

# La materia iluminada

De la física de Newton (siglo XVII) a la física cuántica del siglo XXI

Jean-Pierre Kerckhofs y Jean Pestieau

## 1º Introducción

En este artículo haremos un breve repaso de la historia de nuestras concepciones sobre la luz y la materia con el propósito de entender mejor lo que nos dice al respecto la física moderna. Veremos que la física actual unifica no solamente esas dos nociones, materia y luz, sino que también esta unificación se realiza extendiendo a la materia —los cuerpos, corpúsculos masivos— nuestro conocimiento de aquello que se aprendió sobre la luz, y no a la inversa. Como lo escribe Frank Wilczek<sup>1</sup> al principio de su reciente libro<sup>2</sup>: “El antiguo contraste entre la Luz celeste y la Materia terrestre ha sido trascendido en la física moderna. Hay una noción única, y eso se parece más a la idea tradicional de la luz que a la idea tradicional de la materia”.

El objetivo de nuestro escrito es mostrar que la física moderna es perfectamente racional y que no valida para nada el relativismo que permea en la actualidad en diferentes ámbitos. Al mismo tiempo, ella nos obliga a revisar ciertas concepciones existentes. Pero esto no es raro, ya que la historia de las ciencias está llena de eventos que obligan a revisar completamente las concepciones anteriores.

En nuestros días, los fenómenos que ocurren al nivel de lo que llamamos “infinitamente pequeño”, es decir, aquellos que conciernen a las moléculas y a objetos más pequeños aún, están descritos por una teoría generalmente llamada “física cuántica”. A nivel de la enseñanza media y media superior, esta teoría raramente se aborda y cuando se hace, el enfoque a veces es desafortunado. Uno se queda entonces con la impresión de que se trata de “magia”. Esta impresión proviene con frecuencia de la aparición de la noción de probabilidad en un entorno inesperado. Esta noción interviene en efecto por primera vez de manera intrínseca a nivel científico. Intrínseco significa aquí que el azar se introduce en la ocurrencia de los fenómenos. Hasta ahí, el azar y las probabilidades no existían más que a nivel “macro”. Por ejemplo, si un huracán sopla sobre un poblado, no sabemos con anticipación cuántos techos ni cuales van a salir volando. Pero este “azar” no se debe más que a una ignorancia de los detalles de nuestra parte. Si se hubiera estudiado cada casa en detalle, calculado la velocidad del viento, conocido por donde pasarían las ráfagas más violentas a partir de los datos meteorológicos y de la geografía local, etc., todo se podría predecir. En física cuántica, este no es el caso: el azar es intrínseco. Aun si conociéramos las condiciones iniciales, no podríamos predecir con certeza lo que ocurrirá a un cierto electrón.

---

1 Frank Wilczek (1951- ), físico estadounidense, premio Nobel de física 2004.

2 Frank Wilczek, *The Lightness of Being: Mass, Ether, and the Unification of Forces*, Basic Books (2008), Penguin (2010).

Por otra parte, en nuestra sociedad reina en la actualidad un cierto relativismo filosófico. Todo se vale. Para evitar que las personas comprendan realmente en que mundo viven, se les hace creer que éste es incomprensible. Las teorías más “exóticas” parecen valer tanto como otras más establecidas. Los horóscopos ocupan un lugar en los periódicos, aún en los que parecen más serios. En tal situación, hay quienes se aprovechan de la introducción del azar, el cual tiene sustento en un dominio científico, para hacer creer que lo irracional y la ciencia pueden hacer buena pareja.

## 2º Física clásica

Es común desde tiempos inmemoriales el distinguir entre materia y la luz. La materia, por un lado, es vista como definida por objetos que poseen una cierta extensión, una cierta masa. Por ejemplo, un electrón, un caballo, una estrella, etc. Por otra parte, en contraste con la materia, existe la luz que aparece o desaparece, sin permanencia, la cual, como el fuego, debe alimentarse de alguna manera para que se manifieste. Así, el mundo exterior está comprendido por esta dicotomía de la realidad: la materia y la luz. Esta concepción es tan omnipresente, tan invasiva, que ella aparece en el título mismo del último libro<sup>3</sup> del célebre físico Richard Feynman<sup>4</sup> quien sin embargo trabajó en su vida para mostrar la unidad existente entre luz y materia.

Como lo explica Frank Wilczek, “las dicotomías luz/materia y continuo/discreto ya podían ser percibidas por los homínidos dotados de sentidos. Ellas fueron expresadas claramente y discutidas, sin llegar a conclusiones sólidas, por los antiguos griegos. Aristóteles distinguía el fuego y la tierra como elementos primarios de la realidad<sup>5</sup>”.

En el sistema de Isaac Newton<sup>6</sup>, que data del siglo XVII, —ver recuadro 1— la realidad física se caracteriza por los conceptos de espacio, de tiempo, de puntos materiales, de fuerza, es decir de interacción entre puntos materiales. La descripción de la realidad se hace en términos de movimientos en el espacio en el curso del tiempo. La luz misma está compuesta de partículas que se mueven en línea recta formando así los rayos luminosos. De esta manera, la teoría de la luz está de alguna manera unificada a aquella sobre los corpúsculos materiales.

### Recuadro 1

#### **Mecánica de Newton o mecánica clásica**

Newton estableció las tres leyes del movimiento relativas al movimiento de los cuerpos materiales. Partió del caso idealizado de un cuerpo puntual provisto de una masa encontrándose en un cierto punto del espacio a un tiempo  $t$  determinado y eventualmente sometido a la acción de una fuerza sobre él. A partir de esto podemos ser capaces de

3 Richard Feynman, *Electrodinámica Cuántica: la extraña teoría de la luz y la materia*, Madrid, Alianza Editorial, D. L. (2007). Traducción al español de *QED: The Strange Theory of Light and Matter* (1985).

4 Richard Feynman (1918-1988), físico estadounidense, premio Nobel de física 1965.

5 Frank Wilczek, “A Piece of Magic: The Dirac Equation”, en *It Must be Beautiful: Great Equations of Modern Science*, bajo la dirección de Graham Farmelo, Granta Books (2003), p. 132-160. Todas las citas a Wilczek en el presente artículo provienen de este libro, excepto si se dice explícitamente lo contrario.

6 Isaac Newton (1642-1727), matemático y físico británico.

describir, por medio de esas tres leyes, el movimiento de esos cuerpos en el espacio durante el transcurso del tiempo.

