

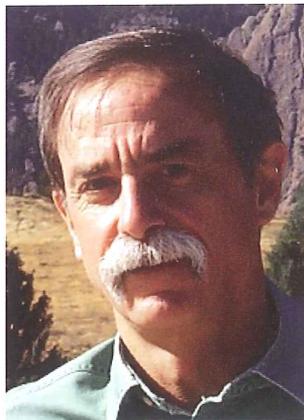
# Premio Nobel de Física 2012

## CONTRIBUCIÓN A LA ÓPTICA CUÁNTICA

Juan José Scala Estalella



Serge Haroche



David J. Wineland

El pasado día 9 de octubre la Real Academia Sueca de las Ciencias anunció que el Premio Nobel de Física del presente año 2012 había sido otorgado a los científicos Serge Haroche, profesor del Collège de France y de la École Normale Supérieure de París; y a David J. Wineland, investigador del National Institute of Standards and Technology y de la Universidad de Colorado en Boulder.

En el mismo comunicado, la Real Academia de Ciencias de Suecia destaca que “los premiados han abierto la vía a una nueva era de experimentación en la Física cuántica al lograr la observación directa de las partículas cuánticas individuales sin destruirlas”.

Antes de pasar adelante merece destacarse que la misma Academia declara que se trata de un logro experimental. Aprovechamos esta declaración para excluir toda prelación entre la Física teórica y la experimental. Ambas avanzan como las dos ruedas de un carro que conducen la misma carga. Si no se construyeran sabias teorías la Física sería un catálogo de hechos experimentales, aislados, inconexos, casi anecdóticos, con frecuencia incomprensibles y, a veces, sorprendentes. La Física teórica,

sin el soporte y confirmación de la experiencia, no pasaría de ser una construcción del pensamiento más o menos bello y, como mucho, adecuado consigo mismo, pero ignorante de toda relación entre sus elucubraciones y la realidad de la Naturaleza. De la conjunción de ambas nace esa magnífica construcción de la mente humana que es la Ciencia Física. El objeto de estas líneas es situar dentro de ella el trabajo de los científicos galardonados.

## ■ La luz: una realidad fácil de percibir y difícil de explicar

Todo ser viviente dotado de una vista normal percibe la luz. Se dice que los peces de las zonas abisales no la perciben, quizá porque tampoco lo necesitan. Otros seres vivos como insectos o aves tienen sensores en algunos aspectos superiores al del hombre, quizá porque lo necesitan más que éste. Pero limitémonos a la especie humana con cuyos individuos podemos entendernos a través del lenguaje. Si uno de ellos carece del sensor adecuado, o sea, el órgano de la vista desde su nacimiento, poco o nada se logrará al intentar explicarle de lo que carece con las mejores explicaciones científicas... o poéticas. A través de este sensor, nos llega información de nuestro entorno inmediato, bien directamente o con la ayuda de algún aparato (gafas, lupas, microscopios o telescopios). Los mensajes que nos vienen de más lejos se sitúan en los límites de nuestro universo y partiendo de allí hace diez mil millones de años, mucho antes de que existiera el planeta en el que viajamos. Basta decir esto para dejar bien patente que la transmisión no es instantánea, como antiguamente se creyó.

## ■ Dos explicaciones que inicialmente se ofrecieron como contradictorias y resultaron ser complementarias

Los físicos han explicado por dos hipótesis la naturaleza de la luz: como partículas y como ondas. Ambas tuvieron sus partidarios. Ciertamente parecía como si la Naturaleza quisiera jugar con los físicos, pues unos experimentos parecían elocuentes para apoyar la primera, mientras otros solo se sostenían si se aceptaba la segunda.

Sir Isaac Newton (1642-1727), británico, probó que la luz solar blanca se compone de un espectro de todos los colores simples, desde el rojo hasta el violeta. Sobre una base matemática desarrolló la teoría corpuscular. Argumentaba que la quiebra en el camino de la luz al pasar de un medio a otro de distinta densidad, lo que se conoce como refracción de la luz, solo se explicaba como partículas que se movían a distinta

velocidad en cada uno de los medios. La teoría corpuscular de la luz no dio explicación satisfactoria a la difracción de la luz al pasar junto a los bordes de un obstáculo. Sin embargo, y debido al enorme prestigio de Newton, no fue decididamente puesta en duda durante más de un siglo.

Entre tanto, un contemporáneo de Newton, el físico holandés Christian Huygens (1629-1695) desarrolló la hipótesis ondulatoria dando el nivel de teoría respetable. En base a un supuesto sencillo, llamado principio de Huygens, pudo explicar los fenómenos de reflexión, refracción y reflexión total. Investigó la doble refracción y sentó las bases para su correcta explicación. La explicación que Huygens dio de la refracción exigió que la velocidad de la luz fuera menor en un medio denso que en el aire, aportando así una prueba definitiva entre las teorías ondulatoria y corpuscular.

La ciencia óptica después de Huygens entró en un periodo de hibernación hasta el siglo XIX, cuando renació con fuerza debido al impulso de varios investigadores geniales. En 1801, el físico británico Thomas Young (1773-1829) demostró la interferencia de la luz probando que dos haces de luz podían anularse al incidir sobre una misma superficie. Este hecho resultaba inexplicable por la teoría corpuscular y constituyó un espaldarazo definitivo para la teoría ondulatoria. Young también propuso que las vibraciones de las ondas luminosas, como las de una cuerda vibrante, debían ser transversales respecto al rayo, o línea de propagación, aclarando así el fenómeno de la polarización de la luz.

La teoría ondulatoria de la luz quedó firmemente asentada por el ingeniero francés Augustin Jean Fresnel (1788-1827) quien probó que la difracción puede explicarse como un fenómeno ondulatorio sobre la base del principio de Huygens. Fresnel halló también por experiencia directa que la velocidad de la luz es inferior en un medio denso que en el aire o en el vacío. Esto confirmó decisivamente la naturaleza ondulatoria de la luz.

El resultado era en aquel momento de uno a cero a favor de la teoría ondulatoria, pero el árbitro Naturaleza no había pitado aún el final del encuentro.

## ■ Ondas, sí; pero ¿de qué?

En Física se conocían y se estudiaban desde antiguo otras ondas menos “misteriosas” que las ondas de la luz. La materia en sus tres estados transmite ondas. Eran las ondas sonoras y también las ondas que se generan en la superficie libre de un líquido.

