

# EINSTEIN Y LAS TEORÍAS DE UNIFICACIÓN DE CAMPOS

H. Pérez Rojas<sup>1</sup> and E. Rodríguez Querts<sup>2</sup>

Instituto de Cibernética, Matemática y Física, Ciudad de La Habana, Cuba

## RESUMEN

En el presente trabajo se describen las fuerzas fundamentales de la naturaleza y se hace una breve exposición de los principales aspectos del Modelo Standard de las interacciones débil, electromagnética y fuerte. Además, se esbozan algunas ideas acerca de la llamada gran unificación de las interacciones.

## ABSTRACT

In this work the natural fundamental forces are described; and a brief explanation about the Standard Model regarding weak, electromagnetic and strong interactions is done. Besides; some ideas about the so called unified theory are presented.

## I. INTRODUCCIÓN

A Albert Einstein le cabe el mérito de haber formulado un nuevo principio de relatividad, que estableció un límite a la velocidad de propagación de toda señal que transporte información. El principio de relatividad einsteniano, además, trajo como consecuencia la unificación del espacio y el tiempo en una nueva entidad, el espacio-tiempo, en el cual la unificación de electricidad y magnetismo descubierta por James Clerk Maxwell se hace matemáticamente más evidente.

En sus últimos años Einstein buscó, aunque sin éxito, una teoría unificadora de las interacciones electromagnética y gravitacional. Inspirados en sus ideas, Kaluza y Klein propusieron un modelo de espacio tiempo de cinco dimensiones que unificaba en principio gravitación y electromagnetismo. La quinta dimensión se enrollaba como en un tubo, anticipando una idea básica para la moderna teoría de cuerdas.

Los trabajos de Weinberg, Salam y Glashow lograron, parcialmente, un objetivo similar, al unificar en una teoría las interacciones electromagnética y débil. Pero la vía seguida era muy distinta. Einstein había seguido un camino basado en las teorías clásicas (no cuánticas) de la relatividad general y la electrodinámica. La teoría del campo electrodébil se situaba, por el contrario, dentro del terreno de las modernas teorías cuánticas de campos con ruptura espontánea de la simetría.

En la actualidad se considera que las leyes que rigen el Universo, desde su expansión hasta las interacciones entre las llamadas partículas elementales que componen la materia ordinaria, deben formar

parte de una teoría unificada. La teoría de cuerdas, por ejemplo, pretende unificar las interacciones básicas a escala ultramicroscópica, del orden de la longitud de Planck  $l = 1.6 \times 10^{-35}$  m.

## II. INTERACCIONES FUNDAMENTALES

Hasta el momento se conocen cuatro tipos de fuerzas o interacciones básicas en la naturaleza. La más débil es la fuerza de gravitación, la cual es de largo alcance, al igual que la electromagnética. Sin embargo, debido a que las cargas gravitacionales no son apantallables (la masa es siempre positiva), esta interacción domina a escala cósmica. La teoría moderna de la gravitación, necesaria para describir con exactitud tanto el movimiento de los planetas (incluso de los satélites geoestacionarios), como la evolución del Universo, es la relatividad general; se basa en la equivalencia entre un campo gravitatorio y un sistema de referencia no-inercial (acelerado).

Entre sus implicaciones básicas está la expansión del Universo: en un pasado remoto se produjo una "gran explosión", a partir de la cual se formaron estrellas y galaxias, y a partir de tal explosión (siguiendo un proceso inflacionario: en sus comienzos el radio tuvo un crecimiento exponencial  $R(t) \sim e^{\lambda t}$ ) las galaxias se alejan unas de otras con velocidad creciente con la distancia. Actualmente todo indica que esta expansión ocurre de manera acelerada.

