

IV. CONFERENCIAS

EL NUEVO ACELERADOR LHC EN GINEBRA RECREAR EL BIG BANG, ¿PARA QUÉ?*

Dr. Mario A. J. MARISCOTTI

Datos profesionales de Mario A. J. Mariscotti

Licenciado en Física, UBA, 1962.

Doctor en Física, UBA, 1967.

Principales antecedentes laborales en Argentina

Profesor Titular de Física Nuclear, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, UBA, desde 1971; Director-fundador de Tomografía de Hormigón Armado S.A., 1992; Presidente de la Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales 1994-98, miembro desde 1986. Miembro del Directorio de la Comisión de Investigaciones Científicas, Provincia de Buenos Aires, 2000. Presidente de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica 1997-99. Director de Investigación y Desarrollo, 1984-88, Jefe del Departamento de Física 1975-82, Comisión Nacional de Energía Atómica

Antecedentes laborales en el extranjero

Investigador/profesor en: Institute Laue-Langevin, Francia, 1979 y 1981; Universidad de Sao Paulo, 1977, Universidad Federal de Río de Janeiro, 1978; Universidad de Manchester, Inglaterra, 1975; Institut für Kernphysik, Alemania, 1974-75. Brookhaven National Laboratory, N.Y., 1965-70; 1986-89. Chairman External Evaluation Team, International Center for Theoretical Physics en Trieste, 1999-2000. UNESCO. Miembro de la Third World Academy of Science, 2002

Otros antecedentes

70 publicaciones en revistas con referato internacional en Física Nuclear; 30 publicaciones en historia de la ciencia, política científica, artículos de divulgación científica, y física aplicada; 3 patentes en Argentina y 1 en EEUU; Mariscotti Peak Search, método de análisis de espectros gamma usado internacionalmente (Nucl. Instr. & Meth. 50 [1967] 189) *El secreto atómico de Huelmul* (Sudamericana/Planeta, 1ª edición 1985, 2da. edición 1987, 3ra. edición 1994). Premio Konex 1983 ("5 mejores figuras en Ciencia y Tecnología Nuclear"); Premio a la Gestión de la Innovación a Tomografía de Hormigón Armado. United Nations Industrial Development Organization UNIDO, 1995. Premio IPYME 1993 a la Innovación Tecnológica a Tomografía de Hormigón Armado. Premio Mercociudades (79 ciudades del Mercosur) a la innovación con impacto social y económico, 2002. Tech Museum Award Laureate, San José California. Premio Konex 2003 ("5 mejores figuras en Desarrollo Tecnológico").

* Conferencia pronunciada el 11 de noviembre de 2008.

Resumen

Esta presentación está ordenada en cuatro partes. En la primera, hablaremos de aceleradores, colisionadores y detectores, es decir, de las máquinas e instrumentos que permiten investigar los límites de la “intimidad” de la Naturaleza, con énfasis en el nuevo acelerador LHC en Ginebra. En segundo lugar, me referiré a la evolución de las principales ideas cosmológicas del siglo XX, pues en este tipo de investigaciones los fenómenos que se observan a escalas cósmicas están estrechamente relacionados con los fenómenos subatómicos. Estos últimos serán el objeto de la tercera parte, en donde mencionaremos algunos ejemplos notables del éxito de la Física de Partículas a lo largo del siglo XX y de cómo el espíritu humano, combinando intuición y apego a la estética de las simetrías, de la unicidad y del lenguaje matemático, ha podido llegar a realizar inesperados descubrimientos y excepcionales predicciones del mundo físico. Mediante estos ejemplos, espero poder transmitir algunos rasgos de la maravillosa “aventura de entender” (la Naturaleza), pues sólo así se puede llegar a comprender que se destinen enormes recursos y esfuerzos para construir una máquina como el LHC. Finalmente mencionaré las principales incógnitas que el proyecto LHC intentará resolver y que han dado el sustento para su financiación.

Agradezco a la Academia Nacional de Ingeniería la invitación a dar esta charla que me ha llevado a recordar el primer experimento que se llevó a cabo para recrear las condiciones iniciales del Universo en el Brookhaven National Laboratory, hacia fines de 1986, y del cual tuve el privilegio de participar.

Una aclaración previa para facilitar esta presentación. Tanto en el campo de la cosmología como en el de las partículas se encuentran valores de ciertas magnitudes físicas muy grandes o muy pequeñas, como los mostrados en la lámina 1.

Nota previa:	Uso de potencias de 10
Radio del núcleo atómico: 0.000000000001 cm	= 10^{-12} cm
Radio del Universo: 1.000.000.000.000.000.000.000.000.000 cm	= 10^{27} cm
Tiempos involucrados en las reacciones del LHC: 0.000000000000000000000001 seg	= 10^{-22} seg
Edad del Universo: 300.000.000.000.000.000 seg	= 10^{17} seg

Academia Nacional de Ingeniería 3

Lámina 1

Por ejemplo, el radio del núcleo atómico, expresado en centímetros, es un 1 con 12 ceros a su izquierda; un valor sin duda difícil de expresar en lenguaje convencional. Es más práctico usar “potencias de diez”, que permiten expresar este número como 10^{-12} cm. El radio del universo, en cm, es un 1 seguido de 27 ceros (aun expresados en km es un número muy grande, un 1 seguido de 22 ceros). Es más fácil decir que es 10^{27} cm. La lámina 1 muestra también un ejemplo de tiempo muy corto, el de una reacción nuclear típica en el LHC que es 10^{-22} seg, y de un tiempo muy largo como la edad del Universo, que es 10^{17} seg. Este sistema de notación facilita mucho el manejo de estas cifras como así también la operación de multiplicar dos de ellas pues sólo hace falta sumar los exponentes. En el transcurso de esta charla usaremos esta notación.