Por concretar, consideremos la superficie de un líquido en reposo. Si se deja caer una gota o un cuerpo pequeño sobre dicha superficie, el líquido se perturba en el punto donde se ha recibido el impacto. Por perturbación queremos significar que a consecuencia de dicho impacto, se rompe el equilibrio local y las partículas de líquido allí situadas empiezan a subir y bajar. Poco después se observa la formación de unas ondulaciones en forma de circunferencias que “avanzan” a radios crecientes, y su amplitud de oscilación disminuye con dicho avance. Hemos destacado la palabra “avance”, porque lo que avanza es solo la perturbación y no el líquido. Si a una cierta distancia se hallaba un cuerpo flotante, al ser alcanzado por las ondulaciones del líquido perturbado, se pondrá en movimiento con desplazamientos verticales, pero no de avance sobre la superficie líquida, sino de oscilación.

En todo caso, algo ha transmitido la onda desde el lugar del impacto inicial: energía y lo que en mecánica se llama cantidad de movimiento (producto de una masa por una velocidad), pero –vale la pena destacarlo– no ha habido transporte de materia. El líquido del depósito inicial ha actuado meramente como medio de soporte de la onda.

Para las ondas sonoras, el medio de transmisión estaba patente: el aire. Con muy sencillos e intuitivos experimentos se comprobaba que el sonido se transmite a través del aire. También lo hacían los cuerpos sólidos, o los líquidos en su seno, ondas vibracionales (no confundir con las ondas superficiales). Muy sencillos experimentos lo pusieron de manifiesto.

Las ondas lumínicas también necesitaban un medio. El tal medio debía ser muy peculiar. Se exigía de él que llenase todo el espacio, tanto los espacios intermoleculares como los intersiderales. En efecto, la luz atraviesa los medios transparentes o láminas delgadas de muchos de ellos, y nos trae la visión de lejanas estrellas; se le llamó el éter. Digamos de paso que este nombre no estaba relacionado con las sustancias químicas orgánicas denominadas éteres. El mar de éter tenía que permanecer en absoluto reposo o a él se tenían que referir todos los movimientos de los cuerpos. Había que suponer que el medio era perfectamente elástico, de manera que los cuerpos celestes pudieran atravesarlo sin perturbarlo y sin que les ofreciera la menor resistencia. Tenía que tener la suficiente rigidez para transmitir las ondas luminosas...

En el desarrollo de la teoría de la relatividad también era necesario detectar el “viento de éter”. De esto se ocuparon en 1887 dos físicos americanos: Albert Abraham Michelson (1852-1931) y Edward Williams Morley (1838-1923) que diseñaron un experimento para observar si el misterioso éter se hallaba en movimiento relativo respecto a

la Tierra. Se hicieron pruebas en valles y en montañas elevadas, en distintas épocas del año... Todo en vano para permitir hablar de la velocidad de la luz respecto al éter.

La hipótesis del éter era una hipótesis “ad hoc” que la experiencia rechazó, dejándola relegada a los libros de historia de la Física.

## ■ Ondas electromagnéticas

En la Costa Este de la actual Grecia continental está la región de Tesalia y en ella el departamento de Magnisia. Allí se encontraba una piedra que tenía la propiedad de atraer los minerales férricos. El ámbar (electrón en griego), al ser frotado, también atrae cuerpos ligeros (trozos de papel, partículas de polvo, cabellos, etc.). Eran distintos fenómenos que se estudiaron a lo largo de los siglos bajo los nombres que de aquellas palabras griegas pasaron a muchas lenguas: electricidad y magnetismo.

El científico escocés James Clerk Maxwell (1831-1879) estudió las relaciones entre ambos grupos de fenómenos y, a partir de ahí, quedaron unidos en la palabra electromagnetismo. En 1864, Maxwell presentó un trabajo ante la Royal Society de Londres explicando su nueva teoría. En una síntesis verdaderamente extraordinaria que quedó expresada en cuatro ecuaciones, desde entonces conocidas por las ecuaciones de Maxwell.

Esta expresión utiliza conceptos de matemática avanzada de la teoría de campos. Maxwell siguió una vía inductiva y, a partir de ella, por procesos matemáticos deductivos pueden derivarse todas las propiedades electromagnéticas de la materia.

La propagación de ondas vibratorias en medios sólidos (cuerda vibrante, placa y membrana vibrante, barra metálica, ondas aéreas, etc.) ya se había estudiado matemáticamente, y todas ellas conducían a una misma ecuación, salvo parámetros específicos de cada fenómeno (densidad, viscosidad, elasticidad, etc.). Era esta una ecuación diferencial de segundo orden y primer grado o lineal, la cual relacionaba la variable que medía la perturbación del medio portador con las variables cartesianas y el tiempo. La estructura de la ecuación era la misma para todos los medios, por lo cual pasó a denominarse “ecuación de ondas”.

A partir de las ecuaciones de Maxwell y por una deducción matemáticamente sencilla y breve se encontró que las cuatro magnitudes características del campo electro-

más fuerte lo constituía la ecuación de ondas, que describía con gran elegancia matemática la analogía entre ambos fenómenos.

El fenómeno se ofrecía bastante satisfactorio para explicar la propagación de las ondas, es decir, para “verlas pasar”, pero no lo era tanto en las interacciones de las ondas con la materia, especialmente en su generación y en su absorción. Seguía habiendo experimentos importantes, como la dispersión de la luz en las sombras y la interacción entre haces de luz, que podían sumar sus efectos o anularlos, y que hallaban cumplida explicación con la teoría ondulatoria, sin encontrar su lugar en la teoría corpuscular. Sin embargo, esta teoría encajaba perfectamente para explicar el efecto Compton, así llamado por haber sido descubierto por el físico estadounidense en 1923 Arthur Holly Compton (1892-1962). El efecto consistía en el aumento de la longitud de onda de los rayos X cuando estos “chocan” con electrones. Destacamos la palabra “chocar”, porque el choque entre partículas estaba bien conocido y estudiado. En él se conservaban siempre la cantidad de movimiento total de las partículas intervinientes y, si el choque era elástico, también se conservaba la energía. Estas leyes de conservación son fundamentales en Física, pero no se podía describir el choque de una onda con una partícula. El propio concepto de choque era inaplicable.

Ante este cuadro de hechos contradictorios se pensó que la luz no podía ser comprendida por analogía con las ondas mecánicas, ni como un chorro de partículas. Había que aceptar que la luz solo podía explicarse por la mera descripción de sus propiedades. Esto equivalía a “tirar la toalla”, pero tal actitud no es propia de la ciencia ni satisface a los científicos.

El tema era demasiado importante para dejarlo así, por dos razones fundamentales. La luz y, en general, las ondas electromagnéticas son grandes portadoras de energía y de información que conducen por el espacio vacío a alta velocidad. Otras energías sólo se pueden transportar mediante el movimiento del material en que se encuentran almacenadas. Por el contrario, la energía lumínica está siempre en movimiento y solo de manera indirecta y a pequeña escala está afectada por el movimiento de la materia, a través de la cual pasa. Cuando la energía de la luz deja de moverse, por haber sido absorbida por la materia, aquella deja de existir.

