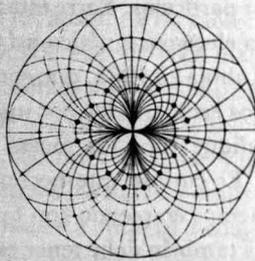
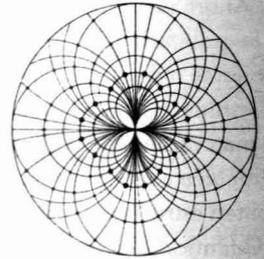
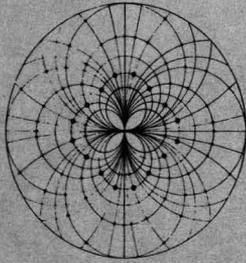


ALGO DE LUZ SOBRE LA MATERIA

Luis de la Peña y Ana María Cetto



1. ¿Es materia la luz?

Pocas preguntas tan breves y llanas como ésta permiten tan de golpe vislumbrar los profundos cambios que el concepto de materia (y el de luz) ha ido sufriendo con el desarrollo del conocimiento físico en los últimos tres o cuatro siglos. No es nuestra intención revisar aquí con detalle esta cuestión, por mucho que nos pueda servir de ejemplo para desarrollar algunas ideas en torno a las nociones que de la materia y su comportamiento a nivel fundamental nos brinda la física contemporánea. Sin embargo, vale la pena recordar brevemente que en la *Óptica* que Isaac Newton escribió como resultado de sus muchos años de observación y experimentación con la luz —obra con la que creó la ciencia de la óptica, así como con sus *Principia Mathematica* creó la mecánica clásica—, el autor argumenta que la luz debe entenderse como compuesta por pequeñísimos corpúsculos que viajan por el vacío —o a través del aire o de algún medio transparente. Autor también de la Teoría de la Gravitación Universal, Newton intuyó que sus corpúsculos luminosos deben ser afectados por los campos gravitatorios y predijo a partir de ello el fenómeno de la desviación de la luz por las estrellas.¹

¹ El famoso experimento mediante un eclipse solar realizado durante el año de 1919 para comprobar la Teoría General de la Relatividad tenía una intención enteramente similar: medir la desviación de la luz que pasa rasando una estrella. La diferencia es —y en esto reside la importancia de su realización— que la teoría de Einstein predice un ángulo de desviación do-

En esta visión, que reinó hasta el siglo XIX, la luz es materia capaz de viajar por el vacío. Por justicia debemos añadir que el propio Newton moduló su teoría, para proponer finalmente que entendiéramos la luz como un complejo constituido por corpúsculos muy particulares, cuya propagación genera una vibración —una onda— que los acompaña y es parte integral del fenómeno luminoso. Sin embargo, este aspecto fue básicamente dejado de lado por sus continuadores, a favor de una interpretación puramente corpuscular.

A principios del siglo pasado algunos experimentadores —entre quienes destaca el físico y médico inglés Thomas Young (1773-1829)— demostraron la existencia de fenómenos luminosos que *sólo* pueden entenderse considerando la luz como una onda viajera.² Estos y otros trabajos —como los del francés Augustin Fresnel (1788-1827), quien desarrolló la correspondiente descripción teórica— condujeron a los físicos a considerar finalmente la luz como un fenómeno ondulatorio. Pero si la luz es una onda que puede viajar por el vacío —por ejemplo, por los grandes espacios intersiderales— y una onda es una vibración de *algo*, entonces el vacío debe contener ese *algo*: ¡la luz ha dejado de ser

ble del que da la teoría newtoniana. El experimento confirmó, como es bien sabido, la predicción relativista. Pero también confirmó el alcance de la profunda visión de Newton.

² Por ejemplo, si se hace coincidir dos haces luminosos que provienen de sendas rendijas delgadas, se produce un patrón con zonas en que *no* hay luz, alternadas con zonas luminosas. Este es un fenómeno típicamente ondulatorio (y llamado de interferencia) que no se presenta con corpúsculos, pues la llegada de un segundo corpúsculo no puede cancelar la del primero.

materia para transformarse en onda, pero el vacío se ha llenado! A este *algo* capaz de servir de asiento a las vibraciones que constituyen la luz se le llamó *éter*, palabra con la que Aristóteles designa la sustancia de la que están hechos los cielos.