1. Aceleradores y colisionadores - LHC

Un acelerador de partículas es un instrumento que produce haces de partículas cargadas para hacerlas chocar contra un objeto blanco (átomos o núcleos). El resultado de estos choques son radiaciones o partículas que, cuando las medimos con detectores apropiados, nos brindan información sobre el objeto que ha sido bombardeado (parte superior de lámina 2). Existe cierta analogía con una linterna que ilumina objetos y nos permite verlos a través de la radiación reflejada, que detectamos con el ojo. Sin embargo, la luz visible no es apta para mostrarnos detalles de la materia de dimensiones mucho menores que su longitud de onda, que es 10^{-4} cm, o sea 10^8 veces mayor que el radio de un núcleo (ver lámina 1). Para “ver” detalles de objetos del tamaño de un núcleo atómico se necesitan proyectiles de tamaño similar, o sea, otros núcleos atómicos y éste es el propósito de los aceleradores de partículas.

Los aceleradores de partículas empezaron a existir a partir del año 1932. Los aceleradores se caracterizan por el tipo de partículas que aceleran y por la energía cinética que estas partículas adquieren. Es una ley de la Mecánica Cuántica que cuanto más energía tiene una partícula, su “longitud de onda asociada” es menor, de modo que cuanto mayor es la energía de un acelerador, detalles más finos de la estructura de la materia pueden ser investigados.

Un caso particular de acelerador es el llamado “colisionador”. En este caso (ver parte inferior de la lámina 2), la máquina acelera dos haces de partículas en trayectorias opuestas, los cuales se intersectan en ciertos puntos de la trayectoria. La ventaja de un colisionador es que toda (o casi toda) la energía adquirida por las partículas (que es energía cinética) se convierte en energía “útil” para la reacción nuclear; no hay “desperdicio” de energía, como en los aceleradores de

blanco fijo, en donde, como consecuencia de la conservación de la cantidad de movimiento, gran parte de la energía cinética incidente continúa como energía cinética del sistema producto de reacción.

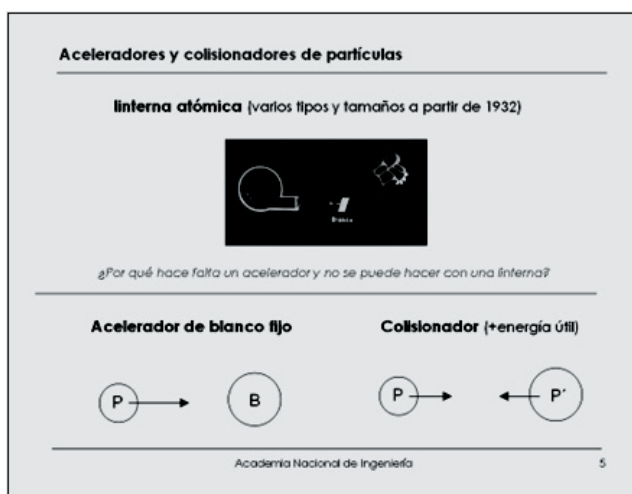


Lámina 2

La lámina 3 muestra el conjunto de aceleradores más importantes utilizados para lograr reacciones nucleares de altísima energía con el objeto de reproducir los primeros instantes de la vida del Universo, es decir, recrear las condiciones cercanas al Big Bang. El primer experimento de este tipo fue hecho, como ya lo dijimos, en el Brookhaven National Laboratory (BNL), con el acelerador AGS (Alternating Gradient Synchrotron), en 1986. Allí, por primera vez, se aceleró a energías relativistas un proyectil pesado, Oxígeno 16, en lugar de un protón, como era lo usual con este tipo de máquinas, y se usó un blanco pesado de oro (^{197}Au). Muy poco después, en el Centro de Investigaciones Nucleares Europeo, CERN, en Ginebra, se comenzaron a realizar experiencias similares con proyectiles de Au sobre blancos de Au. En el año 2000, en BNL se agregó otro acelerador, llamado RHIC (por Relativistic Heavy Ion Collider) y ahora se está poniendo en marcha el LHC (por Large Hadron Collider¹). La última columna

¹ La palabra “hadron” denota partículas sensibles a la “interacción fuerte”, que son todas las conocidas, con excepción del electrón, muon, tau, el fotón y los neutrinos.

de la tabla en la lámina 3 muestra las energías producidas por estas máquinas. Se puede ver la evolución hacia energías mayores y el salto significativo que implica el LHC.

