



# *Cuántica y Relatividad*

## *TOE's*

### *(Teorías del Todo)*

*Lander López Icedo  
José María Porro Azpiazu  
Erik Torróntegui Muñoz  
Miguel García Echevarría*

*UPV/EHU, Leioa  
1º Físicas  
Fundamentos de Química  
Mayo 2004*



# Índice

<b>Mecánica Cuántica</b>	<b>5</b>
Introducción a la Mecánica Cuántica	6
Cronología de la Mecánica Cuántica	7
Max Planck: Radiación del cuerpo negro: el Cuanto	8
<i>Números cuánticos</i>	9
<i>Teoría del quantum de acción de Planck</i>	10
Einstein: efecto fotoeléctrico	12
Bohr: Postulados y modelo atómico	13
<i>Modelo atómico de Bohr</i>	15
Louis de Broglie: dualidad onda-corpúsculo	17
<i>Dualida onda-corpúsculo</i>	19
Wolfrang Pauli: Principio de Exclusión	22
<i>Principio de Exclusión</i>	24
Erwin Schrödinger: Ecuación de Onda	25
<i>Ecuación de Onda</i>	26
<i>El gato de Schrödinger</i>	32
Modelos Atómicos	34
Heisenberg: Principio de Incertidumbre	35
<i>Principio de Incertidumbre</i>	36
Paul Dirac y la antimateria	39
<b>Relatividad</b>	<b>41</b>
Relatividad de Galileo-Galilei	42
Introducción	43
Vida y obra de Galileo-Galilei	43
<i>Contribuciones más importantes a la Ciencia</i>	46
Teoría de la Relatividad de Galileo	47
<i>Todos los sistema de referencia son válidos</i>	47
<i>Desarrollo matemático</i>	51
Relatividad de Isaac Newton	54
Pequeña Biografía de una gran Vida	55
La base de la Mecánica: las Leyes de Newton	57

<i>1<sup>a</sup> Ley del Movimiento (de la inercia)</i>	57
<i>2<sup>a</sup> Ley del Movimiento (fundamental)</i>	58
<i>3<sup>a</sup> Ley del Movimiento (de acción-reacción)</i>	59
La Ley de Gravitación Universal	60
<i>Debilidades de la teoría</i>	61
Espacio y Tiempo absolutos	61
Gravedad instantánea	62
Equilibrio Infinito	62
El Éter	62
La Luz	63
Y la Luz...	63
Electromagnetismo	65
La Luz	66
<i>Naturaleza de la Luz</i>	66
Teoría corpuscular de Newton	66
Teoría ondulatoria de Huygens	67
Teoría ondulatoria de Fresnel	67
Teoría Electromagnética de Maxwell	68
Naturaleza cuántico-corpuscular de Einstein	68
Naturaleza dual de la Luz	69
<i>Fenómenos luminosos</i>	69
Propagación rectilínea de la Luz	69
Reflexión y Refracción	70
Dispersión	70
Interferencia	71
<i>Experimento de Young</i>	72
Difracción	72
Polarización	72
<i>Velocidad de la Luz</i>	73
Método de Galileo (terrestre)	73
Método de Roemer (astronómico)	74
Método de Fizeau (terrestre)	74
Método de Foucault (terrestre)	75
Velocidad Real	76
Electromagnetismo	76
<i>Introducción</i>	76
<i>Breve historia del Electromagnetismo</i>	76
Ecuaciones de Maxwell	80
Importancia y problemas de las fórmulas	81
<i>La búsqueda del Éter</i>	82
Relatividad de Albert Einstein	85
De nuevo, pequeña biografía de una gran vida	86
Teoría de la Relatividad Restringida o Especial	90
<i>El Principio Universal de la Relatividad</i>	92

El problema del Éter	95
<i>La independencia de la velocidad de la Luz</i>	96
<i>Equivalencia de masa y energía</i>	97
<i>Red Espacio-Tiempo</i>	99
Teoría de la Relatividad General	101
<i>Principio de Equivalencia</i>	102
<i>Consecuencias de la Teoría</i>	105
<i>Curvatura de la red espacio-tiempo</i>	108
<b>TOE's (Teorías del Todo)</b>	<b>110</b>
Relatividad y Cuántica... ¿incompatibles?	111
Supergravedad	114
Teoría de Kaluza-Klein	118
Supercuerdas y Teoría M	120

*Mecánica*

*Cuántica*

## **Introducción a la Mecánica Cuántica**

Según esta nueva concepción de la mecánica, la radiación, caracterizada anteriormente por su continuidad, se reducía a gránulos materiales (cuantos) o cantidades discretas de energía. No obstante, al definir estados estacionarios del electrón, se le atribuía a éste un simultáneo carácter ondulatorio: a la cantidad de movimiento del electrón había que hacer corresponder una longitud de onda, con lo cual la constante de Planck, que había servido para introducir el carácter corpuscular en la teoría de la radiación, permitía trasladar también la naturaleza ondulatoria a los corpúsculos materiales.

La concepción tradicional del electrón, que lo consideraba como una simple carga puntual en un medio sin estructura, quedaba descartada y había que aceptar, por el contrario, que el electrón en movimiento está siempre acompañado por una serie de ondas que, en último término, determinan la dirección que debe seguir.

El alemán Werner Heisenberg fue quien resolvió el problema de determinar la naturaleza de la onda asociada al electrón con una interpretación probabilística, según el llamado principio de incertidumbre. Según este resultado, el producto de las incertidumbres o imprecisiones con que se conocen dos magnitudes asociadas, es decir, parejas de magnitudes en las que ocurre que cuanto mejor se pretende medir una más imprecisa queda la otra, resulta ser del orden de la magnitud de la constante de Planck.

Se comprende la esencia de este principio de incertidumbre al considerar que, al realizar una medición en una partícula, es imposible no modificar el estado de la misma. Si, por ejemplo, se pudiera visualizar el electrón para estudiarlo, la luz empleada sería tan potente que modificaría su estado físico de forma radical. Llevando, pues, el principio de Heisenberg a sus últimas consecuencias cabe considerar que en mecánica cuántica se puede calcular la energía de un electrón en casos particulares, pero no es posible determinar simultáneamente su posición exacta. Así pues, sólo se puede dar una distribución de probabilidad para las diversas situaciones posibles.

Al aplicar la mecánica cuántica al estudio del átomo desaparecen las órbitas deterministas de los primeros modelos atómicos y se sustituyen por las expresiones de probabilidad o funciones onda ideadas por Erwin Schrödinger.

Desarrollada con estas directrices, la mecánica cuántica no sólo eliminó las grandes dificultades de tipo lógico que presentaba la física teórica, sino que permitió también resolver

nuevos problemas, tales como la interpretación de las fuerzas de valencia y de las fuerzas intermoleculares.

## **Cronología de la Mecánica Cuántica**

Resulta cuando menos paradójico, como veremos a continuación, el hecho de que el electrón y el neutrino fueran descubiertos en 1937 y 1932 respectivamente y que la que probablemente es una de las disciplinas ligadas a ellos, la Mecánica Cuántica, comenzase su desarrollo allá por 1859.

En las siguientes páginas iremos tratando punto a punto las claves de esta disciplina científica y las historias de sus más grandes contribuyentes. Iremos desde el problema de la radiación del cuerpo negro planteado por Kirchoff hasta la firme consecución matemática de la teoría.

En 1859, Gustav Kirchoff publicó unas teorías sobre la radiación del cuerpo negro en las cuales relacionaba la energía irradiada con la temperatura y la frecuencia de la energía emitida. Esto quedaba probado pero él fue incapaz de encontrar esa relación y la función de esa energía irradiada toma la forma de  $E = J(T, \nu)$  siendo  $J$  una función respecto a la temperatura y el tiempo que era desconocida.

A partir de entonces fueron múltiples los intentos en descubrir la forma de dicha función  $J$ . Uno de los primeros intentos con algo de éxito fue protagonizado por Josef Stefan, el cual de forma experimental, concluye que la energía emitida se relacionaba con la potencia cuarta de la temperatura. A esta misma conclusión llegó de forma teórica Ludwig Boltzmann, aplicando la termodinámica y los principios electromagnéticos de Maxwell. Estas conclusiones eran buenas pero no respondían al problema de longitudes de onda específicas, así pues, no estaban completas.

En 1896, Wilhelm Wien propuso una teoría que encajaba perfectamente para valores bajos de la longitud de onda pero fallaba mas allá del infrarrojo como probaron Rubens y Kurlbaum.

No fue hasta 4 años mas tarde cuando Planck fue visitado por Rubens que le enseñó sus estudios. Poco tiempo después Planck había desarrollado la parte matemática del problema y había descrito con gran exactitud lo que debía ser la función  $J$ . Pero esto no contento a Planck, de manera

teórica sus resultados y dicha función J solo se explicaban de una forma, la energía era emitida en cantidades indistinguibles llamadas cuantos.

### *Max Planck: Radiación del cuerpo negro; el Cuanto*

*Max Planck (1858-1947), alemán, físico, nació en una familia con bastante nivel académico, poco corriente para la época. Su padre, Julius Wilhem Planck, era profesor de derecho constitucional en la universidad de Kiel, y su abuelo y bisabuelo habían sido, en su día, profesores de teología en Göttingen. Su madre, Emma Patzig era la segunda esposa de su padre. Era el sexto hijo de su padre, y el cuarto de su actual mujer, y creció en un ambiente en el que la escolarización, honestidad y generosidad eran valores muy importantes a tener en cuenta. Max empezó su escolarización elemental en Kiel, pero en 1867 su familia se mudó a Munich, donde su padre iba a ser profesor. Recibió la enseñanza secundaria también en Munich, era buen estudiante, pero no era brillante, sino que estaba normalmente entre el 3º y el 8º de su clase. Música era quizás la asignatura que mejor se le daba. Se habría esperado que despuntase en matemáticas y ciencias, pero ciertamente, en sus primeros años académicos, aunque lo hacía bien, no había signos de talento extraordinario. Sin embargo, su profesor Hermann Müller, elevó su nivel de interés por la física y las matemáticas hasta tal nivel que se quedó muy impresionado con la ley de la conservación de la energía.*



*Entró en la universidad de Munich en 1874. Después de recibir mayoritariamente clases de matemáticas al principio de su carrera, mostró interés por los trabajos de investigación que llevaba a cabo su profesor de física, Philipp von Jolly, quien le dijo que la física era esencialmente una ciencia completa con pocas posibilidades de desarrollo en el futuro. A pesar de estas palabras, Planck decidió estudiar físicas.*

*Durante los años de universidad tuvo la oportunidad de conocer a múltiples celebridades de la física en aquel momento, entre ellas a Kirchoff, hacia el cual sentía una gran admiración pero que le parecía seco y monótono en su forma de impartir clases. A pesar de esto Planck mostraba un gran interés fuera de los propios límites de la carrera y quedó fascinado de nuevo por otra ley de carácter universal, la segunda ley de la termodinámica, sobre la cual realizaría su tesis doctoral por la cual recibió el doctorado en Munich en 1879 a la edad de 21 años. Dicha tesis obtuvo la calificación de "summa cum laude".*

*En 1888, tras la muerte de Kirchoff, Planck ocupó su lugar en la universidad de Berlín avalada por su adquirido prestigio como físico y sus visiones originales de la ciencia en*

*general. Mientras tanto continuó su estudio de la termodinámica y la emisión de energía en función de la longitud de onda de la misma.*

*Esto le llevaría en 1900 a publicar una formula hoy en día conocida como la formula de radiación de Planck. En dos meses Planck hizo un completo estudio teórico-ético en el cual introducía un concepto rompedor con la física conocida hasta aquel instante, el cuanto de energía. A finales de dicho año Planck expuso sus teorías públicamente con el tema del cuanto como mayor fuente de controversia y la aceptación del carácter estadístico de las leyes físicas interpretado por Boltzmann.*

En 1900, Max Planck, para justificar el espectro de emisión de un cuerpo negro, enunció su hipótesis según la cual el contenido energético de un oscilador puede ser sólo un múltiplo entero de la magnitud  $hv$ , a la que se denomina cuanto de energía, y en donde  $f$  es la frecuencia de su vibración y  $h$  la constante de Planck igual a  $6,62 \cdot 10^{-34}$  Js. En realidad, los cuantos o unidades de radiación son tan pequeños que la radiación nos parece continua.

El estudio de la radiación, o forma de energía que puede propagarse por el espacio sin medio material alguno y que se presenta bajo distintos aspectos -ondas electromagnéticas, rayos infrarrojos, luz visible, rayos ultravioleta, rayos X, rayos gamma-, llevó a la postulación de una serie de hipótesis y leyes basadas en la física clásica. Tales interpretaciones partieron del estudio de la radiación en un cuerpo negro que, al absorber toda radiación incidente sin reflejar ninguna y emitir, pues, el máximo de energía, se podía considerar como radiador ideal.

Estos estudios y medidas condujeron en algunos casos a resultados tan brillantes como, por ejemplo, el cálculo de la temperatura de la superficie solar a partir de las leyes de Stefan-Boltzmann y Wien, como hemos mencionado anteriormente. Sin embargo, no consiguieron una expresión matemática universal del problema, es decir, no permitieron conocer la composición del espectro integrado por todas las longitudes de onda en que se puede descomponer la radiación, en función de la temperatura. Ello planteó la necesidad de cambiar la base del razonamiento. No obstante, dado que los postulados clásicos de la física en los que se basaron los estudios habían dado lugar a grandes éxitos científicos, los investigadores se encontraron perplejos ante el conflicto entre teoría y resultados experimentales. Fue Planck el primero en pensar que la clave del problema podía estribar en la discontinuidad de la energía radiante.

## Números cuánticos

La aplicación de la hipótesis de Planck al modelo atómico establecido con anterioridad por Niels Bohr permitió explicar que la emisión de la energía radiante por un electrón se debe al salto de éste de una órbita a otra puesto que cada una de ellas queda determinada por un nivel energético, y que sólo eran posibles aquellas órbitas en las cuales el momento cinético del electrón era un múltiplo entero de un número  $h$  denominado cuántico principal, relacionado a su vez con la constante de Planck  $h$ . El alemán Arnold Sommerfeld modificó esta teoría e introdujo otro número cuántico, el secundario  $l$  o orbital  $l$ , para hacer la órbita elíptica. Con posterioridad se instauró un tercero, el número cuántico magnético  $m$ , que indica la inclinación de la órbita. Finalmente se estableció el número cuántico de espín  $s$ , que determinaba el sentido de giro del electrón. La ordenación de los valores que podían adoptar estos números dio lugar a una distribución de niveles y subniveles energéticos a partir de la cual pudo establecerse la estructura electrónica de los átomos y, consiguientemente, el sistema periódico de los elementos.

Sin embargo, estos modelos compatibilizaban la cuantización del átomo con la mecánica clásica y se hacía así sentir la necesidad de una nueva base para la teoría cuántica, base que fue proporcionada por la interpretación física conocida como mecánica cuántica.

## Teoría del quantum de acción de Planck

Al buscar una solución que fuera válida para todos los casos, Max Planck enunció su fórmula matemática, sin pronunciarse sobre la naturaleza de los fenómenos. Tal fórmula permitió fijar el poder de emisión del cuerpo negro en función de la longitud de onda y en ella se relacionaban la constante de Planck, la velocidad de la luz, la constante de Boltzmann y la temperatura absoluta.

No dándose por satisfecho con una mera fórmula que no respondiera a la realidad física, Planck realizó intensos estudios en los que partía de considerar a las moléculas del cuerpo negro como osciladores eléctricos lineales, aplicándoles las leyes de los movimientos armónicos e introduciendo su hipótesis para determinar el estado microscópico del sistema, lo que le permitió formular la teoría cuántica. A este respecto, se considera un oscilador armónico o lineal cualquier partícula oscilante en la que el desplazamiento sea periódico y pueda representarse como función sinusoidal del tiempo. Según la hipótesis planteada por Planck, la emisión de energía radiante de frecuencia  $f$  no tiene lugar de forma continua, sino que se verifica por múltiplos enteros de una cantidad, el quantum o cuanto, cuyo valor es  $hv$ , donde  $h$  es la constante universal de Planck (su valor es de  $6,62 \cdot 10^{-34}$  ergios por segundo).

La teoría de Planck de que la energía radiante es discontinua como la materia no sólo estaba en contradicción con las ideas admitidas hasta entonces, sino también con la naturaleza ondulatoria de esa energía que había sido comprobada en múltiples estudios experimentales. Por ello, Planck intentó conciliar su teoría con la física clásica al afirmar que, si bien la emisión era discontinua, la absorción se mantenía continua.

Se debe a Albert Einstein la generalización de esta discontinuidad al desarrollar sus estudios sobre el efecto fotoeléctrico, consistente en la liberación de electrones que tiene lugar al medir una radiación electromagnética sobre un material.

Poco después de que Gustav Ludwig Hertz observara, en 1887, que determinados materiales sometidos a la acción de una radiación emitían cargas eléctricas, se comprobó que todos los metales presentan este efecto al ser sometidos a la acción de rayos de longitud de onda suficientemente pequeña y que para los metales alcalinos el fenómeno tenía lugar dentro de la gama visible de radiaciones. Este efecto, llamado fotoeléctrico y que constituye el fundamento físico de las células fotoeléctricas y de las fotorresistencias, no tenía explicación posible según la teoría ondulatoria de la luz.

Al estudiar Einstein el fenómeno mediante la hipótesis de Planck, llegó más lejos que el postulador de la teoría, al admitir que la energía luminosa emitida en forma de cuantos conserva esa forma discontinua durante su propagación y se absorbe de la misma manera. Según esta interpretación, la energía luminosa de frecuencia  $v$  era transportada por corpúsculos de energía  $hv$ , a los que Einstein llamó cuantos de luz y que posteriormente se denominarían fotones.

Como la energía  $hv$  de un fotón incidente se emplea en parte con la finalidad de realizar el trabajo de arrancar un electrón y en parte a fin de proporcionarle energía cinética, para que un fotón pueda arrancar un electrón es preciso que su energía  $hv$  sea mayor que el trabajo que hay que cumplir. Así pues, si un fotón no dispone de energía suficiente no es posible sumar la energía de otro fotón para conseguir el desprendimiento de un electrón. De todo ello se deduce que lo decisivo para el proceso de arranque no es la energía total de los rayos que inciden sobre el metal, sino la frecuencia  $v$  de los mismos, que es la que determina la energía individual de cada fotón.

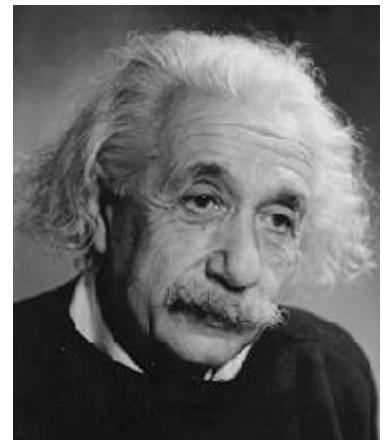
Según este modelo físico, aunque un haz de rayos pertenecientes al intervalo rojo del espectro visible tenga mucha energía en conjunto, es decir, muchos fotones, la energía de cada fotón

es pequeña porque la luz roja, de elevada longitud de onda, es, por consiguiente, de baja frecuencia y el valor de  $hv$  pequeño.

Esta explicación del fenómeno fotoeléctrico fue la primera confirmación de la teoría cuántica. Einstein la dio a conocer en 1905, el mismo año en que fue publicada la teoría de la relatividad. Vamos, así, a continuar ahora hablando de Einstein y del efecto fotoeléctrico, aunque profundizaremos más en los trabajos de Albert Einstein en la parte de relatividad de nuestro trabajo.

### *Einstein. Efecto fotoeléctrico*

En 1905, Einstein estudió el efecto fotoeléctrico. El efecto fotoeléctrico consiste en la emisión de electrones por parte de ciertos metales o semiconductores por efecto de la luz. La teoría electromagnética de la luz nos da resultados raros que son refrendados experimentalmente. Einstein propuso una teoría cuántica de la luz para resolver la “rareza”, y luego se dio cuenta de que la teoría de Planck hacía uso implícitamente de la teoría cuántica de la luz. Para 1906 Einstein había sugerido correctamente que los cambios de energía tenían lugar en un material oscilador cuántico, en saltos, que son múltiplos de  $hv$ . Einstein recibió, en 1921, el premio Nóbel de física por su trabajo sobre el efecto fotoeléctrico.



Después de esta breve introducción, vamos a hablar más detalladamente sobre el efecto fotoeléctrico.

El efecto fotoeléctrico consiste en la formación y liberación de partículas eléctricamente cargadas que se produce en la materia cuando es irradiada con luz u otra radiación electromagnética. El término *efecto fotoeléctrico* designa varios tipos de interacciones similares. En el efecto fotoeléctrico externo se liberan electrones en la superficie de un conductor metálico al absorber energía de la luz que incide sobre dicha superficie. Este efecto se emplea en la célula fotoeléctrica, donde los electrones liberados por un polo de la célula, el foto cátodo, se mueven hacia el otro polo, el ánodo, bajo la influencia de un campo eléctrico.

El estudio del efecto fotoeléctrico externo desempeñó un papel importante en el desarrollo de la física moderna. Una serie de experimentos iniciados en 1887 demostró que el efecto fotoeléctrico externo tenía determinadas características que no podían explicarse por las teorías de

aquella época, que consideraban que la luz y todas las demás clases de radiación electromagnética se comportaban como ondas. Por ejemplo, a medida que la luz que incide sobre un metal se hace más intensa, la teoría ondulatoria de la luz sugiere que en el metal se liberarán electrones con una energía cada vez mayor. Sin embargo, los experimentos mostraron que la máxima energía posible de los electrones emitidos sólo depende de la frecuencia de la luz incidente, y no de su intensidad.

En 1905, para tratar de explicar el mecanismo del efecto fotoeléctrico externo, Albert Einstein sugirió que podría considerarse que la luz se comporta en determinados casos como una partícula, y que la energía de cada partícula luminosa, o fotón, sólo depende de la frecuencia de la luz. Para explicar el efecto fotoeléctrico externo, Einstein consideró la luz como un conjunto de "proyectiles" que chocan contra el metal. Cuando un electrón libre del metal es golpeado por un fotón, absorbe la energía del mismo. Si el fotón tiene la suficiente energía, el electrón es expulsado del metal. La teoría de Einstein explicaba muchas características del efecto fotoeléctrico externo, como por ejemplo el hecho de que la energía máxima de los electrones expulsados sea independiente de la intensidad de la luz. Según la teoría de Einstein, esta energía máxima sólo depende de la energía del fotón que lo expulsa, que a su vez sólo depende de la frecuencia de la luz. La teoría de Einstein se verificó por experimentos posteriores. Su explicación del efecto fotoeléctrico, con la demostración de que la radiación electromagnética puede comportarse en algunos casos como un conjunto de partículas, contribuyó al desarrollo de la teoría cuántica.

Ya en 1913, Niels Bohr escribió un informe que revolucionó la concepción que hasta el momento se tenía del átomo de hidrógeno. Descubrió la mayoría de las leyes del espectro. Este trabajo, que ahora profundizaremos, le valió a Bohr el Nóbel de física en 1922.

### *Bohr: Postulados y modelo atómico*

*Bohr, Niels (1885-1962), físico danés, galardonado con el premio Nobel, que hizo aportaciones fundamentales en el campo de la física nuclear y en el de la estructura atómica.*

*Bohr nació en Copenhague el 7 de octubre de 1885; era hijo de un profesor de fisiología y estudió en la universidad de su ciudad natal, donde alcanzó el doctorado en 1911. Ese mismo año fue a la Universidad de Cambridge (Inglaterra) para estudiar física nuclear con J.J. Thomson, pero pronto se trasladó a la Universidad de Manchester para trabajar con Ernest Rutherford.*



*La teoría de la estructura atómica de Bohr, que le valió el Premio Nobel de Física en 1922, se publicó en una memoria entre 1913 y 1915. Su trabajo giró sobre el modelo nuclear del átomo de Rutherford, en el que el átomo se ve como un núcleo compacto rodeado por un enjambre de electrones más ligeros. El modelo de átomo de Bohr utilizó la teoría cuántica y la constante de Planck. El modelo de Bohr establece que un átomo emite radiación electromagnética sólo cuando un electrón del átomo salta de un nivel cuántico a otro. Este modelo contribuyó enormemente al desarrollo de la física atómica teórica.*

*En 1916, Bohr regresó a la Universidad de Copenhague como profesor de física, y en 1920 fue nombrado director del Instituto de Física Teórica de esa universidad, recién constituido. Allí, Bohr elaboró una teoría que relaciona los números cuánticos de los átomos con los grandes sistemas que siguen las leyes clásicas, y realizó otras importantes aportaciones a la física teórica. Su trabajo ayudó a impulsar el concepto de que los electrones se encuentran en capas y que los de la última capa determinan las propiedades químicas de un átomo.*

*En 1939, reconociendo el significado de los experimentos de la fisión (véase Energía nuclear) de los científicos alemanes Otto Hahn y Fritz Strassmann, Bohr convenció a los físicos en una conferencia en Estados Unidos de la importancia de estos experimentos. Más tarde, demostró que el uranio 235 es el isótopo del uranio que experimenta la fisión nuclear. Bohr regresó posteriormente a Dinamarca, donde fue obligado a permanecer después de la ocupación alemana del país en 1940. Sin embargo, consiguió llegar a Suecia con gran peligro de su vida y de la de su familia. Desde Suecia, la familia Bohr viajó a Inglaterra y por último a los Estados Unidos, donde Bohr se incorporó al equipo que trabajaba en la construcción de la primera bomba atómica en Los Álamos (Nuevo México), hasta su explosión en 1945. Bohr se opuso, sin embargo, a que el proyecto se llevara a cabo en total secreto, y temía las consecuencias de este siniestro nuevo invento. Deseaba un control internacional.*

*En 1945, Bohr regresó a la Universidad de Copenhague donde, inmediatamente, comenzó a desarrollar usos pacifistas para la energía atómica. Organizó la primera conferencia 'Átomos para la paz' en Ginebra, celebrada en 1955, y dos años más tarde recibió el primer premio 'Átomos para la paz'. Bohr murió el 18 de diciembre de 1962 en Copenhague.*

A partir de los estudios atómicos de Rutherford y de la teoría de la mecánica cuántica de Max Planck, estableció el modelo atómico por el que sería galardonado con el Premio Nobel en 1922, como acabamos de comentar. Supuso que los electrones que giraban alrededor de un núcleo central sólo podían situarse sobre determinadas órbitas, cada una de las cuales poseía un determinado nivel energético. Según él, un electrón emitía o absorbía cantidades discretas de energía (cuantos) cuando pasaba de una órbita a otra. Posteriormente realizó estudios para

confirmar que en los elementos químicos con más de dos electrones, éstos se disponen en capas, siendo la más externa la que determinaba las propiedades químicas de la sustancia en cuestión.

El cada vez más evidente distanciamiento entre el mundo cotidiano y las descripciones matemáticas que se ocupan de la ordenación subatómica, que permite paradojas como el doble comportamiento de onda y de partículas en los electrones, constituyó una de las principales preocupaciones para Bohr. Ello lo impulsó a enunciar el principio de complementariedad, según el cual un fenómeno físico puede observarse desde dos puntos de vista diferentes que no se excluyen entre sí.

Bohr propuso los siguientes postulados:

- a) Un átomo está constituido por una carga eléctrica (núcleo) alrededor de la cual giran los electrones, en número suficiente para compensar aquella, describiendo circunferencias.
- b) Cada electrón no puede moverse sobre una órbita cualquiera, sino solamente en aquellas en las cuales su impulso de rotación es un múltiplo entero de  $h/2\pi$  ( $h$ , la constante de Planck).
- c) Cuando el electrón se mueve sobre una de sus órbitas, no irradia energía.
- d) Un electrón puede saltar espontáneamente de una órbita a otra más cercana al núcleo.

Al hacerlo, su energía disminuye en  $\Delta W$ , y esa pérdida es emitida en forma de luz cuya frecuencia es:

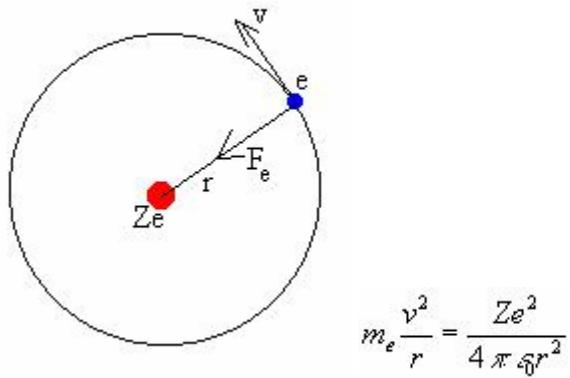
$$\nu = \frac{\Delta W}{h}$$

Estas frecuencias (una para cada par de órbitas) concuerdan con las observaciones experimentalmente en las líneas espectrales de las series del hidrógeno.

### **Modelo atómico de Bohr**

El modelo de Bohr es muy simple y recuerda al modelo planetario de Copérnico, los planetas describiendo órbitas circulares alrededor del Sol. El electrón de un átomo o ion hidrogenoide describe órbitas circulares, pero los radios de estas órbitas no pueden tener cualquier valor.

Consideremos un átomo o ion con un solo electrón. El núcleo de carga  $Ze$  es suficientemente pesado para considerarlo inmóvil, de modo que la energía del electrón es:



Si el electrón describe una órbita circular de radio  $r$ , por la dinámica del movimiento circular uniforme

En el modelo de Bohr solamente están permitidas aquellas órbitas cuyo momento angular está cuantizado.

$$L = m_e v r = \frac{n\hbar}{2\pi} \quad \text{con } n = 1, 2, \dots \quad (3)$$

$n$  es un número entero que se denomina número cuántico, y  $\hbar$  es la constante de Planck  $6.6256 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$

Las ecuaciones (2) y (3) nos dan los radios de las órbitas permitidas

$$r = \frac{n^2 \hbar^2 \epsilon_0}{\pi m_e Ze^2}$$

El radio de la primera órbita es  $n=1$ ,  $r=5.29 \cdot 10^{-11} \text{ m}$ , se denomina radio de Bohr.

La energía total se puede escribir

$$E = -\frac{m_e^4 Z^2}{8 \epsilon_0^2 h^2 n^2}$$

La energía del electrón aumenta con el número cuántico n.

Al discutir el experimento de Frank- Hertz se mencionaba la primera energía de excitación como la necesaria para llevar a un átomo de su estado fundamental a al primer (o más bajo) estado excitado. La energía del estado fundamental se obtiene con n=1, E1= -13.6 eV y la del primer estado excitado con n=2, E2=-3.4 eV.

Las energías se suelen expresar en electrón-voltios (1eV=1.6 10-19 J)

La radiación emitida cuando el electrón pasa del estado excitado al fundamental es

$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h} = 2.47 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$$

### *Louis de Broglie: Dualidad Onda-Corpúsculo*

*De familia noble y aristocrática, heredó los títulos nobiliarios de su padre, de ahí que se le conozca internacionalmente como Príncipe de Broglie. Nació en Dieppe, en el bajo Sena, el 15 de agosto de 1892.*

*Ingresó primero a la universidad en 1909 a estudiar literatura. Sin embargo, cambió luego y obtuvo un primer grado en historia al año siguiente. Pero las conversaciones con su hermano mayor Maurice, físico experimental, lo llevaron a la ciencia obteniendo su egreso en este campo con un primer grado en 1913. A los 18 años, y después de finalizar un trabajo de investigación que se le había asignado, tomó la decisión de estudiar física. Pronto fue enrolado en el servicio militar justo cuando estalló la primera guerra mundial siendo asignado al ejército entre 1914 al 1918, quedando estacionado en la Torre Eiffel en la sección de comunicaciones. Al final de la guerra retomó sus estudios de física, interesándose por los nuevos desarrollos teóricos que emanaban de la nueva física atómica.*



*En 1929 recibió el Premio Nobel de Física por sus trabajos en la naciente Mecánica Cuántica, en particular el comportamiento ondulatorio de las partículas que ya había sido comprobado experimentalmente en 1927 por Davisson y Germer. Esta proposición la efectuó de hecho de su tesis doctoral “Recherches sur Théorie des Quanta”, la cual leyó ante la Facultad de Ciencias de la Universidad de París en 1924.*

*De Broglie alcanzó su reconocimiento en el mundo de los físicos por la propugnación que describe en su teoría sobre la dualidad partícula–onda de la materia. En su tesis doctoral de 1924, propone esta teoría sosteniendo la naturaleza de onda del electrón, basándose en el trabajo de Einstein y de Planck. Esta afirmación, fue confirmada experimentalmente en 1927 por C J Davisson, C H Kunsman y L H Germer en los EE.UU. y por G P Thomson en Escocia. De Broglie, durante una entrevista en 1963, describió cómo había llegado a ese importante descubrimiento:*

*"En conversaciones que frecuentemente sostenía con mi hermano siempre llegábamos a la conclusión que los rayos X se caracterizaban por ser corpúsculos y también ondas. Por ello, en el curso de verano de 1923, repentinamente concebí la idea de ampliar esta dualidad a las partículas materiales, especialmente a los electrones. Recordé que la teoría de Hamilton-Jacobi señalaba algo en esa dirección, ya que ella es aplicable a las partículas y, además, representa una óptica geométrica; por otra parte, en cuántica uno obtienen los números quantum de los fenómenos, que raramente se encuentran en mecánica pero ocurren frecuentemente en manifestaciones ondulatorias y en todos los problemas que se ocupan del movimiento de las ondas."*

*Después de doctorarse, de Broglie permaneció en la Sorbonne, llegando a ser, en el año 1928, profesor de física teórica en el instituto Henri Poincaré. De Broglie enseñó allí hasta que se retiró en 1962. En 1945, fue nombrado consejero de la comisión de energía atómica francesa.*

*La teoría ondulatoria de De Broglie de la materia del electrón fue utilizada más adelante por Schrödinger para desarrollar la mecánica de la onda.*

*Hasta la defensa de su tesis sus aptitudes como docente permanecieron ocultas, en parte por su dedicación a la investigación y en parte por la guerra y sus secuelas. Primero fueron sus conferencias libres en La Sorbonne, luego fue profesor de física teórica en el nuevo Instituto Henri Poincaré, para llegar finalmente a la cátedra de Física Teórica de la Facultad de Ciencias de la Universidad de París en 1932. Sin embargo siguió dictando además un curso diferente cada año en el Instituto Poincaré, lo que le valió una gran reputación como expositor y conferencista. Sus aptitudes didácticas se manifestaron además en la gran cantidad de tesis*

*doctorales dirigidas en las décadas siguientes y los varios libros muy bien escritos que explicaban la nueva física. Esto último fue uno de sus principales respaldos para obtener el premio Kalinga en 1952, la primera ocasión en que fue otorgado, tras su creación por la UNESCO el año anterior. A lo largo de su vida de Broglie recibió muchos otros premios, medallas, distinciones y doctorados honoríficos.*

*Fue elegido a la Academia Francesa de Ciencias recién en 1933 (¡después de recibir el premio Nobel a los 37 años!) . En 1942 asumió como Secretario Permanente para las ciencias matemáticas en la sociedad, cargo que conservó prácticamente hasta su muerte ocurrida el 19 de marzo de 1987 en París.*

## **Dualidad Onda-Corpúsculo**

Cuando una onda electromagnética de frecuencia  $v$  incide sobre un electrón, lo fuerza a oscilar con esa misma frecuencia. Según vimos, el electrón se convierte en una antena que radia con la misma frecuencia que oscila. Ésta es una más de las consecuencias inevitables de unir a la mecánica con el electromagnetismo clásicos. Por ello resultó apasionante ver cómo Compton, al dispersar rayos X con un bloque de parafina, midió una radiación emergente cuya frecuencia era menor a la de los rayos X originales. Si se aceptan los principios de la teoría ondulatoria de Maxwell, el efecto descubierto por Compton resulta incomprensible.