Décadas más tarde se hizo posible dar respuesta a la intrigante y vieja pregunta: la luz es ondas, pero ¿ondas de qué? Por ejemplo, cuando tiramos una piedra en la fuente, vemos ondas en el agua; cuando hablamos, producimos ondas acústicas que hacen vibrar al aire, y así sucesivamente. En el caso de la luz, el éter está vibrando, pero, ¿qué es lo que lo hace vibrar? James Clerk Maxwell, el gran físico escocés (1831-1879), dio una respuesta profundamente original e inesperada: la luz es un fenómeno electromagnético. En palabras simples, la luz que vemos (y la que no vemos, como lo rayos X o los gama, la radiación infrarroja, etcétera) no es sino una vibración eléctrica sumamente rápida aunada a otra magnética de la misma frecuencia, que viajan por el espacio reproduciéndose la una a la otra; el éter es el asiento omnipresente de estas vibraciones electromagnéticas.

Algunos años más tarde el joven físico de origen alemán Albert Einstein (1879-1955) percibe que la noción de éter es superflua (además de contradictoria, cosa que se sabía) y propone deshacerse de ella.³ La luz queda como una simple vibración electromagnética y el vacío recupera su carácter de mero espacio o arena en la que ocurren los fenómenos: la materia ha perdido a ambos como elementos suyos.

Pero las cosas no se quedan ahí. Nuevamente el joven Einstein y en el mismo año de 1905, es el primero en lanzar la física por caminos insospechados. Con argumentos simples que la brevedad de estas páginas impide reproducir, hace ver que para la comprensión de ciertos fenómenos asociados a la luz, debemos aceptar que ésta posee una estructura granular.⁴ La estructura continua y el comportamiento ondulatorio que la física clásica asigna a la luz —y, más en general, a la radiación electromagnética— se obtienen al considerar simultáneamente un gran número de estos gránulos, es decir, son un resultado estadístico que se obtiene al trabajar con sistemas macroscópicos. Desde entonces concebimos a la luz como constituida por paquetitos de energía electromagnética de cierta frecuencia, que al interactuar individualmente con la materia se comportan como corpúsculos (llamados fotones). Sin embargo, estos “corpúsculos” deben ser entendidos precisamente como energía, no como materia: la luz es un campo —un disturbio, si se prefiere— puramente electromagnético, capaz de propagarse por el vacío con la máxima velocidad que puede darse en la naturaleza.⁵

³ La Teoría (restringida) de la Relatividad que propone entonces (1905) elimina todo vestigio de la noción de espacio absoluto contenida en la mecánica newtoniana. El éter era una especie de asiento para los movimientos y todo movimiento respecto de él debía ser absoluto, en contradicción con las nociones relativistas.

⁴ De entre ellos, mencionemos el efecto fotoeléctrico (emisión de electrones por superficies metálicas iluminadas) y el efecto Compton (enrojecimiento de la luz al ser dispersada por los cuerpos). Tanto Einstein como Compton recibieron el premio Nobel de física por la explicación teórica de estos efectos en términos de *corpúsculos* de luz llamados *fotones*.

⁵ Como es sabido, la Teoría de la Relatividad demuestra que ningún cuerpo *material* puede viajar con velocidad que exceda la de la luz en el vacío, la que así se convierte en la velocidad límite de la naturaleza. Nótese que la luz alcanza esta velocidad precisamente porque *no es materia*.