De acuerdo con la teoría no relativista de Newton, la interacción gravitatoria entre dos partículas cuya masa sea del orden de las masas atómicas, digamos de masa igual a la del protón  $m_p$ , está caracterizada por una constante adimensional extraordinariamente pequeña

E-mail: <sup>1</sup>hugo@icmf.inf.cu

<sup>2</sup>elizabeth@icmf.inf.cu

$$\frac{G_N m_p^2}{\hbar c} \approx 10^{-40}, \quad (1)$$

donde  $G_N$  es la constante gravitatoria. Por ello la gravitación se puede despreciar al estudiar las interacciones de las partículas a escala microscópica (excepto a muy altas energías, del orden de la masa de Planck  $E = M_p c^2 = 1.2 \times 10^{19} \text{ GeV}$ ).

En el micromundo se desarrollan procesos a energías comparables con la energía en reposo de las partículas. Por lo tanto, las teorías que describen las interacciones a esa escala deben ser consistentes con la relatividad especial y la mecánica cuántica. Esto es posible precisamente en el formalismo de la teoría cuántica de campos, que hace uso de una función Lagrangiana (análogamente al caso de la mecánica), a partir de la cual se obtienen las ecuaciones del movimiento). Sin embargo, estas ecuaciones del movimiento no describen partículas aisladas, sino campos. Este formalismo, capaz de describir los procesos de aniquilación y creación de partículas, constituye el lenguaje de la física de altas energías.

A la gravitación le sigue en intensidad la llamada fuerza débil, agente de ciertas desintegraciones radioactivas en que aparecen electrones y neutrinos, tales como la desintegración beta.

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}. \quad (2)$$

Una característica importante de las interacciones débiles es que son de muy corto alcance. La distancia característica es  $r \sim 10^{-15} - 10^{-16} \text{ cm}$  y la probabilidad de interacción de los neutrinos con otras partículas es muy baja: por ello se les llama interacciones débiles.

Hasta 1967 los fenómenos de las interacciones débiles se describían satisfactoriamente mediante un modelo fenomenológico debido a Enrico Fermi, que utilizaba la corriente débil  $J_\lambda(x)$ , a la cual contribuye una parte hadrónica (se llaman hadrones a las partículas que interactúan fuertemente, como los bariones y los mesones) y otra parte leptónica (los leptones no interactúan fuertemente, son leptones, por ejemplo, el electrón y su neutrino asociado). Matemáticamente la interacción débil se describía mediante una función Lagrangiana,

$$L_F = \frac{G_F}{\sqrt{2}} J_\lambda(x) J_\lambda^\dagger(x), \quad (3)$$

donde  $J_\lambda$  es un cuatrivector,  $J_\lambda^\dagger$  es su conjugado hermítico y  $G_F$  la constante de acoplamiento débil.

Luego y en analogía con la electrodinámica cuántica, que ya había sido formulada anteriormente, se propuso una Lagrangiana de interacción de la forma

$$L_w = g J_\lambda(x) W_\lambda(x), \quad (4)$$

donde  $W_\lambda(x)$ , sería un campo bosónico. Si los bosones intermediarios de las interacciones tienen masa  $m$  diferente de cero, las fuerzas resultantes son de corto alcance, el factor de acortamiento de la interacción es proporcional a  $e^{-mr}$ . Como el fotón tiene masa nula, la fuerza de Coulomb es de largo alcance. Las interacciones débiles son de corto alcance y por lo tanto, los mesones intermediarios  $W$  deben ser masivos. Además, éstos aparecen en estados cargados.

Después de la débil, la más intensa es la fuerza electromagnética, entre cuyas múltiples acciones está la de atraer protones y electrones entre sí para formar el átomo. La existencia de cargas eléctricas de signos contrarios conduce al apantallamiento de la fuerza electrostática: una carga eléctrica tiende siempre a neutralizarse atrayendo cargas opuestas. Esto ocurre en el átomo, en la molécula, en el sólido y en cualquier cuerpo microscópico.

