

## LA FÍSICA DEL SIGLO XX\*

**Rodolfo Gambini**

Departamento de Física Teórica

Instituto de Física

Facultad de Ciencias

El problema de la divulgación en Física es que se ha transformado prácticamente en misión imposible. Yo recuerdo al amigo de Sábato. Él cuenta en su libro “Hombres y engranajes” que muchas veces le tocó explicar la Teoría de la Relatividad a algún amigo, y que haciéndolo en forma muy concienzuda y responsable, trataba de ser lo más fiel posible a lo que establecía la propia teoría. El resultado, por lo general era que el amigo al final decía: “No entendí. ¿Podrías explicármelo en términos más sencillos?” La explicación se renovaba, cada vez en términos más sencillos, hasta que al final el amigo le decía: “Entendí.” Y entonces Sábato normalmente le explicaba que lo que había entendido ya no era la Relatividad.

Entonces aquí tenemos este tipo de dificultades, y yo quiero analizar por qué se presentan estas dificultades en Física. Creo que no son dificultades insalvables, pero quiero individualizar las causas, y explicar cómo se pueden atacar esos problemas. A veces hay problemas científicos, y a veces hay problemas de otro tipo, relacionados estrictamente con la divulgación.

La Física es para muchos hoy en día un formalismo muy útil para hacer predicciones, pero poco tiene que decir acerca del mundo, en el sentido de aportar un conocimiento más profundo de la realidad. Estas dificultades se acentúan sobre todo cuando uno va a teorías fundamentales, que son muy abstractas del punto de vista matemático. Uno se tropieza con enormes dificultades para proporcionar imágenes. ¿Por qué resulta entonces tan difícil explicar la Física en términos sencillos del lenguaje ordinario?

Por un lado, hay algunas teorías físicas que tienen problemas de interpretación. Mas adelante explicare con más detalle que quiero decir con esto. Por ejemplo, la Mecánica Cuántica es una teoría que aún hoy no ha sido interpretada.

Por otro lado, hay muchas teorías físicas de este siglo que son muy importantes, como la Relatividad Especial o la Relatividad General, que si bien no tienen problemas de interpretación, no son comprendidas por que la interpretación no ha alcanzado, digamos, al público en general. No se ha logrado, de alguna forma, que el sentido común incorpore los resultados de esa interpretación.

Así es que yo digo que hay dos etapas. Una es una etapa de interpretación, y una segunda etapa es de asimilación por el sentido común. Voy a hacer referencia brevemente a estas dos etapas.

---

\* Versión corregida por el autor.

Interpretar una teoría es traducirla al lenguaje ordinario de tal modo de proporcionar una visión del mundo en que la consistencia de sus postulados resulte evidente. Esto parece relativamente sencillo. En realidad, si no es evidente la consistencia de los postulados debería haber algo mal en la teoría. Sin embargo, teorías como la Mecánica Cuántica proporcionan resultados que son y han sido comprobadas con total precisión y, sin embargo, este criterio de consistencia evidente no se logra satisfacer. Es decir, no tenemos una imagen, una descripción en lenguaje ordinario donde veamos cómo los postulados son consistentes entre sí. Voy a volver luego a explicar por qué ocurre eso.

Entonces, ¿qué consecuencias tienen estas dificultades? Para mí tienen graves consecuencias desde el punto de vista filosófico y sociológico. Del punto de vista filosófico la dificultad es que las Ciencias Físicas, que son las que nos dan el conocimiento más preciso sobre el mundo, de alguna forma se han transformado en impotentes a la hora de contribuir a una comprensión universalizadora, unificadora, que incluya al Hombre y que incluya también al mundo físico.

Y por otro lado tienen un aspecto sociológico que me parece muy importante, que es el que tiene que ver con todas estas modas actuales del Posmodernismo, Deconstructivismo, Pensamiento Débil, etc., que son todas formas de negar el poder de la razón como capacidad de comprensión que nos da resultados indiscutibles. Vemos pues que estas dificultades tienen consecuencias que trascienden en mucho lo que es el pensamiento puramente filosófico. Y de alguna manera, justifican posiciones como las que he mencionado.

Entonces, la charla tiene este doble objetivo. Destacar la importancia de las interpretaciones de las teorías físicas y describir algunas enseñanzas, que a mi entender aún no han sido asimiladas por el sentido común, pero que pueden extraerse de la Física Contemporánea. Seguramente sólo podré cumplir parcialmente con objetivos tan ambiciosos. Fundamentalmente, por que las enseñanzas contradicen el sentido común, y en muchos casos resultan un poco escandalosas.

Quiero aclarar a que me refiero con “sentido común”. Yo lo entiendo fundamentalmente como una heurística. Es decir, cuando yo juego al tenis tengo un conocimiento de la Mecánica, de la Mecánica de Fluidos, de una serie de cosas, que por supuesto no resultan únicamente de un conocimiento teórico. Es simplemente un conocimiento empírico. Incluso cuando cocino también utilizo un conjunto de conocimientos empíricos. Esos conocimientos no hay que pensarlos como enunciados que uno tiene de alguna forma acumulados, sino como imágenes, reacciones, relaciones kinestésicas que involucran incluso al cuerpo. Son, en general, realidades muy complejas que forman ese conjunto de prejuicios o de sobreentendidos con los cuales nos manejamos. Entonces uno puede decir por qué preocuparse tanto por lo que en definitiva son prejuicios. Pero el hecho es que cuando uno va a atacar un problema no puede librarse de las ideas preconcebidas y los prejuicios, no puede aislarlos. Y esto se ve y lo vamos a ver en los distintos ejemplos que yo voy a tratar aquí.

Lo dicho no quiere decir que el sentido común sea una cosa estática. El sentido común es dinámico, se ha desarrollado a lo largo de los siglos. Voy a mencionar acá un ejemplo que da para mucho más, pero que no tengo mucho tiempo para analizar. Galileo ridiculizaba a la gente que en su época se oponía a la idea de rotación terrestre haciendo uso de una idea absoluta de arriba y abajo con argumentos como el siguiente “Bueno, ¿cómo puede ser que la Tierra rote? Si

yo estoy subiendo a una montaña y la Tierra rota, entonces llega un momento en que empiezo a bajar la montaña.” Porque pensaban en un sentido de arriba y abajo absoluto, externo a la relación con la Tierra. En la época de Galileo era uno de los argumentos favoritos de la gente, no de los sabios de la época pero sí de la mayor parte de la gente. Vemos pues que esa noción que predominaba en el sentido común de la época de Galileo, hoy en día ha sido superada completamente.

Entonces, ¿cuándo se necesita interpretar una teoría física? Una interpretación se hace necesaria cuando no es posible encontrar ninguna forma de expresar los conceptos fundamentales de la teoría dentro de los límites del sentido común establecido. Me parece que hay dos elementos en la interpretación. El fundamental es este: poner en evidencia la coherencia interna de las leyes y su capacidad de reproducir los hechos observados. Lo voy a mostrar en un momento en un ejemplo, que es el análisis de Galileo de la crítica a la rotación terrestre.

El segundo elemento es, más que parte de la interpretación, producto de la interpretación. Y es que la interpretación nos proporciona un marco conceptual que puede aplicarse a campos de la experiencia que trascienden en principio a la Física, e iluminarlos al descubrir en ellos la acción de sus leyes.

Entonces, les voy a mostrar estos dos elementos en un ejemplo tomado de Galileo. En realidad, este ejemplo es discutido de manera brillante por Feyerabend. Se trata del argumento de la torre. El argumento de la torre tiende a contradecir la idea que sostenía Galileo de la rotación terrestre. Galileo estaba inspirado en las ideas copernicanas del heliocentrismo, y en ese sentido necesitaba para explicar la rotación de la esfera celeste de la rotación de la Tierra, y explicarla además, en términos de movimiento relativo. Él ataca entonces a un argumento que se utilizaba en la época para refutar la posibilidad de rotación. El argumento dice así: “Los cuerpos pesados que caen desde una altura describen una línea recta y vertical hacia la superficie terrestre. Por consiguiente la Tierra no puede moverse. Porque si esta tuviese un movimiento de rotación diurno, al dejar caer la piedra desde lo alto de una torre, esta, transportada por el giro de la Tierra, habría viajado cientos de metros hacia el Este en el tiempo en que la piedra emplearía en su caída. Por lo que la piedra debería chocar con la Tierra en un punto que estuviese a esa distancia del pie de la torre.”

