



Editorial de la Universidad  
Tecnológica Nacional

# La "Máquina de Dios"

LHC (El gran colisionador de Hadrones)

**Dr. Ing. Raúl C. Pérez**

*Director del Laboratorio de Hidrodinámica, Atmósfera y Nubes para Desarrollos Operativos (LIHANDO). CEREDETC.*

Facultad Regional Mendoza

Universidad Tecnológica Nacional - U.T.N.

Conferencia de Posgrado  
Abril 2009

## Mitos y Verdades de la Máquina de DIOS. LHC (El gran colisionador de Hadrones)

Dr. Raúl C. Pérez

rcperez@frm.utn.edu.ar

Facultad Regional Mendoza (FRM) Universidad Tecnológica Nacional (UTN).

### 1. Introducción

Y el hombre creó la máquina... ¿es un nuevo intento de semejarse a Dios por parte de la humanidad? ... La realidad es que se inició una nueva experiencia con el objetivo de encontrar respuestas científicas a aquellos interrogantes tan antiguos como la humanidad misma: ¿Cómo empezó todo? ¿Cuáles son las leyes que rigen el funcionamiento del Universo?

En la frontera entre Suiza y Francia comenzó a funcionar el Gran Colisionador de Hadrones (LHC, siglas según su nombre en inglés), también conocido como la "máquina de Dios", con el objetivo de recrear los orígenes del Cosmos, según postulan sus autores intelectuales; para ello utilizarán un equipamiento que pondrá en marcha uno de los mayores experimentos científicos realizados en la historia del hombre.

Para poder comprender mejor qué es y para qué sirve, vale la pena parafrasear a uno de los científicos creadores de la experiencia, Alejandro Gangui: *"Esta máquina puede recrear las condiciones más primordiales y más energéticas que, se piensa, hubo en el Universo embrionario. El LHC, en particular, permite recrear el Universo cuando tenía apenas una millonésima de millonésima de segundo"*.

*El LHC hará colisionar haces de partículas subatómicas relativamente pesadas utilizando las energías más altas generadas por el hombre hasta la actualidad; y a partir de esos choques, pretende generar nuevas partículas de energía extremadamente alta. Entre ellas quizás se encuentren algunas cuya existencia aún no ha sido comprobada, como por ejemplo, el tan buscado bosón de Higgs"*, según detalla Gangui.

El bosón de Higgs también es conocido como "partícula divina o de Dios" porque, según la hipótesis de su trabajo, permitiría explicar el mecanismo del origen de la masa de las partículas que componen el universo. De allí la nominación de "máquina de Dios".

La idea de colisionar partículas subatómicas para estudiar las leyes físicas que gobiernan los procesos atómicos y nucleares, nació en la década del 30 y la base es el funcionamiento de estos aceleradores, que se vienen construyendo desde los años 50.

Cuanto más grande es un colisionador, más detalles se pueden obtener sobre los procesos que sucedieron al origen del universo. Y como el LHC será el más grande construido hasta la actualidad por el hombre (tiene 27 kilómetros de diámetro, costó 6.000 millones de dólares y su realización demandó 20 años), se puede afirmar que se está inaugurando el experimento más importante para conocer sobre la física de las partículas subatómicas y

aprender más sobre los viejos interrogantes planteados sobre los orígenes del cosmos.

Ricardo Piegaia manifestó: *"Fue diseñado para responder preguntas tan fundamentales como cuál es el origen de la masa de las partículas; por qué si en el Big Bang se creó igual cantidad de materia y antimateria sólo se observa materia en el Universo que nos rodea; cuál es la naturaleza de la materia oscura que parece dominar la estructura del Universo; descubrir nuevas partículas e interacciones fundamentales explorando por primera vez un rango de energía siete veces mayor que el alcanzado en otros aceleradores construidos antes por el hombre"*.

*"Encender la máquina, juntar toneladas de datos y analizarlos es sólo el comienzo. Pero algo es seguro: si la partícula de Higgs no se deja ver, habrá que volver a los pizarrones e inventar algo mejor"*, advierte Alejandro Gangui. *"No sería el fin del mundo pero sí tal vez el comienzo de una nueva era"*.

## 2. Fundamentos Teóricos

Para una correcta comprensión de la temática, es importante exponer los conceptos teóricos que la incumben y que fundamentan:

### 2.1 La Teoría de la Relatividad

Generalmente, cuando se hace referencia a la teoría de la Relatividad, la gente que no está familiarizada con el tema, la relaciona con aquella frase popular que reza: *... "todo es relativo"...* ¿Es realmente así?... ¿Este concepto es uno de los postulados que se desprenden de la importantísima teoría que comenzó a delinear Albert Einstein y que continuaron consolidando sus discípulos Fermi y Dirac?. Pues, se verá al finalizar la exposición de las ideas relativistas, que nada está más alejado de la realidad que esta afirmación; por el contrario, la teoría de la Relatividad afirma exactamente lo contrario...

La primera cuestión a entender respecto a esta teoría, es explicar por qué es necesario estudiarla y en qué condiciones se debe aplicar.

Una de las actividades principales e ineludibles de cualquier rama de la Física, es la realización de mediciones de las magnitudes del tema que se investiga. La teoría de la Relatividad, estudia la dependencia entre las mediciones que se realizan y el movimiento respecto del observador que las realiza.

A partir de la experiencia fallida de Milchesson y Morley que trató de medir la existencia del éter en el universo, Albert Einstein sacó una serie de conclusiones que dan origen a una nueva Mecánica: la Teoría de la Relatividad, también conocida como la *Mecánica de las altas velocidades*. Fundamentalmente porque establece nuevas relaciones entre las magnitudes velocidad, tiempo, energía y masa.

Debido a que las partículas subatómicas como el electrón, neutrón, protón, etc... se mueven en el átomo a muy altas velocidades, comparables con la velocidad de la luz; es imposible llegar a resultados correctos en cualquiera

de los estudios que se emprendan sobre ellos, si no se utilizan las correcciones relativistas correspondientes.

### 2.1.1 Postulados Básicos:

Cuando en Física se estudian situaciones de incumbencia de la Mecánica, siempre se plantea la influencia del movimiento en las mediciones que se realizan respecto de un marco de referencia determinado. Una gran incógnita a develar en esta situación fue: ¿Existe un marco de referencia universal que se encuentre en reposo respecto de todos los otros existentes? Si el éter buscado por Michelson y Morley hubiera existido, éste sería el marco en cuestión, pero como el resultado de sus investigaciones fue la comprobación de que tal éter o cualquier otro elemento con esas características no existen; la primera gran conclusión obtenida por Einstein al respecto fue.: *“La comprobación de que no existe en el universo ni en la naturaleza un sistema de referencia universal privilegiado”...* O en otras palabras: *todos los sistemas marcos de referencia son covariantes (tienen igual valor)*. Este hecho es conocido como el primer postulado de la teoría de la Relatividad, llamado *principio de Covarianza* de los marcos de referencia.

El concepto de este principio es que todos los sistemas de referencias tienen igual valor, no existe ninguno que sea más importante que otro. En la práctica, la importancia de uno sobre otro lo da la posibilidad de permitir realizar los cálculos en forma más sencillos que otros a la hora de utilizarlos.

Otra conclusión igualmente importante obtenida por Einstein, a partir de los resultados de la experiencia de Michelson y Morley, fue que las expresiones de las leyes de la Física son las mismas independientemente de cual es el sistema de referencia utilizado.

Una buena síntesis de estos conceptos expuestos, es la afirmación de que en la teoría de la relatividad, *los sistemas de referencia son relativos, y los hechos de la naturaleza representados por las leyes físicas y sus expresiones matemáticas no lo son*. Para aclarar un poco esta idea, se puede decir que la segunda ley de Newton  $F = m \cdot a$  será la misma en cualquier marco de referencia que se utilice para medirlos. En cada marco de referencia las mediciones en cada una de estas magnitudes masa ( $m$ ), aceleraciones ( $a$ ) y fuerzas ( $F$ ) pueden ser distintas respecto de otros sistemas de referencia; pero en cualquiera de los marcos de referencia que se utilicen cuando se multiplique el valor de la masa medida por la medición obtenida de la aceleración, siempre será igual al valor medido de la fuerza.

La cuestión que surge ahora es... ¿En cuál de todos los sistemas en que se realizan las mediciones se obtienen los valores correctos?... La respuesta, según los postulados de la teoría de la relatividad es... en todos; porque todos son igualmente válidos, las mediciones son relativas al marco de referencia utilizado...