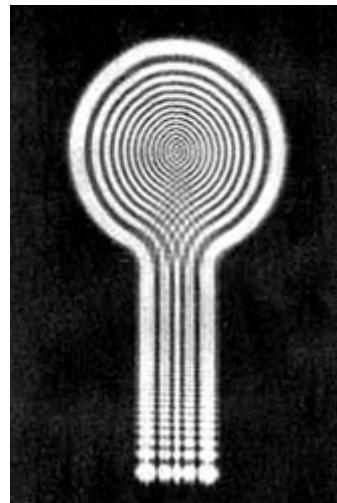
El efecto Compton —encontrado por este físico americano en 1922 para los rayos X, y luego ratificado por el investigador hindú, Chandrasekhar Raman, para la luz visible— puede, sin embargo, entenderse si se adopta un modelo corpuscular para la luz. Al chocar el cuanto de luz, cuya energía es  $hv$ , cede parte de su energía al electrón libre, por lo que su energía se convierte en  $hv'$  después del choque; la conservación de la energía nos fuerza a concluir que  $v'$  es menor que la frecuencia original. De hecho, si se usa la dinámica relativista —como se impone, ya que de haber una partícula muy rápida, ésta sería el fotón—, es posible explicar, aun cuantitativamente, los resultados experimentales de Compton. Una vez más, como en la radiación del cuerpo negro y en el efecto fotoeléctrico, aparecen los fotones y se reafirma, para la luz, la dualidad partícula-onda.

Al reflexionar un momento, pronto se percata uno de cuán irracional es esta dualidad. No es extraño que un físico ortodoxo de principios de siglo protestara cuando alguien tratara de unir conceptos antagónicos como el de onda y el de partícula. En la concepción clásica, esta última es un punto-masa con energía e impulso lineal muy definidos y de dimensiones pequeñísimas; la onda, por su parte, se extiende al infinito en el espacio y el tiempo.

La paradoja anterior no arredró a Louis de Broglie, quien en su tesis doctoral, presentada en la Sorbona en 1925, fue más allá y postuló que la misma dualidad partícula-onda que aquejaba a la luz se halla presente cuando se trata de electrones, protones y otras partículas de pequeña masa. De Broglie insistió en que a toda partícula de masa  $m$  debe asociarse una onda, cuya longitud de onda  $\lambda$  es inversamente proporcional al ímpetu  $p = mv$  de la partícula. Como en todos los efectos cuánticos, la constante de proporcionalidad es la constante de Planck:

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{h}{p}$$

Mientras mayor sea la masa de la partícula, menor será la longitud de la onda asociada, hasta que desaparece cuando de cuerpos macroscópicos se trata. Todo ocurre como, si en tal caso, la constante de Planck fuera cero y las predicciones de la mecánica clásica se recuperaran.



*Figura 18. Patrones de difracción. a) Agujero en forma de ojo de cerradura.*

Una propuesta audaz como la de De Broglie no puede entrar a la física sin antes ser objeto de los inquisidores. ¿Cómo puede sujetarse la hipótesis ondulatoria del físico francés a la prueba experimental? Einstein mismo encontró la primera prueba, pues la idea de Louis de Broglie resultaba necesaria para entender los valores experimentales del calor específico de los sólidos. Una demostración más directa la dieron, sin embargo, Davisson y Germer que descubrieron por accidente la difracción de electrones en 1927. Cuando estudiaban la forma en que se reflejaban los electrones después de chocar con un blanco de níquel metálico dentro de un tubo al vacío, el tubo se dañó y rápidamente se depositó una capa de óxido sobre el níquel. Para salvar su muestra, los físicos americanos la recalientaron, con lo cual, sin saberlo, formaron superficies cristalinas. Al observar luego los electrones, hallaron para su sorpresa que el haz de electrones no sólo se reflejaba sino que también se difractaba! Y la difracción es uno de esos fenómenos típicamente ondulatorios, según sabían los físicos desde muchas décadas antes.

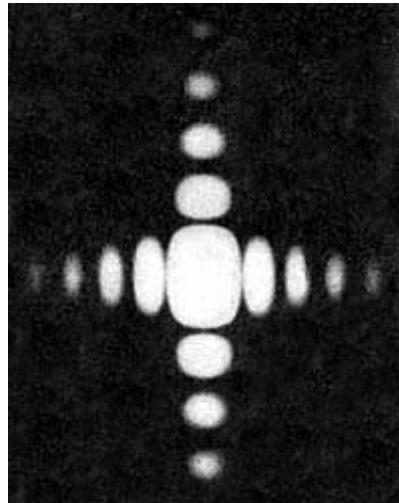


Figura 18. b) Apertura cuadrada.

Con este descubrimiento, no solamente se arraigan las ideas ondulatorias en la física moderna, sino también se abren nuevas posibilidades para ver objetos muy pequeños. La difracción de electrones es la base de la microscopía electrónica, hoy presente en muchísimos laboratorios de biología, química e ingeniería.

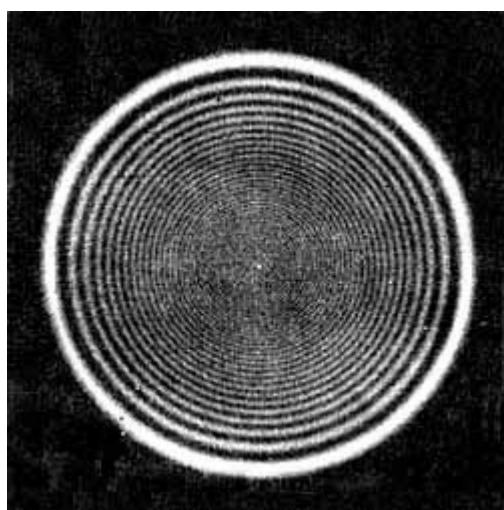


Figura 18. c) Rayos X contra una hoja de aluminio.

El experimento de Davisson fue confirmado por George Thomson —hijo único de sir J. J. Thomson— en el caso de electrones, por Stern para haces moleculares y por otros investigadores para neutrones y otras partículas. En todos los casos, la ecuación de De Broglie se cumple con alta precisión, con lo cual la mecánica ondulatoria de Schrödinger pudo finalmente aparecer.

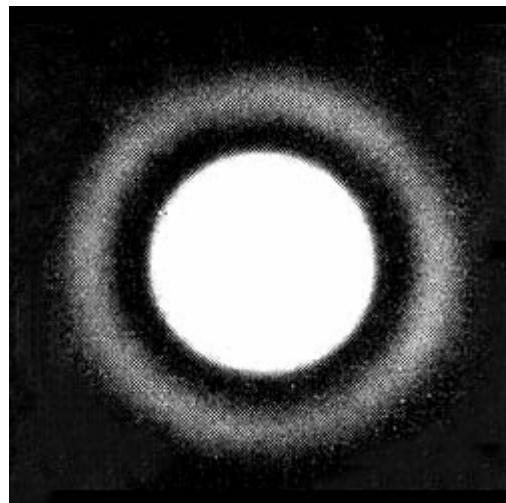


Figura 18. d) Electrones contra una hoja de aluminio.

### *Wolfgang Pauli. Principio de exclusión.*

*Wolfgang Ernst Pauli, físico teórico estadounidense de origen austriaco, conocido por su trabajo sobre la teoría del espín. Hijo de Wolfgang Joseph Pauli, médico de descendencia judía y profesor de la universidad de Viena, y de Berta Camilla Schütz. Pauli fue bautizado en la fe católica y, su segundo nombre, se lo dieron en honor a su padrino Ernst Mach. .*



*Pauli asistió en sus años de escolaridad al Gymnasium Döblingen en Viena, graduándose en su licenciatura secundaria con la distinción en 1918. Solamente dos meses después de la graduación, él publicó su primer artículo sobre la teoría de la relatividad general de Einstein. Sus estudios superiores los cursó en la universidad Ludwig-Maximilian de Múnich, donde tuvo como su profesor guía a Sommerfeld. Con una tesis sobre la teoría cuántica del hidrógeno molecular ionizado, se doctoró en física en el año 1921.*

*En ese entonces, Sommerfeld le pidió a Pauli que revisara la versión de la relatividad publicada en la enciclopedia alemana Encyklopädie der mathematischen Wissenschaften. Dos meses después de recibir su doctorado, Pauli terminó el trabajo que constituía de 237 páginas. Einstein lo elogió por ello, y fue publicado como una monografía que se ha constituido, hasta ahora, en una referencia estándar sobre el tema.*

*Inmediatamente después de su graduación como doctor en física, Pauli fue a trabajar a la universidad de Göttingen como ayudante de Max Born. Luego, al año siguiente, trabajó con Niels Bohr en el Instituto de Física de Copenhague. Desde esa estación en Copenhague, Pauli*

*fue un admirador y un amigo de por vida de Niels Bohr ; y Bohr dio siempre la mayor importancia a los consejos científicos y a las crítica de Pauli. En el año 1923, fue nombrado docente de la cátedra de física teórica en la universidad de Hamburgo, puesto que desempeñó hasta 1928. Durante este período, Pauli participó activamente en el desarrollo de la teoría moderna de la mecánica cuántica. Entre sus aportes de esa época, se encuentran el principio de exclusión – su primer descubrimiento importante en la física atómica– y la teoría no-relativista del espín.*

*Entre los años 1924 y 1927, Pauli desempeñó un importante papel en el desarrollo de la mecánica cuántica. Aunque Heisenberg fue el primero en descubrir su formalismo, muchos físicos han tenido la impresión y, aún la mantienen, que tanto Pauli como Bohr jugaron un rol inspirativo fundamental en él (véase el libro de Henry). Después de que el formalismo fuera creado en 1925-1926, Pauli aplicó las nuevas ideas a importantes casos, como el de la molécula del hidrógeno. La simplicidad del espectro de esta molécula era inexplicable a través de las teorías anteriores, y después de que Pauli formulara la solución para resolver el enigma, la nueva teoría generalmente ha sido aceptada por una gran mayoría de físicos.*

*En 1928, fue nombrado profesor de la cátedra de física teórica del ETH (Instituto Tecnológico Federal de Zurich) , Suiza . Y, en 1931, lo designaron profesor visitante de la universidad de Michigan, EE.UU. Luego, en 1935, pasó a ser profesor del Instituto de Estudios Avanzados Princeton, en Nueva Jersey, EE.UU.*

*En mayo de 1929, Pauli abandonó el catolicismo y, en diciembre de ese mismo año, se casó con Käthe Margarethe Deppner. Esa unión matrimonial no fue lo esperado por él, ni por su cónyuge, y terminó en divorcio en 1930, menos de un año después de haberse celebrado el matrimonio. A raíz de ese fracaso matrimonial, Pauli sufrió una profunda crisis sicológica y, siguiendo los consejos de su padre, se hizo asistir por el sicoanalista Carl Gustav Jung.*

*Después del descubrimiento del principio de exclusión y de su rol inspirativo en el desarrollo de la mecánica cuántica, Pauli entrega su tercer gran aporte a la ciencia. En efecto, para explicar el decaimiento beta del radio, en 1932 propone la existencia del «neutrino». Esta partícula, ya casi al final de su vida, fue detectada experimentalmente en 1956.*

*En 1933, Pauli publicó un artículo titulado "Los principios fundamentales de la mecánica cuántica", para el Handbuch der Physik. Se trató de un trabajo que ha sido ampliamente reconocido como uno de los mejores documentos escritos relacionados con la física cuántica.*

*Wolfgang Pauli se volvió a casar con Franciska Bertram en 1934. Esta unión duraría para el resto de su vida, pero no tuvo descendencias.*

*La anexión de Austria a Alemania en 1938 le hizo a ciudadano alemán, lo que le representó serias dificultades cuando estalló la Segunda Guerra Mundial en 1939. Por ello, Pauli se mudó a los Estados Unidos en 1940, donde él era profesor de física teórica en Princeton. Al finalizar la guerra, en 1945, volvió a Zurich, en donde permaneció por el resto de su vida.*

*En 1945, recibió el premio Nobel de física, otorgado por su decisiva contribución al descubrir, en 1925, una nueva ley de la naturaleza: «el principio de exclusión o principio de Pauli». Para su nominación al premio, uno de los proponentes fue Albert Einstein.*

*Pauli falleció el 15 de diciembre de 1958, en la ciudad de Zurich, Suiza.*

*Wolfgang Ernst Pauli gozaba de una personalidad enérgica, pero a la vez, pintoresca. Todavía son recordadas sus ingeniosas y a menudo sarcásticas críticas para quienes presentaban nuevas teorías de manera poco claras e imperfectas. Pauli ejerció gran influencia en sus alumnos y colegas obligándolos con sus agudas críticas a una comprensión más profunda y clara.*

## **Principio de exclusión**

Usando la dualidad onda-partícula (Ver "La luz: dualidad onda y partícula"), todo en el universo, incluyendo la luz y la gravedad, puede ser descrito en términos de partículas. Estas partículas tienen una propiedad llamada espín. Los que nos dice el espín de una partícula es cómo se muestra la partícula desde distintas direcciones.

Una partícula de espín 0 es como un punto: parece la misma desde todas las direcciones. Por el contrario, una partícula de espín 1 es como una flecha: parece diferente desde direcciones distintas. Sólo si uno la gira una vuelta completa la partícula parece la misma. Una partícula de espín 2 es como una flecha con dos cabezas: parece la misma si se gira media vuelta (180 grados). De forma similar, partículas de espines más altos parecen las mismas si son giradas una fracción más pequeña de una vuelta completa. Todo esto parece bastante simple, pero el hecho notable es que existen partículas que no parecen las mismas si uno las gira justo una vuelta: hay que girarlas dos vueltas completas. Se dice que tales partículas poseen espín 1/2.

- Todas las partículas conocidas en el universo se pueden dividir en dos grupos:
- Partículas de espín 1/2 (las cuales forman la materia del universo)
  - Partículas de espín 0, 1 y 2 (las cuales dan lugar a las fuerzas entre las partículas materiales)

El principio de exclusión de Pauli dice que dos partículas similares no pueden existir en el mismo estado, es decir, que no pueden tener ambas la misma posición y la misma velocidad, dentro de los límites fijados por el principio de incertidumbre.

El principio de exclusión es crucial porque explica por qué las partículas materiales no colapsan a un estado de muy alta densidad, bajo la influencia de las fuerzas producidas por las partículas de espín 1, 1 y 2: si las partículas materiales están casi en la misma posición, deben tener entonces velocidades diferentes, lo que significa que no estarán en la misma posición durante mucho tiempo.

*Si el mundo hubiese sido creado sin el principio de exclusión, los quarks no formarían protones y neutrones independientes bien definidos. Ni tampoco estos formarían, junto con los electrones, átomos independientes bien definidos. Todas las partículas se colapsarían formando una "sopa" densa, más o menos uniforme.*

### *Erwin Schrödinger: Ecuación de Onda.*

Schrödinger, Erwin (1887-1961), físico y premio Nobel austriaco, conocido sobre todo por sus estudios matemáticos de la mecánica ondulatoria y sus aplicaciones a la estructura atómica. Nació en Viena y estudió en la universidad de esa ciudad. Dio clases de física en las universidades de Stuttgart (Alemania), Breslau (Polonia), Zurich, Berlín, Oxford y Graz (Austria). Desde 1940 hasta su jubilación en 1955 fue director de la escuela de física teórica del Instituto de Estudios Avanzados de Dublín. La aportación más importante de Schrödinger a la física fue el desarrollo de una rigurosa descripción matemática de las ondas estacionarias discretas que describen la distribución de los electrones dentro del átomo. Schrödinger demostró que su teoría, publicada en 1926, era el equivalente en matemáticas a las teorías de mecánica matricial que había formulado el año anterior el físico alemán Werner Heisenberg. Juntas, sus teorías constituyeron en buena medida la base de la mecánica cuántica (véase Teoría cuántica). Schrödinger compartió en 1933 el Premio Nobel de Física con el británico Paul A. M. Dirac por su aportación al desarrollo de la mecánica



cuántica. Su investigación incluía importantes estudios sobre los espectros atómicos, la termodinámica estadística y la mecánica ondulatoria. Véase Espectroscopia; Termodinámica; Movimiento ondulatorio. Entre los libros de Schrödinger se encuentran *Collected Papers on Wave Mechanics* (Recopilación de artículos sobre mecánica ondulatoria, 1928), *Modern Atomic Theory* (Teoría atómica moderna, 1934), *Statistical Thermodynamics* (Termodinámica estadística, 1945) y *Expanding Universes* (Universos en expansión, 1956).

## Ecuación de Onda

Con el avenimiento de la mecánica cuántica en 1927, se articularon la hipótesis de Louis de Broglie y el principio de indeterminación de Heisenberg. Ahora, para aplicar el carácter ondulatorio del electrón, se define una función de ondas,  $\psi$ , y utilizando la ecuación de ondas de Schrödinger, que matemáticamente es una ecuación diferencial de segundo grado, es decir, una ecuación en la cual intervienen derivadas segundas de la función  $\psi$ :

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{8\pi^2 m}{h^2} (E - V) \psi = 0$$

Segunda derivada con respecto a X      Función de onda de Schrödinger  
 Posición    Energía  
 Energía potencial

Al resolver la ecuación diferencial, se obtiene que la función  $\psi$  depende de una serie de parámetros, que se corresponden con los números cuánticos, tal y como se define en el modelo atómico de Böhr. La ecuación sólo se plasmará cuando esos parámetros tomen determinados valores permitidos (los mismos valores que se indicaron para el modelo de Böhr).

Por otro lado, el cuadrado de la función de ondas  $\psi^2$ , corresponde a la probabilidad de encontrar al electrón en una región determinada, con lo cual se está introduciendo en el modelo el principio de incertidumbre de Heisenberg. Por ello, en este modelo aparece el concepto de «orbital»: región del espacio en la que hay una máxima probabilidad de encontrar al electrón.

Ahora bien, si  $\psi$  es una función exacta de onda molecular que depende de las posiciones de todos los  $n$  electrones  $(\vec{r}_1, \vec{r}_2, \vec{r}_3, \vec{r}_4, \dots, \vec{r}_n)$ , de las posiciones de todos los  $N$  núcleos  $(\vec{R}_1, \vec{R}_2, \vec{R}_3, \vec{R}_4, \dots, \vec{R}_N)$  y de las coordenadas de los espines

$(m_{s_1}, m_{s_2}, m_{s_3}, m_{s_4}, \dots, m_{s_n})$  de los  $n$  electrones individuales [03]; la ecuación de Schrödinger independiente del tiempo puede ser expresada como sigue:

$$[01] \quad \hat{\mathcal{H}}\Psi_K = \mathcal{E}_K\Psi_K$$

o, desarrollando los parámetros –vectoriales– y, así como los parámetros –escalares– en la expresión [01], en que adquiere la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \hat{\mathcal{H}}\Psi_K(\vec{r}_1, m_{s_1}, \vec{r}_2, m_{s_2}, \vec{r}_3, m_{s_3}, \vec{r}_4, m_{s_4}, \dots, \vec{r}_n, m_{n_2}; \vec{R}_1, \vec{R}_2, \vec{R}_3, \vec{R}_4, \dots, \vec{R}_N) = \\ = \mathcal{E}_K\Psi_K(\vec{r}_1, m_{s_1}, \vec{r}_2, m_{s_2}, \vec{r}_3, m_{s_3}, \vec{r}_4, m_{s_4}, \dots, \vec{r}_n, m_{n_2}; \vec{R}_1, \vec{R}_2, \vec{R}_3, \vec{R}_4, \dots, \vec{R}_N) \end{aligned} \quad [02]$$

estando los vectores a los núcleos y los vectores a los electrones definidos como su grafica en la figura N° 01. Observamos como en nuestras descripciones separamos las variables dependientes de los núcleos de las dependientes de los electrones mediante un punto y una coma.

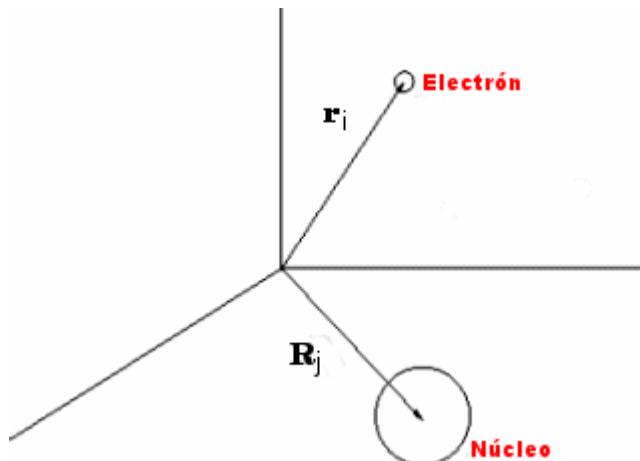


Fig.- N° 01

Podemos derivar la forma del hamiltoniano molecular de la fórmula de la energía clásica por la sustitución del momento clásico y de las coordenadas por sus correspondientes operadores. El hamiltoniano total  $\hat{\mathcal{H}}$  puede ser expresado como sigue:

$$[03] \quad \hat{\mathcal{H}} = \hat{T} + \hat{\mathcal{V}}$$

o bien, desarrollando la expresión [03], con el objeto de describir el hamiltoniano total de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 \hat{\mathcal{H}} = & - \sum_{\alpha=1}^{\alpha=N} \frac{1}{2M_\alpha} \Delta_\alpha - \sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{2} \Delta_i + \sum_{i=j+1}^{i=n} \sum_{j=1}^{j=n} \frac{1}{\|\vec{r}_i - \vec{r}_j\|} + \\
 & + \sum_{\alpha=\beta+1}^{\alpha=N} \sum_{\beta=1}^{\beta=N} \frac{Z_\alpha Z_\beta}{\|\vec{R}_\alpha - \vec{R}_\beta\|} - \sum_{\alpha=1}^{\alpha=N} \sum_{i=1}^{i=n} \frac{Z_\alpha}{\|\vec{r}_i - \vec{R}_\alpha\|}
 \end{aligned}
 \quad [04]$$

La ecuación [04] está expresada en unidades atómicas, en que  $a$  denota la masa del núcleo  $M_a$  y  $Z_a$  su carga [05]; ambos parámetros también en unidades atómicas. También se puede rescribir la expresión en el sistema MKS, de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
 \hat{\mathcal{H}} = & - \sum_{\alpha=1}^{\alpha=N} \frac{\hbar^2}{2M_\alpha} \Delta_\alpha - \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\hbar^2}{2*m} \Delta_i + \sum_{i=j+1}^{i=n} \sum_{j=1}^{j=n} \frac{e^2}{(4\pi\varepsilon\varepsilon_0) \|\vec{r}_i - \vec{r}_j\|} + \\
 & + \sum_{\alpha=\beta+1}^{\alpha=N} \sum_{\beta=1}^{\beta=N} \frac{q_\alpha q_\beta}{(4\pi\varepsilon\varepsilon_0) \|\vec{R}_\alpha - \vec{R}_\beta\|} - \sum_{\alpha=1}^{\alpha=N} \sum_{i=1}^{i=n} \frac{q_\alpha * e}{(4\pi\varepsilon\varepsilon_0) \|\vec{r}_i - \vec{R}_\alpha\|}
 \end{aligned}
 \quad [05]$$

donde  $q_a$  corresponde a la carga de un núcleo.

El operador laplaciano  $D_u$  viene formulado por la expresión:

$$\Delta_\alpha = \left( \frac{\partial^2}{(\partial x)^2}, \frac{\partial^2}{(\partial y)^2}, \frac{\partial^2}{(\partial z)^2} \right) |_\alpha
 \quad [06]$$

en que desarrollando la expresión [06] para todos los núcleos  $\vec{R}_i |_{i \leq N}$ , tenemos:

$$[07] \quad \Delta_\alpha = \left( \frac{\partial^2}{\left(\partial(\vec{R}_i|_x)\right)^2}, \frac{\partial^2}{\left(\partial(\vec{R}_i|_y)\right)^2}, \frac{\partial^2}{\left(\partial(\vec{R}_i|_z)\right)^2} \right)$$

y, de la misma manera, la expresión [06] para todo electrón  $\vec{r}_i|_{i \leq n}$  es:

$$\Delta_i = \left( \frac{\partial^2}{\left(\partial(\vec{r}_i|_x)\right)^2}, \frac{\partial^2}{\left(\partial(\vec{r}_i|_y)\right)^2}, \frac{\partial^2}{\left(\partial(\vec{r}_i|_z)\right)^2} \right)$$

[08]

Por otro lado, el hamiltoniano de la expresión [04] puede ser reescrito en la siguiente manera:

$$[09] \quad \hat{\mathcal{H}} = \hat{T}(\vec{R}_1, \vec{R}_2, \vec{R}_3, \vec{R}_4, \dots, \vec{R}_N) + \hat{T}(\vec{r}_1, m_{s_1}, \vec{r}_2, m_{s_2}, \vec{r}_3, m_{s_3}, \vec{r}_4, m_{s_4}, \dots, \vec{r}_n) + \\ + \hat{\mathcal{V}}_{núcleo-núcleo}(\vec{R}_1, \vec{R}_2, \vec{R}_3, \vec{R}_4, \dots, \vec{R}_N) + \\ + \hat{\mathcal{V}}_{electrón-electrón}(\vec{r}_1, \vec{r}_2, \vec{r}_3, \vec{r}_4, \dots, \vec{r}_n) + \\ + \hat{\mathcal{V}}_{núcleo-electrón}(\vec{R}_1, \vec{R}_2, \vec{R}_3, \vec{R}_4, \dots, \vec{R}_N; \vec{r}_1, \vec{r}_2, \vec{r}_3, \vec{r}_4, \dots, \vec{r}_n)$$

en que el hamiltoniano molecular total es la suma del operador de energía cinética nuclear  $\hat{T}(\vec{R}_1, \vec{R}_2, \vec{R}_3, \vec{R}_4, \dots, \vec{R}_N)$  con el operador de energía cinética electrónica  $\hat{T}(\vec{r}_1, \vec{r}_2, \vec{r}_3, \vec{r}_4, \dots, \vec{r}_n)$  y la representación de los operadores de potencial de interacción electrostática  $\hat{\mathcal{V}}_{a-b}$ , donde  $\hat{\mathcal{V}}_{núcleo-núcleo}$  es el operador de potencial de interacción electrostática entre núcleos para todo par núcleo-núcleo –función de los  $\vec{R}_1, \vec{R}_2, \vec{R}_3, \vec{R}_4, \dots, \vec{R}_N$  vectores– donde  $\hat{\mathcal{V}}_{núcleo-electrón}$  es el operador de la potencial de la interacción electrostática entre electrones para todo par electrón-electrón –función de los  $\vec{r}_1, \vec{r}_2, \vec{r}_3, \vec{r}_4, \dots, \vec{r}_n$  vectores– y  $\hat{\mathcal{V}}_{núcleo-electrón}$  el operador de potencial de interacción electrostática híbrido entre cada núcleo y cada electrón –función de los vectores  $\vec{R}_1, \vec{R}_2, \vec{R}_3, \vec{R}_4, \dots, \vec{R}_N; \vec{r}_1, \vec{r}_2, \vec{r}_3, \vec{r}_4, \dots, \vec{r}_n$ –.

Hasta ahora hemos discutido cómo se opera con la ecuación de Schrödinger hasta llegar a [02], y hemos desarrollado un hamiltoniano hasta la formulación [09]. O sea, hemos descrito matemáticamente a una partícula inserta en un problema de un átomo. Pero el tema es más complejo. En efecto, en la mecánica cuántica, toda la información acerca de una partícula está incluida en su función de onda Y bien en el espacio de coordenadas, bien en el espacio de momentos. Pero ¿qué pasa con su evolución en el tiempo? Como en la física clásica, se supone que si se conoce toda la información necesaria sobre la partícula en un instante inicial, se puede determinar su comportamiento en el futuro: el principio de determinación. Esto significa en mecánica cuántica que, al dar la función de onda en el instante inicial, podemos calcularla en cualquier otro instante. Se trata de un proceso que se realiza a través de la ecuación de Schrödinger de onda para Y(t), análoga a las ecuaciones de onda clásicas. Esta ecuación sustituye a la ley de Newton para la partícula cuántica. Ahora bien, las diferencias esenciales que se dan entre la ecuación para Y(t) y las ecuaciones de onda clásica son manifiestas: la ecuación para Y debe contener sólo el primer orden en la derivada temporal para que al dar sólo Y(t = t<sub>0</sub>) se pueda determinar su comportamiento en el futuro. En cambio las ecuaciones clásicas, contienen derivadas segundas y por lo tanto requieren dar no sólo la función en el instante inicial sino también su primera derivada temporal.

Una partícula libre en la mecánica cuántica tiene como función de onda un paquete de ondas planas cuya dependencia del tiempo ya está determinada. Por eso no es difícil establecer la ecuación que gobierna la evolución en el tiempo en este caso. Si derivamos respecto al tiempo de:

$$\psi(t, \mathbf{r}) = \int (d^3k/2\pi^{3/2}) \phi(\mathbf{k}) \exp(i\mathbf{kr} - i\omega(k)t),$$

encontramos:

$$[10] \quad \dot{\psi}(t, \mathbf{r}) = \int d^3k (2\pi)^{-3/2} (-i\omega(\mathbf{k})) \psi(\mathbf{k}) \exp(i\mathbf{kr} - i\omega(\mathbf{k})t).$$

Por otro lado, tomando el cuadrado del gradiente  $\nabla^2 = D$  (operador de Laplace) tenemos:

$$[11] \quad \nabla^2 \psi(t, \mathbf{r}) = \int d^3k (2\pi)^{-3/2} (-k^2) \psi(\mathbf{k}) \exp(i\mathbf{kr} - i\omega(\mathbf{k})t).$$

Ahora tomemos la siguiente relación entre w y k:

$$\omega(\mathbf{k}) = \hbar k^2/2m,$$

comparando [10] con [11], vemos que se cumple:

$$[12] \quad i\hbar\dot{\psi}(t, \mathbf{r}) = (-\hbar^2\nabla^2/2m)\psi(t, \mathbf{r}) = (p^2/2m)\psi(t, \mathbf{r}).$$

En la segunda igualdad hemos considerado en el espacio de coordenadas que el momento es el operador de gradiente:  $p = -i\hbar\nabla$ . La relación [12] es válida para una amplitud cualquiera  $Y(k)$  y, por ende, para una función de onda cualquiera de una partícula libre, y es precisamente la ecuación de Schrödinger para una partícula libre.

Una de las dificultades que se pueden encontrar en este desarrollo es cómo generalizar [12] cuando las partículas no son libres. Supongamos el caso más sencillo de una interacción dada por un potencial  $U$ , donde el operador que actúa sobre  $Y$  en el tramo derecho de [12] corresponde a la energía cinética  $T(p)$  de la partícula en función de su momento. En el caso libre considerado coincide con la energía total. En la mecánica clásica la energía total de la partícula expresada como función de su momento y coordenada se llama función de Hamilton  $H(r, p)$ . Para una partícula libre  $H(r, p) = T(p)$ , así que para ella la ecuación [12] puede ser reexpresada de la siguiente forma:

$$[13] \quad i\hbar\dot{\psi}(t, \mathbf{r}) = H\psi(t, \mathbf{r}),$$

donde se considera a  $H$  como un supuesto del operador correspondiente a la función hamiltoniana con  $p$  como operador de gradiente. Schrödinger postuló que si la partícula está en un campo de fuerzas conservativas dadas por una energía potencial expresada (clásicamente) por  $U(r)$ , la ecuación para la función de onda conserva su forma [13] con  $H$  dada como suma de las energías cinética y potencial

$$[14] \quad H(\mathbf{r}, \mathbf{p}) = p^2/2m + U(\mathbf{r}),$$

donde  $p$  y  $r$  son ahora los operadores de gradiente y de multiplicación, respectivamente. El operador hermítico  $H$  que resulta se llama hamiltoniano de la partícula. Su sentido físico es el de la energía total. Sus autofunciones, por tanto, son los estados con energía total dada por los autovalores correspondientes de  $H$ . Al pasar al espacio de momentos obtenemos la ecuación de Schrödinger para la función de onda  $f(t, k)$ :

$$[15] \quad i\hbar\dot{\phi}(t, \mathbf{k}) = H\phi(t, \mathbf{k})$$

con  $H$  dado por la misma fórmula [14], donde ahora  $r$  es el operador de gradiente y  $p$  de multiplicación. Señalemos, no obstante, que la energía potencial  $U(r)$  puede ser una función bastante complicada. Por ello, el uso de la forma [14] para el espacio ordinario es muchísimo más recomendable.

