

# Introducción Histórica a las Partículas Elementales

Joaquín Gómez Camacho

February 10, 2003

## 1 El paradigma de la física antigua

La ciencia, tal como la conocemos actualmente, parte de la cultura griega. Fue la civilización griega la primera que se planteó una descripción de la naturaleza que no estuviera totalmente condicionada a la actuación de seres sobrenaturales. En este sentido, algunas contribuciones fundamentales al desarrollo de la ciencia fueron las siguientes:

**Thales:** (Mileto, Asia Menor, 624-548 a.c.)

Estableció que la naturaleza, a pesar de la gran variedad que presenta, puede ser comprendida, si es observada cuidadosamente. Planteó que todas las sustancias estaban formadas por un principio único, que identificó con el agua, ya que ésta podía presentarse como sólido, líquido o gas.

**Pitágoras:** (Crotona, Napoles, 580-500 a.c.)

Además del famoso teorema, descubrió que las subdivisiones enteras o racionales de una cuerda producían sonidos musicales armoniosos. Ello llevó a la idea de que la descripción de los fenómenos de la naturaleza podía, y debía, hacerse en términos de números. Es más, los pitagóricos pensaban que los números estaban en la esencia de todas las cosas.

Los pitagóricos sabían que la tierra era redonda, aunque consideraban que no era habitable mucho más allá de la zona del mediterráneo. La tierra, el sol, la luna y los planetas giraban en torno a un “fuego central” del cual recibía el sol su luz, de la misma forma que la luna.

**Empédocles:** (Acragas, Sicilia, 490-430 a.c.)

Planteó que no podía haber un principio único del que todas las cosas estuvieran compuestas, ya que en la naturaleza había propiedades contradictorias. Por ejemplo, existen cosas secas y húmedas. Como el agua es intrínsecamente húmeda, no puede ser el principio único. Por ello, estableció que existían cuatro elementos: Agua, Tierra, Aire y Fuego. Estos elementos tenían propiedades opuestas. Agua y Tierra son pesados, mientras que Aire y Fuego son ligeros. Por otro lado, Agua y Aire son húmedos, mientras que Fuego y Tierra son secos. Todas las sustancias conocidas estaban compuestas de estos elementos en distintas proporciones.

Los elementos se unían o separaban por dos “interacciones”. El “Amor” tendía a unir los elementos, mientras que el “Odio” los separaba. La naturaleza, con todas sus diferentes manifestaciones, surgía del equilibrio entre estas interacciones.

**Demócrito:** (Abdera, Tracia, 460-370 a.c.)

Estableció que todas las cosas estaban compuestas de átomos. Estos átomos eran pequeños, indivisibles, de distintas formas y tamaños, pero compuestos por la misma sustancia. Los átomos estaban en continuo movimiento, y estaban separados por el vacío. La gravedad se explicaba por un movimiento de rotación, que hacía que los átomos más grandes, que correspondían a sustancias más pesadas, tendieran a irse hacia el centro de la tierra, mientras que los más ligeros iban hacia fuera. Incluso el alma estaba compuesta de un tipo de átomos especialmente ligeros, distribuidos por todo el cuerpo de los seres vivos.

**Aristóteles:** (Atenas, 384-322 a.c.)

La obra “Física” de Aristóteles tiene una aplicación mucho más amplia de lo que actualmente se entiende por el término. Partiendo del concepto de sustancia (inmutable) y forma (cambiante), Aristóteles describe el movimiento como un tipo de cambio.

Aristóteles describe el universo con la tierra (esférica) en su centro. Separa el universo en la esfera terrestre, situada por debajo de la órbita de la luna, y la esfera celeste, situado por encima de la luna, incluyendo ésta. El movimiento de los astros en la esfera celeste era inmutable, y se describía en función de círculos, que eran las figuras perfectas para los griegos. El movimiento en la esfera terrestre venía descrito por líneas rectas. Dentro de este movimiento, se distinguen los movimientos naturales, por los cuales los objetos pesados (Agua y Tierra) se dirigen hacia el centro de la tierra, mientras que los objetos ligeros (Fuego y Aire) se dirigen hacia arriba, y los movimientos forzados, que requieren una causa externa.