La gente pensaba con una física que era totalmente consistente, que era la física de Aristóteles. Y para la física de Aristóteles, un cuerpo tiende al reposo. Entonces, cuando yo suelto la piedra ella tiende al reposo y el resto sigue girando, por lo que la piedra se va para atrás. Cuando la torre se movió, la piedra se quedó, no siguió el movimiento. Entonces un observador vería que la piedra se va para atrás. Esa es la idea del argumento de la torre. El argumento recurre a un hecho: las piedras caen verticalmente. Y da por supuesto lo que para el sentido común de la época era la forma dominante de pensar: el movimiento es absoluto, no se concebía la idea de relatividad. Y en segundo lugar, los cuerpos tienden al reposo.

Entonces, por supuesto, Galileo no discute el hecho, lo que va a mostrar es que existe una interpretación diferente del hecho. El primer punto a rebatir es el de la idea del movimiento absoluto. Recurre a la experiencia y dice: “Bueno, ustedes cuando viajan en un barco, y el barco se está moviendo, ¿acaso ustedes tienen que girar la cabeza para seguir el movimiento del

mástil?” El barco se está moviendo, yo me muevo con el barco, no hay entonces ninguna percepción del movimiento.

Entonces dice: “Si el movimiento es relativo, no tengo que explicar por qué no noto la rotación cuando la piedra no cae. Tengo que explicar qué ocurre en el momento que yo suelto la piedra.” Y él ahí utiliza un segundo principio de la Nueva Mecánica que es el principio de inercia. El principio de inercia establece que un cuerpo mantiene su estado de velocidad. Entonces la piedra tenía una velocidad en la misma dirección de la rotación, y es esa velocidad que se mantiene constante la que hace que la piedra caiga verticalmente en vez de tender hacia atrás.

Así que él combina dos ideas nuevas: la del movimiento relativo y la de inercia, y logra dar una descripción nuevamente consistente de los mismos hechos. Es decir, lo interesante es que los hechos por sí mismos no son completos. Uno los tiene que vestir con una estructura conceptual. Los hechos estaban vestidos con una estructura conceptual que en principio parecía totalmente aceptable, y él lo que hace es proporcionar una nueva estructura que salva los hechos pero ahora los hace consistentes con el principio inspirador de todo esto que era la idea heliocéntrica. Es decir, ahora la Tierra puede rotar naturalmente, los planetas pueden girar alrededor del Sol. No hay más un punto central que tenga sentido decir que está en reposo, por que no hay una idea de reposo absoluto. La idea de inercia establece que yo no puedo distinguir un sistema en movimiento uniforme de un sistema en reposo. De manera que las nociones mismas que están en la base de la Cosmología Aristotélica se vienen abajo con esta nueva interpretación.

Y justamente, ¿qué hizo Galileo? Lo que yo decía al principio, ha puesto en evidencia la consistencia de los principios de la Nueva Mecánica. Principio de relatividad y principio de inercia con la cosmología de Copérnico, que Copérnico no se animó a contar. Se la guardó hasta que se murió, porque él seguía pensando aristotélicamente y no había forma de entender eso, y sin embargo, la evidencia astronómica estaba allí.

Eso con relación al primer punto. Con relación al segundo punto, yo quisiera ahora mostrar brevemente dos consecuencias del impacto que tuvo esta transformación conceptual. Lo notable es que Galileo, por otra parte, no tenía por un lado la Mecánica y por otro lado este argumento, y entonces aplicó la Mecánica al argumento. Él fue creando la Mecánica para responder argumentos como este. Es un ejemplo de cómo hay que reflexionar.

El primer ejemplo que quiero mencionar es la idea de cómo esa nueva interpretación afectó a la Cosmología Moderna. El universo aristotélico estaba basado en un espacio físico con borde. En el borde estaba la bóveda celeste, y un punto central donde se encontraba la Tierra. Había una idea de reposo absoluto. La Nueva Física, por un lado con el concepto de inercia destruye la idea de reposo absoluto, y por lo tanto en el espacio no se pueden distinguir los puntos. No hay un punto privilegiado que pueda considerarse como centro. Por otro lado sustituye la idea de un espacio físico por la idea de un espacio geométrico, el espacio de Galileo es el espacio de la Geometría de Euclides. Y lo mismo para Newton, es un espacio dado de una vez para siempre donde se mueven los objetos, Newton lo dice explícitamente. Es el espacio matemático, dice Newton. Curiosamente, hemos vuelto a Aristóteles después con Einstein. Entonces, si el espacio es geométrico no tiene ningún sentido poner una cáscara en algún lado que limita el espacio. Si el espacio es físico, puede ser finito. De hecho, la Relatividad dice que el espacio es curvo, pero se

curva alrededor de nada. La Física está en el interior del espacio y no en ese hiperespacio sobre el cual se curva.

Estos dos principios hicieron imperceptiblemente cambiar la visión de que había una bóveda celeste e hicieron aceptar naturalmente la idea de que el Universo era infinito. A tal punto, que esta idea que ya predominaba después de Galileo demoró casi doscientos años en ser comprobada. En 1725, Bradley empezó a hacer mediciones de paralaje de las estrellas con resultados negativos. Las estrellas estaban demasiado lejos para las capacidades instrumentales de la época. Y siguieron haciendo mediciones hasta 1838 donde descubrieron los primeros paralajes. A pesar de que demoraron unos 100 años en verificarlo, pocos ponían en duda ya que el Universo era infinito, y menos aun se pensaba que estuviese limitado por la bóveda celeste. Ya en 1750 Kant propuso la hipótesis cosmológica de que nosotros vivimos en una galaxia y que hay otras galaxias como la nuestra, mucho antes de la primera verificación experimental.

La segunda consecuencia que quería mencionar es la consecuencia bien conocida de carácter filosófico que tuvo esta Nueva Mecánica. De hecho, la base de la filosofía moderna desde mi punto de vista está en la Nueva Física. Descartes hace una revisión del pensamiento aristotélico basándose en la Nueva Física. Lo dice explícitamente: “La totalidad de la Filosofía es como un árbol, las raíces son la Metafísica, el tronco la Física y las ramas que salen del tronco las demás ciencias.” Explica en términos mecanicistas, como ustedes saben, la Fisiología en general, animal y humana. Y en definitiva mantiene un ámbito de lo mental, quizás porque no tiene otro recurso. De alguna manera reserva al autor de esa proeza de la razón que es la Nueva Física una naturaleza especial que es la naturaleza del pensamiento, y entonces habla de un mundo compuesto por dos sustancias que tienen una existencia independiente. La sustancia corpórea o material y la sustancia mental.

Evidentemente, el programa cartesiano, es el que está en la base de toda la reflexión filosófica moderna, y se enfrenta con el problema de la comunicación entre las dos sustancias, al que también se enfrenta la Teoría del Conocimiento. Y ahí queda bloqueado el pensamiento no solamente cartesiano sino de los que siguieron: Leibniz, Spinoza. Al tratar de buscar distintas salidas a este problema, la imagen proveniente de la Física Clásica de su época era insuficiente para dar una explicación completa. Sin embargo, en esta época el pensamiento había logrado alcanzar una interpretación interna de la Física y esta había tenido un efecto que se había propagado y había sido asimilado en general por el pensamiento filosófico.

Solo el hombre quedaba como un ente especial no explicable en términos de la física de la época. Voltaire ironizaba al respecto y decía que era un poco raro que todo fuera regido por leyes inmutables salvo un animal de un metro cincuenta que tenía libre albedrío.

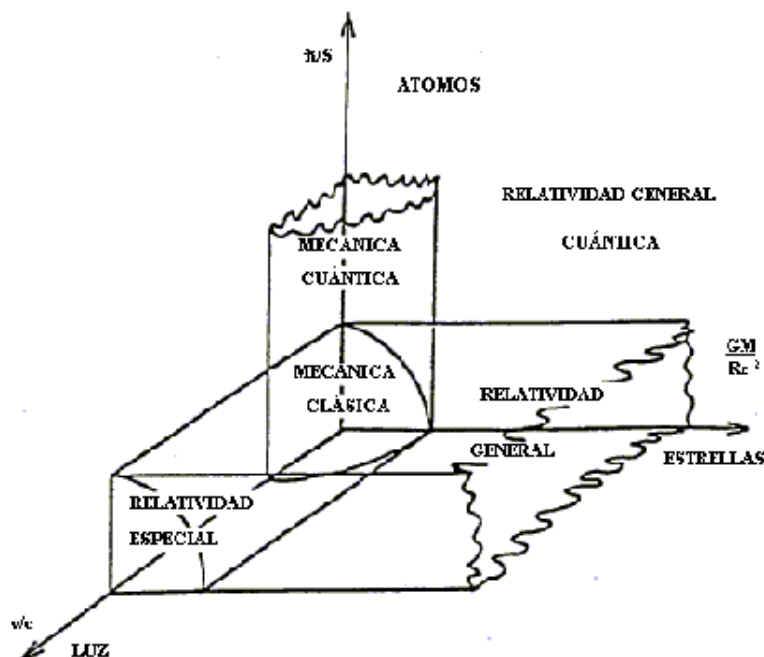
La situación hasta 1870 era la de una concepción del mundo que no tenía fallas desde el punto de vista de la consistencia de las teorías físicas. En la segunda mitad del siglo XIX se empieza a desarrollar la Teoría Electromagnética y ya empiezan a aparecer las primeras contradicciones. Resumo aquí cual es el estado de la Física para esa época. Las principales características de la Mecánica Clásica son: el determinismo, es decir que el conocimiento preciso de las condiciones iniciales permite determinar con total precisión la evolución futura de todos los sucesos. En segundo lugar, esta idea de que los intervalos espaciales y temporales son absolutos. Es decir, que las medidas de tiempo no dependen en absoluto de las propiedades de

