

# Las partículas exóticas y el origen del universo

Hernando González Sierra<sup>1</sup> · Diana Paola Mayor y Jasmidt Vera<sup>2</sup>

## Resumen

*Se presentan las implicaciones teóricas que dan los modelos que incluyen partículas exóticas en la construcción del modelo del big-bang (gran explosión) que es la teoría científica acerca del origen del universo. La construcción de un modelo espejador, con quiralidad derecha, nos permite avanzar en la solución de problemas de tipo teórico y fenomenológico que se presentan en la física de partículas elementales. Muchas de las dificultades que tiene el modelo estándar de la física de partículas elementales, pueden ser subsanadas por los modelos que introducen partículas exóticas. Nuestro modelo que incluye partículas espejo resuelve algunas de estas anomalías.*

## Abstract

*Theoretical implications about models which include exotic particles are presented here, according to the elaboration of the big-bang model as scientific theory about the origin of the universe. The elaboration of a mirror model, with right quirkality, allow us to advance in the solving of theoretical and phenomenological problems which are found in Physics of elementary particles. Many difficulties derived from the standard model of Physics of elementary particles, may be solved by models including exotic particles. Our model includes mirror particles. It can solve some of such anomalies.*

---

<sup>1</sup> Profesor Asociado, adscrito al Departamento de Ciencias Naturales. Doctor en Ciencias con especialidad en Física.

<sup>2</sup> Egresadas Programa de Licenciatura en Matemáticas y Física. Universidad Surcolombiana.

El modelo del big-bang se fundamenta en el modelo estándar de la física de partículas elementales, una posible teoría cuántica de la gravedad y en una serie de principios cosmológicos. El modelo estándar es compatible con la teoría especial de la relatividad y la mecánica cuántica.

El modelo estándar (1) de la física de partículas elementales explica las interacciones electromagnética, débil nuclear y fuerte nuclear. A bajas energías ( $\cong 100$  GeV) las tres interacciones, antes mencionadas son distintas, pero a energías un poco más altas ( $> 100$  GeV) se logra la unificación de las interacciones electromagnética y débil nuclear (modelo estándar electro-débil).

Para describir la interacción fuerte nuclear es necesario recurrir a una teoría denominada cromodinámica cuántica (2) (QCD). Cada una de las tres interacciones tiene asociado un grupo: U(1) para la electromagnética,  $SU(2)_L$  para la débil nuclear y SU(3) para la fuerte nuclear. El modelo estándar está basado en el grupo  $SU(3) \times SU(2)_L \times U(1)$  con tres constantes de acoplamiento (una para cada interacción y para cada grupo).

A energías aún más altas ( $\cong 10^{14}$  GeV) las tres interacciones se encontrarían unificadas (3) (teoría de granunificación), sus respectivas manifestaciones no sean diferenciadas, y sólo se necesite una constante de acoplamiento para describirlas y un único grupo. Estas energías de granunificación no están disponibles en los grandes laboratorios actuales.

La cuarta interacción es la gravitatoria cuyos efectos sentimos todos los días. Para incluir la gravedad en estos esquemas de unificación se hace necesario cuantizarla (gravedad cuántica), pero lo más grave del asunto es que hasta el día de hoy no ha sido hecho aunque existen dos serios candidatos para lograrlo: Teoría de Cuerdas (4) y Supersimetría (5).

## I. Partículas elementales e interacciones

Las interacciones fundamentales de la naturaleza son cuatro: gravitatoria, electromagnética, nuclear débil y nuclear fuerte. Las interacciones gravitatorias y electromagnéticas son las más comunes y sus efectos se manifiestan cotidianamente. Las interacciones nucleares fuerte y nuclear débil se presentan a pequeñas distancias del orden del tamaño del neutrón y del núcleo atómico, respectivamente.

La interacción nuclear fuerte hace que se mantengan unidos los protones y los neutrones en el núcleo de los átomos. La interacción nuclear débil,

la más débil de todas, es responsable de ciertos procesos que ocurren a cortas distancias tales, como por ejemplo, el decaimiento beta.