Los trabajos de Dirac, así como los de Born, Heisenberg y Jordan establecieron las bases para el desarrollo de la *electrodinámica cuántica*, es decir, una teoría relativista que describe la interacción del campo electromagnético cuantificado con el campo electrón-positrón. La electrodinámica cuántica toma en cuenta la estructura corpuscular de la luz, que se considera compuesta de partículas de spin 1 (los fotones), los cuales interactúan con las partículas cargadas (electrones, protones, mesones pi, etc.) a través de los procesos de emisión y absorción. La función Lagrangiana de la electrodinámica cuántica consta de tres partes: una parte que describe a los electrones y positrones, otra parte que describe al campo electromagnético en el vacío, y una tercera que contiene la interacción del campo electrón-positrón  $\Psi$  con el campo electromagnético  $A_\mu$ . Este término se puede escribir.

$$L = e \bar{\Psi} \gamma^\mu A_\mu \Psi, \quad (5)$$

donde  $e$  es la carga eléctrica,  $\bar{\Psi}$  es el conjugado del spinor  $\Psi$ , y  $\gamma^\mu$  es el conjunto de las cuatro matrices de Dirac. Una consecuencia fundamental de la teoría relativista de Dirac es la existencia de antipartículas. La antipartícula del electrón es el positrón, de carga positiva. Esta es una propiedad universal, a toda partícula, le corresponde una antipartícula.

Por último, la fuerza más poderosa es la nuclear (interacción fuerte), que atrae a protones y neutrones entre sí para formar el núcleo atómico. Para tener una idea comparativa, baste decir que entre dos protones la atracción a causa de esta fuerza es de 100 a 1 000 veces mayor que la repulsión electrostática, y esta última es mayor que la gravitatoria en una

cantidad del orden de  $10^{37}$ . Pero la fuerza nuclear se caracteriza por ser de muy corto alcance: su acción está limitada a distancias del orden de las dimensiones del núcleo atómico, es decir de  $10^{-13}$  cm.

En 1935, el físico japonés Hideki Yukawa propuso la existencia de los mesones masivos como partículas intermediarias en estas interacciones fuertes, por analogía con los fotones, intermediarios en las interacciones electromagnéticas. Los mesones de Yukawa fueron descubiertos en 1947 y designados como mesones  $\pi$ . En la actualidad, las interacciones fuertes se suponen determinadas por la interacción entre los quarks, partículas de carga fraccionaria componentes de los hadrones. Los quarks interactúan a través del campo gluónico, que sería la fuerza fundamental, y la fuerza nuclear a la que hemos hecho referencia sería como una fuerza residual, cuya relación con el campo gluónico sería parecida a la de las fuerzas moleculares con respecto a las fuerzas interatómicas.

Así, los componentes básicos de la materia son partículas de spin  $1/2$  (fermiones), que interactúan entre sí mediante el intercambio de partículas de spin 1 (bosones), mediadoras de las interacciones.

### III. MODELO STANDARD

Según el Modelo Standard, los constituyentes básicos de la materia son partículas de spin  $1/2$  (fermiones), los leptones y los quarks, que se comportan como partículas sin estructura interna, es decir, como verdaderos puntos, sin dimensiones perceptibles. Los leptones no participan en las interacciones fuertes. Se tienen seis leptones:

Lepton	Nombre	Carga eléctrica
$\nu_e$	neutrino electrónico	0
e	electrón	-1
$\nu_\mu$	neutrino muónico	0
$\mu$	muón	-1
$\nu_\tau$	neutrino $\tau$	0
$\tau$	leptón $\tau$	-1

Obviamente, a cada leptón, le corresponde un anti-leptón. Los quarks son partículas de carga fraccionaria  $2/3$  y  $1/3$  de la carga del electrón, entre los cuales se ejerce la interacción fuerte a través del campo gluónico. Hay dos propiedades fundamentales de los quarks: el confinamiento y la libertad asintótica. El confinamiento de los quarks consiste en que estas partículas no se encuentran libres; los quarks siempre aparecen en parejas o en tríos, como constituyentes de otras partículas. Los bariones están constituidos por tres quarks y los mesones por pares quark-antiquark. La libertad asintótica se refiere a que los quarks, cuando están

muy próximos (o su energía de interacción es muy grande, a muy alta energía), se comportan como si fuesen libres, o como si no interactuaran entre sí.

