamente qué usan ahora, pero supongo que siguen usando hidrógeno. Cuando pasa la partícula cargada eléctricamente por la cámara va dejando trazas en el camino desde que entra hasta que sale de la cámara de burbujas; se le llama así porque efectivamente se hacen como burbujitas

a lo largo de la trayectoria de la partícula, que no son otra cosa que puntos donde el hidrógeno hierve, cuando se ioniza se le deposita una pequeña cantidad de energía por el paso de la partícula. De esta forma, las trayectorias de las partículas pueden ser fotografiadas; las partículas pueden identificarse, se les puede medir la carga eléctrica, medir la cantidad de movimiento y energía, determinar puntos de decaimiento, identificar partículas madre y partículas hijas, etc. Por ejemplo, podemos detectar y estudiar las partículas alfa, si se desviaron fuertemente, si se desviaron poco, si se absorbieron, etc.

En la historia de la física se cuenta que el físico Donald Glasser, de nacionalidad estadounidense, quien inventó esta técnica, estaba tomando cerveza cuando se percató de lo que ya sabemos que ocurre cuando echamos sal en un vaso con cerveza, se forman cadenas de burbujas a partir de los granitos de sal, se forman trayectorias dibujadas por burbujas; y de ahí se le ocurrió hacer estas cámaras de burbujas para visualizar la trayectoria de partículas elementales; pero claro, las cámaras de burbujas no funcionan con cerveza. La cerveza mejor la bebemos, podemos hacer cámaras de burbujas a base de hidrógeno y a base de otros líquidos.

Entonces hay un inicio con Rutherford de las técnicas para estudiar las partículas elementales, de cómo es posible averiguar la estructura del material sobre lo que estoy disparando partículas alfa; aquí, en particular, era muy importante darse cuenta de que había centros eléctricamente negativos y centros eléctricamente positivos que estaban en algunos lugares muy concentrados y muy bien localizados. Los electrones y los protones. Rutherford descubrió de esa forma el protón o núcleo atómico más simple.

Rutherford descubrió el núcleo atómico, región del espacio central del átomo muy concentrado; contiene más del 99.90% de la masa del átomo en un espacio, volumen, una mil billonésima (10^{-15}) de veces más pequeño que el átomo de hidrógeno. También descubrió que había electrones alrededor del núcleo. Hay dos o tres resultados físicos relevantes más, pero el primero es su modelo de átomo que es como un sistema solar,

es decir, en el centro donde está el Sol ponemos la parte positiva, el núcleo, y tenemos electrones dando vueltas en circuitos, digamos, alrededor del Sol; el más sencillo de todos los átomos es el de hidrógeno, un protón —partícula eléctricamente positiva— en el centro, y el electrón que le está dando vueltas; no necesito dibujarlo, simplemente es el núcleo como una esfera en el centro, y algo, los electrones, que le dan vueltas en circuitos. La primera idea es análoga y aproximada, porque alrededor del Sol los planetas no describen circuitos alrededor de este, pero casi, describen elipses de muy poca excentricidad que se alejan de la circunferencia.

Más o menos esa es la idea central en el modelo de Rutherford. Pero ¿por qué esa es la idea básica? Pues esa es la que se enseña en las escuelas elementales del modelo de Rutherford y a partir de donde se construye el modelo del átomo de Bohr.

La idea de que había un sistema atómico de ese estilo ya con anterioridad a Rutherford siempre está presente y hay otros nombres asociados a este modelo. Fue Rutherford mismo quien primeramente propuso uno de esos modelos, pero había puesto la idea más importante a partir de observaciones hechas por él mismo. La hipótesis de por qué esas partículas, esos electrones, se mantienen dando vueltas alrededor del núcleo quedó como un misterio a resolver en el modelo de Rutherford; ya sabemos que no dan vueltas exactamente, pero dando vueltas en una cierta trayectoria, vamos a decir, circular alrededor del núcleo. Y lo que debería de pasar en esta circunstancia, lo sabemos de la electrodinámica; se sabía de la electrodinámica que toda partícula cargada radia energía —en forma de ondas electromagnéticas— si está acelerada; una partícula en trayectoria circular está acelerada, la velocidad es una cantidad vectorial, el módulo no cambia, pero la dirección sí cambia constantemente. Si ustedes sujetan una partícula cargada eléctricamente y la mueven a velocidad constante no radia, pero si la hacen que describa una trayectoria curva, es decir, si la aceleran, radia; toda partícula cargada eléctricamente y acelerada emite radiación electromagnética; toda partícula cargada eléctricamente y acelerada debe de radiar. Es una conclusión basada en una evidencia experimental.

Y si radia energía pierde energía, y si pierde energía no se puede mantener en un circulito dando vueltas alrededor del núcleo, eventualmente colapsaría, lo que no observamos en el mundo diario, la materia es estable, y ha estado así por muchos miles de años. Pero en la propuesta de Rutherford de por qué ahí están manteniendo la misma trayectoria los electrones es un misterio. El modelo de no se veía muy aceptable a la luz del escrutinio riguroso y había que explicarlo.

A Bohr, quien estaba en el grupo de Rutherford, se le ocurre hacer la propuesta siguiente para solventar las dificultades en el modelo:

1. Las trayectorias de los electrones están cuantizadas y son estables, no radian energía los electrones en esos estados. No son como el caso del Sol y la Tierra; es como si nada más existieran 5 o 6 posibles trayectorias, o estados, para los planetas cada una de cierto radio, a partir del Sol, a partir del núcleo, no hay radios intermedios.
2. Esa es ya una de las propuestas de cuantizar cantidades, es decir estas trayectorias están cuantizadas; estas partículas cargadas, los electrones, se van a mover y pueden salvarse de que los electrones tengan que decaer y tenga que irse hacia el núcleo.
3. La energía de los niveles energéticos núcleo-átomo está cuantizada. Si ustedes le inyectan alguna energía al átomo, insisto estos niveles de energías están cuantizados, entonces el electrón se va al siguiente nivel, no a un nivel intermedio, a un nivel único superior de mayor energía.

Este es básicamente el modelo atómico de Niels Bohr, también llamado el átomo de Bohr. El átomo de hidrógeno es el más sencillo de los ejemplos; pensemos que puede subir de nivel de energía al absorber fotones de energía apropiada, y luego también puede bajar a un nivel inferior de energía al emitir un fotón. El átomo de Bohr absorbe y emite energía en forma de fotones y sube o baja de nivel de energía. Emite luz con una energía dada exactamente por $h\nu$, con ν la frecuencia de la luz

que sale, y h la constante de Planck. Y eso tiene que ver exactamente con la energía que hay entre el primer nivel y el segundo nivel, o con estados o niveles contiguos de energía, o separados.

