

Alcance e impacto de las formulaciones teóricas de la física

J. Rubén Morones Ibarra
Posgrado de FCFM-UANL
rmorones@fcfm.uanl.mx

LIGHTS ALL ASKEW IN THE HEAVENS

Men of Science More or Less
Agog Over Results of Eclipse
Observations.

EINSTEIN THEORY TRIUMPHS

Stars Not Where They Seemed
or Were Calculated to be,
but Nobody Need Worry.

A BOOK FOR 12 WISE MEN

No More in All the World Could
Comprehend It, Said Einstein When
His Daring Publishers Accepted It.

Special Cable to THE NEW YORK TIMES.
LONDON, Nov. 9.—Efforts made to
put in words intelligible to the non-
scientific public the Einstein theory of
light proved by the eclipse expedition
so far have not been very successful. The
new theory was discussed at a recent
meeting of the Royal Society and Royal
Astronomical Society, Sir Joseph Thomson,
President of the Royal Society, de-
clares it is not possible to put Einstein's
theory into really intelligible words, yet
at the same time Thomson adds:
"The results of the eclipse expedition
demonstrating that the rays of light
from the stars are bent or deflected
from their normal course by other aerial
bodies acting upon them and con-
sequently the inference that light has
weight form a most important con-
tribution to the laws of gravity given us
since Newton laid down his principles."

The New York Times 10 noviembre 1919

RESUMEN

En este artículo se mencionan algunos de los logros de la física teórica y la manera en la que las teorías físicas se formulan matemáticamente. Se hace un recuento de importantes predicciones teóricas y de sus confirmaciones experimentales. Se concluye presentando algunos de los retos actuales de la física teórica y los esfuerzos para encontrar respuestas y soluciones a los problemas planteados.

PALABRAS CLAVE

Física teórica, ciencia, retos, demostraciones, simetrías en la física.

ABSTRACT

In this paper are introduced some of the achievements in theoretical physics and the way in which the physics theories are mathematically formulated. A list of relevant theoretical predictions and their experimental confirmations are included. Some of the actual challenges in theoretical physics are remarked and the work that is doing in order to find answers to these questions.

KEYWORDS

Theoretical physics, science, challenges, demonstrations, symmetry in physics.

INTRODUCCIÓN

La física se divide en dos grandes campos: la física teórica y la física experimental. La física teórica la constituyen un conjunto de ecuaciones y métodos matemáticos que permiten describir los fenómenos del mundo físico, es decir, los procesos que ocurren en la materia. Para su estudio la física teórica recurre a los modelos matemáticos, por esto es también llamada física matemática. La física teórica busca formular teorías y leyes, con lo cual se logra predecir lo que ocurrirá en los experimentos.

La primera ecuación asociada a un fenómeno físico fue elaborada por Galileo. Con esta ecuación predecía la posición de un cuerpo en caída libre como función del tiempo. Cuando un cuerpo se suelta desde el reposo recorre una distancia vertical s cuyo valor está dado por $s = \frac{1}{2}gt^2$, donde g es la aceleración de la gravedad y t es el tiempo. Esta ecuación obtenida por Galileo se estudia hoy en el nivel de secundaria como parte de los ejercicios de cinemática de la caída libre.



El comandante David Scott durante la misión *Apollo 15*, realizando la demostración de las conjeturas de Galileo sobre la simultánea caída libre de objetos en el vacío. http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/lunar/apollo_15_feather_drop.html

Posteriormente, Isaac Newton a quien se le considera el primer físico teórico, descubrió las leyes del movimiento y de la gravitación universal, expresando éstas mediante relaciones matemáticas que constituyen hoy en día la Mecánica Newtoniana. Después vendría otro gran físico teórico, Clerk Maxwell, quien logró la unificación de la electricidad y el magnetismo en su gran obra sobre la teoría electromagnética.

En la actualidad los campos fundamentales de la física teórica son: La mecánica analítica, la electrodinámica clásica, la teoría de la relatividad, la teoría cuántica, y la física estadística. Extensiones de estas teorías y combinaciones de ellas dan como resultados la teoría cuántica relativista de campos y otras teorías que pretenden unificar todas las fuerzas fundamentales de la naturaleza.

Los físicos teóricos contemporáneos emplean métodos matemáticos muy sofisticados, inventando algunas veces nuevas matemáticas de acuerdo con sus necesidades. Recordemos que Newton inventó el cálculo infinitesimal para realizar los cálculos que necesitaba. Debido a la gran complejidad de los métodos matemáticos usados actualmente por los físicos, se ha llegado a situaciones en donde las predicciones van más allá de lo que la tecnología actual puede explorar mediante experimentos. En este caso las teorías se quedan sin soporte fenomenológico, como el caso de la teoría de cuerdas, sobre las estructuras fundamentales de la materia, que pretende ser una teoría del todo y donde todas las partículas fundamentales resultan ser manifestaciones de la vibración de pequeñas cuerdas.¹

En campos muy abstractos de la física teórica como es el caso de la física de partículas elementales, el primer problema es el de identificar los parámetros importantes, aquéllos que nos permiten describir los fenómenos que observamos en el laboratorio. En los modelos matemáticos lo que nos preocupa es expresar las ecuaciones en términos de los grados de libertad adecuados que nos proporcionen cantidades medibles que nos permitan someter a la teoría a la prueba experimental. En uno de los ejemplos que incluiremos en este artículo para estudiar la materia nuclear resulta que una analogía con los sistemas de materia condensada nos permite identificar a las partículas propagándose en el medio nuclear con el equivalente en la propagación de modos colectivos en la materia condensada. Estos modos colectivos son los fonones, los cuales son generados por desplazamientos en el arreglo de los átomos en una estructura cristalina. En la materia nuclear estos modos colectivos son identificados con partículas propagándose en el medio. Las características de estas partículas están determinadas por parámetros físicos denominados números cuánticos.

El poder de la física teórica se pone de manifiesto en la unificación de amplios sectores de fenómenos físicos. Por ejemplo, la electricidad, el magnetismo y los fenómenos ópticos, fueron agrupados en un amplio conjunto de fenómenos conocidos como fenómenos electromagnéticos. Este conjunto de fenómenos se describe con cuatro ecuaciones, las cuales son conocidas como ecuaciones de Maxwell. Si nos ponemos a reflexionar sobre este poder unificador de la matemática nos daremos cuenta de lo impresionante que es que fenómenos tan diversos como los de la electricidad, el magnetismo y la luz hayan sido englobados por un conjunto de cuatro ecuaciones, permitiendo que puedan ser estudiados de manera conjunta.

LA FÍSICA TEÓRICA

Todo el conocimiento que se tiene de la naturaleza, de la estructura de la materia y sus propiedades y del universo en general se ha obtenido mediante la observación, la experimentación y el desarrollo de estructuras teóricas. Estas estructuras teóricas consisten en un conjunto de ideas organizadas, sistemáticamente expresadas mediante relaciones

matemáticas a las que se le conoce como física teórica. La física teórica pretende describir el funcionamiento de los fenómenos del universo en términos matemáticos.

Mediante los experimentos, los cuales son procesos controlados para observar lo que pasa, se busca obtener información sobre el comportamiento de la materia. Es en esta etapa del proceso de investigación donde surgen las preguntas. El intento de responder a estas preguntas y la búsqueda de explicación de lo que sucede es el campo de la física teórica. La herramienta fundamental de la física teórica es la matemática, la cual resulta ser el instrumento más poderoso para entender el funcionamiento de la naturaleza. La matemática permite no sólo explicar lo que sucede sino adquirir nuevo conocimiento y predecir lo que va a ocurrir en un experimento.

Por ejemplo, de la observación de que las galaxias se están alejando unas de otras, se llegó a la conclusión de que en el pasado todo el universo estaba concentrado en una pequeña región del espacio. Con esta información se elaboró el modelo del *Big Bang*. La ley de Hubble $\frac{dr}{dt} = Hr$, donde r es el radio del universo, es la primera ecuación asociada al comportamiento del universo. De ahí se inició la cosmología como una ciencia.