Aristóteles considera que, en los movimientos forzados, es necesaria una causa que provoque el movimiento, de tal manera que, cuando cesa la causa, cesa el movimiento. Así, la velocidad sería proporcional a la fuerza, e inversamente proporcional a la resistencia del medio. Por ello, Aristóteles no admitía la existencia del vacío, ya que implicaría una resistencia nula. Por tanto, no aceptaba la teoría atómica de los átomos de Demócrito, aunque asumía plenamente la teoría de los cuatro elementos de Empédocles.

La descripción de los movimientos forzados requería de una causa o “motor” para cada movimiento. El movimiento del “motor”, a su vez, debe estar causado por otro “motor”. De esta manera, se llega a una última causa o “Motor” inmóvil, en el que está el origen de todo movimiento. Este “Motor” es Dios, y sus propiedades vienen descritas en el libro Octavo de la “Física”. La Teología es, por tanto, para Aristóteles, una rama de la Física.

La Física de Aristóteles, junto con los cuatro elementos de Empédocles, han constituido el paradigma básico del saber científico durante casi 2000 años. Basados en este paradigma, Arquímedes descubrió las leyes de la palanca, y el principio que lleva su nombre. Ptolomeo describió el movimiento celeste con gran precisión. Las religiones monoteístas encontraron una base científica sólida. Los cuatro elementos constituían la base natural para descripción de los fenómenos de una sociedad basada en la agricultura, ya que tierra, agua, aire y fuego (luz solar) son los ingredientes necesarios para la agricultura. Del mismo modo, las variaciones estacionales en la agricultura pueden entenderse como ciclos en que domina el “amor” (primavera y verano, en que los elementos se combinan para que crezcan las plantas y los frutos), o el “odio” (otoño e invierno, en que las plantas se secan, y los elementos que las constituyen se separan).

En este contexto, no es sorprendente el empeño de los alquimistas medievales en la transmutación de las sustancias. Si todas las sustancias estaban hechas de los cuatro elementos, podía pasarse de plomo (o de cualquier otra sustancia) a oro añadiendo la proporción adecuada de fuego, aire, agua y tierra. El paradigma de la física antigua no

se vió sustancialmente modificado durante la edad media, aunque es destacable el desarrollo de conceptos filosóficos que precedieron al renacimiento. Entre ellos cabe destacar a Guillermo de Occam, que planteó su principio, denominado “la navaja de Occam”: *Pluribus non est ponenda sine necessitate*. No debe presuponerse la multiplicidad sin necesidad. Éste es un principio básico en el desarrollo de la ciencia hasta nuestros días.

De forma esquemática, podemos resumir el paradigma de la física antigua como sigue:

**Elementos:** Tierra, Agua, Aire y Fuego.

**Interacciones:** Amor y Odio. Fuerzas exteriores.

**Marco Teórico:** Física de Aristóteles.

## 2 El paradigma de la física clásica

La sustitución del paradigma de la física antigua por lo que conocemos por la física clásica, fue una evolución gradual entre los siglos XVI y XIX. Los hitos más importantes son los siguientes:

**Copérnico:** (Cracovia, 1473-1543)

Estableció el sistema heliocéntrico. Este ya había sido propuesto por Aristarco de Samos hacia el 280 a.c., aunque no se aceptó.

**Galileo:** (Pisa, 1564-1642)

Estableció el principio de que las propiedades de los sistemas son las mismas si están en reposo o en movimiento uniforme. También formuló la ley de la inercia, por la cual los cuerpos tienden a mantener su movimiento en ausencia de acciones externas.

**Newton:** (Cambridge, 1642-1727)

Desarrolló (con Leibnitz) el cálculo diferencial, lo que permitía una descripción formal de las leyes físicas, más allá de la geometría que era el instrumento de los científicos anteriores.

Formuló sus tres leyes. La primera ya había sido planteada por Galileo. La segunda establecía que la fuerza era proporcional a la aceleración, y no a la velocidad. Nótese que la diferencia estricta entre aceleración y velocidad pudo plantearse a partir del desarrollo del cálculo diferencial. La tercera, la ley de acción y reacción, hacía que no fuera necesaria una cadena de relaciones causales para provocar el movimiento.

Finalmente, planteó la ley de la gravitación universal, lo cual permitía borrar la separación entre esferas celeste y terrestre. Todo el universo, por tanto, satisfacía las mismas leyes.