2. La estructura de la materia

Que la materia está compuesta de átomos y éstos, a su vez, de partículas más elementales que tienen su propia identidad, son conocimientos relativamente recientes dentro de la física. Esto puede parecer sorprendente si se recuerda a Demócrito y los racionalistas griegos, quienes ya hablaban de los átomos como los elementos indestructibles que constituyen la materia. Sin embargo, como conocimiento científico y no mera especulación, la idea de la naturaleza atómica de la materia aparece hasta inicios del siglo XIX, básicamente como fruto de una vida entera consagrada a la ciencia por el químico inglés John Dalton (1766-1844). La idea evoluciona y poco a poco adquiere popularidad entre los químicos y entre cierta especie de físicos de vanguardia, aunque un sector importante de investigadores la siguen considerando un modelo útil para propósitos prácticos pero artificioso y sin contraparte empírica.⁶

La raíz de la dificultad estriba en el carácter puramente especulativo que seguía teniendo la noción atómica, pues aunque las teorías físicas y químicas basadas en ella conducían a resultados válidos, se carecía aún de una prueba *directa* y *experimental* de la realidad del átomo. El problema se resolvió ya entrado nuestro siglo cuando el físico francés Jean Baptiste Perrin (1870-1942), partiendo de resultados teóricos obtenidos *para este fin* por Einstein (nuevamente en 1905) y otros similares de Smoluchowski, pudo *medir* en 1907-1908 el diámetro de las moléculas y determinar el número de Avogadro. Es interesante notar que el físico inglés Joseph John Thomson (1856-1940) ya había descubierto los electrones desde 1897 como los componentes de la materia que dan lugar a las corrientes eléctricas; de hecho, Thomson consideró los electrones como constituyentes de los átomos. Dentro de esta corriente de vanguardia, vale recordar también que el gran físico teórico holandés Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928) llegó incluso a desarrollar una teoría atómica en términos electrónicos durante la última década del siglo pasado.

Con la confirmación del carácter real de los átomos una nueva interrogante se abría a los físicos: ¿qué son, cómo están hechos los átomos? Pronto se aprendió que la física clásica no era directamente aplicable a tales sistemas, pues conducía a problemas insolubles y contradicciones inaceptables. Sin embargo, para 1913, el joven físico danés Niels Bohr (1885-1962) tenía ya elaborada la que vino a ser la primera teoría cuántica de la materia, es decir, la primera teoría atómica que se salía del marco clásico y buscaba dar solución al problema planteado, en términos de una nueva física. Sin entrar en detalles, baste decir que con el tiempo estos esfuerzos cristalizaron con la construcción de la *mecánica cuántica* actual, teoría que permite describir con impresionante precisión el comportamiento *estadístico* de los microsistemas, como átomos, moléculas, etcétera.

⁶ Entre los físicos del siglo pasado hay figuras como Maxwell o Ludwig Boltzmann (físico austriaco, 1844-1906) que utilizan la hipótesis atómica como base de sus investigaciones de la teoría del calor y de los gases. Pero existen también figuras señeras como Friedrich Wilhelm Ostwald (químico ruso-alemán creador de la fisicoquímica, 1853-1932) o Ernst Mach (físico austriaco, 1838-1916), que fueron convencidos y militantes antiatomistas.

Nuestra intención en lo que sigue del presente trabajo es comentar en forma simple algunas de las peculiaridades de esta teoría y de la representación que del mundo y de la materia nos ofrece. Algunas conclusiones habrán de resultar antiintuitivas para el lector; valga ello como indicio de que entre más profundizamos en la naturaleza, más rica se muestra ante nosotros.

Antes, una observación. La física contemporánea va más allá de la noción atómica; no sólo descompone al átomo en sus ingredientes básicos —los electrones y el núcleo atómico— sino que considera a éste como compuesto a su vez de protones y neutrones, para pasar a continuación a estudiar la constitución de estas partículas y otras similares que pueblan la naturaleza —las que en conjunto son llamadas *partículas elementales*. Hasta la fecha se ha aprendido que hay partículas como los electrones, los neutrinos, etcétera —los *leptones*—, que son de verdad “elementales”. El resto de ellas, como los protones, neutrones, piones, etcétera —todos los *hadrones*—, resultan estar compuestas de otras más primitivas, a las que se les llama *quarks*.⁷ Podemos decir que la materia prima del Universo son los quarks y los leptones.