El *Big Bang* es un modelo matemático para explicar el origen del universo. Entre sus predicciones está la de la existencia de la radiación de fondo, la cual es el vestigio o remanente de la radiación electromagnética que había en el universo temprano. La expansión del universo produjo el enfriamiento de esta radiación cuya temperatura estimada en el modelo del *Big Bang* está en perfecto acuerdo con el valor experimental. De este modelo se han derivado muchos conocimientos que hoy tenemos sobre el universo.

Por otra parte, la matemática tiene un gran poder integrador, con ella se han podido unificar aspectos y fenómenos de la naturaleza que parecían separados y sin ninguna conexión aparente. La electricidad y el magnetismo que ya mencionamos resultan ser manifestaciones de una sola propiedad física que es la carga eléctrica. De esta manera la física teórica aglutina, en un mismo cuerpo de conocimientos una enorme variedad de fenómenos físicos.

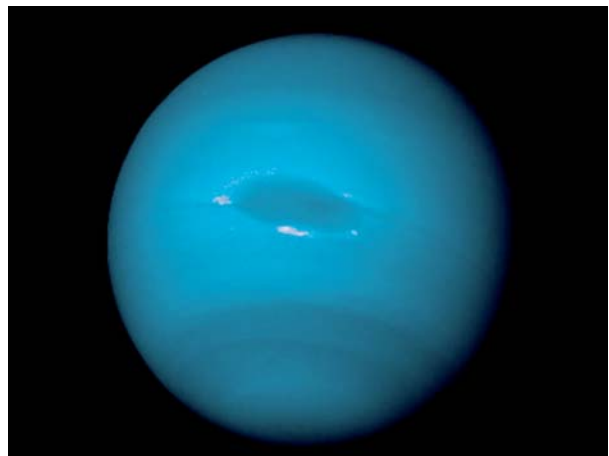
EL IMPACTO DE LA FÍSICA TEÓRICA

Los modelos matemáticos de la física tienen, por su misma naturaleza, una cierta capacidad de predicción. Cuando estos modelos son exitosos y describen algo de la realidad, se espera que sus predicciones sean cumplidas. La confirmación de las predicciones de un modelo es el ingrediente que lleva a la consolidación del mismo y los convierte en una teoría con cierto grado de confiabilidad.

En la historia de la física ha habido una gran cantidad de hechos espectaculares que han mostrado el poder que tiene la física teórica. En seguida se mostrará una lista de predicciones de la física teórica que fueron confirmadas experimentalmente, dando a la teoría respectiva un gran prestigio científico.

a) Descubrimiento de Neptuno

En el año de 1781 fue descubierto el planeta Urano. Hasta ese entonces sólo se conocían siete planetas: Mercurio, Venus, Tierra, Marte, Júpiter, Saturno y Urano. La teoría de la Gravitación de Newton y las leyes de la mecánica desarrolladas por él, habían sido tan exitosas que se podía determinar con gran precisión las órbitas de los planetas, así como también predecir con gran precisión los eclipses. Las leyes de Newton se consolidaron como la teoría que describe el movimiento tanto de los cuerpos en el cielo como en la Tierra. Con estos resultados las leyes de Newton adquirieron un carácter universal.



Planeta Neptuno. Descubierto gracias a la predicción hecha con base en el modelo gravitacional de Newton. <http://www.wallpaperslot.com/wallpaper-neptune-13454.php>

Sin embargo, estas leyes fallaban al aplicarlas para determinar la órbita de Urano. La órbita de Urano se desviaba de las predicciones de la teoría newtoniana. Algunos científicos empezaron a decepcionarse pensando que el poder de la mecánica newtoniana era limitado, lo que se mostraba en el caso de la órbita de Urano. No obstante, el astrónomo y matemático francés Urbain Le Verrier supuso que la desviación de Urano se debía a la presencia de un planeta desconocido hasta entonces. Realizó los cálculos bajo la hipótesis de la existencia de otro planeta y predijo una órbita para Urano que correspondía a la observada. En el año de 1846, la noche del 23 de septiembre se inició la búsqueda del nuevo planeta, el cual fue encontrado a las pocas horas de observación en la posición que Le Verrier calculó. Fue así como ocurrió el descubrimiento de Neptuno, el octavo planeta de nuestro sistema solar. Éste fue un éxito impresionante de la mecánica newtoniana, sin precedente en ninguna otra creación del intelecto humano.²

Con este asombroso resultado la mecánica se consolidó como una teoría poderosa, respetada por toda la comunidad científica. Posteriormente se desarrollarían formulaciones de la mecánica más abstractas, pero equivalentes a la mecánica newtoniana. La formulación de Lagrange y la formulación de Hamilton son dos ejemplos de ellas.

b) Las ondas electromagnéticas

Después de la mecánica surgió otra de las grandes teorías de la física: La teoría del electromagnetismo. La teoría electromagnética fue desarrollada por Clerk Maxwell en 1873. Esta teoría unificaba las fuerzas eléctricas y magnéticas que antes de Michael Faraday (1791-1867) se estudiaban como fenómenos independientes, no relacionados entre sí. La teoría de Maxwell predijo la existencia de las ondas electromagnéticas. Estas ondas fueron descubiertas por Henry Hertz diez años después de la muerte de Maxwell. No tuvo éste la fortuna de ver que sus predicciones teóricas se cumplían. El descubrimiento de las ondas electromagnéticas constituye otro de los grandes logros de la física teórica.

El experimento del descubrimiento de las ondas electromagnéticas se realizó en Alemania en el

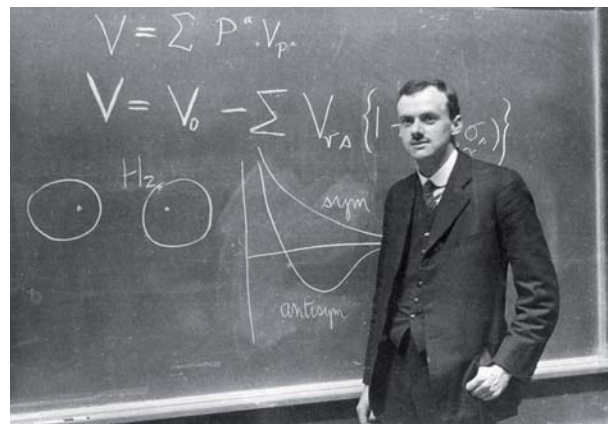
año de 1887. Hertz instaló dos circuitos eléctricos similares, conteniendo bobinas, en lugares diferentes del laboratorio y sin establecer conexiones eléctricas entre ellos; sólo uno de ellos tenía fuente de poder. Conectando y desconectándola, la fuente de poder producía chispas entre los extremos separados de los cables. Cuando esto ocurría, en el otro circuito se observaban chispas eléctricas saltando entre los extremos de dos alambres. La explicación del fenómeno es que en el circuito con fuente se generan las ondas electromagnéticas (transmisor) y en el otro se reciben (circuito receptor). Este acontecimiento marcó el inicio de las telecomunicaciones.

c) Predicciones de la Teoría General de la Relatividad

En la teoría de la relatividad general desarrollada por Einstein hay muchas predicciones espectaculares. Una de ellas, la de la desviación de la luz al pasar por una estrella fue confirmada durante el eclipse total de Sol del año 1919. La confirmación de este fenómeno fue lo que lanzó a Einstein a la popularidad mundial. Varios periódicos del mundo dieron la noticia de la confirmación de la teoría de Einstein con grandes encabezados. La predicción de la existencia de los agujeros negros y otras más, son consecuencia también de la teoría general de la relatividad de Einstein.

d) Antipartículas

El físico británico P. A. M. Dirac desarrolló la primera teoría cuántica relativista exitosa.



Paul Adrien Maurice Dirac [1902-1984]. Físico teórico británico que contribuyó grandemente al desarrollo de la mecánica cuántica y la electrodinámica cuántica.