Para ejemplificar esta situación, se puede tomar el ejemplo de dos personas que viajan sentadas en un tren, si se mide la velocidad de una de estas personas respecto de la otra, y se toma como sistema de referencia del vagón del tren, el valor de sus velocidades respectivas es cero o nula; por el contrario, si la velocidad de ambas personas la mide una tercera que se

encuentra en una estación cuando el tren pasa sin detenerse, al tomar esta persona la velocidad de la gente que viaja en el tren, medirá como valor de la velocidad de cada viajero la misma velocidad con que se desplaza el tren, distinta de cero. Evidentemente, las dos mediciones son correctas, ambas desde sus sistemas de referencias, dan valores distintos; y este hecho es congruente con la relatividad de los sistemas marco de referencia; pero tampoco es menos cierto que los hechos físicos que describen el fenómeno no cambian, en este caso, a medida que transcurre el tiempo, la distancia entre las dos personas que están sentadas en el tren no cambian, y ambas a medida que el tiempo avanza se alejarán del tercer observador que se encuentra en las estación; esto se describirá así, se utilice el marco de referencia que se utilice.

Se puede apreciar entonces que la teoría de la relatividad afirma que lo relativo son los sistemas marcos de referencia, mientras que las leyes de la Física y sus expresiones que las describen permanecen “*inmutables*”.

En este camino de pensamiento, y profundizando los conceptos expuestos, podemos tomar al caso de dos automóviles que se desplazan a 100 km/h. Si ambos se dirigen en igual dirección y sentido contrario, cualquier pasajero de uno de los vehículos observará que el otro automóvil se acerca hacia él a una velocidad “*relativa*” de 200 km/h. En cambio, si ambos vehículos se dirigen en la misma dirección y sentido, el observador percibirá que el otro vehículo no se desplaza respecto al suyo (velocidad “*relativa*” cero o nula). Este comportamiento es de percepción común de los cuerpos móviles existentes en el universo; pero Einstein, a raíz de los resultados de la experiencia de Milchesson y Morley, observó que la luz no cumplía con este comportamiento. Y a partir de este fenómeno, estableció *el segundo postulado de la teoría de la Relatividad*:

*...El valor de la velocidad de la luz es una magnitud invariante ante el cambio de marco de referencia...*

Este postulado se conocido como el principio de Invarianza de la velocidad de la luz, y lo que está afirmando, es que el valor de la velocidad de la luz establecido en aproximadamente 300.000 km/s, es el mismo se mida desde el sistema de referencia que se mida, y es independiente del movimiento de los marcos de referencias entre sí. En otras palabras, al medir la velocidad de la luz, no importa la velocidad del marco de referencia (magnitud, dirección y sentido) desde el que se mida, el resultado de la medición siempre dará un valor de casi 300.000 km/s en el vacío.

Estos dos postulados fundamentales, abrieron la puerta de la Teoría de la Relatividad a través de sus interesantes consecuencias y corolarios...

### 2.1.2 Las Transformadas Lorentz

Si se tienen dos marcos de referencia  $S$  y  $S'$ , que se mueven con velocidad relativa constante  $\mathbf{v}$ , uno respecto del otro, tal como muestra la figura 1, y en un tiempo  $t$  dado ocurre un acontecimiento en el punto  $x, y, z$  del sistema  $S$ . Un observador situado en el marco de referencia  $S'$  medirá que el acontecimiento ocurre en el tiempo  $t'$  en el punto  $x', y', z'$ ; por simplicidad se hace coincidir el eje  $x$  con la dirección de la velocidad  $\mathbf{v}$ . La cuestión es saber como relacionar las mediciones realizadas por un observador en el sistema  $S$

con las realizadas por otro en el sistema de referencia  $S'$ . Una respuesta es que si el tiempo que miden ambos sistemas son los mismos, es decir  $t = t'$ , las medidas realizadas por el observador en  $S$  excederán a  $S'$  en una cantidad  $v.t$ ; y entonces la transformación lineal de un sistema a otro, conocido como *transformaciones de Galileo* son:

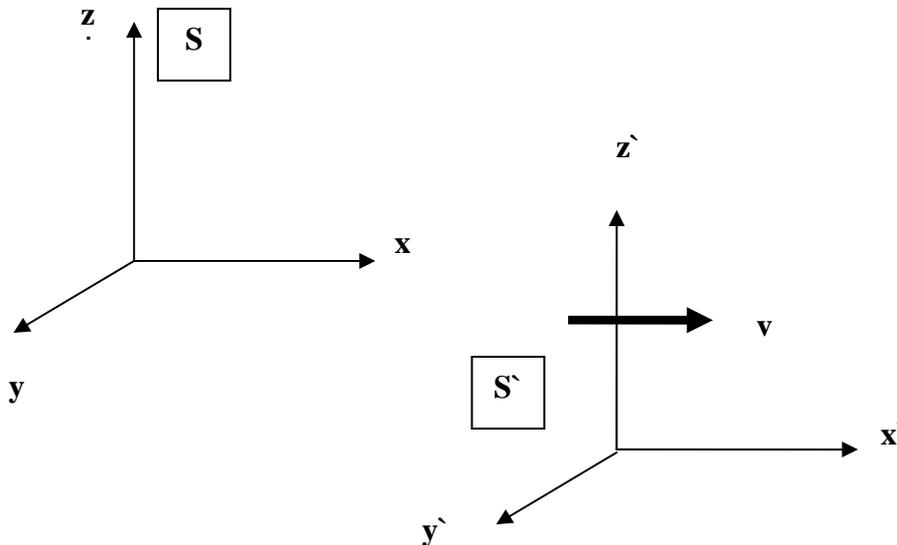


Figura 1: Sistema de marcos de referencia en movimiento relativo inercial

$$x' = x - v.t; \quad y' = y; \quad z' = z; \quad t' = t.$$

y las transformaciones galileanas de las velocidades quedarán como:

$$v_x' = dx'/dt' = v_x - v; \quad v_y' = dy'/dt' = v_y; \quad v_z' = dz'/dt' = v_z$$

Si se toma el caso de un haz de luz que se dirige a lo largo del eje x del sistema S con velocidad  $c$ ; según las transformaciones de velocidades de Galileo, el observador del sistema  $S'$  medirá una velocidad de la luz igual a:

$$c' = c - v$$

Evidentemente este resultado se opone al principio de invarianza de la velocidad de la luz de la teoría de la Relatividad, por lo que se hacen necesarias transformaciones diferentes que satisfagan los principios de la teoría de la Relatividad.

En la búsqueda por las transformaciones correctas entre diferentes sistemas de referencia que se mueven uno respecto del otro a velocidad constante; con la condición de que cumplan con los postulados de la relatividad. Lorentz en un genial trabajo, logró encontrar estas relaciones que están dadas por:

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \quad y' = y; \quad z' = z \quad t' = \frac{t - vx/c^2}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

La observación detallada de las ecuaciones de Lorentz trae una serie de casos de interés, quizás los más importantes son:

1. Ya no tiene vigencia que  $t' = t$ , es decir, que el tiempo transcurrido entre dos eventos depende del sistema de referencia en que se mide, y de su movimiento respecto al otro sistema. La medición del tiempo no es la misma para cualquier sistema de referencia. Por ejemplo, un evento que puede ser simultáneo en un sistema de referencia, en otro no tiene por qué serlo.
2. Las transformaciones de Lorentz quedan reducidas a las de Galileo para velocidades de  $v$  muy pequeñas comparadas con  $c$ . Es decir, si  $v \ll c$  entonces  $v/c$  es aproximadamente igual a cero, y las expresiones de Lorentz se transforman en las de Galileo, es por esto que a la Teoría de la Relatividad se la conoce también como la *Física de altas velocidades*, ya que sus efectos comienzan a manifestarse cuando los móviles tienen valores de velocidad comparables a la velocidad de la luz.