movimiento de los cuerpos, o de los observadores. En tercer lugar, el espacio se piensa como un recipiente absoluto, dado, donde se ubican y evolucionan las partículas, y el espacio tiene las mismas propiedades en todas partes y para siempre. Es un espacio euclídeo tridimensional y un tiempo asociado con una variable real. Newton dice: “El tiempo absoluto, verdadero y matemático fluye igualmente sin depender de nada externo debido a su propia naturaleza, y el espacio absoluto, por su propia naturaleza permanece siempre el mismo e inmóvil sin depender de nada externo.”

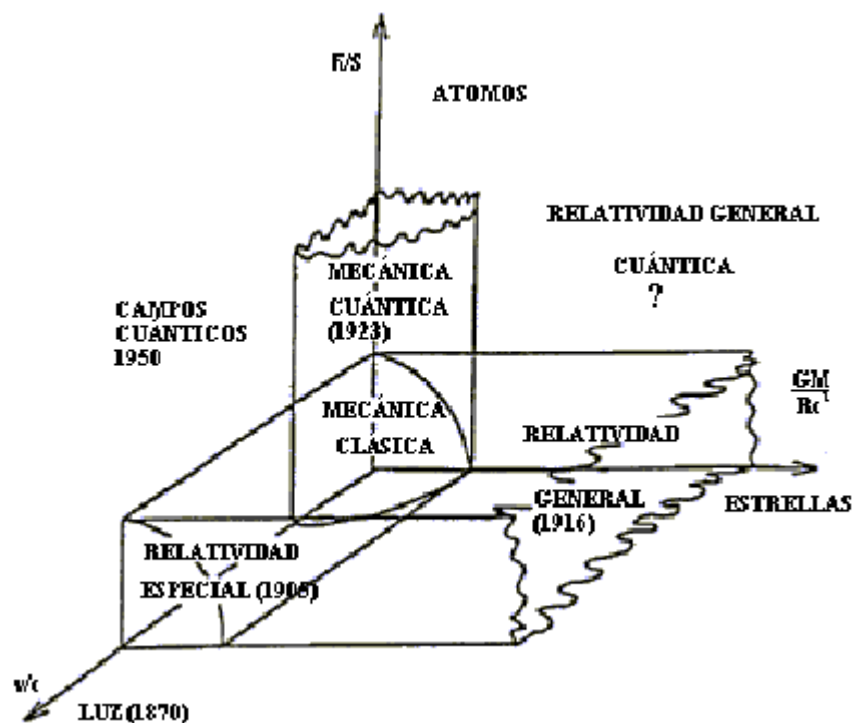
Y el cuarto punto es el de la simultaneidad absoluta. Yo puedo saber exactamente lo que está pasando en cualquier parte del Universo en este instante de acuerdo con la Mecánica Clásica. Entonces, el Universo se puede pensar como algo instantáneo. Es decir, el pasado ya fue, el futuro será. La realidad se concentra en el filo de una cuchilla que avanza en el tiempo.

Evidentemente, si menciono estos cuatro puntos es porque van a ser tirados abajo, no va a sobrevivir ninguno.

Este diagrama al cual recorro en muchas ocasiones es una representación de las distintas teorías físicas en función de tres ejes. El primero relacionado con el cociente entre la velocidad de los objetos y la velocidad de la luz, es decir, a medida que avanzo en la dirección de ese eje tengo objetos que se mueven a velocidades mayores. A medida que avanzo en la dirección del segundo eje tengo objetos sometidos a campos gravitacionales más intensos. A medida que avanzo hacia arriba tengo objetos más pequeños, simplificando. Entonces la física de Galileo y Newton describía la región central, objetos de tamaño mediano, no sometidos a fuerzas gravitacionales demasiado intensas y que se mueven a velocidades pequeñas respecto a la velocidad de la luz. Vamos a ver que como la idea de campo está asociada a la luz, la teoría de ondas electromagnéticas nos aleja de esa zona central y nos hace avanzar en la dirección de la Relatividad Especial. Una vez que uno quiere incluir los fenómenos gravitatorios tiene que irse a la zona que se llama de la Relatividad General. Esta zona es de objetos grandes masivos y muy densos. La Mecánica Cuántica está asociada a la región de objetos microscópicos.



A partir de 1870 se pierde el equilibrio; después de tener una teoría consistente por mucho tiempo, se la debe abandonar para cubrir campos de la realidad que están fuera de su rango de validez. Uno empieza por tener que avanzar en la dirección del primer eje, en 1870 aparece la descripción de Maxwell de los fenómenos electromagnéticos, en 1905 es propuesta la Relatividad Especial. En 1916, la Relatividad General, que describe los fenómenos gravitacionales junto con los fenómenos electromagnéticos. En 1923, la Mecánica Cuántica. Luego, también hay un plano del gráfico en el que uno tiene que describir los fenómenos cuánticos a velocidades muy altas. Esa región es la descrita por la Teoría Cuántica de Campos. La Física de Partículas en general se ocupa de esas cosas, y se le puede poner una fecha indicativa: 1950. Y después queda todo el hueco de la Relatividad General Cuántica que es la zona alejada de los planos definidos por los ejes.

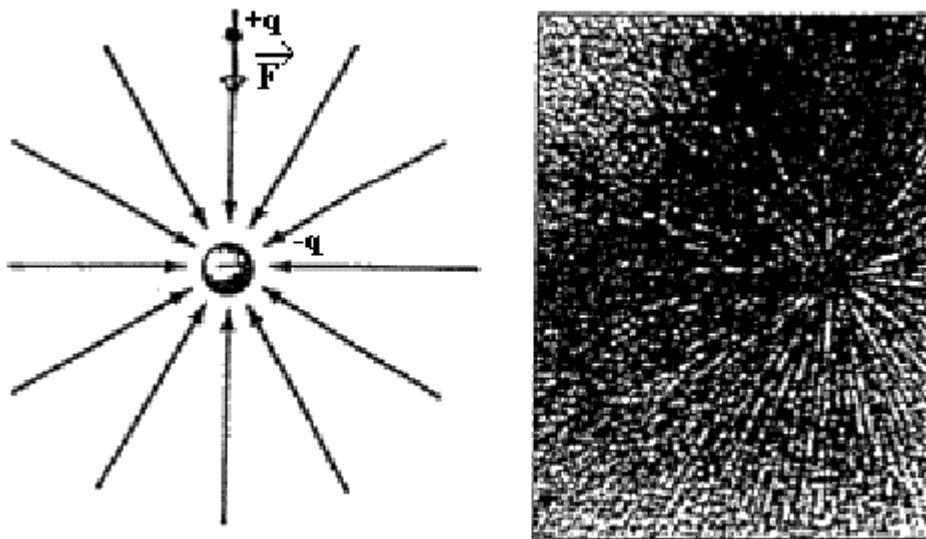


Entonces, la primera conclusión es que la Física no está terminada. La Mecánica Clásica era una Física cerrada, se basaba en un conjunto de principios consistentes y bastaba para describir todos los fenómenos mecánicos. Cuando se abandona el rango de fenómenos descritos por la Mecánica Clásica nos quedamos con una Física abierta que no todavía no hemos podido concluir.