1ª ley — En un determinado sistema de referencia inercial [es decir, que no está sometido a fuerza alguna], si un cuerpo permanece en estado de reposo o de movimiento rectilíneo uniforme, significa que él no está sujeto a fuerza alguna.

2ª ley — La fuerza total a la cual está sujeto un cuerpo es igual a su masa multiplicada por su aceleración.

3ª ley — Todo cuerpo A que ejerce una fuerza sobre un cuerpo B experimenta una fuerza de intensidad igual, en la misma dirección, pero de sentido opuesto al del cuerpo B.

Escuchemos lo que dice Albert Einstein al respecto<sup>7</sup>: “Según Newton, los fenómenos físicos deben ser interpretados como el movimiento de puntos materiales en el espacio, movimientos regidos por leyes. El punto material, es el representante exclusivo de la realidad por excelencia, cualquiera que sea la versatilidad de la naturaleza. Innegablemente, los cuerpos perceptibles han dado origen al concepto de punto material; uno se imagina al punto material como análogo a los cuerpos móviles, suprimiendo en los cuerpos sus atributos de extensión, forma, orientación en el espacio, en breve todas sus características “intrínsecas”. Se conserva la inercia [la masa], la traslación y se agrega el concepto de fuerza. Los cuerpos materiales, transformados [...] por la formación del concepto “punto material”, deben sin embargo ser concebidos como sistemas de puntos materiales. Así ese sistema teórico, en su estructura fundamental, se presenta como un sistema atómico<sup>8</sup> y mecánico. Así, todos los fenómenos deben ser concebidos desde el punto de vista mecánico, es decir como simples movimientos de puntos materiales sujetos a las leyes de movimiento de Newton<sup>9</sup>”.

Esta concepción corpuscular fue y sigue siendo extremadamente fecunda. Fue la soberana hasta los trabajos de Michael Faraday<sup>10</sup> y de James Clerk Maxwell<sup>11</sup> en el siglo XIX. Einstein prosigue: “En ese sistema teórico (de Newton), hay una dificultad mayor: ella reside esencialmente en la teoría de la luz, ya que Newton, en total acuerdo con su sistema la concibe también como constituida de puntos materiales. Ya desde entonces se hacía la pregunta irrefutable: ¿dónde quedan los puntos materiales constituyentes de la luz cuando ésta

---

7 Albert Einstein (1879-1955), físico alemán, premio Nobel de física 1921.

8 “Atómico” debe entenderse aquí en términos del largo debate que ha atravesado la filosofía desde la Grecia antigua: algunos consideran a la materia como “continua” y otros como “discontinua”, es decir constituida de “ladrillos básicos” llamados átomos. No se trata todavía entonces de la concepción moderna de átomos constituyentes de las moléculas y que uno encuentra en la tabla de Mendeleiev.

9 Albert Einstein, “La influencia de Maxwell en la evolución del concepto realidad física”, escrito en 1931 en ocasión del centenario del nacimiento de Maxwell (<http://www.d-meeus.be/physique/Maxwell-Einstein-es.html> o <http://www.izt.uam.mx/contactos/n69ne/maxwell.pdf>), en Albert Einstein, *Comment je vois le monde*, Flammarion (1979), p. 171-176. Todas las citas de Einstein en el presente artículo provienen de este libro.

10 Michael Faraday (1791-1867), químico y físico británico.

11 James Clerk Maxwell (1831-1879), físico británico.

es absorbida?” Cabe mencionar que ya en la época de Newton, existía otra concepción de la luz, es decir aquella que consideraba que la luz es un fenómeno ondulatorio.

Pero, ¿qué es una onda? Si dejamos caer una piedra en la superficie del agua, vemos aparecer anillos en ella. ¿De qué se trata? La superficie del agua es perturbada por un movimiento de arriba hacia abajo en el entorno donde cayó la piedra. Este movimiento vertical se transmite gradualmente en todas las direcciones. Esta es la razón de la aparición de círculos concéntricos alrededor del punto donde cayó la piedra y que se desplazan hacia el exterior. Se trata de un fenómeno ondulatorio, oscilatorio. Hay que entender que la onda no corresponde a un desplazamiento horizontal de materia (en el sentido que lo hemos definido), sino a la propagación de una perturbación sobre la superficie horizontal del agua. El movimiento de la materia en nuestro ejemplo es vertical, mientras que la onda se desplaza horizontalmente. Hay un gran número de fenómenos ondulatorios conocidos (el sonido, por ejemplo) que tienen en común una transferencia de energía de forma gradual a velocidades que pueden ser muy diferentes. Christiaan Huygens<sup>12</sup> imaginó, de manera coherente, una teoría ondulatoria de la luz.

Entonces, ¿corpúsculos u ondas? En ciencias, el veredicto experimental es decisivo para desempatar dos modelos. El problema es que el modelo corpuscular y el modelo ondulatorio eran ambos capaces de explicar los fenómenos ópticos conocidos en la época: la propagación rectilínea de la luz, la reflexión, la refracción (desviación de la luz cuando cambia el medio en que se propaga), la descomposición de la luz blanca en diferentes colores, etc. Claro, la refracción, calculada en los dos modelos, predecía razones de velocidades diferentes para la luz cuando ella se desplaza en el aire o en el agua. Pero en esa época, no existía la capacidad de medir la velocidad de la luz en diferentes medios. Imposible entonces de zanjar la discusión. Pero el problema ondulatorio sufría de un grave problema. Todas las ondas conocidas en la época se desplazaban en un medio material. En nuestro ejemplo de más arriba, se trata de la superficie del agua. Los soportes pueden ser cualesquiera: una cuerda, una membrana, el aire en el caso del sonido, etc. Sin embargo, constatamos que la luz nos proviene del Sol y de las estrellas. Parece entonces que atraviesa el vacío y no un medio. He aquí una dificultad que parece insalvable para el modelo ondulatorio. Esta constatación, combinada con el prestigio adquirido por Newton, hizo que en la época el modelo corpuscular tuviera la preferencia.