En el año de 1929 obtuvo una ecuación, que actualmente lleva su nombre, para describir el comportamiento del electrón. Su ecuación, además de tener soluciones para el electrón cuya carga es negativa, permitía también soluciones para una partícula idéntica al electrón pero de carga positiva. Estos electrones de carga positiva, a los que hoy llamamos positrones, correspondían a soluciones de la ecuación de Dirac para energías negativas. Estas soluciones eran inaceptables desde el punto de vista de la física conocida hasta esos días. Sin embargo, Dirac, en vez de desechar estas soluciones o de desechar su ecuación, introdujo conceptos novedosos en la física con el fin de salvar del fracaso a su ecuación.

Sus argumentos, que se basaban en razonamientos muy elaborados, resultaron correctos y con esto predijo la existencia del positrón, el cual fue descubierto en 1932, pocos años después de su predicción. La ecuación de Dirac dio la pauta para la predicción de las antipartículas, las cuales son hoy elementos que aparecen normalmente en los experimentos de la física de altas energías.³

e) El Neutrino

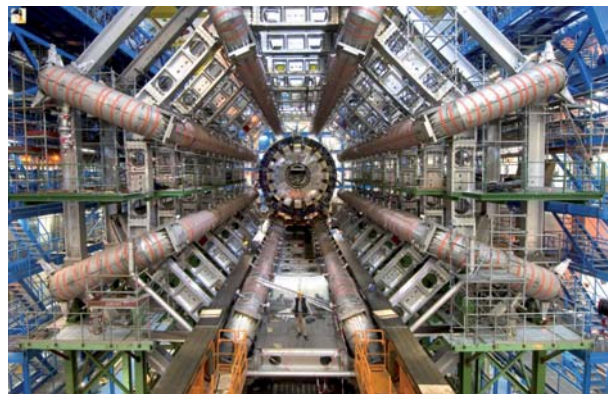
En la década de 1920, en los experimentos de física nuclear sobre el decaimiento de núcleos atómicos mediante la emisión de electrones, se encontró que se violaba el principio de conservación de la energía. El proceso nuclear, conocido como desintegración beta daba como resultado experimental que la energía inicial del proceso era mayor que la energía final. Físicos de la talla de Niels Bohr, admitieron que en estos procesos nucleares no se conservaba la energía. Sin embargo, el físico alemán Wolfgang Pauli, no se resignó a aceptar este argumento. En el año de 1931 propuso una teoría donde predijo que debería existir una partícula con carga neutra y masa cero. Esta partícula era la que se llevaba la energía faltante en el estado final de las reacciones de desintegración beta. Estas partículas que hoy conocemos como neutrinos, fueron observadas 25 años después de que se supuso su existencia. Originalmente se les llamaba los ladrones de energía, pero el físico italiano Enrico Fermi las bautizó con el nombre de neutrinos. El Premio Nobel de Física les fue otorgado a los descubridores del neutrino en el año de 1995.⁴

f) La radiación de fondo del universo

Después del descubrimiento de Hubble de la expansión de las Galaxias, George Gamow elaboró la teoría del Gran Estallido como origen del universo. El modelo del *Big Bang*, una teoría matemática sobre el origen del universo, predice la existencia de una radiación de naturaleza electromagnética que invade todo el universo. A esta radiación se le conoce como radiación de fondo del universo. Gamow calculó la temperatura de esta radiación y sus predicciones fueron confirmadas con el descubrimiento de esta radiación en el año de 1965 por los ingenieros Robert Wilson y Arno Penzias. Éste constituye sin duda otro gran logro de la física teórica, que confirmó el modelo del *Big Bang*. Por este descubrimiento se les otorgó el Premio Nobel de Física en 1978.⁵

g) Bosones de Norma W y Z

Otra de las grandes hazañas de la física teórica la constituye la formulación de la teoría electro-débil. Ésta es una de las teorías más complejas y elaboradas de la física. Basada en teorías matemáticas de gran abstracción, con ella se unifican dos de las fuerzas fundamentales de la naturaleza: la fuerza electromagnética y la fuerza débil. Entre sus predicciones está la de la existencia de tres partículas con ciertas características. Estas partículas, conocidos como bosones de norma, fueron descubiertas en el año de 1983 por el físico italiano Carlo Rubia y su equipo en el laboratorio del CERN. Por este descubrimiento se les otorgó el Premio Nobel de Física de 1984.⁵



Colisionador de partículas de la Organización Europea de Investigación Nuclear (CERN) utilizado para el estudio de las partículas elementales de la materia. <http://technicalstudies.youngster.com/2010/05/hadron-collider-massive-particle.html>

h) El bosón de Higgs

El modelo estándar es la teoría más completa que tenemos para describir el comportamiento de las partículas fundamentales. Este modelo ha resultado ser enormemente exitoso. Es la teoría de las fuerzas fundamentales de la naturaleza y la teoría que describe y clasifica a las partículas elementales, las cuales son las estructuras básicas de la materia.

El modelo estándar fue construido entre los años 1960 y 1964 por los físicos Steven Weinberg, Abdus Salam y Sheldon Glashow, quienes ganaron el premio Nobel de física por lograr la unificación de las teorías sobre la fuerza electromagnética y la fuerza débil. Esta teoría unificada, llamada la teoría electro-débil se conoció como modelo estándar. Posteriormente el nombre de modelo estándar se extendió para incluir la fuerza fuerte.

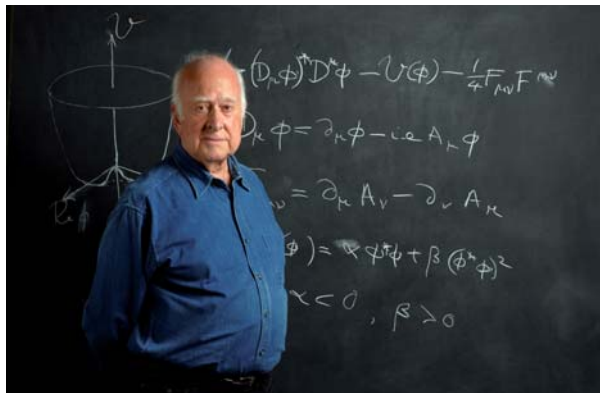
En el mundo totalmente desconocido de las partículas subnucleares se buscaba un camino para construir una teoría que explicara los fenómenos que ocurren entre estas partículas. La primera hipótesis requería la suposición de que las partículas tienen masa cero. Así inició el modelo estándar. Sin embargo como lo que se observa es que las partículas tienen masa diferente de cero, se requirió introducir un mecanismo que permitiera proporcionar masa a las partículas. Este mecanismo que lleva un nombre extraño y que se conoce como Rompimiento Espontáneo de la Simetría, implica la existencia de una partícula nueva. Esa partícula es la que conocemos como Bosón de Higgs.

El bosón de Higgs surge de la teoría electro-débil para dar masa a los bosones vectoriales de

norma o bosones vectoriales intermediarios, que como ya lo mencionamos, son los transmisores de la fuerza débil.

Este bosón se ha estado buscando afanosamente desde que se supuso su existencia en el año de 1964. Hoy a 48 años de distancia parece haberse encontrado. El descubrimiento del bosón de Higgs parece haber ocurrido el 4 de julio de 2012. El anuncio se publicó en todos los diarios importantes del mundo llevando la noticia a millones de personas. Si la noticia del descubrimiento del bosón de Higgs resulta cierta, éste será uno de los hallazgos más notables en la física del pasado y presente siglo, consolidando al modelo estándar como la teoría que describe las interacciones entre las partículas fundamentales. Sin embargo, la misma física teórica en este campo deja la puerta abierta para teorías más completas que serían extensiones de este modelo. Estas teorías, más allá del modelo estándar son en la actualidad, objeto de una intensa investigación en la física de partículas.

Una de las más grandes satisfacciones de un físico teórico es llegar a vivir el momento en que las predicciones de su teoría sean confirmadas experimentalmente. En la historia de la física se han dado muchos casos de estos. El descubrimiento de Neptuno, el de la antimateria, el del neutrino, el de la desviación de la luz por una estrella, y el más reciente, el del descubrimiento del Higgs, son ejemplos de ello. En la dirección electrónica: <http://www.guardian.co.uk/science/video/2012/jul/04/cern-higgs-boson-video>, se anuncia el descubrimiento del bosón de Higgs. Se observa a Peter Higgs visiblemente emocionado ante el anuncio.