Ambas formas [13] y [15] pueden recogerse en la ecuación de Schrödinger para el vector de onda  $\Psi(t)$

$$[16] \quad i\hbar\dot{\psi}(t) = H(\mathbf{r}, \mathbf{p})\psi(t),$$

donde el espacio puede ser cualquiera y la forma de operadores  $r$  y  $p$  se escoge según el espacio.

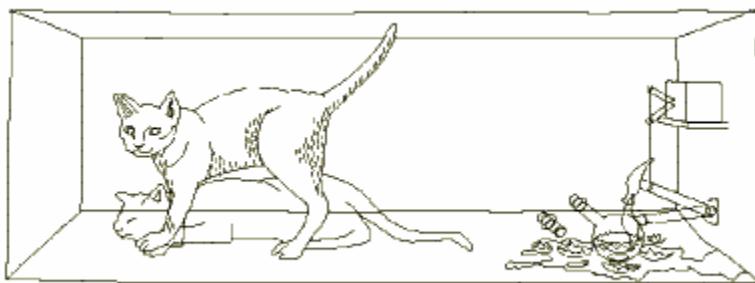
La ecuación de Schrödinger no se deduce en la mecánica cuántica, sino que representa un resultado derivado de observaciones empíricas. Sin embargo, se puede justificar a posteriori considerando sus consecuencias y comparándolas con lo que en realidad ocurre en la naturaleza. Con su aplicación se demuestra a las ondas como una de las características de la materia y es considerada como uno de los grandes logros obtenidos en el siglo XX. Se trata de una herramienta matemática de gran alcance que se utiliza en la física y en una parte importante de los estudios que se efectúan en química que se ocupan de los problemas de la estructura atómica de la materia.

### El gato de Schrödinger

Cuando se habla de "El gato de Schrödinger" se está haciendo referencia a una paradoja que surge de un célebre experimento imaginario propuesto por Erwin Schrödinger en el año 1937 para ilustrar las diferencias entre interacción y medida en el campo de la mecánica cuántica.

El experimento mental consiste en imaginar a un gato metido dentro de una caja que también contiene un curioso y peligroso dispositivo. Este dispositivo está formado por una ampolla de vidrio que contiene un veneno muy volátil y por un martillo sujeto sobre la ampolla de forma que si cae sobre ella la rompe y se escapa el veneno con lo que el gato moriría. El martillo está conectado a un mecanismo detector de partículas alfa; si llega una partícula alfa el martillo cae rompiendo la ampolla con lo que el gato muere, por el contrario, si no llega no ocurre nada y el gato continua vivo.

Cuando todo el dispositivo está preparado, se realiza el experimento. Al lado del detector se sitúa un átomo radiactivo con unas determinadas características: tiene un 50% de probabilidades de emitir una partícula alfa en una hora. Evidentemente, al cabo de una hora habrá ocurrido uno de los dos sucesos posibles: el átomo ha emitido una partícula alfa o no la ha emitido (la probabilidad de que ocurra una cosa o la otra es la misma). Como resultado de la interacción, en el interior de la caja, el gato está vivo o está muerto. Pero no podemos saberlo si no la abrimos para comprobarlo.



Si lo que ocurre en el interior de la caja lo intentamos describir aplicando las leyes de la mecánica cuántica, llegamos a una conclusión muy extraña. El gato vendrá descrito por una función de onda extremadamente compleja resultado de la superposición de dos estados combinados al cincuenta por ciento: "gato vivo" y "gato muerto". Es decir, aplicando el formalismo cuántico, el gato estaría a la vez vivo y muerto; se trataría de dos estados indistinguibles.

La única forma de averiguar qué ha ocurrido con el gato es realizar una medida: abrir la caja y mirar dentro. En unos casos nos encontraremos al gato vivo y en otros muerto. Pero, ¿qué ha ocurrido? Al realizar la medida, el observador interactúa con el sistema y lo altera, rompe la superposición de estados y el sistema se decanta por uno de sus dos estados posibles.

El sentido común nos indica que el gato no puede estar vivo y muerto a la vez. Pero la mecánica cuántica dice que mientras nadie mire en el interior de la caja el gato se encuentra en una superposición de los dos estados: vivo y muerto.

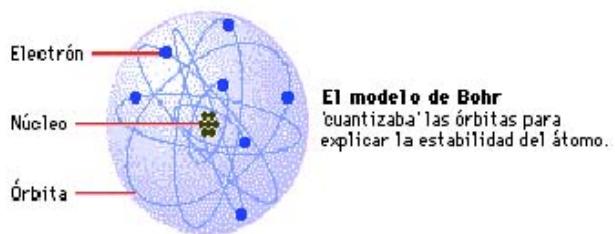
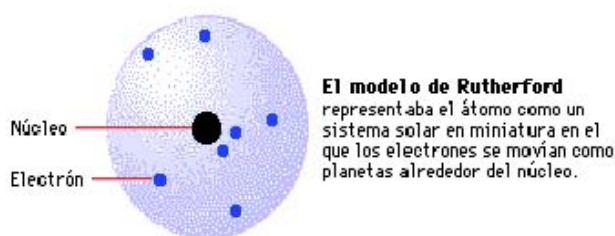
Esta superposición de estados es una consecuencia de la naturaleza ondulatoria de la materia y su aplicación a la descripción mecanocuántica de los sistemas físicos, lo que permite explicar el comportamiento de las partículas elementales y de los átomos. La aplicación a sistemas macroscópicos como el gato o, incluso, si así se prefiere, cualquier profesor de física, nos llevaría a la paradoja que nos propone Schrödinger.

En algunos libros modernos de física, para colaborar en la lucha por los derechos de los animales, en el dispositivo experimental (por supuesto, hipotético) se sustituye la ampolla de veneno por una botella de leche que al volcarse o romperse permite que el gato pueda beber. Los dos estados posibles ahora son: "gato bien alimentado" o "gato hambriento". Lo que también tiene su punto de crueldad.

### *Modelos atómicos*

La materia en estado normal no posee carga eléctrica; es neutra. Sin embargo como los átomos están formados, al menos en parte, por electrones cargados negativamente; debemos suponer que, al menos parte, debe estar cargada positivamente, para que la carga total sea nula. Ello explica la necesidad de un nuevo modelo atómico, que explique la presencia de cargas eléctricas.

*Thomson* sugirió que los átomos son esferas homogéneas e indivisibles, cargadas



**El modelo de Schrödinger**  
abandonó la idea de órbitas precisas y las sustituyó por descripciones de las regiones del espacio (llamadas orbitales) donde es más probable que se encuentren los electrones.

positivamente, en las que están incrustados los electrones. El número de electrones por átomo es suficiente para que su carga sea nula.

La evolución de los modelos físicos del átomo se vio impulsada por los datos experimentales. El modelo de Rutherford, en el que los electrones se mueven alrededor de un núcleo positivo muy denso, explicaba los resultados de experimentos de dispersión, pero no el motivo de que los átomos sólo emitan luz de determinadas longitudes de onda (emisión discreta). Bohr partió del modelo de Rutherford pero postuló además que los electrones sólo pueden moverse en determinadas órbitas; su modelo explicaba ciertas características de la emisión discreta del átomo de hidrógeno, pero fallaba en otros elementos.

El modelo de Schrödinger, que no fija trayectorias determinadas para los electrones sino sólo la probabilidad de que se hallen en una zona, explica parcialmente los espectros de emisión de todos los elementos; sin embargo, a lo largo del siglo XX han sido necesarias nuevas mejoras del modelo para explicar otros fenómenos espectrales.

### *Heisenberg. Principio de incertidumbre.*

*Heisenberg, Werner Karl (1901-1976), físico y Premio Nobel alemán, que desarrolló un sistema de mecánica cuántica y cuya indeterminación o principio de incertidumbre ha ejercido una profunda influencia en la física y en la filosofía del siglo XX.*

*Heisenberg nació el 5 de diciembre de 1901 en Wurzburgo y estudió en la Universidad de Munich. En 1923 fue ayudante del físico alemán Max Born en la Universidad de Gotinga, y desde 1924 a 1927 obtuvo una beca de la Fundación Rockefeller para trabajar con el físico danés Niels Bohr en la Universidad de Copenhague. En 1927 fue nombrado profesor de física teórica en la Universidad de Leipzig. Después fue profesor en las universidades de Berlín (1941-1945), Gotinga (1946-1958) y Munich (1958-1976). En 1941 ocupó el cargo de director del Instituto Kaiser Wilhelm de Química Física (que en 1946 pasó a llamarse Instituto Max Planck de Física).*



*Estuvo a cargo de la investigación científica del proyecto de la bomba atómica alemana durante la II Guerra Mundial. Bajo su dirección se intentó construir un reactor nuclear en el que la reacción en cadena se llevara a cabo con tanta rapidez que produjera una*

*explosión, pero estos intentos no alcanzaron éxito. Estuvo preso en Inglaterra después de la guerra.*

*Heisenberg, uno de los primeros físicos teóricos del mundo, realizó sus aportaciones más importantes en la teoría de la estructura atómica. En 1925 comenzó a desarrollar un sistema de mecánica cuántica, denominado mecánica matricial, en el que la formulación matemática se basaba en las frecuencias y amplitudes de las radiaciones absorbidas y emitidas por el átomo y en los niveles de energía del sistema atómico. El principio de incertidumbre desempeñó un importante papel en el desarrollo de la mecánica cuántica y en el progreso del pensamiento filosófico moderno. En 1932, Heisenberg fue galardonado con el Premio Nobel de Física. Entre sus numerosos escritos se encuentran *Die physikalischen Prinzipien der Quantentheorie* (Los principios físicos de la teoría cuántica, 1930), *Cosmic Radiation* (Radiación cósmica, 1946), *Physics and Philosophy* (Física y filosofía, 1958) e *Introduction to the Unified Theory of Elementary Particles* (Introducción a la teoría unificada de las partículas elementales, 1967).*

## **Principio de incertidumbre**

Heisenberg había presentado su propio modelo de átomo renunciando a todo intento de describir el átomo como un compuesto de partículas y ondas. Pensó que estaba condenado al fracaso cualquier intento de establecer analogías entre la estructura atómica y la estructura del mundo. Prefirió describir los niveles de energía u órbitas de electrones en términos numéricos puros, sin la menor traza de esquemas. Como quiera que usó un artificio matemático denominado “matriz” para manipular sus números, el sistema se denominó “mecánica de matriz”.

Heisenberg recibió el premio Nobel de Física en 1932 por sus aportaciones a la mecánica ondulatoria de Schrödinger, pues esta última pareció tan útil como las abstracciones de Heisenberg, y siempre es difícil, incluso para un físico, desistir de representar gráficamente las propias ideas.

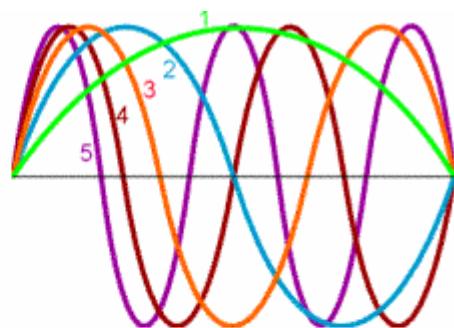
Una vez presentada la mecánica matriz (para dar otro salto atrás en el tiempo) Heisenberg pasó a considerar un segundo problema: cómo describir la posición de la partícula. ¿Cuál es el procedimiento indicado para determinar dónde está una partícula? La respuesta obvia es ésta: observarla. Pues bien, imaginemos un microscopio que pueda hacer visible un electrón. Si lo queremos ver debemos proyectar una luz o alguna especie de radiación apropiada sobre él. Pero un electrón es tan pequeño, que bastaría un solo fotón de luz para hacerle cambiar de posición apenas lo tocara. Y en el preciso instante de medir su posición, alteraríamos ésta.

Aquí nuestro artificio medidor es por lo menos tan grande como el objeto que medimos; y no existe ningún agente medidor más pequeño que el electrón. En consecuencia, nuestra medición debe surtir, sin duda, un efecto nada desdeñable, un efecto más bien decisivo en el objeto medido. Podríamos detener el electrón y determinar así su posición en un momento dado. Pero si lo hicieramos, no sabríamos cuál es su movimiento ni su velocidad. Por otra parte, podríamos gobernar su velocidad, pero entonces no podríamos fijar su posición en un momento dado.

Heisenberg demostró que no nos será posible idear un método para localizar la posición de la partícula subatómica mientras no estemos dispuestos a aceptar la incertidumbre absoluta respecto a su posición exacta. Es un imposible calcular ambos datos con exactitud al mismo tiempo.

$$\Delta x \geq \left( \frac{1}{2} \right) \frac{\lambda}{2\pi}$$

$$\lambda_{de Broglie} = \frac{h}{mv}$$



$$\Delta x \geq \left( \frac{1}{2} \right) \left( \frac{1}{2\pi} \right) \frac{h}{\Delta p}$$

$$\Delta x \Delta p \geq \left( \frac{1}{2} \right) \left( \frac{h}{2\pi} \right) \quad \hbar = \left( \frac{h}{2\pi} \right)$$

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2} \quad \left[ v = \frac{\Delta x}{\Delta t} \right]$$

Siendo así, no podrá haber una ausencia completa de energía ni en el cero absoluto siquiera. Si la energía alcanzara el punto cero y las partículas quedaran totalmente inmóviles, sólo sería necesario determinar su posición, puesto que la velocidad equivaldría a cero. Por tanto, sería de esperar que subsistiera alguna “energía residual del punto cero”, incluso en el cero absoluto, para mantener las partículas en movimiento y también, por así decirlo, nuestra incertidumbre. Esa

energía “punto cero” es lo que no se puede eliminar, lo que basta para mantener líquido el helio incluso en el cero absoluto.

En 1930, Einstein demostró que el principio de incertidumbre (donde se afirma la imposibilidad de reducir el error en la posición sin incrementar el error en el momento) implicaba también la imposibilidad de reducir el error en la medición de energía sin acrecentar la incertidumbre del tiempo durante el cual se toma la medida. Él creyó poder utilizar esta tesis como trampolín para refutar el principio de incertidumbre, pero Bohr procedió a demostrar que la refutación tentativa de Einstein era errónea.

A decir verdad, la versión de la incertidumbre, según Einstein, resultó ser muy útil, pues significó que en un proceso subatómico se podía violar durante breves lapsos la ley sobre conservación de energía siempre y cuando se hiciese volver todo al estado de conservación cuando concluyesen esos períodos: cuanto mayor sea la desviación de la conservación, tanto más breves serán los intervalos de tiempo tolerables. Yukawa aprovechó esta noción para elaborar su teoría de los piones. Incluso posibilitó la elucidación de ciertos fenómenos subatómicos presuponiendo que las partículas nacían de la nada como un reto a la energía de conservación, pero se extinguían antes del tiempo asignado a su detección, por lo cual eran sólo “partículas virtuales”. Hacia fines de la década 1940-1950, tres hombres elaboraron la teoría sobre esas partículas virtuales: fueron los físicos norteamericanos Julian Schwinger y Richard Phillips Feynman y el físico japonés Sin-Itiro Tomonaga. Para recompensar ese trabajo, se les concedió a los tres el premio Nobel de Física en 1965.

A partir de 1976 se han producido especulaciones acerca de que el Universo comenzó con una pequeña pero muy masiva partícula virtual que se expandió con extrema rapidez y que aún sigue existiendo. Según este punto de vista, el Universo se formó de la Nada y podemos preguntarnos acerca de la posibilidad de que haya un número infinito de Universos que se formen (y llegado el momento acaben) en un volumen infinito de Nada.

El “principio de incertidumbre” afectó profundamente al pensamiento de los físicos y los filósofos. Ejerció una influencia directa sobre la cuestión filosófica de “casualidad” (es decir, la relación de causa y efecto). Pero sus implicaciones para la ciencia no son las que se suponen por lo común. Se lee a menudo que el principio de incertidumbre anula toda certeza acerca de la naturaleza y muestra que, al fin y al cabo, la ciencia no sabe ni sabrá nunca hacia dónde se dirige, que el conocimiento científico está a merced de los caprichos imprevisibles de un Universo donde el efecto no sigue necesariamente a la causa. Tanto si esta interpretación es válida desde el ángulo

visual filosófico como si no, el principio de incertidumbre no ha conmovido la actitud del científico ante la investigación. Si, por ejemplo, no se puede predecir con certeza el comportamiento de las moléculas individuales en un gas, también es cierto que las moléculas suelen acatar ciertas leyes, y su conducta es previsible sobre una base estadística, tal como las compañías aseguradoras calculan con índices de mortalidad fiables, aunque sea imposible predecir cuándo morirá un individuo determinado.

Ciertamente, en muchas observaciones científicas, la incertidumbre es tan insignificante comparada con la escala correspondiente de medidas, que se la puede descartar para todos los propósitos prácticos. Uno puede determinar simultáneamente la posición y el movimiento de una estrella, o un planeta, o una bola de billar, e incluso un grano de arena con exactitud absolutamente satisfactoria.

Respecto a la incertidumbre entre las propias partículas subatómicas, cabe decir que no representa un obstáculo, sino una verdadera ayuda para los físicos. Se la ha empleado para esclarecer hechos sobre la radiactividad, sobre la absorción de partículas subatómicas por los núcleos, así como otros muchos acontecimientos subatómicos, con mucha más razonabilidad de lo que hubiera sido posible sin el principio de incertidumbre.

El principio de incertidumbre significa que el Universo es más complejo de lo que se suponía, pero no irracional.

### *Paul Dirac y la antimateria*

*(Bristol, Reino Unido, 1902-Tallahassee, EE UU, 1984)*

*Físico británico. Hijo de un profesor de francés de origen suizo, estudió en la escuela en que impartía clases su padre, donde pronto mostró particular facilidad para las matemáticas. Cursó estudios de ingeniería eléctrica en la Universidad de Bristol, interesándose especialmente por el asiduo empleo de aproximaciones matemáticas de que hace uso la ingeniería para la resolución de todo tipo de problemas. Sus razonamientos posteriores se basaron en el aserto de que una teoría que intente explicar leyes fundamentales del comportamiento de la naturaleza puede construirse sólidamente sobre la base de a aproximaciones sugeridas por la intuición, sin llegar a tener la certeza de cuáles son en realidad los hechos acontecidos, dado que éstos pueden llegar a ser de una complejidad tal que difícilmente pueden llegar a ser descritos con exactitud, por lo cual*



*el físico deberá contentarse con un conocimiento tan sólo aproximado de la realidad. Tras su graduación tuvo dificultades para encontrar trabajo, circunstancia ésta que le llevó a ejercer la docencia casi de forma casual en el St. John's College de Cambridge. Su superior en la mencionada escuela, R. H. Fowler, fue colaborador de Niels Bohr en su labor pionera dentro del campo de la física atómica, una afortunada coincidencia merced a la cual Dirac no tardó en ponerse al corriente de los avances experimentados en esta área de la física. Pronto, en 1926, realizó su mayor contribución a esta ciencia al enunciar las leyes que rigen el movimiento de las partículas atómicas, de forma independiente, y tan sólo unos meses más tarde de que lo hicieran otros científicos de renombre como Max Born o Pascual Jordan, aunque se distinguió de éstos por su mayor generalidad y simplicidad lógica en el razonamiento. Suya fue también la revolucionaria idea según la cual el comportamiento del electrón puede ser descrito mediante cuatro funciones de onda que simultáneamente satisfacen cuatro ecuaciones diferenciales. Se deduce de estas ecuaciones que el electrón debe rotar alrededor de su eje (espín electrónico), y también que se puede encontrar en estados energéticos de signo negativo, lo cual no parece corresponder con la realidad física. A este respecto, Dirac sugirió que la deficiencia energética de un electrón en ese estado sería equivalente a una partícula de vida corta y cargada positivamente; esta sugerencia fue corroborada posteriormente por C. D. Anderson merced al descubrimiento de las partículas denominadas positrones. Estas y otras geniales contribuciones, como la teoría cuántica de la radiación o la mecánica estadística de Fermi-Dirac, le valieron el Premio Nobel de Física del año 1933, compartido con Erwin Schrödinger, tras haber obtenido el año anterior la cátedra Lucasiana de matemáticas en Cambridge, que mantuvo hasta 1968. Acabó por trasladarse a Estados Unidos, donde fue nombrado en 1971 profesor emérito de la Universidad de Tallahassee.*

# *Relatividad*

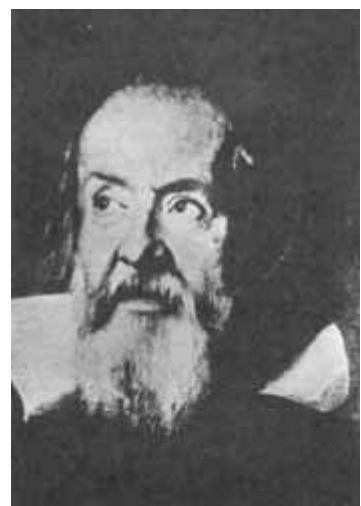
# *Relatividad de Galileo-Galilei*

## **Introducción**

Físico y astrónomo italiano que, junto con el astrónomo alemán Johannes Kepler, comenzó la revolución científica que culminó con la obra del físico inglés Isaac Newton. Su nombre completo era Galileo Galilei, y su principal contribución a la astronomía fue el uso del telescopio para la observación y descubrimiento de las manchas solares, valles y montañas lunares, los cuatro satélites mayores de Júpiter y las fases de Venus. En el campo de la física descubrió las leyes que rigen la caída de los cuerpos y el movimiento de los proyectiles. En la historia de la cultura, Galileo ha pasado a representar el símbolo de la lucha contra la autoridad y de la libertad en la investigación.

## **Vida y obra de Galileo-Galilei**

*Nació cerca de Pisa el 15 de febrero de 1564. Su padre, Vincenzo Galilei, ocupó un lugar destacado en la revolución musical que supuso el paso de la polifonía medieval a la modulación armónica. Del mismo modo que Vincenzo consideraba que las teorías rígidas impedían la evolución hacia nuevas formas de música, su hijo mayor veía la teología física de Aristóteles como un freno a la investigación científica. Galileo estudió con los monjes en Vallombroso y en 1581 entró en la Universidad de Pisa para estudiar medicina. Al poco tiempo cambió sus estudios de medicina por la filosofía y las matemáticas, abandonando la universidad en 1585 sin haber llegado a obtener el título. Durante un tiempo dio clases particulares y escribió sobre el movimiento hidrostático y natural, pero no llegó a publicar nada. En 1589 trabajó como profesor de matemáticas en Pisa, donde se dice que demostró ante sus alumnos el error de Aristóteles, que afirmaba que la velocidad de caída de los cuerpos era proporcional a su peso, dejando caer desde la Torre inclinada de esta ciudad dos objetos de pesos diferentes. En 1592 no le renovaron su contrato, posiblemente por oponerse a la filosofía aristotélica. Ese mismo año fue admitido en la cátedra de matemáticas de la Universidad de Padua, donde permaneció hasta 1610.*



*En Padua, Galileo inventó un 'compás' de cálculo que resolvía problemas prácticos de matemáticas. De la física especulativa pasó a dedicarse a las mediciones precisas, descubrió*

*las leyes de la caída de los cuerpos y de la trayectoria parabólica de los proyectiles, estudió el movimiento del péndulo e investigó la mecánica y la resistencia de los materiales. Apenas mostraba interés por la astronomía, aunque a partir de 1595 se inclinó por la teoría de Copérnico que sostenía que la Tierra giraba alrededor del Sol desechando el modelo de Aristóteles y Tolomeo en el que los planetas giraban alrededor de una Tierra estacionaria. Solamente la concepción de Copérnico apoyaba la teoría de las mareas de Galileo, que se basaba en el movimiento de la Tierra. En 1609 oyó decir que en los Países Bajos habían inventado un telescopio. En agosto de ese año presentó al duque de Venecia un telescopio de una potencia similar a los modernos prismáticos binoculares. Su contribución en las operaciones navales y marítimas le supuso duplicar sus ingresos y la concesión del cargo vitalicio como profesor.*

*En diciembre de 1609 Galileo había construido un telescopio de veinte aumentos, con el que descubrió montañas y cráteres en la Luna. También observó que la Vía Láctea estaba compuesta por estrellas y descubrió los cuatro satélites mayores de Júpiter. En marzo de 1610 publicó estos descubrimientos en *El mensajero de los astros*. Su fama le llevó a servir como matemático en la corte de Florencia, donde quedó libre de sus responsabilidades académicas y pudo dedicarse a investigar y escribir. En diciembre de 1610 pudo observar las fases de Venus, que contradecían a la astronomía de Tolomeo y confirmaban su aceptación de las teorías de Copérnico.*

*Los profesores de filosofía se burlaron de los descubrimientos de Galileo, dado que Aristóteles había afirmado que en el cielo sólo podía haber cuerpos perfectamente esféricos y que no era posible que apareciera nada nuevo. También discrepancia Galileo de los profesores de Florencia y Pisa sobre la hidrostática, y en 1612 publicó un libro sobre cuerpos en flotación. Como respuesta, inmediatamente aparecieron cuatro publicaciones que atacaban a Galileo y rechazaban su física. En 1613 escribió un tratado sobre las manchas solares y anticipó la supremacía de la teoría de Copérnico. En su ausencia, un profesor de Pisa les dijo a la familia de los Médicis (que gobernaban Florencia y mantenían a Galileo) que la creencia de que la Tierra se movía constituía una herejía. En 1614, un cura florentino denunció desde el púlpito a Galileo y a sus seguidores. Éste escribió entonces una extensa carta abierta sobre la irrelevancia de los pasajes bíblicos en los razonamientos científicos, sosteniendo que la interpretación de la Biblia debería ir adaptándose a los nuevos conocimientos y que ninguna posición científica debería convertirse en artículo de fe de la Iglesia católica.*

*A principios de 1616, los libros de Copérnico fueron censurados por un edicto, y el cardenal jesuita Roberto Belarmino dio instrucciones a Galileo para que no defendiera el concepto de que la Tierra se movía. El cardenal Belarmino le había avisado previamente de que sólo tuviera en cuenta sus ideas como hipótesis de trabajo e investigación, sin tomar*

*literalmente los conceptos de Copérnico como verdades y sin tratar de aproximarlos a lo escrito en la Biblia. Galileo guardó silencio sobre el tema durante algunos años y se dedicó a investigar un método para determinar la latitud y longitud en el mar basándose en sus predicciones sobre las posiciones de los satélites de Júpiter, así como a resumir sus primeros trabajos sobre la caída de los cuerpos y a exponer sus puntos de vista sobre el razonamiento científico en una obra sobre los cometas, El ensayador (1623).*

*En 1624 Galileo empezó a escribir un libro que quiso titular Diálogo sobre las mareas, en el que abordaba las hipótesis de Tolomeo y Copérnico respecto a este fenómeno. En 1630 el libro obtuvo la licencia de los censores de la Iglesia católica de Roma, pero le cambiaron el título por Diálogo sobre los sistemas máximos, publicado en Florencia en 1632. A pesar de haber obtenido dos licencias oficiales, Galileo fue llamado a Roma por la Inquisición a fin de procesarle bajo la acusación de "sospecha grave de herejía". Este cargo se basaba en un informe según el cual se le había prohibido en 1616 hablar o escribir sobre el sistema de Copérnico. El cardenal Belarmino había muerto, pero Galileo facilitó un certificado con la firma del cardenal, según el cual no sufriría en el futuro ninguna otra restricción que no fueran las que para todo católico romano contenía un edicto de 1616. Este escrito no pudo ser rebatido por ningún documento, pero Galileo fue obligado a abjurar en 1633 y se le condenó a prisión perpetua (condena que le fue commutada por arresto domiciliario). En el momento en que Galileo tuvo que retractarse y negar todo su trabajo científico, dijo la célebre frase “... y sin embargo se mueve”, refiriéndose al movimiento de la Tierra.*

*Los ejemplares del Diálogo fueron quemados y la sentencia fue leída públicamente en todas las universidades.*

*La última obra de Galileo, Consideraciones y demostraciones matemáticas sobre dos ciencias nuevas, publicada en Leiden en 1638, revisa y afina sus primeros estudios sobre el movimiento y los principios de la mecánica en general. Este libro abrió el camino que llevó a Newton a formular la ley de la gravitación universal, que armonizó las leyes de Kepler sobre los planetas con las matemáticas y la física de Galileo. Antes de la publicación de esta obra, Galileo se quedó ciego, por observar con su telescopio directamente al Sol, y murió el 8 de enero de 1642 en Arcetri, cerca de Florencia.*

*La contribución más famosa de Galileo a la ciencia fueron sus descubrimientos de la física de las mediciones precisas, más que los principios metafísicos y la lógica formal. Sin embargo tuvieron más influencia sus libros El mensajero de los astros y el Diálogo, que abrieron nuevos campos en la astronomía. Más allá de la ciencia, ha quedado el papel de Galileo como defensor de la investigación científica sin interferencias filosóficas y teológicas. Desde la publicación de la documentación completa del juicio contra Galileo en 1870, toda la*

*responsabilidad de la condena a Galileo ha recaído tradicionalmente sobre la Iglesia católica de Roma, encubriendo la responsabilidad de los profesores de filosofía que persuadieron a los teólogos de que los descubrimientos de Galileo eran heréticos. Juan Pablo II abrió en 1979 una investigación sobre la condena eclesiástica del astrónomo para su posible revisión. En octubre de 1992, una comisión papal tuvo que reconocer el error del Vaticano.*

---

### *Contribuciones más importantes a la Ciencia:*

Cabe destacar 3 grandes contribuciones que Galileo realizó a la ciencia, especialmente a la física y a la astronomía.

**1-** A lo largo de su vida Galileo plantó cara a la Iglesia, junto con su íntimo amigo el astrónomo y físico alemán Johannes Kepler, basándose siempre en las matemáticas y en las observaciones, y rompió con las teorías clásicas de la Biblia y de Aristóteles, dando así inicio a la denominada revolución científica y dejando camino libre a las nuevas generaciones de científicos. A continuación se puede leer una carta que Galileo mandó, con su carácter punzante, a Sarsi uno de sus enemigos:

*En Sarsi disciendo la creencia de que en el discurso filosófico se debe defender la opinión de un autor célebre, como si nuestras mentes tuvieran que mantenerse estériles y yermas si no están en consonancia con alguien más. Tal vez piense que la filosofía es un libro de ficción escrito por algún autor, como la Ilíada. Bien, Sarsi, las cosas no son así. La Filosofía está escrita en ese gran libro del universo, que se está continuamente abierto ante nosotros para que lo observemos. Pero el libro no puede comprenderse sin que antes aprendamos el lenguaje y alfabeto en que está compuesto. Está escrito en el lenguaje de las matemáticas y sus caracteres son triángulos, círculos y otras figuras geométricas, sin las cuales es humanamente imposible entender una sola de sus palabras. Sin ese lenguaje, navegamos en un oscuro laberinto.*

**2-** Gracias a la ayuda del telescopio cambio la forma de percibir el Universo y basándose en las observaciones realizadas con este aparato pudo confirmar la teoría heliocéntrica de Copérnico. Además aportó nuevos datos a favor de esta teoría y fueron los siguientes:

a) Las fases de Venus, unidas a su variación de tamaño, son sólo compatibles con el hecho de que, gire alrededor del Sol, ya que presenta su menor tamaño cuando se encuentra en fase llena y en mayor, cuando se encuentra en la nueva; es decir, cuando está entre el Sol y la Tierra, este hecho es similar a la rotación lunar alrededor de la Tierra.

b) La existencia de los satélites de Júpiter mostraba que la Tierra no era el centro del Universo sobre la cuál, el resto de los astros orbitan.

**3-** La tercera gran contribución llevada a cabo por Galileo, fue el estudio de los movimientos y la creación de la primera **teoría de la relatividad**, en la cuál, posteriormente Einstein se basará para desarrollar su teoría relativista.

A continuación se hablará de la teoría de la relatividad de Galileo, se desarrollará matemáticamente, y se citarán los efectos que ésta produce.

### ***Teoría de la Relatividad de Galileo***

#### ***Todos los Sistemas de Referencia son válidos***

La Tierra se mueve en el espacio como un grano de polvo en un vendaval: gira alrededor del Sol a 30 kilómetros por segundo, y este astro se mueve a su vez a 30 000 kilómetros por segundo alrededor del centro de la Vía Láctea, que es sólo una galaxia entre los millones de galaxias que efectúan un baile cósmico enlazadas por sus mutuas atracciones gravitacionales. Y, sin embargo, no percibimos ninguno de estos movimientos; la Tierra parece ser lo único firme e inmutable a nuestro alrededor. La distancia entre dos puntos fijos de la Tierra o la altura de otro con respecto a la superficie son tipos de medición bien definidos, que pueden repetirse tantas veces cuanto sea necesario, sin incertidumbre, pues la Tierra es un excelente *sistema de referencia*.

La inmovilidad y la inmutabilidad de nuestro planeta eran evidentes a los hombres de la Antigüedad, y sólo recientemente hemos podido aceptar que se mueve en el espacio. El hecho de que el movimiento de la Tierra sea prácticamente imperceptible en la experiencia cotidiana se debe

a un principio fundamental que Galileo Galilei enunció claramente en el siglo XVII: las leyes de la física son independientes de cualquier sistema de referencia.

La Tierra constituye el ejemplo más obvio de lo que es un sistema de referencia con respecto al cual se efectúan la mayoría de las mediciones. Podemos estudiar, por ejemplo, el movimiento de una piedra que se deja caer desde lo alto de un poste: la experiencia demuestra que la piedra cae exactamente a lo largo de una línea recta vertical (si no soplan vientos fuertes que la desvíen). Del mismo modo, si la piedra es arrojada con una cierta velocidad horizontal, la piedra cae siguiendo una trayectoria curva y llega al suelo a cierta distancia del pie del poste (Figura 1). Se puede demostrar que la trayectoria es una curva geométrica llamada *parábola*, y la distancia entre el pie del poste y el punto de caída es simplemente la velocidad inicial de la piedra multiplicada por el tiempo que dura la caída. De hecho, esto sería exactamente lo que sucedería si el experimento se realizara en un lugar sin aire (en una campana de vacío o en la Luna; por ejemplo); en la práctica, la fricción del aire con la piedra influye ligeramente en su movimiento.