El estudio del comportamiento de estas partículas y de sus interacciones es lo que se llama sin mucha pompa *física de partículas elementales*. A partir de aquí la física se organiza jerárquicamente según la complejidad estructural: teoría de partículas elementales, física nuclear (que estudia el núcleo atómico), física atómica, física molecular. Seguirían después las ramas de la física que estudian agregados de átomos o moléculas, como la física del estado sólido, la de la materia condensada (estudio de metales, cristales y demás), etcétera. Todas estas ramas encuentran en la mecánica cuántica su teoría fundamental, y a ella se agrega el conjunto de leyes específicas que caracterizan a los diversos sistemas. Al pasar al nivel macroscópico, la física se torna clásica en sus diversas especialidades (fluidos, calor, mecánica de cuerpos indeformables o deformables, etcétera), hasta alcanzar el nivel cosmológico en ramas como la astronomía o la astrofísica. A este nivel la teoría de la relatividad adquiere una relevancia singular, aunque en ocasiones es imprescindible aun a escala microscópica. Tanto en el nivel microscópico como en el macroscópico, y tanto con sistemas clásicos como cuánticos, suele suceder que por la naturaleza del problema los estudios estadísticos sean más apropiados que los detallados; de esta necesidad surge la física estadística. Por ejemplo, visto el calor como generado por el movimiento desordenado de agitación molecular, es claro que un tratamiento estadístico de tales movimientos puede servir de excelente base para el estudio de la termodinámica y de las propiedades térmicas de volúmenes macroscópicos de gases. Incluso la teoría así construida resulta más fundamental y más general que la que surge de una mera descripción fenomenológica directa.

⁷ El término *quark* es de origen literario; lo adoptó Murray Gell-Mann (físico norteamericano, n. en 1929 y uno de los dos descubridores de los quarks) metafóricamente a partir del nombre de los tres hijos de Mr. Finn en la novela *Finnegans Wake* de James Joyce (el protón está constituido por tres quarks). En la física de partículas elementales —y en ocasiones también en otras ramas de la física— se ha ido dando la costumbre de emplear términos de fantasía en vez de descriptivos. Así, se habla de la extrañeza, el encanto, la be-

3. ¿Juega Dios a los dados?

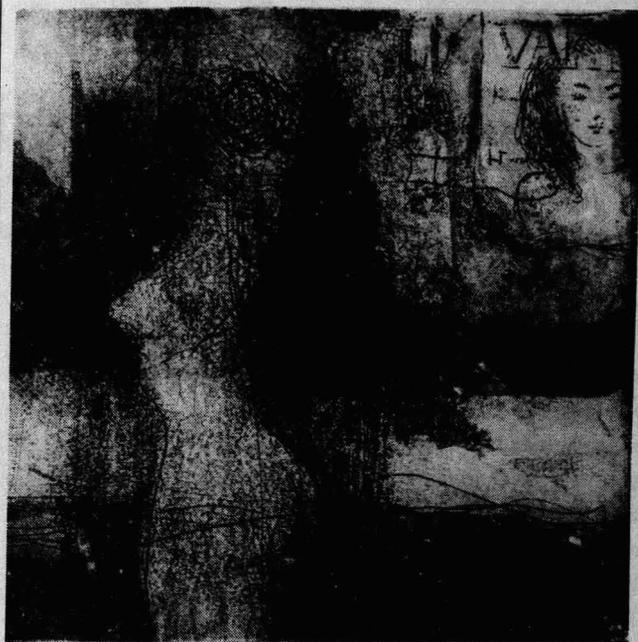
Para ser concretos hablaremos en lo sucesivo de electrones al referirnos a partículas cuánticas. Hemos dicho que la mecánica cuántica proporciona una descripción estadística del comportamiento del sistema estudiado. Tratemos de ver qué significa esto.

