

# LA TEORÍA CUÁNTICA DE LOS CAMPOS Y SUS APLICACIONES: LA FÍSICA DE PARTÍCULAS DE ALTAS ENERGÍAS

## QUANTUM FIELD THEORY AND ITS APPLICATIONS: HIGH ENERGY PHYSICS

Sebastián Rosado Navarro

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

sebastian.rosado@gmail.com

### **Introducción**

La humanidad tal vez ha dependido de la física más de lo que se imagina. La astronomía, una de las ramas del área, fue ampliamente usada por los humanos, incluso en la prehistoria, para poder guiarse en las noches y poder predecir las temporadas del año. Sin embargo, fue con la aparición de las civilizaciones que la física comienza a ser una disciplina académica. Los antiguos griegos la estudiaban como parte de la filosofía, la química y las matemáticas. Centurias tuvieron que pasar para que la física tomara su puesto como una ciencia única. Pero no debemos pensar que por única decimos que está excluida del resto de las áreas académicas: se vincula con otras áreas del conocimiento, desde el uso de conocimientos físicos para la creación de instrumentos para facilitarnos la vida, hasta, en ciertos casos, el uso de estos conocimientos para el entendimiento de distintos fenómenos.

Mas al hablar de las aplicaciones de la física, hay que hacer énfasis en la fidelidad a sus raíces en la filosofía, pues en muchas ocasiones son más motor de esta área

del conocimiento los misterios del universo, desde las escalas más ínfimas hasta las más gigantescas, siendo estas dos escalas inconcebibles para la imaginación humana. Aún así, hemos logrado abstraer un poco de todo lo que el universo es, llegando a entender lo que sucedió instantes después de que éste comenzara, y todo desde nuestro pequeño lugar en él. Hemos logrado entender cómo el espacio y el tiempo pueden deformarse, que la velocidad de la luz en el vacío es el límite en el universo, por qué la luz se curva en presencia de campos gravitacionales, que las estrellas mueren en explosiones gigantescas y violentas de las cuales surgen los materiales indispensables para que la vida sea posible... Y aún así quedan muchos misterios en el universo por esclarecer ¿Pero qué hay de aquello que es extremadamente pequeño?

Hay tantos misterios en lo que concierne a la materia a escalas cuánticas, que incluso necesitamos cambiar un poco la forma de ver la física a estas escalas. Y entre más nos adentramos al mundo subatómico, nuevas y más desconcertantes misterios aparecen. La realidad se nos escapa de las manos tanto a escalas astronómicamente grandes como a escalas subatómicamente pequeñas, sin embargo, la física sigue teniendo un papel muy importante en el estudio de la naturaleza y su predicción.

## **1. La antigüedad**

La física fue estudiada en todo el mundo antiguo, desde China hasta Grecia. Los pensadores griegos ya pensaban en cuatro elementos que conformaban lo que les rodeaba: agua, aire, fuego y tierra. En la Antigua Grecia se puede decir que todo comenzó con la desafiante actitud de Tales de Mileto (624–546 A.C.), quien se rehusó a aceptar explicaciones sobrenaturales, religiosas o mitológicas para dar cuenta de los fenómenos naturales. Él comenzó nuestro viaje hacia el entendimiento de la materia con su propuesta del primer principio (el arché): el agua. Su discípulo Anaximandro propuso el apeiron: lo “indefinido”, o “ilimitado”, infinito y sin forma

concreta. Anaxímenes de Mileto postuló que el aire era el primer principio, retando así a su maestro Anaximandro y a Tales.

Alrededor del año 500 A.C., Heráclito propuso que la única ley básica del universo es la del principio del cambio y que nada se mantendría igual para siempre. Esta idea sería una de las primeras en tomar en cuenta el rol del tiempo en el universo, lo cual sigue siendo clave en el estudio de la física al día de hoy.

La primera idea de atomismo griego llegó con Leucipo, también de Tebas, quien pensaba que todo está constituido por objetos indivisibles llamados “átomos” y que estos se desplazan por el espacio vacío. Su estudiante Demócrito agregó la idea de que estos “átomos” estaban en movimiento siempre y propuso un número infinito de tipos de átomos. Hay detalles interesantes en las ideas de los antiguos atomistas griegos. Por ejemplo, Demócrito, Leucipo y Epicuro creían que las características de los materiales dependían de la forma de sus átomos. Tal vez una de las ideas más fascinantes del atomismo griego fue la de Epicuro de Parékklisis, quien decía que los átomos podrían desviarse de los caminos que se esperaba que siguieran. De esta manera, Epicuro introdujo el concepto del libre albedrío en la hipótesis atomista sin dejar a un lado el determinismo. Los átomos podrían comportarse de una manera diferente a la que se espera. Esto es asombrosamente similar a lo que sucedió milenios después cuando se empezó a estudiar la mecánica cuántica.