### 2.1.3 La contracción del espacio (de Lorentz-Fitz Gerald):

Si se mide cualquier objeto que se encuentra en reposo en el sistema S, y el valor de su longitud es  $L_0$  a lo largo del eje x es:

$$L_0 = x_2 - x_1$$

(donde  $x_2$  y  $x_1$  son las medidas de los extremos del objeto en el sistema S) Si se aplican las transformaciones de Lorentz a las mediciones de  $x_1$  y  $x_2$ ; se obtendrá la medición de la longitud del objeto que obtendrá un observador que se encuentra en el sistema de referencia S' que se mueve con velocidad  $v$  paralela al eje x. El resultado de tal medición será:

$$L = x_2' - x_1' = L_0 \sqrt{1 - (v/c)^2}$$

Una primera observación, es que el observador que se mueve respecto del sistema de referencia en que el objeto se encuentra en reposo, no va a medir la misma longitud que en el otro; pero algunos otros aspectos interesantes que también se pueden observar son:

1. Si la velocidad  $v$  es pequeña comparada con la velocidad de la luz ( $v \ll c$ ), se tendrá que  $L \cong L_0$ ; es decir que para velocidades cotidianas de la Mecánica Clásica, ambos observadores medirán la misma longitud y los efectos relativistas son despreciables.
2. Si el sistema S' se desplaza a velocidades cercanas a la de la luz,  $v/c \approx 1$  y entonces  $L = 0$ . En otras palabras, para observadores que se mueven a velocidades cercanas a la de la luz, las longitudes que medirá un observador en S' estarán contraídas respecto a las mediciones del sistema de referencia en que el objeto se encuentra en reposo; llegando a un caso extremo en que la longitud será cero cuando S' alcance la velocidad de la luz.
3. Este fenómeno relativista se manifiesta sólo en las longitudes que se miden en las direcciones paralelas a la velocidad  $v$  entre los sistemas.

### 2.1.4 La dilatación del tiempo

Como se explicó anteriormente, las mediciones del tiempo, en los distintos sistemas de referencias (en contra de la intuición) también serán diferentes debido a los efectos relativistas. Las mediciones de tiempo en cualquier marco de referencia siempre se realizan por intervalos entre un tiempo inicial  $t_1$  y uno final  $t_2$ ; es decir  $\Delta t = t_2 - t_1$ .

Un tiempo medido desde el sistema de referencia  $S$  que se considera en reposo, respecto a otro  $S'$  que se mueve con velocidad  $v$ , será entonces:

$$t_0 = \Delta t = t_2 - t_1.$$

Para poder encontrar la relación de esta medición con su equivalente que obtendrá un observador en  $S'$ , se debe aplicar a  $t'_2$  y  $t'_1$  las transformaciones de Lorentz correspondientes, es decir el resultado de una medición equivalente de un tiempo  $t$  realizada por el observador del sistema  $S'$  será igual a:

$$t = \Delta t' = t'_2 - t'_1 = \frac{t_0}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}.$$

Tal como se analizó para el caso de la contracción del espacio, se puede ver que dos mediciones del mismo tiempo transcurrido, medidas desde dos sistemas de referencias diferentes, que se mueve uno respecto del otro a velocidad  $v$ , darán por lo general medidas distintas de tiempo, y sus características son:

1. Si la velocidad  $v$  del sistema  $S'$  es pequeña comparada con la velocidad de la luz ( $v \ll c$ ), se tendrá que  $t \approx t_0$ ; es decir que para velocidades cotidianas de la Mecánica Clásica, ambos observadores medirán el mismo tiempo.
2. Si el sistema  $S'$  se mide a la velocidad de la luz,  $v/c \approx 1$ , entonces  $t = \infty$ . En otras palabras, para observadores que se mueven a velocidades cercanas a la de la luz, los tiempos que medirá estarán dilatados respecto a las mediciones del sistema de referencia que se encuentra en reposo; llegando al extremo en que el tiempo no transcurre nunca para el caso de que la velocidad del sistema  $S'$  alcance la velocidad de la luz.
3. Este fenómeno se manifiesta solo en las mediciones que se realizan en las direcciones paralelas a la velocidad  $v$ .

El carácter relativo del tiempo y el espacio tiene muchas consecuencias interesantes

Lo desarrollado muestra que magnitudes físicas fundamentales, como el tiempo y el espacio, tienen significado solamente si se especifica el marco de referencia en que se realizan las mediciones. Si se fija el marco convenientemente, siempre se puede saber qué mediciones se obtendrá en otro sistema de referencia que se mueve relativamente a velocidad constante, utilizando las Transformaciones de Lorentz. Un evento en el tiempo y el espacio tendrá diferentes aspectos en diferentes sistemas de referencias. Sin embargo, de acuerdo con los postulados de la teoría de la Relatividad, las leyes que describen estos eventos deben tener la misma forma en cualquiera de estos marcos de referencia.

Otras consecuencias de interés se pueden observar cuando se aplica la teoría relativista a las leyes de conservación de la Mecánica Clásica (masa, energía y cantidad de movimiento):

### 2.1.5 La relatividad de la masa ( $m$ ):

Si se aplica las transformaciones de Lorentz a la conservación de la cantidad movimiento lineal durante los choques en que no actúan fuerzas externas se llega a la expresión:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-(v/c)^2}}$$

En donde  $m_0$  es la medida de la masa de un cuerpo en el marco de referencia en el cual se encuentra en reposo, mientras que  $m$  es su medida obtenida desde el marco que se desplaza a velocidad  $v$ . Realizando un análisis de este resultado se puede observar que:

1. Si la velocidad  $v$  del sistema  $S'$  es pequeña comparada con la velocidad de la luz ( $v \ll c$ ), se tendrá que  $m \cong m_0$ ; es decir que el valor de la medición de la masa que realizará un observador colocado en el marco de referencia en el cual el objeto se encuentra quieto, tendrá el mismo valor que la medición realizada desde otro sistema de referencia que se mueve a velocidad  $v$  respecto del primero. Este es el caso común que predomina en la Mecánica Clásica.
2. Si el sistema  $S'$  se mueve a velocidades cercanas a la de la luz,  $v/c \cong 1$ , entonces  $m = \infty$ . En otras palabras, para observadores que se mueven a velocidades cercanas a la de la luz, la medición de la masa  $m$  realizada por un observador que se mueve con velocidad  $v$  respecto del marco de referencia en que el cuerpo se encuentra en reposo, crecerá al infinito respecto de la medición  $m_0$  en reposo.

Sería necesario energía infinita para mover un cuerpo de masa infinita a la velocidad de la luz, ésta es una de las razones por lo cual se considera a la velocidad de la luz un límite superior para el movimiento de los cuerpos materiales que poseen masa. No ocurre tal cosa con las partículas que poseen masa despreciable o nula, como es el caso de los fotones que se mueven a la velocidad de la luz.

### 2.1.6 La energía relativista:

La relación más célebre de Albert Einstein es aquélla que relaciona la energía de un cuerpo con su masa. Anteriormente al descubrimiento de esta relación, la Mecánica Clásica las trataba por separado y sin relación alguna en dos importantes principios: la conservación de la masa y la conservación de la energía. Para comprender el salto cualitativo aportado por Einstein a la Física en este punto, es conveniente seguir un poco su línea de pensamiento y desarrollo conceptual. El principio del trabajo y la energía de la Mecánica Clásica establece que el trabajo necesario para pasar a un cuerpo de masa  $m_0$  de un estado de reposo a un estado de movimiento con velocidad  $v$  es:

$$W = \int_0^W dW = \int_0^v F \cdot dx$$

Si se considera que  $F = d(mv)/dt$  y se reemplaza en la ecuación integral anterior y se opera adecuadamente, se llega al resultado final:

$$W = mc^2 - m_0c^2 = (m - m_0)c^2$$

Pero además se sabe por la Mecánica Clásica que el trabajo  $W$  que se está tratando es equivalente al cambio de energía cinética  $K$  adquirida por el cuerpo por el trabajo realizado sobre él. Es decir:

$$W = K = (m - m_0)c^2$$

La ecuación anterior también puede escribirse como:  $E = E_0 + K$ , donde:

$$E = m.c^2 \text{ y } E_0 = m_0.c^2$$

$m_0.c^2$  se conoce como energía en reposo de un cuerpo cuya masa en reposo es  $m_0$ . Este hecho debe comprenderse como que la energía, además de manifestarse en las formas de cinética, potencial, trabajo, electromagnética, térmica, etc... que son tan familiares, también puede manifestarse como masa. El factor de conversión  $c^2 = 9.10^{16}$  m/s es muy grande, de modo tal que la energía que se puede obtener de 1 Kg sería  $9.10^{16}$  joules. La conversión de materia en energía, es la fuente de la energía liberada en todas las reacciones exotérmicas de la Física y la Química, y únicamente se explica y calcula exactamente si se utiliza la teoría de la relatividad, éste es uno de los hechos que dan gran fortaleza a la teoría.