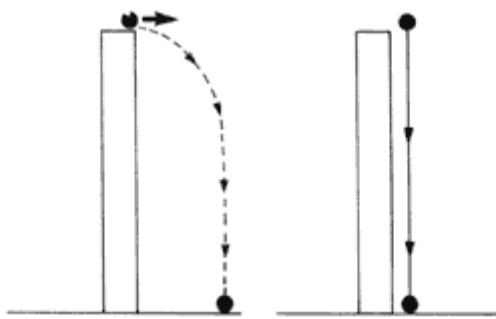


Figura 1. Trayectoria de una piedra.

Pero la Tierra no es el único sistema de referencia disponible. ¿Qué pasa si se repite el experimento de la piedra que cae en un barco en movimiento? Supongamos que la piedra se suelta desde lo alto de un mástil. ¿Caerá la piedra justo al pie del mástil o quedará rezagada debido al movimiento del barco? Esto era un problema filosófico que, en la época de Galileo, se trataba de resolver estudiando los escritos de Aristóteles y otros pensadores de la Antigüedad. No sabemos si Galileo realizó el experimento en un barco o en el laboratorio de su casa, pero podemos afirmar que él comprendió por primera vez las profundas implicaciones de ese problema.

En el ejemplo del barco, la piedra caería justo al pie del mástil si no fuera por el aire que la empuja hacia atrás. Para evitar complicaciones innecesarias, se puede realizar el experimento en el interior del barco, donde el aire está en reposo. En este caso; la caída de la piedra ocurre exactamente como si el barco no se moviera. Un experimentador que se encuentra dentro de un barco que avanza en línea recta y a una velocidad constante no puede decidir, por ningún experimento físico, si el barco se mueve. Tendría que asomarse por una escotilla para saberlo. (Es

muy importante que el barco se mueva en línea recta y no varíe su velocidad; si éste no es el caso, el experimentador podrá adivinar que se mueve e incluso sentirse mareado por el movimiento; volveremos a este punto más adelante.)

La trayectoria de la piedra, vista en el sistema de referencia que es el barco, es una línea recta vertical. En cambio, en el sistema de referencia de la tierra firme, la trayectoria es una parábola. Estas dos descripciones de un mismo fenómeno físico son perfectamente compatibles entre sí: un observador en tierra firme ve una piedra que se arroja con una velocidad horizontal que es precisamente la velocidad del barco y ve la piedra caer siempre pegada al mástil, que se mueve con la misma velocidad; un observador en el barco ve simplemente una caída vertical (Figura 2). Tanto el barco como la tierra firme son sistemas de referencia aceptables, y es sólo una cuestión de conveniencia escoger el más apropiado.

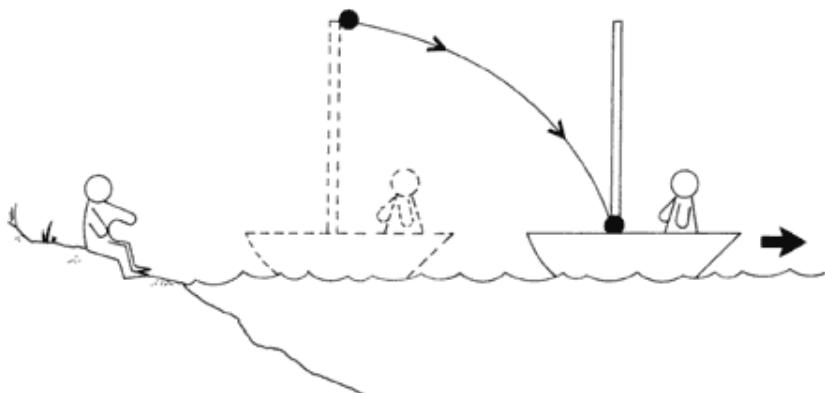


Figura 2. Trayectoria de una piedra vista desde dos sistemas de referencia.

Hasta ahora hemos insistido en que el movimiento del barco (o cualquier sistema de referencia) debe ser sin cambios de velocidad y en línea recta. Sin embargo, sabemos por experiencia que la marcha de un vehículo se nota cuando su velocidad varía; en un automóvil que toma una curva hacia la derecha, los pasajeros son empujados hacia la izquierda, al enfrenarse son arrojados hacia adelante y al acelerarse hacia atrás. Este tipo de fuerzas se debe a la inercia de los cuerpos masivos; todo objeto tiende a moverse en línea recta, con la misma velocidad, y opone resistencia a cualquier cambio de velocidad o trayectoria. Los pasajeros de un autobús que frena bruscamente son arrojados hacia el frente del vehículo porque intentan mantener la velocidad que poseían antes del frenazo: en otras palabras, es el autobús el que se ha detenido mientras que sus ocupantes prosiguen su viaje.

Las fuerzas que surgen en un sistema de referencia únicamente por el cambio de velocidad o de trayectoria, y no por factores externos, se deben a la inercia de los cuerpos masivos; por esta razón, se les llama *fuerzas iniciales*. Un sistema de referencia *inercial* es aquel que se mueve en

línea recta sin variar su velocidad; evidentemente en tal sistema de referencia no surgen fuerzas iniciales. De acuerdo con el *Principio de Relatividad de Galileo*, las leyes de la física son las mismas en cualquier sistema de referencia *inercial*. En particular, no se puede distinguir un sistema de referencia inercial de otro por medio de experimentos físicos; cualquier sistema es válido y sólo es una cuestión de conveniencia escoger el más apropiado para describir un fenómeno físico. Mientras un autobús se mueve en línea recta y sin variar su velocidad, la única manera que tienen sus ocupantes de saber si avanzan o no es asomarse por la ventana. (El caso de los sistemas de referencia no iniciales es más complicado; volveremos a ellos en el capítulo VII.)

La relatividad de los sistemas iniciales choca en un principio con el sentido común. Si no hay manera de determinar el movimiento, los ocupantes de un autobús pueden postular que ellos están parados y que es la Tierra la que se mueve. En realidad, nada impide tal afirmación, a no ser que, en la práctica, cualquier frenazo, curva o bache en el pavimento recuerde a los pasajeros que su sistema de referencia no es idealmente inercial. Sin embargo, es innegable que nos sentimos más seguros sabiendo que la Tierra que pisamos es un sistema de referencia sólido, con respecto al cual podemos efectuar mediciones inequívocamente. Después de todo, tomó muchísimo trabajo a los seguidores de Copérnico convencer al resto de la humanidad de que la Tierra se mueve a gran velocidad por el espacio cósmico.

Si nunca se detecta el movimiento de la Tierra en la experiencia cotidiana, es justamente por el *Principio de Relatividad de Galileo*. Recordemos, sin embargo, que la Tierra no es un sistema de referencia adecuado para observar el curso de los astros. En efecto, los planetas giran alrededor del Sol, por lo que sus movimientos tienen una forma más simple, vistos desde un sistema de referencia en el que el Sol está fijo. Vistos desde la Tierra, los planetas parecen moverse de manera tan complicada que desafiaron durante siglos los intentos de los astrónomos antiguos de racionalizarla. Y no olvidemos que el Sol gira alrededor del centro de nuestra galaxia, la Vía Láctea, y así sucesivamente...

(Debido a su rotación, la Tierra ejerce una ligera fuerza inercial sobre los cuerpos en su superficie empujándolos en dirección perpendicular a su eje de rotación; este efecto es casi imperceptible, pero se puede medir con instrumentos suficientemente precisos.)

El hecho de que un cuerpo masivo tiende a moverse en línea recta y a la misma velocidad, si ninguna fuerza actúa sobre él, es una ley fundamental de la mecánica, descubierta por el gran físico inglés Isaac Newton y llamada, en su honor, primera ley de Newton. A pesar de su sencillez, nadie la había descubierto porque, una vez más, parecía contradecir la experiencia común. Así, Aristóteles

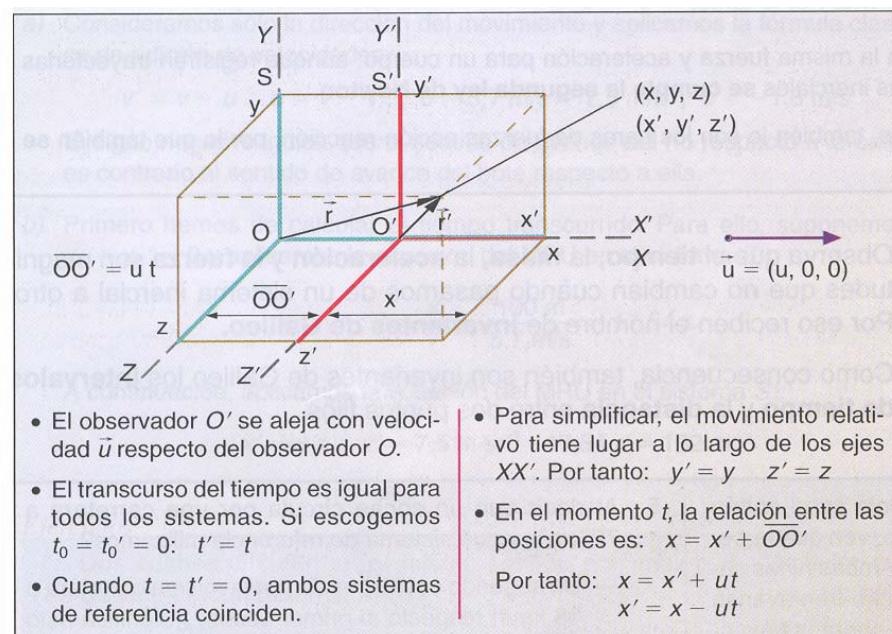
enseñaba que un cuerpo se mantiene en reposo si no actúan fuerzas sobre él, y se mueve con la misma velocidad si se le empuja con una fuerza constante. En efecto, una carreta de bueyes avanza a la misma velocidad mientras los bueyes la jalan y al dejar de hacerlo la carreta se detiene. Sin embargo, esto se debe a la fricción de las ruedas con sus ejes; si éstas estuvieran lubricadas en forma perfecta, la carreta rodaría con cualquier empujón inicial.

La situación ideal en la que se aplica la primera ley de Newton es la de una nave espacial que se mueve en el espacio, suficientemente lejos de cualquier planeta o estrella para que éstos no desvíen su trayectoria. Si la nave alcanza una cierta velocidad y apaga bruscamente sus motores, seguirá viajando indefinidamente en línea recta con la misma velocidad que había alcanzado. Para modificar su trayectoria, deberá volver a encender sus motores.

Una nave espacial a la deriva es un ejemplo perfecto de un sistema de referencia inercial. Sus tripulantes no tienen ningún medio para determinar si se mueven o si están en reposo, a menos que puedan observar las estrellas en el exterior.

### *Desarrollo matemático*

Las ecuaciones de transformación de Galileo permiten a un observador  $O'$ , (sistema de referencia inercial  $S'$ ) interpretar la información que le llega procedente de un observador  $O$  (sistema de referencia inercial  $S$ ), y viceversa. Consideraremos que  $S'$  se aleja con velocidad  $\mathbf{u}$  de  $S$ .



Así las **transformaciones de Galileo** son:

$$x' = x - ut ; \quad y' = y ; \quad z' = z ; \quad t' = t$$

Y se resumen en la ecuación vectorial:

$$\vec{r}'(t') = \vec{r}(t) - \vec{u}t, \text{ donde } t' = t.$$

Se ha hallado la relación entre las posiciones de un móvil en dos sistemas de referencia inerciales. Hay que ver ahora la relación existente entre las velocidades.

Para ello se derivará la ecuación vectorial de las transformaciones de Galileo. Se tendrá en cuenta que el tiempo es el mismo para ambos observadores ( $t = t'$ ) y que el vector  $\vec{u}$  es constante:

$$\begin{aligned} \vec{r}' &= \vec{r} - \vec{u}t \\ \frac{d\vec{r}'}{dt'} &= \frac{d\vec{r}'}{dt} = \frac{d\vec{r}}{dt} - \frac{d(\vec{u}t)}{dt} \\ \vec{v}' &= \vec{v} - \vec{u} \end{aligned}$$

Esta ecuación vectorial recibe el nombre de **fórmula clásica de adición de velocidades**

Se deriva la fórmula clásica de adición de velocidades con respecto al tiempo para hallar la relación existente entre las aceleraciones en los dos sistemas de referencia:

$$\begin{aligned} \vec{v}' &= \vec{v} - \vec{u} \\ \frac{d\vec{v}'}{dt'} &= \frac{d\vec{v}'}{dt} = \frac{d\vec{v}}{dt} - \frac{d\vec{u}}{dt} = \frac{d\vec{v}}{dt} - 0 \\ \vec{a}' &= \vec{a} \end{aligned}$$

Como consecuencia, se obtiene que la **aceleración** de un cuerpo tiene el mismo valor en todos los sistemas inerciales.

Por último, como la aceleración y la masa no varían al pasar de un sistema de referencia inercial a otro, es fácil deducir que la **fuerza** medida en los dos sistemas de referencia tampoco varía.

Como  $\vec{a}' = \vec{a}$  y  $m' = m$ , entonces  $m'\vec{a}' = m\vec{a}$ .

Por lo tanto:  $\vec{F}' = \vec{F}$

Todos los observadores inerciales miden la misma fuerza y aceleración para un cuerpo, aunque registren trayectorias diferentes, es decir, en todos los sistemas de referencia inerciales se cumplirán la **segunda ley de Newton**.

Y, dado que todas las fuerzas son iguales, también lo serán los pares de fuerzas de acción-reacción, por lo tanto este tipo de sistemas también cumplirán la **tercera ley de Newton**.

En definitiva lo que la relatividad de Galileo viene a decir, es que los principios de la mecánica de los cuerpos, en diferentes sistemas de referencia inerciales, son los mismos.

**Nota:** se debe observar que el **tiempo**, la **masa**, la **aceleración** y la **fuerza** son magnitudes que no cambian cuando pasamos de un sistema de referencia inercial a otro si nos basamos en la relatividad de Galileo.

Por eso estas magnitudes reciben el nombre de **invariantes de Galileo**.

Como consecuencia, también serán invariantes de Galileo los **intervalos de tiempo** y la **distancia** entre dos puntos fijos.

Estas magnitudes dejarán de ser invariantes en la teoría de la relatividad de Einstein.

# *Revolución de Isaac Newton*

## **Pequeña biografía de una gran Vida**

Nacido el  
25 de diciembre de 1642,  
en  
Woolsthorpe, Lincolnshire, Inglaterra.  
Fallecido el  
20 de marzo de 1727,  
en  
Cambridge, Cambridgeshire, Inglaterra.

*Isaac Newton, es el más grande astrónomo inglés, que destacó también como matemático y físico. Fue en realidad un genio al cual debemos el descubrimiento de la Ley de la Gravitación Universal, que es una de las piedras angulares de la ciencia moderna. Fue uno de los inventores del cálculo diferencial e integral. Estableció las leyes de la mecánica clásica, y partiendo de la Ley de la Gravitación Universal dedujo las leyes de Kepler en forma más general. Logró construir el primer telescopio de reflexión. También son importantes sus contribuciones al estudio de la luz. Sus obras más importantes publicadas son la **Optica**, en la que explica sus teorías sobre la luz, y la obra monumental **Philosophiae Naturalis Principia Mathematica**, comúnmente conocida como **Principia**, en la cual expone los fundamentos matemáticos del universo.*



*Nació huérfano, ya que su padre había muerto unos meses antes a su nacimiento. Y vivió en una granja que su madre intentó sacar a flote desde el primer momento. Por otra parte, los primeros años de su vida estuvieron marcados por una guerra civil que devastaría gran parte de su país.*

*La juventud de Newton no estuvo muy cercana a la ciencia, ya que al casarse su madre de nuevo cuando él tenía 3 años, lo mandó con sus abuelos, estudiando en las escuelas de pueblos cercanos. Y posteriormente, con 12 años, lo inscribieron en la escuela primaria de Grantham, en la que estudió latín y la Biblia. El joven Newton vivía en la casa de un tal William Clarke, el farmacéutico de la ciudad, que tenía una de las mejores bibliotecas del lugar y una hermosa hijastra, con la que más tarde Newton tuvo un romance adolescente, el*

*primero y último de su vida. Se llevaba mal con los demás muchachos de la escuela, que al parecer lo encontraban extraño y demasiado listo.*

*Durante sus años en Grantham, su mente no paró de asombrar a sus compañeros y la gente de su ciudad, ya que inventó numerosos útiles (como una linterna plegable de papel, para alumbrar el camino a la escuela en las mañanas oscuras). Además, gracias a la fascinación que experimentaba por los relojes de sol, aprendió a calcular la hora, el día, el mes, los equinoccios, acontecimientos celestes...*

*Años más tarde, ingresó en la Universidad de Cambridge. Ésta época la vivió con austeridad y humildad, algo que no estaba muy de moda en su época entre los estudiantes asiduos a las cervecerías y los cafés, por lo que, junto con su abrumadora inteligencia, no gozó de demasiadas amistades.*

*Cuando se preparaba para hacer el postgrado, Inglaterra fue atacada por la peste bubónica, y tuvo que refugiarse en Lincolnshire, lugar en el que desarrolló las bases de su brillante carrera como científico, visitando de vez en cuando la biblioteca de Cambridge para la consulta de libros. Se enfrentó a numerosos problemas matemáticos, sentó las bases del Cálculo, construyó la primera versión de un nuevo instrumento astronómico: el telescopio de reflexión... Y entre otras muchas cosas más, efectuó el trabajo fundamental de lo que sería la Teoría de la Gravitación.*

*El relato popular, imposible de confirmar, cuenta cómo en el verano de 1666 le cayó a Newton en la cabeza una manzana de un árbol, y es así como empezó a dilucidar esta gran teoría. Lo que sí es cierto, es que fue durante este periodo cuando empezó a pensar en la teoría de la gravitación.*

*Su gran tratado Principios Matemáticos de Filosofía Natural, publicado en 1687 presenta los estudios de Newton durante más de veinte años en relación a la mecánica terrestre y celeste. Allí enuncia la ley de gravitación: dos cuerpos se atraen con una fuerza directamente proporcional a sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa. Además, presenta en su gran libro los tres principios de la mecánica:*

1. *Todo cuerpo permanece en reposo o continúa su movimiento en línea recta con velocidad constante si no está sometido a una fuerza exterior.*
2. *El cambio de movimiento de un cuerpo es proporcional a la fuerza exterior, inversamente proporcional a la masa del cuerpo, y tiene lugar en la dirección de la fuerza.*
3. *A toda acción se opone una reacción, igual y de sentido contrario.*

*Las leyes de Kepler del movimiento planetario se refieren al conjunto, son integrales. La ley de Newton de la gravitación universal, por el contrario es diferencial, permite deducir el estado que tendrá un sistema a partir del que tenía un instante anterior; por definición satisface la causalidad. Antes de Newton no había ningún sistema de causalidad física. Con Newton el peso de un cuerpo sobre la superficie terrestre se identifica con la fuerza de atracción entre los dos astros, el movimiento de los proyectiles con el curso de los satélites; las mareas se explican por la atracción luni-solar; se calculan las perturbaciones entre los planetas; se calculan las órbitas de los cometas; se predice el achatamiento del globo terrestre; se explica la precesión de los equinoccios por la atracción del Sol sobre el abultamiento ecuatorial terrestre. Después de Newton los grandes matemáticos pudieron extender los dominios de la razón a todos los rincones del sistema solar. La importancia filosófica de la obra de Newton es extraordinaria; la forma en que el ser humano enfrentó la naturaleza el siglo XVIII y XIX es una consecuencia de los descubrimientos del gran sabio inglés.*

*Los méritos de Newton no se reducen al campo de la mecánica y las matemáticas; también la óptica supo de su talento. Descubrió que la luz blanca puede ser descompuesta en todos los colores del arco iris al hacerla pasar por un prisma, iniciando con ello el análisis espectral, base de la astrofísica contemporánea. Además Newton construyó un telescopio reflector. Sus estudios sobre la luz lo llevaron a publicar en 1704 su Tratado sobre óptica, donde además detalla su teoría corpuscular para la naturaleza de la luz. Los últimos años de su vida los destinó a profundas meditaciones teológicas, alejado casi totalmente de aquellos quehaceres intelectuales para los cuales no tuvo rival.*

## ***La base de la Mecánica: las Leyes de Newton***

La obra de Newton sobre la gravitación, sería un sueño sin las leyes en la que se sustenta, que son capaces de explicar la razón del movimiento de los cuerpos. Es decir, nace la Dinámica.

### ***1<sup>a</sup> Ley del movimiento (de inercia):***

“Cada cuerpo persevera en su estado de reposo, o de movimiento uniforme en una línea recta, a menos que sea compelido a cambiar este estado por una fuerza ejercida sobre él”.

Los proyectiles perseveran en sus movimientos, mientras no sean retardados por la resistencia del aire, o impelidos hacia abajo por la fuerza de gravedad. Un trompo, cuyas partes por su cohesión están perpetuamente alejadas de movimientos rectilíneos, no cesa en su rotación salvo que sea retardado por el aire. Los grandes cuerpos de los planetas y cometas, encontrándose con menos resistencia en espacios más libres, preservan sus movimientos, tanto progresivos como circulares, por un tiempo mucho más largo.

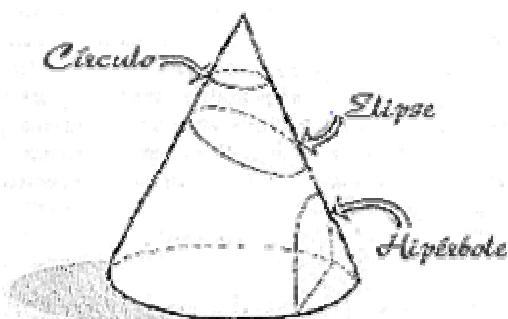
## *2<sup>a</sup> Ley del movimiento (fundamental):*

“El cambio de movimiento es siempre proporcional a la fuerza motriz que se imprime; y se efectúa en la dirección de la línea recta según la cual actúa la fuerza”.

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a} \rightarrow \vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$$

Newton establece el concepto de “masa inerte” como una constante que relaciona la aceleración que experimenta un cuerpo con la fuerza que la provoca. Esta masa es una constante propia de cada cuerpo, que no depende del movimiento de tal cuerpo, sino sólo de la “cantidad de materia”. De esta forma, por ejemplo, un sólido tendrá una aceleración doble cuando la fuerza sea doble.

Gracias a esta formulación analítica de la Segunda Ley, se pueden responder muchos interrogantes a cerca del movimiento de los objetos, como pueden ser: ¿qué ángulo le debe dar un futbolista a un balón para que llegue lo más lejos posible?, ¿Qué órbitas son posibles para los planetas y cometas que son atraídos por el Sol?...

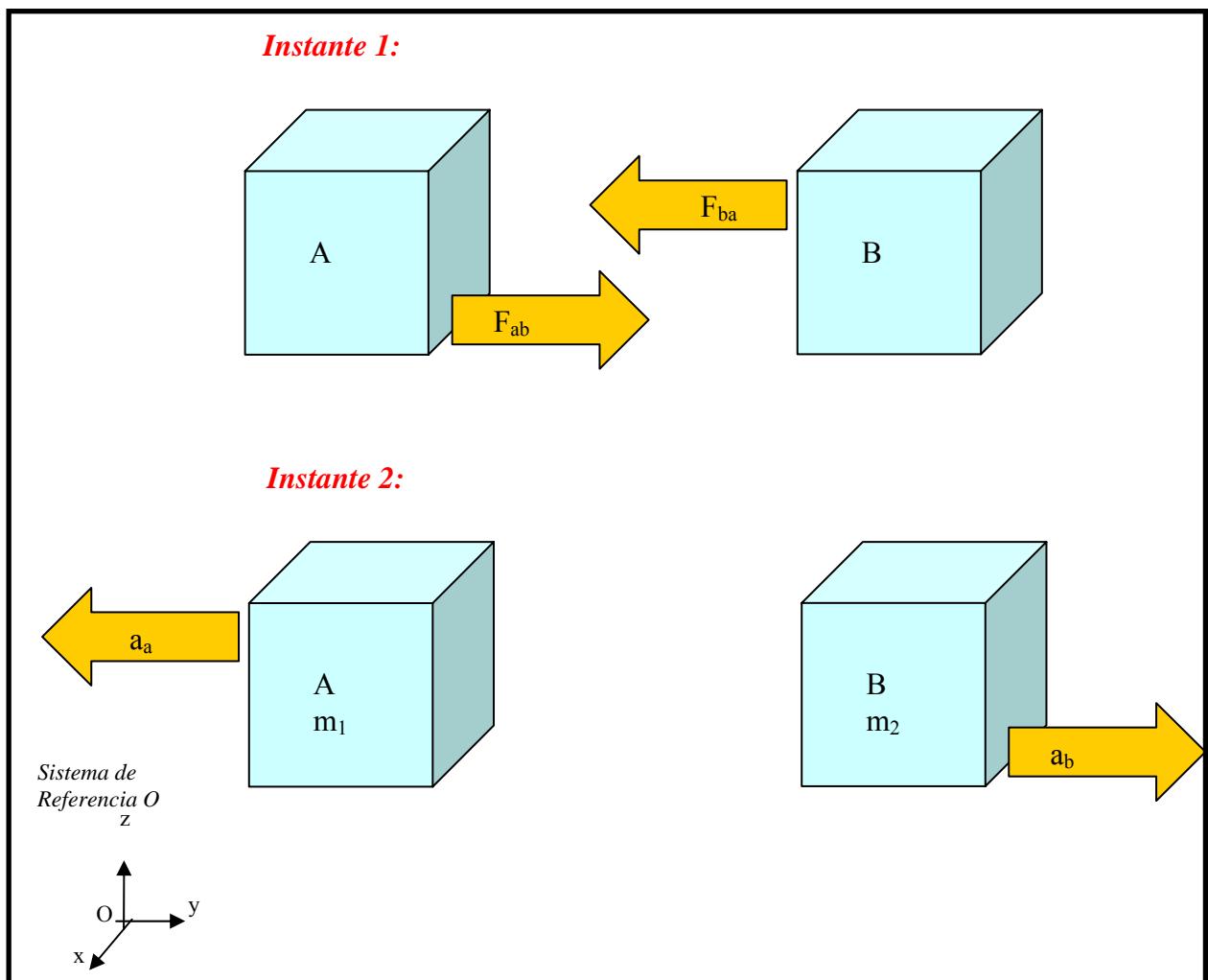


En el dibujo superior se pueden observar las secciones cónicas, que coinciden con las diferentes órbitas que puede describir un objeto alrededor de otro en un sistema de cuerpos. Por ejemplo, la velocidad que debe alcanzar un cohete para escapar de la atracción terrestre es del orden de unos 11000 Km/s. Si la sobrepasa, describirá una órbita parabólica o hiperbólica; si no, una línea cónica cerrada.

Y todas estas preguntas y deducciones se pueden hacer a partir de la 2º Ley de Newton...

### *3ª Ley del movimiento (de acción-reacción):*

“A cada acción se opone siempre una reacción igual; o dicho de otra forma, las acciones mutuas de dos cuerpos uno sobre el otro, son siempre iguales y de sentido contrario”.



Según la 3<sup>a</sup> Ley de Newton, se tiene lo siguiente:

Como la relación es:

$$\vec{F}_{ab} = -\vec{F}_{ba}$$

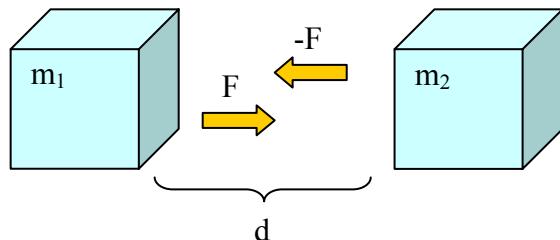
Las aceleraciones serán de igual módulo y sentido opuesto, a lo largo del eje OY:

$$\vec{a}_a = -\vec{a}_b$$

## Ley de Gravitación Universal

La gravedad está definida por la ley de gravitación universal:

“Dos cuerpos se atraen con una fuerza ( $F$ ) directamente proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa”.



$$F \approx \frac{m_1 \cdot m_2}{d^2}$$

La constante que relaciona estos dos factores es la llamada Constante de Gravitación Universal:

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N.m}^2 \cdot \text{Kg}^{-2},$$

Fue descubierta en el siglo XVIII por el científico Henry Cavendish (1731-1810), con un experimento muy delicado; aunque se piensa que Galileo pudo también descubrir este valor, lanzando dos pelotas de diferentes masas desde la Torre de Pisa, las cuales cayeron con una aceleración constante.

La expresión de la Ley de Gravitación Universal queda finalmente como:

$$F = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{d^2}$$

Uno de los primeros ejemplos de divulgación científica tiene que ver con la Teoría de Newton y con las mareas. Aplicó sus cálculos para justificar la subida y bajada periódica del mar, que era causada por la atracción del satélite terrestre: la Luna. Pudo llegar a precisar que el periodo lunar era de 29,3 días, que ajustándolo con ciertos factores llegaba al tiempo real de 27,3 días; de esta forma, comprobó que la Ley actuaba con rigor.

### *Debilidades de la Teoría*

Los principios fundamentales de Newton son tan lógicos que se pueden ajustar perfectamente a los hechos empíricos. Pero la realidad es que tiene muchas interrogantes a su alrededor, una serie de cuestiones que impiden que pueda explicar con total exactitud y veracidad los fenómenos que describe. De esta forma, Newton reconoció que "explicar toda la naturaleza es una tarea demasiado difícil para un hombre o incluso para una época", ya que era muy consciente de las dificultades que generaba su teoría, incluso más que otros muchos científicos que le siguieron...

### **Espacio y Tiempo Absolutos**

En sus trabajos, Newton intentó acompañar todas sus afirmaciones y logros con hecho empíricos. Pero se dio cuenta de que la geometría observada (distancias entre puntos) y su variación en el tiempo no caracterizaban del todo el movimiento predicho. Así, introdujo dos conceptos no referidos directamente a hechos empíricos, por los cuales se le criticó a menudo: el espacio y el tiempo absolutos. Él dedujo que debía existir un sistema de referencia inamovible, respecto al cual poder medir todas las distancias con total precisión, y un tiempo absoluto y constante, por medio del cual medir el movimiento de los cuerpos.

El problema consecuente de su primera Ley, la Ley de Inercia propuesta por Galileo anteriormente, era algo que le atormentaba. Los cuerpos que no estaban sometidos a fuerzas externas, permanecían en su estado, ya fuera de reposo o de velocidad constante. Pero ello dependía

del observador. Si un pasajero en un barco, de noche, ve unas luces que se mueven, puede ser que sea otro barco el que se mueva cerca, puede ser que sea su barco el que se mueva, o puede ser que se muevan los dos barcos a la vez. Es por esto que es imposible determinar si el estado de un cuerpo es el reposo o se mueve con velocidad constante. Por esto introdujo el concepto abstracto de "espacio absoluto", que permanece siempre "igual e inamovible", respecto del cual si un cuerpo no tiene movimiento, está en reposo.

### **Gravedad instantánea**

Newton trabajó sobre la suposición de que la gravedad actúa instantáneamente a través del espacio. Esto no le satisfacía, peor no encontró ninguna otra alternativa. En cualquier caso, no parecía tener trascendencia práctica para sus cálculos. La velocidad de la acción de la gravitación, en cambio, resultaba de importancia crítica cuando se consideraba el universo como un conjunto. Newton planteaba que el universo era infinito. De otro modo, argumentaba, tendría un borde y, en consecuencia, un centro gravitatorio como cualquier otro objeto finito. La atracción entre sus partes haría, señaló, que el universo "cayera hacia el centro del espacio", lo cual evidentemente no ocurría. Como contraposición, cada fragmento de materia en un universo infinito se halla sometido a fuerzas iguales desde todas direcciones y, en consecuencia, permanece estable.

### **Equilibrio infinito**

También era una preocupación para Newton la fragilidad de un universo gobernado por el equilibrio de estas fuerzas opuestas. Si la gravedad actúa instantáneamente sobre distancias infinitas, entonces las fuerzas sobre cada fragmento de materia serán no sólo iguales sino también infinitas, en todas direcciones. Cualquier pequeño desequilibrio en la distribución de la materia alteraría el equilibrio de la atracción, sometiendo a los cuerpos a enormes fuerzas asimétricas, mucho más fuertes que la gravitación ordinaria que mantiene a los planetas en sus órbitas o retiene juntas a las estrellas. Las consecuencias serían catastróficas: los astros se verían lanzados al espacio interestelar a velocidades increíbles. Sin embargo, puesto que el universo parecía estar bien cohesionado, Newton llegó a la conclusión de que la distribución de la materia era de hecho perfectamente uniforme y que el efecto gravitatorio neto de los objetos distantes era prácticamente cero.

### **El éter**

Newton se valió de esta nueva e invisible sustancia para explicar la propagación de la gravedad... En su libro Principia, explicó perfectamente cómo se atraen los cuerpos, pero no por qué se atraen. Así, especuló con la acción de Dios a distancia, algo que en cierta forma “justificaba” su existencia. Pero en un plano menos místico sugirió la existencia del éter, un medio por el cual se propagaba la gravedad, pero que era imperceptible. Se le achacó que no razonara empíricamente la existencia de esta sustancia, pero parecía que era imprescindible su existencia.

## La luz

Por último, el fenómeno de la luz, que tanto intrigaba y apasionaba a los científicos. Y es por esto que se merece una mención y atención especiales, por lo que se explica a continuación...

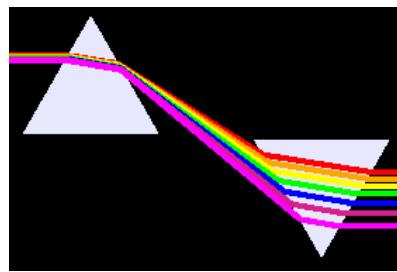
### ***Y la LUZ...***

Además de en la mecánica, Newton hizo una gran contribución en la óptica. Analizó la luz que pasa por un prisma, y descubrió que estaba compuesta de 7 colores. Así, con otras muchas deducciones, publicó su libro *Óptica*, en el que las desarrollaba, fijándose casi exclusivamente al fenómeno de la luz.