Para ello imaginamos el siguiente experimento de sabor casero. Encendemos un tubo de rayos catódicos —como el cinescopio de los televisores— y dejamos viajar algunos pocos electrones desde el cátodo hacia la pantalla. Cada electrón al llegar a la pantalla produce una motita que brilla por un breve instante. Cuidemos las cosas para asegurar que *todos los electrones sean enviados hacia la pantalla exactamente bajo las mismas condiciones*: en la misma dirección, con la misma velocidad, etcétera. ¿Qué observamos? Uno pensaría que, puesto que todos los electrones son tratados igual, todos deben llegar exactamente al mismo punto de la pantalla. Pero esto es precisamente lo que *no* ocurre: las partículas se distribuyen sobre toda la pantalla, cayendo *azarosamente* en diferentes lugares. En palabras llanas: ¡vemos que electrones en iguales condiciones se comportan en forma diferente!

Pero la realidad es aún más sutil y compleja. Para convencernos colocamos en el interior del cinescopio y precisamente en el camino de los electrones hacia la pantalla, una delgada placa metálica que bloquee su paso, y abrimos en la placa dos finísimas rendijas muy juntas entre sí, por las que los electrones podrán pasar libremente. Ahora se espera que los electrones dibujen dos líneas luminosas en la pantalla, una por cada rendija. Pero esto *no* es lo que ocurre: lo que se observa es una serie alternada de muchas franjas luminosas y oscuras, cuyo brillo va decreciendo lentamente hacia los extremos, de tal manera que la franja central (que por cierto *no* se encuentra enfrente de ninguna de las rendijas, sino entre ambas) es la más brillante. ¿Cómo podemos entender este impresionante resultado? Aquí estamos en presencia de una de las más singulares características del comportamiento de los electrones: el patrón luminoso que observamos en la pantalla producido por las partículas que cruzan las rendijas es exactamente igual al que produciría un haz de *luz* (de un solo color) en iguales condiciones. ¡Es decir, los electrones se comportan en este experimento como *ondas*!

Este resultado tiene consecuencias profundas para toda la física microscópica, pues se observa que es característico y no meramente accidental: los sistemas cuánticos se comportan en ocasiones como corpúsculos, y en otras circunstancias como ondas. La idea podría parecer simple, pero un poco de detenimiento la revela como sorprendente, e incluso con aires de misterio. Por ejemplo, en el caso del cinescopio, mientras los electrones cruzan las rendijas se comportan como ondas, las que llenan *todo* el espacio interior, mientras que al llegar a la pantalla quedan registrados *en algún lugar* como puntitos. Además, ¿qué es lo que fija en cuál punto específico se “concentra” el electrón? La teoría no posee *ningún* elemento que determine este resultado, por lo que se considera que es un

leza, el color, el sabor, etcétera, de las partículas en referencia a propiedades intrínsecas cuantitativas.



producto del azar: el electrón —o cualquier sistema cuántico— es *esencialmente* indeterminista. No son éstas las únicas propiedades sorprendentes —por no decir bizarras— del comportamiento cuántico, pero nos bastan para los propósitos presentes. Tratemos de analizarlas un poco más de cerca.

Aunque la mecánica cuántica posee una ley dinámica que implica la evolución *causal* de los sistemas cuánticos, no permite hacer predicciones específicas del tipo: ¿en qué punto de la pantalla habrá de caer *este* electrón? Tal ley *sólo* nos proporciona predicciones de tipo estadístico —como: ¿cuál es la *probabilidad* de que el electrón caiga dentro de este cuadrado?—, que reflejan y contienen el indeterminismo característico del sistema. Por añadidura, a menudo se considera que la mecánica cuántica es una teoría *completa* de la naturaleza que en *cada caso particular* genera *toda* la información física que en principio puede haber. De ser así, debe concluirse que el indeterminismo en cuestión tiene un carácter esencial, irreductible.⁸ La onda que describe al electrón contiene entonces en forma latente *todos los posibles resultados* de cualquier experimento; uno de ellos es el que se dará al *azar* al efectuar la medición. Estos resultados existen en la onda como *potencialidades* que se materializan con probabilidades específicas, que la teoría permite determinar, sin que podamos ir más allá. El electrón atómico, representado mediante estas ondas de potencialidades, se ha transformado ahora en una nube de probabilidades alrededor del núcleo: ha dejado de ser un objeto para convertirse en un conjunto de posibilidades. Sien-

do así que el electrón habrá de recuperar su materialidad, sin embargo, tan pronto determinemos su posición al hacer que se registre en una placa fotográfica, o mediante otra medición equivalente.