Si se expresa la energía cinética  $K$  en función de la cantidad de movimiento lineal  $p$ , se obtiene la expresión  $K = p^2/2m$ ; reemplazando este resultado en la ecuación anterior y operando, se llega a la expresión:

$$E = \pm [m_0^2c^4 + p^2 c^2]^{1/2}$$

Si todas las ecuaciones obtenidas para la Mecánica Relativista son aplicadas a la Mecánica Clásica, se obtienen los mismos resultados, es decir que la teoría de la Relatividad es consistente con la Mecánica Clásica, y esta última es un caso particular de la primera. En otras palabras, la Mecánica Clásica es el caso particular de bajas velocidades de la Mecánica Relativista, y no es verdad el caso inverso, porque la Mecánica Clásica no explica correctamente los casos físicos que se desarrollan a altas velocidades cercanas a la de la luz. Sintetizando se puede afirmar que la Mecánica Relativista es de aplicación general, mientras que la Mecánica Clásica es de aplicación particular (a bajas velocidades).

Debido a que las partículas atómicas y subatómicas se mueven a velocidades comparables a la de la luz; en el estudio y cálculo de los fenómenos del campo de la Física Atómica y Nuclear se deben aplicar los principios y ecuaciones relativistas. Las experiencias realizadas en esta dirección fueron todo un éxito, fortaleciendo y convalidando los resultados obtenidos por la Teoría Relativista.

Los hechos mencionados muestran la importancia del rol de la teoría de la Relatividad en los tratamientos en el campo de la Física Atómica y Nuclear.

## 2.2 La Mecánica Cuántica

La Mecánica Cuántica, al igual que cualquier otra teoría de la Física, nació ligada a un nuevo campo de investigaciones experimentales; las que se iniciaron con el estudio de las propiedades de la radiación de un cuerpo negro por Max Planck; extendiéndose rápidamente a la interacción entre los cuerpos materiales y la radiación electromagnética, dando lugar a los conceptos de la dualidad onda-partícula; y posteriormente a las teorías atómicas y nucleares.

Las propiedades de las partículas de los sistemas atómicos y subatómicos difieren en forma sustantiva respecto de las propiedades de los cuerpos macroscópicos. De tal forma, que las leyes y principios de la Mecánica Clásica y el Electromagnetismo Clásico son insuficientes para realizar una descripción adecuada de la Física de los átomos, moléculas y partículas elementales individualmente.

La diferencia principal entre la Mecánica Clásica Newtoniana y la Mecánica Cuántica es lo que ambas describen; la primera describe el movimiento de partículas debido a la influencia de fuerzas aplicadas y admite por sentado que magnitudes como la posición, la masa, la velocidad, la aceleración, etc... pueden ser medidas en cualquier instante. Esta suposición es totalmente válida, puesto que la Mecánica Clásica es capaz de proporcionar la explicación correcta del comportamiento de los cuerpos en movimientos a bajas velocidades, cuando se las compara con la velocidad de la luz.

### *2.2.1 Las magnitudes “observables” y el principio de indeterminación de Heisemberg*

Por otro lado, la Mecánica Cuántica también desarrolla relaciones entre las magnitudes observables, pero el principio de indeterminación de Heisemberg modifica sustancialmente el concepto de “*magnitud observable*”, sobre todo en el tratamiento en el campo de la Física Atómica y Nuclear. Según el principio de indeterminación, la posición y la cantidad de movimiento de una partícula pequeña, del orden atómico, no pueden ser medidos exactamente al mismo tiempo, cosa que si es posible en la Mecánica Newtoniana. Las cantidades “*observables*” que busca medir la Mecánica Cuántica son las probabilidades de obtener un valor determinado de la medición.

En principio, esta situación de la Mecánica Cuántica, da la impresión de que ésta es un pobre sustituto de la Mecánica Clásica en el campo de las partículas atómicas y subatómicas, pero un análisis más profundo de la situación lleva a la conclusión de un hecho notable: *La Mecánica Newtoniana no es más que una aproximación de la Mecánica Cuántica, resultado de los promedios de los valores posibles de las magnitudes que se desea describir, que cada átomo posee y que componen el cuerpo macroscópico.* No existen dos áreas diferentes, el de las partículas atómicas y subatómicas, y el de los cuerpos macroscópicos, por el contrario, existe una sola área y desde donde se aborde el problema a resolver, los resultados deben ser consistentes con la otra óptica. En este marco, tal como ocurre con la teoría de la Relatividad y la Mecánica Clásica, ésta última es una aproximación de la Mecánica Cuántica incapaz de describir los fenómenos de partículas de escalas de tamaño del orden del átomo o menor.

### *2.2.2 La discretización (cuantificación) de las magnitudes*

Otras de las características fundamentales de la Mecánica Cuántica es el carácter discreto de algunas de las magnitudes físicas observables (*cuantificación*), como lo es la discretización de la energía de los sistemas atómicos, que trae asociado como consecuencia sus transiciones discretas. Por ejemplo, cuando un sistema atómico pasa de un estado de mayor energía (excitado), a uno de menor energía, dado que la energía se conserva, la diferencia de energía del proceso es emitida como un fotón de luz a una frecuencia determinada.

Pero la energía no es la única magnitud física medible que está cuantizada; la experiencia de Stern-Gerlach probó que la cantidad de movimiento angular  $L$  de los sistemas atómicos también posee un espectro discreto de valores.

Esta situación de la Mecánica Cuántica, del carácter discreto de los valores de las magnitudes fundamentales que caracterizan a los sistemas atómicos, contradice abiertamente el conjunto de conceptos de la Mecánica Clásica. El carácter discreto de las magnitudes de partículas atómicas y sub-atómicas y los cambios discontinuos de sus estados, están en contradicción con las hipótesis generales de la Mecánica Newtoniana que expresan que una fuerza infinitamente pequeña determina una variación infinitesimal del estado en que se encuentra cualquier sistema, siendo posible determinar en cualquier momento las magnitudes físicas que intervienen en el proceso, cuyas magnitudes evolucionan infinitesimalmente tomando valores continuos.

### 2.2.3 La naturaleza dual onda-partícula

Uno de los hechos más importantes que presenta la Mecánica Cuántica es que en el mundo físico de las partículas atómicas y sub-atómicas se unen de manera sorprendente las propiedades de las partículas ordinarias con las propiedades de los corpúsculos de las ondas (fotones). Esta propiedad fundamental es llamada el *dualismo onda-partícula*. Dicho en forma más precisa, bajo ciertas condiciones las micro-partículas se comportan como cuerpos materiales, mientras que para otras condiciones las mismas micro-partículas presentan propiedades ondulatorias; y en algunas ocasiones, como en el caso de la resonancia magnética nuclear, manifiestan las propiedades de la naturaleza corpuscular y ondulatoria a la vez.

Esta naturaleza onda-partícula de las partículas atómicas se manifestó por primera vez en las experiencias de cuantos de luz de Max Planck. En lo que concierne a las propiedades corpusculares de la radiación electromagnética se develaron en el descubrimiento del *efecto Compton*, que admite tan sólo esa interpretación del fenómeno, puesto que desde el electromagnetismo clásico no se puede explicar como una onda electromagnética incidente puede hacer retroceder una partícula de dimensiones atómicas sin poner en movimiento el resto de las partículas que se encuentran en las cercanías. Otra experiencia extraordinaria que confirma el fenómeno de comportamiento de propiedades corpusculares de la luz, es el conocido *efecto Fotoeléctrico*.

Los datos experimentales obtenidos a partir de las numerosas experiencias realizadas en este campo de la Física, probaron que a cada fotón

de luz se le puede atribuir una energía  $E$  y una cantidad de movimiento  $p$  dadas por las cantidades:

$$E = h\nu \quad p = E/c = h/\lambda$$

Donde  $h = 6.625 \cdot 10^{-34}$  Joule.s es conocida como la constante de Planck, y  $\nu$  y  $\lambda$  son la frecuencia y la longitud de onda de la onda electromagnética de luz respectivamente.

La Mecánica Cuántica es el mejor resultado de los esfuerzos de todos los científicos en la historia de la humanidad para describir en forma integral la dinámica de las partículas, independientemente de su tamaño. Pasando a ser la Mecánica Clásica una aproximación muy buena para el caso particular de los cuerpos macroscópicos.

#### 2.2.4 Principio de indistinguibilidad de las partículas cuánticas

Si se estudia un sistema de partículas de una misma especie, por ejemplo un sistema de electrones, protones, neutrones, etc... En tales sistemas se manifiestan nuevas e importantes peculiaridades para las que no existen propiedades análogas en la Mecánica Clásica. Estas particularidades resultan obvias cuando se estudian los diferentes procesos de colisiones de partículas clásicas y partículas atómicas.