Pero él y sus contemporáneos no llegaron a comprender la naturaleza misma de la luz. Newton pensaba que estaba constituida de partículas, y que por consiguiente, era afectada por la gravedad. Pero por otra parte esto le generaba un gran problema, ya que la luz escapaba de ella, porque si no los astrónomos no tendrían nada que observar... La luz no podía verse afectada por la gravedad, pero al mismo tiempo se le infería un estado corpuscular, capaz de moverse por el espacio a gran velocidad como proyectiles y atravesar objetos, como el vidrio.

Al mismo tiempo, otros físicos de la época se inclinaban a pensar que la luz tenía propiedades ondulatorias, como el notable Huygens. Pero entonces, ¿qué medio era el que permitía su propagación? Y se reafirmaba una vez más el concepto del éter...

*Experimento del prisma:*

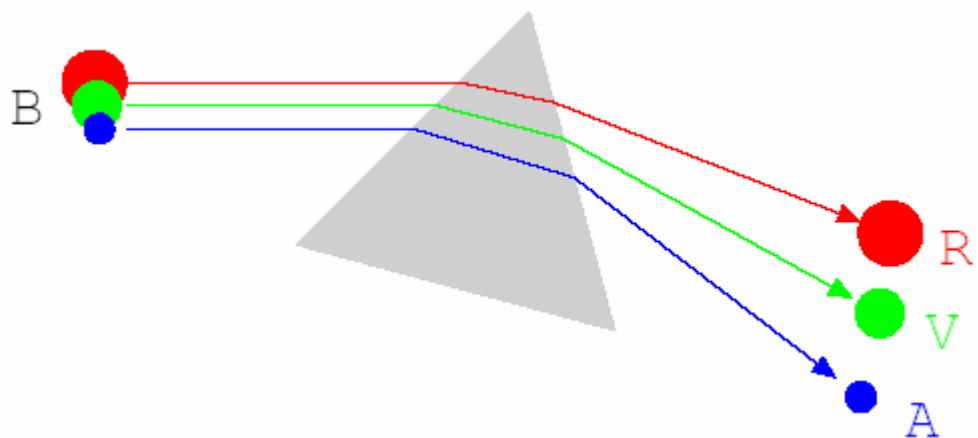


Hasta la Edad Media se debatió si la visión iba del ojo al objeto o al revés. Y Newton, en 1666, descubrió la dispersión de la luz:

\* La luz blanca puede separarse en luces de colores con un prisma; luego la luz blanca no es pura.

\* Los colores puros pueden combinarse para formar otros colores mezclados, que, aunque los confunde el ojo, son distintos a los puros. Se demostró así que el color es una propiedad de la luz, y no una esencia que la luz transportaba hasta nuestro ojo.

\* Propuso que la luz estaba hecha de corpúsculos, es decir, la Teoría Corpuscular de la Luz: los más pequeños y ligeros (más refrangibles) serían los violetas, y los más grandes y pesados (menos refrangibles) los rojos. Por ello en un prisma se desvía más el violeta que el rojo.



# *Electromagnetismo*

## **La Luz**

### **Naturaleza de la Luz**

La determinación de la naturaleza de la luz ha dado lugar a una de las controversias más apasionantes de la historia de la ciencia. Las diversas teorías, formuladas en distintos momentos históricos para justificar los fenómenos conocidos entonces, se iban desechando o modificando a medida que se alcanzaban nuevos conocimientos.

Las primeras hipótesis acerca de la luz, con carácter científico, surgieron de manera casi simultánea durante el siglo XVII y fueron propuestas por dos grandes científicos: el inglés Isaac Newton (1642-1727) y el holandés Charles Huygens (1629-1695), anteriormente las hipótesis acerca de la luz eran meramente filosóficas. Las dos hipótesis, aparentemente contradictorias entre sí, se han denominado, respectivamente, la **teoría corpuscular** de Newton y la **teoría ondulatoria** de Huygens, y han servido de base a todas las opiniones posteriores

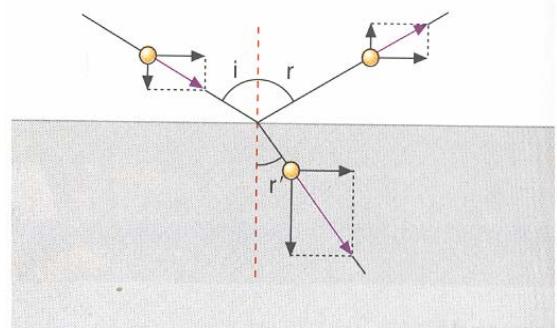


#### **A) Teoría corpuscular de Newton**

En su *Óptica*, publicada en 1704, Newton describió que la luz tiene **naturaleza corpuscular**: *los focos luminosos emiten minúsculas partículas que se propagan en línea recta en todas las direcciones y, al chocar con nuestros ojos, producen la sensación luminosa.*

Los corpúsculos, distintos para cada color, son capaces de atravesar los medios transparentes y son reflejados por los cuerpos opacos.

Esta hipótesis justificaba fenómenos como la propagación rectilínea de la luz y la reflexión, pero no



aclaraba otros como la refracción: *¿por qué unos corpúsculos luminosos son reflejados por la superficie al mismo tiempo que otros penetran en ella refractándose?*

Para poder justificarlo, Newton tuvo que suponer que la luz viaja a mayor velocidad en los líquidos y en los vidrios que en el aire, lo que posteriormente se comprobó que era falso ya que la velocidad de la luz es siempre la misma independientemente del medio en que se propague.

## B) Teoría ondulatoria de Huygens

Con anterioridad a Newton, Huygens en su obra *Tratado de la luz*, publicada en 1690, propuso que: *la luz consiste en la propagación de una perturbación ondulatoria del medio*. Huygens creía que se trataba de **ondas longitudinales** similares a las ondas sonoras.

Esta hipótesis, explicaba fácilmente ciertos fenómenos como la *reflexión*, la *refracción* de la luz y la *doble refracción*, descubierta por entonces.

Pese a ello, no fue comúnmente aceptada. La mayoría de los científicos se adhirió a la teoría corpuscular de Newton dado su gran prestigio.

La mayor dificultad de la teoría ondulatoria residía en que no se habían observado en la luz fenómenos típicamente ondulatorios como la *difracción*. Hoy se sabe que su longitud de onda es tan pequeña que estos fenómenos se producen aunque no es fácil detectarlos.

## C) Teoría ondulatoria de Fresnel

A principios del siglo XIX diversos avances revolucionaron la hipótesis ondulatoria de la luz. Algunos de ellos fueron: las experiencias, en 1801, del médico y físico inglés T. Young (1773-1829) sobre *interferencias luminosas*, el descubrimiento en 1808 de la *polarización* de la luz, o las experiencias en 1815 del físico francés A. J. Fresnel (1788-1827) sobre la *difracción*.

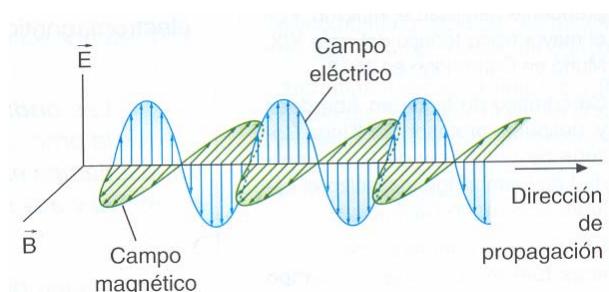
Fresnel mostró la influencia de la teoría corpuscular para justificar estos descubrimientos e hizo una nueva propuesta: *la luz está constituida por ondas transversales*.

Más tarde, en 1850, el físico francés J. L. Foucault (1819-1868) midió la velocidad de la luz en el agua y comprobó que ésta era menor que en el aire, lo que invalidaba la justificación de Newton para la refracción.

La hipótesis corpuscular, después de 150 años de acepción, fue prácticamente abandonada.

#### D) Teoría electromagnética de Maxwell

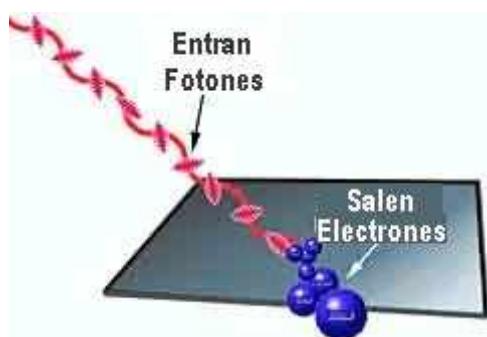
En 1864, el físico y matemático escocés J. C. Maxwell (1831-1879) estableció la *teoría electromagnética de la luz*. Adentrándose en la comprobación experimental de la existencia de las ondas electromagnéticas efectuada, en 1887, por el físico alemán H. Hertz (1857-1894), propuso que: *la luz no es una onda mecánica sino una forma de onda electromagnética de alta frecuencia. Las ondas luminosas consisten en la propagación de un campo eléctrico y de un campo magnético, perpendiculares entre sí y a la dirección de propagación.*



Estos dos campos son funciones periódicas tanto de la coordenada en la dirección de propagación como del tiempo.

La teoría de Maxwell tuvo aceptación general y, al parecer, podía considerarse como la teoría definitiva de la naturaleza de la luz.

#### E) Naturaleza cuántico-corpuscular de Einstein



El *efecto fotoeléctrico*, descubierto en 1887 por H. Hertz, consiste en la emisión de electrones de cierta energía, al incidir la luz de una determinada frecuencia sobre una superficie metálica. Este efecto no podía ser explicado mediante la teoría ondulatoria.

A partir de la hipótesis cuántica del físico M. Planck (1858-1947), Albert Einstein (1879-1955) propuso en 1905 que: *la luz está formada por un haz de pequeños corpúsculos o cuantos de energía* también llamados **fotones**. Es decir, en los fotones esta concentrada la energía de la onda en lugar de estar distribuida de modo continuo por toda ella.

La energía de cada uno de los fotones es proporcional a la frecuencia de la luz.

$$E = hf \quad h = \text{constante de Plank}$$

$$6,625 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

## F) Naturaleza dual de la Luz

*La luz tiene una doble naturaleza, corpuscular y ondulatoria. Se propaga mediante ondas electromagnéticas y presenta los fenómenos típicamente ondulatorios, pero en su interacción con la materia, en ciertos fenómenos de intercambio de energía, manifiesta un carácter corpuscular. Sin embargo, la luz no manifiesta simultáneamente ambas características, en un fenómeno concreto se comporta o como onda o como partícula.*

Se ha comprobado posteriormente que la doble naturaleza de la luz es aplicable también al comportamiento de ciertas partículas, como los electrones. Esta naturaleza dual de la materia, a semejanza de la luz, fue propuesta en 1924 por el físico francés L. De Broglie (1892-1987) y constituye uno de los fenómenos básicos de la física moderna.

El hecho de que se haya mantenido el debate sobre la Naturaleza de la luz durante tantísimos años, se debe a que los diferentes científicos tenían parte de razón en sus modelos sobre la luz. El problema radica en que incluso en la actualidad sigue resultando casi imposible pensar que una misma cosa pueda tener un comportamiento ondulatorio o corpuscular dependiendo de la situación.

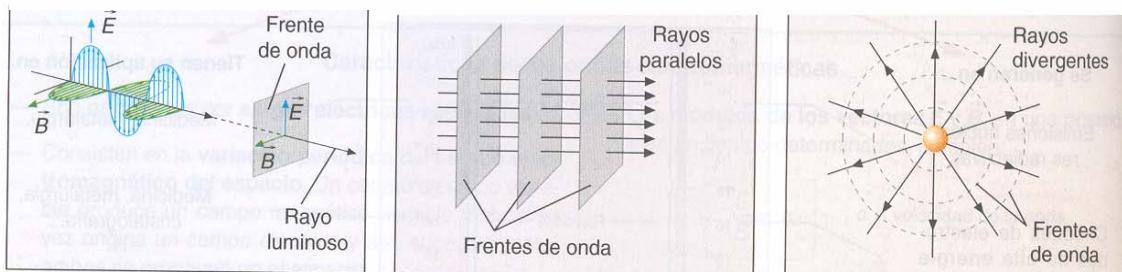
### Fenómenos luminosos

#### - Propagación rectilínea de la Luz

Si la luz solar penetra por una pequeña rendija en un local oscuro, las partículas de polvo iluminadas al paso de la luz ponen de manifiesto que ésta se propaga en línea recta.

Un **rayo luminoso** es una línea perpendicular a la superficie de onda y que determina la dirección de propagación de ésta.

### - Reflexión y Refracción



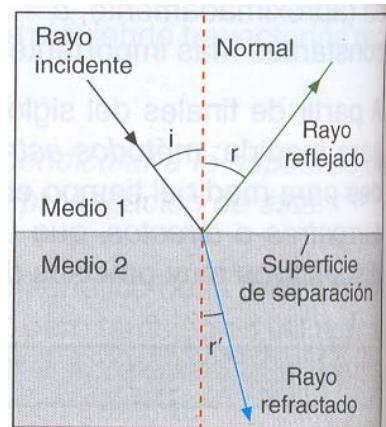
El rayo luminoso es perpendicular a los vectores  $\vec{E}$  y  $\vec{B}$ , que definen los campos eléctrico y magnético, respectivamente.

Un **haz de rayos de luz paralelos** es un conjunto de rayos paralelos entre sí cuyas superficies de onda son planas.

Un **haz de rayos divergentes** es un conjunto de rayos, procedentes de una fuente luminosa puntual, cuyas superficies de onda son esféricas.

Cuando un rayo de luz alcanza la línea de separación entre dos medios con distinto índice de refracción, parte de la luz es **reflejada** “rebota”, mientras que otra parte es **refractada** (pasa al otro medio).

En estos casos es útil abordar el fenómeno de la reflexión desde la naturaleza corpuscular de la luz, mientras que el fenómeno de la refracción se explica de manera más sencilla si se considera la luz como a un conjunto de partículas.



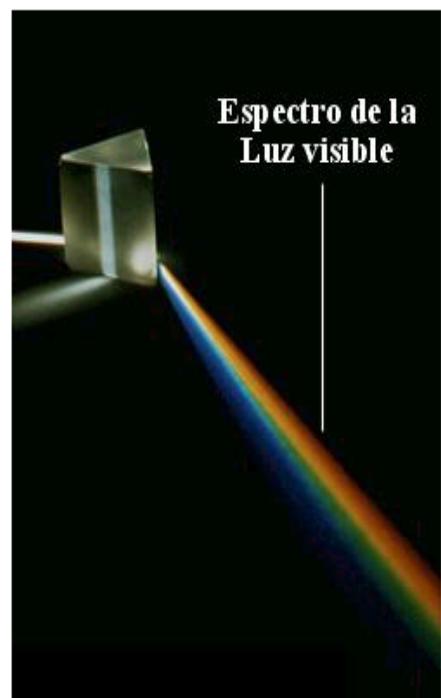
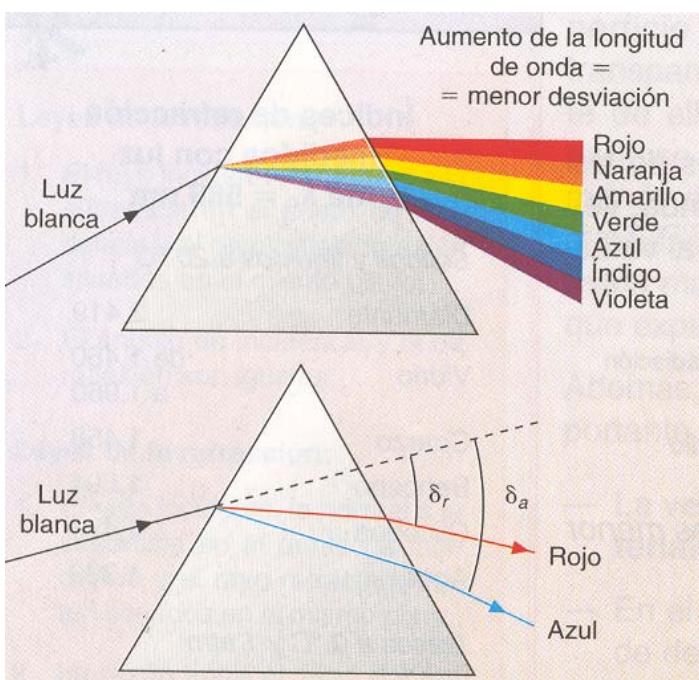
El hecho de que la luz se refleje o refracte depende del ángulo de incidencia.

### - Dispersión

Se sabe que el índice de refracción de una sustancia depende de la longitud de onda incidente. Como consecuencia, si un haz de rayos de luz sin distintas longitudes de onda inciden sobre un material refractante, cada radiación simple se desviará con un ángulo diferente. Este fenómeno recibe el nombre de **dispersión de la luz**.

La dispersión de la luz blanca, formada por una mezcla de radiaciones de distintas longitudes de onda, se pone de manifiesto al hacer pasar un haz de luz blanca por un prisma óptico. Así las distintas radiaciones que forman la luz blanca son refractadas con distintos ángulos y se

obtiene una sucesión de colores denominado, espectro de la luz blanca, que fue descubierto por Newton.



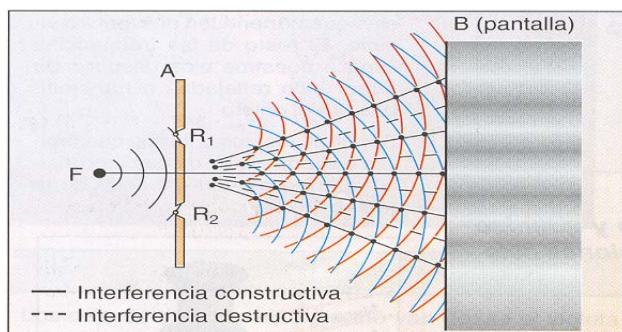
### - Interferencia

La luz es capaz de crear interferencia si se cruza con otro haz de rayos luminosos y esto da lugar a dos tipos de interferencia

**-Interferencia constructiva:** si las ondas están en fase. En este caso la amplitud resultante es la suma de amplitudes y ésta es máxima, se ha producido una *intensificación* de ondas.

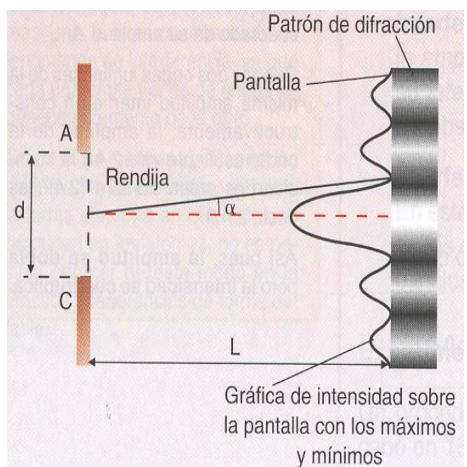
**-Interferencia destructiva:** si las ondas están en oposición de fase. En este caso la amplitud resultante es la diferencia de amplitudes y se produce una *anulación* de ondas

Por medio de la interferencia entre ondas luminosas el físico inglés T. Young realizó el experimento de la doble rendija y pudo determinar la longitud de onda de la luz.



## Experimento de Young

### - Difracción



Este fenómeno consiste en que si se interpone un obstáculo en el camino de la luz y se examina minuciosamente su sombra, se observa que ésta no es del todo nítida. Se aprecian franjas claras y oscuras que parecen contradecir el principio de avance rectilíneo de la luz.

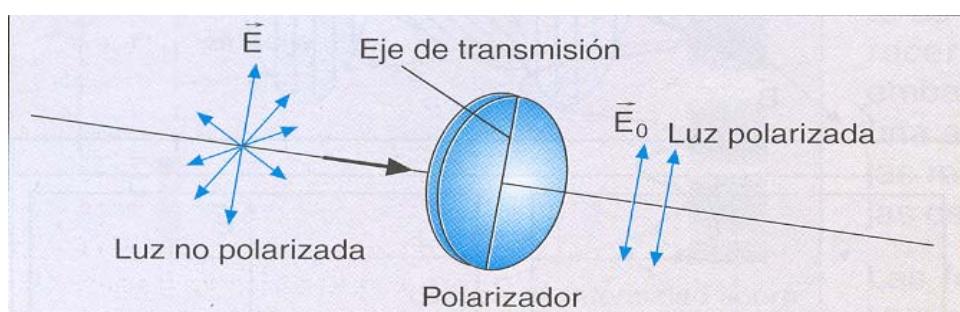
Se trata del fenómeno de la difracción, por lo que las ondas luminosas son capaces de rodear los obstáculos y llega a puntos que estaban escondidos en un principio al foco. Este mismo efecto se puede observar en el caso de ondas sonoras.

Como se puede observar en la figura la luz ha sido capaz de mostrar lo que en un principio estaba oculto para el foco.

### - Polarización

Los fenómenos de interferencia y de difracción muestran el carácter ondulatorio de la luz, pero no su carácter transversal. Los fenómenos de polarización son los que nos muestran el carácter transversal de la luz.

— La luz presenta un carácter transversal en todas las direcciones, pues bien, se dice que la luz está **polarizada linealmente** si las oscilaciones del campo eléctrico tienen lugar siempre en la misma dirección.



En este caso el plano de polarización es el plano XY

Cabe señalar que existen diversas formas de polarizar la luz, como la **polarización por reflexión** o la **polarización por absorción selectiva**.

## *Velocidad de la Luz*

Durante muchos siglos se ha creído que la velocidad de la luz era infinita y que su propagación era instantánea. Sin embargo, hoy sabemos que es *finita*, aunque mucho mayor que cualquier otra velocidad conocida (aproximadamente,  $c = 300.000 \text{ km/s}$ ), y que su valor es una de las constantes más importantes de la naturaleza. Además también sabemos que la luz no necesita de ningún medio de propagación al tratarse de una onda electromagnética.

A partir de finales del siglo XVII se empezaron a seguir dos tipos de métodos para determinar la velocidad de la luz: *métodos astronómicos* que emplean distancias muy largas y *métodos terrestres o directos* que emplean distancias cortas, pero requieren la utilidad de aparatos de medida muy precisos.

### **1.- Método de Galileo (terrestre)**

El primer esfuerzo para medir la velocidad de propagación de la luz fue hecho por Galileo. Se situó en la cima de una colina mientras que otro observador se colocaba en la cima de otra, distante aproximadamente 3 km, teniendo los dos una linterna y un obturador para ocultar la luz. Galileo propuso medir el tiempo que tarda la luz en recorrer la distancia de ida y vuelta entre los experimentadores. A debería descubrir su linterna y cuando *B* viese la luz debería descubrir la suya. El tiempo transcurrido a partir del momento en que *A* destapase su linterna y el momento en que éste viese la luz proveniente de *B* debería ser el tiempo que la luz tarda en recorrer el espacio de ida y vuelta entre los experimentadores.

Aunque este método es correcto en principio, la velocidad de la luz es tan grande que el intervalo de tiempo a medir es mucho menor que las fluctuaciones de la respuesta humana y por ello Galileo fue incapaz de medir la velocidad de la luz y la consideró infinita.

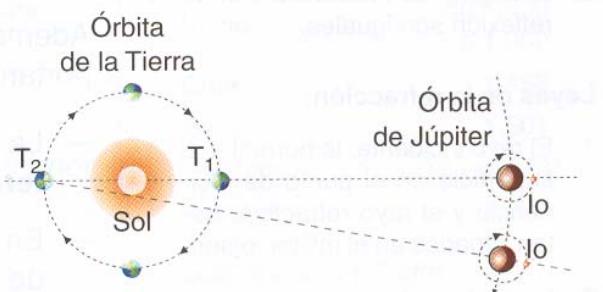
## 2.- Método de Roemer (astronómico)

En 1675, el astrónomo danés Olaf Roemer (1644-1710) midió la velocidad de la luz. Aunque el valor que obtuvo difiere notablemente del admitido en la actualidad, la medición tuvo el mérito de demostrar, **por primera vez**, que la velocidad de la luz es *finita*.

Roemer trató de medir el período orbital de Io (satélite de Júpiter) a partir del intervalo de tiempo transcurrido entre dos eclipses consecutivos. Sin embargo, encontró que este tiempo era variable: se hacia mayor cuando la Tierra se alejaba de Júpiter y menor cuando la Tierra se acerca a él.

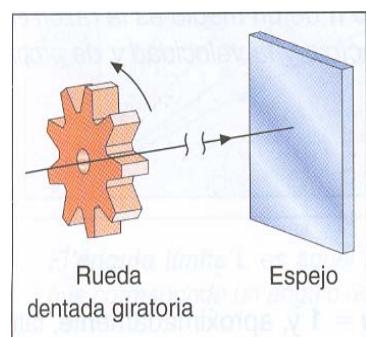
Interpretó el hecho admitiendo que, al aumentar la distancia entre la Tierra y Júpiter, la luz que procede de Io debe recorrer una distancia mayor.

Midió el período del satélite cuando la Tierra se halla en  $T_1$  y calculó con el valor obtenido el momento en que debería producirse un eclipse al cabo de medio año, cuando la Tierra estuviera situada en  $T_2$ . El retraso en la observación del eclipse es el tiempo que la luz emplea en recorrer la distancia desde  $T_1$  a  $T_2$ , es decir, el diámetro de la órbita terrestre,  $3 \cdot 10^{11}$  metros. El retraso observado fue de 22 minutos (en realidad es menor 16,5 minutos). Y el valor de  $c$  obtenido por Roemer fue:



$$c = \frac{\Delta s}{\Delta t} ; c = \frac{3 \cdot 10^{11} \text{ m}}{22 \cdot 60 \text{ s}} = 2,3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

## 3.- Método de Fizeau (terrestre)



El físico francés A. Fizeau (1819-1896) en 1849, hizo pasar un haz de luz entre dos dientes consecutivos de los 720 de una rueda dentada giratoria. Este haz se reflejaba posteriormente en un espejo situado a una distancia de 8,63 km de la rueda y volvía siguiendo la misma trayectoria.

A bajas velocidades de rotación de la rueda, la luz reflejada era detenida por el siguiente diente de la ésta.

Para determinar la velocidad de la luz es preciso conocer cuál debe ser la velocidad angular de la rueda dentada para que la luz reflejada pase exactamente por la siguiente ranura de la rueda. Conociendo dicha velocidad angular (25,2 rev/s), se puede calcular el tiempo que transcurre desde que la luz atraviesa la rueda hasta que vuelve a alcanzarla.

$$\Delta t = \frac{\Delta\Phi}{\omega} ; \Delta t = \frac{\frac{2\pi}{720 \text{ rad}}}{2\pi \cdot 25,2 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}} = 5,5 \cdot 10^{-5} \text{ s}$$

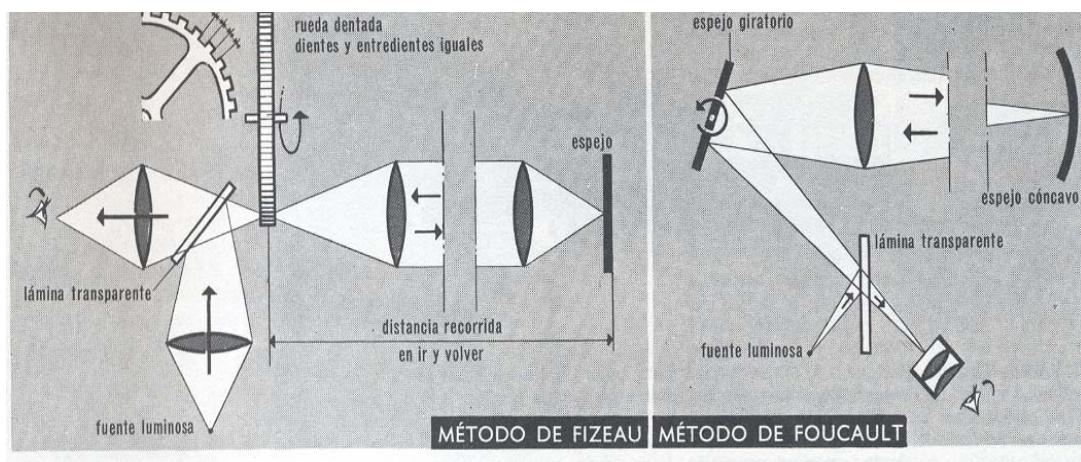
$$c = \frac{\Delta s}{\Delta t} ; c = \frac{2 \cdot 8,63 \cdot 10^3 \text{ m}}{5,5 \cdot 10^{-5} \text{ s}} = 3,1 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

El valor obtenido es ligeramente superior al valor real.

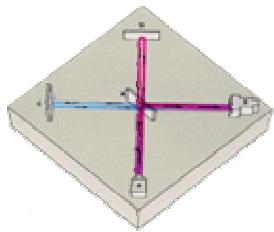
#### 4.- Método de Foucault (terrestre)

Un año después en 1850 el físico francés J. L. Foucault, siguiendo un proceso similar al de Fizeau, pero esta vez con un espejo móvil determinó que el valor de la luz era de 295.680 Km./s, que ha sido una de las medidas más precisas de la velocidad de la luz.

El mérito de Foucault no fue sólo medir la velocidad de la luz, sino que como anteriormente se ha dicho midió también la velocidad de la luz en el agua y comprobó que era menor que en el aire, lo que invalidó la justificación de Newton para la difracción.



## **\*\* Velocidad Real**



Posteriormente más científicos han tratado de medir la velocidad de la luz y cabe destacar sobre todo, el método empleado en 1887, por Michelson y Morley quienes con la ayuda de un invento propio, el **interferómetro** (figura adjunta), demostraron que la velocidad de la luz era siempre la misma independientemente del medio por el que se propague y hallaron su valor. De este experimento se hablará posteriormente debido a la importancia que tuvo en el desarrollo de la teoría de la relatividad de Einstein.

La medida más precisa que se ha realizado de la velocidad de la luz es de 299.792,457 Km/h y se realizó en el año 1972. Se puede decir que este es el valor real de la velocidad de la luz.

## ***Electromagnetismo***

### *Introducción*

El electromagnetismo a primera vista parece no desempeñar un importante papel en el desarrollo de la teoría de la relatividad de Einstein, pero si se piensa eso se está equivocado ya que gracias a esta rama de la física se lograron entender todos los fenómenos, tanto eléctricos, como magnéticos. Todos los científicos que dedicaron su vida al estudio de estos fenómenos contribuyeron enormemente en el desarrollo de la física y gracias a ello Maxwell pudo finalmente de explicar matemáticamente estos procesos, que se basaban principalmente en la experimentación.

Las cuatro ecuaciones de Maxwell del electromagnetismo son un pilar muy importante para la física. Basándose en ellas y principalmente en la relatividad de Galileo, Einstein pudo desarrollar su magnífica teoría relativista.

### *Breve historia del Electromagnetismo*

El desarrollo de las aplicaciones prácticas del *electromagnetismo*, de cuyas ventajas se puede disfrutar, ha sido espectacular en el siglo XX.

El filósofo griego **Tales de Mileto** (640-546 a.C.) fue el primero en estudiar el magnetismo y la electricidad. Se dice que observó que un trozo de resina fósil, el ámbar, al que entonces se le llamaba *elektrón*, era capaz de atraer objetos ligeros.

Pero hubo que esperar mucho tiempo para que alguien tomara con interés científico este fenómeno. El físico y médico inglés, **W. Gilbert** (1544-1603), contemporáneo de Galileo, publicó un libro titulado *De magnete*, en el que describía el comportamiento de distintos objetos frotados e interpretaba el movimiento de las agujas imantadas al suponer por primera vez que la Tierra era un gigantesco imán.

El físico francés Charles du Fay (1698-1739) observó las atracciones y las repulsiones que se producen entre cuerpos frotados según su naturaleza, de donde dedujo la existencia de dos clases de *electricidad*, nombre dado por Gilbert, a las que llamó *resinosa* y *vítreas*.

En 1729 el investigador inglés **S. Gray** (1696-1736) observó la conducción de la electricidad de la cual se desconocía su naturaleza, a través de algunas sustancias aunque no todas permitían el paso de ésta. El físico francés **J. T. Desaguliers** (1683-1744) propuso los nombres de *conductores* y *aislantes* para designar el nombre de las sustancias que permiten o impiden, respectivamente el paso de la corriente eléctrica.

El científico norteamericano **B. Franklin** (1706-1790) describió la electricidad como un fluido cuyas formas de manifestación son debidas al exceso o falta de éste. Así resultan los cuerpos con carga positiva y los cuerpos con carga negativa, respectivamente, según esta nomenclatura. Además Franklin demostró que las nubes tormentosas están cargadas de electricidad, mediante su celebre y peligroso experimento de lanzar, aprovechando una fuerte tormenta, una cometa con una punta metálica conectada a un hilo de seda. Franklin completó sus investigaciones con un invento de gran utilidad, el pararrayos.

En 1785 el físico francés **Charles de Coulomb** (1736-1806) ideó la balanza de torsión para medir las fuerzas eléctricas de muy pequeña intensidad, lo que le permitió enunciar la célebre ley de Coulomb:

$$\mathbf{E} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}'}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3}.$$

**SISTEMA DISCRETO**

$$\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}'}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3} \rho(\mathbf{r}') d^3\mathbf{r}'.$$

**SISTEMA CONTINUO**

El siglo XIX se inició con un invento espectacular, la pila de Volta. En 1800 el físico italiano **A. Volta** (1736-1806) generó por primera vez corriente eléctrica mediante reacciones químicas entre dos metales, plata y cinc, en contacto con una disolución salina.

El año 1820 es otra fecha importante en la historia de la ciencia, ya que el físico danés **Oersted** (1777-1851) descubrió la íntima relación existente entre la electricidad y el magnetismo al percatarse de que la corriente eléctrica era capaz de desviar las brújulas. Surgió así el *electromagnetismo*.

El hallazgo atrajo a numerosos científicos que trataron de profundizar en este fenómeno. Entre ellos se encontraba el matemático y físico francés **A. M. Ampère** (1775-1836), quien se basó en el experimento de Oersted para desarrollar su trabajo.

Ampère comprobó que las corrientes eléctricas se atraen o rechazan como lo hacen las cargas electromagnéticas, demostró que dos corrientes eléctricas paralelas y del mismo sentido se atraen, mientras que las de sentido contrario se repelen.