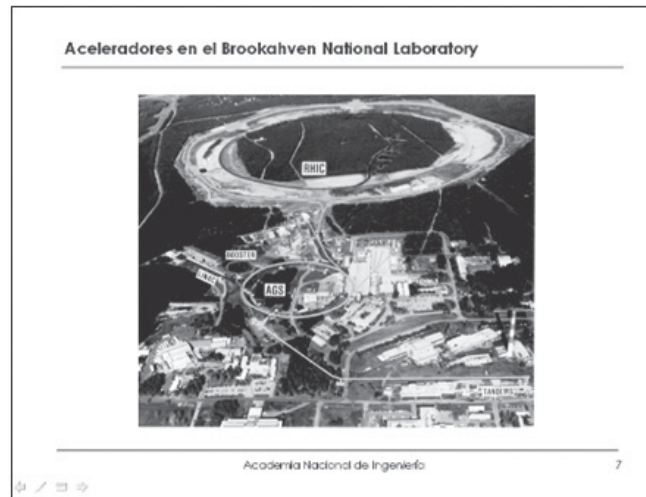
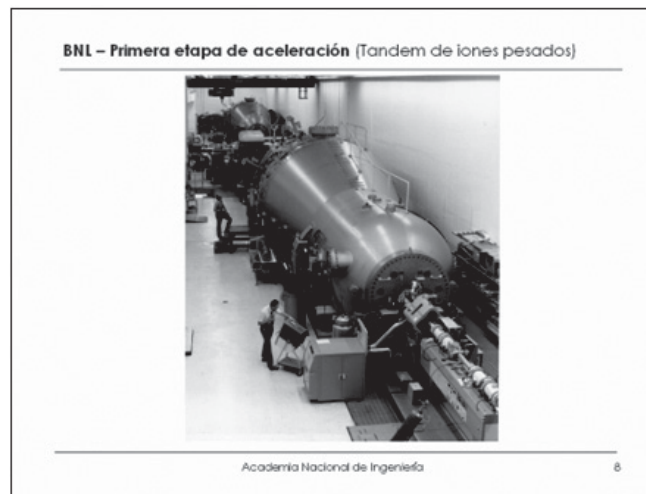
Experimentos para recrear el Big Bang (plasma de quarks)

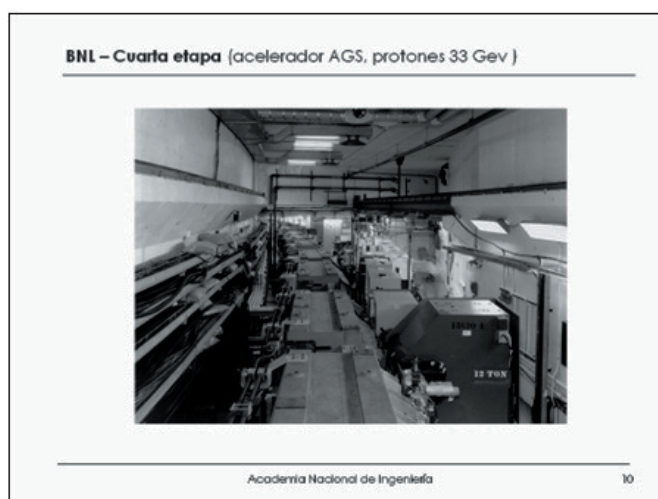
AÑO	LUGAR	PROYECTIL	BLANCO	ENERGIA (GeV/n)
1986	BROOKHAVEN (NY) AGS	^{16}O	^{197}Au FUO	14.5
1986	CERN SPS	^{197}Au	^{197}Au FUO	225
2000	BROOKHAVEN (NY) AGS + RHIC	^{197}Au	^{197}Au MOVIL	200
2008	CERN LHC	PROTON	PROTON FB MOVIL	7000

Academia Nacional de Ingeniería 6

Lámina 3

Las siguientes láminas muestran fotos de algunas de estas instalaciones y de su equipo asociado. La lámina 4 es una foto aérea de los aceleradores de BNL. Los iones se producen en una “fuente de iones” en la máquina TANDEM (construida a principios de los 1970), que se ve abajo a la derecha en la foto. Esta máquina es similar a nuestro acelerador TANDAR en el Centro Atómico Constituyentes. Los iones acelerados en el TANDEM se desplazan por la línea de transmisión (un tubo dentro del cual se ha hecho un alto grado de vacío, de casi 1 km de largo, rodeado de imanes que ayudan a mantener el haz enfocado). Estos iones son luego inyectados en el AGS (centro de la foto) y luego entran en el colisionador RHIC (parte superior de la foto). La lámina 5 es una foto del TANDEM y la lámina 6 es una foto del interior del AGS.

**Lámina 4****Lámina 5**

**Lámina 6**

La lámina 7 es una foto del conjunto de detectores que se utilizaron a la salida del AGS en los experimentos de 1986. Uno de estos sistemas detectores se muestra en la lámina 8 donde se puede ver la cantidad de cables utilizados para transmitir las señales de centenares de detectores individuales.

