

ALGUNAS IDEAS GENERALES SOBRE LA DESCRIPCION DEL MUNDO QUE NOS PROPORCIONA LA FISICA

RODOLFO GAMBINI

Todos reconocemos en la Ciencia su capacidad transformadora del mundo en que vivimos, y sabemos que cuando es bien aplicada puede contribuir a mejorar las condiciones de nuestra sociedad. Pero la ciencia también es, junto con el arte, una de las más altas manifestaciones del espíritu humano. Nuestra Facultad de Ciencias se ha creado con la clara decisión de estimular ambas vertientes de la actividad científica, la aplicada y la orientada a la búsqueda del conocimiento puro. Yo quisiera referirme hoy al segundo aspecto, que muchas veces se olvida ante las urgencias que nuestro país tiene.

Por siglos se pensó que la Física era la ciencia que podía arrojar más luz sobre la estructura del mundo. Sobre ella se fundaron algunos de los más grandes sistemas filosóficos, como el cartesiano y el kantiano. En este siglo, sin embargo, la situación parece haber cambiado. Los gigantescos avances teóricos de la física contemporánea: la Relatividad Especial, la Relatividad General y la Mecánica Cuántica, implicaron un grado de abstracción tan grande que hizo que tanto su base observacional como la interpretación de sus resultados quedase oscurecida.

Nadie duda del enorme poder predictivo de su formalismo, ni del dominio tecnológico que de ella se deriva. Pero las dificultades de comprensión de la visión del mundo que sugiere, han llevado muchas veces a los estudiosos de las otras ciencias y hasta a los filósofos a adoptar una concepción del mundo físico inspirada en la física newtoniana del siglo XIX. Así el mundo físico se ve esencialmente como un sistema de partículas que evoluciona bajo la acción de ciertas fuerzas en el espacio vacío. El Universo se concibe entonces como un sistema de partículas masivas que evoluciona de modo completamente determinado por las leyes de la física en un espacio y un tiempo absolutos descritos por la geometría de Euclides. Por supuesto, toda persona culta hoy sabe que estos conceptos han cambiado, pero no dispone de una imagen alternativa consistente.

Si tomamos en cuenta que esta concepción del mundo físico proviene de una ciencia que afirma su vocación universal, abarcadora de todos los fenómenos, y que se supone capaz de describir con leyes precisas los procesos subyacentes a sistemas tan diferentes como pueden ser una estrella y un ser vivo, entonces esta descripción resulta sumamente pobre, insatisfactoria y en definitiva carente de sentido.

Los físicos han intentado en repetidas oportunidades transmitir una imagen más ajustada al contenido de las teorías vigentes. Al respecto se pueden citar los excelentes libros de Heisenberg, Margenau, Jammer y Penrose, pero hasta el momento se ha tenido poco éxito. Al contrario: ha ocurrido que

los físicos teóricos hemos adquirido un tufillo algo religioso, por nuestro esfuerzos en transmitir verdades difícilmente expresables en palabras, sin el auxilio de las matemáticas.

Esta charla (*) tiene entonces un carácter esencialmente divulgativo. Me propongo analizar algunas de las características de la descripción física del mundo: discutir qué describe y cómo describe la física, esbozar la imagen del mundo que nos proporciona y analizar sus límites. En definitiva, despertar la inquietud por saber más sobre estos temas, y la convicción de que una visión más ajustada del mundo físico puede resultar útil en el ejercicio de las otras ciencias.

La actividad científica tiene siempre un carácter provisional, nunca está terminada, por lo que la reflexión sobre ella tampoco puede ser definitiva. Sin embargo las teorías físicas, una vez confirmadas, permiten describir en forma muy aproximada un cierto conjunto de fenómenos y sus consecuencias no pueden ser ignoradas. De hecho no lo fueron en el pasado, y las consideraciones que de ella se derivaron han moldeado en parte nuestra actual forma de pensar.

¿Cuál es el objeto de estudio de la física?

Forma, color, dureza, composición, pueden ser ejemplos de cualidades relevantes para el físico. En todo los casos el estudio de estas cualidades no resulta de la mera observación sino de un conjunto de operaciones que el físico realiza sobre el objeto. El objeto va adquiriendo una progresiva definición en las propiedades que lo caracterizan, a medida que operamos sobre él directamente o mediante nuestros instrumentos. El físico busca el conocimiento exacto del objeto; para ello debe descartar todo aquello que no puede expresarse mediante una relación exacta de magnitudes.

Por supuesto este proceso no está libre de errores, ya que tiene como punto de partida un cierto marco conceptual que se procura verificar. Recuérdese que Aristóteles y Galileo sacaban conclusiones diametralmente opuestas de los mismos hechos cuando uno concluía que los cuerpos tienden al reposo y el otro al movimiento uniforme. Sin embargo, en ese mismo proceso vemos que un análisis más a fondo de los hechos hubiese permitido -como lo sugiere Galileo- detectar la falta de adecuación de la hipótesis aristotélica.

La verificación de una hipótesis científica está ligada a un proceso activo de interacción con el objeto de estudio. Este proceso no difiere mucho del que sigue un niño para familiarizarse con el mundo que lo rodea. El niño ejerce una serie de actividades sobre las cosas, las sigue con la mirada, las escucha tratando de vincular el sonido con las imágenes visuales. Las palpa, las frota, las sacude y las levanta. Es sólo en relación con esas actividades, que se van organizando los distintos elementos perceptuales: resistencia, dureza, elasticidad, peso, color y sonido. El carácter substancial del objeto, concebido como abstracto de esas cualidades, surge precisamente de las acciones que llevan a reencontrarlo y a encontrar una cierta resistencia e independencia de nuestra voluntad. En definitiva, los objetos físicos se revelan por su permanencia, independencia y capacidad para producir con regularidad ciertos efectos. Como veremos, los sistemas que estudia la física poseen esencialmente las mismas características.

Inicialmente las leyes de la naturaleza establecen una regularidad: son enunciados de ciertas correlaciones invariantes entre fenómenos. El agua

hierve a 100 grados centígrados al nivel del mar, los cuerpos caen con una aceleración de $9,8 \text{ m/s}^2$.

Una teoría surge cuando un conjunto de leyes empíricas puede explicarse a partir de un principio común. Implica una necesidad lógica. Los enunciados de las regularidades observadas no tienen ahora el valor de leyes sino que se deducen de la validez de las premisas. Así la ley que establece con qué aceleración caen los cuerpos en la superficie de la Tierra pasa a ser un enunciado que se deduce de las leyes de Newton de la mecánica clásica y de la ley de gravitación universal. La física es la ciencia en que el método teórico deductivo ha alcanzado el más alto grado de desarrollo, y con él se ha logrado la posibilidad de describir la suma de los fenómenos conocidos a partir de un conjunto cada vez más reducido de principios.

Nos proponemos ir mostrando a grandes rasgos las descripciones que nos proporcionan teorías cada vez más amplias en el número de fenómenos que cubren y profundas en su unidad y poder explicativo.

