

PRESENTACIÓN

Para quien esté dispuesto a leer, o a quien se encuentre con estas conferencias y le despierten alguna curiosidad intelectual, le pongo sobre aviso con unas pocas observaciones y comentarios.

Este libro está dividido en nueve capítulos que, a modo de conferencias, elaboran un discurso sobre el proceso y los experimentos que permitieron la paulatina construcción del monumento a la inteligencia que es la teoría cuántica. El primer capítulo está dedicado a mostrar el panorama de la física antes de que Max Planck usara por primera vez el artificio de dividir la energía en porciones minúsculas para poder explicar el comportamiento de la radiación del cuerpo negro. Para quien desee conocer cuándo se puede empezar a hablar de física moderna, una lectura de este primer capítulo le permitirá apreciar cuánta belleza teórica se había alcanzado en la mecánica y la teoría electromagnética antes de empezar a explorar la idea de los cuantos.

La idea de estas conferencias es que cada capítulo se pueda leer de manera casi independiente, de modo que tras leer el primer capítulo se puede abordar cualquiera de los siete siguientes, si bien el orden recomendado es el que desarrolla el libro. El último capítulo, el noveno, es dependiente de todo el contexto, es un epítome de la mecánica cuántica, y está hecho para ilustrar de manera breve sobre el enorme cambio entre la que hoy se designa como la vieja o la antigua teoría cuántica y la real o moderna teoría de la mecánica cuántica.

Este texto tiene como tema central la comúnmente denominada Física Moderna, y en consecuencia versa sobre las teorías y los experimentos que dieron lugar a la estructuración de la física cuántica en el periodo de 1895 a 1925. Aquí encontrará una reseña y una serie de comentarios que lo guiarán en la lectura de los principales artículos acerca del descubrimiento del electrón, los rayos X, la radioactividad, los cuantos de energía y los cuantos de luz o "fotones", el núcleo atómico, los saltos cuánticos de los electrones, las primeras leyes de la teoría cuántica y el mundo dual de la micromecánica, hasta alcanzar el grado de maduración que dará pie a que Werner Heisenberg y Erwin Schrödinger, cada uno de modo diferente, crearan la bella representación ecuacional de la mecánica cuántica, el primero en forma de matrices, y el segundo como funciones de onda.

Aunque muchos libros de Física Moderna además de los temas que se han mencionado también contienen el tema de la relatividad especial de Einstein, aquí sólo se mencionan las ecuaciones relativistas cuando resulta imprescindible hacer uso de ellas para explicar el avance de la teoría atómica o la intuitiva idea de la teoría de la dualidad onda-partícula propuesta por el príncipe Louis de Broglie. Si esta privación se considera una carencia, es porque el tema es muy profundo y se debe abordar en otro texto. Para esto busco apoyo en el sin par Richard Feynman, un profesor genial, bromista y carismático, premio nobel de 1965 por la deslumbrante teoría de la electrodinámica cuántica, quien en 1963 escribió una de las más bellas obras para la enseñanza de la física, "Lectures on Physics" (título que no necesita traducción); de dicho libro se editó una síntesis de lecturas seleccionadas con el atractivo título de "SEIS PIEZAS FÁCILES" y, por supuesto, como es sencillo adivinar, no incluye la teoría de la relatividad de Albert Einstein. Esta última, en cambio es el tema de otra obra extraordinaria, "SEIS PIEZAS NO TAN FÁCILES. LA RELATIVIDAD, SIMETRÍA Y ESPACIO-TIEMPO DE EINSTEIN"; he ahí porque espero que disculpen la voluntaria omisión.