En la Mecánica Clásica, las propiedades de cada partícula se caracterizan por su masa. Si las masas de dos partículas que chocan son iguales, ambas se consideran por completo equivalentes. El estado de cada una está dado por las condiciones iniciales. Se mueven según trayectorias determinadas, chocan en cierto punto del espacio y divergen sus trayectorias correspondientes. Así, a lo largo de todo momento es posible identificar individualmente cada partícula a pesar de tener la misma masa.

De manera totalmente diferente se comportan los procesos de colisión entre partículas cuánticas. Si antes del choque, dos partículas cuánticas se encuentran en determinados puntos del espacio, en esta situación, por el principio de indeterminación, sus cantidades de movimiento  $\mathbf{p}$  no tienen un valor definido. Después de la colisión, si se pudiera establecer sus trayectorias por algún tipo de experimento (ej: cámara de Wilson), y si las dos partículas son de la misma naturaleza (dos electrones, dos neutrones, etc...), es imposible establecer cuál de las dos partículas estaba vinculada a cual trayectoria.

Un buen ejemplo lo constituye un sistema formado por dos átomos de hidrógeno, si ambos se encuentran a distancias suficientemente grandes de forma tal que sus nubes electrónicas no se solapen, cada electrón se encuentra individualizado y localizado moviéndose en sus orbitales atómicos cerca de sus respectivos núcleos. A medida que se muevan uno hacia otro hacia una colisión, sus nubes electrónicas se solaparán, y aumenta la probabilidad de encontrar ambos electrones en un dominio común a las dos nubes. Si esto ocurriera, no existe procedimiento alguno que permita establecer cuál era el electrón que le pertenecía a cada núcleo. Este hecho es conocido como el *principio de indistinguibilidad de las partículas cuánticas*, principio que se puede formular de la siguiente manera:

... en un sistema de partículas idénticas, se dan solamente aquellos estados que no cambian al permutar las posiciones de dos partículas idénticas cualesquiera”...

Este principio que no tiene analogía en la Mecánica Clásica, conduce a consecuencias muy importantes y profundas, como el descubrimiento de la energía atómica de intercambio, concepto al que era imposible llegar desde el formalismo de la Mecánica Newtoniana.

### 2.2.5 Bosones y Fermiones

El principio de identidad de las partículas da origen a una propiedad importantísima de la Mecánica Cuántica, que no tiene equivalente en la Mecánica Clásica: *la propiedad de simetría de las partículas*.

Si bien al permutar dos o más partículas cuánticas, el estado del sistema no cambia, lo que sí puede cambiar es la paridad de la función de estado que lo describe. De esta manera es natural pensar que la simetría viene determinada por las propiedades intrínsecas de las partículas elementales que constituyen el sistema. Efectivamente, se pudo demostrar que las partículas que poseen momento angular de spin entero se describen por funciones simétricas, mientras que las de spin semi-entero lo son por funciones antisimétricas. Las primeras partículas se llaman *partículas de Bosé-Einstein* o “bosones”, las segundas, *partículas de Fermi-Dirac* o “fermiones”. A la categoría de los bosones pertenecen los cuantos de campos de fuerza como los fotones, gravitones, etc... y los piones entre otras partículas. Por otro lado, a la categoría de fermiones pertenecen los electrones, positrones, protones, el neutrino, los muones y otros más...

Una propiedad importante de los fermiones es la conocida como *principio de exclusión de Pauli*, que enuncia que en un sistema de partículas cuánticas idénticas de momento angular total de spin semientero, no pueden existir dos de ellas con todas sus magnitudes cuánticas en el mismo estado.

Para aclarar la cuestión relativa a las propiedades de simetría de un sistema formado por partículas compuestas idénticas, hay que determinar el spin total del sistema. Por ejemplo, en un átomo; para poder determinar las propiedades de simetría es necesario calcular su spin total como la suma del spin de todos los electrones, protones y neutrones que lo componen; y sólo entonces, a la luz del resultado, se lo podrá analizar bajo las propiedades de los bosones o los fermiones

## 2.3 La antimateria

El electrón (como la mayoría de las partículas subatómicas elementales) se mueve en el átomo a velocidades cercanas a la de la luz, en consecuencia, para abordar un correcto estudio de su dinámica, Dirac aplicó los principios de la teoría de la Relatividad a la Mecánica Cuántica para realizar un estudio con mayor precisión, por este camino encontró que la expresión de la energía del electrón libre está dada por<sup>1</sup>:

<sup>1</sup> Levich, B. G. *Física Teórica. Mecánica Cuántica*. Vol. III. Pag. 528.

$$E = \pm \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4}$$

Donde  $p$  es la cantidad de movimiento lineal del electrón y  $m$  su masa; según la Física Clásica, el signo negativo de una energía de una partícula libre no tiene ningún significado; pero desde el punto de vista de la Mecánica Cuántica la situación cambia, ya que ambas energías representan diferentes estados cuánticos de energía posibles separados por una barrera de energía que no es infranqueable, además los principios de la mecánica Cuántica establecen que no se deben excluir los estados de energía negativa, ya que son autoestados de la función de onda que deben estar representados por su conjunto completo. En síntesis, las energías negativas en la Mecánica Cuántica son tan posibles como los estados de energía positiva.

Para poder explicar todas las posibilidades que implica la existencia de energía negativa en partículas libres que sean consistentes con la Física, Dirac postuló la siguiente hipótesis:

*El concepto de vacío es el estado del espacio en que todos los estados con energías negativas son ocupados por electrones, mientras que todos los estados con energía positivas están libres. En cada estado de energía negativa, según el principio de Pauli; se encuentra un electrón.*

Si por acción de alguna influencia exterior se pudiera quitar un electrón de un estado de energía negativa, quedaría libre el estado de energía negativa y aparecería “algo” con energía positiva, ya que se necesitaría para aniquilar dicho estado (ocuparlo nuevamente) un electrón de energía negativa. Así, un estado de energía negativa no ocupado debe interpretarse como una partícula cuántica de energía positiva. Inicialmente Dirac asoció erróneamente esta partícula al protón, pero trabajos posteriores establecieron que la partícula en cuestión debía tener la misma masa del electrón. Posteriormente a esta partícula, semejante al electrón pero de carga positiva la llamó *positrón*, que es la antipartícula de antimateria del electrón.

Los resultados basados en las ideas de Dirac pudieron dar cuenta de toda una serie de hechos físicos que hoy se dan por validados con el rigor científico correspondiente. Por ejemplo: en la actualidad es evidente que el campo electromagnético puede formar un par electrón-positrón si la energía de su fotón  $h\nu$  es mayor a  $2mc^2$  (siendo  $m$  la masa del electrón y  $c$  la velocidad de la luz). Esta última energía es la necesaria para llevar al electrón de un estado de energía negativa a otro de energía positiva. Las leyes de la conservación de la energía y la cantidad de movimiento lineal  $p$ , limitan las posibilidades de la reacción descrita de la formación de un par electrón-positrón a partir de un fotón, porque sólo puede producirse cerca de un tercer cuerpo relativamente pesado que absorba parte de la cantidad de movimiento. También es posible la reacción inversa, la aniquilación entre electrón-positrón (en realidad es el pasaje de un electrón de un estado de energía positiva a uno de energía negativa) generando un fotón de energía  $h\nu$  (generalmente en la frecuencia de los rayos gama).

La teoría de Dirac no sólo ha podido predecir estos fenómenos, sino también poderlos calcular con total exactitud. La excelente concordancia de los resultados de los cálculos con los datos experimentales fue una de las confirmaciones de que la teoría de Dirac era correcta. Estos éxitos junto a

otros, han permitido poner de manifiesto el carácter real de la existencia del vacío de antimateria; y por otro lado expandir el área de aplicación de la Mecánica Cuántica Relativista.

## 2.4 Partículas elementales subatómicas

Según el conocimiento de la Física actual, el concepto etimológico de la palabra *átomo* (indivisible) ha perdido total vigencia, porque no sólo el átomo es divisible en partículas subatómicas como el electrón, el protón y el neutrón; sino que a su vez, también estas partículas subatómicas están compuestas por partículas subatómicas elementales más pequeñas. El avance de la Física Cuántica ha descubierto más de 200 partículas elementales susceptibles de transformarse unas en otras, que no están compuestas de otras más pequeñas, y que a su vez son las responsables de conformar toda la materia existente en el universo.