Los experimentos de altas energías estudian la estructura subnuclear y resulta asombroso que los componentes del núcleo, protones y neutrones, sean aun entes compuestos de partículas más diminutas denominadas quarks.

El electrón, que es un **Leptón (liviano)**, no muestra una estructura interna, lo cual nos lleva a pensar que es indivisible y por esta razón le damos el calificativo de Partícula Elemental. Los experimentos llevados a cabo en las tres últimas décadas muestran que los protones y neutrones, denominados **Hadrones (pesados)**, tienen estructura interna.

Los protones y neutrones están compuestos de partículas más pequeñas llamadas quarks, las cuales tienen cargas eléctricas fraccionarias. Los quarks, según el Modelo Estándar, son de 6 clases (6 sabores) y ya fueron detectados en los laboratorios de altas energías. Estas partículas reciben los nombres de letras con iniciales de palabras inglesas u (up), c (charm), t (top), d (down), s (strange), b (beauty) asociadas a los calificativos de arriba, encanto, cima, abajo, extraño y bello, respectivamente.

Los quarks, y sus antipartículas (antiquarks), son catalogados como partículas elementales y con ellos se puede construir una minitable periódica de partículas compuestas: los mesones y los bariones, que son también hadrones.

¿Cómo saber si una partícula es elemental o no?. En los laboratorios de altas energías se hacen colisionar partículas para tratar de romperlas y obligarlas a mostrar su **estructura** interna. Los experimentos de altas energías actuales utilizan técnicas parecidas a las usadas por E. Rutherford (bombardeo de núcleos con partículas alfa), quien en 1911 comprobó que el átomo consiste en un núcleo de carga positiva (protones y neutrones) y electrones orbitando a su alrededor.

Los procesos de creación de pares, algunos de cuyos eventos ocurren naturalmente en la atmósfera terrestre por colisiones entre partículas de los rayos cósmicos, muestran que cada partícula tiene su antipartícula. La antipartícula del electrón,  $e^+$ , es el positrón,  $e^+$ , que tiene la misma masa pero está cargado positivamente; similarmente la antipartícula del protón es el antiprotón con su misma masa pero con carga negativa y, por ejemplo para un quark específico como el quark t, su antipartícula es el antiquark  $t, \bar{t}$ , con la misma masa pero de carga

fraccionaria de signo contrario.

El efecto contrario a la creación de pares, la aniquilación de pares, es un efecto común que ocurre en los laboratorios de altas energías. Cuando una partícula y su respectiva antipartícula se encuentran lo suficientemente cerca se aniquilan dando lugar a radiación electromagnética (fotones de luz) y bajo circunstancias especiales un fotón de luz puede dar lugar a la creación de un par partícula-antipartícula. El tiempo de vida de una antipartícula es efímero y sólo pueden durar unos cuantos nano segundos ( $10^{-9}$  seg.)

Para entender las interacciones se recurre a partículas mediadoras responsables de estos procesos. Las partículas mediadoras de las interacciones son: el fotón para la electromagnética, los Bosones Vectoriales Masivos  $W_{\pm}$  y Z para la Débil, los Gluones (8 en total) para la Fuerte y el Gravitón para la gravitacional. El Gravitón no ha sido detectado.

Las partículas de acuerdo a un número cuántico llamado **espín** se clasifican en dos grupos: fermiones y bosones. Los fermiones tienen espín semientero con la propiedad de que **dos** de estas partículas no pueden estar en el mismo estado cuántico (están sujetos al principio de exclusión de Paulí) y los bosones tienen espín entero sin restricciones para ocupar muchos de ellos el mismo estado cuántico (no satisfacen el principio de exclusión de Paulí).

Las partículas mediadoras de interacciones son bosones y tienen espín entero. El electrón, protón, neutrón, neutrino y todos los quarks tiene espín 1/2 razón por lo que son fermiones.