Mientras leía y estudiaba diferentes libros y artículos con el propósito de preparar el contenido y la escritura de este texto, tuve el placer de leer en su versión original el prefacio del libro "Un Tratado sobre la Electricidad y el Magnetismo", escrito en 1873 por James Clerk Maxwell. En ese excelso y maravilloso volumen, Maxwell interpreta en forma matemática el deslumbrante trabajo experimental de Faraday, y muestra que el mismo está en armonía con las creaciones matemáticas de corte más especulativo como las de Gauss, Weber, Lorentz, Riemann, y Franz y Carl Neumann. Llama la atención la lucidez con la cual Maxwell afirma que "el estudio del electromagnetismo en toda su extensión ha cobrado una importancia primordial como medio para promover el progreso de la ciencia"; y aunque el contenido del tratado de Electricidad y Magnetismo es ciencia pura, el autor no duda en señalar la importancia próxima o futura del electromagnetismo para asuntos tan prácticos y comunes como la navegación y la telegrafía. Pero por sobre todo, lo que encontré más inspirador en esta lectura, y que me motivó a darle la forma y contenido al texto que se presenta, con el propósito básico de narrar y escudriñar la etapa inicial de los experimentos que dieron lugar a la creación de la teoría cuántica, es el siguiente comentario de Maxwell:

“Es de gran ventaja para el alumno de cualquier materia leer las memorias originales sobre ese tema, ya que la ciencia siempre se asimila completamente cuando está en estado naciente, y en el caso de las investigaciones de Faraday esto es comparativamente fácil, ya que son publicadas en forma separada y pueden leerse consecutivamente. Si con algo de lo que he escrito aquí puedo ayudar a cualquier estudiante a comprender los modos de pensamiento y expresión de Faraday, lo consideraré como logro de uno de mis principales objetivos - comunicar a los demás el mismo placer con el que me he encontrado al leer las investigaciones de Faraday.”

Ya avanzado en el gratificante trabajo de estudiar y revisar la temática de este libro, me encontré con otra obra que tiene un título que seduce de inmediato, “The Dreams That Stuff Is Made Of: The Most Astounding Papers of Quantum” (Los sueños de los que está hecha la materia: Los más asombrosos artículos de la Cuántica), disculpen que lo escriba en el idioma original de su autor, Stephen Hawking, último gran científico que concitó la atención y despertó la curiosidad de vastas audiencias por su “Breve Historia del Tiempo”; pues bien, con gran asombro y alegría descubrí que el libro de Hawking es una antología de artículos que presenta la obra de los principales creadores de la teoría cuántica: Niels Bohr, Max Planck, Werner Heisenberg, Max Born, Erwin Schrodinger, J. Robert Oppenheimer y Richard Feynman. Qué gusto coincidir en el propósito y la intención del libro de Hawking al incluir en este libro la obra de Planck y Bohr, además de revisar un buen número de autores que participaron decidida y firmemente en el proceso de creación de la pre-cuántica. Para apreciar la buena física no es necesario ser un genio.

Sólo espero que el lector disfrute y comparta un poco la alegría que me produjo dedicar el periodo sabático que me concedió la Universidad del Cauca a escribir estas conferencias. Si este material, que deseo que se difunda por internet -como hoy es común y fácil- capta la atención de algunos lectores, y en él encuentran una fuente de información o conocimiento sobre la primera etapa de la construcción de la teoría cuántica, estaré muy satisfecho con el resultado de esta obra; y si acaso resulta que este texto motiva al menos a una persona a estudiar física o mecánica cuántica, celebraré el fruto de este trabajo.

Popayán, agosto 08 de 2019.

CONTENIDO

	Pag.
Capítulo 1. LA MODERNIDAD DE LA FÍSICA	1
Evolución de la mecánica clásica a la mecánica cuántica	3
De la física de los cuerpos al concepto de los campos electromagnéticos	11
Del fuego a la termodinámica moderna	14
Capítulo 2. LA RADIACIÓN TÉRMICA Y LA TEORÍA DE LOS CUANTOS	21
Introducción	21
Radiación térmica	21
- Radiación del cuerpo negro	26
- Ley de Stefan-Boltzmann	28
- Ley de Wien	30
Las teorías de Rayleigh y Jeans de la radiación térmica	32
Los trabajos de Max Planck sobre la radiación del cuerpo negro	37
Capítulo 3. LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA Y EL CUANTO DE LUZ	48
Introducción	48
Descubrimiento del efecto fotoeléctrico	49
Avances experimentales	51
- El experimento de Wilhelm Hallwachs	51
- Los experimentos de Lenard	53
- Teoría de Einstein	55
- Los experimentos de Millikan	60
Efecto Compton	61
Capítulo 4. LOS RAYOS MISTERIOSOS	71
Introducción	71
Breve reseña: Desde el efluvio eléctrico al electrón	73
Tubos de descarga eléctrica	75
- Los inicios	75
- El "Huevo eléctrico" del "Abbé" Nollet	76
- Los aportes de Faraday, Grove y Gassiot	77
- El popular tubo de Geissler	78
- Los tubos de Hittorf y de Crookes	80
Los rayos catódicos - I Parte	85
El descubrimiento de los rayos X	87