Pero ¿qué es lo que nos planeta Niels Bohr en su modelo atómico?

En parte, insisto, él estaba en el lugar donde se dieron cuenta en base a resultados experimentales, liderados por E. Rutherford, que había un centro positivo cargado, en algún lado y que en conclusión el modelo del pudín de Thomson no era el adecuado y había que hacer algo más para explicar los resultados experimentales.

Pero había algo más, y había que explicar de una manera muy fenomenológica, se conocían de forma empírica, las famosas series básicas de Johann Jakob Balmer y otras del ultravioleta al infrarrojo. Pero lo que extraemos de las series de Balmer es que, si ustedes tienen la frecuencia de la luz, esa frecuencia es proporcional a un parámetro constante por la siguiente expresión:

$$\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \tag{47}$$

Con n y m números naturales, con los que se reproduce la serie de líneas al fijar n —una n para cada serie espectral— y variando m, empezando con $m = n + 1$. Son las n y las m, ya viéndolo desde el átomo de Bohr, las trayectorias y estados energéticos del sistema núcleo-electrón; y efectivamente, la frecuencia en el átomo de hidrógeno de la luz emitida o absorbida por el sistema núcleo-electrón está dada de esa manera. Es una descripción matemática, fenomenológica, de evidencias observacionales en términos de la teoría cuántica de M. Planck.

Y esa es la profunda idea de Bohr. Y en lo que yo quiero insistir es que había un abuelo, que era Kirchhoff; había unos tíos que eran J. J. Thomson y otros; y había un padrino, E. Rutherford y otros físicos. Eso no le resta para nada a la genialidad de Bohr; o sea, con todos esos elementos nosotros no hubiéramos hecho nada equiparable a lo que hizo Bohr; Bohr sí lo construyó. O quizá hubiéramos hecho algún modelo mucho mejor. Ya

estamos en el terreno de los hubiera, y el mundo de los hubiera está fuera de la inspección objetiva y predictiva, está en el terreno de la esperanza. No lo sabremos nunca. O en palabras que a veces se le ponen en boca de Niels Bohr irónicamente: “es difícil predecir, especialmente predecir el futuro”.

Entonces esas son las propuestas e ideas que fueron caminando hacia el modelo de Bohr, donde las energías de los estados del electrón-núcleo y los radios de las órbitas de los electrones están cuantizadas. Ahora, con respecto al modelo, desde luego, hoy sabemos que está equivocado y no es completo, por eso se le llama modelo; no quiere decir que no era una maravilla, Einstein le llamó un “milagro” para manifestar lo bien encaminado y profundo que era para describir el átomo.

La primera corrección que se hace al modelo es por parte de físicos muy connotados como Arnold Sommerfeld. Valga esta vivencia personal: yo estuve en Alemania, durante mis estudios doctorales, donde el profesor con el que tomé clases duró solo tres años en el puesto a partir de que yo llegué, pues se retiró; lo sustituyó uno de sus alumnos. El primer profesor había sido asistente de Arnold Sommerfeld. De los viejos profesores alemanes más famosos están Wolfgang Pauli, Werner Heisenberg, y otros que también fueron asistentes de A. Sommerfeld. Antes de Pauli, estuvo Born, muy importante en esta historia, vamos a hablar de él y de otros físicos más adelante.

Sommerfeld era un físico que sabía de toda la física. Todos los demás, quienes habían hecho maravillas en algunos campos, eran muy completos, pero no se le igualaban en el conocimiento universal. Sommerfeld sabía de cualquier rama y podía calcular en todas sus áreas de la física; de hecho, es cierto, tiene varios libros de enseñanza en todos los campos de la física, y puede decirse, que Sommerfeld “escurre” física, y “exuda” matemáticas, pero no fue tan originalmente profundo y de ideas fértiles, como algunos de sus estudiantes y asistentes, quienes sí lo fueron.

Entonces, a Sommerfeld se le ocurre remediar algunos de los problemas que había con el átomo de Bohr, por ejemplo extenderlo a átomos más pesados que el átomo de hidrógeno y a

moléculas; lo que hace es pensar que es más bien una especie de elipses, en vez de los círculos, ahí medio chuecas, excéntricas, por donde circulan los electrones alrededor del núcleo; porque en el átomo de Bohr, lo que hay es un número cuántico que es el momento angular; clásicamente el momento angular de una partícula no es más que la multiplicación de la distancia radio de giro por la masa por la velocidad, cuando ustedes le están dando vueltas a un cuerpo de masa dada, a alguna piedra, por ejemplo, le dan vueltas y entonces esa piedra, o cuerpo, tiene velocidad y se multiplica por el radio de curvatura de la trayectoria, la masa y la velocidad clásicas. Ese es el momento angular. Sommerfeld introduce las modificaciones, de las órbitas elípticas, en el modelo atómico de Bohr, y la cuantización del momento angular orbital del átomo de Bohr.

En el modelo de Bohr está incluido el momento angular implícitamente, porque cada electrón tiene un radio de giro, y tiene un momento lineal —una velocidad multiplicada por la masa de los electrones—, pero en algunos átomos más complicados y moléculas eso ya no funciona de esa manera. Para hacer la descripción se necesita otro número cuántico; se introduce proponiendo órbitas elípticas y circulares, velocidades relativistas del electrón y cuantización del momento angular orbital; no voy a entrar a explicar con mucho detalle estas propuestas.

Con esta introducción, en vez de llamar a este modelo el átomo de Bohr, algunos autores lo llaman el átomo de Bohr-Sommerfeld y así se conoce en la literatura; porque muy rápidamente se dan cuenta, los mencionados autores, que necesitan otro número cuántico para describir completamente el sistema, y la motivación se deriva de que se tiene solo un radio para el círculo, y se tienen ahora dos radios para describir la elipse, y se traduce en dos radios desde el punto de vista cuántico que tipifican con dos números cuánticos. Se tiene entonces radios orbitales cuantizados, energías de estado cuantizadas, y momentos angulares cuantizados.

Entonces, esa es la primera modificación que Sommerfeld hace para generalizar el modelo atómico de Niels Bohr, para hacer extensivo el modelo de Niels Bohr a sistemas de moléculas

y algunos átomos complejos, dado que para estos el modelo de Niels Bohr no funciona. Sin embargo, el átomo de Bohr, con las adendas de Sommerfeld, es muy bienvenido en la comunidad porque funcionaba bastante bien, con las adendas del segundo número cuántico, con estas órbitas que no eran totalmente circulares. Sin embargo, seguía habiendo inconsistencias con sistemas atómicos más complejos.