**Lavoisier:** (París, 1747-1794)

Consiguió descomponer el agua en hidrógeno y oxígeno, así como recomponerla. Por otro lado descubrió que la combustión se debía a la combinación de las sustancias con el oxígeno. Previamente, se había considerado que los cuerpos, al arder, emitían una sustancia llamada Flogisto. Esto era la prueba definitiva de que los elementos de Empédocles no eran realmente fundamentales. Por otro lado, comprobó que en las reacciones químicas se conservaba la cantidad total de materia.

**Dalton:** (Manchester, 1766-1844)

Planteó la teoría atómica, partiendo del hecho de que las reacciones químicas entre gases ocurrían en proporciones sencillas de volumen. Obtuvo la relación de las masas atómicas de varios elementos con la del hidrógeno. Posteriormente, el desarrollo de la teoría cinética de los gases, justificó plenamente la teoría atómica, cuya base había sido ya planteada por Demócrito.

**Maxwell:** (Cambridge, 1831-1879)

Unifica la descripción de los fenómenos eléctricos y magnéticos, así como la luz y otras radiaciones electromagnéticas en función de campos eléctricos y magnéticos, que satisfacen las ecuaciones que llevan su nombre.

**Mendeleev:** (San Petersburgo, 1834-1907)

Clasifica los elementos, que son cerca de 90, en la tabla periódica. De esta forma, se correlaciona el peso atómico con las propiedades químicas de los elementos.

El panorama de la ciencia a finales del siglo XIX era brillante. La ciencia constituía una base para las necesidades tecnológicas de la revolución industrial. Las leyes de Newton se veían plenamente confirmadas por observaciones astronómicas. Se desarrollaban las aplicaciones prácticas de la electricidad. La química progresaba a partir de la base de la teoría atómica, aunque la naturaleza de las interacciones entre los átomos, el enlace químico, no fuera bien comprendida. La biología y la medicina se iban despojando de principios vitalistas, y se beneficiaban de los avances de la física y la química.

Esquemáticamente, el paradigma de la física clásica puede expresarse como sigue:

**Elementos:** 90 elementos de la Tabla Periódica.

**Interacciones:** Gravitación. Electromagnetismo. Enlace químico.

**Marco Teórico:** Física Clásica (Leyes de Newton).

### 3 El paradigma de la física moderna

Aunque la ciencia clásica sigue siendo de plena validez en muchos campos, sus fundamentos tuvieron que ser modificados en función de descubrimientos realizados a finales del siglo XIX y principios del siglo XX.

**Thompson:**

Descubre el electrón en 1897. Plantea el primer modelo del átomo, pero no consigue describir adecuadamente el espectro de absorción y emisión.

**Becquerel:** (París, 1852-1908)

Descubre la radiactividad (1896). Las radiaciones descubiertas se identifican posteriormente con partículas cargadas extraordinariamente energéticas.

**Plank:** (Berlín, 1858-1947)

Plantea la hipótesis de los cuantos (1900) para explicar el espectro de emisión del cuerpo negro.

**Rutherford:** (Manchester, 1871-1937)

Descubre el núcleo atómico (1911). Plantea el modelo planetario del átomo, aunque no es compatible con el electromagnetismo. Identifica la radiación  $\alpha$  como núcleos de

helio. Produce la primera reacción nuclear  $\alpha + {}^{14}\text{N} \rightarrow p + {}^{17}\text{O}$ : La transmutación de los elementos, que era el sueño de los alquimistas, se había logrado.

**Bohr:** (Copenhague, 1885-1962)

Aplica los cuantos al modelo de Rutherford (1913), consiguiendo explicar satisfactoriamente la absorción y emisión de luz por los átomos. Contribuye de forma fundamental al desarrollo de la física atómica y de la física nuclear.

**Heisenberg:** (Munich, 1901-1976)

Formula el principio de indeterminación, por el cual no es posible conocer con precisión el valor de la coordenada y el momento de una partícula. Desarrolla la mecánica matricial (1925) para describir la emisión de radiación.

**Schrödinger:** (Viena, 1887-1961)

Propone la ecuación que lleva su nombre (1926), para describir el estado de los sistemas cuánticos.

**Pauli:**

Plantea el principio de exclusión, que es básico para interpretar la estructura de átomos poliatómicos. Postula en 1931 la existencia del neutrino, para justificar la conservación de la energía en el decaimiento beta.