Ellas son: la Mecánica Clásica, la Relatividad Especial, la Relatividad General y la Mecánica Cuántica.

Todas ellas parten de tres conceptos fundamentales. Describen sistemas físicos que se encuentran en ciertos *estados*, en los que se desea medir un conjunto de *magnitudes observables*.

La noción de sistema físico se origina en la simple idea de objeto que hemos delineado previamente. Un sistema presenta con regularidad ciertas propiedades, tamaño, color, energía. La idea de sistema se va generalizando a medida que se consideran teorías más y más totalizadoras. Pero en todos los casos el sistema mantiene su propiedad esencial de ser portador de ciertos atributos. Ejemplos de sistemas físicos son: las masas puntuales, el campo electromagnético, el electrón, la molécula de agua y, como veremos luego, hasta el propio espacio tiempo.

Un mismo sistema puede tener distintos comportamientos, una partícula puede tener distintas posiciones y velocidades o un átomo puede encontrarse en distintos niveles de excitación. El número mínimo de propiedades que es requerido para definir el comportamiento de un sistema caracteriza lo que llamamos *estado* del sistema. El estado de un sistema define su comportamiento con la mayor precisión posible. Normalmente para caracterizarlo utilizamos algunas de las infinitas propiedades del sistema. Tomemos por ejemplo la tiza: puede presentar infinitos aspectos, podrá verse desde distintos ángulos y cada uno de sus puntos podrá tener una velocidad diferente. Sin embargo, para definir su estado de movimiento sólo necesitamos 12 variables: 6 para definir su posición y 6 para su velocidad. La posición y velocidad de cualquier punto de la tiza, así como el valor que pueda tomar cualquier otra magnitud como su energía mecánica, resulta del conocimiento de esos 12 parámetros.

Las propiedades que pueden resultar al medir un sistema se llaman observables. Por ejemplo la forma, la masa o el color, son magnitudes observables. Conviene pensar a los observables no como posesiones del sistema sino como posibles respuestas del sistema a un proceso de medida. Más adelante se verá por qué es importante esta distinción.

Pasemos ahora a esbozar la descripción que nos proporciona cada una de las teorías físicas fundamentales. Iremos de la más específica a la más general.

Las teorías se pueden representar en un diagrama tridimensional en función del valor que toman tres magnitudes: la velocidad, la intensidad del campo gravitacional, y la acción que es esencialmente una medida del tamaño del sistema en consideración. En la Figura 1 se muestran las regiones de este diagrama tridimensional cubiertas por cada una de las teorías que estudiaremos.

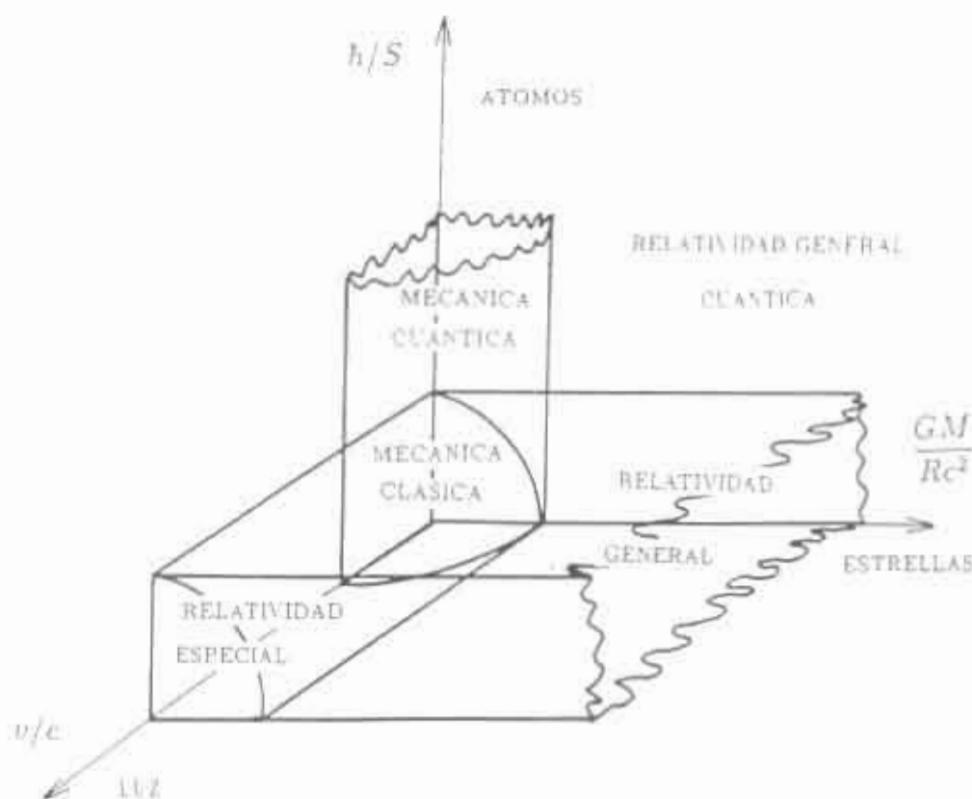


Figura 1: Las teorías físicas y los sistemas que describen

La *Mecánica Clásica* describe sistemas con velocidades pequeñas respecto a la velocidad de la luz, en presencia de fuerzas gravitacionales no muy intensas y con un tamaño grande en relación con la escala atómica. Veamos cuáles son las bases de esta descripción.

En *Mecánica Clásica* se consideran sistemas de partículas masivas que pueden interactuar entre sí mediante ciertas fuerzas. Un estado de dicho sistema, está dado por la posición y velocidad de cada partícula y caracteriza completamente el comportamiento del sistema. A partir de esos datos se puede calcular cualquier otra propiedad mecánica del sistema, su energía, cantidad de movimiento, o lo que sea. Las partículas se mueven en un espacio absoluto

dado de una vez para siempre, que puede describirse por la geometría de Euclides. El espacio se piensa como el recipiente donde se ubican y evolucionan las partículas y tiene las mismas propiedades en todas partes y para siempre. El tiempo también es absoluto, dos relojes idénticos marcarán la misma hora sin importar cuál sea su movimiento.

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".

Los sistemas clásicos son deterministas: dado el estado del movimiento de las partículas en un instante, se puede determinar las posiciones futuras de cada partícula con total precisión. El Universo se comporta en esta descripción como un gigantesco mecanismo de relojería que funciona con precisión infinita. Toda la materia está contenida en las partículas que interactúan entre sí a distancia. Tal es el esquema newtoniano del universo, que llega a su cumbre con Laplace quien en su **Tratado de Mecánica Celeste** describe la creación del sistema solar, la dinámica planetaria, los anillos de Saturno, el origen de las mareas y demuestra la estabilidad del sistema solar basándose en estos principios. Se trata de la teoría física más antigua y la mejor conocida. Las otras tres surgieron en este siglo.