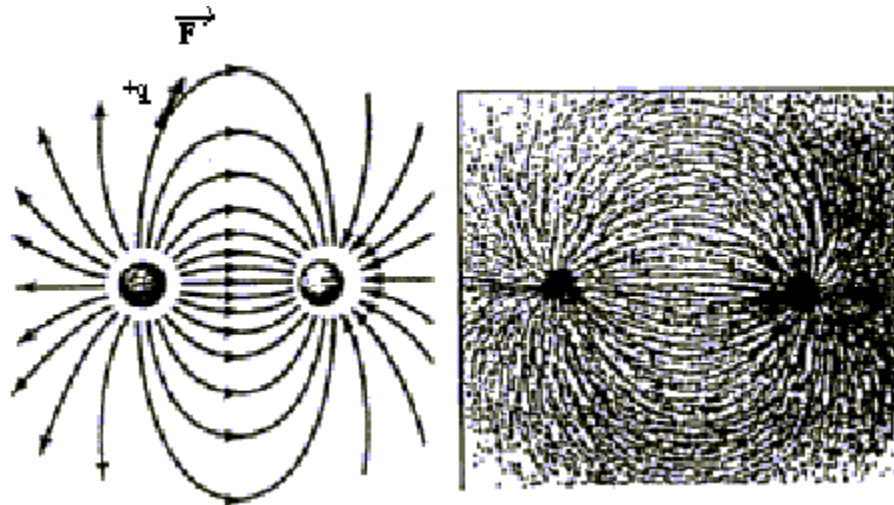
Yo me quiero referir ahora a cuatro ideas que son bastante extrañas al sentido común establecido y que surgen naturalmente de las teorías físicas del siglo XX. Aquí pongo dos juntas porque las analizo simultáneamente. **La desaparición progresiva del concepto de que la materia está compuesta por partículas que se mueven en el espacio vacío.** Esta era la idea básica de la Física de Newton. Los cuerpos son partículas que interactúan y evolucionan en un espacio que es el espacio de la Geometría de Euclides.

**Desaparición de la idea del espacio y tiempo geométricos sustituida por la de un espacio-tiempo dinámico.** Es decir, el espacio-tiempo ya no es una realidad externa, matemática, sino que es una realidad física que evoluciona, que interactúa con la materia, y que lleva hasta energía, es decir, es tan material como el resto. Es de esto que pretendo empezar a hablar, voy a referirme a dos de estos cambios conceptuales que es necesario digerir, es necesario adecuar a nuestro sentido común a las implicaciones que esto tiene. Evidentemente, mencionar sólo cuatro ideas es totalmente arbitrario, simplemente trato de resumir en ellas algunas de las consecuencias más importantes de la física del siglo XX.

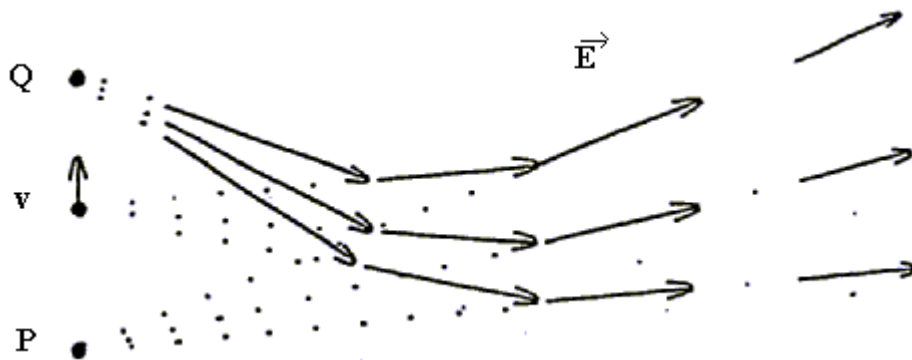
El primer concepto nuevo que aparece es el concepto de campo, introducido a mediados del siglo pasado. El concepto de campo es un concepto no reducible al concepto de partícula. Aparece asociado a los campos de fuerza. La idea es que si uno tiene una carga y pone alguna carguita por algún lado, pequeña, de modo de no alterar mucho el efecto de la carga principal, va a observar que las fuerzas que actúan sobre la pequeña carga están dirigidas hacia el centro. Eso en el caso en que tenga una sola carga aislada. Muestro aquí fotografías de un campo que se visualiza echando limaduras de hierro. Las partículas de hierro se polarizan y se orientan formando esta figura.



Aquí tenemos un campo producido por dos cargas de signo opuesto. Entonces, si uno pone una carga positiva, en reposo, en un punto cualquiera, la carga se va a mover en el sentido de la flecha, hacia la carga negativa.



La luz está compuesta por ondas electromagnéticas, el fenómeno ondulatorio está asociado a una carga en movimiento. La idea es que si yo tenía una carga inicialmente en reposo, y la empiezo a mover, entonces el campo lejos no se entera del movimiento y sigue apuntando a la dirección original. Y a medida que me acerco a la carga tengo que el campo va respondiendo a la carga en posiciones intermedias, hasta que muy cerca el campo proviene de la carga en el instante en que me encuentro. Si yo ahora produzco la oscilación de la carga y después la dejo nuevamente en reposo se produce una onda y la onda se propaga libremente. Aún cuando el movimiento de la carga cese y no existe ningún agente externo, la onda se sigue propagando. Lleva energía, esa energía que nosotros detectamos con la antena de una radio.



Entonces hay un fenómeno ondulatorio asociado al campo. Lo primero que se pensó durante décadas es que había algún soporte mecánico allí, que había un sistema de partículas cuyas oscilaciones producían ese comportamiento. El propio Maxwell hizo maravillas para encontrar el soporte mecánico, sin éxito. Incluso, gentes de un ingenio extraordinario descubrieron la teoría de nudos cincuenta años antes de que los matemáticos se empezaran a interesar por ella, tratando de explicar el fenómeno. El resultado era que el soporte mecánico, llamado éter tenía propiedades totalmente absurdas e incompatibles, y poco a poco se fue abandonando la idea de que tal fluido existiera. El golpe final se lo dio Einstein con la Teoría de la Relatividad.

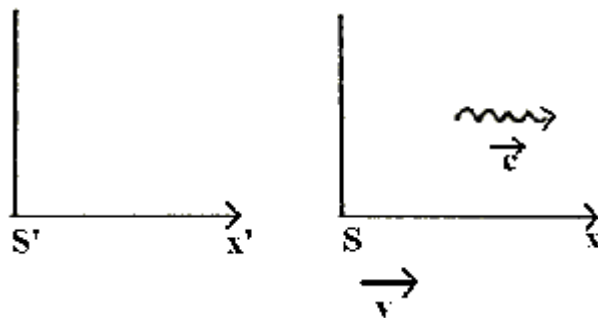
Von Laue en 1908 dice: “...una comprensión totalmente renovada de la propagación de los efectos electromagnéticos en el espacio vacío... (surge de las nuevas teorías del campo); ...ellos no son soportados por medio alguno ni tienen lugar por una inmediata acción a distancia. Sino que el campo electromagnético en el espacio vacío es una cosa que posee existencia propia y una realidad independiente de toda sustancia. En efecto, uno debe acostumbrarse a esta idea, pero quizás este acostumbramiento pueda simplificarse si se recuerda que las propiedades físicas de este campo, que están dadas en la forma más adecuada por las ecuaciones de Maxwell, son más perfectamente y exactamente conocidas que las propiedades de cualquier sustancia.” Las ecuaciones de Maxwell son ecuaciones muy simples y describen el comportamiento de esos objetos. Así que lo que dice von Laue es que aparte de las partículas hay otro tipo de entidad con una existencia propia que son los campos. Y los campos son independientes, no son un subproducto del movimiento de las partículas. Así que pasamos de un Universo en donde tenemos un tipo de sustancia a un Universo donde en principio aparecen dos tipos de sustancias.