## II. Esquema teórico para describir las interacciones electrodébiles

El descubrimiento del muón  $m$ , que es un Leptón de 106 Mev de masa, se obtuvo a partir de los rayos cósmicos en la década de los 40. La caracterización de esta radiación cósmica y los cálculos efectuados con ella permiten predecir que los rayos gama primarios que generan los muones tienen energías del orden de los 100 Gev (6). El Leptón tau  $t$ , fue descubierto en 1975 con una masa de 1.7771 Gev. La unificación de las interacciones electro-débiles está fundamentada matemáticamente en el grupo  $SU(2)_L \times U(1)$  y las características que podemos mencionar son las siguientes:

1. Cuando la interacción débil es considerada aisladamente el grupo  $SU(2)_L$  determina que los mediadores de las interacciones débiles son 3

bosones vectoriales masivos:  $W^+$  (cargado positivamente),  $W^-$  (cargado negativamente) y Z (de carga neutral lo mismo que el fotón). Estos 3 bosones son masivos debido a que la interacción débil es de corto alcance. El tipo de interacción débil más conocido es el decaimiento beta en donde un neutrón se transforma en protón+electrón+antineutrino. El decaimiento beta es responsable de que los elementos químicos sufran transmutaciones que los convierten en elementos más livianos por efecto de la radioactividad. La interacción débil tiene asociado el número cuántico del sabor (7).

2. Cuando la interacción electromagnética es tomada aisladamente el grupo  $U(1)$  indica que existe un único mediador de las interacciones electromagnéticas: el fotón. Como la interacción electromagnética es de largo alcance la masa del fotón debe ser cero.

3. Al considerar el grupo  $SU(2)_L \times U(1)$  tenemos la distribución de los fermiones en 3 familias: los 6 quarks se pueden ordenar en 3 dobletes de quiralidad izquierda y los tres leptones (electrón, muón y tau) se asocian cada uno con un neutrino (el neutrino del electrón  $\nu_e$ , el neutrino del muón  $\nu_{\mu}$ , el neutrino del tau  $\nu_{\tau}$ ) en 3 dobletes similares a los de los quarks. Esta distribución da la siguiente nomenclatura de dobletes izquierdos:

$$\begin{pmatrix} e \\ \nu_e \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} \mu \\ \nu_{\mu} \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} \tau \\ \nu_{\tau} \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}_L$$

El subíndice L significa izquierdo (del inglés left). Los quarks vienen en tres colores.

4. Los procesos de interacción se pueden efectuar entre los dobletes en forma vertical: por ejemplo el quark u interacciona con el quark d, a través del intercambio de un bosón W, o el electrón lo hace con el neutrino electrónico intercambiando el bosón W. Las interacciones horizontales están mediadas por el bosón neutro Z: por ejemplo el quark u con el quark c o el neutrino del electrón con el neutrino del tau. Existen también las interacciones electromagnéticas asociadas con el grupo  $U(1)$  y sólo son posibles entre partículas cargadas, de tal manera que los neutrinos no participan de ellas. El grupo  $U(1)$  asocia singletes derechos a las partículas que participan en la interacción electromagnética: los quarks y los leptones.

$$e_R, m_R, t_R, u_R, d_R, c_R, s_R, t_R, b_R$$

Las masas de las partículas se forman con dobletes izquierdos y singletes derechos; por la razón anterior los neutrinos, dentro del modelo estándar, no tienen masa porque no existen singletes de neutrinos con quiralidad derecha.

5. La ruptura espontánea de la simetría del grupo electro-débil  $SU(2)_L \times U(1)$  a  $U(1)$  (separación de los dos tipos de interacción) es introducida adicionando un doblete de campos escalares con quiralidad

izquierda, el campo de Higgs, que es responsable de que los bosones vectoriales y los fermiones adquieran masa. La postulada partícula de Higgs ha sido muy difícil de detectar debido a su escasa interacción con las demás partículas estándar, pero se espera que la siguiente generación de colisionadores permita su detección.

El doblete de campos de Higgs, que tiene quiralidad izquierda, se puede representar así:

$$\begin{pmatrix} H^+ \\ H^0 \end{pmatrix}_L$$

Los campos  $H^+$  (cargado positivamente) y  $H^0$  (sin carga eléctrica) son complejos, así que se tienen cuatro campos; de estos campos sólo uno se hace masivo (el escalar de Higgs neutro); los otros tres son absorbidos por los bosones vectoriales para hacerse masivos. El proceso mediante el cual las partículas estándar adquieren sus masas es denominado **Mecanismo Higgs** (8). El concepto de campo es una denominación usada por las teorías de las partículas elementales y es sinónimo del apelativo partícula.