**Chadwick:** (Manchester, 1891-1974)

Descubre el neutrón en 1932, con carga neutra y masa parecida al protón. Ello permite explicar que las masas atómicas fueran aproximadamente múltiplos de la del átomo de hidrógeno.

**Fermi:** (Roma, 1901-1954)

Plantea la primera teoría de la interacción débil (1930) que es capaz de explicar el espectro de emisión de electrones en el decaimiento beta.

**Einstein:**

Explica el efecto fotoeléctrico (1905), aplicando la teoría de los cuantos. Introduce la teoría especial de la relatividad (1905), que modifica la concepción del tiempo y el espacio, y correlaciona masa y energía, y la teoría general de la relatividad, que explica la gravitación como una curvatura espacio-temporal.

El descubrimiento por Einstein de la relatividad especial y general suponen una modificación muy importante del paradigma clásico, aunque, más que invalidarlo, lo llevan a su plenitud. La relatividad especial establece que las leyes de transformación que dejan invariante un sistema no son las transformaciones de Galileo, que ya entraban en conflicto con las ecuaciones de Maxwell, sino las transformaciones de Lorentz. La relatividad general justifica la igualdad entre la masa inercial y la gravitatoria, que era un hecho empírico en la gravitación de Newton. Además, la relatividad general predice la curvatura de la luz en campos gravitatorios.

Los descubrimientos asociados con la física cuántica suponen una revolución en el paradigma clásico. El principio de indeterminación hace que las leyes de Newton no sean aplicables para el átomo o el núcleo. En su lugar, debe aplicarse la ecuación de Schrödinger.

El paradigma de la ciencia moderna tiene hoy en día una aplicabilidad plena en la inmensa mayoría de los campos de la ciencia. Los fundamentos del enlace químico están justificados por la descripción cuántica del movimiento de electrones en átomos y moléculas.

Del mismo modo, la interacción de los electrones con una red cristalina es la base de la física del estado sólido. Para estas ciencias, la interacción electromagnética está en el origen de todos los fenómenos. Por otro lado, la gran mayoría de los fenómenos en física nuclear pueden describirse en este paradigma, aunque el origen de la interacción fuerte y la débil no queda plenamente justificado. La astrofísica (evolución estelar, estrellas de neutrones, supernovas) también se describe en este paradigma.

El paradigma de la física moderna que se establece sobre 1940 puede describirse como sigue:

**Elementos:** Electrón, protón, neutrón, (neutrino).

**Interacciones:** Gravitación, electromagnetismo, interacción fuerte, interacción débil.

**Marco Teórico:** Física cuántica (Ecuación de Schrodinger)

## 4 El paradigma de la física actual

El paradigma de la ciencia moderna, aunque plenamente aplicable hoy en día en la mayoría de los campos científicos, resultó insuficiente como base para describir la partículas y las interacciones realmente fundamentales. Las contribuciones principales que llevaron a su cuestionamiento fueron las siguientes:

**Dirac:** (Cambridge 1902-1984)

Plantea una ecuación cuántica en que la función de onda es compatible con la relatividad especial. Ello le lleva a postular la existencia de una antipartícula para cada partícula de espín semi-entero. En 1928 postula la existencia del positrón, que es descubierto en 1932. Sienta las bases de la electrodinámica cuántica como una teoría cuántica de campos, en la que la interacción electromagnética se produce por intercambio de fotones.

**Yukawa:** (Tokio 1907-1981)

Aplicando la teoría cuántica de campos a la interacción fuerte, deduce que debe existir una partícula que transmite la interacción fuerte, cuya masa es inversamente proporcional al rango de la interacción  $m = \hbar c/a$ . Por ello, del rango de la interacción fuerte (1 fm), deduce la existencia de partículas de masa sobre 200 MeV, que llama mesones (1935).

**Descubrimiento de Partículas:**

Analizando los rayos cósmicos en la cámara de niebla, se descubre en 1937 el muón, de masa 107 MeV, pero no puede corresponder a la partícula predicha por Yukawa, porque no interactúa con la materia por la interacción fuerte. En 1947 se descubren los piones de masa 140 MeV, que sí se adecúan a los mesones de Yukawa. Poco después, se descubren otras muchas partículas, algunas de masas intermedias entre los piones y los protones, como los mesones K ( $m=500$  MeV), y otras más pesadas que el protón, llamadas hiperones, como el  $\Lambda$  ( $m=1110$  MeV). Estas partículas, son inestables, y se descomponen en tiempos del orden de  $10^{-8}$  segundos para dar protones, neutrones, electrones (o positrones) y neutrinos.