Sin embargo, en la primera mitad del siglo XIX, varias observaciones minaron este modelo corpuscular. Por una parte, la observación de las interferencias luminosas (ver recuadro 2). En efecto, si se envía un haz luminoso hacia una placa opaca provista de dos pequeños agujeros o rendijas y si recogemos la luz sobre una pantalla colocada atrás de la placa, no se observan dos “manchas” luminosas, como debería corresponder al caso de la luz compuesta de corpúsculos, sino mas bien una alternancia de zonas sombreadas e iluminadas. Esta experiencia había sido realizada ya desde 1800 por el médico británico Thomas Young. Ella puede explicarse perfectamente si admitimos el carácter ondulatorio de la luz, ya que las imágenes en la pantalla corresponden a un fenómeno de interferencia, es decir típicamente ondulatorio. Por otra parte, se pudo medir la velocidad de la luz en el aire o el vacío (300,000 km por segundo) y en el agua (225,000 km por segundo). Sin embargo, el modelo ondulatorio

---

12 Christiaan Huygens (1629-1695), físico neerlandés.

predice que la luz se desplaza más rápido en el aire que en el agua, de conformidad con la observación, mientras que el modelo corpuscular predecía lo contrario. Esto hizo callar de momento al modelo corpuscular.

Resta evidentemente un problema por resolver. ¿Cómo explicar que la luz se desplaza en el vacío? Los físicos imaginaron entonces que el Universo estaba lleno de una sustancia invisible e imponderable (sin masa) que bautizaron como *éter*. Se dice que se trata de una hipótesis *ad hoc*. A los científicos les repugna hacer este género de hipótesis, ya que son difícilmente verificables. Pero parecía ser la única manera de admitir la naturaleza ondulatoria de la luz en tanto que los hechos aparentaban dar razón a este modelo.

## Recuadro 2

### Óptica

En 1704, Newton publicó su tratado llamado *Opticks*. Ahí expuso su teoría corpuscular de la luz, su teoría de la reflexión, la refracción, la difracción de la luz así como su teoría de los colores<sup>13</sup>. Él demostró que la luz blanca está formada de varios colores y propuso que ésta estaba compuesta de corpúsculos mucho más pequeños que los corpúsculos masivos ordinarios.

Él argumentaba que si se proyecta la luz sobre una pared opaca en la cual hay un pequeño agujero, la luz pasaría por el agujero para alcanzar la pantalla detrás de la pared. Se observaría que el punto de emisión A, el pequeño agujero B y el punto iluminado sobre la pantalla C estarían todos sobre una recta, que es lo que se espera si la luz está compuesta de partículas muy ligeras (insensibles al peso que desviaría hacia abajo las trayectorias).

Sin embargo, si uno disminuye el diámetro del agujero en la pared (de tal manera que sea del tamaño de la longitud de onda de la luz proyectada), se encuentra que sobre la pantalla no aparece un punto luminoso, sino un punto luminoso más débil rodeado de un círculo de sombra, él mismo rodeado de un círculo luminoso y así sucesivamente. Esta imagen es típica de una onda (pensemos en la forma de la superficie del agua si se lanza una piedra en un estanque tranquilo). Si el diámetro del agujero es muy pequeño (más pequeño que la longitud de onda de la luz proyectada), entonces no hay más luz que pase. No es sorprendente que en el siglo XIX, en el marco de las ecuaciones de onda de la luz derivadas de las ecuaciones de Maxwell, se tuviera que abandonar la concepción corpuscular de la luz.

No obstante no hay que olvidar que los múltiples éxitos de la óptica geométrica basada en la concepción corpuscular de Newton están a la base de la industria de los lentes, microscopios y telescopios. Entre óptica geométrica (corpuscular) y óptica ondulatoria, hay una invitación a eliminar la contradicción y a tener una concepción unificada de la óptica. Es esto lo que logra hacer la óptica cuántica como se expone magníficamente en el libro de Feynman *Luz y Materia*.

---

13 Ver: <http://bibnum.education.fr/files/Newton-analyse.pdf>.

A principios del siglo XIX, la luz era vista como una vibración del éter. En lo que concierne a la materia, el enfoque de Newton continúa reinando gracias a sus múltiples éxitos en grandes dominios de la física. Las fuerzas entre cuerpos materiales son vistas como fuerzas de interacción a distancia — actuando de manera instantánea (ver recuadro 3). Esto es cierto para la fuerza gravitacional entre dos cuerpos masivos. Pero Coulomb<sup>14</sup> había mostrado en la segunda mitad del siglo XVIII que entre dos corpúsculos cargados eléctricamente, la fuerza de interacción eléctrica es igual a una fuerza de interacción (instantánea) a distancia. Y se formuló entonces la hipótesis de que todas las fuerzas de interacción en la naturaleza son fuerzas de interacción a distancia.

Es entonces que aparece Michael Faraday. Faraday cursó algunos años de la escuela primaria, y se convirtió en obrero trabajando para un encuadernador en Londres a la edad de 14 años. No tenía ningún conocimiento en matemáticas. Debido a su curiosidad, su originalidad y su trabajo meticuloso, se convirtió en el físico y químico experimental más grande del siglo XIX. Contrariamente a los físicos de la época, apasionados de las matemáticas pero no tanto del sentido de la experimentación materialista, él constató que sus experimentos no defienden para nada las misteriosas fuerzas de interacción a distancia. Observó que, en presencia de un imán, si uno salpica una mesa con limaduras de hierro, estos se organizan en surcos como los de un campo cultivado<sup>15</sup>. De ahí dedujo la noción de campo de fuerza que indica que las interacciones actúan localmente de forma gradual y no misteriosamente a distancia.

Veamos cómo Einstein analiza la física de la época: “Es en este momento que se produce un gran cambio radical, aquel que porta el nombre de Faraday, Maxwell, Hertz<sup>16</sup>. En esta historia, Maxwell obtiene la mejor parte. Él explicó que todos los conocimientos de la época en relación a la luz y los fenómenos electromagnéticos reposan en un sistema doble de ecuaciones muy conocidas [...]”.

### Recuadro 3

#### **Ley universal de la gravitación**

Al formular la ley universal de la gravitación en la primera edición (en latín) de los *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* [Principios matemáticos de la Filosofía Natural] en 1687, Newton propuso la hipótesis de interacción entre cuerpos materiales como acción instantánea a distancia porque ella funcionaba muy bien. Pero él sabía que dicha idea no podría dar cuenta de la realidad a nivel fundamental. Así, él mismo escribió: “El que un cuerpo pueda actuar sobre otro a distancia y a través del vacío sin la mediación de alguna otra cosa por la cual esta acción se transmita, es un absurdo tan grande que yo no creo que ningún ser humano por incompetente que sea en materia de filosofía no podría jamás caer en este error”. En la segunda edición (en latín) de los *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* de 1713, él continúa y afirma: “En cuanto a la razón de esas

14 Charles Augustin de Coulomb (1736-1806), físico francés.

15 Para ver un video sobre este experimento entrar a:

[http://www.dailymotion.com/video/x3y4eg\\_experience-limaille-de-fer-aimant-d\\_school](http://www.dailymotion.com/video/x3y4eg_experience-limaille-de-fer-aimant-d_school).