El segundo tesoro –no dudamos en calificarlo así– es la información. Las ondas sonoras son el principal canal de intercambio de información entre los humanos; ellas nos descubren la estructura interna de nuestro planeta y nos ofrecen el mundo de la música. Los ojos aportan al cerebro más información que cualquier otro sensor de nuestro orga-

nismo. Aun así, en el sistema óptico que constituye el sentido de la vista solo se recoge una pequeña proporción de la que contiene la luz que llega a la retina. Los instrumentos ópticos, por ejemplo, multiplican enormemente la información que parte de la fuente de luz. Telescopios y radiotelescopios, espectrógrafos, microscopios ópticos y electrónicos, y tantos y tantos aparatos, potencian el sentido de la vista de tal manera que el cerebro tendría dificultad o imposibilidad de elaborar tal caudal de información. Y todo ello a pesar de que el ojo es un sensor altamente selectivo, como ha sido ya comentado.

## ■ Dualidad onda-corpúsculo

La idea vino de la mano de un físico francés, Louis Victor de Broglie (1892-1987), quien postuló en 1924 que los electrones, como la luz, tenían propiedades ondulatorias. Pocos años más tarde esta hipótesis fue confirmada por el descubrimiento de fenómenos de difracción análogos a los de la óptica ondulatoria. Estamos acostumbrados a manejar objetos de los que nuestra experiencia sensorial nos da su forma, así como su posición en el espacio y la trayectoria que describen en su movimiento. Se tendió a suponer que las partículas elementales, que ya se conocían (electrones, protones, neutrones, etc.), se comportaban de la misma manera, pero nuestros sentidos, como otras veces, nos engañaron. A cada partícula había que asociar una onda, de la misma manera que a cada onda había que asociar una partícula. Las propiedades cuantitativas características de una onda son la longitud de onda y la frecuencia, los de una partícula son su energía y su cantidad de movimiento. Era lógico que los unos se encontraran relacionados con los otros y, en efecto, así fue, a través de relaciones matemáticas extremadamente sencillas, y una constante, la constante de Planck (de la que volveremos a hablar) una de las más importantes de la Física. La longitud de onda (de la onda asociada) era inversamente proporcional a la cantidad de movimiento de la partícula, y la frecuencia de dicha onda era directamente proporcional a la energía. La constante de proporcionalidad para la primera relación era la constante de Planck y su inversa para la segunda relación. Desde entonces las cuatro propiedades se predicaban indistintamente de la onda o de su partícula, pues ambas constituyen una única realidad física.

## ■ Una polisemia peligrosa

No sería tan peligrosa, si no fuera porque en Física se utiliza frecuentemente el vocablo con uno u otro significado. Nos referimos a la voz “cuantificación”. Del Dicciona-

rio de la Lengua Española en su 22ª edición (2001) tomamos dos de sus acepciones: 1, Expresar numéricamente una magnitud; 2. Introducir los principios de la mecánica cuántica en el estudio de un fenómeno físico. La primera acepción se utiliza en cualquier ámbito de la Física; la segunda es propia de la mecánica o de la óptica cuántica. Me pregunto por qué no se ha adoptado la palabra “cuantificación” y sus derivados y, sobre todo, la voz inicial “quanto” de energía. Supongo que deben existir poderosas razones para ello, pero que no han existido para aceptar los términos quark y quasar.

Decir que nuestro mundo está cuantificado, o más clara e incorrectamente dicho, “cuantizado” es algo que ya pensaba Demócrito (nacido alrededor de 460 a.C.). El padre del atomismo enseñaba que todo consta de innumerables partículas finitas que difieren solo en tamaño y forma. Hoy se sabe científicamente que esto es así, lo cual no era óbice para que la Física utilizara el modelo continuo de la materia y de la energía.

En la teoría clásica de las ondas electromagnéticas, la absorción de la luz es un proceso continuo y no hay más límite inferior que la cantidad de energía que un átomo puede absorber de una luz monocromática. La energía puede ser intercambiada en cantidades infinitamente pequeñas entre la radiación y los átomos existentes en una cavidad que se encuentra en equilibrio térmico. La energía total de la cavidad en equilibrio, a cierta temperatura, debe distribuirse de tal manera que a cada grado de libertad de las moléculas le corresponde una cantidad de energía proporcional a la temperatura. A la constante de proporcionalidad se llama constante Boltzmann, en honor del físico austriaco Ludwig Boltzmann (1844-1906), notable por sus aportaciones a la teoría cinética de los gases.

Forma parte de la experiencia corriente que al abrir la boca de un horno, si observamos su interior por un visor, existe una relación entre el color observado y la temperatura a la que el horno se encuentra. Si se ve el interior muy brillante, el horno está a temperatura alta, es decir, la radiación de equilibrio en su interior es elevada, pero se ve completamente negra a baja temperatura (calor negro). En ese caso la intensidad de radiación de equilibrio es pequeña en la parte visible del espectro de ondas electromagnéticas (rayos infrarrojos).

La relación entre la energía radiante emitida dependiendo de la frecuencia era expresada por la ley de Rayleigh-Jeans, así llamada por haber sido descubierta por los físicos británicos John William Strutt, 3<sup>er</sup> Barón de Rayleigh (1842-1919), y Sir James Hopwood Jeans (1877-1946). La ley fue derivada como consecuencia lógica

de la teoría ondulatoria clásica y funcionaba aceptablemente para bajas frecuencias, pero no así para altas frecuencias, que producen un aumento sin límite de la radiación, lo que implicaba que, en el equilibrio, toda la energía del universo debería encontrarse en el extremo de las altas frecuencias del espectro electromagnético y no existir nada en la materia. La predicción de esta catástrofe podía soslayarse suponiendo la existencia de un límite superior para las frecuencias de radiación según la ley citada, admitiendo que la ley no funciona con las frecuencias altas del espectro visible y el ultravioleta.

Razonamientos termodinámicos muy generales ponían de manifiesto que la radiación emitida por un cuerpo negro depende únicamente de la temperatura del cuerpo, al margen de toda otra propiedad. La distribución espectral de la intensidad de radiación emitida por el cuerpo negro es, pues, una expresión fundamental que debe ser deducible por los métodos de la termodinámica estadística a partir de las leyes generales de la interacción entre materia y radiación. La expresión deducida a partir de la teoría clásica choca frontalmente con la experiencia. A fin del siglo XIX, un físico alemán, Max Karl Ludwig Planck (1858-1947) cortó el nudo, al menos para sus contemporáneos, aunque más tarde se puso de manifiesto que la cuerda estaba intacta. Planck emitió la revolucionaria hipótesis de que los intercambios de energía entre materia y radiación no se efectuaban de manera continua, sino por cantidades discretas e indivisibles llamadas cuantos de energía. Planck estableció que el cuanto de energía era proporcional a la frecuencia de la radiación y a la constante de proporcionalidad se la llamó constante de Planck, siendo hoy una de las constantes más importantes de la Física.