### III. Esquema teórico para describir las interacciones fuertes

Las interacciones fuertes, que mantienen unidos a los quarks en los hadrones (mesones y bariones), poseen propiedades muy diferentes a la interacción electro-débil. Las características más importantes de las interacciones fuertes son:

1.  $SU(3)$  que es el grupo del color determina 8 mediadores que son los gluones, 6 que llevan color y 2 que sólo responden a ellos. Los quarks y antiquarks tienen cada uno tres colores.
2. Los quarks no pueden ser detectados separadamente; es decir no existen en el aislamiento. Esta propiedad de los quarks se denomina **confinamiento**.
3. Los hadrones están conformados por quarks y/o antiquarks pero en la combinación final deben ser incoloros; por ejemplo, un quark verde se puede combinar con un antiquark de color antiverde.

### IV. Dificultades del modelo estándar

A pesar de su ratificación en muchos experimentos, el modelo estándar tiene una serie de dificultades que son (9):

Existen 18 parámetros arbitrarios: tres constantes de acoplamiento (1 para cada grupo), las masas de los 6 quarks, los 3 ángulos de mezcla para los quarks, las 3 masas de los leptones, valor de expectación del vacío y la masa del Higgs.

El término arbitrario indica que estos parámetros son desconocidos, no son predichos por la teoría, y deben ser obtenidos experimentalmente.

Las tres interacciones son independientes entre sí.

No tenemos una teoría unificada porque existen 3 constantes de acoplamiento.

El patrón de familias es arbitrario y complicado, y no existe explicación para la repetición de ellas.

La asignación de la hipercarga es arbitraria y la cancelación de las anomalías es accidental debido a la escogencia de la estructura del contenido de los campos de materia. No existe explicación física para la repetición de familias.

La carga eléctrica no está cuantizada pues los quarks tienen carga fraccionaria.

Para aminorar muchos de estos problemas se han elaborado modelos que contienen al modelo estándar como el límite de baja energía. Entre estos modelos están las teorías de granunificación (10) (unificación de las tres interacciones a altas energías) y supersimetría (11) (simetría que relaciona bosones y fermiones).

### V. El modelo del big-bang

El modelo del big-bang es una teoría acerca del origen del universo y sus ingredientes son:

- Modelo estándar de la física de partículas elementales.
- Una posible teoría cuántica de la gravedad.
- Teoría unificada de las cuatro interacciones conocidas.
- El corrimiento hacia el rojo (resultado experimental).
- Los dos principios cosmológicos siguientes:
  - a. El universo, considerado a gran escala, es el mismo en todos los lugares.
  - b. Si el universo se observa desde un mismo lugar su apariencia, a gran escala, es idéntica en todas las direcciones.

Para hacer plausible una teoría unificada de las cuatro interacciones es indispensable contar con una teoría cuántica de la gravedad (única interacción que no ha sido cuantizada); la razón anterior estriba en que de acuerdo al modelo del big-bang el universo empezó simultáneamente en todos los lugares con una gran explosión y que las

cuatro interacciones en ese instante estaban unificadas (no existía ruptura de la simetría).

La gran explosión proporcionó radiación electromagnética de gran energía que dio origen, por el proceso de creación de pares, a pares de partícula-antipartícula (electrón-positrón, protón-antiprotón,...). Después se crearon los átomos más ligeros, el hidrógeno y el helio, para dar posteriormente lugar a la nucleosíntesis.

## VI. Modelo supersimétrico espejo del modelo estándar

Al incluir la supersimetría, se tiene una simetría que unifica los fermiones con los bosones, de tal forma que cada partícula estándar (las partículas del modelo estándar) tiene un compañero supersimétrico. El compañero del electrón, que es un fermión, es un bosón llamado selectrón (superelectrón) y el fotón, que es un bosón, tiene como compañero supersimétrico un fermión denominado fotino (un fermión). Los otros compañeros supersimétricos son el smuon (bosón), stau (bosón), los 6 squarks bosones, el Higgsino (fermión), los 3 bosones vectoriales (fermiones). A cada una de las partículas del modelo estándar electrodébil se debe adicionar su correspondiente antipartícula.