16 Heinrich Hertz (1857-1894), físico alemán.

propiedades de la gravedad, no puedo todavía deducirlas de fenómenos y no haré hipótesis. En efecto, todo aquello que no se deduce de fenómenos debe ser llamado una hipótesis, y las hipótesis, así sean metafísicas, físicas, o se relacionen con las cualidades ocultas o mecánicas, no tienen lugar en la física experimental. En esta filosofía, las propuestas se deducen de fenómenos y se vuelven generales por inducción<sup>17</sup>.”

La ley universal de la gravitación de Newton unifica los movimientos de los cuerpos terrestres y celestes. Ella da cuenta cuantitativamente del efecto del peso de los objetos sobre la Tierra y de la atracción del Sol y de los planetas entre ellos. Según ella, todo cuerpo masivo ejerce una fuerza sobre los otros cuerpos masivos. Esta fuerza entre dos cuerpos masivos se ejerce a lo largo de la recta que los separa y es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia y a cada una de las masas de los dos cuerpos en cuestión.

El “absurdo” mencionado más arriba fue eliminado por la teoría de la gravitación de Albert Einstein de 1916, llamada teoría de la relatividad general, la cual estipula que la existencia del campo gravitacional que cubre todo el espacio y es el mediador de la interacción gravitacional no solamente entre los cuerpos masivos entre sí, sino igualmente con la luz, los rayos X, las ondas de radio, los rayos gamma, en breve, con toda la radiación electromagnética.

Esas ecuaciones expresan los vínculos que unen el campo eléctrico y el campo magnético. Pero se trata una vez más de lo que llamamos campos clásicos. Para entender mejor esta noción, intentemos comprender la expresión de “campo gravitacional”. Todo objeto en la proximidad de la Tierra, cae sobre ella. Newton dice que es una fuerza ejercida por la Tierra (llamada peso) que atrae al objeto. Si hablamos en términos de campo, diremos que el objeto se encuentra en el campo gravitacional de la tierra. Se trata de una zona del espacio donde ésta ejerce una influencia atrayendo a los objetos. En teoría, esta zona es infinita, pero digamos que si uno se encuentra cerca de otro astro, o realmente muy lejos de la tierra, la influencia de ésta es despreciable. Si los planetas giran alrededor del Sol, es debido a que ellos se encuentran en su campo gravitacional, etc. Para regresar a la Tierra, si no hay, por ejemplo, un objeto a 2 metros encima del suelo, no hay evidentemente una fuerza en ese lugar. Pero el campo está presente ahí. Se trata de una noción relativamente abstracta, pero cuyos efectos son muy concretos. Diremos que la Tierra es la fuente de un campo gravitacional, como lo son de hecho todos los cuerpos masivos. Igualmente, toda carga eléctrica es la fuente de un campo eléctrico, ya que ella puede atraer o repeler a otras cargas eléctricas. Al principio, los imanes también eran considerados como fuentes de campo magnético, ya que son capaces de atraer a los cuerpos ferrosos. Más tarde, se comprendió que este fenómeno se derivaba (efecto colateral) de otro y que las verdaderas fuentes de los campos magnéticos eran las partículas cargadas eléctricamente en movimiento u orientadas de manera específica (espín). De ahí se deriva la relación estrecha entre los campos eléctricos y

---

17 Isaac Newton, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (1713), libro III, *Scholium generale*. En español : *Principios matemáticos de la Filosofía natural*, Ediciones Altaya, S.A. Grandes Obras del Pensamiento, 21. 621 págs. Barcelona, 1993.

magnéticos que nos llevan a la fusión entre esos dos conceptos en el de campo electromagnético como fue demostrado por Hendrik Antoon Lorentz<sup>18</sup>.

Maxwell se planteaba preguntas del tipo: “¿si una partícula cargada se desplaza, cómo varía el campo electromagnético que tiene asociado?” Es evidente que, en efecto, cuando una carga eléctrica se desplaza, el campo del cual ella es la fuente, también se desplaza. Pero, ¿la transmisión del desplazamiento se hace de forma instantánea? Maxwell respondió a esta pregunta a partir de sus ecuaciones y mostró que el campo electromagnético se modifica gradualmente y no de manera instantánea. La transmisión se hace de manera ondulatoria y esta nueva onda se bautizó como “onda electromagnética”. Maxwell calculó la velocidad de propagación a partir de sus famosas ecuaciones y obtuvo como resultado: ¡la velocidad de la luz,  $c$ ! Se trató de un avance fundamental de la física del siglo XIX, ya que a partir de ese resultado, no hay sino un paso para considerar que la luz es una onda electromagnética. Y ese paso fue rápidamente superado. En ese momento, todo parecía muy claro: la luz es una onda y conocemos ahora la naturaleza de esta onda, pues ella es electromagnética. Y de un golpe, la hipótesis del éter pudo ser abandonada, ya que las ondas electromagnéticas se desplazan en el vacío. Contrariamente a las ondas mecánicas, ellas no tienen necesidad de un medio.

Las ondas electromagnéticas pueden ser de una frecuencia cualquiera, es decir, tener cualquier oscilación. La luz visible no representa más que una muy pequeña parte del espectro posible. Nuevos rayos correspondientes a toda la gama de ondas electromagnéticas fueron descubiertos a fines del siglo XIX: rayos gamma, rayos X, ultravioletas, infrarrojos, de radio.