La teoría de la *Relatividad Especial* es una descripción más general del mundo, comprende al conjunto de los objetos que se pueden mover a una velocidad inferior a la de la luz en presencia de campos gravitacionales débiles y relativamente grandes respecto al tamaño atómico. La Relatividad permite incluir en forma consistente otro tipo de sistemas además de las partículas: los campos; en particular permite describir el campo electromagnético y los fenómenos lumínicos.

Un campo está asociado a la acción de una partícula cargada sobre el medio que la rodea; su dirección y magnitud son proporcionales a la fuerza que dicha partícula ejerce sobre otra partícula colocada en su presencia. La fuerza decrece a medida que nos alejamos de la carga y va siempre en direcciones que parten radialmente de la carga.

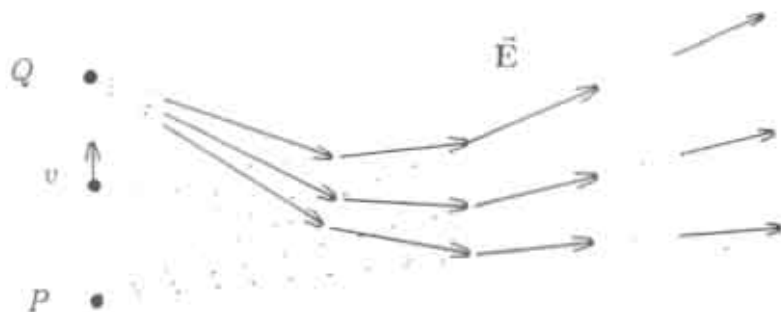


Figura 2

Supongamos que ahora movemos la carga que produce el campo que inicialmente se encontraba en reposo. En la Figura 2 se muestra primero qué ocurre cuando la carga es puesta en movimiento. Veremos que el campo tiene

ALGUNAS IDEAS GENERALES SOBRE LA DESCRIPCION DEL MUNDO QUE NOS PROPORCIONA LA FISICA

RODOLFO GAMBINI

Todos reconocemos en la Ciencia su capacidad transformadora del mundo en que vivimos, y sabemos que cuando es bien aplicada puede contribuir a mejorar las condiciones de nuestra sociedad. Pero la ciencia también es, junto con el arte, una de las más altas manifestaciones del espíritu humano. Nuestra Facultad de Ciencias se ha creado con la clara decisión de estimular ambas vertientes de la actividad científica, la aplicada y la orientada a la búsqueda del conocimiento puro. Yo quisiera referirme hoy al segundo aspecto, que muchas veces se olvida ante las urgencias que nuestro país tiene.

Por siglos se pensó que la Física era la ciencia que podía arrojar más luz sobre la estructura del mundo. Sobre ella se fundaron algunos de los más grandes sistemas filosóficos, como el cartesiano y el kantiano. En este siglo, sin embargo, la situación parece haber cambiado. Los gigantescos avances teóricos de la física contemporánea: la Relatividad Especial, la Relatividad General y la Mecánica Cuántica, implicaron un grado de abstracción tan grande que hizo que tanto su base observacional como la interpretación de sus resultados quedase oscurecida.

Nadie duda del enorme poder predictivo de su formalismo, ni del dominio tecnológico que de ella se deriva. Pero las dificultades de comprensión de la visión del mundo que sugiere, han llevado muchas veces a los estudiosos de las otras ciencias y hasta a los filósofos a adoptar una concepción del mundo físico inspirada en la física newtoniana del siglo XIX. Así el mundo físico se ve esencialmente como un sistema de partículas que evoluciona bajo la acción de ciertas fuerzas en el espacio vacío. El Universo se concibe entonces como un sistema de partículas masivas que evoluciona de modo completamente determinado por las leyes de la física en un espacio y un tiempo absolutos descritos por la geometría de Euclides. Por supuesto, toda persona culta hoy sabe que estos conceptos han cambiado, pero no dispone de una imagen alternativa consistente.

Si tomamos en cuenta que esta concepción del mundo físico proviene de una ciencia que afirma su vocación universal, abarcadora de todos los fenómenos, y que se supone capaz de describir con leyes precisas los procesos subyacentes a sistemas tan diferentes como pueden ser una estrella y un ser vivo, entonces esta descripción resulta sumamente pobre, insatisfactoria y en definitiva carente de sentido.

Los físicos han intentado en repetidas oportunidades transmitir una imagen más ajustada al contenido de las teorías vigentes. Al respecto se pueden citar los excelentes libros de Heisenberg, Margenau, Jammer y Penrose, pero hasta el momento se ha tenido poco éxito. Al contrario: ha ocurrido que

los físicos teóricos hemos adquirido un tufillo algo religioso, por nuestro esfuerzos en transmitir verdades difícilmente expresables en palabras, sin el auxilio de las matemáticas.

Esta charla (*) tiene entonces un carácter esencialmente divulgativo. Me propongo analizar algunas de las características de la descripción física del mundo: discutir qué describe y cómo describe la física, esbozar la imagen del mundo que nos proporciona y analizar sus límites. En definitiva, despertar la inquietud por saber más sobre estos temas, y la convicción de que una visión más ajustada del mundo físico puede resultar útil en el ejercicio de las otras ciencias.

La actividad científica tiene siempre un carácter provisional, nunca está terminada, por lo que la reflexión sobre ella tampoco puede ser definitiva. Sin embargo las teorías físicas, una vez confirmadas, permiten describir en forma muy aproximada un cierto conjunto de fenómenos y sus consecuencias no pueden ser ignoradas. De hecho no lo fueron en el pasado, y las consideraciones que de ella se derivaron han moldeado en parte nuestra actual forma de pensar.

¿Cuál es el objeto de estudio de la física?

Forma, color, dureza, composición, pueden ser ejemplos de cualidades relevantes para el físico. En todo los casos el estudio de estas cualidades no resulta de la mera observación sino de un conjunto de operaciones que el físico realiza sobre el objeto. El objeto va adquiriendo una progresiva definición en las propiedades que lo caracterizan, a medida que operamos sobre él directamente o mediante nuestros instrumentos. El físico busca el conocimiento exacto del objeto; para ello debe descartar todo aquello que no puede expresarse mediante una relación exacta de magnitudes.

Por supuesto este proceso no está libre de errores, ya que tiene como punto de partida un cierto marco conceptual que se procura verificar. Recuérdese que Aristóteles y Galileo sacaban conclusiones diametralmente opuestas de los mismos hechos cuando uno concluía que los cuerpos tienden al reposo y el otro al movimiento uniforme. Sin embargo, en ese mismo proceso vemos que un análisis más a fondo de los hechos hubiese permitido -como lo sugiere Galileo- detectar la falta de adecuación de la hipótesis aristotélica.