## ■ La teoría corpuscular de la luz se afianza

Los hechos experimentales exigían una completa revisión de la teoría de las ondas electromagnéticas de Maxwell, apuntando todo a un retorno de la teoría corpuscular. Contribuyó a ello el físico alemán Albert Einstein (1879-1955) en 1905 con su memoria sobre el efecto fotoeléctrico. Este efecto fue observado por el físico también alemán Rudolf Heinrich Hertz (1857-1894), quien investigando la descarga eléctrica entre dos electrodos como fuente de las ondas electromagnéticas que llevan su nombre (herzianas) observó que la intensidad de la descarga aumentaba cuando se iluminaban los electrodos con luz ultravioleta. Esto probaba que las superficies iluminadas emitían más electrones. Poco después se observó que se producían emisiones electrónicas al iluminar la superficie de otros metales. A los electrones así liberados, y en razón de

su origen y no de su naturaleza, se les llamó fotoelectrones, como se designó por termoelectrones aquellos que recibían la energía necesaria por calentamiento del metal en que se encontraban. En los metales, además de aquellos que orbitan en torno a un núcleo, existen otros que se mueven con cierta libertad a través de la red cristalina. Son estos los que con su movimiento originan la corriente eléctrica. Estos electrones no escapan espontáneamente del metal, pues no tienen energía suficiente para saltar la barrera electrostática que limita su superficie. Esta energía hay que proporcionársela a los electrones por medio del calor o de una onda electromagnética, y el exceso de lo recibido para saltar la barrera de potencial, la lleva consigo el electrón en forma de energía cinética.

Einstein observó que la energía de los fotoelectrones depende de la frecuencia de la radiación, de tal manera que los electrones libres del metal se comportan de la misma manera que Planck propuso para las oscilaciones atómicas en relación con la radiación emitida por el cuerpo negro. La energía necesaria para que un electrón salte la barrera no es la misma para todos ellos y se llama energía de arranque. Los que tengan menor energía de arranque dispondrán de un exceso máximo que llevarán consigo como energía cinética. El experimento permitió, además, hallar el valor de la constante de Planck, que es  $h=6,6256 \times 10^{-34}$  julios x segundo. Al multiplicar esta constante por la frecuencia de la onda, se obtiene la energía del fotón. Pero los fotones merecen un nuevo apartado.

## ■ El fotón

Ya se ha comentado anteriormente la dualidad onda-corpúsculo, que asocia a cada onda una partícula elemental y recíprocamente. Pues bien, el fotón es la partícula elemental asociada a las ondas de luz. Al igual que ellas, el fotón tiene una energía y una cantidad de movimiento. También la onda transporta una energía y una cantidad de movimiento, conceptos propios de la mecánica. La energía (cinética) de un cuerpo en movimiento es el semiproducto de su masa por el cuadrado de la velocidad, y la cantidad de movimiento es el producto de su masa por su velocidad.

Hemos dicho que el fotón es una partícula elemental. Pero eso no es mucho decir, porque existen bastantes partículas elementales. Unas son conocidas fuera de los medios científicos y se pueden encontrar citados en los libros de texto previos a la universidad, como el electrón, el protón y el neutrón. Algunas otras están ya “fichadas”, pero no han sido aisladas, siendo de esperar que en un futuro no muy lejano cedan a

la actividad investigadora. El número de ellas es una veintena aproximadamente, sin contar con que cada una tiene su antipartícula, lo que duplica este número.

Generalmente las partículas se presentan tabuladas e individualizadas por un símbolo, como los elementos químicos. Tienen (no siempre) una masa que se refiere a la del electrón. Con esta unidad la masa del electrón es obviamente 1. Otras son cientos, y algunas de ellas miles de veces mayores que el electrón. El electrón fue la primera en ser descubierta. Su masa es  $9.1091 \times 10^{-31}$  kilogramos. Debe tenerse presente que las partículas son objetos que se mueven a velocidades comparables a la velocidad de la luz (300.000 kilómetros por segundo), por lo que han de ser estudiadas aplicando la teoría de la relatividad, según la cual la masa de un cuerpo depende de su velocidad. Por ello se da siempre su “masa en reposo”, que es la que hemos apuntado para el electrón.

Algunas partículas no tienen carga eléctrica, pero otras la tienen positiva o negativa y siempre múltiplos sencillos de la carga del electrón, que es negativa y vale  $1.6021 \times 10^{-19}$  culombios. Bastantes partículas –aunque no todas– giran sobre sí mismas (como lo hace la Tierra). A este giro se le llama en inglés “spin” (girar, dar vueltas). La Real Academia Española de la Lengua lo ha incorporado a su diccionario con la grafía espín, definiéndolo como “movimiento intrínseco de rotación de una partícula elemental o de un núcleo atómico”. Este giro viene evaluado por un número cuántico semientero (0, 1/2, 1, 3/2, 2...) propio de cada partícula.

Después de esta incursión, casi tímida, por el mundo de las partículas elementales, a veces llamadas fundamentales, damos la tarjeta de identidad del fotón. Su símbolo es la letra griega gamma minúscula, su masa en reposo es nula, su carga eléctrica es también nula y su espín vale 1. Es una partícula estable, lo que no es frecuente entre las partículas elementales, cuya vida se reduce a pequeñísimas fracciones de segundo.

Los fotones pueden nacer o morir, pero durante su existencia se han de mover permanentemente a la velocidad de la luz. Si se detienen, entregan su energía y resultan aniquilados. Su energía y su cantidad de movimiento son proporcionales, siendo la primera el producto de la velocidad de la luz por la segunda, lo que no ocurre en la mecánica clásica. En la interacción con la materia, como en el efecto Compton, se respetan las leyes de conservación de la energía y de la cantidad de movimiento. La energía de un fotón de una luz monocromática se obtiene multiplicando la constante de Planck por la frecuencia de la radiación electromagnética. Los más energéticos

nida: a cada frecuencia corresponde una intensidad de radiación de cuerpo negro que depende únicamente de la temperatura de las paredes y es independiente del material con que están hechos. La radiación del cuerpo negro se comporta como un gas de fotones. Se supone que éstos no interactúan entre sí y solo lo hacen con los átomos de las paredes. Los fotones son indistinguibles y nada impide que muchos fotones tengan la misma energía. Por ello, a cada frecuencia se puede aumentar sin límite la intensidad de la radiación. Como los átomos de las paredes de la cavidad pueden absorber o emitir fotones, su número no es constante.