A ellas se las clasifica en dos tipos: las *de vida corta o resonancia*, cuya vida media está caracterizada por el valor máximo del *tiempo característico* de  $10^{-23}$  segundos y las *estables* cuya vida promedio es muy grande comparada con la vida de las partículas de vida corta.

Las partículas estables están caracterizadas en cuatro tipos:

1. *Fotones*: Son los cuantos de los campos clásicos que no poseen masa en reposo, como el fónon de los campos electromagnéticos, el gravitón de los campo de gravitación, etc.
2. *Leptones*: Así se denomina a las partículas ligeras como lo son el electrón, el muón (mesón  $\mu$ ), los neutrinos muónicos y electrónicos; como así también a sus antipartículas de antimateria.
3. *Mesones*: Son las partículas subatómicas que tienen masa media como los mesones  $\mu$ , los mesones K y los mesones  $\pi$  tanto de partículas materiales como de sus correspondientes antipartículas de antimateria.
4. *Bariones*: Así se denominan las partículas y antipartículas pesadas como los neutrones, protones, hiperones, etc.

Las partícula de vida corta o resonancia se descubrieron a partir de la relación de interacción entre partículas en los experimentos de dispersión en aceleradores. Estos se dan únicamente entre mesones y bariones. Un caso interesante y que se intenta imitar con el LHC, fue el descubrimiento por este método del mesón f, el cual fue hallado después que se predijo teóricamente por los trabajos de Pomeranchuk.

El conjunto de todos los mesones y bariones y sus resonancias forman un gran grupo de partículas que hoy llaman *hadrones*. En la literatura moderna, también puede encontrarse el neologismo *hadenones* para el grupo de fotones, leptones y sus resonancias.

## 2.5 Tipo de Interacciones de las partículas elementales

Las partículas elementales pueden participar en las más diversas interacciones; por ejemplo: una partícula se aniquila cuando interacciona con

su antipartícula y genera alta energía, o en el choque de partículas rápidas se crean nuevas y diferentes partículas, de las cuales muchas son inestables y se desintegran. Todas las interacciones se caracterizan por las constantes de acoplamiento  $g$ . Actualmente se conocen cuatro tipos de interacciones entre partículas elementales:

1. *Interacción electromagnética*: En este tipo de interacción intervienen partículas cargadas con fotones o algunas de estas partículas entre sí. El efecto Compton es un ejemplo de este tipo de interacción. Tiene un radio de acción infinito, pero la intensidad de la interacción está relacionada con la carga de las partículas intervinientes. Generalmente su intensidad es tan baja que se las considera una simple perturbación dentro de la problemática de reacciones atómicas o nucleares.
2. *Interacción fuerte*: Es la interacción que se produce entre hadrones, que da como resultado formación y desintegración de partículas resonantes. Es de corto alcance, su radio de acción es de  $10^{-13}$  cm, y tienen un tiempo característico de  $10^{-23}$  segundos. La intensidad de la interacción es de tres órdenes de magnitud superior a la interacción electromagnética, por esta razón no se puede utilizar la teoría de perturbaciones para estudiarlas, en realidad actualmente no existe una teoría acabada para abordarla.
3. *Interacción débil*: Es la responsable de las desintegraciones lentas de partículas elementales, tiene alcance más corto que las interacciones fuertes (radio de acción menores a  $10^{-17}$  cm.), mientras que sus tiempos característicos son mucho mayores, encontrándose en el orden de los  $10^{-9}$  segundos. Las intensidades de esta interacción son de un orden de  $10^{11}$  veces menos que la interacción electromagnética, y requieren que las partículas tengan masa para interactuar.
4. *Interacción gravitatoria*: Esta interacción es despreciable cuando se trata del estudio de partículas elementales.

## 2.6 El bosón de Higgs

Desde hace tiempo es una de las partículas más buscadas en el campo de la física cuántica y de altas energías. Esta partícula es propuesta como uno de los componentes del campo de Higgs, y resulta fundamental para dar consistencia a su *modelo estándar*. Sin él, el modelo es consistente sólo si todas las partículas se mueven a la velocidad de la luz (es decir, no tienen masa). Dado que la experiencia muestra fehacientemente que no es esto lo que ocurre en la realidad, es necesario postular el campo de Higgs para poder deshacer este entuerto. En cierto sentido se puede imaginar que este campo es un fluido que permeabiliza todo el Universo, y que ofrece una resistencia a las partículas que se mueven en él. Esta resistencia no sería la habitual fricción que hace que un cuerpo en movimiento se detenga eventualmente, sino que constituiría en realidad una amortiguación, esto es, una resistencia a los cambios de velocidad. En resumidas cuentas, proporcionaría inercia (masa) a las partículas que interaccionaran con él.

Dado que el modelo estándar se derrumbaría como un castillo de naipes si no se detecta el bosón de Higgs, puede entenderse el anhelo de los físicos por verificar experimentalmente su existencia. El límite inferior experimental a su masa es de 114.4 GeV, y con un nivel de confianza del 95%, su masa no es superior a 144 GeV. Estos valores están dentro de lo que se podrá explorar con ayuda del LCH, por lo que pronto se podrá comprobar si la teoría se reafirma, o entra en serios problemas.

Como es habitual en la búsqueda de este tipo de partículas, la detección del bosón de Higgs se realizará a través del estudio de los residuos de su desintegración. Dado que se producirán cientos de millones de colisiones por segundo, es preciso que se filtren de manera automática los eventos potencialmente interesantes para su posterior estudio detallado.

El campo de Higgs no se teorizó inicialmente para explicar el Big Bang. La fortaleza de su postulación es su posterior utilización teórica para validar ciertos procesos del Big Bang que hasta ese momento no podían ser explicados.

La verdadera finalidad por la que los teóricos especulan con los bosones del campo de Higgs es que explicarían por qué ahora existen cuatro fuerzas de interacción en la naturaleza en lugar de una sola. Los bosones habrían interferido enormemente con esa fuerza de interacción única que existía inicialmente. Cuando la simetría del campo de Higgs se rompió, el Universo, se habría llenado de bosones de Higgs. La presencia de esos bosones interfirió con esa fuerza única y la descompuso en cuatro distintas, destruyendo la gran simetría original que existía.

La mayor prueba a favor de que realmente existe una unidad esencial en las cuatro fuerzas, la proporcionan los aceleradores de partículas. Se sabe experimentalmente que la intensidad con la que actúan las diferentes interacciones es muy distinta entre ellas. La interacción fuerte es la más intensa de todas. Le siguen la interacción débil y luego la electromagnética. Por último, la gravedad es la más débil de todas. La intensidad de las fuerzas se suele medir mediante la constante de acoplamiento,  $g$ . Sin embargo, los

experimentos en aceleradores de partículas muestran que las “constantes” de acoplamiento no son constantes, sino que su valor cambia en función de la energía con que se trabaja.

Lo más sorprendente no es el hecho de que la intensidad de las distintas fuerzas varíe, sino el cómo varían. La gráfica muestra el valor de la constante de acoplamiento para las distintas fuerzas de interacción, salvo la gravedad, en función de la energía. Como se ve, el valor de las constantes de acoplamiento tiende a acercarse a un mismo valor conforme la energía del sistema aumenta. Más allá de cierto punto no se dispone aún de datos. Los actuales aceleradores no funcionan por encima de las energías necesarias para poder hacerlo. Extrapolando, las tres interacciones se encuentran a una energía de  $10^{15}$  GeV. Esto sustenta la validez de la hipótesis de la unificación de las fuerzas en el origen del Universo, cuando la energía involucrada era increíblemente alta.

La rotura de la fuerza de interacción única en cuatro no se hizo de una sola vez. Primero se separó la gravitación, luego la interacción fuerte y posteriormente la interacción débil y la electromagnética. Hoy día los detalles de cómo estas dos últimas fuerzas se separaron son bien conocidos en Teoría Cuántica de Campos. Como demostraron en 1968 de forma independiente el físico paquistaní Abdus Salam y el físico estadounidense Steven Weinberg, la interacción electromagnética (que está mediada por un bosón sin masa, el fotón), y la interacción débil (mediada por tres bosones con masa, el  $W^+$ ,  $W^-$  y el  $Z^0$ ), son en realidad una misma interacción, llamada electrodébil. La nueva fuerza unificada matemáticamente está mediada por cuatro bosones sin masa. Y efectivamente se descompone en las dos fuerzas constituyentes en presencia de bosones de Higgs. Al menos teóricamente.