La verificación de una hipótesis científica está ligada a un proceso activo de interacción con el objeto de estudio. Este proceso no difiere mucho del que sigue un niño para familiarizarse con el mundo que lo rodea. El niño ejerce una serie de actividades sobre las cosas, las sigue con la mirada, las escucha tratando de vincular el sonido con las imágenes visuales. Las palpa, las frota, las sacude y las levanta. Es sólo en relación con esas actividades, que se van organizando los distintos elementos perceptuales: resistencia, dureza, elasticidad, peso, color y sonido. El carácter substancial del objeto, concebido como abstracto de esas cualidades, surge precisamente de las acciones que llevan a reencontrarlo y a encontrar una cierta resistencia e independencia de nuestra voluntad. En definitiva, los objetos físicos se revelan por su permanencia, independencia y capacidad para producir con regularidad ciertos efectos. Como veremos, los sistemas que estudia la física poseen esencialmente las mismas características.

Inicialmente las leyes de la naturaleza establecen una regularidad: son enunciados de ciertas correlaciones invariantes entre fenómenos. El agua

hierve a 100 grados centígrados al nivel del mar, los cuerpos caen con una aceleración de $9,8 \text{ m/s}^2$.

Una teoría surge cuando un conjunto de leyes empíricas puede explicarse a partir de un principio común. Implica una necesidad lógica. Los enunciados de las regularidades observadas no tienen ahora el valor de leyes sino que se deducen de la validez de las premisas. Así la ley que establece con qué aceleración caen los cuerpos en la superficie de la Tierra pasa a ser un enunciado que se deduce de las leyes de Newton de la mecánica clásica y de la ley de gravitación universal. La física es la ciencia en que el método teórico deductivo ha alcanzado el más alto grado de desarrollo, y con él se ha logrado la posibilidad de describir la suma de los fenómenos conocidos a partir de un conjunto cada vez más reducido de principios.

Nos proponemos ir mostrando a grandes rasgos las descripciones que nos proporcionan teorías cada vez más amplias en el número de fenómenos que cubren y profundas en su unidad y poder explicativo.

Ellas son: la Mecánica Clásica, la Relatividad Especial, la Relatividad General y la Mecánica Cuántica.

Todas ellas parten de tres conceptos fundamentales. Describen sistemas físicos que se encuentran en ciertos *estados*, en los que se desea medir un conjunto de *magnitudes observables*.

La noción de sistema físico se origina en la simple idea de objeto que hemos delineado previamente. Un sistema presenta con regularidad ciertas propiedades, tamaño, color, energía. La idea de sistema se va generalizando a medida que se consideran teorías más y más totalizadoras. Pero en todos los casos el sistema mantiene su propiedad esencial de ser portador de ciertos atributos. Ejemplos de sistemas físicos son: las masas puntuales, el campo electromagnético, el electrón, la molécula de agua y, como veremos luego, hasta el propio espacio tiempo.

Un mismo sistema puede tener distintos comportamientos, una partícula puede tener distintas posiciones y velocidades o un átomo puede encontrarse en distintos niveles de excitación. El número mínimo de propiedades que es requerido para definir el comportamiento de un sistema caracteriza lo que llamamos *estado* del sistema. El estado de un sistema define su comportamiento con la mayor precisión posible. Normalmente para caracterizarlo utilizamos algunas de las infinitas propiedades del sistema. Tomemos por ejemplo la tiza: puede presentar infinitos aspectos, podrá verse desde distintos ángulos y cada uno de sus puntos podrá tener una velocidad diferente. Sin embargo, para definir su estado de movimiento sólo necesitamos 12 variables: 6 para definir su posición y 6 para su velocidad. La posición y velocidad de cualquier punto de la tiza, así como el valor que pueda tomar cualquier otra magnitud como su energía mecánica, resulta del conocimiento de esos 12 parámetros.

Las propiedades que pueden resultar al medir un sistema se llaman observables. Por ejemplo la forma, la masa o el color, son magnitudes observables. Conviene pensar a los observables no como posesiones del sistema sino como posibles respuestas del sistema a un proceso de medida. Más adelante se verá por qué es importante esta distinción.

Pasemos ahora a esbozar la descripción que nos proporciona cada una de las teorías físicas fundamentales. Iremos de la más específica a la más general.

Las teorías se pueden representar en un diagrama tridimensional en función del valor que toman tres magnitudes: la velocidad, la intensidad del campo gravitacional, y la acción que es esencialmente una medida del tamaño del sistema en consideración. En la Figura 1 se muestran las regiones de este diagrama tridimensional cubiertas por cada una de las teorías que estudiaremos.

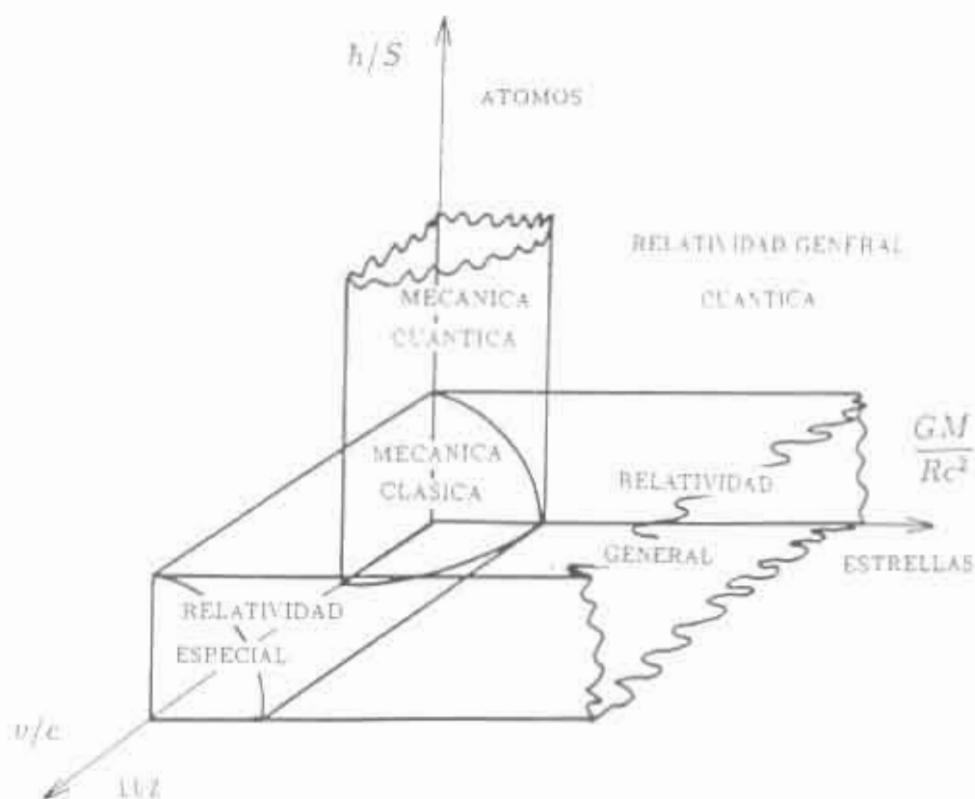


Figura 1: Las teorías físicas y los sistemas que describen

La *Mecánica Clásica* describe sistemas con velocidades pequeñas respecto a la velocidad de la luz, en presencia de fuerzas gravitacionales no muy intensas y con un tamaño grande en relación con la escala atómica. Veamos cuáles son las bases de esta descripción.