No se debe olvidar que los indios podrían ser considerados los padres del atomismo: cuando el sabio Aruni, en el siglo VIII A.C., sentenció que hay partículas tan pequeñas que no es posible verlas como objetos de la experiencia y mucho menos cómo se amasan en sustancias. Muchas de las enseñanzas indias sobre el atomismo resultan muy similares a las de Demócrito, lo cual puede ser resultado de que las enseñanzas fueran transmitidas mediante el contacto cultural.

Aristóteles fue quien al final ejerció más influencia en la filosofía occidental y, siendo que él negaba las ideas atomistas, se aceptó su propuesta de que el universo

estaba compuesto por los cuatro elementos (agua, aire, fuego y tierra), más un elemento divino: el éter. Aunque Aristóteles estuvo equivocado al pensar que la materia no estaba compuesta de pequeños corpúsculos, su “tabla periódica” tiene el detalle interesante de coincidir con los estados de la materia que hoy conocemos: gaseoso, representado por el aire; líquido, representado por el agua; sólido, representado por la tierra; y plasma, representado por el fuego.

## **2. La Revolución Científica y la física clásica**

Lo que comenzó el ascenso de la física como una ciencia por sí misma es la muy famosa obra de Nicolás Copérnico Sobre los giros de los orbes celestes (*De revolutionibus orbium coelestium*), la cual estableció que la Tierra se mueve alrededor del Sol. Aunque ya en la antigüedad el modelo heliocéntrico había sido sugerido por Aristarco de Samos (310–230 A.C.), no tuvo el sustento que tuvo la obra de Copérnico, la cual hizo que fuera aceptado el modelo heliocéntrico. Estas nuevas ideas, así como las observaciones hechas por Tycho Brahe, permitieron que Johannes Kepler pudiera formular sus leyes para describir matemáticamente el movimiento de los planetas en sus órbitas, las cuales resultaban ser elípticas.

Galileo Galilei, con sus experimentos y propuestas contrarias a lo que establecía Aristóteles sobre el movimiento, pudo determinar que un objeto no caía más rápido si tenía una masa mayor, por lo que pudo calcular la trayectoria parabólica de los proyectiles y desarrollar el concepto de la relatividad galileana, la cual establece que todos los movimientos son iguales en todos los sistemas de referencia inerciales.

Más adelante, llegaría quien es considerado el más grandioso físico de todos los tiempos: Isaac Newton. No solamente formuló sus tres leyes del movimiento y la ley de gravedad universal, también inventó una nueva rama de las matemáticas: el cálculo, el cual fue también inventado de manera independiente por Gottfried Leibniz. El cálculo se convirtió en una herramienta indispensable para el desarrollo de la física.

Algo que muestra el paradigma de la física en esta época es el uso de las matemáticas y su consecuente desarrollo. Es mediante ellas que podemos expresar de manera precisa lo que sucede en la naturaleza. Gracias a las matemáticas, poderosa herramienta, se lograrían los mayores avances científicos.

### **3. La física moderna**

Viento en popa, la física avanzó de una manera increíble durante siglos. Tanto así que para finales del siglo XIX se comenzaba a pensar que la física estaba terminada, que sólo quedaba volver más precisas las mediciones de las constantes de la naturaleza. Pero la naturaleza resultó ser más compleja de lo que se pensaba y comenzaron a aparecer fenómenos que no podían ser explicados con la física desarrollada hasta el momento. Así, en el siglo XX comenzó una nueva forma de pensar los fenómenos de la naturaleza.

#### *3.1. La relatividad especial*

Una de las ideas más revolucionarias de la física moderna es la relatividad especial. Aunque el concepto no fue concebido por Albert Einstein, su contribución fue considerar la velocidad de la luz en el vacío como constante, es decir, que es la misma para todos los observadores inerciales y es el límite de velocidad en el universo. Estas ideas no afectan nuestra vida cotidiana, ya que sólo aplican para cuerpos que se mueven a velocidades muy altas y cercanas a la de la luz, mientras que los fenómenos cotidianos suceden a velocidades muy bajas en comparación. Esta teoría también tuvo una idea revolucionaria para el momento: la relación entre el espacio y el tiempo. Obviamente, no podemos olvidar una ecuación que nos dio la relatividad especial:  $E = mc^2$ . Ésta nos dio la relación entre la masa y la energía.