Funcionaba bastante bien para muchos sistemas cuánticos sencillos. Cómo es la física con esas aproximaciones es digno de mencionarse, pero tales precisiones nos alejan de nuestra historia principal. Lo que restaba era muy poco y los cálculos en base al modelo de Bohr-Sommerfeld resultaban bastante bien concordantes con las evidencias experimentales que se tenían en esa época.

Sin embargo, en los estudios espectroscópicos de sistemas más complejos se evidenció que no son descritos por este modelo atómico con la precisión requerida. Ejemplos de sistemas donde no funciona el modelo son átomos y moléculas más complejas, como átomos de oro, moléculas de azúcar, etc. Los trabajos de los químicos y los físicos en este tipo de sistemas complejos evidenciaron la necesidad de abandonar esta búsqueda de modelos y crear toda una teoría más completa y general. Coloquialmente los físicos y químicos decían: “querido físico, eres mi amigo, y no quiero desilusionarte, pero no compaganan los resultados experimentales con las predicciones hechas en base al modelo de Bohr-Sommerfeld. Debes afanarte más para tener un esquema completo, o te declararé incompetente y excluido de mi gracia”. Muchos físicos, entre ellos Niels Bohr se dieron a la búsqueda de ese esquema más general. La situación duró como unos quince años, hasta que los físicos lograron formular el esquema general llamado Mecánica cuántica, una de las grandes revoluciones intelectuales de todos los tiempos.

Empiezo a mencionar las ideas basales de la Mecánica cuántica también. Los ajustes y críticas cada vez más complejos y profundas al átomo de Bohr-Sommerfeld; y, un poco de lado, se toman otras ideas más profundas y radicales; también importantes, empieza a haber, cada vez más, filosofía al respecto;

el cambio radical iba en serio. El tema central era ya muy viejo: cómo describir la naturaleza a partir de las observaciones hechas sobre sistemas físicos; en este caso, de sistemas microscópicos y submicroscópicos. Se propusieron muchas ideas interesantes a lo largo de casi diez años.

Interesantes son las ideas y escritos de Thomas Kuhn y de otros filósofos e historiadores de la ciencia. En la mecánica cuántica los físicos generan una serie de preguntas de largo alcance que aún en nuestros días subsisten. Aún, viéndolo desde el punto de vista del modelo atómico de Bohr-Sommerfeld, está la misma serie de preguntas sin respuesta; los objetos no pueden estar más que en un lugar, y hay un límite natural, de principio y no de limitación experimental en nuestro conocimiento de la naturaleza, y que todas las cantidades físicas están cuantizadas.

Hay también, una serie de discusiones entre los filósofos, y entre los mismos físicos como Bohr y Einstein, todas muy interesantes y profundas. Muchas de estas discusiones están registradas por la historia. Estos avances conceptuales y experimentales, y discusiones filosóficas, dejan una influencia muy profunda en la Mecánica cuántica maravillosa, que abre las puertas a la descripción física del mundo externo, y nos acerca a entenderlo, y también aleja a la mecánica cuántica de la interpretación clásica del mundo externo, y la hace radicalmente nueva y revolucionaria.

Y a mi entender, viene después y prácticamente al mismo tiempo, el surgimiento de la mecánica cuántica de a de veras, y en seguida la mecánica cuántica relativista que también es muy importante, pero este es otro tema que nos aleja de nuestro objetivo.

La mecánica cuántica no relativista fue creada por Werner Heisenberg, por un lado, y por Erwin Schrödinger por otro. Werner Heisenberg, de ciudadanía alemana; y Erwin Schrödinger, austriaca. Valga la siguiente anécdota para esclarecer lo cerca que estuvo México de tener a uno de los creadores de la Mecánica Cuántica: E. Schrödinger estuvo a punto de venir al país, cuando el ingeniero Eugenio Méndez Docurro, con el apoyo de otros eximios mexicanos ocupantes de puestos claves en la administración pública, fundó el Cinvestav (Centro

de Investigación y Estudios Avanzados del Politécnico Nacional), el primer director del Centro, Arturo Rosenblueth, tenía buenas relaciones con algunos físicos de muy alto nivel y logró invitar a Schrödinger a venir a México. Entiendo que Schrödinger aceptó, pero murió poco antes de venir. El primer jefe del departamento de física del centro de investigación y de estudios avanzados del IPN fue Jerzy Plebansky, un físico relativista distinguido, colaborador en segunda generación de Einstein. El primer jefe del departamento de física hubiera sido Erwin Schrödinger, un físico de una visión extraordinaria para la Física teórica y de una amplia cultura científica-filosófica, hablaba muy bien el inglés, con acento irlandés aprendido desde niño en la ciudad de Dublín, aunque no sé para la administración de un centro de investigación científica incipiente como lo era el departamento de física del Cinvestav debido a su edad y a su gastado estado de salud por la enfermedad crónica que lo llevó a la tumba. A la sazón, ya estaba retirado de la Universidad de Dublín desde 1955. Como preludeo del éxito potencial en México sirvan estas dos referencias: fue Jefe del Departamento de Física Teórica de la Universidad de Zúrich y en el Instituto de Estudios Avanzados en Dublín, Director de la Escuela de Física Teórica. Murió de tuberculosis en 1961, a los 73 años, tras muchos años de lucha contra la enfermedad.

Heisenberg es otra historia. Hasta donde yo entiendo, Heisenberg fue asistente de Max Born y también de Sommerfeld, quien hacía los cálculos en varios campos de la física, porque era especialista en física matemática.

Max Born, de más entrenamiento matemático, está familiarizado con algunas ideas de cálculos matriciales, álgebra matricial, que pudiera quizá explicar la versión de Heisenberg de la mecánica cuántica, también llamada mecánica matricial. Recuerden que, en el modelo de atómico de Bohr, finalmente, lo que tenemos son ciertas energías, que pueden ser arregladas en forma de tablas, entre cada estado de energía hay una diferencia de $h\nu$. Entre cada nivel existe esa diferencia.

Esta información de las energías atómicas, obtenidas por técnicas espectroscópicas, nos da idea de que había una manera

para entender los resultados experimentales, de alguna forma que pudiéramos comprender esas energías arregladas en forma de tablas, o también llamadas matrices, y la dinámica del sistema físico. Recuerden que esas matrices constituyen la base matemática de la mecánica cuántica de Heisenberg. Dicho de manera muy simple, no es así de fácil, la mecánica cuántica de Heisenberg es interesantísima, hay que entenderla bien, también se puede entender de otras maneras, no hay problema con eso.

La idea que está detrás, de fondo, pero que motiva a Born y Heisenberg a tomar, de una manera maravillosa, y crear la mecánica cuántica matricial, es que se usan matrices porque las matrices tienen lo que se llaman eigenvalores, y se establece un álgebra no conmutativa propia para describir sistemas cuánticos. De esta versión, en el límite de la partícula libre se recupera la mecánica clásica de Hamilton-Jacobi (en honor de los físicos William Rowan Hamilton y Carl Gustav Jacob Jacobi).