En *Mecánica Clásica* se consideran sistemas de partículas masivas que pueden interactuar entre sí mediante ciertas fuerzas. Un estado de dicho sistema, está dado por la posición y velocidad de cada partícula y caracteriza completamente el comportamiento del sistema. A partir de esos datos se puede calcular cualquier otra propiedad mecánica del sistema, su energía, cantidad de movimiento, o lo que sea. Las partículas se mueven en un espacio absoluto

dado de una vez para siempre, que puede describirse por la geometría de Euclides. El espacio se piensa como el recipiente donde se ubican y evolucionan las partículas y tiene las mismas propiedades en todas partes y para siempre. El tiempo también es absoluto, dos relojes idénticos marcarán la misma hora sin importar cuál sea su movimiento.

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".

Los sistemas clásicos son deterministas: dado el estado del movimiento de las partículas en un instante, se puede determinar las posiciones futuras de cada partícula con total precisión. El Universo se comporta en esta descripción como un gigantesco mecanismo de relojería que funciona con precisión infinita. Toda la materia está contenida en las partículas que interactúan entre sí a distancia. Tal es el esquema newtoniano del universo, que llega a su cumbre con Laplace quien en su **Tratado de Mecánica Celeste** describe la creación del sistema solar, la dinámica planetaria, los anillos de Saturno, el origen de las mareas y demuestra la estabilidad del sistema solar basándose en estos principios. Se trata de la teoría física más antigua y la mejor conocida. Las otras tres surgieron en este siglo.

La teoría de la *Relatividad Especial* es una descripción más general del mundo, comprende al conjunto de los objetos que se pueden mover a una velocidad inferior a la de la luz en presencia de campos gravitacionales débiles y relativamente grandes respecto al tamaño atómico. La Relatividad permite incluir en forma consistente otro tipo de sistemas además de las partículas: los campos; en particular permite describir el campo electromagnético y los fenómenos lumínicos.

Un campo está asociado a la acción de una partícula cargada sobre el medio que la rodea; su dirección y magnitud son proporcionales a la fuerza que dicha partícula ejerce sobre otra partícula colocada en su presencia. La fuerza decrece a medida que nos alejamos de la carga y va siempre en direcciones que parten radialmente de la carga.

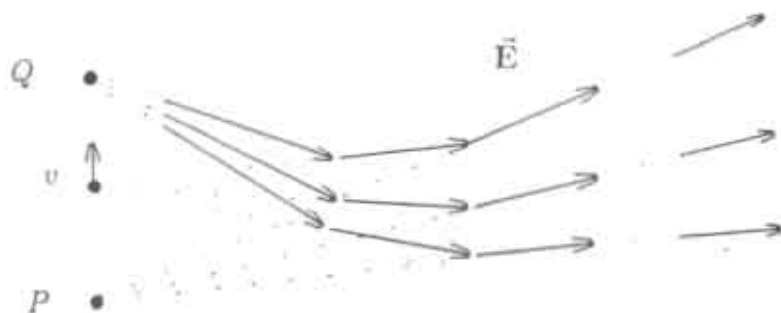


Figura 2

Supongamos que ahora movemos la carga que produce el campo que inicialmente se encontraba en reposo. En la Figura 2 se muestra primero qué ocurre cuando la carga es puesta en movimiento. Veremos que el campo tiene

una realidad independiente de la carga. Para ello pensemos que la carga que inicialmente se encontraba en **P** comienza a moverse hasta llegar a **Q**. En la primer figura de la serie se muestra el campo en el instante en que la carga llega a **Q**. Observen que cuando estamos lejos de la fuente, las líneas de campo provienen del punto original, ya que el campo en esa región no tuvo tiempo de enterarse que la partícula comenzó a moverse. La propagación de la información se produce a la velocidad de la luz, por lo que lejos de la carga el campo no ha sido alterado. A distancias intermedias el campo proviene de una posición intermedia de la carga, y a distancias próximas proviene del punto que acaba de emitir la señal. De este modo se va dibujando una figura de lo que será una onda.

En la Figura 3 vemos qué ocurrió cuando la partícula regresa de **Q** al punto de partida **P**. Entonces tenemos que muy cerca las líneas ya detectan que la carga llegó a **P**, y muy lejos aún no han recibido información de que se produjo movimiento alguno, y también salen de **P**. En la región intermedia hay una onda. Esa onda se irá propagando a la velocidad de la luz, alejándose de la partícula hasta llegar al detector. Eso es lo que ocurre normalmente en cualquier sistema de rediodifusión. Una antena emite una onda electromagnética (de radio o televisión) que se propaga y es captada finalmente por el receptor. La onda tiene la capacidad de mover los electrones de la antena del receptor aun cuando la emisora ya haya cesado de emitir señales. Es decir que persiste esta capacidad en el campo.



Figura 3

En conclusión: ahora el campo es un sistema físico tan real como las partículas. Más en general debemos pensar una partícula cargada como un objeto esencialmente extendido. Sólo se puede describir ahora consistentemente a un sistema de partículas si al mismo tiempo se describe al campo que ellas crean. En resumen: al pasar de la Mecánica Clásica a la Relatividad Especial hemos podido ampliar el conjunto de sistemas que nuestra teoría puede describir; la materia ya no está confinada en las partículas masivas sino que de alguna forma se extiende por todo el espacio a través de los campos.

una realidad independiente de la carga. Para ello pensemos que la carga que inicialmente se encontraba en **P** comienza a moverse hasta llegar a **Q**. En la primer figura de la serie se muestra el campo en el instante en que la carga llega a **Q**. Observen que cuando estamos lejos de la fuente, las líneas de campo provienen del punto original, ya que el campo en esa región no tuvo tiempo de enterarse que la partícula comenzó a moverse. La propagación de la información se produce a la velocidad de la luz, por lo que lejos de la carga el campo no ha sido alterado. A distancias intermedias el campo proviene de una posición intermedia de la carga, y a distancias próximas proviene del punto que acaba de emitir la señal. De este modo se va dibujando una figura de lo que será una onda.

En la Figura 3 vemos qué ocurrió cuando la partícula regresa de **Q** al punto de partida **P**. Entonces tenemos que muy cerca las líneas ya detectan que la carga llegó a **P**, y muy lejos aún no han recibido información de que se produjo movimiento alguno, y también salen de **P**. En la región intermedia hay una onda. Esa onda se irá propagando a la velocidad de la luz, alejándose de la partícula hasta llegar al detector. Eso es lo que ocurre normalmente en cualquier sistema de rediodifusión. Una antena emite una onda electromagnética (de radio o televisión) que se propaga y es captada finalmente por el receptor. La onda tiene la capacidad de mover los electrones de la antena del receptor aun cuando la emisora ya haya cesado de emitir señales. Es decir que persiste esta capacidad en el campo.