Los quarks son de diferentes tipos, a los que los físicos llaman humorísticamente *sabores*. Hasta el presente se suponen seis sabores o tipos de quarks: "up", "down", "strange", "charmed", "bottom", "top". La sustancia ordinaria requiere sólo de los quarks u, d, (a los cuales se les asocia el número cuántico I (spin isotópico), relacionado con las transformaciones en el espacio isotópico, que veremos más adelante) y de los leptones  $e^-$ ,  $\nu_e$ . Por ejemplo, un protón tiene la estructura:

$$p = \begin{cases} \text{quarks carga} \\ u & 2/3 \\ u & 2/3 \\ d & -1/3 \end{cases}$$

cuya carga eléctrica total es 1. Un neutrón, por el contrario, tiene la estructura:

$$n = \begin{cases} \text{quarks carga} \\ u & 2/3 \\ d & -1/3 \\ d & -1/3 \end{cases}$$

de carga total cero. Análogamente, un mesón  $\pi = (u\bar{d})$ , está compuesto de un quark u, de carga  $2/3$ , y de un antiquark  $\bar{d}$ , de carga  $1/3$ . Su carga es +1, etc. El mecanismo de desintegración beta podemos entenderlo ahora como que un quark d en el neutrón emite una partícula  $W^-$  de carga -1, y entonces pasa a ser un quark u, con lo que el neutrón original pasa de la estructura neutra  $udd$  a la  $uud$ , de carga +1 que corresponde al protón.

Hay otro conjunto de partículas como el barión  $\Lambda$  y los mesones  $K^\pm$ ,  $K^0$ ,  $\bar{K}^0$  que manifiestan propiedades caracterizadas por la "extrañeza", número cuántico que se designa por la letra S. La extrañeza está determinada por los quarks s. La existencia del *charmed* quark c fue propuesta por Glashow, Iliopoulos y Maiani. Actualmente se considera que existen seis quarks.

Quark	Sabor	I	$I_3$	S	C	$B^*$	T	Q/e
u	up	$1/2$	$1/2$	0	0	0	0	$2/3$
d	down	$1/2$	$-1/2$	0	0	0	0	$-1/3$
s	strange	0	0	-1	0	0	0	$-1/3$
c	charmed	0	0	0	1	0	0	$2/3$
b	bottom	0	0	0	0	-1	0	$-1/3$
t	top	0	0	0	0	0	1	$2/3$

Para los números cuánticos asociadas a los diferentes "sabores" se cumple

$$\frac{Q}{e} = I_3 + \frac{1}{2}(B + S + C + B^* + T), \quad (6)$$

donde B es el número bariónico, el cual es igual a  $\frac{1}{3}$  para todos los quarks. Entre los quarks se ejerce una fuerza, caracterizada por un número cuántico nuevo, llamado *color*. Así, cada quark de un *sabor* dado, por ejemplo u, puede aparecer en los *colores rojo, azul y amarillo*. La teoría que describe la interacción entre los quarks se llama, por esta razón, *cromodinámica cuántica*. Una consecuencia fundamental es que las partículas observables deben ser incoloras pues no se observan quarks libres en la naturaleza.

La primera teoría cuántica que se formuló, la electrodinámica cuántica, posee una invarianza fundamental, llamada de calibración (o de norma). Si al campo electromagnético  $A_\mu$  se le suma el cuatrigradiente de una función de las coordenadas y del tiempo  $f$ , y al spinor que define al campo electrón-positrón  $\Psi$  se le multiplica por un factor de fase

$e^{i\frac{e}{\hbar c}f}$  los resultados físicos no varían. Es conveniente destacar aquí que la Lagrangiana de la electrodinámica cuántica (sin el término de interacción (5)) es invariante ante una transformación global, es decir, donde  $f$  es independiente de las coordenadas. Tal transformación global no afecta al campo electromagnético. Ahora bien, si  $f$  depende de las coordenadas (la transformación es local), para mantener la invarianza de las consecuencias físicas de la teoría, es necesario introducir la interacción del campo electromagnético con el campo electrón-positrón; es decir, la interacción electromagnética es consecuencia de la simetría de calibración asociada al grupo U(1).