Se puede decir que la situación descrita es totalmente caótica. La luz emitida por todos los fotones no tiene la misma longitud de onda, ni la misma dirección, ni la misma fase, ni la misma polarización. Cada átomo, al cesar su periodo de excitación, emite luz espontáneamente (radiación espontánea), sin ser forzado a ello por ningún agente externo.

En un instante determinado la población total de átomos está repartida entre dos niveles: uno, el de los átomos excitados, o de energía alta; y otro, el de los átomos no excitados o de energía baja. Por supuesto, el lenguaje es puramente convencional. En ese momento, un fotón con la frecuencia adecuada incide sobre el conjunto. Puede provocar uno de estos dos efectos: excitar un átomo no excitado o, desexcitar un átomo excitado, con lo que parten de él dos fotones (emisión inducida). Estos dos fotones son de radiación coherente; es decir, de misma longitud de onda, misma dirección y de la misma fase. En lenguaje musical diríamos que lo hacen al unísono. Ambos efectos tienen una probabilidad de producirse y, consecuentemente, se altera el número de átomos en ambos estados.

Si la sustancia está en equilibrio térmico, el número de átomos excitados es menor que los del estado fundamental. Pero si por algún medio se invierte la población relativa de los dos niveles, la cantidad de energía emitida sería mayor que la absorbida; es decir, si una radiación tiene una cierta densidad de energía de determinada frecuencia atraviesa el sistema, la radiación emergente tiene más fotones de esa frecuencia que la radiación incidente, es decir, ha habido una amplificación de la radiación a esa frecuencia. A partir de ahí se desexcitarían más átomos de los que los que se excitan, por lo que el nivel de alta energía comienza a vaciarse y la amplificación disminuye hasta que se restablece el equilibrio térmico. Entonces hay que alimentar con más átomos el nivel superior, o sacarlos por algún otro medio del nivel inferior. Este es el fundamento de la luz LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*).

En 1917, Einstein previó la posible existencia de luz estimulada, pero hasta la década de 1950 no se dispuso de aparatos que la emitieran de manera continua o por pulsos.

## ■ Los intocables

Cosas muy distintas en Física son manejar grandes conjuntos de partículas o iones, o hacerlo individualmente. A partir del conocimiento de las leyes de interacción individual, como el choque de moléculas gaseosas, se llega al conocimiento de las leyes macroscópicas a las que obedecen, por ejemplo, una masa de gas. Esta metodología es la que sigue una rama tradicional de la Física, llamada Física estadística. Otra cosa distinta es poder manejarla individualmente para hacerlas objeto de estudio. Al intentar observarlos individualmente, los fotones se desvanecen.

El paso dado por los receptores del Premio Nobel es el descubrimiento de métodos que permiten que estas partículas subsistan el tiempo necesario para observar su estado individualizado y, en concreto sus propiedades cuánticas. Se pretende con ello una mejor comprensión de las interacciones entre la materia y los campos electromagnéticos, lo que puede lograrse al conseguir que los efectos cuánticos se mantengan durante tiempos muy largos comparados con los fenómenos que ocurren en la naturaleza. El equipo de investigación francés lo logró utilizando átomos para estudiar la luz. El americano hizo lo contrario: utilizar la luz para estudiar iones que son átomos con carga eléctrica.

Entre las aplicaciones que esto puede tener se apuntan los relojes cuánticos con exactitud cien veces superior a los relojes atómicos de cesio, actualmente utilizados. En estos relojes se basa actualmente la definición de segundo, que es 9192631770 periodos de la radiación entre los dos niveles hiperfinos del estado fundamental del átomo de cesio 133. Es una de las cantidades físicas medidas con mayor exactitud, con un error de 1 entre  $10^{11}$ .

Otra aplicación se orienta hacia la construcción de un nuevo tipo de ordenador superrápido basado en la Física cuántica. El propio Wineland probó por primera vez que era posible efectuar cálculos aritméticos con bits cuánticos (qubits). Se recuerda que el bit es el dígito binario, o cifra en el sistema binario de numeración (0, 1).

El enfriamiento de átomos e iones utilizando el láser se convirtió en un procedimiento habitual para físicos atómicos y ópticos cuánticos en los años que rodearon el

último cambio de siglo. Por enfriamiento se entiende el hecho de hacer perder energía cinética a las partículas. Pero aquí se predica este hecho de una partícula aislada, con lo cual nos apartamos de la idea de temperatura, relacionada con la energía cinética media de una masa de gas, o líquido, o de un sólido. Esto fue comunicado alrededor de 1980. Para ello era necesario atrapar la partícula o ión, aislarla y enfriarla.

El enfriamiento láser de iones atrapados se desarrolla aplicándolo a los átomos neutros captados por ondas estacionarias. Esta técnica se basa en la posibilidad de alcanzar por enfriamiento un estado fundamental y en la capacidad de manejar un estado cuántico de forma bien controlada. Todo ello ha permitido profundizar en la comprensión de los efectos mecánicos de la radiación y ha sido práctico para desarrollos punteros en la óptica cuántica experimental.

Estas técnicas continúan siendo campo activo de investigación pero ya se han convertido en rutina para muchos laboratorios, donde ya se manejan variados procedimientos de enfriamiento a fines de espectroscopia de precisión y óptica cuántica.

## ■ Habla la Academia Sueca de Ciencias

Para explicar de manera sencilla y sin recurrir a formulaciones propias de la óptica cuántica, nos parece lo más oportuno basarnos en el informe emitido por la propia Academia Sueca de Ciencias, donde se afirma que Serge Haroche y David J. Wineland han concebido y desarrollado independientemente métodos pioneros para medir y manipular partículas aisladas, conservando al mismo tiempo su naturaleza mecano-cuántica, por procedimientos que antes se consideraban inalcanzables.

Haroche y Wineland han abierto la puerta a una nueva era de experimentación en Física cuántica al presentar la observación directa de sistemas cuánticos individuales sin destruirlos. Con sus ingeniosos métodos de laboratorio se las han arreglado para medir y controlar estados cuánticos muy frágiles, permitiendo que su campo de investigación de los primerísimos pasos hacia la construcción de un nuevo tipo de computador superrápido, basado en la Física cuántica. Estos métodos han conducido también a la construcción de relojes extremadamente exactos que podían convertirse en la base futura para definir la unidad de tiempo, con una precisión cien veces superior a la que permitían los actuales relojes de cesio.

Para partículas aisladas de luz o materia dejan de cumplirse las leyes de la Física clásica y han de ser sustituidas por las de la Física cuántica. Pero las partículas individuales no son fácilmente aislables del entorno que las rodea y pierden sus misteriosas propiedades cuánticas apenas interactúan con el mundo exterior. Por ello, muchos fenómenos aparentemente curiosos predichos por mecánica cuántica no se podían observar directamente, y los investigadores solo podían llevar a cabo “experiencias del pensamiento” que pudieran poner de manifiesto en principio estos curiosos fenómenos.