Posteriormente, con el desarrollo de los aceleradores de partículas, se producen muchas más partículas, de vida cada vez más corta.

**Feynmann:** (Boston (MIT) 1918-1988)

Con Schwinger, Tomonaga y muchos otros, contribuye al desarrollo de la teoría cuántica de campos en general, y de la electrodinámica cuántica en particular. Esta teoría permite

describir la relación del momento magnético del electrón con su carga y su masa con una precisión de 10 cifras significativas. Además, es una teoría de tipo “Gauge Local”, que sirve de modelo para las teorías del resto de las interacciones.

**Gell-Mann:** (Chicago 1929- )

Él y Zweig, de forma independiente, plantean el modelo de quarks (1963), que permite describir la gran variedad de partículas elementales (mesones y bariones) en términos de unas partículas fundamentales llamadas quarks. Esta hipótesis recibió apoyo experimental en experimentos de colisión electrón-nucleón a altas energías (1968).

**Weinberg:** (Harvard 1933- )

Con Salam, plantean en 1967 una teoría unificada “Gauge Local” que permite describir la interacción electromagnética y la interacción débil. Predicen la existencia de nuevas partículas, los bosones  $W^\pm$  y  $Z^0$ , que junto con el fotón describen las interacciones electro-débiles. Las predicciones de la teoría electrodébil se ven confirmadas por el descubrimiento experimental de estos bosones.

**Cromodinámica Cuántica:**

La interacción que liga a los quarks cristaliza en una teoría “Gauge Local”, que adquiere su formulación definitiva en 1973, y que relaciona la interacción a una propiedad de los quarks llamada color, y esta asociada a ocho partículas sin masa llamados gluones. La cromodinámica cuántica no puede tratarse de forma perturbativa a energías pequeñas, pero a energías altas se reduce, lo cual ha permitido verificar experimentalmente sus predicciones.

El paradigma de la ciencia actual, que se establece sobre 1975, y se conoce como “Modelo Estándar”, puede describirse de forma abreviada como sigue:

**Elementos:** Quarks (u, d, s, c, b, t), con tres colores cada uno, y leptones (e,  $\nu_e$ ,  $\mu$ ,  $\nu_\mu$ ,  $\tau$ ,  $\nu_\tau$ ). Falta por descubrir el bosón de Higgs.

**Interacciones:** Interacción electro-débil ( $\gamma$ ,  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$ ), interacción de color (8 gluones) y Gravitación.

**Marco Teórico:** Teorías Gauge Locales.

El Modelo Estándar presenta una descripción especialmente elegante y simple de las interacciones: estas interacciones aparecen como consecuencia de la simetría de los sistemas frente a un conjunto de transformaciones. Las propiedades de la interacción quedan totalmente determinadas por el grupo de simetría, y su intensidad viene dada por una constante (o dos en el caso de la teoría electrodébil. La teoría de la gravitación de Einstein, aunque es una teoría clásica, es una teoría gauge local. En este caso, el grupo de simetría corresponde a las transformaciones de Lorentz. El campo gravitatorio preserva esta simetría haciendo, por ejemplo, que un sistema en movimiento acelerado sea completamente equivalente a un sistema en reposo más un campo gravitatorio.

El Modelo Estándar ha sido avalado por un gran número de observaciones realizadas en los aceleradores de altas energías. Recientemente, se observó experimentalmente el último quark predicho, el top (t), y solamente falta encontrar una partícula, el boson de Higgs, que es responsable de la masa no nula de los bosones de la interacción débil y de los fermiones. Existen evidencias de que no hay más neutrinos sin masa de los tres que se han hallado, por lo que no debe haber más familias de partículas.

El modelo estándar ha permitido avances importantes en la cosmología, porque permite inferir la evolución del universo a partir de una fracción de segundo después de la gran explosión.

Aunque la cromodinámica cuántica debería ser capaz de dar las masas de todos los hadrones (partículas compuestas de quarks), y de las interacciones entre ellos, el carácter no perturbativo de la teoría dificulta estos cálculos, por lo que no hay todavía resultados fiables de estas magnitudes. Ello limita la aplicabilidad de la cromodinámica cuántica en la física nuclear.