**Lámina 7**

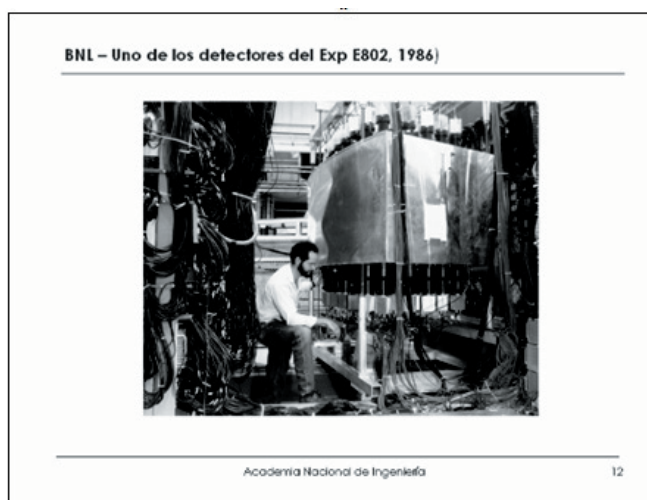


Lámina 8

Finalmente, en la lámina 9 se ve un esquema del LHC. El anillo de este acelerador está a 100 m de profundidad y pasa por debajo de la frontera suizo-francesa. En esta figura se pueden ver los puntos donde los haces opuestos intersectan y colisionan, alrededor de los cuales se encuentran los sistemas de detección. Éstos son realmente inmensos. Un ejemplo se puede ver en las láminas 10 y 11, que muestran el instrumento ATLAS, uno de los grandes sistemas de detección, en su estado de avance en octubre de 2004 y en marzo de 2008, respectivamente. La presencia de personas en ambas fotos permite hacerse una idea de las dimensiones de estos instrumentos. Varios argentinos² integran el grupo de trabajo del ATLAS. El LHC tiene 27 km de circunferencia, involucra 5.000 científicos de 35 países, costó 6.000 millones de dólares, cada protón da 11.000 vueltas por segundo y la longitud total de cables es igual a 7 veces la longitud del ecuador terrestre.

² Ricardo Piegai, María Teresa Dova, Alberto Gastón Romeo, Laura González Silva, Martín Tripiana, Valeria Pérez Reale, Xabier Anduaga, Fernando Monticelli.