Peter Ware Higgs. Físico británico conocido por su predicción de la existencia de una nueva partícula, el bosón de Higgs.

EL ALCANCE DE LA FÍSICA TEÓRICA

El objetivo principal de la física teórica es establecer las ecuaciones que gobiernan los fenómenos naturales. Los logros de la física teórica han sido impresionantes, su impacto ha sido tal que ha modificado nuestra forma de vida a través del impulso de nuevas tecnologías. Las consecuencias de las teorías físicas se han manifestado en desarrollos tecnológicos que son los que han marcado las diferentes épocas sociales. El sello actual de nuestras comunicaciones y relaciones sociales está determinado por las tecnologías de la información



Autoridades del CERN celebrando la demostración de la existencia del Bosón de Higgs el día 4 de julio de 2012. <http://news.nationalpost.com/2012/07/05/higgs-boson-find-could-make-light-speed-travel-possible-scientists-hope/>

que son el producto de los conocimientos que tenemos en la física teórica.

Hay un conjunto de conocimientos que tenemos sobre el mundo que nos rodea y sobre lo cual poca gente reflexiona. Tener una teoría que nos explique por qué una estrella puede explotar partiéndose en pedazos durante unos pocos segundos emitiendo una cantidad de luz mucho mayor que la que emiten todas las estrellas de la galaxia es uno de los logros de la física teórica útil para la comprensión de nuestro entorno.

Los físicos buscan los medios para lograr comprender el mundo donde vivimos y entender el funcionamiento del universo. La imaginación y la intuición son ingredientes importantes en este proceso de adquisición de conocimientos. Con estos elementos se han podido elaborar estructuras teóricas que nos han permitido explicar lo que observamos.

Muchas de las construcciones teóricas de la física provienen de la observación y la experimentación. Sin embargo hay otras formulaciones que se originan en el pensamiento mismo, basándose en premisas que se supone deben cumplirse en el mundo físico. También hay quienes confían en que el universo debe funcionar de acuerdo con ciertos principios estéticos. Según algunos físicos, la belleza debe ser el más fundamental principio en el funcionamiento del universo, éste es para muchos teóricos el criterio que guía la elaboración de nuevas teorías.

Para ejemplificar esto diremos que un razonamiento puramente estético nos indica que el universo no puede ser zurdo o derecho, más bien debería ser ambidextro. ¿Qué significa un universo

zurdo? Es un universo donde el marco de referencia levógiro es el que nos permite explicar mejor las cosas. Lo mismo diríamos de un universo derecho, donde el marco de referencia privilegiado sería el dextrógiro. Los físicos esperan que el marco de referencia deba ser indistinto para explicar y describir los fenómenos físicos.

Otra de las hipótesis fundamentales de la física teórica es que las leyes de la física deben ser universales, es decir, tener validez en cualquier punto del universo. No deben ser locales. De manera similar estas leyes deben ser válidas para todo instante de tiempo. Empleando el lenguaje unificado del espacio-tiempo decimos que las leyes de la física son válidas en todos los puntos del espacio-tiempo. Este resultado tiene una forma matemática de expresarse diciendo que las ecuaciones de la física son invariantes ante translaciones en el espacio-tiempo.

FENOMENOLOGÍA CONTRA AXIOMATIZACIÓN ESTÉTICA

El desarrollo de las ciencias naturales se basa en la fenomenología, es decir en la observación y la experimentación. Estas son las fuentes de información para desarrollar una teoría fenomenológica o empírica, donde los resultados de la teoría se ponen a prueba mediante el experimento. La confirmación experimental de los resultados teóricos y de sus predicciones es lo que le da solidez a una teoría científica. Sin embargo, en los modernos desarrollos de la física teórica han aparecido otras tendencias para edificar las teorías sobre los fenómenos naturales, principalmente en las áreas del mundo atómico y subatómico. P.A.M. Dirac, uno de los más notables científicos del siglo XX, afirmaba que la belleza de una teoría debería ser una componente importante para juzgar su validez. La belleza aquí es sinónimo de simetría.

Los físicos que apoyan esta corriente de pensamiento dentro de la física y a la que llamaremos axiomática o estética para contraponerla con la corriente fenomenológica, creen firmemente que existe otra manera para llegar a obtener buenos resultados en la búsqueda de las leyes que gobiernan los fenómenos naturales, principalmente al nivel atómico y subatómico. Dirac consideraba la belleza como guía y como criterio para juzgar la viabilidad de una ecuación como fundamental en la física.

Las posturas o corrientes filosóficas de la física son fundamentalmente dos: La empírica o fenomenológica y la otra es la estética o axiomática. Estos últimos confían en la simplicidad del universo, donde los aspectos estéticos y de simetría juegan un papel fundamental. En esta corriente no se piensa que el universo pueda ser caprichoso o rebuscado al grado de que los aspectos estéticos se hayan supeditado a otras formas de ordenar los fenómenos del universo. Einstein creía en esto y éste es el origen de su frase multicitada: Dios no juega a los dados. Aun cuando esta frase resultó fallida en los procesos atómicos, la idea de los físicos es que debe haber un sustrato en las leyes fundamentales del universo que respeten los aspectos estéticos. Esta estética está determinada por criterios matemáticos.

Dirac afirmaba que una ecuación de la física contiene en sí misma una gran belleza. En 1927 él obtuvo una ecuación para describir al electrón de una manera cuántica relativista, la cual es una de las ecuaciones fundamentales de la teoría cuántica relativista. Para una partícula libre esta ecuación tiene dos soluciones: una de energía positiva y otra de energía negativa. Cuando Dirac obtuvo por primera vez estas soluciones, la solución de energía negativa parecía que echaba a perder la ecuación. Pero según Dirac, su ecuación tenía una gran belleza matemática y no podía desecharse así nada más. Trató de salvar su ecuación mediante un artificio matemático y esto dio como resultado la predicción de la existencia de un electrón con carga positiva y que hoy conocemos como positrón. Esta partícula fue observada en los laboratorios de Berkeley California en el año de 1932, confirmando la predicción de Dirac. Después se confirmaría la existencia de muchas otras antipartículas que hoy se observan diariamente en los laboratorios de física de altas energías.

Quien entienda la matemática aprecia la belleza de una ecuación. Una ecuación muestra relaciones entre diversas cantidades físicas, lo que permite apreciar la interdependencia entre ellas. La belleza de una expresión matemática asociada con un sistema o proceso físico se manifiesta de varias formas:

- a) Se puede revelar en la forma compacta de su escritura.
- b) Al mostrar de manera clara la conexión entre las cantidades físicas que relaciona, lo cual permite interpretar físicamente su significado.

- c) El tipo de soluciones que admite restringe las posibilidades de las variables físicas, etc.

El poder de una teoría física es que para ser aceptada tiene que ser verificada experimentalmente. La teoría de la relatividad y la mecánica cuántica son creaciones abstractas, producto de razonamientos originados en la convicción de que la naturaleza respeta principios estéticos, es decir, que es regulada por aspectos de simplicidad y no caprichosos. No se cree, por ejemplo, que en un sistema de dos estados de igual energía ocurra que la probabilidad de encontrar al sistema en uno de ellos sea mayor a la del otro. De igual manera, de un conjunto de electrones no polarizados se espera que la mitad tengan espín hacia arriba y por consiguiente, la otra mitad lo tengan hacia abajo.

EL MONOPOLO MAGNÉTICO

En las ecuaciones de Maxwell se presenta una notable asimetría. Mientras que la ecuación donde interviene la divergencia del campo eléctrico se escribe como $\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$, la ecuación para la divergencia del campo magnético es $\nabla \cdot \vec{B} = 0$.

La interpretación física de estas ecuaciones es como sigue: $\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$, implica que el campo eléctrico tiene como fuente las cargas eléctricas. Por otra parte, $\nabla \cdot \vec{B} = 0$ significa que no existen cargas magnéticas aisladas. Esto tiene como consecuencia que no se haya observado nunca un monopolo magnético. Siempre se da que en cualquier estructura magnética encontremos un polo norte y un polo sur.