El hecho descrito dio origen a lo que se llama la ley de Ampère y al comienzo de una nueva rama de la física: la electrodinámica. Por ello en 1825 creó los fundamentos teóricos y realizó la descripción básica entre la electricidad y el magnetismo.



$$\oint_C \mathbf{B} \cdot d\ell = \mu_0 I_C$$

*Ley de Ampère*

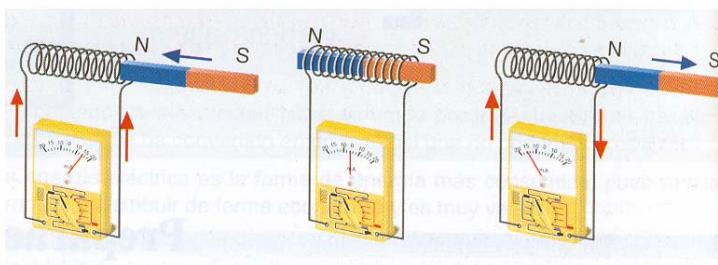
Según Ampère, una corriente eléctrica es asimilable a un imán; por consiguiente, podría reemplazarlo. Demuestra esta afirmación con un solenoide, o sea, una bobina recorrida por una corriente eléctrica, y comprueba que ésta se comporta como un imán.

Ahora bien, también existe una expresión alternativa a la ley de Ampère, la que reconocemos como la **ley de Biot-Savart**, que también relaciona el campo magnético y la corriente que lo produce.

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\ell \times \hat{\mathbf{r}}}{r^2}$$

El físico y químico **M. Faraday** (1791-1867) efectuó un experimento cuya influencia ha sido enorme por sus numerosas aplicaciones. En él descubrió la *inducción electromagnética*, base de los generadores eléctricos. Faraday probó que al mover un imán dentro de una bobina de alambre se crea en ella una corriente eléctrica. A él le debemos los conceptos de *campo* y *líneas de fuerza*, que rompieron con la visión mecánica del Universo de Newton.

El físico norteamericano **J. Henry** (1797-1878) también destaco en el mundo del electromagnetismo, al descubrir la inducción al mismo tiempo que Faraday. Es a él a quien le debemos las leyes matemáticas de la inducción.



*Experiencia de Faraday y Henry*

Tanto Faraday como Henry obtuvieron distintas ecuaciones para describir la fuerza electromotriz inducida (f.e.m.) y fueron las siguientes respectivamente:

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi}{dt}$$

**Faraday**

**Henry**

$$\varepsilon = vBl$$

Pero la formulación matemática del electromagnetismo correspondió al mejor físico teórico del siglo XIX, J. C. Maxwell. Maxwell partió de las ideas de Faraday acerca de las líneas de fuerza y profundizo en que los efectos eléctricos y magnéticos son resultado de los campos creados por conductores e imanes. Su habilidad matemática le permitió formular definitivamente la naturaleza y la propiedad del electromagnetismo en las cuatro ecuaciones que llevan su nombre y que representan el vínculo definitivo entre los campos eléctricos y magnéticos.



El mayor logro de Maxwell fue darse cuenta de que todas las experiencias, tanto eléctricas como magnéticas, que se habían realizado hasta entonces y de las cuales no se conocía bien su naturaleza, formaban parte de una misma cosa, el **electromagnetismo** y además sus cuatro ecuaciones eran capaces de describir todas las experiencias electro-magnéticas que se conocían hasta entonces.

## Ecuaciones de Maxwell

Las ecuaciones de Maxwell son:

$$\oint_S E_n \, dA = \frac{1}{\epsilon_0} Q_{\text{interior}}$$

$$\oint_S B_n \, dA = 0$$

$$\oint_C \mathbf{B} \cdot d\ell = -\frac{d}{dt} \oint_S B_n \, dA$$

$$\oint_C \mathbf{B} \cdot d\ell = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d}{dt} \oint_S E_n \, dA$$

**1.-** La primera de ellas es la ley de Gauss; establece que el flujo del campo eléctrico a través de cualquier superficie cerrada es igual a  $1/\epsilon_0$  veces la carga neta encerrada.

Dentro de la misma. Esto implica, de la ley de Gauss, que el campo eléctrico debido a una carga puntual varia en razón inversa al cuadrado de la distancia de la carga. Esta ley describe como divergen las líneas de campo eléctrico de una carga positiva y convergen sobre una negativa. Su base experimental la constituye la ley de Coulomb.

**2.-** La segunda ecuación, llamada a veces ley de Gauss del magnetismo, establece que el flujo del vector del campo magnético  $\mathbf{B}$  es cero a través de cualquier superficie cerrada. Esta ecuación describe la observación experimental de que las líneas de campo magnético no divergen de ningún punto del espacio ni convergen sobre cualquier otro punto, esto implica que no existen polos magnéticos aislados.

**3.-** La ecuación tercera es la ley de Faraday, afirma que la integral de campo eléctrico a lo largo de cualquier curva cerrada  $C$  (la circulación), que es la fuerza electromotriz, es igual a la variación por unidad de tiempo (con signo negativo) del flujo magnético que atraviesa cualquier superficie  $S$  limitada por la curva. La ley de Faraday describe cómo rodean las líneas de campo

eléctrico cualquier superficie a través de la cual existe un flujo magnético variable y relaciona el vector de campo eléctrico **E** a la variación respecto al tiempo del vector de campo magnético **B**.

4.- La cuarta ecuación es la que se conoce como ley de Ámpere, con la modificación de Maxwell de la corriente de desplazamiento. Esta ley describe como rodean las líneas de campo magnético a una superficie a través de la cual está pasando una corriente o bien existe un flujo eléctrico variable.

### Importancia y problemas de las fórmulas

Es obvio que aquellos resultados alcanzados por los trabajos de Maxwell fueron relevantes para la física, pero comportaron además consecuencias, quizás, más significativas aún.

Si se agitara una carga eléctrica hacia arriba y abajo, produciría debido a los cambios que se han generado en la carga, un campo magnético. Ahora, si estos cambios de la carga son regulares, se producirá un campo magnético cambiante. Este campo magnético cambiante producirá a su vez un campo eléctrico cambiante, que a su vez producirá un campo magnético cambiante, y así sucesivamente. Una alteración «electromagnética», u onda, se moverá hacia fuera.

Para los físicos, esto es estar frente a la presencia de un notable resultado. Pero lo que sí resulta ser excepcionalmente más importante aún, especialmente para el desarrollo posterior de la física teórica, es la contribución matemática de Maxwell que permite calcular, basándose solamente en la medición de la potencia de las fuerzas eléctricas y magnéticas entre las cargas estáticas y dinámicas, con qué velocidad se movería esa alteración. Las ecuaciones predicen que la velocidad de esas ondas alterativas es de 300.000 kilómetros por segundo, exactamente la velocidad de la luz tal como se había determinado ya por diversos experimentos.

Maxwell llegó a la conclusión de que estas ondas electromagnéticas eran similares a la luz, que se sabía que tenía una naturaleza ondulatoria. De hecho, decidió, que la luz visible era simplemente una de muchas formas de energía electromagnética, que se distinguía de las otras sólo por su diferente longitud de onda.

No es sorprendente, de hecho, que la luz sólo resulte ser una onda electromagnética, cuya velocidad se determina en términos de dos constantes fundamentales de la naturaleza: la potencia de

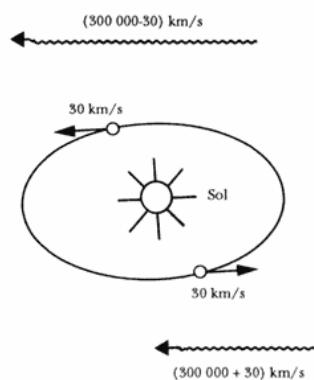
la fuerza eléctrica entre partículas cargadas y la potencia de la fuerza magnética entre imanes. Sin embargo, esto en aquella época causó un dilema.

Los físicos de la época creían que todas las ondas requerían algún medio que las transportara, del mismo modo que el agua transporta las olas en el océano. Pero el espacio a través del cual viaja la luz de las estrellas se consideraba en general como vacío. La solución adoptada fue postular la existencia de un medio transportador de las ondas llamado *éter*, una materia insustancial e invisible que no impedía el movimiento de los cuerpos celestes por el cual se propagaba la luz.

### *La búsqueda del éter*

La situación en el siglo pasado era tal que ningún físico dudaba de la existencia del éter, pero nadie tenía la más remota idea de qué clase de sustancia podía ser. Si todo lo penetraba sin que nada pudiera influir sobre él, ¿cómo detectarlo? Se pensaba que la única posibilidad real de confirmar, aun indirectamente, su existencia era a través de experimentos con la luz.

Si la luz tiene una velocidad bien definida con respecto al éter, entonces esta velocidad debe variar según el movimiento de quien la mida. Si un barco se mueve con una cierta velocidad fija con respecto al agua en reposo, ese mismo barco navegando por un río se moverá con respecto a la tierra firme con mayor o menor velocidad según si sube o baja la corriente. Para un observador en tierra firme, la velocidad del barco será menor si se mueve río arriba porque hay que restar la velocidad del agua a la del barco, mientras que si el barco se mueve río abajo, las dos velocidades se adicionan.



**La velocidad de la luz debería variar según la dirección de un rayo luminoso, debido al movimiento de la tierra.**

Lo mismo debe suceder con la luz, cuya velocidad es fija con respecto al éter. La Tierra gira alrededor del Sol con una velocidad aproximada de 30 kilómetros por segundo. De acuerdo con el razonamiento anterior, un rayo de luz emitido en el sentido de movimiento de la Tierra debe moverse, con respecto a la Tierra misma, con una velocidad menor que un rayo emitido en la dirección contraria, siendo la diferencia de velocidades entre los dos rayos luminosos de 60 kilómetros por segundo (Figura adjunta).

Si se pudiera medir esa variación de la velocidad se confirmaría indirectamente la existencia del éter, o al menos la de un sistema de referencia absoluto, como el que proponía Newton.

La velocidad de la luz es de aproximadamente 300 000 kilómetros por segundo; evidentemente, la medición de la velocidad luminosa debe ser extremadamente precisa para poder detectar una variación de sólo 60 kilómetros por segundo. Tal era el reto para los físicos experimentales del siglo pasado.

El primer experimento confiable para medir la velocidad de la Tierra con respecto al éter fue realizado en 1887 por los norteamericanos Albert Abraham Michelson y Edward W. Morley. El aparato que utilizaron fue un interferómetro, que permite medir distancias y velocidades con enorme precisión utilizando haces de luz en interacción.

El experimento consistía en dividir, por medio de un espejo semitransparente, un haz luminoso en dos haces perpendiculares, que se reflejaban en sendos espejos para volver a unirse y calibrar, así, el aparato. Luego se giraba todo el aparato: cualquier cambio en la velocidad de la luz debería producir una interferencia entre los dos haces luminosos que podría detectarse directamente (Figura adjunta).

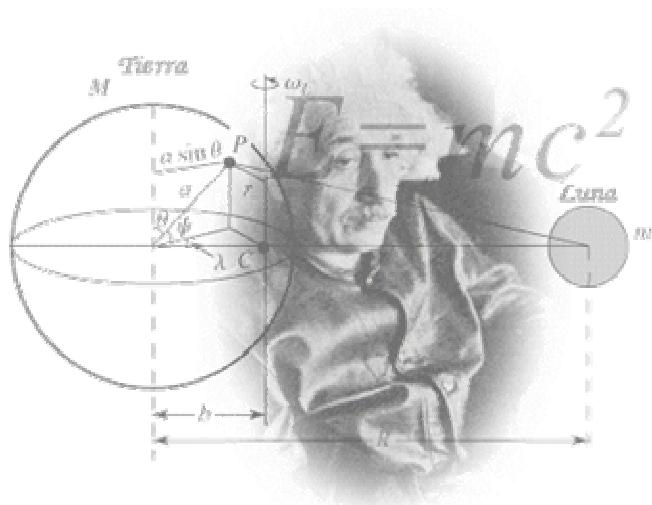


*El interferómetro utilizado por Michelson y Morley.*

El experimento se llevó a cabo con todo el cuidado necesario, pero, sorprendentemente, Michelson y Morley no detectaron ningún cambio en la velocidad de la luz. A pesar del movimiento de la Tierra, la luz se movía con la misma velocidad en todas las direcciones.

¿Cómo explicar el resultado negativo del experimento? Tanto Michelson y Morley, como otros físicos, propusieron varias hipótesis: quizás la Tierra arrastra consigo al éter en su movimiento; quizás los cuerpos se contraen en la dirección de su movimiento, cancelando así el efecto debido a la diferencia de velocidades de los dos haces luminosos del experimento; quizás la velocidad de la luz es constante con respecto a la fuente que la emite o a cualquier sistema de referencia (más tarde éste será uno de los postulados de Einstein), etc.

Durante algunas décadas, el resultado negativo del experimento de Michelson-Morley fue uno de esos detalles molestos que no encajan en ninguna teoría bien establecida, y que no cobran verdadera importancia hasta que se produce una revolución científica. En este caso, la revolución científica fue la teoría de la relatividad.

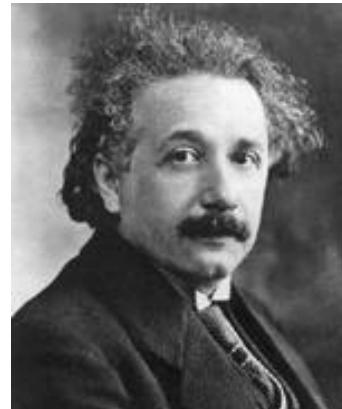


# *Relatividad de Albert Einstein*

## ***De nuevo, pequeña biografía de una gran Vida***

Nacido el  
14 de marzo de 1879,  
en  
Ulm, Alemania,  
Fallecido el  
18 de abril de 1955,  
en  
Princeton, Estados Unidos.

*Tímido y retraído, tuvo problemas para aprender en sus primeros años escolares. Aunque fue un apasionado de las ecuaciones, que su tío Jacob le empezó a enseñar. Fue un hombre muy sensible, cualidad que desarrolló de niño con el aprendizaje del violín. Albert Einstein estuvo destinado a buscar un nuevo enfoque y otra forma de entender la Física, desarrollando una nueva concepción teórica sobre el saber que muchos hombres de ciencia habían preparado con tanta brillantez....*



*Nacido en Ulm, en 1879, tuvo una infancia trastornada, ya que a los dos años de edad su familia y él se trasladaron a Munich, hasta 1895. Aunque antes sus padres se habían ido a Italia, a causa de la imposibilidad de su padre para firmar un contrato con una empresa eléctrica. Debido a su soledad, y faltándole tres cursos para acabar el instituto, se fue con sus padres a Italia (1895) unos años, tiempo en el que gozó del arte de Miguel Ángel y del que dispuso para estudiar por su cuenta y pensar sobre los efectos de moverse a la velocidad de la luz.*

*Regresó a Munich, y después se trasladó a Zurich, en Suiza, para seguir sus estudios y entrar en la Universidad, tal y como le había insistido su padre. Pero al no haber completado sus estudios secundarios, tuvo que entrar en el Instituto Politécnico de Zurich, en el que pudo estudiar matemáticas y física con Heinrich Weber y Hermann Minkowski. Fue condiscípulo de Marcel Grossmann, que llegó a ser su gran amigo. En aquellos años conoció el hambre, la marginación por no ser suizo... Pero en 1900 se graduó por fin, consiguió la nacionalidad suiza y se casó con Mileva Maric, una joven matemática croata.*

*Einstein comenzó a buscar trabajo, y anduvo dos años impartiendo clases particulares y/o a tiempo parcial. Pero pudo beneficiarse de la amistad de Grossmann, que le consiguió un puesto de experto técnico de tercera clase en la Oficina de Patentes suiza en Berna.*

*Trabajando en la oficina, tuvo tiempo para estudiar por su cuenta, ya que aprendió muy bien su trabajo, desempeñaba muy bien sus funciones. Por las noches organizaba reuniones en su casa para hablar de física, filosofía y literatura, y se alargaban indefinidamente. Einstein era un hombre solitario, pero la oportunidad de poder desarrollar sus ideas con otras mentes agudas le era valiosísima. Empezó a publicar los trabajos de sus estudios en uno de los principales diarios científicos, y se centró en la cuestión que tanto le intrigaba: ¿cómo sería viajar a la velocidad de la luz?*

*Con 26 años, en 1905, publicó cuatro trabajos científicos. En uno postula los cuanta de luz, para explicar el efecto fotoeléctrico. El segundo trabajo era acerca del movimiento browniano. Sin duda el trabajo más importante fue el titulado «Acerca de la electrodinámica de los cuerpos en movimiento», donde expone la relatividad especial. En él plantea dos postulados que tienen inmensas consecuencias:*

*\* Todos los observadores que se mueven entre sí con velocidad constante son equivalentes en lo que a las leyes de la física se refiere. Este es el principio de relatividad que excluye la noción de espacios y tiempos absolutos que anteriormente había postulado Newton.*

*\* La velocidad de la luz en el vacío es la misma para todos los observadores, 299792,458 Km/s, y es independiente del movimiento relativo entre la fuente de luz y el observador. Este postulado explica el resultado negativo del experimento de Michelson y Morley. En esos primeros años Einstein plantea su famosa relación  $E = mc^2$ , el producto de la masa por el cuadrado de la velocidad de la luz dan la energía asociada a una masa m. Masa y energía son dos formas equivalentes. Esto produjo una gran revolución en nuestra comprensión de la física del Sol y las estrellas, y constituye la base de la energía nuclear.*

*El 1909 es nombrado profesor del Instituto Politécnico de Zurich, y desarrolla una gran actividad docente en Praga y Berlín, trabajando simultáneamente en la generalización de su teoría. En 1911, formula el principio de equivalencia entre un movimiento acelerado y un campo gravitacional.*

*Cuatro años después, separado ya de su esposa con la que había tenido dos niños, contrajo su segundo matrimonio con su prima Elsa Einstein. En 1916, da a conocer su Teoría General de la Relatividad, en un periodo lleno de alegría. Escribió a uno de sus amigos: "en el curso de este último mes he vencido el periodo más excitante de mi vida y el más fructífero". En*

*la Relatividad General, da forma geométrica a la gravitación. Una masa deforma la red del espacio-tiempo a su alrededor; y Einstein proporciona las matemáticas que permiten calcular punto a punto la "geometría" en la vecindad de una masa.*

*La primera comprobación empírica de la teoría de la relatividad ocurrió cuando mediciones hechas durante el eclipse total de Sol de 1919 demostraron que sus cálculos, sobre la curvatura de la luz en presencia de un campo gravitatorio, eran exactos. Cuando se dieron a conocer los resultados en la Royal Society de Londres, su presidente expresó emocionadamente: "No se trata en este caso del descubrimiento de una isla alejada del mundo, sino de todo un nuevo continente de nuevas ideas científicas. Es el más grande descubrimiento concerniente a la gravitación que se haya hecho después que Newton enunció sus principios".*

*Pero su vida volvió a recibir un duro golpe, la muerte de su hijo Eduardo y de dos de sus hijas: Ilsa y la que había tenido con su primera esposa Mileva, hicieron que la gloria se manchara de dolor.*

*Albert Einstein fue galardonado con el Premio Nobel de Física en el año 1921, por sus investigaciones sobre el efecto fotoeléctrico y sus grandes aportaciones en el terreno de la física teórica.*

*Desde comienzos de los años '30, y con el surgimiento en Alemania del nazismo, su vida se caracterizó por sus continuos viajes obligados, protegiéndose del régimen gobernante alemán, y por su decidida oposición a éste. Vivió en Coq, Bélgica, accediendo a una invitación de los reyes. Estuvo asimismo en Francia y Gran Bretaña, para finalmente echar raíces en Estados Unidos y, desde 1933, establecerse en Princeton. Allí falleció en 1936 su segunda esposa. En 1940, obtuvo la nacionalidad norteamericana y, hasta su muerte, acaecida el 18 de abril de 1955, Einstein trabajó por integrar en una misma teoría las cuatro fuerzas de la naturaleza: gravedad, electromagnetismo y las subatómicas fuerte y débil.*

*Einstein escribió numerosos artículos de divulgación para revistas científicas, dictó conferencias que transcribieron, y algunos libros. Los títulos más destacados: Electrodinámica de los cuerpos en movimiento, Fundamentos de la teoría de la relatividad general, Sobre la teoría del campo unificado, Mis ideas y opiniones, La física, aventura del pensamiento, esta última obra escrita en colaboración con Leopold Infeld.*

*Albert Einstein fue un científico excepcional, un genio, con la misma intuición física que Newton, con una pasión descomunal por las Matemáticas y la Física. Pero fue también un defensor acérrimo de la paz, de los derechos humanos, de la vida... Temió por las consecuencias de sus teorías en el campo de la energía nuclear, por la errónea proyección que*

*se les podía dar en la carrera armamentística, durante la trágica II Guerra Mundial. Y prueba de esto es la carta que escribió al presidente Roosevelt en 1939, una buena forma de rematar la biografía de este gran científico que, ante todo, fue una buena persona.*

## *Carta de Einstein al Presidente Roosevelt*

*Preludio de la bomba atómica.*

*(Traducción de la transcripción del documento público)*

*Albert Einstein*

*Old Grove Rd. Nassau Point*

*Peconic, Long Island*

*2 de Agosto de 1939*

*F. R. Roosevelt*

*President of the United States*

*White House*

*Washington, D.C.*

*Señor:*

*Algunos recientes trabajos de E. Fermi y L. Szilard, los cuales me han sido comunicados en manuscritos, me llevan a esperar, que en el futuro inmediato, el elemento uranio puede ser convertido en una nueva e importante fuente de energía. Algunos aspectos de la situación que se han producido parecen requerir mucha atención y, si fuera necesario, inmediata acción de parte de la Administración. Por ello creo que es mi deber llevar a su atención los siguientes hechos y recomendaciones.*

*En el curso de los últimos cuatro meses se ha hecho probable -a través del trabajo de Loiot en Francia así como también de Fermi y Szilard en Estados Unidos- que podría ser posible el iniciar una reacción nuclear en cadena en una gran masa de uranio, por medio de la cual se generarian enormes cantidades de potencia y grandes cantidades de nuevos elementos parecidos al uranio. Ahora parece casi seguro que esto podría ser logrado en el futuro inmediato.*

*Este nuevo fenómeno podría ser llevado a la construcción de bombas, y es concebible -pienso que inevitable- que pueden ser construidas bombas de un nuevo tipo extremadamente poderosas. Una sola bomba de ese tipo, llevada por un barco y explotada en un puerto, podría muy bien destruir el puerto por completo, conjuntamente con el territorio que lo rodea. Sin embargo, tales bombas podrían ser demasiado pesadas para ser transportadas por aire.*

*Los Estados Unidos tiene muy pocas minas con vetas de uranio de poco valor, en cantidades moderadas. Hay muy buenas vetas en Canadá, la ex-Checoslovaquia, mientras que la fuente más*

*importante de uranio está en el Congo Belga.*

*En vista de esta situación usted podría considerar que es deseable tener algún tipo de contacto permanente entre la Administración y el grupo de físicos que están trabajando en reacciones en cadena en los Estados Unidos. Una forma posible de lograrlo podría ser comprometer en esta función a una persona de su entera confianza quien podría tal vez servir de manera extra oficial. Sus funciones serían las siguientes:*

*a) Estar en contacto con el Departamento de Gobierno, manteniéndolos informados de los próximos desarrollos, y hacer recomendaciones para las acciones de Gobierno, poniendo particular atención en los problemas de asegurar el suministro de mineral de uranio para los Estados Unidos.*

*b) acelerar el trabajo experimental, que en estos momentos se efectúa con los presupuestos limitados de los laboratorios de las universidades, con el suministro de fondos. Si esos fondos fueran necesarios con contactos con personas privadas que estuvieran dispuestas a hacer contribuciones para esta causa, y tal vez obteniendo cooperación de laboratorios industriales que tuvieran el equipo necesario.*

*Tengo entendido que Alemania actualmente ha detenido la venta de uranio de las minas de Checoslovaquia, las cuales han sido tomadas. Puede pensarse que Alemania ha hecho tan claras acciones, porque el hijo del Sub Secretario de Estado Alemán, von Weizacker, está asignado al Instituto Kaiser Guillermo de Berlín donde algunos de los trabajos americanos están siendo duplicados.*

*Su Seguro Servidor,  
A. Einstein*

## ***Teoría de la Relatividad Restringida o Especial***

Después del experimento fallido de Michelson y Morley, de la explicación como doga de fe que le dio Lorentz sin justificarla, de las incompatibilidades que sufrían las ecuaciones de Maxwell para sistemas estáticos o en movimiento... Einstein fue más allá, y consiguió resolver todos los problemas de una forma sencilla.

En la mecánica newtoniana, una masa de un kilogramo, una duración de un segundo y una distancia de un metro, si son medidas con precisión, seguirán midiendo lo mismo independiente del sistema de referencia que se tome. Esto parecía algo evidente, que ni siquiera había que demostrar... Pero las incongruencias con las que se encontraron los grandes científicos del siglo XIX, necesitaban de una solución nueva que ni siquiera podían imaginar.

Y es entonces cuando la genialidad de Einstein, en ese momento dubitativo y escabroso para la Física, entró en escena y pudo dar forma a las elucubraciones de Lorentz, Poincaré, Maxwell,

Minkoski y otros muchos. Se atrevió a postular, afirmar, demostrar, que la base de la mecánica de Newton era errónea... que la piedra filosofal que buscaban estaba en admitir que la única constante del Universo era la velocidad de la luz, independiente de todo observador. Y en consecuencia, que todas las demás variables, como espacio, masa, tiempo... dependían del sistema de referencia. Además, introdujo una relación inesperada: la energía y la masa son el mismo objeto físico, es decir, la energía es masa ultra diluida y la masa es energía ultra concentrada. Así, se abrían las puertas para nuevas concepciones de la realidad, y se cerraban para los problemas antes descritos.

Pero esto no desacreditó el trabajo de las mentes que años, décadas y siglos antes habían desarrollado. La mecánica newtoniana y la teoría del electromagnetismo, que llega a su culminación con Maxwell, no eran erróneas del todo. De hecho, eran perfectamente aplicables en el marco en el que habían sido utilizadas, con velocidades medias comedidas. El problema era cuando las velocidades de los objetos a estudiar se acercaban a la de la luz, que se obtenían datos incoherentes y aparentemente erróneos.

De esta forma, si imaginamos un metro de medición que estuviera animado con una velocidad de 270.000Km/s, que tuviera 1Kg de masa y que portara un reloj, ocurrirían tres hechos sorprendentes:

- Su longitud, con respecto al metro en reposo se reduciría a la mitad, 0,5m.
- Su masa se incrementaría al doble, 2Kg.
- Y su reloj contaría 30min mientras un reloj en reposo contara 60min.

Dos son los postulados que enunció Einstein a la luz de los acontecimientos que acaecieron en la Física del siglo XIX, y que fueron formulados basados, por una parte, en evidencias experimentales y, por otra, en profundas y lógicas deducciones teóricas.

**1.- *El Principio Universal de la Relatividad*:** las leyes de todos los fenómenos físicos tienen la misma expresión entre sí en los sistemas inerciales.

Este principio es la generalización hacia toda la Física del «Principio de Relatividad de Galileo» para la mecánica. Sostiene la imposibilidad de detectar el movimiento uniforme de un sistema, mediante la realización en su interior de cualquier experimento físico.

**2.- *La independencia de la velocidad de la luz:*** la velocidad de la luz en el vacío es independiente de la velocidad del objeto emisor y del observador.

Este principio puede ser extendido a fotones, a partículas cuya masa en reposo es nula... Por lo que las trasformaciones de Lorentz se aplican no sólo a partículas cargadas, sino a todo objeto.

Indudablemente, como se ha dejado entrever anteriormente, el escenario en el que es aplicable esta teoría sólo consta de movimientos uniformes y rectilíneos. Sin embargo, en el universo real, donde actúa la fuerza de la gravedad, los movimientos son acelerados, tanto el de la manzana que cae a tierra como el de los planetas en su traslación alrededor del Sol. Esto Albert Einstein lo asume en su Teoría de la Relatividad General, que se desarrollará más adelante, cuando la que nos ocupa sea totalmente abstraída y comprendida.

### *El Principio Universal de la Relatividad*

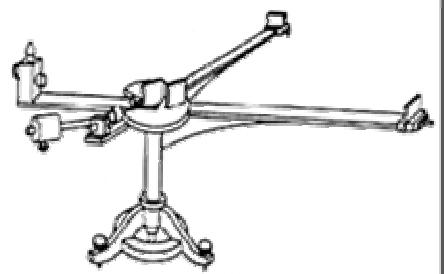
En el año 1887, Michelson y Morley tuvieron el honor de confeccionar uno de los experimentos fallidos más importantes de la historia. Su objetivo era verificar que la velocidad de la luz era variable, según si se medía en la dirección y sentido del movimiento orbital de la Tierra o perpendicularmente a Ella. Desgraciadamente para ellos, pero afortunadamente para la Ciencia, la repetición de su experimento varias veces no hizo que la conclusión negativa cambiara: la velocidad de la luz era independiente del movimiento del observador... El concepto del Éter empezaba a desvanecerse.

## Experimento de Michelson y Morley

Una lámina semirrefectora divide el haz de una fuente luminosa en dos rayos, que recorren luego caminos iguales; el rayo 1, en el sentido de la translación de la Tierra; el rayo 2 perpendicularmente a esta dirección, siendo reflejado cada uno por un espejo (véase la figura). Los dos rayos que parten simultáneamente de 0, ¿volverán a ese punto en el mismo instante? Así sucedería, si el aparato se quedara en reposo en el éter; sin embargo, está llevado a través del éter por la translación de la Tierra. De ello resulta –como lo muestra un simple cálculo– que el rayo 1, que se desplaza primero en la dirección del viento etéreo y después en contra del mismo, llega al punto de partida un poco más tarde que el rayo 2, que se propaga, de ida y vuelta, a través de la corriente etérica. Al reunirse los dos rayos, la diferencia del tiempo de recorrido se revelaría.



Interferómetro utilizado por Michelson y Morley para medir la velocidad de la luz.



Primer Interferómetro de Michelson

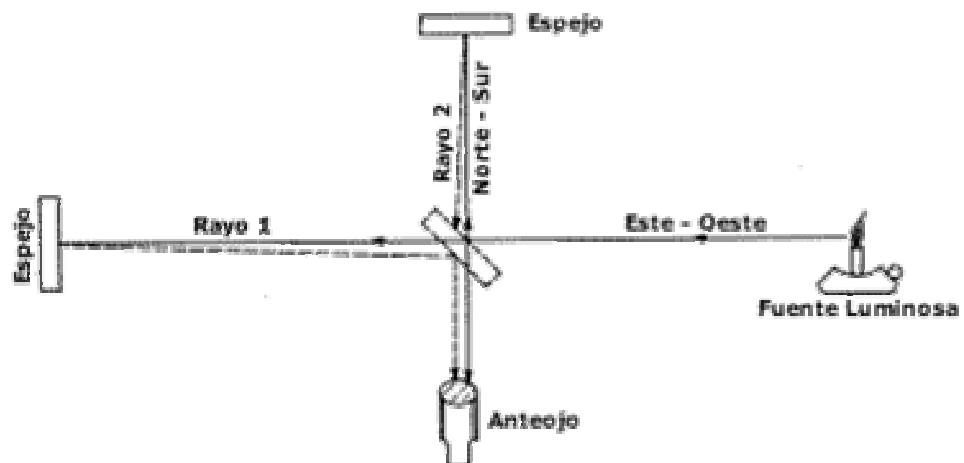


Fig.04.01.01

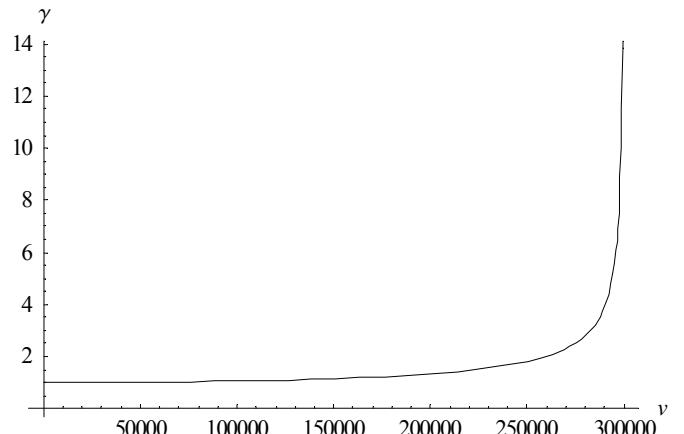
Hendrik Lorentz, en un intento por explicar este fenómeno, se basó en que la Tierra arrastraba consigo al Éter (tal y como había supuesto medio siglo antes George Gabriel Stokes). De esta forma, la velocidad de la luz debía ser constante. Pero por aquellos años, estaba ya claro que esta hipótesis era incompatible con la aberración de la luz; el Éter debía permanecer siempre inmóvil.

Pero Lorentz se mantuvo en su postura e ideó una forma de transformar las coordenadas de espacio y tiempo, para poder compatibilizar este hecho con su teoría general del electromagnetismo. Así, pudo conseguir que las ecuaciones de Maxwell se vieran invariantes ante medidas realizadas desde sistemas de referencia fijos y en movimiento. Son como las transformaciones de Galileo para la mecánica, pero con una salvedad: desechan el carácter absoluto de distancia y duración formulados por Galileo.

Como los electrones comportan la naturaleza eléctrica de toda materia, el movimiento de los objetos hace que los campos que crean se vean modificados, y produzcan a su vez cambios en las posiciones y hasta en las masas relativas de los electrones. Según Lorentz, estos cambios afectan a las dimensiones longitudinales del objeto en movimiento, sin alterar las trasversales, por lo que queda explicado el experimento de la luz: en el interferómetro de Michelson el acortamiento de la longitud material subyacente a la trayectoria del rayo 1 –el que se propaga en el sentido del movimiento de la Tierra– compensaría exactamente la diferencia de las velocidades, y anularía el efecto previsto.