Hagamos un inventario de lo discutido hasta ahora. Con Newton, el mundo material era concebido como un conjunto de puntos materiales que obedecen a leyes, las leyes de Newton. Los cambios son descritos y están regidos por ecuaciones. Estos cambios son descritos como movimientos en el espacio. A partir de Maxwell, el mundo real se divide en dos categorías: el mundo mecánico el cual no ha cambiado desde Newton, y el mundo electromagnético al que pertenecen los fenómenos luminosos. Este mundo está descrito por campos cuyo comportamiento está regido por ecuaciones. La distinción entre esos dos mundos muestra el lado necesariamente temporal de esta concepción. Esto no impide a Einstein considerar que “esta modificación de la concepción de la realidad representa la evolución más radical y la más fructífera para la física desde Newton”. Maxwell unificó en una misma teoría a la electricidad, el magnetismo y la óptica. Los campos electromagnéticos unifican fuerzas de interacciones eléctricas y magnéticas, así como la radiación electromagnética. Esto condujo al abandono de la concepción de Newton de la luz en términos de partículas. Wilczek expresa la situación como sigue: “la electrodinámica de Maxwell es una teoría de campos eléctricos y magnéticos, y de la luz, que no hace ninguna mención a la masa. La teoría de Newton (complementada por la teoría del electrón de Lorentz) es una teoría de partículas discretas, donde las únicas propiedades requeridas son la masa y la carga eléctrica”.

### **3º Relatividad**

Todavía a finales del siglo XIX, un experimento realizado por Michelson y Morley<sup>19</sup> llegaría a un resultado sorprendente: ¡la luz parece desplazarse a la misma velocidad con

---

<sup>18</sup> Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928), físico neerlandés, premio Nobel de física 1902.

respecto a no importa qué sistema de referencia! Para comprender el lado sorprendente de esta afirmación, tomemos la analogía siguiente. Si una persona se desplaza en el interior de un tren a una velocidad de 5 km/h y que el tren se desplaza con respecto al suelo a una velocidad de 100 km/h, es evidente que la velocidad de la persona con respecto al suelo será de 105 o de 95 km/h según sea el sentido del desplazamiento. Y bien, si reemplazamos a la persona por un rayo de luz, ya no podremos efectuar este razonamiento que parece sin embargo evidente. ¡La velocidad de la luz será la misma con respecto al tren que con respecto al suelo! En 1905, Einstein se tomó en serio esta propuesta y dedujo todas sus consecuencias. Construyó así la teoría denominada de la “relatividad restringida”. Esta teoría obliga a reconsiderar nuestras concepciones del espacio y del tiempo. Es lógico ya que la velocidad depende de esos dos conceptos. Una consecuencia fundamental de la relatividad restringida es por ejemplo que ¡el transcurso del tiempo no ocurre de manera idéntica para objetos móviles que se desplazan a velocidades diferentes! Por sorprendente que esto pueda parecer, esta propiedad ha sido verificada por los experimentos.

Una vez que hemos dicho esto, hay que saber que las leyes de la relatividad restringida no difieren de aquellas de Newton mas que cuando las velocidades son gigantescas, es decir próximas a la de la luz. La teoría demuestra que es imposible sobrepasar esta velocidad, y aún de alcanzarla por parte de partículas que tengan una cierta masa. Para las velocidades habituales, las predicciones de la relatividad restringida y de Newton son idénticas. Con respecto a nuestro tema, lo que resulta más importante es la famosa fórmula  $E = mc^2$ . Ella significa que la masa es una forma particular de la energía. La consecuencia es que ciertas partículas (con una masa no nula) pueden desintegrarse para dar lugar a la energía cinética y también que la energía cinética puede, en circunstancias precisas, transformarse en partículas. Esto se verifica cotidianamente en los laboratorios. Regresaremos a ello más adelante. Algunos años más tarde, Einstein integraría la gravitación en la teoría de la relatividad, lo que originaría la “relatividad general”. Pero esta es otra historia.

#### **4º Mecánica cuántica**

Es en este contexto que nació la mecánica cuántica, llamada también mecánica de los cuantos o mecánica ondulatoria, la cual es necesaria para describir el mundo a la escala del átomo, es decir dimensiones más pequeñas o iguales a 10 milmillonésimas (1/10,000,000,000) de un metro.

¿Por qué una nueva teoría? Ocurría que varios datos experimentales de finales del siglo XIX y de principios del XX no podían ser explicados por las teorías entonces existentes. Un ejemplo importante y decisivo fue el llamado efecto fotoeléctrico. Si se envían rayos UV (ultravioletas) hacia una placa metálica, se constata que los electrones presentes en el material de la placa son arrancados. Si se estudian estos fenómenos en detalle, uno ve que es imposible de explicar los hechos experimentales si no se admite que los rayos UV están compuestos de “gránulos de energía” indivisibles. Esto puede ser generalizado a todas las ondas electromagnéticas y por lo tanto, también a la luz visible. Uno puede decir entonces que las “partículas de luz” interaccionan con la materia. A ellas se les llamó *fotones*. Esta

---

19 Albert A. Michelson (1852-1931), físico estadounidense, premio Nobel de física 1907. Edward W. Morley (1838-1923), químico estadounidense.

interpretación no cuadra más en el esquema de la física clásica, incluida la de Maxwell, y necesitaba una nueva teoría que sería bautizada como *mecánica cuántica*.

Como se dijo más arriba, cuando se interpretan los resultados experimentales en el marco de esta teoría, uno llega a resultados desconcertantes. Un ejemplo célebre es el famoso experimento llamado de las dos rendijas (aquel de Young del cual hablamos anteriormente para demostrar el carácter ondulatorio de la luz)<sup>20</sup>. Mientras uno piense que la luz es una onda, no hay ningún problema. Pero si uno piensa que ella está compuesta de fotones, esto resulta mucho más desconcertante. En efecto, en ese experimento nosotros somos incapaces de afirmar por cual rendija pasó el fotón. Peor aún (para nuestro buen sentido), estamos obligados a admitir que es imposible considerar la trayectoria de un fotón desde la fuente hasta la pantalla. Hasta hace poco tiempo se decía con frecuencia que el fotón, ¡pasaba por ambas rendijas a la vez! Peor aún: ¡uno puede efectuar el mismo razonamiento para el electrón! En efecto, el experimento de Young (en todo caso, su equivalente) puede ser realizado con electrones, el cual, de hecho, fue realizado en los años 1930's con resultados similares. Y uno podía escuchar hasta hace poco que ¡el electrón había pasado por las dos rendijas!