Figura 3

En conclusión: ahora el campo es un sistema físico tan real como las partículas. Más en general debemos pensar una partícula cargada como un objeto esencialmente extendido. Sólo se puede describir ahora consistentemente a un sistema de partículas si al mismo tiempo se describe al campo que ellas crean. En resumen: al pasar de la Mecánica Clásica a la Relatividad Especial hemos podido ampliar el conjunto de sistemas que nuestra teoría puede describir; la materia ya no está confinada en las partículas masivas sino que de alguna forma se extiende por todo el espacio a través de los campos.

La idea predominante en Mecánica Clásica de fuerzas que actúan a distancia no es correcta porque la perturbación del campo no afecta inmediatamente a la antena y viaja a la velocidad de la luz, que resulta un límite absoluto para la transmisión de señales. Más en general, ningún objeto físico puede viajar con una velocidad superior a la velocidad de la luz que resulta un límite absoluto. Encontraremos más adelante otros límites que restringen las posibilidades de acción de un sistema sobre otro. En este caso, la limitación reside en la imposibilidad de modificar un sistema que se encuentra a cierta distancia, en un tiempo inferior al que toma la luz para viajar de nuestro sistema al otro.

Los intervalos de tiempo y las distancias espaciales entre dos puntos ya no son absolutos e independientes de cualquier factor externo. El tiempo transcurre con un ritmo distinto en un sistema que se mueve con relación a otro con una velocidad próxima a la velocidad de la luz. Sólo notaremos un retraso en el transcurrir del tiempo si las velocidades son cercanas a la de la luz; cuando las velocidades son pequeñas, no hay diferencia entre el comportamiento predicho por la relatividad especial y la mecánica clásica.

Sin embargo, si bien el espacio y el tiempo ya no son absolutos, una combinación de ambos, el espacio-tiempo, lo es y está descrita por una geometría fija. Para comprender esto un poco mejor, recordemos lo que se entiende en física por suceso. Un suceso es cualquier fenómeno al que se puede asignar una posición y un tiempo bien determinados. Supongamos que un observador en la superficie de la tierra observa dos sucesos y determina que la distancia entre ellos es d y el intervalo de tiempo transcurrido entre los mismos es t ; otro observador que se mueve a una velocidad próxima a la de la luz respecto al primero, medirá entre los mismos sucesos una distancia d' y un tiempo t' que en general serán distintos. Sin embargo ambos estarán de acuerdo en el valor de la cantidad $s^2 = c^2 t^2 - d^2 = c^2 t'^2 - d'^2$ que representa el cuadrado del llamado intervalo espacio-temporal. Todavía se mantiene aquí la noción del espacio-tiempo como mero receptáculo de los sucesos que en él se producen permaneciendo inalterado, independiente de nada externo y descrito por una geometría esencialmente euclídea.

Esta situación cambia con la teoría de la Relatividad General. Ella permite incluir en nuestra descripción a los objetos que se mueven a cualquier velocidad en presencia de campos gravitacionales tan intensos como se quiera y suficientemente grandes con relación al tamaño atómico.

Una vez más al pasar a una teoría más general, nuevos sistemas quedan incluidos en la descripción; aquí es el propio espacio-tiempo el que se comporta como un sistema físico. Ya no es más un espacio cuya geometría es dada desde fuera sino que, como cualquier otro sistema físico, puede interactuar con otros objetos y presentar diferentes estados o comportamientos. Además posee un conjunto de propiedades que se manifiestan en la existencia de magnitudes observables, como la energía o la cantidad de movimiento asociadas al propio espacio.

El espacio-tiempo ya no es más absoluto, sino relacional, depende de la presencia del resto de la materia y admite una descripción de su dinámica y evolución totalmente análoga a la de una partícula o un campo. La idea guía fundamental de la Relatividad General es que todos los cuerpos se comportan exactamente de la misma manera en presencia de un campo gravitacional.

Conviene insistir en que cuando hablamos de todos los cuerpos estamos incluyendo a todos los sistemas físicos ya tratados, ya sean partículas o campos, por ejemplo la luz.

Esa observación del carácter universal de la fuerza gravitacional y del comportamiento universal de los objetos que se mueven en su presencia, sugiere la posibilidad de describir el campo gravitacional como una alteración de la estructura misma del espacio tiempo. La presencia de un sistema físico dotado de energía altera la curvatura del espacio. En efecto, la ecuación fundamental de la Relatividad General o ecuación de Einstein establece que:

$$\text{curvatura del espacio-tiempo} = G * \text{energía del resto de la materia}$$

Para entender el significado de esta ecuación, podemos pensar al espacio como la superficie de un globo, cerca de cada objeto material, las estrellas o los planetas, la ecuación de Einstein establece que se producirá una pequeña deformación de la superficie del globo (Figura 4), de modo que cualquier partícula en presencia del cuerpo más masivo (por ejemplo un planeta en presencia de una estrella) seguirá una trayectoria de mínima longitud en el espacio curvo y describirá una elipse alrededor de la estrella. La luz misma se desviará siguiendo una trayectoria de mínima longitud. Este efecto de desviación de la luz fue observado por primera vez en 1919, y actualmente los astrónomos lo utilizan para observar objetos distantes, ya que producen las llamadas lentes gravitacionales. En efecto un objeto masivo se comporta como una lente convergente al desviar la luz y permite magnificar los objetos que se encuentran detrás de la estrella.

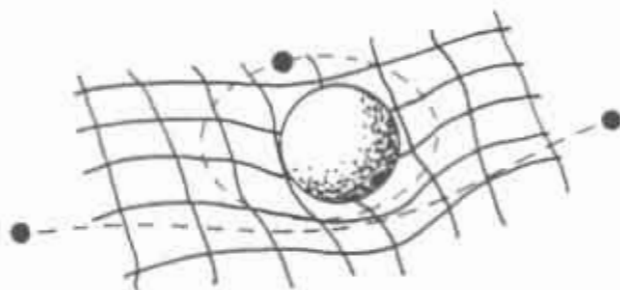


Figura 4: La presencia de un cuerpo masivo altera la curvatura del espacio. Trayectoria de un planeta y de un rayo luminoso en las proximidades de una estrella.

Las predicciones de esta teoría se apartan más de las familiares de la mecánica clásica, cuanto más masivo es un sistema y más intenso es el campo gravitacional o la curvatura que produce. Un caso extremo es el de los huecos negros. Una estrella de masa suficientemente grande, digamos diez veces la masa del sol, al concluir su hidrógeno comienza un proceso de colapso que la lleva finalmente a implotar. Toda la materia caerá sobre sí misma hasta concentrarse literalmente en un punto donde la curvatura del espacio será infinita. Si pensamos en el espacio-tiempo como en la superficie de un globo, un hueco negro sería un punto donde el globo estaría presionado por una aguja.