Los dos galardonados trabajan en el campo de la óptica cuántica estudiando las interacciones fundamentales entre luz y materia, un campo que ha progresado considerablemente desde mediados de los años ochenta. Sus métodos tienen mucho en común. David Wineland atrapa átomos con carga eléctrica, o iones, controlándolos y midiéndolos con luz, o fotones. Serge Haroche sigue el camino opuesto: controla y mide fotones atrapados, o partículas de luz haciendo pasar átomos a través de la trampa.

## ■ Controlando iones

Wineland construye la trampa con campos eléctricos de sentido opuesto creando lo que se llama un pozo de potencial eléctrico y aislándolos del calor y de la radiación de su entorno, realizando el experimento en el vacío y a temperaturas extremadamente bajas.

Uno de los secretos que se hallan tras el avance de Wineland es la maestría en el arte de utilizar y crear haces pulsantes de láser. Se utiliza el láser para suprimir el movimiento térmico de los iones en la trampa, llevando al ion a su nivel de energía más bajo, permitiendo así el estudio de los fenómenos cuánticos en el ion atrapado. Se puede utilizar un pulso láser cuidadosamente sintonizado para situar al ion en un estado de “superposición” que es una existencia simultánea de dos estados cuánticos claramente diferentes. Por ejemplo, el ión se puede preparar para ocupar dos niveles energéticos simultáneamente. Empieza en el nivel energético más bajo y el pulso láser solo le lanza a situarse a medio camino del estado energético más alto, de manera que al ión se le deja entre los dos niveles, en una superposición de estados energéticos, con igual probabilidad de acabar en uno de ellos. Por este procedimiento se puede estudiar una superposición cuántica de estados de energía iónica.

## ■ Controlando fotones

Serge Haroche y su equipo de investigadores emplean un método diferente para desvelar los misterios del mundo cuántico. En el laboratorio de París, los fotones de microondas rebotan en un movimiento de vaivén dentro de una pequeña cavidad entre dos espejos, separados unos tres centímetros. Los espejos están hechos de material superconductor y están enfriados a una temperatura ligeramente por encima del cero absoluto. Estos espejos superconductores son lo más brillante del mundo, es decir, ofrecen la más pura y neta reflexión de la luz. Son tan buenos reflectantes que un solo fotón puede ir y venir entre ellos dentro de la cavidad durante casi 0,1 segundos, antes de que el fotón se pierda o sea absorbido. Este tiempo récord de vida significa que el fotón habría viajado 40.000 kilómetros equivalentes a una vuelta alrededor de la Tierra.

Durante el tiempo de su larga vida, se pueden llevar a cabo muchas manipulaciones cuánticas con el fotón atrapado. Haroche utiliza átomos especialmente preparados, llamados átomos de Rydberg por el físico sueco Johannes Robert Rydberg (1854-1919), para controlar y medir el fotón de microondas en la cavidad. Un átomo de Rydberg tiene un radio de 125 nanómetros = 1250 angstrom, que es aproximadamente 1.000 veces mayor que un átomo típico, de algo más que 1 angstrom. Estos gigantes átomos de Rydberg, de forma toroidal, son introducidos en la cavidad uno a uno a una velocidad cuidadosamente elegida, de manera que la interacción con el fotón de microondas se realiza de manera bien controlada.

El átomo de Rydberg atraviesa y sale de la cavidad, dejando atrás el fotón de microondas. Para la interacción entre el fotón y el átomo crean un desfase del estado cuántico del átomo, es decir, en la onda asociada al átomo. Este desfase se puede medir cuando el átomo sale de la cavidad, manifestando así la presencia o ausencia del fotón dentro de la misma. Si no hay ningún fotón, no hay desfase. Haroche puede así medir un fotón aislado sin destruirlo.

Con un método similar, Haroche y su grupo son capaces de contar los fotones existentes dentro de la cavidad. Esto puede parecer fácil pero requiere una destreza y habilidad extraordinarias, ya que los fotones, a diferencia de los cuerpos ordinarios, se destruyen inmediatamente al ponerse en contacto con el mundo exterior. Basándose en sus métodos para contar fotones, Haroche y sus colaboradores han concebido métodos para seguir la evolución de un estado cuántico individual paso a paso, en tiempo real.

## ■ Determinismo en Física

En este apartado transcribimos algunos de los párrafos de mi discurso de ingreso en esta Real Academia de Doctores de España, en 1991.

Laplace (Pierre Simon, Marqués de) (1749-1827), extendió la Teoría de la Gravitación de Newton al conjunto del sistema solar, lo que constituía un complejo problema. En efecto, según las observaciones realizadas desde el tiempo del astrónomo danés Tycho Brahe (1546-1601), es decir, durante dos siglos, la órbita de Júpiter se estaba reduciendo continuamente, mientras que la de Saturno se ampliaba. El hecho había sorprendido a Newton, quien, al no poder explorar matemáticamente fenómenos tan complejos, supuso una periódica intervención divina para arreglar las cosas y evitar la catástrofe. Laplace por cálculos matemáticos concluyó en la invariancia del movimiento medio planetario. Era el paso más importante en la Física astronómica desde Newton.

Laplace resume los resultados obtenidos por medio de cálculos matemáticos y la aplicación de la Ley de la Gravitación de Newton en su gran obra titulada *Traite de Mecanique Celeste*. El alcance de sus conclusiones queda reflejado en sus propias palabras:

*“Presentamos en la primera parte de este trabajo los principios generales del equilibrio y del movimiento de los cuerpos. La aplicación de estos principios a los movimientos de los cuerpos celestes nos ha conducido por razonamientos geométricos, sin hipótesis alguna a la ley de atracción universal. La acción de la gravedad y el movimiento de los proyectiles son casos particulares de esta ley. Consideramos después un sistema de cuerpos a esta universal ley de la Naturaleza y obtenemos, por un análisis singular, las expresiones generales de sus movimientos, de sus figuras y de las oscilaciones en los fluidos que los cubren. De estas expresiones deducimos todos los fenómenos conocidos de la subida y bajada de las mareas, las variaciones de los grados y de la fuerza de la gravedad en la superficie de la Tierra, la precisión de los equinoccios, el movimiento de vibración de la Luna y rotación de los anillos de Saturno. Hemos señalado también la causa de que estos anillos permanezcan continuamente en el plano del ecuador de Saturno. Además, hemos deducido de la misma teoría de la gravitación las ecuaciones principales de los movimientos de los planetas, en particular de los de Júpiter y Saturno, cuyas grandes perturbaciones tienen los periodos de cerca de novecientos años”.*