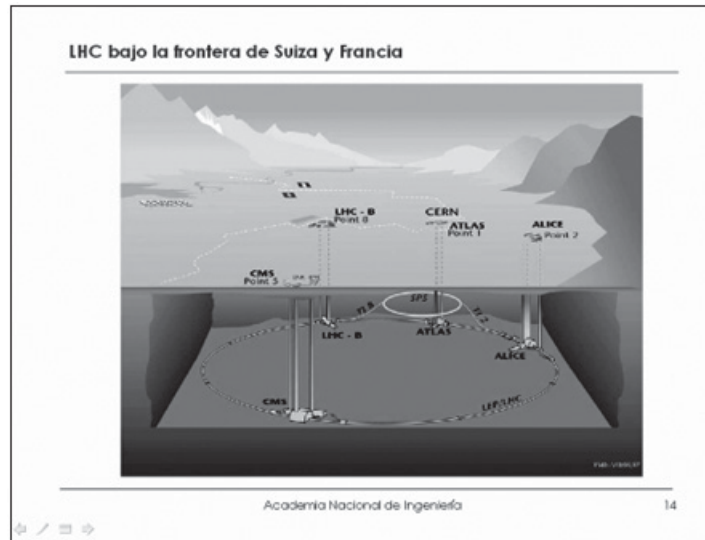


Lámina 9

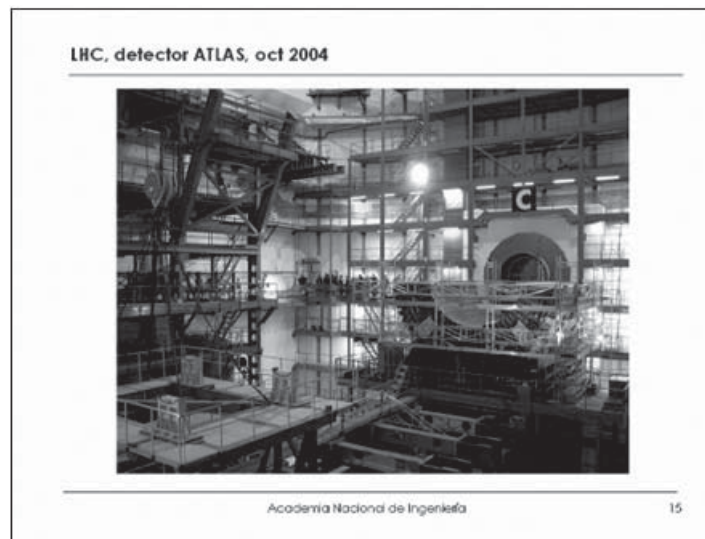


Lámina 10

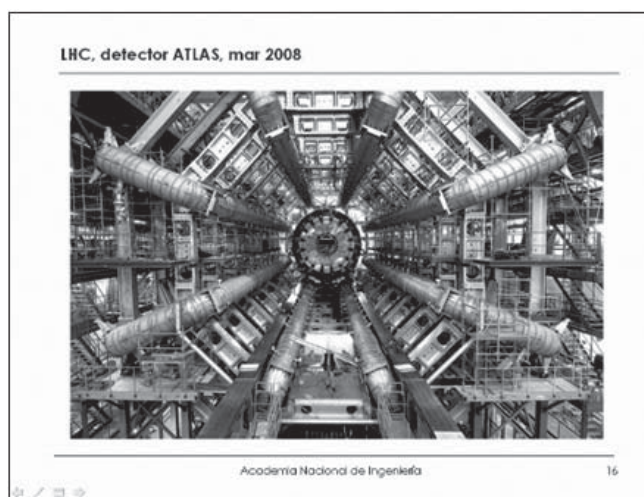


Lámina 11

{En este punto de la conferencia se mostró un video que simula una de las reacciones que tendrán lugar en el LHC. Se trata de dos núcleos de plomo, cada uno con 208 protones y neutrones, moviéndose a una velocidad cercana a la de la luz en dirección opuesta. Un reloj muestra la variación del tiempo durante la reacción. Al comenzar el video, los núcleos de plomo están separados 19×10^{-13} cm. La colisión produce centenares de partículas que se dispersan, entre las cuales hay quarks, los cuales, en el brevísimo tiempo de unos 10^{-22} seg, se recombinan para formar nuevos protones y neutrones}³.

2. Cosmología y física de lo pequeño

La lámina 12 resume algunos de los hitos más importantes en el desarrollo de las nuevas ideas sobre la evolución del Universo, que tuvieron lugar en el primer tercio del siglo XX. En 1915, Einstein publicó su Teoría General de la Relatividad, que generaliza la Teoría Especial de la Relatividad, de 1905, y es

³ Este video fue realizado por H. Weber del grupo UrQMD de Frankfurt y está disponible para quien lo requiera.

aplicable a sistemas acelerados. La Teoría General es una teoría de la gravitación a partir de la observación de que la fuerza que sufre un cuerpo en un sistema acelerado es la misma que sufre en un campo gravitatorio. En esta Teoría, la fuerza gravitatoria es una consecuencia de la curvatura del espacio producida por la masa de los cuerpos vecinos. En 1915 se pensaba que el Universo era estático, y Einstein agregó una constante a su ecuación, la constante cosmológica, para forzar la teoría a predecir un Universo estático.⁴

Evolución de las ideas cosmológicas

1915	Einstein (Alemania)	Teoría General de la Relatividad La constante cosmológica Λ ("el peor error de mi vida")
1922	Friedman (Rusia)	Estudió una de las soluciones de Einstein con $\Lambda = 0$. Expansión
1924	Friedman (Rusia)	Universos con distinto Ω
1927	Lemaître (Bélgica)	Sugiere universo en expansión
1929	Hubble (EEUU)	Corrimiento al rojo de las galaxias
1931	Lemaître (Bélgica)	Propone el Big Bang

Academia Nacional de Ingenieros 20

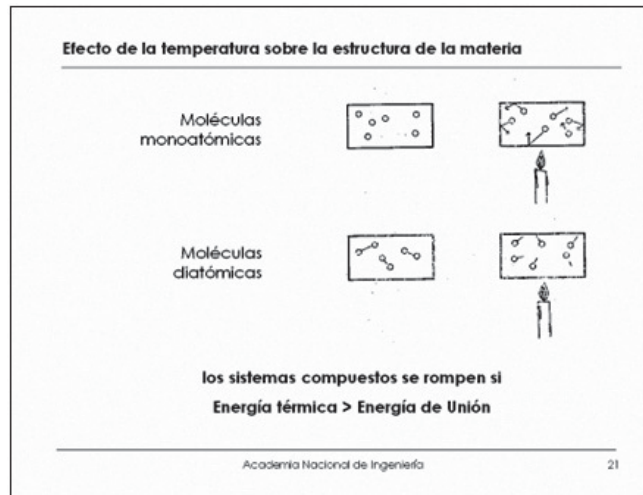
Lámina 12

Entre 1922 y 1924, el físico matemático ruso Friedman profundizó el análisis de la solución de Einstein con $\Lambda = 0$, mostrando que ésta conduce a un Universo en expansión y estudió las posibilidades de Universos en continua expansión y Universos en los cuales la expansión eventualmente se detiene y comienza una contracción. A estas ideas también contribuyó el sacerdote-físico belga Lemaitre. Poco después, Hubble produjo las primeras evidencias de que efectivamente el Universo se expande, al medir el corrimiento al rojo de la luz de las galaxias más lejanas. Este corrimiento no es más que el desplazamiento hacia valores

⁴ Como luego se vio que el Universo no es estático sino que se expande, Einstein consideró que el introducir esta constante ad hoc había sido el error más grande de su vida. Sin embargo, actualmente la constante cosmológica juega un papel importante en la concepción vigente.

mayores de la longitud de onda de las *líneas espectrales* de las radiaciones emitidas por estrellas que se alejan de nosotros, un fenómeno conocido como efecto Doppler (el significado de espectro es explicado más adelante). Basado en estas mediciones, Hubble concluyó que la única explicación consistente con los corrimientos hacia el rojo registrados era que todas las estrellas extragalácticas se estaban alejando y que, cuanto más lejos se encontraban, más rápidamente se alejaban. Un análisis relativamente sencillo de esta ley de Hubble conduce en forma natural a concluir que la expansión del Universo comenzó en un punto con una gran explosión, un “Big Bang”, un estado del mundo físico inicial con temperatura infinita y dimensión cero que a partir de ese instante inicial se expande y se enfría a la vez.