Cuando yo calculo con valores numéricos, siempre puedo calcular sobre una función y obtengo un valor sobre una función, esos números representan las energías, y son números que se llaman eigenvalores, los valores característicos de la función, los valores propios de la energía.

Por lo anterior, la búsqueda de hacer representaciones y cálculos con las matrices es para ajustar datos experimentales con predicciones basadas en esta álgebra; sabemos que matemáticamente, y en base a los datos físicos espectroscópicos, que solo se van a necesitar las energías de transición de los sistemas para describir la evolución del sistema físico. Dicho sea de manera sencilla, a manera de divulgación, porque estos temas requieren más observación, dedicación, y estudio. Se construyen poco a poco estos conocimientos. A la versión de Heisenberg de la mecánica cuántica se le conoce como mecánica matricial.

Y por el otro lado de la otra versión de la mecánica cuántica, está Erwin Schrödinger. Lo que él hace es formular una ecuación diferencial, compleja, de primer orden en el tiempo y de segundo orden en el espacio, que es la base para calcular los espectros de energías, ciertos valores de energías, obtenidos experimentalmente. Ya para entonces, de alguna manera, había

mucho conocimiento en las matemáticas y en la física teórica de lo que se llamaba teoría espectral, que es la base de esta formulación clásica en términos de ecuaciones diferenciales.

Los matemáticos y los físicos sabían cómo calcular espectros usando muchas ecuaciones diferenciales. Yo, como físico, diría que no servían para nada; claro que un matemático me daría de golpes en la cabeza por decir esas tonteras, pero desde el punto de vista de la física había 20 000 ecuaciones diferenciales con las cuales yo podía calcular algunos términos en la teoría espectral. El chiste era, por decirlo coloquialmente, encontrar una ecuación diferencial con la que pudieran predecirse los resultados espectrales que fueran los adecuados para reproducir los niveles de energía observados, y ese papel, o resultados, lo conseguimos con la ecuación de Schrödinger. Esa es la gran utilidad de la ecuación de Schrödinger.

La ecuación de Schrödinger es una ecuación diferencial que tiene del lado izquierdo unas derivadas segundas con respecto al espacio (x, y, z) , en forma de un operador diferencial, y una cierta función ψ , sobre la que actúa el operador, y del lado derecho tiene E , energía como un operador, aplicado sobre la misma función de estado, ψ . E es esa energía de la que hemos estado hablando en los espectros atómicos, y en el modelo atómico de Bohr. Entonces la ecuación depende, en cierta forma, de cómo están los términos balanceados en esa ecuación diferencial. Qué es E y qué energías son las E_n vale la pena explicar con detalle. Las E_n son varias energías, dependen de cómo esté configurado el sistema físico, de qué energía potencial tiene y de esa forma escribir la ecuación diferencial para un problema concreto, o un sistema físico particular, para un átomo de hidrógeno, para un oscilador armónico, o para una partícula libre. Este penúltimo ejemplo es porque se dice, en *vox populi*, que el único ejemplo de sistema físico que sabemos resolver los físicos, en la teoría clásica y en la teoría cuántica, es el oscilador armónico.

Porque, de hecho, el átomo de hidrógeno lo calculamos de alguna manera truculenta como si fuera un oscilador armónico, que no lo es de facto; es la técnica que usamos para resolver el

sistema. Esta postura es muy exagerada, pero hay visos de esa visión e incapacidad de elaborar más en las técnicas empleadas.

Sin embargo, cuando son cosas muy complicadas sabemos hacerlo también; de hecho, hay colegas en la UNAM como Carlos Bunge quién es especialista en estos cálculos; también hay personas que saben hacer cálculos de química cuántica o de sistemas moleculares en varios institutos del país. La técnica se basa en la fuerza bruta para resolver las ecuaciones para describir la dinámica de los sistemas cuánticos. Lo que hacen los físicos es programar en gigantes programas de código, que ya están hechos por alguien, y muchas veces el que los utiliza es un usuario inteligente que a lo mejor le cambia muchos parámetros para dar cuenta de su sistema físico particular, y que tiene trabajo de mucha gente, que en base a la mecánica cuántica permite calcular la interacción entre dos partículas y una tercera, etc. En el programa de cómputo, así se le va sumando términos, tomando en cuenta efectos raros y sutiles, como el efecto de apantallamiento en el potencial eléctrico; este efecto se da cuando observamos muy lejos; una partícula, por ejemplo que está muy lejos del punto de observación, que tiene un núcleo formado de muchas partículas positivas y tiene electrones dando vueltas afuera entonces, sobre el último electrón no actúa la carga total del núcleo, nada más actúa una parte de la carga positiva del núcleo y las cargas negativas de los electrones que están entre él y el núcleo atómico. La interacción es de tipo coulombiano.

La interacción está apantallada, la carga eléctrica total, origen de la fuerza sobre el electrón, da origen a cálculos complicados, cálculos cuánticos, porque se requiere conocer la energía potencial coulombiana del electrón en medio de todas las demás cargas eléctricas que conforman el sistema físico. De esta manera, los físicos desarrollan cálculos moleculares bastante precisos. Mas estos cálculos que hacemos en sistemas atómicos coinciden con los resultados experimentales de forma muy precisa, ya sea que hagamos física molecular, física cuántica, u otra por el estilo. Ese es el poderío y precisión de la Mecánica cuántica.

Para agregar un poco más en la historia de la mecánica cuántica, sobre el uso de la teoría cuántica y la relación entre físi-

ca y economía y riqueza de un país, menciono a John Archibald Wheeler, quien fue uno de los físicos más interesantes del siglo XX, tuvo como estudiante de doctorado a Richard P. Feynman, gran creador de otra versión de la mecánica cuántica, y también tuvo a Kip Thorne quien mereció el Premio Nobel en Física hace unos años por la detección de las ondas gravitacionales. Tuvo como estudiante doctoral también a Jacob Bekenstein, quien concibió la idea que los agujeros negros tienen entropía y esa entropía es solo función de la superficie exterior del agujero negro.

Es una idea absolutamente loca, absurda; pero que funciona maravillosamente, es decir, funciona de esta manera: tengo un objeto, para el cual una propiedad física muy importante que es la entropía, que sé cómo funciona para un gas, y para un líquido; ahora resulta que para ese objeto —agujero negro— no depende de nada de lo que esté adentro, depende de su superficie. La entropía de un agujero negro depende del área de lo que se llama el horizonte de eventos. Esto lo planteó Jacob David Bekenstein, quien era un judío nacido en México. Y vivió como hasta los 18 años en México y para estudiar un poco más emigró a Estados Unidos de Norteamérica, terminó haciendo doctorado con Wheeler, y luego emigró a Israel.