La relatividad especial es una teoría bien definida y en la cual no podemos contribuir nada nuevo. Esto puede ser desalentador para algunas personas al estudiar física, pero está otra teoría que a la fecha sigue dando incógnitas: la relatividad general. Esta es la teoría que une a la relatividad especial con la gravedad. En esta se establecen fenómenos que nunca habrían imaginado los filósofos de la antigüedad, tales como que los cuerpos distorsionan el espacio y el tiempo a su alrededor causando de esta manera la gravedad, o bien, hipótesis tan descabelladas como las de los puentes de Einstein-Rosen, mejor conocidos como agujeros de gusano, que son distorsiones del espacio y el tiempo que nos permitirían viajar de un extremo del universo a otro en fracciones de segundo sin movernos más rápido que la luz.

### *3.2. La catástrofe ultravioleta: la mecánica cuántica*

Mientras la relatividad especial ayudaba a resolver conflictos de fenómenos electromagnéticos, aparecía un nuevo problema que la física no era capaz de explicar: la radiación electromagnética emitida por un cuerpo negro. La teoría predecía que en el espectro ultravioleta, a longitudes de onda más pequeñas la energía debía tender hacia el infinito, pero los experimentos mostraban que se aproximaba a cero. Esto fue conocido como “la catástrofe ultravioleta”, la cual sólo pudo ser resuelta con una nueva teoría: la mecánica cuántica. Esta teoría trata sobre las escalas atómica y subatómica. Difiere con la física clásica en que la energía, el momentum, el momentum angular y otras cantidades en un sistema están restringidas a valores discretos. Los cuerpos pueden tener comportamientos tanto de ondas como de partículas y hay límites a la precisión con la que una cantidad física puede ser predicha antes de ser medida, siendo ésta la propiedad probabilística de la mecánica cuántica. Max Planck introdujo los conceptos básicos de esta teoría en el año 1900. Los experimentos del efecto Compton, el efecto fotoeléctrico, el experimento de Millikan, el experimento de Stern-Gerlach, etcétera, dieron la razón a la mecánica cuántica.

Este tema nunca fue muy apreciado por Albert Einstein, a pesar de que él contribuyó con la explicación teórica del efecto fotoeléctrico. En efecto, el carácter probabilístico de esta teoría no fue muy apreciado por muchos de los grandes físicos, teniendo como emblema de esta corriente una frase famosa de Einstein: “Dios no juega a los dados”. La respuesta de Erwin Schrödinger a esa frase fue: “Señor Einstein, no le diga a dios qué hacer con sus dados”.

#### **4. La mecánica cuántica relativista**

Es famosa una idea, parcialmente incorrecta: que la relatividad y la mecánica cuántica están peleadas. Efectivamente, hay un problema al intentar unificar la relatividad general con la mecánica cuántica, pero como se dijo anteriormente, la teoría de la relatividad especial está muy bien comprobada y puede ser usada para definir si una teoría es válida o no. La mecánica cuántica debía sobrevivir a las pruebas que le impusiera la relatividad especial. Esta transición de la descripción no relativista a la relativista implica que varios conceptos deben ser revisados. En particular, los siguientes:

1. Las coordenadas espaciales y temporales deben ser tratadas como iguales.
2. Una partícula relativista no puede ser localizada con gran precisión, ya que si la energía es muy alta, entonces sucede una creación de pares partícula-antipartícula.
3. Si la posición de una partícula es indefinida, también lo será su tiempo.
4. Con energías altas (relativistas) ocurren procesos de creación y aniquilación de pares de partículas, usualmente en forma de la creación de pares partícula-antipartícula. Por lo tanto, con las energías relativistas, la conservación de número de partícula ya no es una suposición válida.

El primer intento de conciliar ambas teorías fue la ecuación de Klein-Gordon. Al desarrollar su idea se toparon con densidades de probabilidad negativas y

energías negativas, las cuales no suceden en física clásica, en la relatividad especial ni en la mecánica cuántica. Por mucho tiempo, esta ingeniosa ecuación fue vista como sinsentido físico, una curiosidad matemática. Pero los científicos somos perseverantes, o necios, y llegó Paul Adrien Maurice Dirac en 1928, con su ecuación para describir las partículas relativistas y todo pareció ser correcto. Sin embargo, se obtuvieron nuevamente energías negativas. Dirac propuso entonces que esas energías eran antimateria. Esta revolucionaria idea —y tal vez descabellada para muchos en su momento— fue comprobada experimentalmente en 1932 por Carl David Anderson. Así comenzó la física de altas energías.

## **5. La teoría cuántica de los campos y el modelo estándar de las partículas**

Justo cuando se podría pensar que la física moderna se volvía extraña, se propuso la cuantización de campos en la mecánica cuántica relativista, teniendo así la teoría cuántica de los campos a través de interacciones mediadas por partículas virtuales, las cuales pueden existir de acuerdo a las leyes que gobiernan las incertidumbres asociadas a la teoría cuántica.