Podemos resumir lo anterior diciendo que la cosa funcionaba, y funcionaba muy bien. El Universo, como realización de un magnífico orden, respondía perfectamente a las leyes de la Física. Laplace se entusiasmaba con sus propias conclusiones y añade:

*“Las irregularidades de los dos planetas –se refiere a Júpiter y Saturno- parecían antiguamente inexplicables por la ley de la gravitación universal. Ahora constituyen uno de sus demostraciones más llamativas. Tal ha sido el destino de este descubrimiento brillante, que cada dificultad que ha surgido ha resultado para él un nuevo motivo de confirmación, circunstancia que es la característica más cierta del verdadero sistema de la Naturaleza”.*

Pero Laplace no lo explica todo, al menos todo lo que hoy sabemos. Por ejemplo, la Tierra no es un cuerpo rígido, los movimientos de los fluidos que afectan al manto y a la corteza, así como las variaciones del nivel global de los mares, debidas a la congelación o fusión del hielo polar, alteran el momento de inercia del planeta y afectan a su velocidad de rotación. El sistema no es, además, conservativo, pues los fenómenos de marea frenan el movimiento de los cuerpos celestes y, en el caso de la Tierra, suponen un incremento gradual de 2 mili-segundos por siglo. Las medidas se han hecho mucho más precisas y el láser ha permitido conocer que la Luna se aleja de la Tierra 4 cm por año.

Sin embargo, Laplace no se plantea estas reservas y afirma que el sistema está diseñado *“para una duración eterna, mediante los principios que prevalecen tan admirablemente en la Tierra misma para la conservación de los individuos y para la perpetuidad de los especies”*. Llegado a este punto, para pasar de la Física a la Filosofía no faltaba más que un paso y Laplace lo dio, contribuyendo al desarrollo del determinismo, según el cual todos y cada uno de los sucesos del Universo están sometidos a las leyes naturales. Así lo expone en su *Ensayo Filosófico*. Volvamos a escucharle.

*“Así, pues, deberíamos considerar el estado presente del Universo como el efecto de su estado anterior y como la causa del que le va a seguir. Supuesto por un instante una inteligencia que pudiera captar todas las fuerzas que animan la Naturaleza y la situación respecto a los seres que la componen, una inteligencia suficientemente amplia para someter esos datos a análisis, abarcaría en una misma fórmula los movimientos de los cuerpos más grandes del Universo, y las del átomo más ligero. Para ello, nada sería incierto, y el futuro tanto como el pasado estarían presentes a sus ojos. La mente humana ofrece,*

*en la perfección que ha sido capaz de dar a la astronomía una remota idea de esa inteligencia. Su descubrimiento de la mecánica y geometría, unidas a las de la gravitación universal, le han capacitado para comprender en las mismas expresiones analíticas los estados del pasado y futuro del sistema del mundo. Aplicando el mismo método a algunos campos de su conocimiento ha logrado comprender fenómenos reservados a leyes generales y prever aquellos fenómenos que circunstancias dadas han de producir. Todos esos esfuerzos en la búsqueda de la verdad tienden a apuntar continuamente a la amplia inteligencia que hemos mencionado, de la cual la mente humana se verá siempre infinitamente alejada. Esta tendencia peculiar a la raza humana es la que le hace superior a los animales, y su progreso en este respecto distingue a las naciones y a las épocas, y constituye su verdadera gloria”.*

Laplace establece que el estado actual del Universo determina tanto el futuro como el pasado. Quien poseyera la información suficiente para descubrir dicho estado en un momento del tiempo posee la historia completa. Esta proyección hacia delante y hacia atrás radica en que el tiempo interviene en la ley fundamental de la dinámica dimensionalmente elevada al cuadrado. En efecto, así ocurre al expresar la aceleración como derivada segunda del espacio respecto al tiempo. Dicha cantidad cinemática, efecto de las fuerzas motrices, resulta invariante ante un cambio de signo del tiempo, y por eso sus conclusiones se extienden en ambos sentidos de la recta real, sobre la que esta variable se representa.

A continuación apela Laplace a una inteligencia capaz de almacenar los datos que describen todas las acciones dinámicas actuantes en un instante determinado, tratándose de un sistema universal habrían de ser en todo caso interiores. Ciertamente con los conocimientos de la época, bastaba una información referente a las posiciones de las partículas, sus velocidades y sus masas, pues de ello dependían las correspondientes interacciones. Finalmente era necesaria una descripción cinemática de los cuerpos. En resumen, de cada partícula, por supuesto esférica, habría que conocer seis datos: las tres coordenadas de su posición y las tres correspondientes de la cantidad de movimiento. Si no se consideraban esféricas, habría que duplicar esta información, pues habría que conocer su orientación inicial y su rotación. El duplicar la información, no obstante, no altera el orden de magnitud de esta.

Laplace recaba además de esa inteligencia la capacidad de someter esos datos a análisis, es decir, su elaboración. Esta segunda parte es aún más exigente que la primera, pues el tratamiento analítico se mostró incapaz de ir más allá de dos par-

tículas. El problema de los tres cuerpos, es decir, el estudio del movimiento de tres partículas, que se atraen según la Ley de Gravitación de Newton, hizo correr mucha tinta desde la época de Laplace. Más de 800 trabajos científicos de los matemáticos más notables se ocuparon de él. Las ecuaciones matemáticas que describían el movimiento se planteaban con facilidad, pero se resistían a una solución analítica y la solución numérica con cálculo manual era prácticamente irrealizable. Lagrange encontró algunas soluciones particulares y así quedó hasta fines del siglo XIX, cuando el matemático francés Jules Henri Poincare (1854-1912) desvaneció todas las esperanzas al demostrar que se trataba de un problema no integrable por ser insuficientes las cantidades conservadas.

La amplia inteligencia que Laplace evoca, será siempre infinitamente superior a la mente humana. Solo nos queda la duda de que si Laplace hubiese vislumbrado los albores del cálculo automático hubiese acaso apeado la exigencia de esa infinitud. En efecto, el mínimo de partículas elementales de nuestro universo se estima en  $10^{80}$ .

No vale la pena inquietarnos por los escurridizos neutrinos que, al ser tomados en consideración, suponen algunos que pueden hallarse presentes en una proporción 100 veces superior. Dos unidades en el exponente no alteran demasiado nuestras reflexiones.