Veamos ahora cómo la combinación de la idea del Big Bang con los datos que aporta la física de lo “pequeño” (moléculas, átomos, núcleos y nucleones) permite trazar una historia del Universo. En la parte superior de la lámina 13 se muestra una caja con un gas de moléculas monoatómicas, es decir, que tienen un solo átomo. Si este gas es calentado, las moléculas del gas se agitan (la temperatura es una medida de la energía cinética de las moléculas), pero al menos dentro de cierto rango de temperatura, el gas mantiene su estado de gas monoatómico. Por otro lado, en la parte inferior de la lámina 13 se ve una caja con un gas de moléculas diatómicas. Si este gas se calienta, llegará un momento en que, por efecto de la agitación térmica, las moléculas se disocian. Esto ocurre cuando la energía térmica supera lo que llamamos la *energía de unión* de las moléculas diatómicas, equivalente al trabajo que hay que realizar para romper los pares de átomos. La física de lo pequeño nos provee la información sobre las energías de unión de las moléculas, de los átomos, etc., mientras que el modelo del Big Bang nos dice cómo ha variado la temperatura del Universo en función del tiempo.

**Lámina 13**

Energías de unión y temperatura del Universo en función del tiempo nos permiten conocer los distintos estados del Universo en distintos momentos de su evolución, como se muestra en el gráfico de la lámina 14. Este es un gráfico “log-log”, es decir, ambos ejes están en escala logarítmica y los valores en cada eje están expresados en potencias de 10. Se trata de un gráfico de la temperatura del Universo (eje vertical) en función del tiempo (eje horizontal). Por supuesto que en una escala logarítmica no se puede representar el tiempo cero, pues el logaritmo tiende a menos infinito cuando su argumento tiende a cero, de modo que este gráfico comienza, a la izquierda, con tiempos del orden de $t \sim 10^{-8}$ seg después del Big Bang, cuando la temperatura era de $T \sim 10^{18}$ grados Kelvin. Hacia la derecha en la escala de tiempos vemos una indicación de dónde estamos hoy (en $t \sim 10^{17}$ seg, que equivale a unos 15 mil millones de años) y la temperatura del Universo es de sólo 3 grados Kelvin (270 grados centígrados bajo cero). Recorriendo la escala de tiempos hacia atrás, vemos que recién cuando el Universo tenía 10^{14} seg (aproximadamente 10 millones de años) se formaron las primeras moléculas, pues antes de eso la temperatura era tal que la energía de agitación térmica superaba la energía de unión molecular y, por lo tanto, sólo había átomos. Éstos, a su vez, no pudieron existir antes de $t \sim 10^{12}$ seg (100 mil años), pues la energía de unión que mantiene los electrones ligados al núcleo atómico corresponde a temperaturas entre 10

mil y 100 mil grados. La era de los electrones y núcleos desvinculados entre sí comenzó aproximadamente a los 100 seg después del Big Bang. Antes de eso, la temperatura era suficientemente alta como para descomponer los núcleos atómicos en sus componentes, protones y neutrones. Pues bien, la idea de los experimentos de BNL y del CERN es explorar la región de temperaturas aún mayores a 10^{16} grados, donde se supone que la materia hadrónica sería una especie de “sopa” de quarks, los componentes de los protones y neutrones. Estas temperaturas, correspondientes a la condiciones del Universo cuando sólo habían transcurrido 10^{-5} seg desde el Big Bang, se pueden alcanzar en escala microscópica colisionando núcleos pesados a las energías de los grandes aceleradores RHIC de BNL y más aún ahora con el LHC.

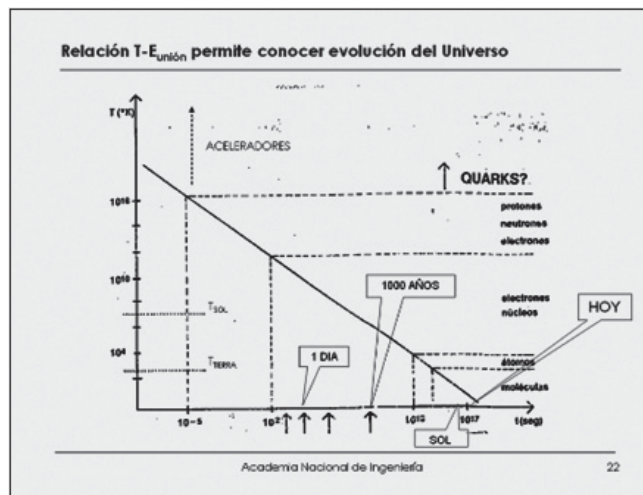


Lámina 14

3. La aventura de entender

Permítanme que haga ahora un repaso rápido, pero indispensable para el objeto de esta presentación, de los principales hitos en la evolución de las ideas sobre la estructura subatómica a partir de la primera manifestación observada del núcleo atómico (cuando aún no se sabía que los núcleos existían) que fue el descubrimiento de la radioactividad en 1896 por Becquerel, y hasta los años 1920 (lámina 15).