Ahora vamos a ver que aparecen tres tipos de sustancias. Para eso vamos a referirnos a la idea del espacio-tiempo. La idea del espacio-tiempo tiene que ver con el abandono de la noción de que el espacio y el tiempo son geométricos. Esto surge con la Relatividad Especial. Hay dos tipos de sustancias, por un lado partículas y por otro lado campos. El problema es que los dos tipos de sustancias tienen descripciones que no son consistentes. La descripción de la Mecánica y de la Física de Partículas da lugar a que si yo tengo un cuerpo que se mueve respecto a un sistema con velocidad  $c$ , entonces se mueve respecto a otro con velocidad  $c + v$ . Es la fórmula de adición de velocidades que relaciona a dos sistemas con movimiento relativo.

$$t' = t$$

$$x' = x + v \cdot t$$

$$c' = c + v$$

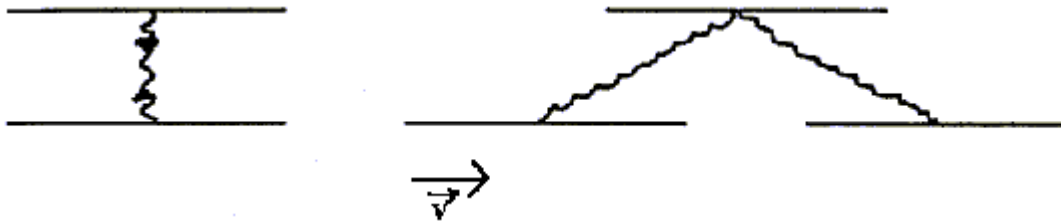


Así que si se cumpliesen los principios de la Mecánica, entonces si un observador ve que la luz se mueve con velocidad  $c$ , otro observador en movimiento respecto al primero vería que se mueve a velocidad  $c + v$ . Pero lo que se observa es que los dos ven que la luz se mueve con velocidad  $c$ . Por consiguiente, este principio que está basado esencialmente en una idea de tiempo independiente del movimiento de los cuerpos, es inadecuado. El dilema entre las dos formas incompatibles de describir las partículas y los campos es resuelto por Einstein que recurre a la navaja de Ockham y dice simplemente: “Postulo que la velocidad de la luz es la misma en todos los sistemas de referencia.” Y voy a analizar qué consecuencias tiene este principio.

Por supuesto, la primera consecuencia que tiene es que las leyes de Newton, que son invariantes bajo unas transformaciones que dan lugar a cambios en la velocidad de la luz, no pueden ser ciertas

exactamente. Tienen que ser ciertas solamente en forma aproximada. Las transformaciones de Galileo, que son las que dicen que la velocidad  $v'$  es la velocidad  $v$  más la velocidad del sistema en movimiento son incorrectas y hay que corregirlas. Solamente son buenas aproximaciones que valen si las velocidades relativas son mucho menores que la velocidad de la luz.

Otra consecuencia de este postulado de que la velocidad de la luz es la misma en todos los sistemas de referencia es que los relojes funcionan distinto cuando el cuerpo está en movimiento y cuando el cuerpo está quieto. Y eso se puede entender con este dibujito de manera muy sencilla.



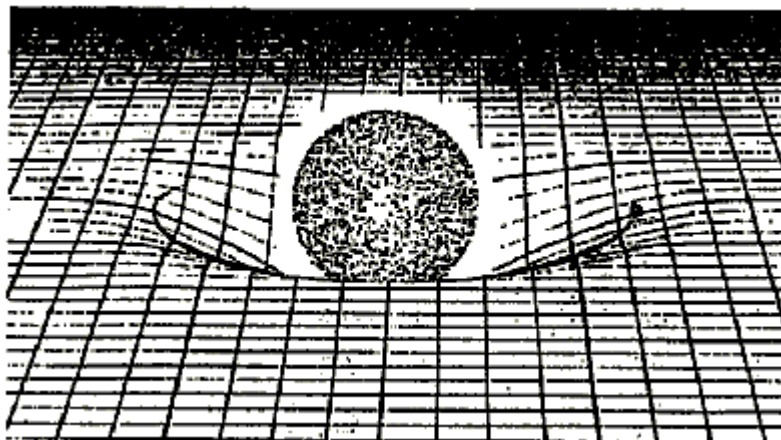
Yo estoy aquí en reposo y veo a un sistema que se mueve con velocidad  $v$ . Armo un reloj formado por dos espejos, y cuento las veces que la luz va y vuelve. Cada vez que golpea el espejo de abajo cuento uno, dos, tres, cuatro, cinco... Entonces, en el sistema en reposo la luz me da un “clic” cada vez que voy hasta arriba y regreso, recorro dos veces esa distancia que separa los dos espejos. En el sistema en movimiento, cuando la luz llega, el espejo de arriba se corrió, porque el sistema está en movimiento, y cuando regresa el espejo de abajo se corrió también. De manera que en vez de recorrer esa distancia dos veces. Recorro una distancia que es mayor, porque tiene que moverse no perpendicularmente al espejo sino en alguna dirección oblicua. Por consiguiente, el número de “clics” que marca el reloj en movimiento es inferior al número de “clics” que marca el reloj que está conmigo. Es decir, yo veo que para mí el tiempo pasa más rápidamente que para la persona que se encuentra en movimiento. Es una consecuencia inmediata del hecho de que la velocidad de la luz es la misma en todos los sistemas de referencia.

Entonces, se pierde la noción de que los intervalos de tiempo son iguales, también se pierde la noción de que los intervalos de espacio (las medidas de longitudes) son iguales, en dos sistemas que se mueven uno con relación a otro. Y también se pierde la noción de que hay un instante, de que hay una noción de simultaneidad que permite saber qué está pasando en este instante en el Universo. Eso no es cierto, y no tiene sentido preguntarse qué está pasando en este momento en la Nebulosa de Andrómeda. Por lo menos tiene un sentido muy relativo. Como la Tierra rota, nuestro movimiento difiere del de los que están en las antípodas en unos 3.000 km/h. La noción de simultaneidad depende de la distancia entre los objetos y de la velocidad, por consiguiente, lo que es simultáneo con nosotros en la nebulosa de Andrómeda puede ser algo que ocurrió hace 10.000 años para los que están en las antípodas. Entonces, el Universo ya no es este filo de cuchillo que avanza en el tiempo. No hay un Universo que es el de este instante, hay una estructura que es la estructura de espacio-tiempo. Es convencional, en definitiva, qué es lo que es simultáneo. Yo establezco la convención, yo establezco las medidas y resulta que en función de mi comportamiento y de mi estado de movimiento tendré que hay ciertos sucesos simultáneos y si tengo otro estado de movimiento tendré que hay otros sucesos simultáneos.

Evidentemente, lo que estoy haciendo aquí al cambiar de teoría en cada página no es algo que esté demasiado bien desde el punto de vista de la divulgación. Es simplemente un intento de transmitir este mensaje de que hay una superación de las nociones tradicionales del sentido común.

¿Qué agrega la Relatividad General a esta noción de espacio-tiempo que ya surge con la Relatividad Especial? Lo que agrega es que el espacio-tiempo ahora es una cantidad dinámica, el espacio-tiempo ya no es más algo geométrico que me lo doy de una vez para siempre, sino que es algo físico, alterado por los objetos y que afecta a los objetos. Eso se traduce, por ejemplo, en la ecuación de Einstein que la escribo aquí en palabras. Y dice que la curvatura del espacio es proporcional a la energía del resto de la materia. En otras palabras, donde hay más energía el espacio se curva más. Entonces hay una relación entre el resto de la materia y el espacio. Y también se le puede atribuir al propio espacio una energía, de una manera un poco diferente que al resto.

El movimiento de los planetas resulta de la curvatura del espacio, como se muestra en el dibujo. Realmente la idea es que los cuerpos se mueven siguiendo trayectorias de mínima longitud, las que se llaman geodésicas, y como el espacio es curvo esas trayectorias dejan de ser las rectas y se transforman en trayectorias curvas. En el dibujo se muestra la geodésica de un pequeño cuerpo en las proximidades de un cuerpo masivo que puede ser una estrella, y la geodésica es curva. Esto es una analogía, como lo eran las explicaciones que le daba Sábato a su amigo. Porque el espacio es cuadrimensional, la curvatura es mucho más compleja y aquí mostramos una estructura como una membrana, que es tridimensional. Pero se puede explicar, al transmitir los conceptos de la Relatividad General, uno no tiene más dificultades que las que resultan del esfuerzo que requiere seguir el razonamiento.



Así que hemos pasado de la idea de que la sustancia está compuesta por partículas a una idea de que está compuesta por partículas y campos. Cuando se introduce la Relatividad General aparecen partículas, campos y espacio-tiempo, todos son objetos físicos. Llevan energía, interactúan entre sí, y no hay nada geométrico, dado, externo. La geometría del espacio-tiempo está determinada por las leyes de la Física. Este efecto de multiplicación de los objetos fundamentales es seguido luego por un efecto de reducción de los objetos fundamentales con la Mecánica Cuántica, que unifica la idea de partícula y la idea de campo, yo no me voy a poder centrar en eso. Y la Gravedad Cuántica, que debe unificar la idea de campo, partícula y de espacio-tiempo. O sea, que al final, lo que uno termina teniendo es un solo objeto con distintas presentaciones, distintos aspectos, distintos comportamientos.