Una extensión muy promisoría del modelo estándar es la versión supersimétrica de un modelo espejo del modelo estándar; aproximación que unifica los bosones (los portadores de las interacciones) con los fermiones (quarks y leptones) y que postula la existencia de partículas de quiralidad derecha (los fermiones espejo). Los fermiones espejo son dobletes de quiralidad derecha cuya designación es:

$$\begin{pmatrix} e \\ \nu_e \end{pmatrix}_R \quad \begin{pmatrix} \mu \\ \nu_\mu \end{pmatrix}_R \quad \begin{pmatrix} \tau \\ \nu_\tau \end{pmatrix}_R \quad \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_R \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}_R \quad \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}_R$$

y singletes izquierdos dados por  $e_L, \mu_L, \tau_L, u_L, d_L, c_L, s_L, t_L, b_L$

La letra R (right) significa derecho y la letra L (left) izquierdo.

Un modelo espejo del modelo estándar (12) duplica el número de partículas y se tiene un espectro mayor, con la ventaja que se pueden resolver muchos de los problemas que presenta el modelo estándar y que fueron mencionados anteriormente.

Las particularidades de un modelo supersimétrico con partículas espejo presenta los siguientes hechos importantes:

- Puede incluir la supergravedad abriendo una ventana para la unificación de las cuatro interacciones fundamentales.
- Resuelve algunos problemas no introducidos adecuadamente en el modelo estándar, relacionados con la violación de algunas simetrías (13) (paridad P, conjugación de la carga y paridad CP) que han sido observadas experimentalmente en algunos procesos de decaimiento.
- Podría dar una explicación al problema de la materia oscura (14). Sabemos, por la radiación que proviene de sectores bien alejados de nuestra galaxia, que existe algún tipo de materia, o quizás antimateria, que no ha sido identificada plenamente (materia oscura) y que pueden ser formaciones de partículas exóticas.
- Un modelo supersimétrico espejo con masas para los neutrinos da lugar a oscilaciones entre ellos, permitiendo la violación del número leptónico, y generando transformaciones de neutrinos electrónicos en otras clases de neutrinos. De esta manera se puede explicar también el déficit de neutrinos solares y atmosféricos (los neutrinos producidos en el sol son electrónicos).

La investigación sobre la posible existencia de partículas supersimétricas y partículas espejo se efectuará en los primeros años de este milenio (2006) cuando se den los datos experimentales del proyecto Atlas del CERN que empieza en el año 2003.

La inclusión de un modelo espejo en la teoría del big-bang tiene una serie de implicaciones teóricas sobre los procesos que ocurrieron en el universo primitivo, pues se alterara la versión de la teoría que se fundamenta en el modelo estándar. Desde el punto de vista cosmológico no se ha estudiado este modelo espejo supersimétrico porque aun no se tiene ninguna evidencia experimental sobre la existencia de estas partículas exóticas (partículas espejo y supersimétricas) pero se reitera que se tiene una explicación aceptable sobre la violación de las simetrías P y CP y sobre el déficit de neutrinos solares.

## Glosario

**Cosmología:** Disciplina científica que estudia el origen, la evolución y el destino del universo en las mayores escalas de distancias y tiempos que somos capaces de medir.

**Partículas exóticas:** Partículas postuladas por algunos modelos para poder explicar desviaciones experimentales no predichas por el modelo estándar.

**Astrofísica:** Parte de la física orientada al estudio de estructuras como las estrellas, sistemas estelares, materia interestelar, procesos

astronómicos.

**Teoría especial de la relatividad:** Teoría física que investiga el movimiento de los cuerpos a velocidades comparables a la velocidad de propagación de la luz.

**Mecánica cuántica:** Teoría que describe el comportamiento del mundo microscópico al nivel de átomos, moléculas y núcleos.