En las proximidades de un hueco negro se presenta otro límite absoluto para las interacciones. Recordemos que el primero estaba dado por la velocidad de la luz. Este otro límite se produce cuando uno se encuentra dentro del llamado horizonte de Schwartzild que rodea al hueco negro como una membrana esférica situada a una distancia

$$R = 2GM/c^2$$

El horizonte "protege" al resto del universo de la singularidad en el espacio, en el sentido que no hay ningún medio de que algo situado en el interior del horizonte actúe sobre el exterior. Por ejemplo, si tratamos de enviar una señal de radio hacia el exterior, ésta no podrá atravesar el horizonte y quedará permanentemente atrapada. De hecho todo lo que se encuentra en el interior del horizonte, incluyendo la luz o las ondas de radio, caerá inexorablemente hacia el hueco negro. El horizonte se comporta como una membrana que sólo puede atravesarse en un sentido. Una vez más encontramos que las leyes de la física establecen límites para la acción de ciertos objetos sobre otros.

Al pasar a la Mecánica Cuántica encontraremos el límite que tiene quizá consecuencias más importantes desde el punto de vista físico y filosófico.

La Mecánica Cuántica describe sistemas microscópicos tales como partículas, átomos y moléculas en campos gravitacionales débiles. Con ella quedan incluidos dentro de los sistemas físicos todos los asociados a los elementos y sustancias químicas. De hecho con la Mecánica Cuántica y la Mecánica Estadística se logra la reducción a nivel de principios básicos de la química a la física.

Es importante recordar que la mayor parte de las aplicaciones tecnológicas de los últimos 50 años están relacionadas con la Mecánica Cuántica. Para mencionar sólo una: la revolución electrónica que se inició en los años 50 y que aún hoy continúa y se extiende a la informática y la robótica, fue posible gracias a la capacidad de fabricar microcomponentes electrónicas basadas en la física cuántica de los sólidos.

La novedad más importante que introduce la Mecánica Cuántica es que sistemas que se encuentran en el mismo estado pueden dar distintas respuestas al mismo proceso de medida. Supongamos por ejemplo, que tenemos 100 átomos idénticos de un cierto elemento como el sodio, y que todos han sido preparados de modo que se encuentren en el mismo estado excitado. Es decir que uno de sus electrones no se encuentra en la órbita más baja sino en una de mayor energía. Cuando el electrón vuelve a su nivel más bajo emite un fotón asociado a cierta luz de color amarillo. El estado de estos átomos está completamente determinado, no hay nada más que podamos medir para obtener información adicional. Si hacemos alguna medida ulterior sólo lograremos alterar al átomo que ahora no emitirá luz amarilla. En objetos clásicos se debe esperar que sistemas físicos en el mismo estado tengan exactamente la misma respuesta a una medida.

Sin embargo en el caso que estamos considerando no ocurre lo mismo. Supongamos que colocamos un fotodetector para saber cuándo emite luz cada átomo y supongamos que todos ellos han sido excitados simultáneamente. Lo que observaremos es que cada uno emite luz en un instante de tiempo distinto.

No hay forma de predecir cuándo emitirá luz un átomo determinado. Sobre los sistemas cuánticos sólo es posible hacer predicciones estadísticas sobre su comportamiento; así podremos decir que de los 100, un promedio de 50 emitirá antes de un segundo, mientras que los últimos 10 emitirán en general luego de 5 segundos.

Los sistemas cuánticos resultan ser indeterministas: el conocimiento preciso del estado de un sistema no permite deducir con certeza cuál va a ser la respuesta del sistema a una medida. Aparece así otro límite a las interacciones que parece ser aún más fundamental que los anteriores. Es imposible determinar el comportamiento de un sistema cuántico con suficiente precisión como para que se pueda predecir con exactitud el resultado de cualquier medida que se realice sobre él. Esta característica no depende de ningún tipo de limitación tecnológica, responde a la naturaleza misma de los objetos microscópicos.

El cambio de descripción que impone la Mecánica Cuántica es el más radical de todos. Se debe, por ejemplo, abandonar la noción de que una partícula estará en cierta posición aun cuando no sea observada. En efecto, en Mecánica Cuántica la posición es una magnitud observable y éstas sólo aparecen como respuestas posibles en un proceso de medida. Para entender esto más claramente, veamos lo que ocurre en el siguiente ejemplo (Figura 5).

Se considera un fuente **F** que emite electrones con muy baja intensidad; los electrones pueden pasar por una pantalla con dos rendijas **R** y **S**, y finalmente son detectados mediante una placa fotográfica colocada en **P**. Cada vez que un electrón llega a la placa aparecerá una pequeña manchita en la misma. Luego de un tiempo suficientemente grande como para que un número apreciable de electrones se depositen, la placa tendrá un oscurecimiento proporcional a la densidad de electrones depositados en cada región. El resultado notable de esta experiencia, perfectamente explicado por la Cuántica, es que no importa la intensidad de la fuente de electrones, en la placa aparecerá una figura de interferencia, *como si cada electrón pasase simultáneamente por los dos orificios de la pantalla*. Cualquier medida que se realice para determinar el orificio por el cual pasa el electrón (por ejemplo, iluminando uno de los orificios de forma de ver al electrón pasar) altera completamente la distribución de electrones en la pantalla que ya no mostrará ninguna figura de interferencia.

En otras palabras, mientras no se lo obliga a responder la pregunta de dónde se encuentra, el electrón no opta por ninguna respuesta; de hecho en el ejemplo se comporta como si pasara simultáneamente por ambos orificios. Cuando intentamos determinar por qué orificio pasa el electrón alteramos radicalmente su comportamiento y si bien ahora sabemos con certeza qué ubicación tenía al atravesar la pantalla, lo que hemos ganado en precisión en el conocimiento de su posición lo hemos perdido en la determinación de su velocidad, lo que altera la distribución de partículas en la placa. El sistema mantiene siempre un cierto grado de libertad irreductible en su comportamiento. Esa libertad se manifiesta en el famoso principio de incertidumbre que limita nuestra posibilidad de determinar precisamente la posición y velocidad de un objeto microscópico.