Entonces, de la idea original que teníamos al principio con la mecánica de Newton de que uno tenía partículas, bastante coincidente con la idea de Demócrito, de que uno tenía átomos, partículas, que se mueven en el vacío. Hoy pasamos a una forma de ver al mundo radicalmente diferente. Ahora lo que sabemos es que aun en las regiones del medio intergaláctico más vacías de partículas hay campos y obviamente espacio-tiempo. La teoría cuántica nos dice más, hay un hervidero de actividad, el espacio se comporta como una espuma formada por pequeñísimas burbujas cuya topología cambia permanentemente. Es decir, las burbujas se abren, se rompen y se vuelven a formar. En él se crean y aniquilan en cada instante todo tipo de partículas. Aquí estoy dando un salto explicativo, pero esta es la visión que surge cuando uno incluye estos dos tipos de teoría que mencioné previamente. Uno tiene entonces un objeto cuyo nombre no es definitivo, todavía no hay una teoría final. Es un objeto que presenta distintos comportamientos, a veces se comporta como partícula, a veces se comporta como campo, y simultáneamente da lugar a la estructura del espacio y del tiempo.

Aquí viene el tercer título. Los dos primeros eran que la idea de partícula no estaba directamente asociada con la sustancia fundamental, sino que el concepto de sustancia resulta mucho más rico; y el segundo estaba relacionado con la noción de espacio. **El tercero se refiere a aquello de lo que esta hecho el mundo.** Es decir, se procura responder sobre aquello qué es lo más concreto. Lo más concreto son los eventos. Un evento es algo que ocurre en algún lugar. Después vamos a hablar con un poquito más de precisión de qué es un evento.

Pero yo todavía no hablé de la Mecánica Cuántica. Y entonces, para que se entienda un poquito lo que está dicho en esa afirmación voy a tener que explicar alguna cosa. La Mecánica Cuántica describe los objetos microscópicos. Tiene dos propiedades fundamentales: es probabilista y es cuántica. Cuántica quiere decir que las propiedades de los objetos microscópicos no toman valores continuos. Si yo mido la energía de un objeto microscópico, no toma cualquier valor, sino que toma uno de un conjunto discreto de valores. Por ejemplo, en el caso del átomo de hidrógeno toma el valor 1, o el 4, o el 9, o el 16, o el 25; cuadrados de números naturales. Por una constante, que es la constante de Bohr. Y en el medio no hay nada, es decir, la energía no puede tomar valores intermedios.

Este es un hecho de una importancia tremenda. En definitiva, las sustancias, los átomos, los ladrillos que componen a todos los objetos físicos, son tales que solamente pueden tener ciertos comportamientos posibles, y no tienen comportamientos intermedios. Si hubiese un continuo, entonces por ejemplo tener un código genético sería una cosa muy complicada. El código genético en un sistema discreto es un sistema de sí y nos, yo puedo codificarlo de alguna manera en un código binario. Si yo tengo sistemas continuos, que pueden variar de manera continua, la propia idea de lo que nosotros entendemos por los átomos y las moléculas sería completamente alterada. Aquí, un átomo de hidrógeno en el estado fundamental es absolutamente idéntico a otro átomo de hidrógeno en el estado fundamental. Todo lo que mida va a dar los mismos valores.

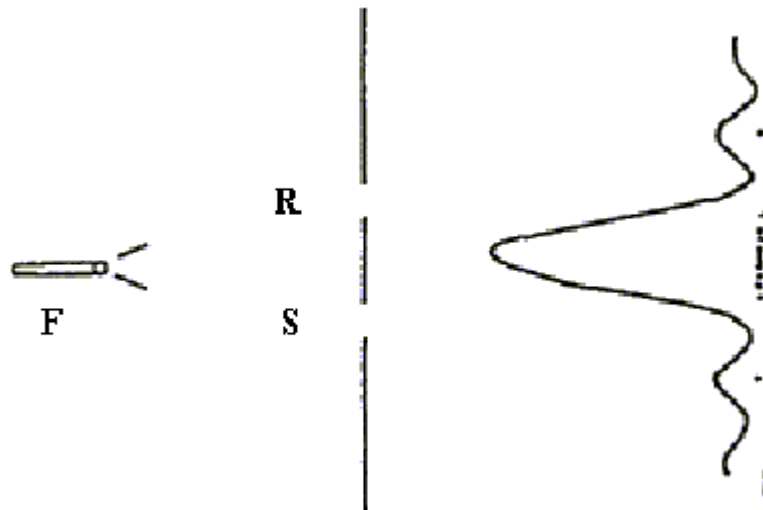
Eso en cuanto a la propiedad cuántica. El hecho de que es probabilista es aún más profundo en sus consecuencias. Probabilista quiere decir algo sencillo: no podemos hacer predicciones sobre el comportamiento de los objetos microscópicos, que sean deterministas. No podemos saber qué va a hacer un átomo determinado en un instante determinado. Por ejemplo, si uno tiene átomos radiactivos, los átomos emiten radiación alfa o cualquier otro tipo de radiación. Uno puede hacer preguntas como esta: ¿cuál es la probabilidad de que la mitad de los átomos hayan emitido radiación alfa al cabo de cierto tiempo? Pero no puede decir: este átomo va a emitir un rayo alfa en los próximos dos minutos. Puede ser que haya una cierta probabilidad de que lo haga. No se trata de que realmente hay una naturaleza subyacente que nosotros no conocemos, sobre la cual tenemos una ignorancia, y entonces

hacemos predicciones probabilísticas simplemente porque no sabemos lo que está pasando. Se trata de una ignorancia que tiene un carácter intrínseco.

Por ejemplo, cuando yo tiro un dado, estoy manejando un sistema clásico. El dado tiene una probabilidad muy parecida de dar cualquier resultado. Pero eso se debe a que ignoro cuales son las condiciones iniciales con las cuales estoy lanzando el dado. Si yo tengo información completa sobre el sistema podría ajustar cada vez más la precisión de mi predicción. En el caso de la Mecánica Cuántica eso no es así. Uno tiene la información completa sobre el sistema y no tiene ninguna posibilidad de hacer predicciones con certeza, predicciones con probabilidad uno. Esto es un punto que es quizás el más importante.

Uno está transmitiendo un mensaje que no hemos logrado digerir completamente, porque entonces la Mecánica Cuántica no habla del mundo que observamos sino que habla de un mundo de potencialidades, habla de lo que puede ocurrir, habla siempre de probabilidades. Y no nos dice cómo se pasa de las probabilidades a los hechos observados. Y ahí está el problema de interpretación, explicado de una manera muy grosera, de la Mecánica Cuántica. Se hace imposible hablar de la posición de la partícula en cada instante, o de su trayectoria. Y la Mecánica Cuántica pone en cuestión nuestras concepciones más básicas sobre la realidad. Sólo podemos saber con certeza que un sistema cuántico sometido a cierta medición nos dará una respuesta elegida entre un conjunto posible, y calcular la probabilidad de cada respuesta. Hay que pensar en los sistemas cuánticos como sistemas capaces de tener ciertos comportamientos, y ante una pregunta, que se realiza mediante una medición, dan una respuesta que es el resultado de la medición.

El ejemplo típico es este: uno tiene electrones, los larga desde F hacia la derecha, hay dos rendijas. Entonces uno puede lanzar los electrones de manera tal que en cada instante hay uno solo viajando. Como dijimos, de acuerdo con la mecánica cuántica, no puede decirse qué trayectoria sigue el electrón. No puede decirse por cuál de las rendijas pasa. No puede decirse dónde va a caer en la pantalla. Lo único que puede afirmarse es que hay cierta probabilidad de que caiga en distintos puntos. Cuando uno pone la pantalla, obliga al electrón a dar una respuesta, tiene que decidir adónde va a aparecer. Si la pantalla es una placa fotográfica, aparecerá una manchita en algún lado (los puntitos). Aparecen más manchitas en los lugares en que la probabilidad es más grande y menos manchitas en los lugares en que la probabilidad es más pequeña. Pero cada vez que pasa un electrón aparece una sola manchita en algún lugar. Después pasa otro, y así sucesivamente van marcando. Al final la pantalla se va ennegreciendo más en la zona donde caen más electrones. Pero en cada medición concreta hay una sola respuesta, que es un puntito en un lugar de la pantalla.



¿Por qué no tenemos una interpretación completamente satisfactoria de la Cuántica? Porque no tenemos una Cosmología Cuántica, es decir, no tenemos una descripción de la realidad totalmente en términos cuánticos. Sabemos que la realidad obedece a las leyes cuánticas que son las leyes fundamentales. Los objetos macroscópicos están hechos de objetos microscópicos, y por consiguiente, las leyes de la Cuántica deberían ser universales. Sin embargo, el comportamiento de los objetos macroscópicos que nosotros observamos no es probabilista.