El *factor de Lorentz*, aplicado a variables de espacio, masa y tiempo, es el siguiente:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$



Gráfica del factor de Lorentz

(Siendo  $c$  la velocidad de la Luz, es decir, 300.000Km/s)

De esta forma, utilizando las transformaciones de Lorentz, se pueden calcular las variaciones de longitud, masa y tiempo:

$$t' = \frac{t}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad L' = L \cdot \sqrt{1 - v^2/c^2} \quad m' = \frac{m}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Como se puede observar, el tiempo y la masa sufren un alargamiento relativista, al contrario que la longitud, que se ve contraída.

No obstante, y sin despreciar en absoluto el trabajo genial de Lorentz, la interpretación que le dio al experimento fallido de Michelson y Morley no fue la adecuada, ya que identificó el Éter inmóvil con el espacio absoluto. Ideó su hipótesis de contracción para afirmar que el movimiento de éste (espacio absoluto) era imposible de medir, ya que la existencia de éste era indemostrable. En consecuencia, como hay una contracción lorentziana, la existencia del éter (de nuevo referido también al espacio absoluto) debe permanecer indemostrable. Por tanto, la argumentación de Lorentz se sostiene en una hipótesis auxiliar que no tiene base, que está inventada a propósito, por lo que carece de credibilidad.

### **El problema del Éter**

En la mecánica newtoniana, se admitían el espacio y tiempo absolutos, pero sólo podían advertirse con movimientos acelerados. Esta hipótesis de un sistema de referencia absoluto era incompatible, a la vez, con la necesidad de definir experimentalmente ese sistema, que ocupase en el espacio la misma posición de forma indefinida. Aunque en la práctica bastaba con admitir que el Sol, por ejemplo, era totalmente estático, y que el movimiento de los planetas representaba un reloj absoluto. Por lo que era prescindible la idea del Éter, no importaba que el espacio estuviera vacío o lleno de una sustancia inmóvil...

Por otro lado, en cambio, la existencia del Éter era totalmente imprescindible. Dentro de los campos del electromagnetismo y de la óptica, era sabido que las ondas necesitaban un medio para propagarse. Entonces era totalmente lógico pensar que el Éter era el medio que utilizaba la luz para propagarse.

Con todo, había una contradicción a cerca de la existencia de esta sustancia, de sus propiedades, de sus efectos, y además se admitían dos hipótesis a la vez:

- La materialización del espacio absoluto de la mecánica se da por un medio continuo, el Éter, desprovisto de masa, cuyas vibraciones, provocadas por los movimientos de las cargas eléctricas, constituyen la luz; estas vibraciones se transmiten gradualmente a una velocidad que es una constante absoluta cuando el éter no está mezclado con ningún otro medio material; el éter no tiene ningún movimiento aparte de estas vibraciones.

- Por consiguiente, mientras que ninguna experiencia basada en las solas leyes de la mecánica puede hacer patente la velocidad (si es uniforme) de un cuerpo respecto al espacio

absoluto, tal experiencia sí sería compatible con las leyes del electromagnetismo y de la óptica y, por consiguiente, en principio realizable con ayuda de fenómenos de esta naturaleza.

Estas hipótesis hicieron que muchos científicos realizaran experimentos de la línea del de Michelson y Morley, y provocaron que se llegara a una dificultad insalvable.

Einstein, como ya introducía en su artículo en 1905 “Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento”, publicado en el prestigioso periódico alemán “Anales de la Física”, postuló varias ideas que aclaraban el panorama científico del siglo XIX, y que posteriormente se convertirían en la Relatividad Especial.

Estableció la velocidad de la luz como una constante independiente del observador, con lo que quedaba aclarado el desastroso final del experimento de Michelson y Morley; y para solucionar los problemas consecuentes con la Física Clásica, generalizó en Principio de Relatividad galileo-newtoniano (confiriéndole universalidad) para que las leyes de la Naturaleza tuvieran una formulación equivalente en todos los sistemas de inercia. Así, desterró por completo de la base de la mecánica el espacio y tiempo absolutos, y afirmó que aquél estado de movimiento perceptible es aquél que se hace respecto a un observador.

El Éter por tanto no tiene ningún sentido, un Sistema de Referencia Absoluto es absurdo, satisfaciendo así la primera hipótesis. Pero, además, aceptando la contracción relativista, hace que la teoría del electromagnetismo no tenga ningún problema, adquiriendo para sí las trasformaciones de Lorentz; pero con un sentido totalmente diferente, claro está.

Por último, le da un vuelco a la idea que se tenía de la naturaleza de la luz, ya que no es algo que se desprende del estado de un medio hipotético, sino como algo que existe de por sí, como la materia o la energía.

### *La independencia de la velocidad de la luz*

Este firme postulado venía acompañado de una no menos sorprendente consecuencia: la velocidad de la luz (299.792,458 Km/s) es el límite para todo acontecer en el Universo, ninguna señal o fuerza puede propagarse más rápido.

Esto no fue fácil de asumir, porque para la cinemática galileana si una aceleración continuaba, se alcanzaría más y más velocidad, sin ningún tipo de límite. Pero, si nos detenemos en

las trasformaciones de Lorentz, podremos advertir que si alcanzamos  $c$ , nuestra masa sería infinita. Jamás podríamos llegar a acercarnos a un rayo de luz y verlo “más despacio” a nuestro lado, porque para nosotros el tiempo se ralentizaría incommensurablemente, y no notaríamos tal efecto.

La velocidad de la luz es un límite que no se puede alcanzar, nada puede viajar a esa velocidad si no lo hace de por sí. Además, si se alcanzara, hipotéticamente, se haría con una masa infinita y el tiempo se pararía, si se supera, el tiempo sería imaginario y retrocedería... es el turno de la ciencia-ficción... ¿o de la realidad?

### *Equivalencia de Masa y Energía*

$$E=m \cdot c^2$$

Esta equivalencia requiere la comprensión primero de dos grandes principios de conservación de la Física, que durante siglos fueron una base inamovible y certera del conocimiento.

Por una parte, tenemos el Principio de la Conservación de la Energía, enunciado por Gottfried Wilhelm Leibnitz en tiempos tan lejanos como el siglo XVII, y fue desarrollado en el siglo XIX esencialmente como corolario de un principio de la mecánica. Al existir dos tipos de conservación, de la energía mecánica y térmica, al final se consiguió la fusión de los dos principios en uno sólo, y extenderse a procesos tanto físicos, químicos o electromagnéticos. De esta forma, existía una suma de energías en nuestro sistema físico que se mantenía constante a través de todos los cambios que se produjeran.

Y por otra, el Principio de la Conservación de la Masa. Esta magnitud tenía dos acepciones, que en la práctica tomaban valores iguales: la masa inerte, como la resistencia que opone un cuerpo a su movimiento; y la masa pesante, como el peso másico.

Además, se deben tener en cuenta dos teorías de la conservación de ciertas cantidades de la Mecánica de la Teoría Galileana, como son:

- Conservación del Momento Lineal de un Sistema (P): el Momento Lineal total de un sistema de  $n$  partículas, que es la suma de los momentos lineales particulares, se conserva.

$$\vec{P}_t = \sum_{i=1}^n \vec{p}_i = \sum_{i=1}^n m_i \cdot \vec{V}_i = cte$$

*Que con el factor de Lorentz, quedaría:*

$$\vec{p}_i = \gamma \cdot m_i \cdot \vec{V}_i$$

- Teorema de Fuerzas Vivas: la Energía Cinética total de un Sistema de n partículas, es constante, siendo la suma de la Energía Cinética particular de cada una.

$$E_k = \sum_{i=1}^n E_i = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \cdot m_i \cdot V_i^2 = cte$$

*Que con el factor de Lorentz, quedaría:*

$$E_i = (\gamma - 1) \cdot m_i \cdot c^2$$


---

*Podemos expresar la Energía total de una partícula como:*

$$E = mc^2 = g m_0 c^2,$$

*Donde la cantidad m es una masa variable,*

$$m(v) = g m_0$$

*En que  $m_0$  corresponde a la masa de un sistema en reposo o propia, conocida como «masa en reposo». De esta manera, y evaluando la energía total de un sistema en reposo [con  $g(0) = 1$ , para  $v = 0$ ] se obtiene la energía equivalente a su masa:*

$$E(v=0) = g(0) m_0 c^2$$

*Por otro lado, la energía total en un sistema en movimiento puede expresarse como la suma de la «energía en reposo»,  $m_0 c^2$ , más la energía cinética relativa:*

$$E = m_0 c^2 + (g - 1) m_0 c^2$$

*Pero la expresión  $E = mc^2$  encierra mucho más que lo que hasta ahora hemos analizado. Por ejemplo, es importante estudiar desarrollos para llegar a estimar lo que se suele llamar la «ENERGÍA INTRÍNSECA DE EINSTEIN». Para ello, partamos de la siguiente expresión:*

$$G M_u / R_u = c^2$$

*Si procedemos a afectar a ambos términos por una masa cualquiera  $m_0$ , se tiene que:*

$$G M_u m_0 / R_u = m_0 C^2$$

*En esa expresión, el término de la izquierda representa la energía potencial gravitatoria universal que genera la totalidad de la estructura másica del universo hacia una masa dada  $m_0$  y,*

el término de la derecha, equivale a la energía intrínseca de Einstein referida a  $m_0$ . Así considerado el problema, la energía que produce  $E = mc^2$  se generaría a partir de la energía potencial de todas las masas del universo, o sea  $E = mc^2$  representa la energía de una masa dada, en relación a todas las restantes masas del universo. La expresión [04.10.07] expresada en el sistema de unidades naturales generalizado (S.U.N.G.), donde  $G$  equivale a:

$$G = \bar{\gamma} c^3 R_p / M_p$$

Conduce a:

$$\frac{GM_o m_o}{R_o} = \left[ \frac{\bar{\gamma} c^2 \lambda_p}{M_p} \right] \left[ \frac{M_p N}{\bar{\gamma}} \right] \left[ \frac{1}{\lambda_p N} \right] \left[ \frac{m_o}{1} \right] = m_o c^2$$

Reordenando y anulando se llega a la expresión [04.10.07] como se observa a continuación:

$$\frac{GM_o m_o}{R_o} = \frac{\bar{\gamma} M_p N \lambda_p c^2 m_o}{\bar{\gamma} M_p N \lambda_p} = m_o c^2$$

El desarrollo anterior, pone en evidencia que esta enorme energía potencial confinada en los núcleos de una masa dada es responsable de las intensas fuerzas nucleares, y que, por otra parte, fuera tan difícil su percepción tiempo atrás, ya que no había forma de liberarla.

### *Red Espacio-Tiempo*

La lógica humana había ideado un espacio separado del tiempo, dos variables que no tenían nada en común, que se podían tratar por separado. Pero la revolución de Einstein llevó a construir una red espacio-tiempo tetradimensional continua por todo el Universo, dando tanta importancia al tiempo como a las coordenadas de espacio.

Pero quien consiguió dar forma matemática a esta bella teoría, fue el matemático Hermann Minkowski, que un año antes de su muerte dio una interpretación geométrica a la Teoría Restringida, reuniendo las 4 variables en un continuo. Así, los Sistemas de Referencia Galileanos, formados por triédros trirrectangulares en el espacio, ceden su lugar a los constituidos por tetraedros rectangulares, en los que el tiempo representa una cuarta dimensión imaginaria.

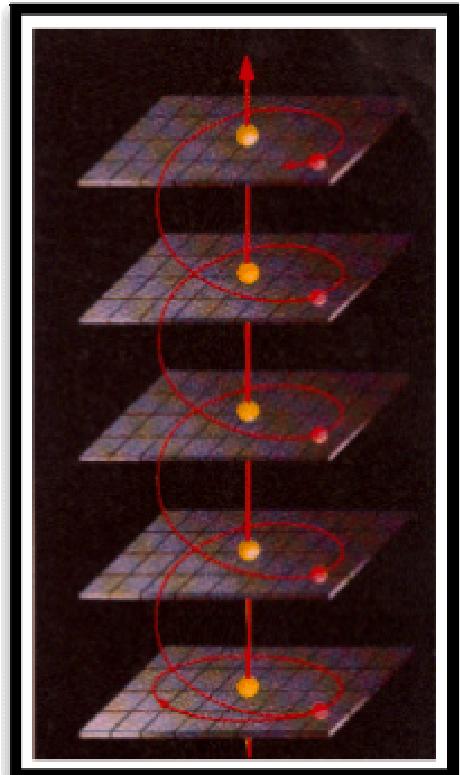
Un ladrillo, por ejemplo, ya no es un objeto constituyente de una pared, sino un “suceso”, ya que es un cúmulo de partículas en el espacio que se mantienen en la misma posición durante ciertos instantes de tiempo. Una partícula ya no se caracteriza sólo por su posición, sino por un cúmulo de sucesos, siendo cada uno de éstos su presencia en un instante en un lugar determinado.

La asociación del espacio y del tiempo en un indisoluble continuo permite definir una magnitud que no depende del estado de movimiento del observador; el intervalo que separa dos sucesos dados es el mismo para todos los observadores, aun cuando las longitudes y las duraciones que median entre ellos fueran, para sistemas con distintos movimientos, tan diferentes como se quiera. Sea  $t$  la duración y  $l$  la longitud que separan dos sucesos, en dos sistemas dotados de movimientos uniformes; aunque ambas magnitudes son variables de un sistema a otro, la cantidad  $s^2 = c^2 t^2 - l^2$ , donde  $c$  es la velocidad de la luz, tiene el mismo valor en todos los sistemas. Si  $x, y, z$  son las tres coordenadas del espacio, y  $t$  la del tiempo, la expresión:

$$ds^2 = c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2$$

Define el intervalo  $ds$ , entre dos sucesos infinitamente cercanos.

En la metodología del desarrollo, se debe hacer la distinción entre dos categorías de intervalo: temporal y espacial; aun cuando dos acontecimientos sigan uno al otro en un décimo de segundo, la luz, cuyo trayecto mide el tiempo, ya habrá recorrido 30.000 Km.. De este modo, en casi todos los sucesos que pueden tener lugar en la Tierra,  $ct$  será  $> l$ . Ahora, el orden como se dan tales sucesos (intervalo temporal) es idéntico para todos los observadores; tales sucesos pueden estar en la conexión de causa y efecto. Sin embargo, no puede haber nexo causal alguno si  $l < ct$ , es decir, cuando la distancia que separa los dos eventos –por ejemplo, un acontecer terrestre y un fenómeno cósmico– es tan grande que la luz que parte de uno



*La ilustración de arriba, representa a un planeta que cada vez que orbita por su órbita regular traza su línea de universo a través de un diagrama del espacio-tiempo de Minkowski modificado. En cada uno de los planos, el correspondiente cuadriculado denota la posición relativa del planeta con respecto a una estrella en el centro, incorporando dos de las tres dimensiones espaciales. La tercera dimensión –altura por encima y/o por debajo de la estrella– no puede mostrarse en el diagrama, dado que en el dibujo el eje vertical representa el tiempo. Los planos apilados representan los sucesivos años en que el planeta orbita por el mismo lugar del espacio una y otra vez.*

no puede llegar al otro. Como ninguna causa física puede propagarse más rápidamente que la luz, ninguno de los dos acontecimientos puede haber influido sobre el otro. Su orden de sucesión, diferente para observadores ubicados en distintos lugares del universo, quedará indeterminado, merced al intervalo espacial que los separa. Función de la distancia y la duración, el intervalo resultante, constante, de componentes variables, nos brinda la preciosa propiedad de la invarianza; en un mundo de relatividades, representa una magnitud absoluta.

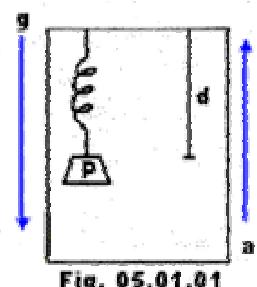
## ***Teoría de la Relatividad General***

### ***Principio de Equivalencia***

La Mecánica Clásica establece una distinción, como ya hemos explicado, entre masa pesante y masa inercial: la gravedad actúa sobre la primera, y la resistencia que todo cuerpo ofrece a variar su movimiento manifiesta la segunda.

Pero Einstein predijo que era indistinguible el efecto sobre un cuerpo creado por un campo gravitacional que el creado por la aceleración de ese mismo cuerpo; es decir, la característica más importante de la gravedad es que no se puede discernir entre masa inercial y gravitacional.

Ahora bien, para entender mejor lo que Einstein nos lega en esto, imaginémonos una caja cerrada, en la que se encuentra el observador (ver figura a la izquierda). La caja está provista de un resorte en espiral, pendiente del cielorraso, y del cual está colgada una pesa metálica. El observador ha medido la distancia  $d$ , que separa a la pesa del cielorraso. Supongamos que la caja sea elevada por una cuerda, como un ascensor, en la dirección de la flecha  $a$ . El observador notaría entonces un cambio, producido por el movimiento en el interior de la caja: la longitud del resorte –a causa de la inercia de la pesa– aumentaría, indicando que los cuerpos en la caja pesan más que antes. Si nuestro observador dispusiera de un péndulo, advertiría que sus oscilaciones son más rápidas. ¿Cuál es la interpretación que el observador encerrado en la caja daría a esos fenómenos? Le será difícil decidirse entre las dos interpretaciones siguientes:



**Fig. 05.01.01**

1) Su caja se encuentra en movimiento, con una velocidad no uniforme, en un espacio vacío, en el que no existen masas gravitacionales. Los fenómenos son debidos al movimiento acelerado de su caja;

2) Su caja se encuentra en reposo, en un campo gravitatorio. Los fenómenos son debidos a la atracción de masas gravitacionales.



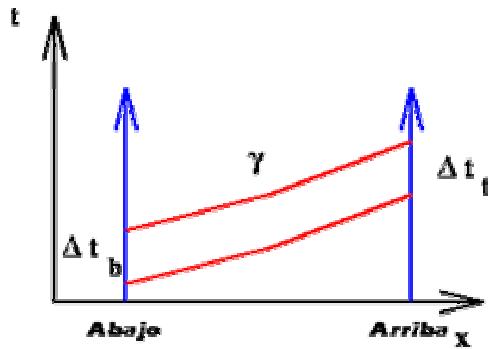
**Viajando por el espacio:** La ilustración de la izquierda, representa a una cápsula espacial cerrada que viaja a la deriva por el cosmos con un pasajero en el interior de ella. El viajero de la cápsula sólo puede explicar sus sensaciones y el comportamiento de los objetos de su equipaje estrictamente en términos de aceleración, concurriendo a la hipótesis de que está realizando un viaje por el espacio profundo en una nave. Cuando está flotando ingravido, puede imaginar que la cápsula espacial viaja a una velocidad constante; cuando se siente sujetado firmemente contra una superficie que de pronto se convierte en «piso» (segunda figura de la izquierda), puede significar que se ha incrementado la velocidad de crucero de la cápsula. Si deja caer dos pelotas en esas condiciones, su percepción será la de que el suelo, a todos los efectos, acelera a su encuentro.

Una vez comprendido lo que implica este principio, es conveniente darle la forma matemática adecuada, que por supuesto guarda una estrecha relación con Minkowski.

Se sabe que en un Sistema de Referencia Inercial, una partícula sólo ve afectada su situación si experimenta la acción de una fuerza (1<sup>a</sup> Ley de Newton). Un cuerpo cae con una aceleración independiente de su masa, y no rota en su caída, o por lo menos no lo hace localmente (nos referimos a regiones en las que el campo gravitacional observable es ínfimo). Así, se deduce la siguiente afirmación del Principio de Equivalencia:

1.- *No hay experimentos locales que puedan distinguir una rotación en una caída libre en el espacio con movimiento uniforme en ausencia de un campo gravitacional.*

Analicemos esta primera afirmación con la ayuda del experimento de Pound-Snider:



Las flechas verticales señalando abajo y arriba corresponden a líneas de universo y representan a la luz en reposo. El movimiento de la luz es representado por las líneas rojas, considerando la posibilidad de que la gravedad puede actuar sobre la luz, deflectándola desde una trayectoria desconocida. Pero no importa cómo la luz es afectada por la gravedad, ya que el efecto debe producirse en ambas crestas de la onda, puesto que el campo gravitacional no es dependiente del tiempo. En consecuencia, las trayectorias de las dos crestas son congruentes, lo cual se extrae de esta hipotética geometría de Minkowski:

$$\Delta t_a = \Delta t_b$$

Pero se sabe que  $Dt = \frac{1}{v}$  y el experimento de Pound-Snider señala que  $n_b > n_t$ , y se conoce que  $Dt_t > Dt_b$ . Por lo tanto, la respuesta que da el uso de la geometría de Minkowski es incorrecta o el sistema de referencia en la Tierra no es inercial y, con ello, se arrincona a la teoría de la relatividad restringida... Por supuesto que no. Ya se ha dicho que un sistema en particular no necesariamente es inercial. Existen sistemas inerciales en un sentido estricto, pero antes de llegar a definirlos es necesario primero, como veremos más adelante, considerar los efectos de la estructura física de un cuerpo.

Hecha la precisión, retomemos el estudio del experimento de Pound-Snider. Asumamos la existencia de un sistema de referencia particular en reposo cuando el fotón comienza su viaje y después cae libremente. Dado que el fotón asciende hasta una distancia  $h$ , toma el tiempo  $Dt = \frac{h}{c}$  para llegar hasta arriba. Durante ese lapso de tiempo, el sistema adquiere una velocidad de caída de  $n = gDt = \frac{gh}{c}$ .

Ahora bien, para poder calcular la frecuencia del fotón concerniente al sistema en caída libre, usemos la siguiente fórmula que se aplica en el corrimiento al rojo:

$$\frac{\nu_{ff}}{\nu_t} = \sqrt{\frac{1 + gh/c^2}{1 - gh/c^2}} \approx 1 + \frac{gh}{c^2},$$

En que:

$$\begin{aligned}\nu_{ff} &= \nu_t \left(1 + \frac{gh}{c^2}\right) \\ &\approx \nu \left(1 + \frac{gh}{c^2}\right) \left(1 - \frac{gh}{c^2}\right) \approx \nu,\end{aligned}$$

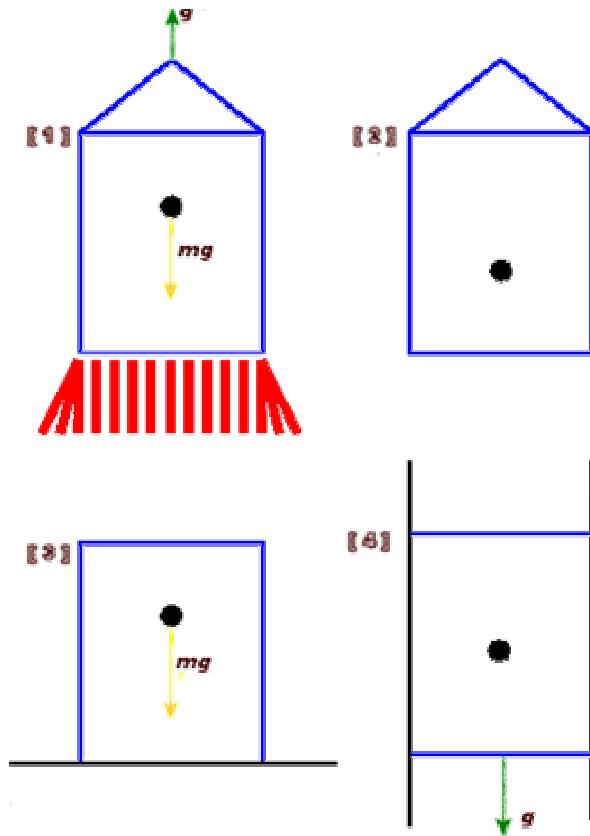
El hecho de que no aparezcan términos de orden más alto, implica la inexistencia de corrimiento al rojo en un sistema de caída libre, lo que expresa la presencia de un sistema inercial local.

Por otro lado, Einstein se fijó mucho en la Mecánica Newtoniana, y concretamente en la fuerza que experimentan dos cuerpos al caer:  $m_1g$  y  $m_2g$ . Y así, consiguió comparar la fuerza de atracción de un cuerpo cayendo  $mg$  y la fuerza inercial  $ma$ , obteniendo la segunda afirmación del Principio de Equivalencia:

*2.- Un sistema acelerado lineal concerniente a un sistema inercial de la relatividad restringida o especial es localmente idéntico a un sistema en reposo en un campo gravitacional.*

Las dos versiones del principio de equivalencia que hemos descrito, pueden ser comprendidas con claridad, concurriendo al famoso experimento de pensamiento de Einstein, conocido como «gedanken» (experimento de ascensión).

Imaginémonos a un observador encapsulado herméticamente sin comunicación alguna con el mundo exterior. No obstante, el observador puede usar equipamiento para realizar experimentos dinámicos simples dentro de la cápsula en que se halla. El objeto de este ejercicio es intentar determinar el estado de los observadores en movimiento. Consideraremos cuatro casos (véase la figura).



*Caso 1:* La cápsula es impulsada fuera de la Tierra en una trayectoria espacial que la orienta lejos de la influencia gravitatoria de objetos que pueblan el espacio. El cohete es propulsado hacia adelante con una aceleración constante  $g$  relativa a un observador inercial. El observador lanza una pelota y la ve caerse al piso con una aceleración  $g$

*Caso 2:* El cohete de la cápsula es apagado de manera tal que la trayectoria de la nave continúe su ascensión con un movimiento uniformemente relativo al observador inercial. La pelota que fue lanzada anteriormente adquiere un estado en reposo relativo con respecto al observador en ascenso.

*Caso 3:* La cápsula adquiere una trayectoria hacia la superficie de la Tierra y se ubica en un lugar donde los movimientos rotatorios y orbitales son imperceptibles. En este caso, la pelota cae al piso con una aceleración  $g$ .

*Caso 4:* Finalmente, la cápsula toma la trayectoria del eje de ingreso a la atmósfera de la Tierra y se le permite caer libremente hacia el centro de ésta. Dada la situación que adquiere, en este caso, el vehículo espacial, la pelota permanece en reposo con relación al observador.

Del experimento de pensamiento formulado, podemos extraer claramente que, desde el punto de vista del observador en ascensión:

- Los casos 1 y 3 son indistinguibles, según los requisitos de la primera afirmación antes expuesta.

- Los casos 2 y 4 con respecto a lo requerido en la segunda afirmación, también son indiscernibles.

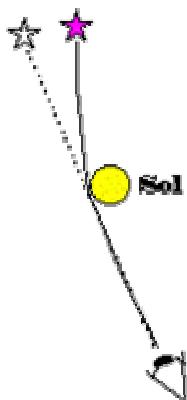
## *Consecuencias de la Teoría*

La primera consecuencia es la desviación de un haz de luz al pasar cerca de un objeto muy masivo, que curve lo suficiente la red espacio-temporal. Según Einstein, no se curva por la acción de la gravedad de ese cuerpo solamente (como consideraría la mecánica newtoniana al creer la luz como conjunto de partículas), sino que se desvía a causa de la curvatura originada en el espacio-tiempo por la masa del cuerpo. De esta forma, se desvía el doble de lo que predecirían las fórmulas de Newton.

La desviación sería la siguiente:

$$\alpha = \frac{4 \cdot G \cdot m}{r \cdot c^2}$$

Y nos otorga un ángulo de desviación de  $1^\circ 75''$  para un rayo de luz que pasara cerca de nuestro Sol.

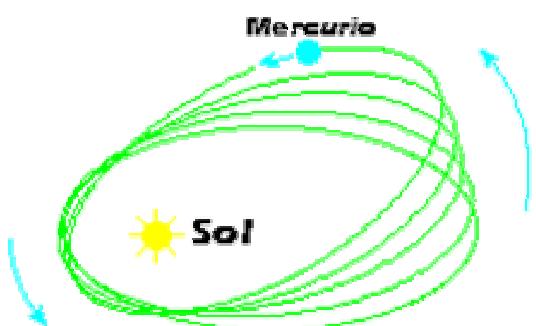


*En los eclipses solares se ha comprobado que realmente ocurre así (las estrellas situadas al borde del astro se encuentran realmente tras él siguiendo una media de desviación de  $1,7^\circ$  ), y aunque en las primeras comprobaciones se obtenían unos errores relativamente altos, se han realizado mediciones con radiotelescopios observando cuásares al pasar por detrás del sol y se ha detectado un error menor del 1% respecto a la teoría de Einstein. Esta fue una de las tres predicciones que Einstein formuló en su teoría de la relatividad general.*

---

Como segunda predicción, permitió explicar una desconcertante discrepancia de la órbita de Mercurio. Su perihelio avanza cada año hacia el Sol una cantidad significativamente mayor a la que se puede estimar a través de la aplicación de las leyes de Newton. En sus esfuerzos por explicar la diferencia, los astrónomos especulaban sobre la causa de ello –antes de la aparición de las ideas de la relatividad general de Einstein– en la posible existencia de un pequeño planeta que orbitaba entre Mercurio y el Sol. Sin embargo, las ideas que se fundamentaban en la Teoría General de la Relatividad demostraron que ese cuerpo era innecesario. La nueva teoría sobre la gravedad

formulada por Albert Einstein logra explicar completamente el misterio de la órbita de Mercurio, señalando que ello es producto del espacio intensamente curvado en las inmediaciones del Sol.



*Demostró las razones del comportamiento del eje mayor de la órbita del planeta Mercurio, en cuanto a la precesión o adelanto de su perihelio de 43" de arco cada cien años, aparte de los efectos que producen en su órbita la atracción del resto de los planetas. Este hecho ya había sido observado en años anteriores a la teoría de Einstein, pero no había podido ser explicado satisfactoriamente.*

*Ahora bien, según la teoría newtoniana, el perihelio de Mercurio debe adelantarse ligeramente cada año debido a la influencia gravitatoria de otros planetas del sistema solar. Este adelanto o precesión, debería ser de 531" de arco por siglo. Pero Mercurio se adelanta 574" por siglo, que fue lo que condujo a las especulaciones de los científicos sobre la posible existencia de otro planeta más cercano del Sol.*

*La teoría general de la relatividad de Einstein explica esta discrepancia de 43" de arco de la siguiente manera: Los objetos masivos como nuestra estrella Sol, doblan el espacio que comporta su entorno, creando una depresión, o pozo gravitatorio a su alrededor. Cuando los planetas se trasladan alrededor del Sol, sus órbitas siguen la línea de este pozo, y les toma algo más de tiempo su trayectoria en este camino deprimido que si siguieran un camino completamente parejo como lo establece el sistema newtoniano. Mercurio, dada su estrecha cercanía hacia el Sol, es el que muestra más claramente los efectos de esas diferencias que se producen en el trazado orbital.*

Y por último, Einstein predijo que a todo cuerpo en un campo gravitatorio se le asignaba una energía cinética igual a la energía potencial que tendría a causa del campo gravitatorio, lo cual equivale a asignarle a ese cuerpo una velocidad: la *velocidad de escape* de un campo gravitatorio, con la que un cuerpo en órbita perdería su órbita elíptica para pasar a una órbita parabólica. Aunque aquí la explicaremos a través del Principio de Equivalencia, su origen estuvo basado en cálculos tensoriales de geometría riemanniana.

Si  $E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V^2$  y  $E_p = \frac{G \cdot m \cdot M}{r}$ , entonces la velocidad de escape es la siguiente:

$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot G \cdot M}{r}}$$

En que  $G$  es la constante de gravitación universal,  $M$  la masa que produce el campo gravitatorio (planeta, astro) y  $r$  la distancia desde el centro del astro hasta el punto determinado del campo gravitatorio producto del estudio. En consecuencia, como toda velocidad produce una disminución del ritmo en que transcurre el tiempo:

$$t' = t \cdot \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}$$

En medio de un campo gravitatorio también se frenará el tiempo. En efecto, el tiempo pasará más rápido en el espacio lejos de toda atracción gravitatoria que, por ejemplo, en la superficie de la Tierra. Sustituyendo la penúltima ecuación en la última podemos obtener para cualquier astro:

$$t' = t \cdot \sqrt{1 - \frac{2 \cdot G \cdot M}{c^2 \cdot r}}$$

El ejemplo que hemos usado para explicar la asignación a todos los cuerpos sometidos a la interacción gravitatoria de una energía cinética, ha sido comprobado hace unos años por medio de relojes atómicos sincronizados, el cual uno de ellos fue transportando en un avión a elevada altura durante un largo periodo de tiempo y comparando luego con otro empotrado en la Tierra. El resultado fue que el tic-tac del reloj ubicado en el avión se movía un poco más rápido que el del empotrado en la Tierra. La predicción que realizó Einstein para comprobar esta idea fue que la luz emitida por una estrella debía tener un espectro algo desplazado hacia el rojo, o sea que la luz emitida tendrá una frecuencia menor de lo normal debido a que todos sus electrones vibrarán con más lentitud a causa del frenado parcial del tiempo.

Por otra parte, a través del principio de equivalencia la relación entre las frecuencias es:

$$\nu = \nu_0 \cdot \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}$$

La velocidad orbital:

$$\nu = \sqrt{\frac{2 \cdot G \cdot M}{r}}$$

En consecuencia, la relación es:

$$\nu = \nu_0 \cdot \sqrt{1 - \frac{2 \cdot G \cdot M}{c^2 \cdot r}}$$

Por otro lado, las disminuciones en la velocidad del tiempo que hemos descrito, también han sido comprobadas efectuando mediciones del tiempo que transcurre entre el envío de una señal a una sonda espacial y la recepción del rebote de ella. Si la sonda se encuentra en conjunción superior con respecto al Sol, las señales transitan pasando muy cerca del Sol en su recorrido desde la Tierra a la sonda y, viceversa, siendo su viaje por las cercanías del Sol más lento. Lo anterior, se trata de una evidencia dura que fue tomada por las naves Mariner 6 y 7. El retraso detectado en las señales fue de 200 ms con un margen de un 3%.

En el tiempo se han deducido muchas otras consecuencias de la Teoría de la Relatividad, como pueden ser los asombrosos agujeros negros. Y además, este mes de Abril, se ha mandado un satélite para hacer una nueva comprobación de la curvatura de la red-espacio tiempo, causada por la masa terrestre, valiéndose de la esfera metálica más perfecta construida nunca para realizar sus mediciones y cálculos.