La interpretación ofrecida⁹ lleva a la idea de que la microfísica no describe una realidad objetiva, independiente de nosotros y regulada por leyes causales que determinan los resultados, sino más bien se reduce a describir relaciones entre nuestras observaciones de un mundo en que reina el indeterminismo. En estas condiciones, es legítimo preguntarnos: ¿qué tan objetiva y determinista puede ser la realidad macroscópica que construimos a partir de la legalidad microscópica? En forma por demás sintética esta interrogante expresa algunas de las inquietudes que durante más de 60 años han ocupado las mentes de algunos —pocos, para ser sinceros— físicos y filósofos de la ciencia, insatisfechos con la imagen del mundo que tal interpretación ofrece. Podríamos agregar problemas no menos interesantes —como el de la separabilidad conceptual de partes del mundo, la validez del principio de localidad, la objetividad de las teorías naturales, etcétera— pero ello requeriría demasiado espacio y paciencia del lector, la que probablemente está a punto de agotarse o quien quizá empieza a creer en actos mágicos de la naturaleza. Dejemos aquí, pues, este análisis, para preguntarnos si es o no posible, al menos en principio, recuperar el realismo, la objetividad y el determinismo perdidos en la descripción del mundo físico, sin violar con ello las leyes de la naturaleza.

⁸ Esta observación contrasta con una afirmación hecha por Einstein en una carta dirigida a su amigo el físico alemán Max Born, uno de los fundadores de la teoría cuántica: . . . *me resisto a creer en un Dios que juega a los dados* . . .

⁹ La interpretación usual de la mecánica cuántica a la que hacemos referencia, es la conocida como *ortodoxa* o de *Copenhague*. No existe interpretación alterna a ella que goce de aceptación generalizada.

4. Una visión alternativa

La natural inquietud por construir una interpretación de la microfísica consistente con principios generales y fundamentales de las ciencias naturales, tales como los de realismo y objetividad, ha conducido a la proposición de interpretaciones alternativas que, sin modificar al aparato matemático de la teoría, invitan a una lectura diferente de la fenomenología descrita. A pesar del gran esfuerzo invertido en estas tareas, ninguna de ellas ha alcanzado hasta el momento el nivel de coherencia *lógica* que posee la interpretación de Copenhague, por lo que no han logrado éxito suficiente.¹⁰ Por otra parte, es claro que una mera *reinterpretación* de la microfísica no puede generar respuestas novedosas a las profundas interrogantes cuya solución se le escapa a la física contemporánea, como por ejemplo sobre la causa del aparente indeterminismo, o el origen de la naturaleza ondulatoria de la teoría actual. Si queremos ir al fondo de estos problemas, se hace necesario preguntarnos por el propio origen de la teoría cuántica, buscar elementos físicos que sirvan de base para la revisión de la interpretación.

Tratemos, en breves líneas, de presentar las ideas centrales de una proposición que va en la dirección indicada. Nos referimos a la llamada *electrodinámica estocástica*, teoría en elaboración durante los últimos 20 o 25 años, y cuyos principios básicos pasamos a describir. Partamos para ello de una observación muy simple, también de sabor casero: cuando una carga eléctrica se pone a vibrar (a cierta frecuencia), emite ondas electromagnéticas (de la misma frecuencia). Así ocurre, por ejemplo, en una antena de radio o televisión, cuando se envía a ella una corriente alterna de electrones: éstos radian la señal (de radio o televisión) que habremos de recibir con otra antena, en la que las ondas electromagnéticas captadas ponen a su vez a vibrar a los electrones. Resulta que cada electrón atómico es una antena en miniatura que envía ondas electromagnéticas al espacio. Esto significa dos cosas, entre otras:

- a) que cada átomo pierde energía, pues la radia poco a poco;
- b) que el espacio está lleno de radiación electromagnética producida por todos los átomos del Universo.