Evolución de ideas sobre la estructura subatómica (hasta 1930)		
1896	Radioactividad	Becquerel
1897	Electrón	Thomson
1900	Átomos emiten en forma cuantificada	Planck
1905	Fotones, relatividad, masa=energía	Einstein
1911	Núcleo atómico	Rutherford
1913	Espectros cuantificados	Bohr
1920's	Mecánica Cuántica - "ondículas"	Schrodinger et al

Academia Nacional de Ingeniería 24

Lámina 15

Es en cierto modo notable que el electrón, un componente fundamental de la materia, haya sido descubierto hace sólo un poco más de 100 años por Thomson (1897). En 1900 tiene su origen una de las grandes revoluciones científicas del siglo XX, cuando Planck muestra que los átomos emiten ondas electromagnéticas en forma "cuantificada". En 1905, Einstein publica dos trabajos fundamentales, uno es la Teoría de la Relatividad (la otra gran revolución científica del siglo XX, que modifica nuestra concepción del tiempo y establece una equivalencia entre masa y energía) y el otro explica el efecto fotoeléctrico, suponiendo que la luz misma está cuantificada en forma de partículas (fotones). Esta explicación del efecto fotoeléctrico, que hasta entonces había sido un misterio, fue un respaldo definitivo a la hipótesis de Planck y si bien Einstein posteriormente renegó de la Mecánica Cuántica, su trabajo sentó las bases de la misma. En 1911, Rutherford descubre el núcleo atómico y concluye que es 10 mil veces más pequeño que el radio de las órbitas electrónicas, o sea del tamaño del átomo, pero que concentra más del 99,9% de la masa de éste. Posteriormente, Bohr propone un modelo del átomo en el cual las órbitas de los electrones (y por lo tanto sus energías) están también cuantificadas, y que explica excepcionalmente bien los datos ya conocidos desde años antes del espectro del átomo de hidrógeno. Finalmente, en los años 20 se desarrolla la Teoría Cuántica en lenguaje matemático riguroso. Esta Teoría muestra que el mundo microscópico exhibe fenómenos, como la

dualidad onda-partícula o el principio de incerteza, que no tienen análogos con los fenómenos que ocurren en nuestro mundo (macroscópico) habitual.

A mi modo de ver, con la Teoría Cuántica las matemáticas pasan a jugar un rol primordial en la descripción del mundo físico; no podemos guiarnos más que por ecuaciones matemáticas y creer en ellas si éstas conducen a buen acuerdo con los datos experimentales. En este sentido, “entender” pasa a ser la capacidad de calcular cosas a partir de las ecuaciones de la teoría y obtener acuerdo con lo que es medido en el laboratorio, en lugar de “entender” en virtud de analogías con fenómenos que experimentamos en nuestra vida diaria. Antes decíamos “lo entiendo porque funciona como tal cosa”, siendo tal cosa un elemento de nuestra experiencia previa. A partir de la Mecánica Cuántica, entender significa disponer de una ecuación que funciona, o sea, con capacidad predictiva.

Para ilustrar la sorprendente capacidad del hombre —y de la herramienta matemática— de avanzar en el entendimiento del mundo físico, voy a utilizar un ejemplo. Más arriba mencionamos el éxito de Bohr en explicar el espectro entonces conocido (1913) del átomo de hidrógeno. Espectro es el conjunto de distintas frecuencias de las ondas electromagnéticas (o más apropiadamente, fotones) emitidas por un átomo. El espectro de un átomo es como una huella digital. Ningún átomo genera un espectro igual al de otro átomo. Las frecuencias que se observan en un espectro no son regulares, a veces una frecuencia está bien diferenciada de las otras, a veces hay dos frecuencias muy parecidas. Si el instrumento no tiene la resolución adecuada, dos frecuencias cercanas pueden verse como una sola. En los años 20, la resolución de los espectrógrafos había mejorado y se observó que algunas frecuencias en el espectro de hidrógeno (y luego de los otros elementos también) eran en realidad dos de valores muy parecidos y no una, como previamente se pensaba. Para entonces, no sólo el modelo de Bohr sino la Teoría Cuántica, sustentada en la matemática rigurosa de la ecuación de Schroedinger, explicaban el espectro de frecuencias del hidrógeno con mucha precisión... salvo por la presencia de estos “dobletes”. Esto representó una importante incógnita que ponía en duda la validez de la teoría. Dos físicos jóvenes, Goudsmit y Uhlenbeck, propusieron entonces una salida: los electrones tienen una propiedad, que llamaron “spin”, tal que daba origen a esos dobletes. No había ni explicación ni justificación para esta hipótesis ad hoc, salvo que permitía reproducir los datos experimentales. Era una hipótesis arriesgada, sin fundamento, y nada análogo a este spin del electrón se conocía, tanto que el profesor de estos dos físicos les dijo: “Uds. son jóvenes, publiquen, total si se equivocan no tienen aún prestigio que arriesgar”.

La ecuación de Schroedinger no incluía efectos relativistas y si bien estos efectos podían ser insignificantes, el no incluirlos significaba que la teoría

no era completa. En 1928, Dirac introdujo una modificación a la ecuación de Schroedinger con el objeto de salvar esta dificultad y otra modificación —arbitraria— para que la nueva ecuación fuera “lineal”, evitando cuadrados y raíces cuadradas. Esto lo hizo incorporando ciertos coeficientes. Resultó que esta ecuación no tenía solución, salvo que estos coeficientes fueran matrices en lugar de números. ¡Lo inesperado fue que estas matrices contenían implícitamente el spin del electrón! O sea que ahora el spin era una consecuencia rigurosa de la teoría y era esencialmente un resultado matemático (no buscado hasta donde yo sé) ajeno a cualquier hipótesis ad hoc.