En cierto sentido la idea de Bekenstein motiva el principio holográfico, y en este ha contribuido, de manera muy relevante Juan Maldacena al relacionar en su comportamiento cuántico modelos de la gravitación con modelos de teorías cuánticas de campo (AdS-CFT).

La entropía por él planteada muchas veces lleva el nombre Bekenstein-Hawking, o entropía BH. Digo esto porque Wheeler era un físico enormemente creativo. Decía que la mitad de la economía de los Estados Unidos se debe a la Mecánica cuántica. Y yo considero que es completamente cierto. Si uno se pone a ver todas las cosas que hay en el mercado y que compramos y usamos, que se construyen, por ejemplo, un iPhone, los computadores que estamos usando, la tecnología láser, la electrónica, etc. La mitad de la economía, o quizá el 35% —que es una cantidad terriblemente grande de dinero —, descansa indudablemente en la mecánica cuántica.

Después, para aquellos que están estudiando física, Wheeler tenía un principio moral, que es a la vez un principio ético: “nunca empiece usted a resolver un problema sin saber antes la respuesta”. Piensen en eso. Si uno no se constriñe a este principio, entonces su actuar es inmoral, antiético. Este principio es de oro, es de platino, es la base de la moralidad inventiva de todos los físicos creativos. Quizá lo decía con sentido irónico, después de resolver el misterio de la creación de la energía en las estrellas donde la clave es la mecánica cuántica y la teoría especial de la relatividad.

La mecánica cuántica juega un papel extenso y excelso en la descripción del mundo externo. Es la base de toda la tecnología moderna que está a nuestro alcance, y es la clave de las economías de los estados modernos.

Quería enfatizar cómo surgen las ideas del átomo de Niels Bohr, cómo se hilvanan las ideas para aplicar los principios cuánticos de la teoría de Planck a la teoría atómica y cumplir el sueño de cientos de filósofos de muchas centurias; no sé qué es el átomo de Bohr en detalle matemático, yo no lo recordé aquí, esos detalles los pueden buscar y encontrar incluso en Wikipedia o en cualquier libro de texto apropiado. Quise resaltar cómo surgen las ideas pues en la medida que podamos entenderlas, podemos apreciar la gotita genial de Bohr, y después de Sommerfeld, en la construcción de la teoría atómica, que llevó en los desarrollos generalizados a la Mecánica cuántica.

Cierre

Julián Félix

Laboratorio Internacional de Partículas Elementales

Quiero agradecer a todos ustedes, estimadas autoridades y colegas. En la tarde de hoy, quiero decir que no es un cierre a la conmemoración de hechos, o eventos, pues quisiéramos proponer que sea el inicio de una larga discusión, que nos lleve a una fructífera generación de ideas.

Esta marca el inicio también de las celebraciones encaminadas al Año Internacional de las Ciencias Básicas para el Desarrollo Sostenible, el año en que se celebran 100 años desde que le fuera otorgado el Premio Nobel en Física a Niels Bohr, 2022.

Los 120 años de la Teoría cuántica son el preámbulo de las celebraciones de la formulación de la Mecánica cuántica, la cual inicia en 1924, entonces, en unos años estaremos celebrando sus 100 años. Estas ideas basales, dieron origen a la revolución más importante de la ciencia y del pensamiento del siglo **XX**, la confirmación experimental del quantum en los trabajos de Bohr que los explicó maravillosamente el Dr. Obregón; Einstein que me tocó explicar, Millikan y otros con los que quedó firmemente establecida la Teoría del quantum, abriendo el camino para la construcción de la Mecánica cuántica.

Se ha sentado el precedente para estas celebraciones, con su compañía y la de expertos internacionales como Juan Maldacena, de Princeton, Fernando Quevedo de Cambridge, Octavio Obregón y Julián Félix de la División de Ciencias e Ingenierías del Campus León de la Universidad de Guanajuato y otros profesionales que nos han apoyado en estos esfuerzos. Estas discusiones demuestran que la Física se encuentra en todas las actividades humanas. Se vincula con todos los entornos e incide en la economía de los países. Las aplicaciones magistralmente dadas por nuestros expositores han sido material valioso y permite a

nuestros estudiantes un acercamiento a estos temas de manera distinta. La divulgación científica es importante como medio de interesar a los estudiantes.

Además, se ha realizado exitosamente un curso de introducción a la construcción de prototipos de investigación, los cuales serán caracterizados y evaluados para ser llevados a las instalaciones del Test Beam de Fermilab próximamente cuando las condiciones lo permitan. También se han presentados posters y artículos por parte de los estudiantes involucrados que permiten continuar la discusión de estas ideas. Además de la presente edición de las memorias, el material digital se encuentra disponible en nuestras páginas y redes sociales.

Tienen alcanzados en nuestros materiales digitales a más de 300 000 personas en cuatro meses siendo la serie de seminarios Leon Lederman un preámbulo a estos eventos. Hemos tenido participantes de toda América Latina que se interesaron en nuestros materiales y estos temas. Sobreparamos las expectativas y cumplimos los objetivos de divulgación e investigación.

Este esfuerzo interinstitucional ha sido posible gracias al apoyo del Conacyt y de la División de Ciencias e Ingenierías de la Universidad de Guanajuato y otras instituciones; también hemos contado con la presencia de autoridades como la senadora Beatriz Paredes y la Dra. Carmen Rodríguez que con su presencia han dado realce a este evento. Quisiera decir gracias por su participación, estos eventos han sido exitosos en promover la sana discusión de las ideas, las exposiciones de las ideas, y promover las vocaciones científicas en las nuevas generaciones. Muchas gracias y los esperamos en los próximos eventos relacionados con estos temas.

Muchas gracias y buenas tardes.

Tonatiuh Matos

Presidente de la Sociedad Mexicana de Física

Buenas tardes a todos, muchas gracias por la invitación, y primero que nada quiero felicitarlos por un evento como este, se ve que ha tenido mucha repercusión en mucha gente y se demostró que la mecánica cuántica es una de las teorías y de las ideas que tiene la humanidad para resolver el entendimiento de la naturaleza y que la mecánica cuántica es una de las dos grandes teorías del siglo pasado.

Todo mundo hemos pensado que estas teorías tienen aún una gran cantidad de controversias, es impresionante la cantidad de cosas que no se entienden de la mecánica cuántica. Feynman decía “el que entiende la mecánica cuántica es que está mintiendo”.