Este experimento también permite entender la intrusión de las probabilidades en el corazón mismo de la Naturaleza. Para esto es necesario detenerse un poco en el asunto. La luz está compuesta de partículas (de otra manera, no habría efecto fotoeléctrico). Sin embargo, cuando se observa su desplazamiento, uno constata un fenómeno ondulatorio. En 1924, Louis de Broglie<sup>21</sup> propuso que las otras partículas conocidas (electrones, protones...) deberían comportarse de la misma manera. En el alboroto, Davisson<sup>22</sup> y Germer<sup>23</sup> realizaron, en 1927, un “experimento de Young” con un haz de electrones. Y observaron un resultado completamente similar: ¡*interferencias*! Un comportamiento ondulatorio puede entonces ser atribuido a las partículas. Esto llevó a hablar en su momento de “dualidad onda-partícula”.

Pero, ¿cómo interpretar entonces esta situación? En la física clásica, cuando dos puntos materiales idénticos (misma masa, misma carga eléctrica) se encuentran en condiciones iniciales idénticas, su evolución posterior será perfectamente idéntica. Así, si dos canicas idénticas reciben un mismo impulso en un mismo lugar y si ellas tienen la misma velocidad inicial, ellas se encontrarán exactamente en la misma posición después de un tiempo determinado. Este no es evidentemente el caso a nivel sub-molecular. En efecto, en el experimento de Young (de las dos rendijas), todas las partículas idénticas (electrones, por ejemplo) se encuentran en las mismas condiciones iniciales. Sin embargo, algunas llegan a un lugar de la pantalla y otras a otra parte. La interpretación que se le da es la siguiente. Cada partícula tiene asociada una función de onda. La evolución de esta función puede ser calculada a partir de una ecuación. A partir de esta función de onda es posible calcular la probabilidad de presencia de la partícula en un entorno y un instante determinados. Esto permite comprender los resultados del experimento de Young. Cada partícula considerada tiene la misma función de onda y por lo tanto la misma probabilidad de encontrarse en uno u

---

20 Ver por ejemplo: <http://www.reflexiencies.com/dossier/97/lumiere-sur-la-lumiere/3/1-experience-des-trous-d-young/>.

21 Louis de Broglie (1892-1987), físico francés, premio Nobel de física 1929.

22 Clinton Joseph Davisson (1881-1958), físico estadounidense, premio Nobel de física 1937.

23 Lester Halbert Germer (1896-1971), físico estadounidense.

otro lugar. Pero, si yo tengo un 20 % de probabilidades de ganar la lotería, seguramente ganaré en promedio una vez de cada cinco ocasiones. Para las partículas, no se trata de ganar o perder, sino de encontrarse en uno u otro lugar (hay mucho más que dos posibilidades). Los cálculos muestran que cada partícula tiene una gran probabilidad de llegar a un cierto lugar de la pantalla, una probabilidad más débil de hacerlo a otra parte, y aún una probabilidad nula de llegar a otro. Dado el gran número de partículas idénticas involucradas, muchas llegan a un lugar de gran probabilidad, menos a las zonas de probabilidad más débil y ninguna a donde la probabilidad es nula.

A partir de la función de onda uno puede perfectamente reproducir los resultados experimentales. Pero el precio a pagar es la introducción de probabilidades. No se puede hablar más con certeza del destino de una partícula. La introducción de este indeterminismo nunca sería aceptada por Einstein quien habría de emprender querellas filosóficas interminables sobre el materialismo y el idealismo. Damos como referencia<sup>24</sup> los puntos de vista cruzados de dos grandes físicos, V. Fock<sup>25</sup> y N. Bohr<sup>26</sup> sobre este asunto, dado que ellos son de calidad. Dichos argumentos datan de 1957-1959.

Más allá de los problemas epistemológicos, resta una dificultad para la mecánica cuántica. En su formulación inicial, ella no era relativista. Esto significa que ella no toma en cuenta las leyes de la relatividad restringida. En este sentido, no puede describir de manera completa el mundo que nos rodea.

Cuando decimos que la mecánica cuántica no toma en cuenta las leyes de la relatividad restringida, estamos simplificando las cosas. Decimos que ella no integra en su formulación las ecuaciones de la relatividad restringida. Pero ella está obligada a tener en cuenta el hecho de que las partículas de luz (los fotones) se desplazan a la velocidad de la luz. Por lo tanto, los fotones deben ser necesariamente de masa nula. Por el contrario, la relatividad restringida impone que toda partícula masiva (como el electrón o el protón) deben desplazarse menos rápidamente que la luz.

## 5° Teoría cuántica de campos

Independientemente de las querellas filosóficas, lo que no es satisfactorio de la mecánica cuántica original, es que ella no incorpora los conceptos relativistas.

La mecánica cuántica no relativista aplicada al átomo, y particularmente al electrón, fue inventada por Schrödinger<sup>27</sup> y Heisenberg<sup>28</sup>. Ella data de 1925. Fue extendida a la mecánica cuántica relativista en 1928 por Dirac<sup>29</sup> a través de la llamada ecuación de Dirac, todo un monumento de la física cuántica del siglo XX. Originalmente, estaba basada en el postulado de que los electrones tienen una existencia eterna: ni son producidos, ni desaparecen. Pero al mismo tiempo, ella fue capaz de predecir la existencia de una partícula de carga eléctrica opuesta a la del electrón. Esta nueva partícula, llamada *positrón*, es llamada la antipartícula del electrón, y fue descubierta en 1932. Más aun, experimentalmente ocurre que, de la misma

---

24 Ver discusión entre V. Fock y N. Bohr en [http://www.d-meeus.be/physique/Fok-Bohr\\_1957-59.html](http://www.d-meeus.be/physique/Fok-Bohr_1957-59.html).

25 Vladimir Fock o Fok (1898-1974), físico soviético.

26 Niels Bohr (1885-1962), físico danés, premio Nobel de física 1922.

27 Erwin Schrödinger (1887-1961), físico austriaco, premio Nobel de física 1933.

28 Werner Heisenberg (1901-1976), físico alemán, premio Nobel de física 1932.

29 Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984), físico británico, premio Nobel de física 1933.

manera que los fotones son creados y aniquilados, los electrones también se crean y aniquilan cuando se dispone de la energía cinética (energía de movimiento) suficiente. Así, dos fotones que chocan con una energía cinética de al menos dos veces la masa del electrón multiplicada por el cuadrado de la velocidad de la luz (recordar la fórmula,  $E = mc^2$ ) pueden aniquilarse y crear un electrón y un positrón. De manera inversa, un electrón y un positrón que chocan pueden aniquilarse y producir 2, 3, 4... fotones. Todas las partículas elementales (fotón, electrón, protón, muón, etc.) poseen esta característica fundamental de aniquilarse y de crearse mediante las interacciones entre ellas. Y en cada interacción entre ellas se producen esas partículas.