En 1954 los físicos C.N. Yang y R. L. Mills propusieron una generalización de la invarianza de calibración de la electrodinámica. En esta, cada componente espacio-temporal de los campos tendría, a su vez, componentes en un espacio abstracto llamado espacio isotópico, es decir, una componente del campo según cada dirección del espacio isotópico (por ejemplo, el protón y el neutrón se pueden considerar dos componentes isotópicas de una misma partícula, una componente en la *dirección* de carga +1, y la otra en la *dirección* 0). El campo propuesto por Yang y Mills sería un campo compuesto de modo tal que en cada dirección del espacio isotópico habría un cuatrivector potencial, semejante al cuatrivector  $A_\mu$  del campo electromagnético.

Las transformaciones de calibración varían así en cada punto, y son por ello esencialmente *locales*.

A diferencia de la electrodinámica, las transformaciones de norma de los campos de Yang-Mills son no-abelianas (no conmutativas); un ente fundamental, llamado tensor del campo, tendría propiedades no lineales, pues contendría un término con el producto de dos de sus componentes. Esto, da lugar a nuevas propiedades físicas para estos campos. Por ejemplo, cuando un fotón se propaga libremente no puede descomponerse en dos fotones, pues este proceso no lineal está prohibido en la electrodinámica. Pero en los campos de Yang-Mills, a causa de sus propiedades no lineales, es posible el proceso en que un bosón masivo Z se desintegra en un par de bosones pesados  $W^+$  y  $W^-$ .

Entonces, mediante un modelo de Yang-Mills se puede unificar en una teoría a la electrodinámica y las interacciones débiles como resultado de la simetría de calibración  $SU(2) \times U(1)$ . Las interacciones entre los quarks, por otra parte, se deben a la invarianza ante el grupo SU(3). Pero para que la teoría así obtenida sea renormalizable (es decir, las divergencias que aparecen en los cálculos específicos se puedan eliminar) los campos de calibración deben ser no masivos, como el fotón. Hace falta entonces un mecanismo mediante el cual se genere la masa de los bosones intermediarios en las interacciones débiles y preserve la renormalizabilidad.

¿Qué ocurre si el campo de Yang-Mills no abeliano interactúa con un campo escalar? En este caso, si hay ruptura espontánea de la simetría (es decir, si el estado básico no es simétrico ante la transformación de calibración, aunque la Lagrangiana sí lo es) aparecen componentes del campo escalar de masa nula que corresponden a partículas no físicas, que se pueden eliminar de la teoría y sólo queda una componente con masa. Esto significa que hay grados físicos de libertad que se pierden; pero, en su lugar, el campo de calibración adquiere masa; es decir, la ruptura de simetría produce partículas sin masa y es posible demostrar que estas son no físicas. Pero, por otra parte, el campo de calibración adquiere masa. Por cada partícula escalar sin masa, a causa de la ruptura de simetría, aparece ahora una partícula vectorial con masa. Este es el llamado mecanismo de Higgs.