A Dirac esta asimetría de la naturaleza del campo electromagnético le pareció inaceptable por antiestética. Siguiendo la línea de pensamiento de que las ecuaciones de la física deben ser estéticas Dirac introdujo una modificación en las ecuaciones de Maxwell destruyendo esta asimetría y postuló la existencia del monopolo magnético.

El monopolo magnético resultaría ser una partícula que, como su nombre lo indica, tendría solo un polo norte por definición. Su antipartícula sería el polo sur. Lo importante en esta teoría, es que ambas pueden existir en forma aislada. Actualmente se realizan esfuerzos teóricos y experimentales para determinar las características del monopolo magnético. Hay proyectos de investigación en la física experimental que tiene el propósito de descubrir

el monopolio magnético, el cual se manifestaría en forma de una partícula. Hasta ahora no se ha tenido éxito. Si se logra descubrirlo, estaríamos ante otra de las grandes hazañas de la física teórica.⁶

LA IMPORTANCIA DE LAS SIMETRÍAS EN LA FÍSICA TEÓRICA

La idea más primitiva sobre el concepto de simetría es de naturaleza geométrica, pero los físicos lo han extendido y generalizado convirtiéndolo en una propiedad abstracta fundamentada en relaciones matemáticas, lo cual la convierte en un recurso muy poderoso y con un gran impacto en la física teórica.

La importancia de la simetría en la física se inicia con la visión y los trabajos de Einstein a principios del siglo XX. Posteriormente, en los años veinte, el físico húngaro Eugene Wigner y otros se percataron de que los conceptos de simetría juegan un papel fundamental en la comprensión de la naturaleza y para el desarrollo de las teorías físicas. Cuando no se tiene una teoría que describa la dinámica de alguna clase de sistemas, la simetría que se espera que sea satisfecha por las fuerzas que intervienen juega un papel decisivo para desarrollar la teoría correspondiente. Las fuerzas nucleares, por ejemplo, han ido aproximándose poco a poco para explicar los fenómenos observados, tomando como guía la simetría.

Uno de los grandes principios formulados antes del desarrollo de la ciencia moderna fue planteado por el filósofo y matemático alemán Gottfried Leibniz,



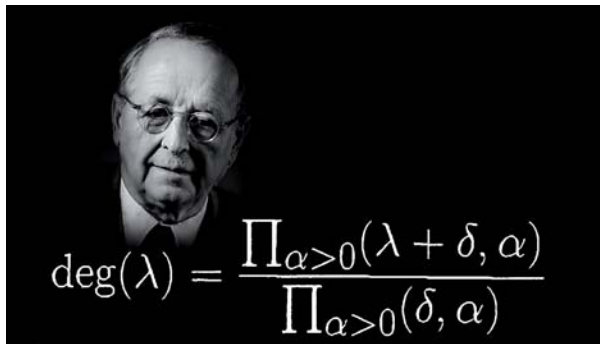
Eugene Paul Wigner [1902-1995]. Físico y matemático húngaro que recibió el Premio Nobel de Física en 1963 por el descubrimiento y aplicación de importantes principios de simetría.

estableciendo que si dos estados de un sistema son indistinguibles entre sí, entonces son el mismo estado. Este principio, aparentemente trivial e inocente, tiene profundas implicaciones para la ciencia. La simetría en la física está apoyada en esta idea o principio. Cambiemos algo en un sistema, y si el resultado es que no podemos distinguir lo que teníamos inicialmente de lo que tenemos ahora, entonces podemos identificar ambos estados como uno solo.

A partir del desarrollo de la teoría especial de la relatividad por Einstein, donde se postula que todas las leyes de la física deben tener la misma forma matemática en todos los sistemas de referencia inerciales, la guía para construir las teorías físicas han sido las propiedades de transformación de las variables o cantidades físicas que intervienen y de las interacciones o combinaciones entre ellas. Una transformación de una variable es un cambio que realizamos en dicha cantidad, dada por una prescripción matemática. Puesto que buscamos transformaciones que dejen invariantes las leyes de la física, las cuales se expresan mediante relaciones matemáticas, entonces estas transformaciones están restringidas por este requisito. Una transformación que deja invariante las ecuaciones de la teoría se le conoce como transformación de simetría.

El concepto de simetría en su forma más general lo estableció el físico-matemático alemán Weyl de la siguiente manera: una cosa es simétrica si uno puede someterla a ciertas transformaciones y esta cosa se ve exactamente igual después de la transformación. Esta cosa (algo) de la que estamos hablando puede ser una figura geométrica, o una expresión matemática y la transformación puede ser una operación geométrica o física, como una rotación o una translación, una reflexión, etc. La transformación puede también estar dada por una operación matemática, expresada mediante una función que toma el objeto matemático y lo modifica.

La idea de simetría como la planteó Weyl, se manifiesta clara y poderosamente en la teoría especial de la relatividad al establecer que las transformaciones matemáticas adecuadas, que conectan los diferentes marcos de referencia inerciales, dejan invariantes las ecuaciones de movimiento. En relatividad especial la simetría significa que la física es la misma para dos observadores en movimiento relativo uniforme. Las reglas de transformación que conectan a ambos observadores son transformaciones de simetría.



Hermann Klaus Hugo Weyl [1885-1955]. Físico-matemático alemán que construyó la primera teoría del campo unificado, en la que el campo electromagnético y el gravitatorio aparecen como propiedades geométricas del espacio-tiempo. <http://www.math.uni-bielefeld.de/weyl/poster.html#weyl/poster.html>

PRIMEROS PRINCIPIOS

Buscando encontrar armonía y regularidades en la enorme diversidad de objetos y de fenómenos naturales, el ser humano ha introducido conceptos que le permitan entender y explicar estos fenómenos. Avanzando en este conocimiento se pretende que los principios fundamentales queden establecidos a partir de los conceptos más primitivos que tenemos sobre el mundo que nos rodea. Estos primeros principios se construyen a partir de suposiciones sobre el espacio, el tiempo y la materia, que son de los conceptos más primitivos y fundamentales en toda teoría que trate de la naturaleza.

Se ha encontrado que las regularidades y la armonía en el universo están relacionadas con simetrías del espacio, del tiempo y de otros conceptos que se han introducido en la física (las simetrías internas, que no dependen ni del espacio ni del tiempo). La simetría que en sus orígenes fue un concepto geométrico se ha llevado a un grado muy elevado de abstracción a través del uso de los métodos matemáticos. El lenguaje matemático de las simetrías se conoce como teoría de grupos.

Las leyes y las regularidades en la física están estrechamente ligadas entre sí, manifestándose a través de teoremas de conservación que se obtienen a partir de las simetrías. Entre los ejemplos más conocidos de estas relaciones tenemos la conservación de la energía que es consecuencia de la homogeneidad del tiempo, la conservación de la cantidad de movimiento y la conservación

del momento angular que son consecuencias de la homogeneidad e isotropía del espacio, respectivamente. La conservación de la carga eléctrica que en un principio se postuló como un hecho experimental, resulta de una simetría bastante abstracta que se conoce como simetría de norma.

La importancia del concepto de simetría en la física proviene de un poderoso teorema demostrado por la matemática alemana Emmy Noether. En una transformación de simetría se produce un cambio en algunos parámetros o variables que entran en una teoría, sin que se produzca un cambio en las cantidades que se pueden observar o medir. El teorema conocido como Teorema de Noether, establece que el resultado de una transformación de simetría es siempre una cantidad conservada. La consecuencia de este teorema ha dado a la física teórica un impulso sin precedentes.

LA MATEMÁTICA ES UN LENGUAJE QUE DESCRIBE, UNIFICA Y ESTABLECE ANALOGÍAS

El concepto de energía en la física.

Una de las definiciones más desafortunadas de la física elemental es la de la energía. Es lamentable que aún los libros de física a nivel universitario definan el concepto de energía como la capacidad que tiene un sistema o un objeto para realizar un trabajo y no destaquen el hecho de que la energía es un concepto completamente abstracto que se introduce a través de relaciones matemáticas y es definida convenientemente para que resulte una cantidad que se conserva en todos los procesos. Esta característica de la energía es la que la ha hecho tan poderosa y tan útil en la ciencia: la energía no se crea ni se destruye, sólo se transforma, es un principio que aprende el estudiante desde primaria pero no se dice en el nivel universitario a qué se debe su validez.