Capítulo 5. EXPERIMENTOS ASOMBROSOS	96
Introducción	96
Los rayos catódicos - II Parte	98
- Determinación de la relación carga - masa	107
Descubrimiento de la radioactividad natural	116
Tras los rastros de las radiaciones ionizantes	123
La cámara de niebla	130
La búsqueda del núcleo atómico	134
Experimento de la hoja de oro	135
Rutherford encuentra el núcleo atómico	139
Capítulo 6. TEORÍAS ATÓMICAS	149
Introducción	149
- La filosofía y la poesía del átomo	150
El átomo: De la idea al corpúsculo	151
El átomo elemental e indivisible	154
Balmer y la pista oculta de los saltos cuánticos	161
Los saltos cuánticos	167
Capítulo 7. LAS REGLAS DE LA VIEJA TEORÍA CUÁNTICA	178
Introducción	178
Los cuantos: Tema del primer congreso de Solvay	179
Las primeras reglas cuánticas	186
Las reglas cuánticas de Wilson	194
El principio de correspondencia	196
Capítulo 8. LA DUALIDAD DEL MUNDO CUÁNTICO	203
La teoría de Louis De Broglie	204
El experimento de Davisson y Germer	212
El experimento de Thomson y Reid	218
Capítulo 9. EPÍTOME DE LA MECÁNICA CUÁNTICA	223
La ecuación de onda de Schrödinger	223
El principio de incertidumbre de Heisenberg	235
APÉNDICE: Efecto túnel cuántico	243