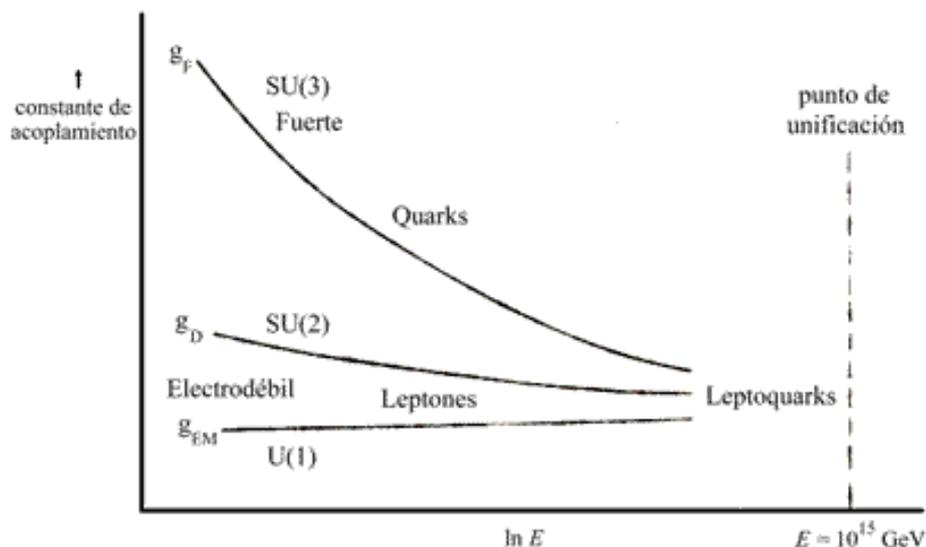


Figura 2: Curva de la constante de acoplamiento vs el logaritmo de la energía

La teoría postula entonces que el mecanismo de desacoplamiento de la

fuerza débil y electromagnética en las etapas tempranas del Universo ocurrió entonces de la siguiente manera: al disminuir la temperatura del Universo se fracturó la simetría del campo de Higgs y cayó en uno de sus mínimos. Surgieron así distintos tipos de bosones de Higgs. Cuatro tipos afectaron a la descomposición de la interacción electrodébil. Cuando estos cuatro tipos de bosones de Higgs diferentes interfirieron con el campo electrodébil, tres de ellos fueron absorbidos por tres de los cuatro bosones del campo electrodébil. De hecho, al ser absorbidos, se transformaron en bosones con masa, el  $W^+$ ,  $W^-$  y el  $Z^0$ , los responsables de la interacción débil. Por otra parte, restan un cuarto bosón de Higgs y bosón sin carga ni masa del campo electrodébil.

Como ya se dijo, si los bosones que median los campos de fuerzas no tienen masa, el alcance de la fuerza sería infinito. Pero si las partículas mediadoras tienen masa, la fuerza es de corto alcance. El hecho de que la simetría inicial se rompa dando tres bosones con masa por un lado y uno sin masa por otro, es lo que hace que la interacción electrodébil se descomponga en dos fuerzas distintas. Debido a que tres bosones habrían adquirido masa, su comportamiento fue muy diferente del que permanece sin masa. Éstos sólo pueden actuar ahora a muy cortas distancias, solamente podría haber ejercido acción de alcance infinito el cuarto. A efectos prácticos se puede decir que sólo quedan dos campos de fuerza distintos.

Uno de los éxitos del modelo de Weinberg y Salam de descomposición de simetría mediante el campo de Higgs fue la predicción del valor de la masa de los tres bosones ( $W^+$ ,  $W^-$  y  $Z^0$ ) encargados de transmitir la interacción débil ( $83 \pm 2.7$  GeV para los dos W y  $93.8 \pm 2.2$  GeV para el  $Z^0$ ). Cuando el modelo fue desarrollado teóricamente, aún no se había detectado ninguno de los tres bosones. El modelo no pasaba de ser un elegante ejercicio intelectual. Sin embargo, en 1983, un equipo internacional descubrió en el Centro Europeo de Investigación Nuclear (C.E.R.N.) los tres bosones ¡con las masas predichas! Concretamente, 81.1 GeV para los bosones W y 94.0 para el  $Z^0$ . Esto supuso el espaldarazo al modelo de unificación de la fuerza electromagnética y débil y a la existencia de los campos de Higgs. El modelo de Weinberg y Salam proporciona también una cota superior a la masa del bosón de Higgs que queda libre: ésta debe ser menor a  $1.2 \cdot 10^3$  GeV. No obstante, de momento, el modelo de los bosones de Higgs es solamente teórico, pero explica tan bien lo que observamos en la naturaleza que los físicos tienen la completa seguridad de que es cierto. Una de sus predicciones es la existencia de un bosón de Higgs libre, el cuarto bosón que no se combinaba con ninguna partícula de la interacción débil. La investigación en los aceleradores de partículas está centrada en su búsqueda y detección, para validar definitivamente una teoría que tiene todos los visos de ser correcta.

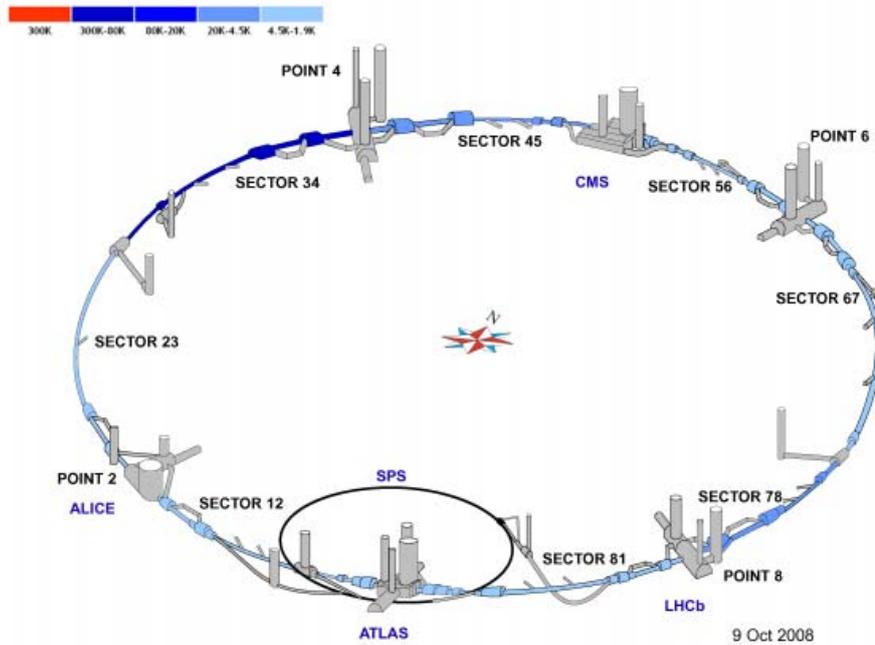


Figura3: Esquema del funcionamiento del equipamiento del LHC

### 3. Hipótesis y objetivos del proyecto

El experimento científico que se llevará adelante utilizando el LHC, se realizará bajo la aceptación de hipótesis no demostradas con el rigor científico necesario pero presenta una alta coherencia lógica:

1. Los científicos del proyecto LHC suponen que la teoría del Big Bang es correcta, hecho que no está totalmente demostrado en la actualidad, es sabido que si bien es la única teoría que explica ciertos hechos y procesos del universo que ninguna otra teoría ha podido, no es menos cierto que todavía existen fenómenos del universo que la mencionada teoría no puede explicar, al punto tal que ponen en duda algunas de sus postulaciones.
2. También se ha adoptado como hipótesis que el inicio del universo tuvo una esencia y un desarrollo tal como lo plantea la teoría del Big Bang, hecho todavía no comprobado con el rigor científico necesario como para ser aceptado como verdad científica irrefutable.
3. Es aceptada la hipótesis de la existencia del bosón de Higgs, la cual todavía no ha podido ser comprobada, como se detalló, esta afirmación surge como elemento necesario para poder fundamentar la teoría de campos de Higgs.
4. La aceptación de la existencia de la partícula de Higgs, tiene como consecuencia el apego de la teoría que plantea que esta partícula sería la responsable de la transformación de la energía en la masa que actualmente posee el universo, positiva o negativa (antimateria); pero este hecho tampoco ha sido validado con el rigor científico que toda teoría debe tener.