Y efectivamente es una teoría bastante compleja y una de las partes principales de ella es que nos ha llevado a una discusión filosófica epistemológica de dos o tres corrientes muy fuertes de filosofía que es importante porque después estas corrientes filosóficas tienen consecuencias inclusive en lo social y en la vida misma de los humanos y por supuesto que siguen en controversia, no se han dado una solución final a la interpretación de la mecánica cuántica, que es algo espectacular y lo que nadie puede dudar es el poder predictivo que tiene la mecánica cuántica. Lo que uno puede poner en controversia es ¿cómo lo interpreto?

Y bueno eso es una discusión mucho más interesante que podría alargarse muchas horas. También he estado notando que todo mundo piensa que la mecánica cuántica es la física del microcosmos, pero no es así.

Resulta ser, que los últimos meses, los últimos años, el cosmos, que son las galaxias, inclusive el nivel cosmológico, la materia oscura, todo esto, parece ser que puede ser explicado con la mecánica cuántica.

Déjenme explicarles un fenómeno que se observó hace dos o tres años. Resulta ser que todos los modelos de materia oscura nos dicen que las galaxias satélites tienen que estar distri-

buidas uniformemente alrededor de una galaxia, de las galaxias grandes, por ejemplo nuestra galaxia la Vía Láctea al lado está Andrómeda y acaban de encontrar una galaxia que tiene exactamente la misma característica, entonces estas galaxias tienen muchas galaxias satélites alrededor de ellas y todos los modelos sin excepción predicen que estas galaxias satélites deben estar distribuidas uniformemente alrededor de las galaxias grandes, y resulta ser que no.

Primero lo encontraron en la Vía Láctea y todo mundo pensó, bueno es una galaxia anómala, después lo vieron también en Andrómeda, pues puede ser que estemos en dos galaxias gemelas, pero hace poquito se encontró una tercera donde se pueden ver las satélites y todas estas galaxias satélites están orientadas en el Polo Norte y hay una manera de explicarlo. Y es que las galaxias son átomos que tienen un estado base y estados excitados y en esos estados excitados lo que están haciendo es “jalar” a las galaxias satélites hacia las partes de los polos. Entonces increíblemente la mecánica cuántica podría explicar este comportamiento de las galaxias satélites.

Otro fenómeno que también se está viendo que ya hay varios, no son uno ni dos, son modelos que explican la materia oscura utilizando la mecánica cuántica. La expansión acelerada del universo es no otra cosa que un fenómeno cuántico, entonces la mecánica cuántica tiene una repercusión impresionante no nada más a nivel microscópico sino tal vez nos explique todo el cosmos.

Todo sigue aun en nivel de especulación, y a nivel de investigación, pero para que se den cuenta que la gente que hace cosmología y que hace astrofísica tiene que estudiar mecánica cuántica, aunque esté estudiando cosas del macro mundo, del mundo cósmico y del mundo cosmológico.

Esta es una felicitación, en serio que este tipo de seminario y este tipo de congresos son muy importantes para que la gente vea que la mecánica cuántica y la repercusión de estas ideas va mucho más allá incluso de lo que ahorita nos estamos imaginando.

Muchas gracias.

David Delepine

Director de la División de Ciencias e Ingenierías, Campus León,
Universidad de Guanajuato

Buenas tardes, antes que todo quiero felicitar a Julián, agradecer a todos los participantes, al público que asistió a estas charlas. Es un evento que como División de Ciencias e Ingenierías consideramos muy importante poder divulgar, comunicar la ciencia y compartir las ideas de diferentes ramas de física del cosmos, física del microcosmos, como comentó Tonatiuh, efectivamente todo está relacionado.

También es una doble felicitación a Julián por haber obtenido el reconocimiento de parte del SNI del nivel III que es un reconocimiento a su carrera como investigador, a su liderazgo, a su trabajo como investigador, pero también como formador de grupos investigadores no sólo aquí en México, pero también en América Latina.

Muchas Felicidades Julián. Muchas gracias por la organización y por los esfuerzos que se están haciendo para hacer realidad este tipo de evento.

También, reitero, el compromiso de la Universidad de Guanajuato y en particular de la División de apoyar este tipo de evento. Creo que estamos en una época de pandemia, una época en la cual estamos separados, no podemos reunirnos y realizar este tipo de eventos en nuestro auditorio, lo resentimos, no tenemos esta presencia. Pero también como Julián lo compartió en una plática que tuvimos hace unas semanas es una oportunidad de desarrollo de uso de las nuevas tecnologías y de aumentar el impacto de esos eventos podemos ver que los participantes, tenemos participantes, no solo de Guanajuato y todo México sino también de Estados Unidos, de Guatemala y otros países de América Latina, entonces muchísimas gracias por este esfuerzo y Julián reitero mi compromiso de apoyarte y puedes contar conmigo.

Muchísimas gracias.

Octavio Obregón

División de Ciencias e Ingenierías, Campus León, Universidad de Guanajuato

Gracias, en primer lugar, decir que agradezco que Julián diga que soy coorganizador de esto, pero eso es mentira, realmente el organizador ha sido él. Si bien platicamos algunas cosas y me hizo el favor de conversar conmigo sobre sus planes, el organizador absoluto de todo esto ha sido él y ha sido muy exitoso. Yo lo quiero felicitar mucho por eso.

Quiero hacer un paréntesis. Muy interesante lo que platicó Tonatiuh, hay desde luego una sección donde la mecánica cuántica y la teoría cuántica de campos van a tener que jugar un papel fundamental en la gravitación y es entender la *quantum gravity*, la gravitación cuántica, que no entendemos nada hasta ahora, y una de las cosas que ha hecho mucho, es hacer modelos de cosmología cuántica. Que es considerar el universo, el principio del universo, como si fuera, casi casi un electrón, o sea el principio del universo tuvo que haber sido cuántico.

Pero todavía todo eso tenemos muchos trabajos y muchos modelos, pero todavía no entendemos todo lo que se ve. Pero yendo a la mecánica cuántica yo quisiera de manera muy breve decir que tengo un artículo en el periódico *La Crónica de Hoy*, y ese artículo es sobre la visita que nos hiciera Leon Lederman y Premio Nobel y Townes hace casi 20 años y una de las cosas que mencionó ahí no voy a ir demasiado lejos, es un poco la anécdota de Charles Townes, cuando era joven pensó que podía hacer un aparato, el máser, en la región de las microondas que tuviera todas las ondas de la luz colimadas, etc., y dice, luz amplificada, estimulada, coherente, etc. Y dio su plática, ya tenía *tenure* (permanencia) en la Universidad de California y estaba un Premio Nobel, quien le dijo “está usted violando las leyes de la termodinámica”, se fue a su casa, se puso todo nervioso, toda la noche la pasó desvelado, eso lo cuentan, lo cuenta en sus historias y dice “creo que el Premio Nobel no me entendió”. Y siguió de necio haciendo su Máser y lo hizo, paso al menos un año y la gente lo felicitaba. Mire, ¡Es usted una maravilla! Se debería sacar el pre-

mio Nobel, pero nadie sabía para qué servía, pero poco a poco se vio que era una cosa útil. Siempre le pregunto al público si conocen algo más útil que el láser, no fue creado por la persona que lo creó por hacer algo útil, él quería hacer algo para hacer luz amplificada, etc. La ciencia da unas vueltas muy interesantes, muy importantes. Y obviamente el láser tiene muchas cosas atrás y la mecánica cuántica. También creo que mencionaba ya antes Johan Archibald Wheeler decía un porcentaje muy importante de la economía de Estados Unidos, no recuerdo si 35 o 50%, se debía a la mecánica cuántica, así que bueno, esa es la ciencia, que hacemos por entender y comprender, tiene consecuencias bárbaras.