Las cantidades conservadas en una teoría que describe el comportamiento de los sistemas físicos son fundamentales. Una cantidad que es constante en el tiempo resulta ser de gran utilidad para describir la dinámica de un sistema físico. En la física la energía se definió convenientemente para que resultara una cantidad conservada. Primeramente se introdujo el concepto de energía cinética y después, definida convenientemente para dar una cantidad conservada, se introdujo la energía potencial. Con esto obtenemos

que la energía mecánica de un sistema de partículas, la cual consiste en la suma de la energía cinética y la energía potencial es una cantidad que no cambia en el tiempo.

Cuando se incluyen interacciones (fuerzas) en los sistemas físicos, la energía se extiende para incluir, calor, sonido, luz, etc. de tal manera que resulte una cantidad conservada. En un sistema aislado de electrones, por ejemplo, la energía mecánica no se conserva. Hay que incluir la energía del campo electromagnético presente en el sistema.

Teorema del trabajo y la energía.

El teorema del trabajo y la energía establece que si una fuerza actúa sobre una partícula, el efecto de ésta al cambiar la posición de la partícula del punto A al punto B se manifiesta en el cambio en la energía cinética de la partícula entre ambos puntos. Matemáticamente esto se escribe como:

$$\int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{r} = K_B - K_A \quad (1)$$

Por otra parte, en el caso de fuerzas conservativas, se introduce la definición de energía potencial U como una función de la posición donde la diferencia de energía potencial entre los puntos A y B está dada por

$$-\int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{a} = U_B - U_A \quad (2)$$

Sumando miembro a miembro las ecuaciones (1) y (2) obtenemos la conservación de la energía mecánica

$$K_B - K_A + U_B - U_A = 0$$

$$\Delta K + \Delta U = 0$$

$$\Delta(K + U) = 0$$

$$K + U = \text{constante}$$

Notemos que hemos definido convenientemente la energía potencial para obtener una cantidad conservada. La energía mecánica es algo que por definición se conserva para el caso de fuerzas conservativas. Cuando se introducen otro tipo de fuerzas como la fricción se introduce una nueva cantidad llamada calor que se toma como una forma de energía y que conduce a la conservación de una cantidad más general, a la que llamamos simplemente energía. Con la introducción de otras interacciones aparecerán otras formas de energía como el sonido, la luz y otras más. Todas ellas

expresadas convenientemente para lograr una cantidad conservada que es llamada energía.

Por esto se habla del principio de conservación de la energía ya que este resultado no se obtiene como conclusión de ninguna idea más primitiva, sino que proviene de las definiciones. No es un teorema dirían los matemáticos, sino un postulado.

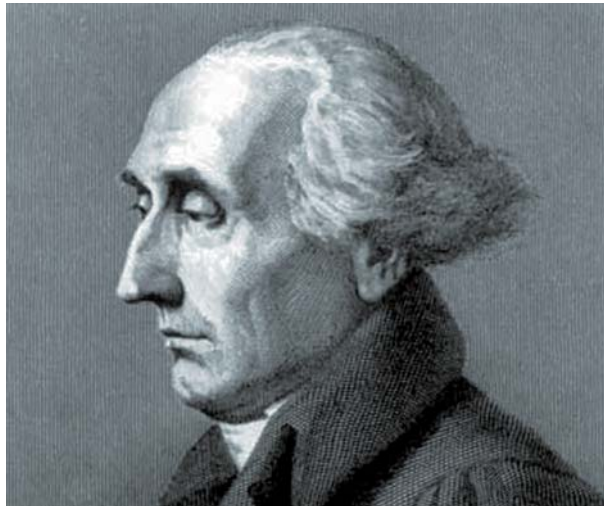
La mecánica teórica como pilar de la física teórica.

La mecánica es la teoría fundamental sobre la que se estructuró toda la física teórica. Sus ideas y conceptos invadieron todas las teorías de la física. Conceptos como energía, energía potencial, momentum lineal, momentum angular, etc. nacieron de la descripción de los sistemas mecánicos. Como es bien conocido, la primera formulación de la mecánica la desarrolló Newton basándose en el concepto de fuerza. Las leyes de Newton constituyen el fundamento de la mecánica. Sin embargo, hay otras formulaciones de la mecánica donde no entra el concepto de fuerza y resultan ser equivalentes a la mecánica newtoniana.

Las formulaciones lagrangiana y hamiltoniana son totalmente equivalentes a la mecánica de Newton y están basadas en el concepto de energía. Estas formulaciones son abstractas y se apoyan en un principio variacional conocido como principio de Hamilton. La ventaja de estas formulaciones es que permiten unificar ideas y conceptos fundamentales en diferentes campos de la física. También es posible detectar importantes características de los sistemas físicos sin siquiera resolver las ecuaciones de movimiento.

Nos concentraremos en la formulación lagrangiana para mostrar, con dos ejemplos específicos, la manera en la que se pueden asociar propiedades físicas de un sistema con características de conceptos fundamentales como espacio y tiempo.

Para evitar complicaciones se hará el análisis para un sistema de una sola partícula. La formulación lagrangiana se basa en la introducción de una función $L = L(x_i, \dot{x}_i, t)$, definida como $L = T - V(x_i)$, donde T y $V(x_i)$ son la energía cinética y la energía potencial, respectivamente. Las ecuaciones de movimiento, conocidas como ecuaciones de Euler-Lagrange tienen la forma



Joseph Louis Lagrange [1736-1813]. Matemático, físico y astrónomo francés de origen italiano, quien entre otras cosas reformuló la mecánica clásica de Isaac Newton.

$$\frac{\partial L}{\partial x_i} - \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{x}_i} = 0 \tag{3}$$

En el caso de una sola partícula tendremos tres ecuaciones ya que $x=x_1$, $y=x_2$, $z=x_3$ el índice nos indica la coordenada.

Para el caso de un sistema cerrado, es decir, aquel donde la partícula está interaccionando solamente con la fuerza que origina la energía potencial $V(x_i)$, tendremos que la lagrangiana L no debe depender explícitamente del tiempo. Esto se justifica por un principio fundamental conocido como homogeneidad del tiempo. El significado de esto es que si queremos describir el sistema partícula-entorno, el resultado de la descripción no debe depender del momento en que iniciemos la descripción. Esto implica que la dinámica del sistema será la misma. Como ejemplo podemos tomar el sistema Sol-Tierra. Notemos que esto es diferente si existieran fuerzas externas al sistema, lo cual implicaría que la influencia externa podría cambiar con el tiempo.

De una manera más elegante se expresa la independencia del sistema respecto al tiempo diciendo que el tiempo es homogéneo, es decir, que dos instantes de tiempo cualquiera son equivalentes. Habiendo llegado a esto, tenemos que

$$\frac{\partial L}{\partial t} = 0$$

Tomando ahora la derivada total de L respecto al tiempo, obtenemos

$$\frac{dL}{dt} = \sum_{i=1}^3 \left(\frac{\partial L}{\partial x_i} \frac{dx_i}{dt} + \frac{\partial L}{\partial \dot{x}_i} \frac{d\dot{x}_i}{dt} \right) \tag{4}$$

$$\frac{\partial L}{\partial x_i} = \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{x}_i}$$

Sustituyendo

de la Ec. (3) en la Ec. (4) obtenemos, después de dos pasos algebraicos, que

$$\frac{d}{dt} \left[L - \sum_{i=1}^3 \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}_i} \frac{dx_i}{dt} \right) \right] = 0$$

De aquí obtenemos que

$$L - \sum_{i=1}^3 \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}_i} \frac{dx_i}{dt} \right) = \text{constante} \tag{5}$$

Calculando explícitamente esta expresión obtenemos que ésta corresponde a la energía total de la partícula.

$$E = \frac{1}{2} m \sum_{i=1}^3 \dot{x}_i^2 + V(x) \tag{6}$$

$$\sum_{i=1}^3 \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}_i} \frac{dx_i}{dt} \right) = \sum_{i=1}^3 m \dot{x}_i \dot{x}_i$$