Dado que el LHC es el acelerador de partículas que produce interacciones entre partículas subatómicas a la mayor energía que haya logrado el hombre

jamás; siempre bajo las hipótesis de trabajo expuestas, se pone en marcha un trabajo experimental con los siguientes objetivos:

1. Comprobar la existencia del bosón de Higgs.
2. Responder preguntas tan fundamentales como: ¿cuál es el origen de la masa de las partículas?... ¿el Big Bang creó igual cantidad de materia y antimateria y sólo se observa materia en el Universo que nos rodea?.
3. Recrear las condiciones del Universo cuando tenía apenas una millonésima de millonésima de segundo.
4. Descubrir nuevas partículas subatómicas desconocidas hasta el momento.

#### 4. Equipamiento y metodología utilizados

Expertos del centro de investigación del CERN, ubicado en la frontera entre Suiza y Francia, planean hacer colisionar partículas para recrear, a pequeña escala, el evento que se dio posterior al instante del inicio al cosmos. Para ello, El LHC usará campos magnéticos intensísimos ubicados en cavernas para disparar haces de partículas de alta energía a lo largo de un túnel de 27 kilómetros, donde chocarán a niveles cercanos a la velocidad de la luz. Posteriormente, computadoras analizarán si suceden eventos semejantes a los ocurridos según se cree que sucedieron durante el comienzo del Big Bang. El vasto material recolectado será evaluado por 10.000 científicos de todo el mundo para encontrar pistas sobre ello.

Científicos del laboratorio CERN (el Consejo Europeo para la Investigación Nuclear) fundado hace 54 años y ubicado al pie de las montañas Jura, buscarán desenmarañar conceptos como "materia oscura", "energía oscura", dimensiones extra y, sobre todo, el "Bosón de Higgs," considerado el responsable de todo el proceso.

*"El LHC fue concebido para cambiar radicalmente nuestra visión sobre el universo",* dijo el director general del CERN, el francés Robert Aymar. *"Cualquiera sea el descubrimiento que permita el conocimiento humano acerca de los orígenes del mundo se verá muy enriquecido",* agregó.

Cosmólogos creen que el Big Bang ocurrió hace unos 15.000 millones de años cuando un objeto inimaginablemente denso y caliente del tamaño de una pequeña moneda explotó y se expandió rápidamente creando estrellas, planetas y eventualmente la vida en la Tierra.

Pero el experimento del CERN comienza con un procedimiento relativamente simple: emitir un haz de partículas a lo largo del túnel subterráneo. Los técnicos primero intentarán dirigir el haz en una dirección alrededor del colisionador hermético a unos 100 metros bajo la tierra. Una vez que hayan hecho eso *-y miembros del CERN dicen que no hay garantía de éxito inmediato ni durante los primeros días-* proyectarán otro haz, también levemente por debajo de la velocidad de la luz, en otra dirección.

Más tarde, quizás en las próximas semanas, emitirán haces en ambas direcciones y harán chocar las partículas, pero inicialmente a baja intensidad.

Luego, probablemente cerca de fin de año, pasarán a producir pequeñas colisiones que recrearán el calor y la energía del Big Bang, un concepto sobre el origen del universo ampliamente aceptado por los científicos.

Los detectores van a monitorear los miles de millones de partículas que emerjan de las colisiones, capturando en computadora la forma en que se juntan, se separan o simplemente se disuelven.

Es en estas condiciones que los científicos esperan encontrar bastante rápidamente el bosón de Higgs, denominado así por el científico escocés Peter Higgs que lo propuso por primera vez en 1964 como la respuesta al misterio de cómo la materia adquirió su masa.

El LHC es un anillo metálico de 27 kilómetros de circunferencia, ubicado a 100 metros de profundidad en la frontera franco-suiza. Con una temperatura interior de 271 grados bajo cero, buscará identificar certeramente elementos fundamentales con que se formaron las estrellas, los planetas y hasta los seres humanos.

Del trabajo, que demandó 12 años de estudios y una inversión de 4.000 millones de euros, participan 500 universidades del mundo y unos 6.000 físicos e ingenieros, entre ellos ocho argentinos.

#### *Detectores*

La sofisticada estructura, obra del Laboratorio para la Física de Partículas del Centro Europeo para la Investigación Nuclear, contará con cuatro detectores gigantescos: Atlas y CMS fueron diseñados para escrutar el bosón de Higgs o "partícula elemental de Dios", que sería la número 25 tras las 24 ya descubiertas y cuya misión consistiría en dotar de masa a otras partículas.

Por su parte, LHCb dilucidará qué aconteció con la antimateria al producirse el Big Bang, y Alice se focalizará en los choques de iones de plomo, a fin de "recrear la sopa" de quarks y gluones que formaban la materia en los primeros microsegundos del Universo, antes de la aparición de los protones.

En la principal fase del experimento, millones de protones recorrerán los 27 kilómetros del anillo en un solo sentido, pero no habrá impactos hasta pasados unos meses, cuando se haya verificado el buen funcionamiento del equipo "a máxima potencia". La idea es inyectar un primer haz, a modo de ensayo, para corroborar si atraviesa sin inconvenientes el anillo. Superado ese test, los protones serán acelerados hasta 5 billones de electronvoltios y luego se los hará colisionar para observar las nuevas partículas y fuerzas que generan.

"Irán a unos 299.000 kilómetros por segundo, casi la velocidad de la luz - explicó uno de los expertos-. Los 600 millones de choques por segundo originarán partículas, algunas nunca observadas, y los datos recogidos serán enviados a 500 instituciones académicas de los cinco continentes".

El plan de hacer colisionar partículas para después examinar los resultados no es novedoso: los primeros aceleradores comenzaron a fabricarse a mediados del siglo pasado. El más grande era hasta ahora el Fermilab, que funciona en Chicago con un rango de energía siete veces menor que el LHC.

## **5. Síntesis y conclusiones**

Como se puede observar de lo expuesto, el modelo de bosones de Higgs, si bien es consistente, no pasaba de ser un elegante ejercicio teórico intelectual.

Si se encuentra el bosón de Higgs, este sería un “resonante” de vida corta y no explicaría por qué la masa y la energía del universo se conservan a lo largo de toda su existencia, tal cual lo plantea y acepta la Física a través de toda su historia y sus principales científicos mediante el principio de la conservación de la masa y la energía.

Los resultados de las experiencias realizadas con el LHC, sean cuales sean; es decir, comprueben o no comprueben la existencia del bosón de Higgs, validen o descarten las hipótesis de trabajo; en ningún caso podrán establecer alguna relación con la existencia o no de DIOS, porque toda la experiencia está enfocada al instante posterior del origen del universo según la teoría del Big Bang; y no a su momento primordial, al instante anterior a aquel momento en que el tiempo mismo comenzó a existir; en definitiva a la causa del origen y esencia del universo...

Las experiencias con el LHC pueden llegar a explicar cómo fueron los procesos de la evolución en la formación del universo a partir de una millonésima de millonésima de segundo de su existencia en adelante, pero es incapaz de explicar qué ocurrió antes de ese instante, como tampoco lo hace la misma teoría del Big Bang.

Definitivamente, no existe en la experiencia que desarrollará el LHC relación alguna con la comprobación de la existencia o no de DIOS, como mucha gente erróneamente piensa a partir del desafortunado nombre “*Máquina de DIOS*” con que vaya a saber quién bautizó al equipamiento de la experiencia.

La gran duda que intranquiliza es la siguiente: ¿Qué ocurrirá, si las cosas no fueron en el Big Bang como los científicos postulan?... ¿Cuál será el resultado del experimento si al hacer colisionar una gran cantidad de partículas atómicas y subatómicas a energías jamás producidas y los procesos que se producen no son los imaginados?... ¿Podrán controlar los procesos que se produzcan y que no esperaban que se produjeran?... Es inquietante...

Lo cierto es que salvo el nombre mediático de “la máquina de Dios”, la experiencia no tiene nada que ver con Dios, es sólo otra magnífica obra del hombre cuyos posibles resultados todavía son inciertos.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Alonso Finn. *Fundamentos Cuánticos y Estadísticos*. Vol. III. Fondo Educativo Interamericano. 1984.
- Beiser, Arthur. *Conceptos de Física Moderna*. Mac Graw- Hill. 1988.
- Crawford Jr., Frank S. *Mecánica Cuántica. Berkeley: Curso de Física*. Vol. IV. Education Development Center Inc. 1972.
- Eisberg and Resnick. *Física Cuántica*. Compañía Editorial Continental. Méjico. 1980.
- Levich, B. G. *Física Teórica. Mecánica Cuántica*. Vol. III. Ed. Reverté. 1974.