Gracias.

Recapitulación

Julián Félix

Tenemos en nuestras manos los cuatro capítulos que surgieron a partir de las pláticas impartidas por destacados físicos a nivel internacional para conmemorar los 120 años de la Teoría cuántica, las ideas basales que dieron origen a esta teoría. Son cuatro puntos de vista complementarios.

Fernando Quevedo, Cambridge; Juan Maldacena, Princeton; Octavio Obregón, UG; Julián Félix, UG, amablemente aceptaron participar y repartimos los temas de esta manera: 1) La física antes de la teoría cuántica, los antecedentes. 2) El nacimiento de la teoría cuántica con los trabajos de Planck del espectro de radiación del cuerpo negro. 3) La confirmación y extensión de la teoría cuántica en los trabajos del efecto fotoeléctrico de A. Einstein. 4) La aplicación de la teoría cuántica para formular el modelo atómico de Niels Bohr. La idea es hacer las presentaciones secuenciales y complementarias para dar un panorama completo de los orígenes de la teoría cuántica, su fundamentación, universalización y aplicación.

Cada uno les llamó como sigue: Los orígenes: Fernando Quevedo; La teoría de Planck de la radiación: Juan Maldacena; El efecto fotoeléctrico: Julián Félix; La teoría de Bohr: Octavio Obregón.

Con la presente obra queremos llegar al gran público, especialmente al público joven, universitario o preuniversitario, compuesto por personas inquietas, talentosas, que buscan orientar su vida. Y ejemplificar para esas personas, con la vida y obra de destacados científicos, que dedicarse a la ciencia como proyecto de vida vale en toda la extensión de la frase. Los mismos autores son ejemplos de personas dedicadas completamente a la ciencia. Aquí mostramos que todavía hay mucho por explorar en la naturaleza. La exploración de la naturaleza, y la construcción del conocimiento no han terminado. Podemos decir que la teoría cuántica es el inicio de la exploración de la naturaleza desde la constitución misma de ella.

Fernando Quevedo expone los orígenes de las ideas y los conocimientos previos a la formulación de la teoría cuántica. Cubre, y repasa, desde las primeras ideas de exploración de la naturaleza debidas a los antiguos griegos, y llega al renacimiento con Galileo, Kepler, Newton, Huygens, Hooke, y otros. Presenta las ideas de Fourier, de Laplace, Boltzmann, Kirchhoff, y otros. La gran disputa es sobre la naturaleza y constitución de la luz, ya sea como una onda o una partícula. Young, con su experimento de Young, logra establecer la constitución ondulatoria de la luz. Pero la disputa y controversia no está terminada, mucho menos cerrada.

Kirchhoff es uno de los originadores de la exploración de la naturaleza en su constitución más elemental con su espectroscopia, junto con su colega Bunsen. Ahí establece, desde el punto de vista experimental, el problema de la radiación del cuerpo negro. Y aquí terminan los orígenes. La explicación del espectro de tradición del cuerpo negro, por Max Planck, es lo que da origen a la Teoría Cuántica.

Juan Maldacena explica con mucho detalle el espectro de radiación del cuerpo negro, el equilibrio térmico entre el campo de radiación y las paredes materiales del cuerpo negro, y la forma en que se origina el problema, las explicaciones fallidas de éste, ofrecidas por lo físicos en términos de la termodinámica y la electrodinámica clásicas. El cambio de visión ofrecida por M. Planck para resolver el problema, pasar de una concepción continua de intercambio de la energía entre el campo de radiación y la materia, a una discreta. Y resultó que esa es la clave para resolver este problema y muchos otros. Planck propuso que el intercambio de radiación entre las paredes del contenedor y el campo de radiación es en forma discreta, en paquetes, en cuanta, en lugar de continua como se había supuesto, es como se lleva a cabo este proceso en la naturaleza. Así nació la Teoría cuántica en los trabajos de Max Planck, con apego estricto a la evidencia observacional y experimental; propone que la energía del quantum de radiación es proporcional a la frecuencia de la radiación, actualmente conocemos del parámetro de proporcionalidad como constante de Planck; es una constante fundamental de la

naturaleza. Juan Maldacena ofrece, además, algunos ejemplos donde se aplica la Teoría cuántica en sistemas microscópicos y sistemas macroscópicos. Y queda abierto del problema de la universalización de la teoría.

Julián Félix da cuenta del efecto fotoeléctrico y la forma en que A. Einstein explicó este efecto basado en la teoría cuántica de Max Planck, y la manera en que R. Millikan corroboró experimentalmente las propuestas de explicación ofrecidas por A. Einstein. Es un trabajo de ampliación y universalización de la teoría cuántica. Einstein ofrece una forma de medir la constante de Planck usando técnicas eléctricas, no termodinámicas, como lo propuso originalmente Planck. Julián Félix explica el origen del efecto fotoeléctrico en los trabajos de Hertz y Lenard y otros físicos. Luego explica el trabajo, y propuesta de Einstein. Concluye la exposición con la explicación de los trabajos experimentales de R. Millikan, que confirman fehacientemente la propuesta de Einstein, y la universalización de la Teoría cuántica de Max Planck. Y cierra la exposición con algunos comentarios sobre la enorme utilidad de la física como explicación del devenir del mundo externo y como fundamento de todas las ingenierías, y por ende de toda la actividad económica de los países.

Octavio Obregón describe los trabajos de Niels Bohr; donde N. Bohr hace uso de la Teoría cuántica de Max Planck para explicar los espectros atómicos —al menos el más sencillo que es el del hidrógeno—, y proponer el modelo atómico conocido como modelo atómico de Niels Bohr. Y con estos trabajos de N. Bohr queda completamente fundamentada y universalizada la Teoría cuántica de Max Planck. Con ayuda de Sommerfeld, al modelo atómico de Niels Bohr se incluye no solamente la cuantización de la energía de los sistemas atómicos, sino también la cuantización del momento angular del sistema atómico, o del momento angular del electrón en el átomo; ésta es una aportación fundamental a la fundamentación y universalización de la Teoría cuántica. Octavio Obregón explica los orígenes de estas ideas fundamentales en la teoría atómica de Niels Bohr, y cómo Niels Bohr y colaboradores aplican la teoría cuántica para cons-

truir su modelo de átomo y corregir el modelo de atómico de Rutherford.