En el modelo de unificación de las interacciones electromagnéticas y débiles, debido a Weinberg, Salam y Glashow, se usa de modo especial el mecanismo de Higgs, para que tres campos de norma, originalmente sin masa, adquieran masa a causa de su interacción con un campo escalar. Este campo escalar no está aún identificado en la naturaleza, sin embargo, las consecuencias físicas de la unificación han tenido ya comprobación experimental amplia. Este campo escalar aparece inicialmente con cuatro componentes independientes. A causa de la ruptura de simetría, sólo una de las

componentes del campo escalar es masiva y se le llama escalar de Higgs. Las otras tres componentes de masa nula pierden sentido físico y, en su lugar, aparecen las componentes longitudinales que adquieren masa. Un elemento básico del modelo de Weinberg y Salam es el de suponer inicialmente un campo de norma abeliano  $B_\mu$  y uno de calibración no abeliano de tres componentes:  $W_\mu^1$ ,  $W_\mu^2$  y  $W_\mu^3$ . De la combinación de  $B_\mu$  con  $W_\mu^3$  resultan dos campos neutros: uno sin masa, que es el campo electromagnético, y otro que adquiere masa por el mecanismo de Higgs, llamado campo  $Z_\mu$ . Por otra parte,  $W_\mu^1$  y  $W_\mu^2$ ; se combinan para dar dos campos (o partículas) cargados  $W_\mu^\pm$ , también masivos. Las partículas  $Z_\mu$  interactúan con los neutrinos y también con los electrones. Ellas son los agentes de la llamada corriente neutra, descubierta en 1975 en el CERN (Centro Europeo de Investigaciones Nucleares) y considerada como una de las primeras confirmaciones de la teoría de Weinberg-Salam.

El campo de color aparece mediado, según el Modelo Standard, por partículas sin masa, llamadas gluones (de *glue*, en inglés, pegamento) que serían los análogos de los fotones, como verdaderos intermediarios de las interacciones fuertes. La existencia de tres colores de quarks da una base para la teoría actual de las interacciones fuertes, la cromodinámica cuántica (en inglés, QCD). El conjunto de transformaciones unitarias que transforman los colores entre sí son el grupo de *calibración de color* SU(3), que tiene ocho generadores que determinan el grupo. El campo gluónico se describe así por un campo de Yang-Mills donde las componentes isotópicas corresponden a los distintos colores  $a = 1, 2, \dots, 8$ . En la QCD la simetría es exacta: por ello los gluones serían como el fotón, partículas de masa cero.

La cromodinámica cuántica presenta la propiedad de confinamiento, ya mencionada. Un quark de color dado atrae cargas de color de la misma polaridad. Como resultado de esto la carga de color dado disminuye a cortas distancias del quark, y aumenta, cuando se incrementa la distancia. Esto está asociado a la dependencia de la constante de acoplamiento con respecto al momentum  $g^2 = g(-p^2)^2$ , (se suele usar esta notación donde  $-p^2 > 0$  es el módulo del vector cuatri-momentum). Tomando un valor  $\mu^2$  como referencia, tiene la forma:

$$g(-p^2) = \frac{g(\mu^2)}{1 + (11 - \frac{2n_f}{3}) \ln \frac{-p^2}{\mu^2}}, \quad (7)$$

donde el número de sabores de quarks es  $n_f = 6$ . Como ejemplo, si uno tomase un mesón  $\pi$  y tratara

de separarlo en un quark y un antiquark, como la fuerza ejercida aumenta con la distancia ( $g(-p^2)$  aumenta), el aumento de energía potencial daría lugar a la formación de un nuevo par quark-antiquark, y el resultado final serían dos mesones  $\pi$ , pues solamente tienen una energía finita los estados ligados incoloros, es decir, carentes de un color neto, los cuales se llaman singletes de color.