Sustituyendo esto en la Ec. (5), obtenemos que la cantidad constante es la energía total de la partícula, dada por la Ec. (6).

$$L - \sum_{i=1}^3 \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}_i} \frac{dx_i}{dt} \right) = \frac{1}{2} m \sum_{i=1}^3 \dot{x}_i^2 + V(x) - \sum_{i=1}^3 m \dot{x}_i \dot{x}_i = E$$

La conclusión de este análisis es que la conservación de la energía proviene de un aspecto muy fundamental de la naturaleza: la homogeneidad del tiempo. Esto le da al principio de conservación de la energía una gran solidez, pues no es ya producto de una serie de parches que se agregan cada vez que aparezca una nueva forma de energía como ocurre en la formulación newtoniana de la mecánica.⁷

El principio de conservación de la energía tiene validez universal debido a que se obtiene de una hipótesis muy fundamental que hacen los físicos sobre las propiedades del tiempo. La hipótesis se conoce como la homogeneidad del tiempo. Otras formas equivalentes de expresar esta idea son: cualquiera dos instantes de tiempo son equivalentes; las leyes de la física son invariantes ante translaciones en el tiempo; las leyes de la física son las mismas hoy y siempre.

Propagación de partículas en el medio nuclear

Así como se ha estudiado el sonido como una perturbación en un medio elástico, los fonones como resultado de la propagación de una perturbación o desplazamiento respecto de su posición de equilibrio de los átomos en una red cristalina y también la propagación de ondas electromagnéticas en medios materiales, podemos estudiar también la propagación de perturbaciones en el medio nuclear.

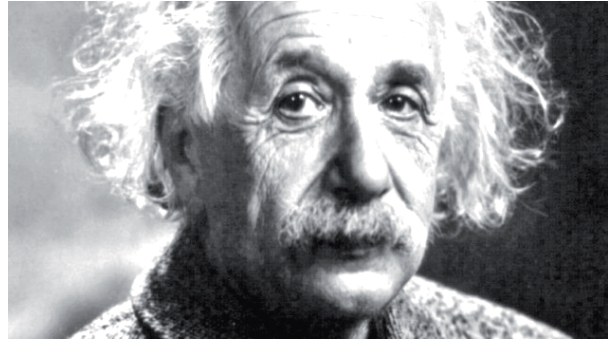
Los fonones, por analogía con los fotones, se consideran como partículas. De esta manera la propagación de una perturbación en la función que representa la fuente de mesones en el medio nuclear genera una perturbación que se asocia con un mesón y que se propaga con ciertas características dinámicas.

Notación, en la matemática la notación juega un papel muy importante. Lograr una notación compacta permite escribir expresiones matemáticas con apariencia más sencilla y nos ayuda a visualizar con mayor facilidad las relaciones entre las cantidades o variables que entran en las ecuaciones.

En la física teórica las formas compactas de expresión matemática resultan esenciales para detectar relaciones y analogías físicas que de otra manera resultaría imposible encontrar, perdidas en una selva de símbolos que ocultan estas relaciones. En las teorías cuánticas relativistas es costumbre utilizar la notación de Einstein sobre la suma. La convención de Einstein consiste en que si en un término un índice aparece repetido esto implica una suma sobre estos índices. En las teorías relativistas se acostumbra a escribir los índices que se refieren al espacio-tiempo con letras griegas.

La notación más simple para las coordenadas del espacio-tiempo se consigue mediante el empleo de cuadvectores

Un cuadvector es un conjunto de cuatro componentes de números que se transforman de acuerdo con una regla particular. Hay varias notaciones para las componentes. En este artículo tomaremos tres componentes reales y la cuarta componente será compleja. Puesto que en el espacio



Albert Einstein [1879-1955]. Físico alemán, nacionalizado después suizo y estadounidense, considerado como el científico más importante del siglo XX.

de la relatividad especial, el cual es un espacio de cuatro dimensiones, conocido como espacio de Minkowski, la distancia de un punto del espacio tiempo (x, y, z, ct) al origen $(0,0,0,0)$ se escribe como $S^2 = x^2 + y^2 + z^2 - (ct)^2$, entonces es conveniente definir un punto del espacio-tiempo como (x, y, z, ict) . Con esto la distancia de este punto al origen se puede escribir como $S^2 = x_\mu x_\mu$ donde se ha usado la convención de Einstein, con $x=x_1, y=x_2, z=x_3, ict=x_4$.

De igual manera definimos $\partial_\mu = \frac{\partial}{\partial x_\mu}$

Usando esta definición obtenemos que

$$\partial_\mu \partial_\mu = \partial_x^2 + \partial_y^2 + \partial_z^2 - \frac{1}{c^2} \partial_t^2$$

$$\partial_\mu \partial_\mu = \nabla^2 - \frac{1}{c^2} \partial_t^2$$

Con esta notación, la ecuación de onda para un campo $\varphi(x, y, z, ict)$ toma la forma

$$\partial_\mu \partial_\mu \varphi(x, y, z, ict) = 0$$

Definiendo $x=(x, y, z, ict)$

La ecuación de onda se escribe como

$$\partial_\mu \partial_\mu \varphi(x) = 0$$

La ecuación de onda con una fuente $J(x)$ adquiere la forma

$$\partial_\mu \partial_\mu \varphi(x) = J(x)$$

Cuando un campo tiene varias componentes φ^i con $i=1,2,\dots,n$

La ecuación de onda se escribe como

$$\partial_\mu \partial_\mu \varphi^i(x) = J^i(x) \quad (7)$$

En las ecuaciones relativistas, los campos vectoriales tienen índices espacio-temporales, lo que significa que tienen valores de 1 a 4.

La forma de la ecuación de onda es entonces

$$\partial_\mu \partial_\mu \varphi^v(x) = J^v(x)$$

Con $v=1, 2, 3, 4$

La ecuación de un campo vectorial relativista con masa, como la que presentan algunas partículas subnucleares está dada por

$$(\partial_\mu \partial_\mu - m^2)\varphi^v(x) = -J^v(x) \quad (8)$$

Donde m es la masa del campo vectorial. La ecuación anterior se conoce como ecuación de Proca y es muy común encontrarla en la teoría relativista de campos cuánticos.⁸

La Ec (8) es la forma que adquiere una de las ecuaciones de movimiento que aparecen en el estudio de la materia nuclear. En este caso $J^v(x)$ resulta ser la densidad del material nuclear y es a su vez la fuente del campo vectorial, al cual llamaremos campo mesónico.⁹

En el cálculo variacional una variación de una funcional $\varphi(x)$ en un punto fijo x del espacio se define como $\delta\varphi(x) = \varphi'(x) - \varphi(x)$

La variación en la derivada $\partial x \varphi(x)$ se define como $\delta \partial x \varphi(x) = \partial x \varphi'(x) - \partial x \varphi(x)$ lo cual se puede escribir como $\delta \partial x \varphi(x) = \partial x \delta \varphi(x)$

Con esto estamos en condiciones de establecer la ecuación que deben satisfacer la propagación de las perturbaciones en la materia nuclear.

Consideremos una variación en la densidad nuclear $\delta J^v(x)$ en la Ec. (8). Tomando la variación en ambos miembros de la ecuación, obtenemos

$$(\partial_\mu \partial_\mu - m^2)\delta\varphi(x) = -\delta J(x) \quad (9)$$

Tomemos la transformada de Fourier en ambos miembros de la Ec. (9) para pasar al espacio de momentos y convertirla en una ecuación algebraica. Con esto obtenemos

$$(k^2 + m^2)\delta\varphi(k) = \delta J(k) \quad (10)$$

El propagador libre de mesón $D_0(k)$ asociado a los modos colectivos arriba mencionados está definido como

$$D_0(k) = -\frac{1}{k^2 + m^2}$$

Por lo tanto la Ec. (10) se puede escribir como

$$\delta\varphi(k) = -D_0(k)\delta J(k) \quad (11)$$

A su vez, las excitaciones colectivas $\delta\varphi^v(k)$ pueden inducir variaciones en la densidad nuclear $\delta J^v(k)$. Se supone que la respuesta del medio es lineal y escribimos la relación lineal más general entre ambas variaciones:

$$\delta J^v(k) = -\Pi^{\nu\mu}\delta\varphi^\mu(k) \quad (12)$$

La expresión para la función $\Pi^{\nu\mu}$ es muy complicada, aun en los ejemplos más sencillos. La idea aquí es mostrar solamente la línea de razonamiento que se sigue en la física nuclear y hacer notar que se le parece mucho a lo que se hace en el estudio de, por ejemplo, las propiedades microscópicas de los dieléctricos.