**Carga eléctrica:** Número cuántico que indica la cantidad de carga eléctrica, en múltiplos de la carga eléctrica elemental, que posee una partícula.

**Sabor:** Número cuántico asociado a la interacción débil para designar a las diferentes variedades de quarks que existen.

**Color:** Número cuántico de la interacción fuerte que da una característica que distingue a los diferentes tipos de quarks.

**Granunificación:** Unificación de las interacciones electromagnética, nuclear débil y nuclear fuerte.

**Gev:** Diminutivo de la palabra Giga-electronvoltio que es la energía correspondiente a  $10^{12}$  electronvoltios. Un electronvoltio es la energía adquirida por un electrón cuando se le aplica una diferencia de potencial de un voltio.

**Simetría de paridad P:** Simetría en física de partículas elementales que consiste en cambiar las coordenadas espaciales  $(x,y,z)$  por  $(-x,-y,-z)$  o simetría discreta que cambia la derecha por la izquierda como en el caso de un espejo.

**Conjugación de la carga C:** Cambio en el signo de la carga de una partícula para originar su antipartícula.

**Simetría CP:** Operación en la cual se cambian partículas por antipartículas y se invierte el signo de las coordenadas.

**Nucleosíntesis:** Proceso de la formación de los elementos que se encuentran en la naturaleza a partir de los elementos más simples: hidrógeno y helio.

**Quiralidad:** Orientación asociada a dos posibles direcciones arbitrarias: izquierda y derecha.

**Singlete:** Campo asociado al grupo  $U(1)$  de la interacción electromagnética.

**Doblete:** Campo asociado al grupo  $SU(2)_1$  de las interacciones del modelo estándar electrodébil.

**Grupo:** Operación matemática que contiene una serie de propiedades y operaciones.

**U(1):** Grupo matemático unitario y abeliano correspondiente a la interacción electromagnética. El número 1 se asocia a la carga eléctrica elemental.

**SU(2)<sub>L</sub>:** Grupo especial unitario no abeliano correspondiente a la interacción nuclear débil con dos números cuánticos. El subíndice L indica que las partículas estándar son de quiralidad izquierda.

**SU(3):** Grupo especial unitario no abeliano de la interacción nuclear fuerte. El número 3 da las clases de colores de los quarks.

**Electrodébil:** Interacción que describe las fuerzas nuclear débil y electromagnética unificadas, presente solo a ciertas escalas de energía.

**Fermiones:** Partículas que tienen espín semientero y están sujetas al principio de exclusión de Pauli.

**Bosones:** Partículas que tienen espín entero y no están sujetas al principio de exclusión de Pauli.

## Bibliografía

1) T.P Cheng and L.F Li. Gauge Theory of elementary particle physics. Clarendon Press-Oxford (1994) P. Fayed and S. Ferrara, Phys. Rep. 32 (1977).

2) S. Weinberg. The Quantum Theory of Fields. Volumen 2. Cambridge University Press (1995).

3) P. Langacker, Grand unified theories and proton decay. Phys. Rep. 72C, (1988)185.

4) E. Witten, Nucl. Phys. B, 258 (1985); B 268 (1986) 79.

5) P. Fayed and S. Ferrara. Phys. Rep. 32 (1977).

6) F. Arqueros. A distancia (1994).

7) S. Dimopoulos, SA Raby and F. Wilczek. Physics Today. Sep. 1991.

8) P.W Higgs, Phys. Rev. 145,1156 (1966).

9) P. Langacker, Phys. Rep. 72C, 185 (1981).

10) Zee. A. The unity of forces in the universe, vol. 1. World Science Press (1982).

11) M.F Sonnius. Supersymmetric for beginners. Proceedings in Supersymmetry and Supergravity of the Trieste School 82.

12) R. Gaitán, H. González y J.L. Díaz. Simetría especular en física de altas energías. Universidad Surcolombiana (2000).

13) T. D. Lee, Physics Reports 16, (1974) 275; R.N Mohapatra, A. Rasin and G. Sanjanovic hep-ph 970728.

14) E. Witten, Nucl. Phys. B188 (1981) 513.