El modelo estándar de las partículas elementales es una teoría cuántica que describe las interacciones de las partículas que componen toda la materia. Estas interacciones pueden suceder mediante tres fuerzas: la eléctrica, la débil (las cuales pueden unificarse como interacciones electrodébiles) y la fuerte. La fuerza débil es la fuerza que permite que las partículas decaigan y la fuerza fuerte es la que hace que las partículas que constituyen a los protones —los quarks— se mantengan unidas. La unificación de las fuerza débil y eléctrica es formulada por Abdus Salam, Steven Weinberg y Sheldon Glashow. Su teoría fue comprobada en el experimento Gargamelle (una cámara de burbujas) en la Organización Europea para la Investigación Nuclear (CERN por sus siglas en francés).

El modelo estándar también describe cuáles son las partículas y los mediadores de las interacciones y hasta ahora, ha probado ser un modelo consistente y altamente predictivo. La última partícula que faltaba era el bosón de Higgs, la partícula resultante por la ruptura del campo de Higgs, el cual es el responsable de darle masa a las partículas fundamentales.

No obstante, aun cuando ha sido descubierta, tenemos incógnitas acerca del modelo; demasiadas cantidades son definidas “a mano”, a lo que se conoce parámetros libres. Una buena teoría tiene pocos de parámetros libres, pues cuando estos son definidos “a mano”, no sabemos por qué son como son. Esto es buenas noticias para los físicos, ya que significa que todavía quedan dudas por resolver y, de hecho, abundan diversos modelos para explicar estas incógnitas, pero tienen que superar las evidencias experimentales.

## **6. ¿Y esto de qué nos sirve?**

Obviamente nace la pregunta sobre la aplicación de estos conocimientos, más allá de que sea parte intrínseca de la humanidad el tratar de entender lo que nos rodea y, de esta manera, entender qué somos e incluso cuál es nuestro origen.

Aunque parecen ideas lejanas o ficticias, las teorías de la física tienen una aplicación en la actualidad y aquellas que no lo tienen todavía, posiblemente lo tendrán en el futuro, a corto plazo. El mejor ejemplo es la tomografía por emisión de positrones (PET por sus siglas en inglés), que hace uso de los decaimientos en los núcleos de neutrones inestables para producir pares de partícula-antipartícula para que, con los detectores adecuados, se pueda realizar la medición en tiempo real de, por poner algún ejemplo, el cerebro. Tenemos también la hadroterapia, que sería una terapia muy buena contra el cáncer, la cual consistiría en usar partículas altamente energéticas para “bombardear” un tumor cancerígeno sin afectar tejidos adyacentes, a diferencia

de la radioterapia que es muy agresiva. Con un mejor entendimiento de las partículas fundamentales podríamos mejorar estos métodos médicos.

Otros avances interesantes que pueden asociarse a la física de altas energías no son directos. Un ejemplo sería la web, conocida por casi todo el mundo, que fue desarrollada en el CERN para poder compartir datos de manera más eficiente. Otro ejemplo serían los sistemas de enfriamiento del Gran Acelerador de Hadrones (LHC por sus siglas en inglés), que es el punto más frío del universo al necesitar de una temperatura de 1.9 K (-271.25°C) para el funcionamiento de sus tubos superconductores, mientras que la temperatura del espacio es de 3 K (-270°C). De igual modo, debido a las herramientas computacionales y estadísticas que se necesitan para estudiar los experimentos de altas energías, muchos egresados que hicieron sus posgrados en proyectos ligados directamente al CERN son contratados por instituciones bancarias para realizar cálculos económicos, otra posible aplicación de los avances desarrollados en la física.

## **Conclusión**

La física de altas energías y la relatividad general son por ahora las ramas de la física que están en la frontera de lo conocido y lo desconocido. Tenemos un camino largo por recorrer para poder entender el universo que nos rodea en sus diversas escalas, pero la humanidad ha demostrado con su perseverancia que siempre estará persiguiendo el entendimiento de la naturaleza. Es muy probable que los físicos actuales no lleguen a ver una “teoría del todo” que unifique a la teoría de la relatividad general con la teoría cuántica de los campos, pero de igual manera, muchos antes que nosotros no pudieron ver los grandiosos descubrimientos que se han logrado en años recientes. En todo caso la física, como cualquier área de la ciencia, es un trabajo colaborativo que lleva milenios de desarrollo y se basa en los estudios de nuestros colegas del pasado para intentar avanzar en el conocimiento humano. Citando a Isaac Newton: “yo sólo ando sobre hombros de gigantes”.