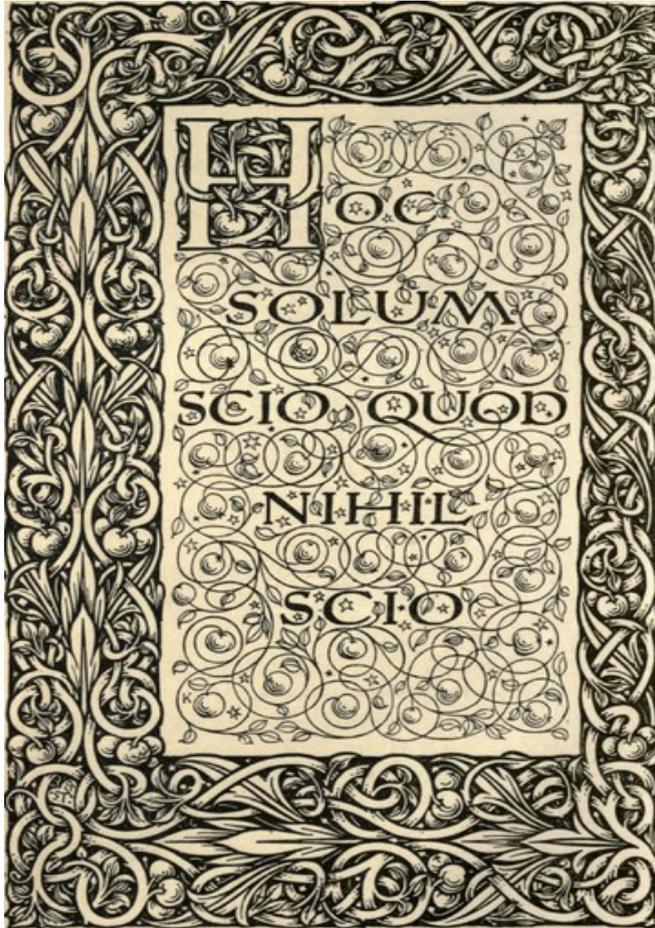
Capítulo 1

LA MODERNIDAD DE LA FÍSICA

En la inmensidad del cosmos, el planeta tierra es menos que una brizna de polvo a la que el astrónomo Carl Sagan poéticamente designó como UN PÁLIDO PUNTO AZUL. Sagan se inspiró en el registro fotográfico de nuestro planeta, hecho por la sonda espacial Voyager 1, el 14 de febrero de 1990, a 6.400 millones de kilómetros de la tierra. Es asombroso que la curiosidad y la capacidad humana hayan logrado entender el comportamiento de la materia, la energía y la naturaleza, para traspasar, con un artefacto construido por su propio ingenio el límite del sistema solar, hasta perderse en la lejanía estelar llevando un disco de oro para ser escuchado en un gramófono con LOS SONIDOS DE LA TIERRA.

Muy buena parte de la tecnología que hizo posible el viaje del Voyager es consecuencia del extraordinario avance científico en las teorías de la física que se presentaron en el breve lapso de tiempo comprendido entre 1900 y 1930. Aunque es discutible en términos cronológicos establecer de manera exacta el periodo de creación de la ciencia que se designa en los libros como FÍSICA MODERNA, hay coincidencia en que se trata de las teorías que dieron lugar a la transición de la física clásica a la física cuántica.

El estado de desarrollo de la física a finales del siglo XIX ya era suficientemente elevado para ser calificado de Moderno; el nivel de interpretación de los fenómenos mecánicos, electromagnéticos y termodinámicos, a la par que los conocimientos matemáticos, alcanzaron tal nivel y profundidad, que se llegó a un estado de optimismo científico que se puede calificar de pretencioso. A manera de pista sobre el espíritu y opinión de la comunidad científica de esa época, se cuenta (aunque no hay plena evidencia) que el famoso Albert Abraham Michelson (premio nobel de 1907 por sus trabajos experimentales en óptica de precisión) afirmó refiriéndose a la física que “parece probable que la mayoría de los principios subyacentes se han establecido firmemente”. Pero quizá, como dijera Isaac Newton sobre la naturaleza, “Lo que sabemos es una gota de agua; lo que ignoramos es el océano”



“Sólo sé que nada sé.” (Sócrates).¹

Así pues, el considerado firme sistema científico de finales del siglo XIX se vio sacudido por asombrosos descubrimientos de fenómenos insospechados. El experimento de Michelson y Morley puso en tela de juicio la validez de la existencia del éter como medio de transporte para la propagación de las ondas predichas en el magistral trabajo de electromagnetismo de James Maxwell; este acertijo lo resolvería en 1905 Albert Einstein, con una teoría tan fascinante como desconcertante para los sentidos del ser humano: que al asumir la

¹ Ilustración tomada del libro “Faraday’s select researches” editado por Ernest Rhys, publicado en 1914 en Londres por J. M. Dent & Sons Ltd.

velocidad de la luz como una constante, explican la existencia del espacio y el tiempo como cantidades cambiantes (que se acortan o dilatan) en función del movimiento. Por otro lado, Heinrich Hertz demuestra, en un experimento, el carácter ondulatorio de la luz de acuerdo con la teoría de Maxwell, y, a la par, en el mismo experimento, descubre una conducta anómala de un tipo de luz (ultravioleta) que produce electricidad en desacuerdo con la misma teoría electromagnética de Maxwell. Además, Wilhelm Röntgen descubre unos enigmáticos rayos que no tenían comparación con nada conocido hasta entonces, y que pasaron a llamarse rayos X. Finalmente, el problema largamente estudiado de la radiación emitida por los cuerpos calientes ponía de manifiesto la incapacidad de las teorías de la física para ofrecer una explicación completa y consistente; este agrietamiento de la teoría, que Paul Ehrenfest acuñaría años más tarde con el sugerente calificativo de la “Crisis del Ultravioleta”, resultó ser el detonante para el más profundo cambio creativo en la física.