En la física de Newton y sus sucesores, el mundo estaba descrito en términos de trayectorias deterministas de las partículas. En la física cuántica, que toma en cuenta a la relatividad y que por lo tanto es la única estrictamente correcta, los procesos físicos se describen en términos de creación y aniquilación de partículas cuando ocurren interacciones entre ellas. Aquí, la energía de masa ( $mc^2$ ) se transforma en energía cinética, y a la inversa. Para los físicos del siglo XXI que trabajan en los colisionadores de partículas como el LHC (por las siglas en inglés para Gran Colisionador de Hadrones) en el CERN, Ginebra, esta es una evidencia de la vida cotidiana<sup>30</sup>. Esta manera de ver a las partículas es también esencial para entender cómo funciona el Big Bang<sup>31</sup>.

La teoría que da cuenta de los fenómenos que acabamos de describir se llama *Teoría cuántica (relativista) de campos*, la cual puede decirse que nació en 1927 con el artículo fundador de la electrodinámica cuántica: *La teoría cuántica de la emisión y de la absorción de la radiación (electromagnética)*. Obra de Dirac, esta teoría fue aplicada en primer lugar solamente a los fotones. Posteriormente se desarrolló y fue aplicada a las demás partículas elementales como el electrón (ver recuadro 4). En palabras de Frank Wilczek, este propósito se puede ilustrar como sigue: “pocas observaciones son tan comunes como aquellas donde la luz puede ser creada a partir de la falta de luz, por ejemplo mediante una lámpara de bolsillo [...] o suprimida o aniquilada [...]. Y traducida en el lenguaje de los fotones, esto significa que la teoría cuántica de las ecuaciones de Maxwell es una teoría de la creación y de la destrucción de partículas (fotones). En realidad, el campo electromagnético aparece, en la teoría de Dirac, en primer lugar como un agente de creación y de destrucción. Las partículas —los fotones— que observamos, resultan de la acción de este campo, que es el objeto fundamental. Los fotones van y vienen, el campo permanece. La fortaleza completa de este desarrollo parece haberse escapado a Dirac, y a todos sus contemporáneos por un cierto tiempo, quizás precisamente a causa del aparente caso especial de la luz (¡la dicotomía!) Pero en realidad se trata de una construcción general, la cual puede aplicarse también al objeto que aparece en la ecuación de Dirac, el electrón”.

Lo anterior, ilustra bien el sentido de la teoría cuántica de campos: “A la vez, las partículas y la luz son *epifenómenos*, manifestaciones superficiales de realidades más profundas y permanentes, los campos cuánticos. Esos campos permean todo el espacio y en ese sentido son continuos. Pero las excitaciones que ellos crean —sea que los reconozcamos como partículas de luz o como partículas de materia— son discretas”. En estricto sentido, no

---

30 En 2011, los detectores de los experimentos del LHC registraron millones de billones de colisiones de un protón contra otro protón, los cuales condujeron a la creación de un número aún mayor de partículas.

31 Ver por ejemplo: Simon Singh, *Big Bang*, Editorial Intervención Cultural, Barcelona 2008.

hay espacio vacío, no hay un vacío en la física cuántica: “La incertidumbre cuántica, combinada con la posibilidad de procesos de creación y de destrucción, implican un vacío pleno de actividad. Los pares de partículas y de antipartículas efímeras, nacen y mueren”.

#### Recuadro 4

### Partículas y Campos

La teoría cuántica relativista de campos pone por delante el concepto de campos que permiten entender a la materia de una forma unificada. El concepto de partículas queda subordinado al de campos. He aquí lo que escribe S. Weinberg<sup>32</sup>: “La teoría de campos cuánticos fue concebida originalmente para ser simplemente la teoría cuántica de campos. Dicho de otra manera, cuando la mecánica cuántica fue desarrollada, los físicos ya conocían diferentes campos clásicos, especialmente el campo electromagnético. ¿Qué más habrían podido hacer sino la cuantización del campo electromagnético de la misma forma que habían cuantizado la teoría de partículas comunes? [...] La teoría cuántica de partículas para los electrones fue puesta a punto al mismo tiempo, y hecha relativista por Dirac en 1928-1930. Durante un tiempo, numerosos físicos pensaron que el mundo se componía a la vez de campos y de partículas: el electrón es una partícula, descrita por una versión invariante relativista de la ecuación de Schrödinger, y el campo electromagnético es un campo, aún si sus cuantos se comportaban también como partículas. [...] En su forma madura, la idea de la teoría cuántica de campos es que los campos cuánticos son los ingredientes básicos del universo, y las partículas no son más que paquetes de energía y de cantidad de movimiento de los campos. [...] La teoría cuántica de campos conduce entonces a una visión más unificada de la naturaleza que la antigua interpretación dualista en términos de campos y de partículas. Aquí nos encontramos con una ironía. Aún cuando la batalla ha terminado y que el viejo dualismo que trataba a los fotones de manera totalmente diferente que a los electrones está, yo pienso, definitivamente muerto y no regresará jamás, es un hecho que ciertos cálculos efectivamente son más fáciles de realizar en el viejo esquema de las partículas<sup>33</sup>.”

Es interesante notar lo siguiente:

1. Las relaciones básicas de la mecánica cuántica no relativista (esencialmente la ecuación de Schrödinger y las relaciones de incertidumbre de Heisenberg) pueden ser obtenidas a partir de la teoría cuántica relativista de campos en el límite en que los corpúsculos masivos considerados (electrones, protones...) se mueven con velocidades pequeñas comparadas con la velocidad de la luz,  $c$ .
2. Las ecuaciones de Newton pueden ser obtenidas de la mecánica cuántica no relativista cuando las relaciones de incertidumbre de Heisenberg son ampliamente satisfechas en el siguiente sentido: el producto de la imprecisión sobre la cantidad de movimiento de un cuerpo dado y de la imprecisión en la posición es mucho más grande

32 Steven Weinberg, físico estadounidense, premio Nobel de física 1979.

33 Steven Weinberg, *What is Quantum Field Theory, and What Did We Think It Is ?* ([http://arxiv.org/PS\\_cache/hep-th/pdf/9702/9702027v1.pdf](http://arxiv.org/PS_cache/hep-th/pdf/9702/9702027v1.pdf)), 1997.

que  $h$ , la constante de Planck<sup>34</sup>. Por el contrario, es necesario utilizar la mecánica cuántica cuando el producto de esas dos cantidades es del orden de magnitud de  $h$  (la cantidad de movimiento de un cuerpo es el producto de su masa por su velocidad).