El problema de interpretación de la Mecánica Cuántica tiene 75 años, se han hecho esfuerzos denodados, mucha gente ha pensado que es un problema puramente filosófico, otros han pensado que es un problema físico. Después de 75 años, los que piensan que es un problema puramente filosófico cada vez son menos. Aquí hay un problema físico, no entendemos cómo se produce este pasaje del mundo de las posibilidades a una realidad concreta. Un evento es justamente uno de estos pasajes. Aquí un evento es la aparición de una manchita en la placa fotográfica, cada vez que aparece una manchita se produce un evento. Todo lo que nos rodea está compuesto por eventos. En general, puede ser una superposición de eventos. Fuera de los eventos no hay nada, lo que hay es un mundo de posibilidades, las posibilidades son infinitas y aparece una selección en el momento en que se realiza la medida.

Es en definitiva la noción de evento una noción clásica. Un evento es un hecho, clásico, pero que resulta de una elección de un sistema cuántico. Lo que hay que explicar es cómo aparece un régimen donde con mucha aproximación las cosas se comportan clásicamente. No disponemos de una comprensión completamente satisfactoria del proceso por el cual a partir de un conjunto de posibilidades, el sistema selecciona una que se manifiesta en el ámbito físico como evento. La manchita oscura que aparece en algún punto de la placa fotográfica sobre la que incide un electrón es un ejemplo de evento, una gotita de agua que aparece en una cámara de niebla diseñada para detectar partículas elementales es otro evento. Y en general, los objetos macroscópicos están compuestos por eventos. La luz incide, los distintos fotones que componen la luz producen tenemos un efecto colectivo en la placa fotográfica y se produce un evento.

Son muchos los físicos que piensan que esto es algo fundamental para entender e incluso resolver el problema del dualismo. Aquí los físicos y los biólogos entramos en una discusión que ya lleva muchos años. Yo lo único que quiero enfatizar es que la Física abre estas posibilidades, están allí. Puede ser que no tengan nada que ver, pero que están allí es claro. Y el hecho es que entonces en la

realidad objetiva, lo que no es ambiguo, lo que no tiene probabilidad sino que es cierto está constituido por eventos. Mientras que estos no ocurren nada puede ser observado. El sistema se mueve en un mundo de puras posibilidades sin elegir ningún comportamiento.

La idea de partícula, o la idea de campo, o la idea de espacio-tiempo describen a los agentes. Y los actos son los eventos, y el conjunto de los actos es lo que constituye esto que es la experiencia. Y como los eventos físicos, son todos los eventos, entonces en principio muchos físicos piensan que no hay una división tan tajante como la que existe entre partículas que simplemente obedecen las leyes de la Mecánica y por otro lado los fenómenos mentales. De alguna forma, los eventos psicológicos también forman parte del mundo de los eventos. Si realmente se producen hechos en el momento en que los eventos pasan de lo potencial a lo real, ciertos hechos particulares pueden estar relacionados con los fenómenos conscientes. Aquí no puedo decir mucho más, hay mucho más dicho, pero ustedes seguramente han leído a algunos físicos que se han atrevido a ir más lejos.

Concluyo con el último de los cuatro puntos que quería mostrar, referente a cómo el sentido común de alguna forma se ve superado y de los esfuerzos que seguimos haciendo para que recupere el terreno perdido. El cuarto mensaje de la Física que no ha sido completamente asimilado, que para mí es el más polémico de todos. **No tiene sentido pensar que los objetos materiales tienen ciertas propiedades o atributos.** No tiene sentido pensar que el objeto va acompañado de ciertas propiedades independientemente de con qué interactúa o quién lo observa. Todo proceso físico es el resultado de una interacción. Todas las propiedades de los sistemas físicos dependen de cómo se observan. Son comportamientos posibles que se dan cuando interactúan con otros objetos. Esos comportamientos siempre dependen de la interacción.

Un ejemplo de esto es lo que decía de la Mecánica Cuántica: el electrón no hace absolutamente nada, no da lugar a ningún evento, hasta que uno le pregunta ¿dónde estás? En el momento en que le pregunta ¿dónde estás?, o sea, pone la pantalla, el electrón se ubica en un punto. Si se le hace otra pregunta, si se lo hace interactuar con otra cosa, entonces da una manifestación completamente distinta. Ni siquiera es lícito pensar que el electrón lleva un conjunto de respuestas preparadas para todas las preguntas, y entonces saca la adecuada para la pregunta que le hacen. Hay teoremas que muestran que eso no es posible.

Hace mucho tiempo que los físicos notaron la naturaleza relacional del mundo. Helmholtz, en 1896, decía: “Con respecto a las propiedades de los objetos del mundo exterior, es fácil ver que todas las propiedades que les podemos asignar significan sólo los efectos que ellos producen sobre nuestros sentidos o sobre otros objetos naturales... En todas partes nos ocupamos de las relaciones mutuas de los cuerpos entre sí... De esto se deduce que de hecho, las propiedades de los objetos de la Naturaleza no son, a pesar de su nombre, nada propio de esos objetos, en y para ellos, sino que siempre son una relación con un segundo objeto (incluidos nuestros órganos de los sentidos).”

Ejemplos de esto están en la Relatividad, donde uno para hablar del intervalo tiene que establecer una red de observadores que miden los intervalos; no se puede hablar de un intervalo de manera absoluta. También lo vimos en el caso de la Cuántica, donde mostramos que los objetos no tienen propiedades hasta que son medidos. Es decir, las propiedades son las respuestas que dan los sistemas a los aparatos que los miden.

Tampoco hay variables ocultas. Como decía, hay un teorema que muestra esto, establece que el objeto no lleva un conjunto de respuestas para cada pregunta. El objeto no lleva absolutamente nada,

las respuestas se producen en el momento en que el objeto es medido. El teorema muestra que si llevara un conjunto de respuestas habría ciertas correlaciones cuando uno mide dos objetos que han salido de un mismo punto del espacio, y esas correlaciones no se observan. Es decir, se observan correlaciones diferentes que son perfectamente explicadas por la Mecánica Cuántica, pero son incompatibles con la existencia de variables ocultas. Aquí estamos llamando variables ocultas a las respuestas que podía llevar escondidas cada uno de los objetos.

Para mí, la comprobación más clara de que siempre un objeto se manifiesta en una interacción, de que no hay nada que pueda decirse que sea propio del objeto, es que la propia existencia de una partícula depende de la interacción. Hay una experiencia muy sencilla: si uno tiene un detector de partículas, una caja con un pequeño orificio, cada vez que entra una partícula hay un “clic”. Supongamos que tengo esta caja en el vacío, y compruebo que no marca nada: entonces no hay partículas. Ahora ponemos una caja al lado de la primera, también en el vacío, pero que acelera respecto a la primera. La Teoría Cuántica de Campos establece que esa caja ve un mar de partículas que se le acercan. Una caja detecta partículas: “clic”, “clic”, “clic”, y la otra no hace absolutamente nada. El efecto “partícula sí – partícula no” es un efecto relativo, depende del estado de aceleración de un cuerpo. Entonces, ¿qué se puede decir? ¿Qué hay una partícula, o que no hay una partícula? Hay un comportamiento de ese sistema que está en todos lados y que lo represento como un campo cuántico que me responde a este otro sistema que es el detector. La respuesta que da el mismo sistema a dos detectores diferentes es diferente. En la medida en que la respuesta le dice a algún detector que hay partículas, ustedes pueden pensar que hay partículas, pero el resultado claramente depende de la interacción.

Concluyo la intención era mostrar que hay un trabajo por hacer, que es el trabajo de transmitir en lenguaje ordinario los resultados de las teorías físicas de este siglo. Que hay un trabajo de reflexión que hay que hacer sobre ello, y que este trabajo, si bien está limitado porque no tenemos todavía interpretaciones de todas las teorías físicas, permite ofrecer visiones totalmente revolucionarias acerca de la realidad. Su asimilación por el sentido común daría lugar, me parece a mí, a formas de pensamiento más adecuadas a lo que es el mundo realmente.

P: ¿No habría que hacer una separación entre el evento y la observación del evento? ¿Que el evento sea, me parece a mí, uno, y las posibles observaciones que se hagan de ese evento sean varias, y de ahí la dualidad?

R: No, yo hablo del evento. No estoy hablando para nada del observador. Yo hablo del evento que se produce en la placa fotográfica. No estoy pensando que este evento pueda ser a su vez observado. Lo que uno no sabe explicar es el proceso puramente físico de interacción entre el electrón que se propagaba y la aparición de un punto en algún lugar concreto en la pantalla.

P: ¿Que no se sepa explicar es una verdad absoluta, o por el momento no se sabe?