Los desafíos de estos secretos de la naturaleza serían resueltos en el curso de los primeros años del siglo XX con la nueva teoría de los cuantos, propuesta inicialmente por Max Planck. Estos cambios en las teorías de la física darán lugar a la transición de la Física Clásica a la Física Cuántica. El trabajo científico de esta etapa de transición es considerado el tema de la Física Moderna.

EVOLUCIÓN DE LA MECÁNICA CLÁSICA A LA MECÁNICA CUÁNTICA

Asumo que es casi imposible encontrar en la historia de las ciencias naturales una obra que supere la majestuosidad y que despierte tanta admiración como la obra de Isaac Newton, ***Philosophiæ naturalis principia mathematica, publicada en Londres el 5 de julio de 1687***. En ese tratado se presentan por primera vez los conceptos de masa, cantidad de movimiento y fuerza, así como la ley de gravitación universal, mediante ecuaciones matemáticas que permiten hacer de forma sistemática las comparaciones entre las predicciones teóricas y las medidas experimentales. El trabajo de Newton representa en su época el *summum* del conocimiento científico, y engloba todos los avances previos en la interpretación de los fenómenos naturales y el movimiento de los cuerpos logrados por Nicolás Copérnico, Johannes Kepler, Tycho Brahe y Galileo Galilei.

PHILOSOPHIÆ
NATURALIS
PRINCIPIA
MATHEMATICA.

Autore ꝑ S. NEWTON, Trin. Coll. Cantab. Soc. Matheseos
Professore *Lucafiano*, & Societatis Regalis Sodali.

IMPRIMATUR.
S. PEPYS, Reg. Soc. PRÆSES.
Julii 5. 1686.

LONDINI,
Jussu Societatis Regiæ ac Typis *Josephi Streater*. Prostat apud
plures Bibliopolas. Anno MDCLXXXVII.

Tomado de: The original uploader was Zhaladshar de Wikisource en inglés. - Transferido desde wikisource a Commons., Dominio público.
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2681838>

Posiblemente, el mejor y para nada exagerado ejemplo de la admiración que genera la obra de Newton lo encontramos en la disertación que presenta Isaac Asimov en el libro “100 preguntas básicas sobre la ciencia”, al reflexionar sobre quién ha sido el científico más grande en la historia:

“Si la pregunta fuese «¿Quién fue el segundo científico más grande?» sería imposible de contestar. Hay por lo menos una docena de hombres que, en mi opinión, podrían aspirar a esa segunda plaza. Entre ellos figurarían, por ejemplo, Albert Einstein, Ernest Rutherford, Niels Bohr, Louis Pasteur, Charles Darwin, Galileo Galilei, Clerk Maxwell, Arquímedes y otros. Incluso es muy probable que ni siquiera exista eso que hemos llamado el segundo científico más grande. Las credenciales de tantos y tantos son tan buenas y la dificultad de distinguir niveles de mérito es tan grande, que al final quizá tendríamos que declarar un empate entre diez o doce.

Pero como la pregunta es «¿Quién es el más grande?», no hay problema alguno. En mi opinión, la mayoría de los historiadores de la ciencia no dudarían en afirmar que Isaac Newton fue el talento científico más grande que jamás haya visto el mundo. Tenía sus faltas, viva el cielo: era un mal conferenciante, tenía algo de cobarde moral y de llorón autocompasivo y de vez en cuando era víctima de serias depresiones. Pero como científico no tenía igual.

Fundó las matemáticas superiores después de elaborar el cálculo. Fundó la óptica moderna mediante sus experimentos de descomponer la luz blanca en los colores del espectro. Fundó la física moderna al establecer las leyes del movimiento y deducir sus consecuencias. Fundó la astronomía moderna estableciendo la ley de la gravitación universal.

Cualquiera de estas cuatro hazañas habría bastado por sí sola para distinguirlo como científico de importancia capital. Las cuatro juntas le colocan en primer lugar de modo incuestionable.”