#### IV. LA GRAN UNIFICACIÓN

Como ya hemos visto, los quarks interactúan entre sí mediante el campo gluónico, pero también interactúan entre sí y con los leptones mediante el campo electrodébil. Entonces, parece natural buscar modelos que unifiquen las interacciones fuertes, con el campo electrodébil. Un modelo que hace algunos años se tomó como prometedor fue el grupo SU(5). Para que sea una teoría unificadora de fuerzas débiles y fuertes, debe haber mecanismos que transformen hadrones en leptones. El modelo requiere para ello de unos bosones X super-masivos de energías del orden de  $10^{14}$ - $10^{15}$  GeV. Estos serían intermediarios en la descomposición del protón, por ejemplo, en un positrón y un mesón  $\pi$ . De acuerdo con esto, el protón debe tener una vida media de unos  $10^{33}$  años, y el neutrino debe tener una pequeñísima masa, probablemente del orden de algunas decenas de eV. La idea de la gran unificación se apoya también en el hecho de que las constantes de acoplamiento varían con la energía (o el momentum) de las partículas en interacción. Así, la constante de estructura fina, que caracteriza las interacciones electromagnéticas, es constante para bajas energías; para energías mayores aumenta su valor. También vimos que el campo gluónico se caracteriza por una constante de acoplamiento que disminuye al decrecer la distancia (incrementar el momentum y la energía) entre las partículas (libertad asintótica), mientras que la interacción débil disminuye, pero más lentamente. La teoría de la gran unificación prevé la unificación de las interacciones electrodébiles con las fuertes a energías gigantescas, del orden de  $10^{15}$  GeV, a las cuales corresponde una longitud del orden de  $10^{-29}$  cm. Es decir, a estas energías, las constantes de acoplamiento (que varían con el momentum) coinciden en valor. La interacción fuerte (descrita por el grupo SU(3)) decrece, y en cuanto a las otras dos, descritas por los grupos SU(2) y U(1), la débil decrece más lentamente y la electromagnética incrementa su valor hasta coincidir con las otras dos.

Esta energía prevista, de unificación de los campos fuertes y electrodébil, es aun  $10^4$  veces menor que la energía de Planck, característica de los efectos cuánticos gravitacionales. Para energías inferiores a  $10^{15}$  GeV, se produce una ruptura de la simetría, y quedan dos campos separados: el fuerte o de color

y el electrodébil. A su vez, a energías del orden de 100 GeV el campo electrodébil se separa en dos componentes. El campo electromagnético permanece hasta energías más bajas, pero la fuerza débil se manifiesta sólo mediante procesos virtuales de creación de las partículas W y Z. Es decir, entre 0 y 100 GeV, las fuerzas que prevalecen son la fuerte y la electromagnética. El hecho de que las energías determinantes de los cambios de simetría sean 100 y  $10^{15}$  GeV, plantea el problema de que en este modelo el rango de energías intermedias es muy grande: la relación entre ambos es de  $10^{13}$  y se piensa que esto es un defecto de la teoría y que puede haber muchos fenómenos notables en el fango de  $10^2$  a  $10^{15}$  GeV. La teoría de la gran unificación tiene una aplicación inmediata a escala

cosmológica. Se considera que al comenzar la expansión del universo (y probablemente la *inflación*), la temperatura media era del orden de  $10^{32}$  K. A esa temperatura todas las interacciones fundamentales tenían igual jerarquía. Al descender a menos de  $10^{28}$  K se produjo la separación entre las interacciones fuertes y el campo electrodébil. Entre esa temperatura y  $10^{15}$  K se produjo la transición de fase, en que se rompió la simetría electrodébil. A la temperatura media actual del universo visible, las fuerzas de la naturaleza tienen las características que detallamos anteriormente. De la igualdad inicial entre todas las interacciones fundamentales, alcanzada a temperaturas gigantescas, hemos llegado, al enfriarse el universo, a una escala jerárquica de las fuerzas de la naturaleza.

#### REFERENCIAS

1. COLEMAN, S. (1985): **Aspects of Symmetry**, Cambridge University Press, Cambridge,
2. KAKU, M. (1993): **Quantum Field Theory**, Oxford University Press, Oxford,
3. WEINBERG, S. (1997): **The First Three Minutes**, Bantam Books, New York,
4. LINDE, A. D. (1990): **Inflation and Quantum Cosmology**, Academic Press, San Diego.
5. PERKINS, D.A. (1987): **Introduction to High Energy Physics**, Addison Wesley, Menlo Park, California.
6. LAWRIE, I. D. (1990): **A Unified Grand Tour of Theoretical Physics**, Adam Hilger, Bristol.