Una vez más el espacio ha dejado de estar vacío, para llenarse ahora de energía electromagnética. Como este campo de vacío es generado por un número inmensamente grande de antenas independientes, su estructura es terriblemente azarosa y fluctuante —técnicamente, se trata de un *campo estocástico*. La existencia de este campo da lugar a un nuevo fenómeno, que es fácil percibir al considerar que los propios electrones de los átomos que lo generan se encuentran a su

¹⁰ Esto pone de manifiesto de manera clara que la falta de coherencia entre las filosofías subyacentes a la teoría cuántica por un lado y al resto de las ciencias naturales por otro, no ha sido razón suficiente para convencer a los físicos de la necesidad de revisar aquella. Por el contrario, no es difícil toparse con la afirmación de que la mecánica cuántica ha venido a mostrar la invalidez de la filosofía de la naturaleza abstraída del resto de la ciencia natural. No es infrecuente leer, por ejemplo, que “el experimento cuántico tal y tal realizado en 1985 (digamos) ha demostrado la invalidez del realismo filosófico”, o bien que “el indeterminismo esencial del electrón está en la base del libre albedrío”, etcétera.

vez inmersos en él: la interacción produce un movimiento caótico permanente de cada electrón —como antena capturando ondas electromagnéticas. En el átomo las cosas se arreglan de tal manera que la energía ganada por el electrón debido a este movimiento errático compensa en promedio la que se pierde por radiación, y así el átomo adquiere una estructura estable, aunque estocástica. En esta forma la electrodinámica estocástica puede explicar la estabilidad de los átomos sin violar las leyes del electromagnetismo.

Pero hemos ganado una posibilidad más: puesto que la interacción de los electrones con el vacío electromagnético fluctuante es permanente, ubicua e inevitable, debemos concluir que el movimiento de cada electrón será caótico, irregular e irreproducible —dicho en lenguaje técnico, los electrones siguen trayectorias estocásticas. Ahora estamos en condiciones de entender por qué, aunque se envíen electrones idénticos dentro de un cinescopio, cada uno de ellos seguirá su propio camino aleatorio: simplemente, porque cada uno habrá de encontrar un *diferente* campo electromagnético de vacío. Se hace así natural el comportamiento azaroso del electrón; como, además, no tenemos acceso —al menos en la actualidad— a los detalles del campo electromagnético que en cada caso habrá de darse, sino sólo a sus propiedades estadísticas,¹¹ es natural que la teoría se encuentre en condiciones de hacer *únicamente predicciones estadísticas* del comportamiento de los electrones. No se trata de un indeterminismo esencial, innato del electrón, sino del resultado natural de un fenómeno físico perfectamente inteligible y accesible al estudio teórico.

Durante las dos décadas que la electrodinámica estocástica lleva de estudio y desarrollo, ha permitido encontrar la explicación a muchas de las propiedades cuánticas de la materia como resultado de la presencia ubicua del campo electromagnético de vacío. Es cierto que han aparecido dificultades mayores de las previstas inicialmente, pero la solución de cada una de estas dificultades nos enseña que la naturaleza resulta con frecuencia más sutil y astuta de lo sospechado. No puede aún afirmarse que esta teoría resuelve todos los problemas planteados por la mecánica cuántica; más correcto sería decir que la forma “ingenua” que se le ha dado no representa todavía suficientemente bien a la naturaleza. Así, la tarea es ahora revisar la teoría, buscar formas alternas de ella o bien, completarla adecuadamente, para tratar de llevar a término su programa central. Si será o no capaz de resolver enteramente los problemas planteados aún no lo sabemos. Pero hoy día, su mera existencia muestra que existe la posibilidad, en principio, de encontrar explicaciones físicas al fenómeno cuántico sin necesidad de abandonar caros principios generales.

Por otra parte, la electrodinámica estocástica nos lleva a una conclusión atractiva: aunque la luz no es materia, la materia es como es gracias a su interacción permanente con el campo electromagnético que llena el vacío, el que es, a su vez, resultado de la propia materia, de la que se origina. La luz no es materia, pero es complemento indispensable de ella. ♦

¹¹ La teoría contiene argumentos que permiten determinar todas las propiedades estadísticas del campo electromagnético del vacío.