## ■ Frente al determinismo, la incertidumbre

El concepto determinista del Universo hizo crisis en 1927, cuando el físico alemán Werner Karl Heisenberg (1901-1976) enunció su célebre principio, estableciendo que la posición y la velocidad de un objeto no pueden ser medidas, ambas, exactamente en el mismo momento. La coexistencia de los meros conceptos de posición exacta y velocidad exacta carecen de significado en la Naturaleza. El principio de incertidumbre de Heisenberg no se pone de manifiesto en la experiencia ordinaria, pues su alcance escapa a la observación. Solo se hace significativo cuando se trabaja con las masas muy pequeñas de los átomos o las partículas elementales. El principio pone un límite al conocimiento que se puede obtener por el método científico y destaca la interacción existente entre los objetos observados y el observador. Dicho con otras palabras: este principio, llamado también de indeterminación, se refiere a la incertidumbre que inevitablemente se introduce entre la medida experimental de una cantidad física y el propio proceso de medición. La mecánica clásica impone que se puede medir la velocidad y la posición de cualquier sistema o de cualquiera de sus partes con tanta

exactitud como se desee. Nótese que no se trata aquí de poner la esperanza en contar ni ahora ni nunca con instrumentos de medida más precisos. El principio quita precisamente esa esperanza, pues establece como una ley de la Naturaleza que la posición y la cantidad de movimiento de un sistema no son determinables con cualquier exactitud arbitrariamente fijada. El margen de error (digámoslo así) con que se miden la una y la otra tienen que ser del orden de magnitud de la constante de Planck, ya citada, de  $6,6256 \times 10^{-34}$  julios x segundo. Dicho de una manera aún más gráfica. La Naturaleza se niega a revelar para una misma partícula y en un mismo instante la respuesta a estas dos preguntas: ¿Dónde está? y ¿Cómo se mueve? Si la ciencia lograra con sus métodos arrancar a la Naturaleza una respuesta con error nulo (o que tienda a ser nulo) para una de ellas, la respuesta a la otra pregunta se le escaparía hasta el infinito (o tendería a ser infinito el error con que logre medirla). Si alguien se entristece por el carácter negativo o limitativo de esta ley, consuélase meditando en la enorme pequeñez de la constante de Planck.

## ■ Cuando la física habla en términos de probabilidades

No se puede decir que la Física sea una ciencia exacta. A diferencia de la Matemática que maneja entes de razón, la Física maneja entes reales. La Física expresa las leyes de la Naturaleza con lenguaje matemático, porque es el que mejor se adapta a sus fines, pero de ahí a pensar que pueda transportar a estas leyes la exactitud de la Matemática hay bastante distancia. Desde siempre se han interpuesto en el camino las técnicas de la medida, pero como acabamos de decir, la propia Naturaleza ha manifestado su rechazo a la exactitud, sin alejarse mucho de ella. Visto que no se puede medir exactamente la posición de la partícula y su velocidad, tampoco se puede hablar de su trayectoria en el sentido clásico, como la línea (unidimensional) que describe en su movimiento. Sigue en pie la pregunta, aparentemente sencilla: ¿dónde está la partícula?

El físico austriaco Erwin Schrödinger (1887-1961) dio la respuesta en términos de probabilidad. No se puede saber dónde está la partícula, pero podemos evaluar la probabilidad de encontrarla aquí o allí. Su célebre ecuación es considerada hoy una de las ecuaciones básicas de la Física cuántica. Schrödinger define la función de ondas que nos ofrece como información la determinación de las regiones del espacio en que es más probable que la partícula se encuentre. La función de onda debe depender del estado dinámico de la partícula, caracterizado por las fuerzas que actúan sobre ella y por su energía total. No es poco. La ecuación de Schrödinger es una ecuación dife-

rencial en derivadas parciales de segundo orden, y lineal. Es integrable para casos de contornos sencillos y, cuando esto no ocurre, siempre queda el recurso del cálculo numérico, hoy potenciado increíblemente con el uso de las computadoras electrónicas.

No creemos oportuno seguir por esta línea en el presente trabajo, pero sí ofrecer una reflexión sobre el concepto de probabilidad. La palabra es de uso corriente, aunque a veces se confunde con la posibilidad. Para un hecho concreto, la posibilidad no puede tener más que dos valores: el hecho es posible o imposible. Por el contrario, la probabilidad se mide o se calcula; un hecho puede ser más o menos probable y su probabilidad va de cero a uno, de forma continua; el cero corresponde a la imposibilidad de que el suceso ocurra, y el uno a la seguridad de que ocurrirá.

La ecuación de Schrödinger da la densidad de probabilidad; es decir, fijado un intervalo espacial infinitamente pequeño se puede evaluar la probabilidad de que la partícula se encuentre allí. Si el intervalo no es infinitamente pequeño, la probabilidad se calcula por la operación matemática de integración.

Aunque no es esta la definición que da la literatura matemática de probabilidad, nos atrevemos a afirmar, algo jocosamente, que es la formulación de la ignorancia. Jugamos a cara o cruz, o a cualquier otro juego de azar, porque suponemos que nuestra ignorancia sobre el resultado es compartida por los demás jugadores. Pero si uno de ellos lanzara la moneda utilizando un complicado aparato que registrara la posición inicial de la moneda, la velocidad de lanzamiento, la temperatura y densidad del aire en la que va a voltear, y las características elásticas de la mesa en la que va a rebotar, y que todos estos datos son elaborados en tiempo real por un computador que susurra la respuesta de sus cálculos a uno de los jugadores, ¿se aceptaría como juego de azar? ¿No se ofrecerían dudas de que la ignorancia no fuera igual para todos? ¿Además, la caída sobre cara o cruz se entiende que son las únicas posibilidades? ¡No va a caer de canto! Depende de lo gruesa que sea la moneda. Si su grosor es, por ejemplo, veinte veces su diámetro, lo más probable será que caiga de canto y lo raro sería que caiga sobre una de las bases del cilindro.

Schrödinger intentó, y lo consiguió, describir la realidad cuántica en términos de probabilidad. No era esto totalmente nuevo en Física. La Física estadística formula leyes termodinámicas macroscópicas a partir del conocimiento de las leyes que rigen el choque de moléculas individuales. Pero establecer en base probabilística las características del mundo macroscópico es otra cuestión. Ya él mismo decía en 1952: "Nosotros nunca realizamos experimentos con un solo electrón o átomo, o con una

molécula pequeña. En los experimentos imaginarios que, a veces imaginamos hacer, esto comporta inexorablemente consecuencias ridículas”.

El momento ha llegado con los recientemente galardonados Haroche y Wineland de trabajar en el laboratorio con un número muy reducido de partículas del macrocosmos. Es pronto para predecir las consecuencias que esto pueda tener. Se piensa en aplicaciones. Quizá alguien imagine su impacto en la producción o la economía. Prefiero quedarme en el plano puramente teórico y conceptual con unos esquemas de pensamiento que nos permitan imaginar en el mundo cuántico, sin que se nos ofrezca como algo artificial y ridículo, o contrario al sentido común. Y, sobre todo, que nos lleve a exclamar con admiración: “*Deus est magnus in magnis maximus in minimis*”. Dios es grande en las cosas grandes, grandísimo en las cosas pequeñas.