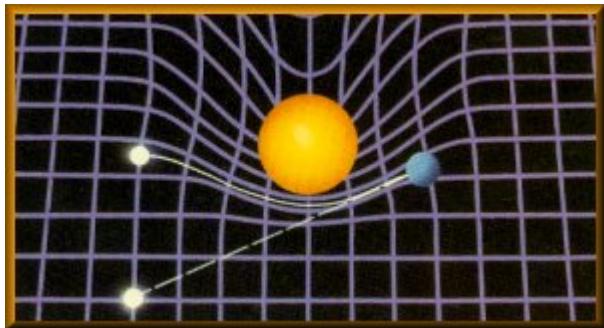
### *Curvatura de la Red espacio-tiempo*

Einstein, basándose en sus experimentos de lógica, llegó a cambiar de una forma inimaginable los conceptos de espacio y tiempo, pero se encontró con una barrera que le costó salvar: las matemáticas. En un determinado punto no supo expresar lo que su intuición genial le ayudaba a ver. Y es entonces cuando Minkowski unió las 4 variables en una red tetradimensional.

Pero el continuo tetradimensional y euclídeo de Minkowski era, sin embargo, sólo la imagen de un universo ideal, libre de materia; solamente conocía movimientos uniformes, conforme a la simplificadora cinemática de la teoría restringida.

El matemático alemán del siglo XIX, Bernhard Riemann, realizó la descripción matemática completa de estos espacios curvos. Normalmente, consideramos plano el espacio físico vacío, de forma que si utilizásemos rayos láser para formar los lados de triángulos, cubos y otras figuras geométricas, obedecerían a los teoremas de la geometría euclíadiana. Si despegásemos en una nave espacial en línea recta y siguiéramos esa línea recta, no volveríamos nunca al punto de partida. Pero los trabajos de Riemann generalizaron una noción de espacio que incluyese también la posibilidad de una geometría no euclíadiana, de un espacio no plano sino curvo. Sería como generalizar espacios bidimensionales para que no sólo incluyesen el espacio plano de una hoja de papel sino también superficies curvas como la de una pera. Riemann demostró que podía describirse exactamente la curvatura geométrica del espacio no euclíadiano con una herramienta matemática denominada tensor de curvatura. Utilizando rayos láser en un espacio tridimensional y midiendo con ellos ángulos y distancias, podemos determinar, en principio, el tensor de curvatura de Riemann en cada punto de ese espacio.

De esta forma, Riemann nos da las herramientas para poder trabajar con espacios de cualquier número de dimensiones, ya que a pesar de que la percepción visual no llega a tratarlas, sí lo hacen las matemáticas, y además con un sentido totalmente geométrico y relacionadas enormemente con las predicciones de Einstein.



*Ilustración simplificada de la afirmación de Einstein de que la luz sigue un camino curvado cerca de un objeto masivo. El espacio puede ser considerado como una lámina tensada por el pesado sol (amarillo). Cuando la luz de una distante estrella (línea continua) pasa junto al Sol en su trayectoria hacia la Tierra (línea azul), seguirá la superficie combada de la lámina. Vista desde la Tierra, la posición aparente de la estrella (línea punteada) diferirá de su posición real en una magnitud predecible.*

Las ecuaciones de Einstein, que predecían la curvatura del espacio-tiempo en las proximidades del Sol, fueron ratificadas por observaciones unos años después de su formulación, en un eclipse ocurrido el 29 de mayo de 1919, cuando el Sol pasara frente a las Híadas, un denso conglomerado de estrellas en la constelación de Tauro. Pero, posteriormente, fueron sometidas a pruebas experimentales más precisas mediante el uso de satélites artificiales y métodos basados en el radar y han quedado perfectamente confirmadas.

Pero como percibió el propio Einstein cuando trabajaba en la teoría, sus ecuaciones no sólo describen la curvatura del espacio-tiempo en las proximidades del Sol, sino también la curvatura del espacio-tiempo de todo el universo. Las ecuaciones de Einstein aportan la estructura conceptual de la cosmología moderna.

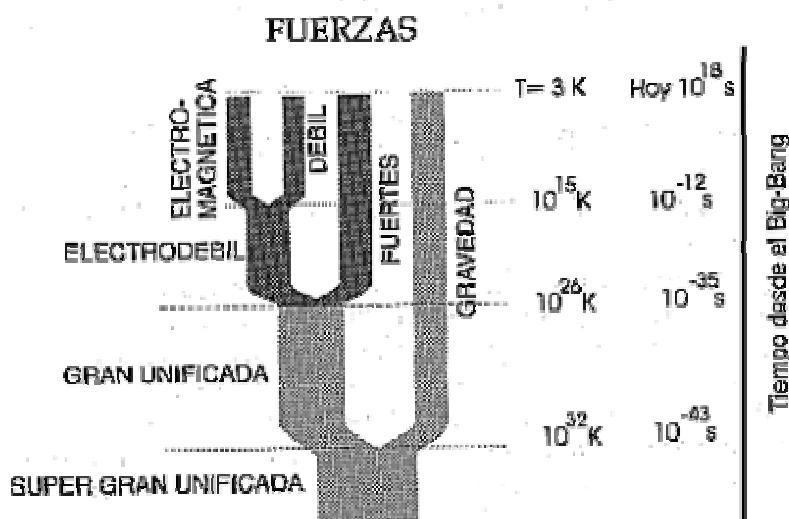
# *TOE's*

# *(Teorías del Todo)*

## **Relatividad y Cuántica... ¿incompatibles?**

Hasta ahora, nos hemos centrado en explicar detalladamente las dos teorías fundamentales que gobiernan la realidad, según el pensamiento actual, para poder comprender las dificultades que entraña la búsqueda de la añorada Teoría del Todo (TOE's).

Todos los fenómenos que acaecen a nuestro alrededor, se explican por cuatro fuerzas fundamentales, como son la gravitatoria, la electromagnética, la nuclear fuerte y la nuclear débil. Y como ya se ha explicado, la Mecánica Cuántica gira alrededor de las tres últimas, así como la Teoría de la Relatividad de la gravitatoria. Para comprender mejor el proceso de la unificación de fuerzas, y por tanto de comprensión más sencilla de la Naturaleza en la que confía la Física, se adjunta el siguiente esquema:

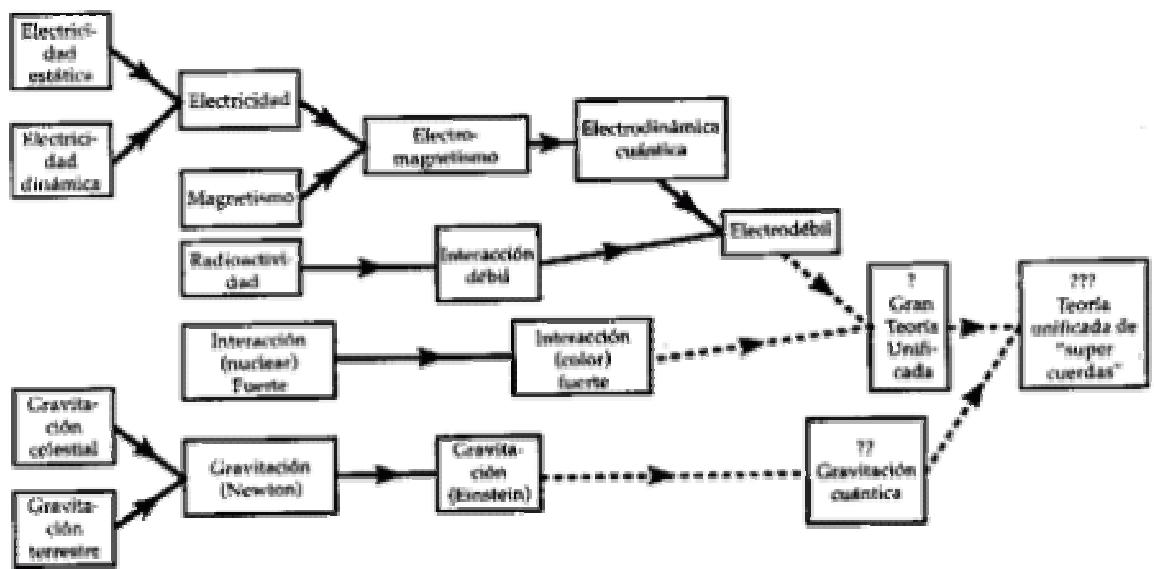


En un principio, justo  $10^{-43}$  segundos después de la Gran Explosión, empezó un proceso que actualmente estamos a punto de descifrar, yendo hacia atrás en el curso del Universo. Hasta la temperatura de  $10^{32}$  K, denominada Temperatura de Planck, las cuatro fuerzas antes mencionadas estaban reunidas en una sola, de la que, posteriormente, fueron apareciendo las demás.

Cuando la temperatura bajó un poco (a pesar de que estamos hablando de la descomunal temperatura de Planck), se separó la primera y más desconocida, aún, de las fuerzas: la Gravedad. Y es este instante en el que la Física actual ha encontrado una barrera de momento insalvable. La tecnología actual no es capaz de reproducir el marco físico de aquél estado, aunque hay ciertas vías por las que puede que se halle una solución, como son los superconductores (por ejemplo, el  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ ), gracias a los cuales se consiguen campos magnéticos de cientos de miles de Teslas. Así, el confinamiento de partículas a grandes temperaturas se hace viable, además de requerir una

cantidad de Energía aceptable, por lo que se podrán reproducir los primeros instantes del Universo algún día...

A partir de  $10^{26}$  K, empezó la historia que se conoce, en la que aparecen las tres fuerzas que se concentran en la Mecánica Cuántica, aunque su unión no fue fácil, y necesitó de muchas mentes magníficas.



En la figura superior se puede apreciar la evolución de la Física, que gracias al trabajo de muchos genios ha ido poco a poco simplificando la visión de la realidad. De esta forma, las leyes que se iban descubriendo, han sido concentradas en otras más globales y con mayor alcance en sus predicciones.

Hoy en día, la unión de la Electrodinámica Cuántica (QED) y de la Cromodinámica Cuántica (QCD), conforman la explicación de las interacciones producidas por las fuerzas nuclear fuerte y débil y la electromagnética; comúnmente se conoce por GUT (Teorías de la Gran Unificación) a la unión de estas tres interacciones. Pero a pesar de que la Teoría de la Relatividad Restringida se ha podido cuantizar, la General no, con lo que se llega a un punto y a parte en la unión de las cuatro fuerzas fundamentales del Universo.

Actualmente, la Física Moderna apuesta por tres caminos diferentes para la Gran Unificación, es decir, la compilación de todas las Teorías y Leyes en una que sea capaz de explicar el funcionamiento de “lo grande” y “lo pequeño”, que reúna las maravillosas Teoría de la Relatividad y Mecánica Cuántica.

Quizá todo esto no sea más que una vana aspiración humana por llegar a comprender su existencia, debido a sus ansias por conocer todo lo que le queda al alcance. Quizá no esté en nuestra mano conocer tan preciado secreto, tan oscuro final, pero aún así no somos capaces de controlar nuestra propia naturaleza.

Ojalá jamás se descubra la explicación a Todo, ni la curiosidad humana sea saciada, para poder así disfrutar de la aparente frustración de caer una y otra vez en la búsqueda de algo que queda lejos del pensamiento, lejos de toda comprensión, pero que nos llena más que nada...

*Esperemos nunca llegar a conocer lo desconocido...*

## *Supergravedad*

La teoría de la supergravedad es una de las soluciones posibles al problema que plantea la incompatibilidad existente entre la teoría de la relatividad, estudiada a lo largo de este trabajo, y el principio de incertidumbre, también comentado en la parte de mecánica cuántica. Fue allá por el año 1972 cuando los físicos se dieron cuenta de esta incompatibilidad, pero bastaron cuatro años para que surgiese una posible solución a ella, la “supergravedad”. Trataremos de describirla más o menos detalladamente, para lo cual necesitamos hablar previamente de las partículas más fundamentales que componen la materia que conocemos, para luego hablar de las “supersimetrías”, parte esencial de la teoría de la supergravedad.

Las partículas subatómicas están divididas en dos clases: los bosones, partículas de spin entero, y los fermiones, de spin fraccionario. Podemos pensar en las partículas cuánticas como pequeñas <>peonzas<> que giran, y ese giro depende del spin de cada partícula. Spin cero significa que la peonza no gira,  $\frac{1}{2}$  significa una cerca cantidad de giro, y spin 1 significa el doble de dicha cantidad. La división de las partículas subatómicas es debida a el comportamiento muy diferente de ambos tipos de partículas. Por mencionar alguna, diremos que los bosones idénticos son “sociables”, mientras que los fermiones idénticos asemejan su comportamiento en este sentido a las cargas eléctricas de igual signo, se repelen.

Debemos tener en cuenta que, tanto bosones como fermiones, juegan un papel muy importante en la descripción de la materia. Quarks y leptones son partículas fermiónicas conocidas de spin  $1/2$ , mientras que el grupo de los bosones está integrado, entre otros, por gluones (spin 1) y partículas de Higgs (conocidas como bosones de Higgs, de spin cero).

La dificultad superada por los físicos teóricos es el logro de haber desarrollado otra simetría que permite convertir campos de spin distinto unos en otros, lo cual se ha llamado “supersimetría”. Esta teoría supone la agrupación de las partículas de spines diferentes en el <>grupo de supersimetría<>, lo cual, a su vez, implica la existencia de operadores matemáticos para transformar una partícula de spin dado en otra de diferente spin. Debido a estos operadores, los fermiones, de spin semientero, se transforman en bosones, de spin entero. También supone esta teoría que, debido a la existencia de spines  $\frac{1}{2}$ , 1 y 2, deberían existir también spines 0 y  $3/2$ , para completar el quinteto 0,  $\frac{1}{2}$ , 1,  $3/2$ , 2.

Esta teoría de las supersimetrías es muy hipotética, debido a la escasez de pruebas experimentales que demuestren su validez. Sin embargo, hay que tener en cuenta a su favor la existencia de una similitud muy profunda entre los operadores de supersimetría y los de espacio-

tiempo. Un claro ejemplo de ello es que el producto de dos operaciones de simetría (transformar un fermión en un bosón, y luego hacer lo contrario), supone un simple desplazamiento de dicha partícula en el espacio-tiempo.

La teoría de la supersimetría fue descubierta, independientemente, por varios grupos de físicos. La estudiaron Y. A. Golfand y E.P. Likhtman, del Instituto de Física Lebedev de Moscú y, posteriormente, D. V. Volkov y V. P. Akulov, del Instituto Fisicotécnico de Jarkov. También describieron una simetría bosón-fermión, Pierre M. Ramond y John Schwarz, del Instituto Técnico de California; y André Neveu, de la Ecole Normale Supérieure. Pero la mayoría de los físicos no prestó gran atención a la supersimetría hasta 1973, en que Julius Wess y Bruno Zumino inventaron una teoría relativista del campo cuántico simple y renormalizable que era supersimétrica.

Sobre el trabajo de Wess-Zumino , consistente en el desarrollo de la teoría del campo supersimétrico en propiedad, se puede decir que su principal objetivo era meramente académico, ya que en ningún momento se propusieron que fuera un modelo matemático realista de las partículas cuánticas existentes. Pretendían, más bien, proporcionar una especie de laboratorio conceptual en el que los físicos matemáticos pudieran estudiar las consecuencias de la supersimetría antes de pasar a construir modelos más complejos cuyo fin sería la consecución de éxitos en este campo a nivel experimental. La esencia conceptual matemática en este modelo era un supercampo único cuyos componentes correspondían a campos de spin cero y campos de spin 1/2. La supersimetría exacta imponía que las partículas cuánticas de spin cero y un medio tuviesen igual masa (lo cual también se cumple en modelos supersimétricos más complejos). Pero tales partículas con igual masa y distinto spin no se han observado nunca en la naturaleza, y ése es el motivo de que el modelo simple no sea experimentalmente relevante. En consecuencia, ha de romperse la supersimetría para que nos permita una descripción de las partículas observadas en la naturaleza. Las partículas de distinto spin que relaciona la supersimetría no han de tener igual masa. Pero, aunque los físicos hicieron modelos matemáticos en los que la supersimetría se rompe, no han conseguido relacionar entre sí a través de ella ninguna de las partículas de spin distinto actualmente detectadas.

Para la gran mayoría de los físicos que han dedicado tiempo al estudio de las teorías supersimétricas están convencidos de que aunque los gluones, leptones y quarks ordinarios tengan distinto spin, no se relacionan entre sí por una operación de supersimetría. Si la supersimetría rota ha de manifestarse en la naturaleza, los quarks, leptones y gluones deberían estar pareados con otras partículas cuánticas «supramásicas» totalmente nuevas (los cuantos que se relacionan realmente con ellos por supersimetría), ninguna detectada hasta el presente, y muy difícil que ello pueda ocurrir en el futuro cercano.

Si la naturaleza se rigiera por supersimetrías, el micromundo estaría organizado por una especie de radiografía con dos exposiciones. A un lado de ésta estarían las partículas ordinarias como los leptones, los quarks y los gluones; al otro, cada una de esas partículas tendría la imagen de una supramásica: partículas nuevas llamadas «leptinos», «quarkinos» y «gluinos». Los leptones y los quarks tienen fermiones de spin 1/2, pero sus supramásicas serían bosones. La supramásica del fotón que tiene espín uno sería el «fotino», de spin 1/2, y así sucesivamente.

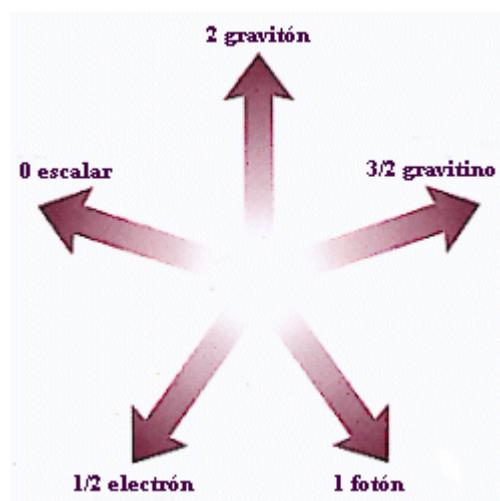
Por otro lado, si existieran realmente esas partículas supramásicas, por desgracia, nadie puede calcular con certeza la masa prevista que pudieran comportar, y se desconoce por ello el umbral energético que ha de superarse para producir esas nuevas partículas extrañas. De existir, lo más probable es que casi todas las supramásicas tengan una masa tan grande que ni siquiera los superaceleradores que se puedan construir algún día puedan crearlas; quizás la única ocasión en que hubo energía suficiente fue en el universo primitivo.

También podríamos pensar que puede llegar a darse el caso de que, si existiesen, el fotino y el gravitino (superpartícula asociada al gravitón), tuvieran masas pequeñas. Si esto es así, puede suponerse que la todavía no detección experimental de estas partículas se debe a que las interacciones de las mismas con la naturaleza no son lo suficientemente fuertes como para poder apreciarlas y, además, de existir, cabe la posibilidad de que ambas partículas desempeñen un papel importante en la evolución del universo. En ese caso, podría llegarse a pensar que los fotinos o los gravitinos liberados de sus interacciones con el resto de la materia en las primeras etapas de la gran explosión podrían ser la materia oscura del universo actual; también podrían haber desempeñado un importante papel en la formación de las galaxias por acumulación gravitatoria. Podemos llegar a la conclusión de que la teoría de las supersimetrías cobra especial importancia a la hora de hablar acerca del origen del universo, aunque parece que ello nos llevaría a una historia de un universo sin fin.

En el modelo de Wess-Zumino podemos apreciar una simetría global, ya que la operación de simetría es la misma para todo el espacio. Destaca Zumino que la supersimetría global, al igual que las simetrías globales internas más antiguas podían generalizarse a las simetrías Yang-Mills locales, también debería tener una generalización al campo de medida. Además, por las propiedades matemáticas de la supersimetría, tal generalización incluiría al campo gravitatorio como campo de medida asociado con la supersimetría local. La primera teoría matemática de esta versión local de la supersimetría, denominada «supergravedad», la descubrieron, en 1976, Sergio Ferrara, de los Laboratorios Frascati (cerca de Roma), y Daniel Z. Freedman y Peter van Nieuwenhuizen, de la Universidad de Nueva York, en Stony Brook. Poco después, Bruno Zumino, del CERN, y Stanley

Deser, de Brandeis University, hallaron una derivación alternativa más simple de la teoría de la supergravedad.

La teoría de la supergravedad no era mas que una aplicación imaginativa de la teoría de la gravedad de Einstein, la cual era convertida en teoría supersimétrica. Como ya sabemos, la teoría de la relatividad de Einstein se generalizaba, ya que se podía considerar que describía el gravitón como un hipotético bosón de spin 2. Cuando ampliamos la teoría de Einstein a la teoría supergravitatoria, se dice que el gravitón adquiere un supercompañero, el gravitino, fermión de spin 3/2 y, mediante transformaciones locales supersimétricas, estas dos partículas se transformaban la una en la otra. En el fondo, la idea consistía en combinar el gravitón, que supuestamente transporta la fuerza gravitatoria, con partículas de spin 3/2, 1, 1/2 y 0. En cierto sentido, todas estas partículas podrían ser consideradas como diferentes características de una misma superpartícula, unificándose así las partículas materiales de spin ½ y 3/2 con las partículas portadoras de fuerza de spin 0, 1 y 2.



*Imagen: En la supergravedad, las partículas con espines distintos son consideradas como características diferentes de una única superpartícula*

Así mismo, por otra parte, los pares partículas/antipartículas virtuales de spin 1/2 y 3/2 tendrían energía negativa, y de ese modo tenderían a cancelar la energía positiva de los pares virtuales de spin 2, 1 y 0. Esto, al hacer cálculos cuánticos utilizando la teoría de la supergravedad, los teóricos descubrieron sorprendidos, que

los infinitos que plagaban la teoría de la gravedad anterior, que sólo consideraba el gravitón, en su mayoría se anulaban con infinitos iguales y contrarios. Claro está, que nunca se ha llegado a saber si quedaban o no algunos infinitos sin cancelar, ya que se trataba de realizar cálculos largos y difíciles que, en los años de los finales de la década de 1970 y principio de la de 1980, nadie estaba preparado para acometerlos. Se estimó que, incluso con un poderoso computador, se demorarían por lo menos unos cuatro años y, además, había muchas posibilidades de márgenes de error.

De todas maneras, es necesario aclarar que las anulaciones a que nos hemos referido, en ningún caso se debieron a circunstancias fortuitas, sino que correspondían a una consecuencia más profunda de la presencia de la supersimetría. Aunque no se ha llegado a saber si la teoría de la supergravedad es completamente renormalizable, esa «reducción de los infinitos» aportó más de un ladrillo en la consecución de una teoría viable de la gravedad cuántica.

Hasta el año 1984, y pese a que las partículas de las teorías de supergravedad no se correspondían con las partículas observadas, no obstante la mayoría de los físicos creía que la supergravedad constituía probablemente la respuesta correcta al problema de la unificación de las cuatro fuerzas de la naturaleza. Pero en ese año indicado, las opiniones sufrieron un notable cambio a favor de lo que se conoce como teoría de cuerdas, de la cual hablamos también en nuestro trabajo como posible solución a algunas de las incompatibilidades existentes entre las teorías cuántica y relativista.

Pero en los gabinetes de la mayoría de los físicos académicos-investigadores deben encontrarse archivados una serie de modelos de supergravedad que se desarrollaron mientras la idea estuvo de moda. En la teoría más simple de la supergravedad sólo se incluía el gravitón y el gravitino, y esto difícilmente se corresponde con el mundo real de muchas partículas. Pero se desarrollaron otras teorías matemáticas de la supergravedad. En su búsqueda de teorías matemáticas de las partículas cuánticas, los físicos andan siempre a la caza de poderosos principios generales que permitan limitar su investigación. Ese concepto de trabajo llegó a demostrar que el principio de la supersimetría local es muy limitado, y que sólo daban cabida para la existencia de ocho teorías de la supergravedad posibles. (Lo que equivalía más o menos a demostrar que sólo existen cinco sólidos regulares en tres dimensiones.) Estas ocho teorías de la supergravedad se clasificaron mediante un entero  $N = 1, 2 \dots 8$ , donde supergravedad  $N = 1$  es la más simple, sólo con los campos de gravitación de spin 2 y el gravitino de spin 3/2. Las teorías supergravitatorias de  $N$  más alta exigen también campos con spin cero, 1/2 y 1. La supergravedad  $N = 8$ , la más compleja, tiene un total de 163 campos, todos ellos interrelacionados por supersimetría.

### **Teoría de Kaluza-Klein**

Las teorías de unificación de campo han evolucionado y avanzado mucho desde que se comenzó a intentar materializarlas. Estos avances siempre se han producido desde el punto de partida que nos otorga una ley como la de la relatividad, revolucionaria por su exactitud en la descripción del campo gravitatorio. El problema estriba en incorporar el resto de las interacciones fundamentales sin alterar la exactitud con la cual esta ley de la naturaleza nos describe parte de nuestro medio. Entre las teorías que tratan de lograr esta unificación se encuentra la de Kaluza-Klein, que será en la cual nos centremos en este apartado.

Por todo es conocido que las dimensiones espaciotemporales que nos son usuales son cuatro; esto es algo incontestable desde ningún punto de vista, pero no por ser solo cuatro aquellas que percibimos a “simple vista”, deben ser estas las únicas. Por ello ciertos físicos apuntan que la dimensionalidad del universo debe ser un hecho que provenga de la teoría y no algo establecido de principio. La teoría que nos ocupa se encuentra en este caso, necesita y desarrolla mas dimensiones que las cuatro usuales para su validez.

Para una mejor compresión de la teoría puede que lo mejor sea una comparación entre la generadora de fuerza en la gravedad (la masa) y su análoga eléctrica (la carga). Sabemos que en el campo eléctrico se muestran dos tipos de carga y por tanto dos comportamientos, atracción y repulsión, en cambio dentro de la gravedad solo existe la atracción, por lo menos este es el único suceso observable. Por tener la electricidad estas dos posibilidades su explicación geométrica en el espacio-tiempo relativista esta incompleta a no ser que se introduzca una nueva dimensión.

Matemáticamente la introducción de una quinta dimensión a la relatividad general de Einstein fue conseguido por el alemán Theodoro Kaluza en 1919. Este introdujo una quinta dimensión compacta en forma de “círculo” cuyo tamaño era el perfecto para poder describir el comportamiento de las cargas eléctricas y no influir en las descripciones de la fuerza gravitatoria aunando ambas en el contexto de la relatividad general.

Tras esto el problema que surge es la identificación de que es la quinta dimensión introducida por Kaluza y porque este necesito introducir ciertas restricciones en las soluciones de las ecuaciones de Einstein para hacer cuadrar todo el conjunto. Entonces, en el año 1926, aparece el físico sueco Oskar Klein, quién demuestra que los supuestos restrictivos son absolutamente innecesarios. Calculó, además, el radio del circulito de la quinta dimensión en función de las cantidades conocidas, la escala de distancia de Planck y la carga electrónica, cuyo resultado obtenido fue de un radio de unos 10 cm. Esta medida es lo suficientemente pequeña para que la quinta dimensión nos sea totalmente imperceptible a pesar de extenderse a través de todas las otras 4 dimensiones.

Esta dimensión no podemos percibirla pues se encuentra arrugada en cierto modo entre las otras 4.

Esta teoría sostiene que al comienzo el universo era un espacio multidimensional muy compacto y que las cuatro dimensiones que en mayor medida nos afectan lo son debido a que en

cierto momento se expandieron a una velocidad mucho mayor que las otras a las que dejaron minúsculas en comparación y casi sin valor físico apreciable.

El por qué fueron cuatro y no un número diferente el número de dimensiones que se desarrollaron de esta manera al comienzo del universo es algo que no explican estas teorías, pero se apunta que este número juega un papel importantísimo en el desarrollo inicial del universo.

## ***Supercuerdas y Teoría M***

Possiblemente es la teoría de las supercuerdas la candidata idónea a convertirse en la teoría del todo, y en la actualidad es la más estudiada.

La base central de esta teoría es que las partículas ya no son “entes puntuales”, sino que se trata de pequeños filamentos (cuerdas) denominados string ó F-strings con una longitud que podría ser de unos  $10^{-33}$  cm, denomina longitud de Plank. Además estas cuerdas tienen como característica diferentes nodos y frecuencia, dependiendo cual sea el valor de esta última, la cuerda corresponderá a una determinada partícula.

La teoría de supercuerdas ha tenido una historia un poco accidentada. Ésta fue primeramente utilizada en los años sesenta para intentar describir la física de la materia hadrónica. En esos años, a través del modelo de quarks de Murray Gell-Mann, se tenía evidencia de que algunas partículas conocidas, como el protón, el neutrón y algunas partículas descubiertas por vez primera en los rayos cósmicos, admitían una descripción más económica (y simétrica) si éstas se encontraban compuestas por partículas más pequeñas bautizadas por Gell-Man con el nombre de quarks. La descripción de la física de hadrones (a través de quarks) mediante la Teoría de Cuerdas obtuvo sólo éxitos parciales y una serie de inconsistencias hicieron desistir de la formulación de una teoría de hadrones empleando la TC. Los inconvenientes producidos por la aplicación de esta teoría fueron que había que confirmar la existencia de partículas que podían viajar más rápido que la luz, como los taquiones, y también había que suponer la existencia de partículas sin carga, como el gravitón. Por ello, esta teoría fue finalmente desestimada.

Sin embargo, posteriormente gracia la supersimetría y a la Cromodinámica Cuántica QCD, la teoría de cuerdas salió de nuevo a la luz. Por ello durante la década de los setenta se produjo un gran avance en el desarrollo de las teorías de cuerdas.

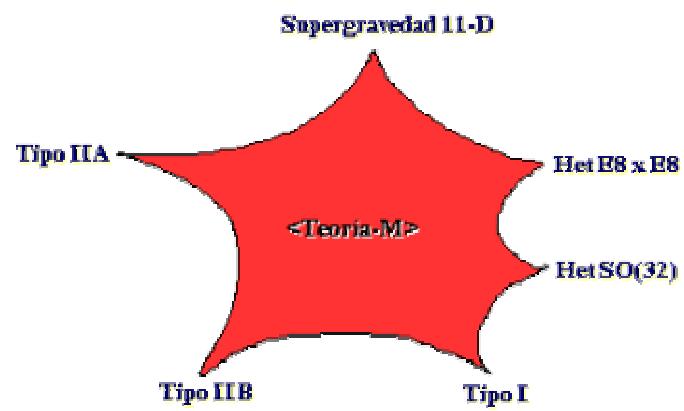
Hacia 1984 se tenían cinco modelos de cuerdas diferentes, basados en Universos que poseían varías dimensiones espacio-temporales, con lo que se produjo un problema ya que ¿cuál de todos era el válido?. El hecho que mostraban que las diferentes teorías de cuerdas eran excluyentes entre sí, quedo resuelto por M. Green y J. Swartz, cuando éstos presentaron sus estudios, ya que en ellos se pudo observar como ciertas anomalías, (violaciones de simetrías fundamentales que aseguran, por ejemplo, la conservación de la carga eléctrica) se cancelaban en algunos modelos como en el de tipo I (con grupo de norma SO(32)), tipo IIA y tipo IIB. Aquel mismo año una serie impresionante de trabajos realizados por (D. Gross, J. Harvey, E. Martínez y R. Rohm, y E. Witten y colaboradores) mostraron que existía un modelo, llamado de la Cuerda Heterótica, sin anomalías, que permitía descender de 26 dimensiones a 10 y luego de 10 a las cuatro dimensiones del espacio-tiempo que nos es familiar. Además, se podía lograr cierto contacto con los modelos estándar ya existentes para reproducir datos experimentales.

Las cinco teoría de supercuerdadas convivieron juntas hasta 1990, pero siempre se produjeron una serie de roces entre estas teorías ya que unas podían explicar cosas que las demás no podían, por lo que todas eran igual de válidas. Se tenía la sospecha de que tanto las cinco teorías de cuerdas como la teoría de las supercuerdas de 11 dimensiones estaban refiriéndose a una misma cosa pero no se sabía que podía ser, la unificación quizás si era posible.

Tipificación	Tipo I	Tipo IIA	Tipo IIB	SO(32) Heterótica	E8 x E8 Heterótica
Tipo cuerda	Abierta (& cerrada)	Cerrada	Cerrada	Cerrada	Cerrada
Supersimetría 10d	N=1	N=2 (sin chirales)	N=2 (con chirales)	N=1	N=1
Grupo gauge 10d	SO(32)	no	no	SO(32)	E8 x E8
D-comas	1,5,9	0,2,4,6,8	-1,1,3,5,7	no	no

Características de las cinco Teorías de Cuerdas

El trabajo de unificar estas 6 teorías fue llevado a cabo por Edward Witten, quien había desarrollado la teoría de las cuerdas Heteróticas, en el año 1990. La unificación de las teorías de cuerdas se denominó teoría M, la cual es un mero desarrollo matemático que los físicos deberán demostrar experimentalmente. Será este uno de los mayores retos para la nueva generación de físicos.



## **Bibliografía**

- “A horcajadas en el tiempo”, Patricio T. Díaz Pazos, editado en Internet.
- “Abstracciones sobre la Relatividad”, Patricio T. Díaz Pazos, editado en Internet.
- “Mis ideas y opiniones”, Albert Einstein, Bon Ton.
- “ $E=mc^2$ ”, David Bodanis, Planeta.
- “El Universo en una cáscara de nuez”, Stephen Hawking, Planeta.
- “Cromodinámica Cuántica”, Lander López, José María Porro, Miguel García.
- “Relatividad para principiantes”, Shahen Hacyan, editado en Internet por el Fondo de Cultura Económica de México.
- “Agujeros Negros, Cuerdas y Gravedad Cuántica”, un artículo de Juan Maldacena.
- *Investigación y Ciencia*, edición en castellano de la revista Scientific American.
- *Muy Interesante*, revista mensual.
- “Las partículas elementales, ¿son Supercuerdas?”, un artículo de Dr. Luis P. Neira.
- [www.astrocosmo.cl](http://www.astrocosmo.cl)
- [www.astroweb.org](http://www.astroweb.org)
- [www.wikipedia.com](http://www.wikipedia.com)
- [omega.ilce.edu.mx:3000](http://omega.ilce.edu.mx:3000)
- ... (Páginas sueltas de Internet, libros diversos, apuntes... etc...)