R: Hay un hecho, que no es una verdad absoluta. Nosotros no tenemos una interpretación de la Mecánica Cuántica. Lo que es una verdad considerada como absoluta por los físicos es: la Mecánica Cuántica es probabilista. Y las respuestas que dan los objetos no son producto de ciertos comportamientos clásicos escondidos que nosotros desconocemos. Eso, por una cantidad de evidencia basada en teoremas que muestran que si se comportasen de esa manera tendrían resultados o algún tipo de observaciones que serían contrarias a las previsiones de la Mecánica Cuántica. Como esas

observaciones no se han realizado, entonces seguimos pensando que la Mecánica Cuántica es probabilista y no hay variables ocultas.

P: Me parece que igual no salimos de la dualidad en los procesos experimentales. Que igual tiene que haber un observador, una conciencia que observe los eventos. Que tiene que haber por un lado los eventos y por otro el observador.

R: Yo no pretendo resolver el problema del dualismo. Yo lo que digo es lo que surge de aquí. Propongo la siguiente imagen para tu pregunta. Por supuesto aquí aparece un evento que es una manchita, y aquí hay un ojo, y entonces la luz que sale de la manchita incide sobre el ojo. Después va al cerebro. Todo esto también uno lo puede pensar como un proceso si se quiere cuántico, donde el resultado final es la producción de un evento en el cerebro. Ese evento del cerebro es la sensación. Son eventos sobre los cuales tenemos un acceso directo. Unos son eventos a los cuales tienen acceso las pantallas, otros son eventos a los cuales tenemos acceso los seres humanos. Yo tampoco tengo una interpretación ni materialista ni todo lo contrario, yo simplemente trato de entender qué es lo que me está diciendo la Física hasta donde nosotros sabemos. Y tampoco pretendo resolver el problema del dualismo.

P: ¿Cuál es el estado actual de la Física en cuanto a la posibilidad de lograr un grado de avance grande de las teorías de unificación de la interacción débil, fuerte, con el electromagnetismo y la gravedad?

R: Los físicos somos optimistas por naturaleza, porque sino nos iríamos para nuestras casas. Pero en este tema creo que el optimismo muchas veces es injustificado, es un problema tremendamente duro. Todos los años se anuncia que está resuelto, sin embargo seguimos estando muy lejos de la resolución de este problema que involucra una serie de elementos muy difíciles de aunar. No es solamente la definición de un formalismo adecuado. Hay distintas teorías de las cuales la más popular es la que se llama Teoría de Cuerdas y Supercuerdas. Las cuerdas aquí serían esos objetos que son capaces de tener los tres comportamientos que dije: partícula, campo, espacio. ¿Cómo una cuerda presenta tres comportamientos? Presenta comportamientos relacionados con sus formas de vibrar, distintos modos de la cuerda asociados a distintos comportamientos. Es una teoría muy atractiva desde el punto de vista matemático. Sin embargo, hasta el momento no ha permitido responder algunas de las grandes preguntas físicas que están planteadas. Es un tema sobre el que se está concentrando un esfuerzo enorme, pero los avances son lentos.

P: Antes de que se termine, tengo una pregunta que me importa mucho, que tú lo dijiste al pasar. Tú señalaste que sobre esto tenemos una gran discusión con los biólogos.

R: El punto es que los biólogos parten de un modelo neuronal, perdonen mi atrevimiento al hablar de lo que hacen los biólogos. Esta es la interpretación de un físico de lo que hacen los biólogos. Parten de un modelo neuronal donde consideran que los elementos cuánticos del modelo son irrelevantes o inexistentes, y que, en definitiva, el funcionamiento mental va a poder describirse puramente en términos de la Teoría Electromagnética, de un circuito. Para mí, la discrepancia está en lo siguiente: hay una gran polémica entre lo que se llama la inteligencia artificial fuerte o débil en una serie de versiones. Es decir: ¿puede un computador reproducir el comportamiento humano? Para mí eso está relacionado con este problema: el comportamiento humano no es solamente un problema de software, a pesar de lo que muchos sostienen. Para los físicos es un problema de hardware. Es un problema de cómo estamos armados, no es un problema de qué programa estamos ejecutando. Es gente que cree que

se pueden explicar todos los comportamientos humanos en términos de un programa, que es capaz de responder a todas las preguntas y comportarse como un ser humano. Para muchos físicos eso no es así, y hay también un elemento involucrado de cómo estamos armados internamente, y en esa estructura pensamos que los elementos cuánticos juegan un papel. Y yo tengo algunos argumentos, pero quizá no sea el momento para decirlos.

P: Hoy estaba hablando usted de curvatura, de curvatura de espacio. ¿Qué diferencia hay entre una recta y una curva y cómo sabe usted que la curva en el espacio no es absoluta?

R: Lo que uno hace es hacer mediciones. Digamos, toma tres puntos, intercambia luz entre los tres puntos, dibuja un triángulo.

P: La luz puede no desplazarse en línea recta.

R: Uno siempre trabaja con la teoría. No tiene una cosa que son los hechos y otra cosa separada; como mostraba en el caso de Galileo, se acerca a la realidad munido de una teoría. Yo me acerco a la realidad munido de la Teoría de la Relatividad, y entonces eso me dice que la luz se propaga siguiendo los caminos de mínima longitud en una superficie curva.

P: ¿Por convención se llama recta a la trayectoria de la luz?

R: No, por convención se llama recta a los caminos de longitud mínima. Yo tengo una forma de medir longitudes, con reglas. Esa forma de medir longitudes con reglas coincide con la propagación de la luz. Entonces, volviendo a lo de la luz, yo intercambio luz entre los tres puntos.

P: ¿La recta es la mínima distancia?

R: Olvidemos la palabra recta. La geodésica es la mínima distancia. La luz recorre geodésicas. Si estoy en un espacio plano, las geodésicas son rectas. En un espacio curvo, las geodésicas son ciertas curvas especiales de lo que se llama la variedad espacial. Entonces, en este espacio yo intercambio luz entre tres puntos. Y observo que esa luz no forma un triángulo cuyos ángulos suman  $180^\circ$ , sino que forma un triángulo cuyos ángulos suman menos de  $180^\circ$ . Entonces, en ese sentido es que el espacio es curvo. Uno sabe que sobre una esfera uno mide los ángulos de un triángulo y tienen que sumar menos de  $180^\circ$ . En el Universo, aparentemente hoy en día hay evidencia creciente de que podríamos estar en un espacio abierto en vez de en un espacio cerrado, en ese caso lo que tendríamos es que suman más. Pero eso no se puede medir directamente, eso es un resultado de las teorías cosmológicas y de observaciones sobre comportamientos de la forma en que se alejan las galaxias.

P: Juntando tu conferencia con la de Ramón Méndez y diciendo las cosas de manera provocativa como si entendiera mucho más del asunto de lo que entiendo. En el recuerdo me refiero a lo que dijo Ramón y después lo hilo con lo que dijiste tú. Ramón empezó representándonos imágenes de la materia: primero el átomo de Thomson, creo que era, un pastel; después el átomo de Rutherford, el sistema planetario; después las muñecas rusas, una dentro de la otra; y después dejó una ecuación, la ecuación de Schrödinger. Eso parece una reivindicación, 2.500 años después, del pitagorismo. Lo que tú escribiste hace un rato parecía una reivindicación del idealismo, es decir, es cierto que tú hiciste una descripción, pero lo estoy diciendo de manera cruda para suscitar tu crítica: las cosas existen en la medida de que hay alguien para observarlas. Daría la impresión de que la Ciencia, y esta es mi

pregunta, a fines del siglo XX, muy diferente seguramente a hace 120 años, tiene una profunda reaproximación al pitagorismo como al idealismo.

R: La respuesta directa es sí, pero hay alguna sutileza. La respuesta directa es sí porque el pitagorismo, en el sentido en que tú lo usas, también es un refugio en el formalismo. Como yo decía al principio, ante las dificultades de la interpretación uno se refugia por un lado en el formalismo y por otro lado en lo que se llama el instrumentalismo, en las posiciones positivistas. Yo tengo lo que experimento. De lo único que tengo certeza es de aquello que experimento. Yo he procurado salirme de esa dicotomía, no estar ni con el pitagorismo ni con el positivismo. De alguna manera, cuando hablo de realidad, estoy hablando de algo para lo cual los pitagoristas han renunciado de entrada.

P: Yo quería preguntar qué es el pitagorismo.

R: El pitagorismo en última instancia es la idea de que el mundo es un mundo de relaciones puras, de relaciones matemáticas. Los objetos fundamentales son los objetos matemáticos. Una larga tradición de la cual Pitágoras es el padre.

4 de noviembre de 1999.