## 6º Conclusión

Para comprender de manera moderna lo que es la materia, es necesario entender primero lo que es la luz y sobretodo su propiedad de faro: la luz se “crea” (emite) y se “destruye” (absorbe) cuando entra en contacto (o se pone en interacción) con lo que se llama vulgarmente materia, a saber los corpúsculos masivos, principalmente electrones. Este fenómeno de absorción y de emisión es tan común que generalmente uno no le pone mucha atención después de miles de años. Lo que hace única a la luz, es que ella se compone de partículas llamadas fotones, los cuales no tienen masa. Es por esta razón que uno puede crear muy fácilmente a las “partículas de luz” (esto es evidentemente un fenómeno de los más comunes en la vida cotidiana) mientras que, por otra parte, es necesario invertir energías colosales para crear por ejemplo a los electrones. Este fenómeno está reservado a los aceleradores de partículas o a fenómenos muy violentos de la naturaleza, es decir, que tienen lugar por ejemplo a nivel de las estrellas. La materia que tiene un cierto peso o masa no desaparece o no es emitida con las energías de la vida cotidiana, aún con las energías liberadas por los explosivos clásicos (como por ejemplo, la dinamita). Esta es la razón por la cual, la luz puesta a un lado, la teoría cuántica relativista de los campos no es evidente en la vida cotidiana.

El Universo está constituido fundamentalmente de campos. Las partículas que observamos (fotones, electrones, protones, etc) son una especie de producto de esos campos en circunstancias particulares. **La creación y la destrucción de partículas constituye el fenómeno fundamental de la física.** En ese sentido, podemos ver que la distinción tradicional de la luz/materia no está justificada: los electrones como los fotones se crean y se destruyen en función de ciertas condiciones energéticas precisas. Son, como lo dice Wilczek, epifenómenos. La teoría cuántica de campos difícilmente puede ser puesta en tela de juicio. No solamente ha sido verificada de manera cotidiana en los laboratorios especializados, sino más aún, ella posee numerosas aplicaciones en nuestro mundo moderno<sup>35</sup>.

Si esta preponderancia de los campos es aceptada, todos los aspectos “extraños” de la física cuántica se difuminan. En efecto, no es necesario invocar a electrones que pasan por dos rendijas a la vez. En el experimento equivalente al de Young, los electrones del haz inicial son destruidos y otros electrones aparecen en el detector. No hay nada más de misterioso ahí.

---

34 Max Planck (1858-1947), físico alemán, premio Nobel de física 1918.

35 Dos ejemplos: (a) la explicación de la tabla de Mendeleiev (1869) que permite la clasificación de los elementos químicos. La explicación se hace en términos de la mecánica cuántica por medio de la descripción de la dinámica de las capas electrónicas en los átomos, pero también mediante el principio de exclusión de Pauli cuya justificación es inherente a la teoría cuántica de campos. Dicha teoría está en la base de toda la química: (b) los relojes atómicos (con frecuencia de Cesio): estos son relojes que utilizan la perennidad y la inmutabilidad de la frecuencia  $\nu$  (energía =  $E = h \times \nu$ ) de la radiación electromagnética emitida por un electrón cuando salta de un nivel de energía a otro en el átomo para asegurar la exactitud y la estabilidad de la señal oscilatoria que ellos producen. Uno de sus principales usos es el mantenimiento del tiempo atómico internacional que es la escala de referencia del tiempo. Sin tales relojes basados en la física cuántica relativista, el mundo actual estaría paralizado (GPS, GMS, satélites, organización del tráfico aéreo, marítimo y carretero, etc).

Tampoco es necesario invocar a una dualidad “onda-corpúsculo” cualquiera. En los detectores se detectan sólo corpúsculos y nada más. Uno evoca a las ondas cuando se refiere a un comportamiento colectivo de partículas. Por supuesto, lo que resulta desconcertante para un ser humano, es que no estamos habituados a razonar de esta forma. A nuestra escala, la materia parece ser perenne. En realidad, aquí también se trata de un epifenómeno. ¿Debemos sorprendernos de aquello que nos parece desconcertante? Realmente no. Como lo dice Wilczek: “nosotros fuimos esculpidos por la evolución para percibir aspectos del mundo que son, de una manera u otra, útiles para nuestra supervivencia y nuestro éxito reproductivo”.

En breve, si la física moderna nos sorprende a veces a nosotros los seres humanos, ella no tiene nada de irracional y no justifica ninguna elucubración “a la Bogdanov” y otros fantasiosos a falta de sensacionalismo. Por el contrario, el hecho de que ella nos sea entendible dice mucho del nivel de comprensión del mundo que hemos alcanzado hasta el presente. La teoría cuántica de campos evocada aquí es la base de la física de las interacciones fundamentales del siglo XXI<sup>36</sup>. Ella ha tenido éxitos innegables comprobables a partir de la comparación precisa entre la teoría y los experimentos. Ella está a la base de la visión materialista contemporánea del mundo ya sea en la física, en la química y en la biología. Integrar la gravitación dentro de esta visión del mundo, es decir a la relatividad general en su esquema, es uno de los grandes desafíos de la física del siglo XXI. Otro de los grandes desafíos es el de descubrir el origen de la masa de las partículas elementales. Esta es precisamente la tarea principal del LHC en Ginebra.

**Jean-Pierre Kerckhofs** es profesor de física en la enseñanza secundaria y presidente de la APED (Llamado por una educación democrática, Bélgica).

**Jean Pestieau** es profesor emérito de física de la Universidad de Lovaina, Bélgica y miembro correspondiente de la Academia Mexicana de Ciencias.

---

36 F. Wilczek, “Quantum Field Theory”, *Review of Modern Physics*, vol. 71, 1999, p. S85-S95; [http://www.frankwilczek.com/Wilczek\\_Easy\\_Pieces/094\\_Quantum\\_Field\\_Theory.pdf](http://www.frankwilczek.com/Wilczek_Easy_Pieces/094_Quantum_Field_Theory.pdf).