Sustituyendo la Ec. (12) en (11) obtenemos

$$(\delta^{\nu\mu} - D_0(k)\Pi^{\nu\mu})\delta\varphi^\mu(k) = 0 \quad (13)$$

$$\text{Donde } \delta^{\nu\mu} = \begin{cases} 1 & \text{si } \nu = \mu \\ 0 & \text{para los demás casos} \end{cases}$$

La ecuación (13) es la que gobierna los modos colectivos de propagación en el medio. Sus soluciones, dadas por los valores de $\delta\varphi^\mu(k)$ están asociadas a los mesones vectoriales, conocidos con el nombre de mesón omega. De las propiedades de estas soluciones podemos determinar las propiedades de los mesones en la materia nuclear.

Para que la ecuación (13) tenga soluciones diferentes de la trivial, (de hecho un infinito número de ellas) se impone la condición de que el determinante de coeficientes sea cero. Esta condición se expresa como:

$$\text{Det}(\delta^{\nu\mu} - D_0(k)\Pi^{\nu\mu}) = 0 \quad (14)$$

El análisis anterior es muy parecido al que se hace en el estudio de la propagación de ondas en un plasma.¹⁰ Esta analogía muestra cómo la matemática unifica, mostrando relaciones entre sistemas físicos muy diferentes. La física teórica, que es la física matemática encuentra esas relaciones entre los diferentes sistemas físicos, lo que le permite desarrollar teorías que engloban fenómenos correspondientes a diferentes aspectos de la naturaleza.

LOS RETOS ACTUALES DE LA FÍSICA TEÓRICA

La física teórica es un campo donde se desarrolla una intensa actividad de investigación. Se tienen grandes pendientes que hay que resolver y son varios los retos que se le presentan actualmente a los físicos teóricos. El primero es el de incorporar la fuerza de gravedad en el modelo estándar, lo que significa desarrollar la teoría cuántica de la gravedad. Otro problema es el de lograr la unificación de las fuerzas fundamentales de la naturaleza. Un tercer problema es el de explicar la naturaleza de la materia y la energía oscuras.

a) La teoría cuántica de la gravedad.

La teoría actual de la gravedad es la teoría general de la relatividad de Einstein. Esta teoría describe los fenómenos a gran escala, como los que ocurren en el sistema solar, en las galaxias o los fenómenos cosmológicos, donde se estudia al universo como un todo.

Por otra parte, la teoría que describe los fenómenos en la escala opuesta, es decir aquellos que suceden a muy pequeñas distancias, en la estructura atómica y subatómica, es la mecánica cuántica. La inclusión de la interacción gravitacional entre las teorías cuánticas es lo que se conocería como teoría cuántica de la gravedad.

La teoría cuántica del campo electromagnético cuantiza este campo, lo que significa que se asocia una partícula al campo. Esta teoría se conoce como electrodinámica cuántica y en ella el campo electromagnético es una partícula llamada fotón. Similarmente las otras teorías cuánticas de la interacción débil y la interacción fuerte asocian partículas o cuantas a los campos.

Dado que la relatividad general es una teoría donde el campo gravitacional corresponde a la geometría del espacio-tiempo, la cuantización del campo gravitacional corresponde a la “granulación” del espacio-tiempo. Con esto tendríamos que el espacio y el tiempo no son continuos sino que existen en paquetes de dimensiones que tienen un valor mínimo.

b) La búsqueda de una teoría unificada.

La obsesión de Einstein durante los últimos años de su vida fue la de lograr una teoría que unificara

todas las fuerzas de la naturaleza, entre ellas el campo electromagnético y el campo gravitacional. Él llamó a esta teoría que pretendía desarrollar, la teoría del campo unificado. En la búsqueda de esa teoría empleó más de 30 años sin lograrlo. Hasta el momento es uno de los grandes objetivos de la física teórica.

c) La materia y la energía oscuras.

Se ha encontrado que las galaxias deben tener una masa de alrededor de un 90% más que la observada como materia luminosa. Incluso al observar el movimiento de una galaxia en un conglomerado de galaxias se encuentra que la materia faltante, la que no es luminosa excede al 90% de la materia visible. A esta materia faltante para explicar el movimiento observado de estrellas y galaxias se le conoce como materia oscura.

La búsqueda de la materia oscura es en el presente uno de los grandes retos de los astrónomos y de los físicos de partículas. Es importante tomar en cuenta que se define como materia luminosa aquella que emite radiación electromagnética en cualquiera de las regiones del espectro electromagnético. En la actualidad los astrónomos cuentan con telescopios que permiten la detección de radiación en una amplia gama de frecuencias. De acuerdo con la ley de Stefan-Boltzmann sabemos que todo cuerpo que



El Telescopio Espacial Hubble ha estado en órbita desde 1990. Permite la observación nítida del espacio sin las deformaciones causadas por la atmósfera de la Tierra.

<http://www.spaceanswers.com/astronomy/341/all-about-the-hubble-space-telescope/>

tiene una temperatura absoluta diferente de cero, emite radiación electromagnética.

La masa faltante en el universo no se espera que esté compuesta de materia ordinaria, es decir no está formada de los elementos químicos que encontramos aquí en la Tierra. Tampoco se espera que esté constituida por protones, neutrones y electrones. Esta materia es algo extraordinario, un tipo de materia exótica que no conocemos hasta ahora.

Otro de los problemas preocupantes de la astronomía moderna es el de la energía oscura. La energía oscura está asociada con una clase de materia hasta ahora desconocida que se ha introducido con el propósito de explicar el efecto observado de que el universo se está expandiendo cada vez más rápido, es decir, la expansión del universo es acelerada. No conocemos hasta ahora la naturaleza de la energía oscura pero produce un efecto de gravedad repulsiva o antigraavedad. Determinar la naturaleza de la energía oscura es otro de los desafíos que los científicos tienen en la actualidad. La energía oscura se inscribe también en la lista de los tipos de materia exótica.

Actualmente los físicos de partículas buscan nuevas formas de materia, como los axiones, o las partículas supersimétricas, para asociarlas con la materia y la energía oscuras. Es posible que el bosón de Higgs tenga también contribuciones a los valores de la materia y la energía oscuras.

Los problemas de la materia oscura y la energía oscura están en la actualidad entre los retos más desafiantes de la ciencia. Todos estos misterios del

cosmos hacen más fascinante el mundo en el que vivimos y lo es porque en el intento de descifrar sus misterios nos lleva de una aventura intelectual a otra.

REFERENCIAS

1. Leon, M. Lederman and Christopher T. Hill, Symmetry and the Beautiful Universe, Prometheus Book, (2004).
2. Michio Kaku, Einstein's Cosmos, Atlas Books, (2004).
3. Frank Close, Antimatter, Oxford, University Press, (2009).
4. David Lindley, The End of Physics, Basic Books, (1993).
5. Raymond Serway, Física Vol. II, Cuarta edición, McGraw-Hill, (1997).
6. Quantum Field Theory, Mark Srednicki, Cambridge, University Press, (2007).
7. Herbert Goldstein, Charles poole, and John L. Safko, Classical Mechanics, 3rd. Edition, Addison-Wesley, Pub. Co. (2001).
8. J. David Jackson, Classical Electrodynamics, third edition, John Wiley and Sons, (1998).
9. John Dirk Waleka, Theoretical Nuclear and Subnuclear Physics, Second edition, World Scientific, (2004).
10. J. A. Bittencourt, Fundamentals of Plasma Physics, Third Ed., Springer Verlag, N. Y., (2004).

Ingenierías en línea

<http://ingenierias.uanl.mx>