Como decíamos al definir las magnitudes observables, no se debe pensar que un objeto cuántico posee una cierta velocidad en un instante dado; más bien se debe pensar que el objeto tiene la posibilidad de dar un cierto conjunto de respuestas diferentes a la pregunta (o medida) sobre su velocidad. Importa

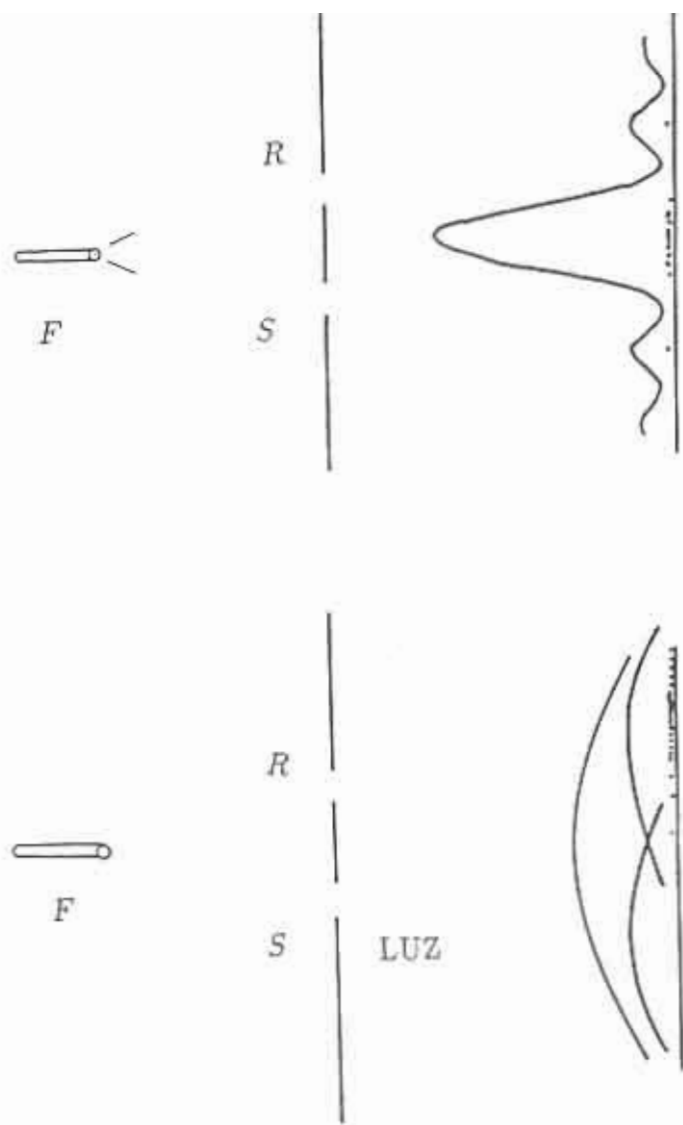


Figura 5: a) Comportamiento de los electrones cuando no se observa por qué rendija pasan. b) comportamiento cuando se ilumina una de las rendijas.

hacer dos precisiones. Estas propiedades de la descripción cuántica no conducen necesariamente a abandonar la idea de una realidad independiente del acto de observación. El realismo no debe abandonarse, sin embargo debe modificarse. Aun cuando no sea observado, el electrón se encuentra en un estado bien definido, pero dicho estado no estará en general directamente asociado a un conjunto definido de magnitudes; en otras palabras, el electrón no tendrá en general una posición y velocidad bien definidas. Estas propiedades sólo se manifiestan en el proceso de medida. La medida siempre termina con la producción de algunos eventos que podemos observar, aparecen algunas manchitas en una placa fotográfica, la flecha de un detector oscila al recibir un electrón con cierta velocidad, en definitiva los eventos sólo se producen durante el proceso de medida. Esto nos lleva a la segunda precisión. No se debe concluir de aquí que los objetos sólo son cuando son observados por alguien, como sostiene el idealismo. El proceso de medida al que aquí se hace referencia es la interacción de un sistema microscópico con uno macroscópico, mediante la cual alguna propiedad del objeto microscópico tiene un efecto en el sistema grande. En definitiva, se trata de un proceso de interacción puramente físico en el que no tiene por qué intervenir ningún observador humano.

La Física aún no está completa: no tenemos una teoría que cubra todo el espacio de parámetros en nuestro diagrama tridimensional. Tal teoría debe ser cuántica e incluir a la gravitación. La Relatividad General Cuántica es la gran teoría que queda por encontrar y en su búsqueda han venido trabajando muchos físicos desde 1930.

Para concluir resumamos la enseñanzas que se pueden extraer de este recorrido relámpago por el mundo de la física. Se ha dejado muy atrás la idea de un mundo compuesto de partículas materiales que evolucionan en un espacio vacío y absoluto. No hay espacio ni tiempo absolutos sino que ellos son dinámicos, como también lo son los campos y las radiaciones que llenan el espacio. El espacio es distinto en cada punto y en cada instante de tiempo dependiendo de todos los sucesos que en él se dan. No hay determinismo: los sistemas físicos tienen un cierto grado de libertad incontrolable que impide determinar con precisión su comportamiento futuro. Un sistema físico resulta ser en última instancia un ente capaz de producir ciertos efectos sobre otros y de ser afectado por otros. El mundo físico es un mundo de acciones mutuas interrelacionadas. Las leyes de la física describen dichas relaciones y establecen ciertos límites para ellas.

En definitiva, no podemos pensar que es más material un cuerpo sólido como la mesa, que el espacio que la separa de los otros objetos. Uno podría concluir tranquilamente como hacia aquel sabio del siglo pasado, cuando afirmaba que para asegurarse de la validez del sentido común, bastaba con dar un puntapié a una piedra.

Al fin de cuentas, el ideal de lo material es aquello que podemos tocar, que es sólido. Conviene al respecto recordar cómo surge la noción de solidez en Mecánica Cuántica. La materia se divide de acuerdo con la Estadística Cuántica en dos grandes grupos: los *bosones* como las partículas que componen la luz, que tienen la propiedad de que un número cualquiera pueden estar en un mismo estado, y los *fermiones* como los electrones y los protones que componen la materia sólida y que tienen la propiedad de que no puede

haber más de una partícula por estado. La posición de una partícula forma parte de las características que determinan su estado; dos electrones idénticos no pueden estar en la misma posición porque estarían en el mismo estado. Tal es lo que ocurre en un sólido, donde cada electrón va ocupando un lugar definido debido a esta propiedad estadística.

Esto no quiere decir que el electrón sea sólido en ningún sentido. En efecto, si pensamos en dos electrones que difieran por alguna propiedad que los distinga, como su spin, de modo que aunque ocupen la misma posición estén en estados diferentes, entonces cada uno de ellos podrá colocarse coincidentemente con el otro como si no hubiera nada en ese punto.

En resumen, la diferencia entre los sistemas que podemos tocar y los que no -como la radiación electromagnética-, reside en el tipo de comportamiento colectivo que obedecen. Los sólidos están compuestos por partículas que nunca presentan comportamientos idénticos; los campos, por partículas que pueden presentar el mismo comportamiento y en particular ocupar la misma posición.

La idea tradicional de materia como cuerpo dotado de extensión, inspirada en los cuerpos sólidos, se va diluyendo progresivamente a medida que la física progresa. Parecería que más bien estamos sumergidos en un hondo mar de materia, un mar compuesto de infinitos polos activos en perpetuo devenir.

La física de hoy nos invita a superar ciertas discusiones del pasado entre materialismo e idealismo, o entre realismo y fenomenalismo, y reflexionar sobre nuevas bases. Muchos físicos creemos que este paso debe ser dado pero hasta el momento no hemos sido capaces de hacerlo solos. De ahí el reiterado esfuerzo por expresar en palabras la descripción del mundo que la física nos proporciona.

(*) Una de las conferencias inaugurales del año lectivo 1993.