Con los trabajos de Niels Bohr también quedó claro que debería construirse, basada en la Teoría cuántica, una Mecánica del quantum, porque los modelos atómicos propuestos por Niels Bohr y Sommerfeld tienen aplicación no exacta y muy limitada en átomos que no son tipo hidrógeno. Era evidente que se requería toda una universalización de la dinámica del quantum o de los sistemas cuánticos, una Mecánica cuántica.

Esta es una invitación a las jóvenes generaciones a considerar muy en serio el estudio de la naturaleza, y el punto de partida puede ser la Teoría Cuántica, que aquí ofrecemos.

La Teoría cuántica es universal y completamente establecida por la evidencia observacional y experimental.

Para inaugurar este evento contamos con destacadas personalidades relacionadas con la educación y la administración pública de México, la Universidad de Guanajuato, la División de Ciencias e Ingeniería, Campus León, la SEP, el Conacyt, y colegas alrededor del mundo.

Este trabajo es un pequeño tributo, y remembranza, a los 120 años de la Teoría cuántica, desde la Universidad de Guanajuato para el mundo y para la historia de la ciencia, en especial la historia de la Física, y sin fines de lucro.

Referencias

- Darwin, C. (1859). *On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life*. Londres: Impreso por W. Clowes and Sons, Reino Unido.
- Diarmseven. (s.f.). Optics Fourier Transform II. https://www2.slideshare.net/diarmseven/optics-fourier-transform-ii?from_action=save
- Einstein, A. (1905, marzo 18). Concerning an Heuristic Point of View Toward the Emission and Transformation of Light. *Annals of Physics*, 17, 132. http://physics.gmu.edu/~rubinp/courses/123/einstein_photoelectric.pdf
- _____ (1909). "On the Development of Our Views Concerning the Nature and Constitution of Radiation". En Stachel, J., et al. (eds.), *The Collected Papers of Albert Einstein, the Swiss Years: Writings, 1900-1909* (Beck, A., trad.), vol. 2, Princeton University Press, Princeton, EUA, pp. 379-394.
- French, A. P. (ed.) (1979). *Einstein: A Centenary Volume*. Harvard University Press, EUA.
- Hawking, S. (2004). *On the Shoulders of Giants: The Great Works of Physics and Astronomy*. Running Press, 2003.
- Helmholtz, H. (1881). On the modern development of Faraday's conception of electricity. *Journal of the Chemical Society, Transactions*, 39, pp. 277-304. <https://doi.org/10.1039/CT8813900277>
- Hertz, H. (1887). Ueber einen Einfluss des ultravioletten Lichtes auf die electriche Entladung. *Annalen der Physik*, vol. 267 (8), pp. 983-1000. <https://doi.org/10.1002/andp.18872670827>
- Lord Kelvin (1901). *I. Nineteenth century clouds over the dynamical theory of heat and light*. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 2:7, pp. 1-40. <https://doi.org/10.1080/14786440109462664>

- Laplace, P. S. (1951). *A Philosophical Essay on Probabilities* (F. W. Truscott y F. L. Emory, trads.). Dover Publications, Nueva York, EUA.
- Lenard, P. (1900). Erzeugung von Kathodenstrahlen durch ultravioletes Licht. *Annalen der Physik*. vol. 307 (6). <https://doi.org/10.1002/andp.19003070611>
- _____ (1905). Nobel Lecture: On cathode rays [PDF]. Fundación Nobel. <https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/lenard-lecture.pdf>
- Michelson, A. A. (1903). *Light Waves and Their Uses*. The Decennial Publications of the University of Chicago, Chicago University Press, EUA.
- Millikan, R. (1923). Nobel Lecture: *The electron and the light-quant from the experimental point of view* [PDF]. Fundación Nobel. <https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/millikan-lecture.pdf>
- NASA (2015). Cosmic Background Explorer (COBE). <https://science.nasa.gov/missions/cobe/>
- Newton, I. (2011). *Principios matemáticos de la filosofía natural* (Eloy Rada García, trad.). Alianza Editorial, Colección: Libros singulares, España.
- Pais, A. (2005). *Subtle Is the Lord: The Science and the Life of Albert Einstein*. Oxford University Press, EUA.
- Planck, M. (1920). Nobel Lecture: The Genesis and Present State of Development of the Quantum Theory [Transcripción]. Fundación Nobel. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1918/planck/lecture/>
- Stachel, J. (2021). *Einstein's Miraculous Year: Five Papers That Changed the Face of Physics*. Princeton University Press, EUA.
- Strathern, P. (2001). *Mendeleyev's Dream: The Quest for the Elements*. Thomas Dunne Books, EUA.
- Weinberg, S. (2015). *To Explain the World: The Discovery of Modern Science*. Harper/Harper Collins Publishers, Nueva York, EUA.
- Westfall, R. S. (2015). *The Life of Isaac Newton*. Cambridge University Press, Reino Unido. <https://doi.org/10.1017/CBO9781316424018>

- Whewell, W. (1847). *The Philosophy of the Inductive Sciences*. J. W. Parker, Londres. <https://archive.org/details/philosophindu01whewrich/page/n15/mode/2up>
- _____ (2010). *History of the Inductive Sciences: From the Earliest to the Present Times*, vol. 3. Cambridge University Press, Reino Unido. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511734359>
- Wikiwand. (s.f.). Black Body Radiation. https://www.wikiwand.com/en/Black-body_radiation
- Wilson, W. (1958, septiembre 27). Collected Works of Max Planck. *Nature*, 182, 820-821. <https://doi.org/10.1038/182820a0>

UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

Dr. Luis Felipe Guerrero Agripino
Rector General

Dra. Cecilia Ramos Estrada
Secretaria General

Dr. Sergio Antonio Silva Muñoz
Secretario Académico

Dr. Salvador Hernández Castro
Secretario de Gestión y Desarrollo

Dra. Elba Margarita Sánchez Rolón
Titular del Programa Editorial Universitario

120 TC.

*120 años de las ideas basales que dieron origen
a la teoría de los cuanta*

coordinado por Julián Félix
terminó su tratamiento editorial
en el mes de diciembre de 2022.

En su composición se utilizó la fuente tipográfica
Crimson Text de 9, 11, 14, 18 y 24 puntos.

El cuidado de la edición estuvo a cargo de
Jaime Romero Baltazar.