Este resultado naturalmente dio mucho prestigio a Dirac, pero las novedades de su teoría no se agotaban con el spin del electrón. Otros dos hechos sorprendentes surgieron de la matemática de Dirac: por una lado, la predicción de un factor giromagnético $g = 2$ para el electrón que discutimos más abajo y, por otro lado, el hecho de que la ecuación de Dirac da lugar a dos soluciones para la energía de los electrones, una correspondiente a electrones con energía positiva (la solución esperada) y otra solución correspondiente a electrones con energías negativas, difícil de interpretar. Este último resultado podría haber echado por tierra la validez de la ecuación de Dirac. Sin embargo, éste introdujo la hipótesis de que un electrón (que tiene carga eléctrica negativa) con energía negativa era equivalente a un electrón con energía positiva y carga positiva. A este electrón con carga positiva se lo llamó “positrón”. Como en otros casos (Goudsmit y Uhlenbeck, la hipótesis de Pauli del neutrino, etc.), la conjetura de Dirac fue de alto riesgo, exhibiendo a la vez una fe total en la matemática y en su ecuación. Según esta teoría, un positrón y un electrón debían aniquilarse, desapareciendo la masa de ambos y generándose fotones de energía equivalente a la masa perdida (de acuerdo a la igualdad de Einstein), y viceversa, un fotón (que no tiene masa) de suficiente energía puede dar lugar a la creación de un par electrón-positrón. Éste fue el origen del concepto de materia-antimateria.

Uno de los episodios más extraordinarios de la física del siglo XX ha sido que muy poco después de estas asombrosas predicciones, Anderson descubrió el positrón y se confirmó el fenómeno de creación y aniquilación de pares electrón-positrón. En la parte superior de la lámina 16 se ve el resultado de Anderson. Se trata de la foto de la traza del primer positrón observado por el hombre, en una cámara de niebla con un campo magnético perpendicular responsable de la curvatura de la traza. La franja blanca horizontal es una plancha de plomo. Al atravesar el plomo, la partícula pierde parte de su energía y el radio de curvatura de la trayectoria es, en consecuencia, menor. El hecho de que el radio de curvatura de la traza es menor por encima de la plancha de plomo indica que la partícula ha entrado a la cámara por abajo. Dada la configuración del

campo magnético utilizado, la partícula tiene que tener carga positiva y su masa es igual a la masa del electrón. La foto de abajo a la derecha en esta lámina muestra tres trayectorias de pares electrón-positrón.

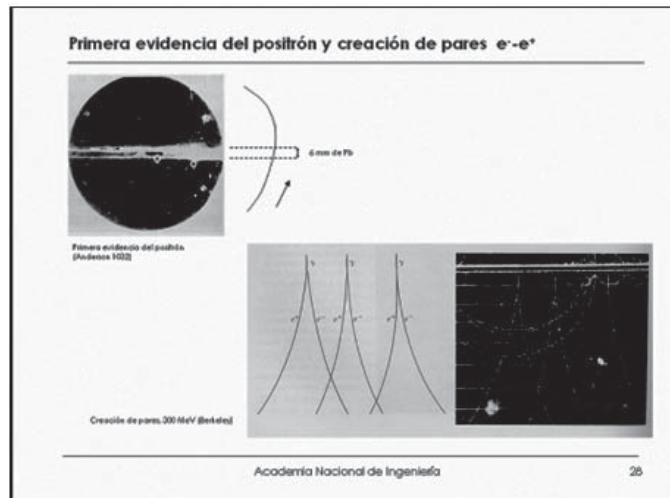


Lámina 16

La ecuación de Dirac ha sido fundamental para el desarrollo de las teorías actualmente vigentes como la Electrodinámica Cuántica (EDC), a cuyo desarrollo también contribuyó una osada idea de Yukawa de 1935. Para entonces se conocían 4 fuerzas o tipo de interacciones: la gravitatoria, la electromagnética, la fuerza fuerte (responsable de la energía de unión de los protones y neutrones en el núcleo) y la fuerza débil (responsable del fenómeno de la radioactividad “beta”). Este físico japonés postuló que la interacción entre partículas se debe al intercambio de “mediadores” entre ellas y que la interacción entre protones y neutrones se debía a la existencia de un mediador de determinada masa y carga, que predijo. Poco después, esta notable predicción pareció comprobarse cuando se descubrió una partícula que recibió el nombre de muón. Sin embargo, se vio que el muón sólo interactuaba con partículas sensibles a la fuerza débil y no a la fuerte, como es el caso entre protones y neutrones. La teoría de Yukawa pareció desmoronarse hasta que en 1947 se descubrió el verdadero mediador de la interacción fuerte, el pión.

Como dije, estos importantes avances en la investigación del mundo físico tuvieron mucha influencia en las teorías actuales. La interpretación actual

de cómo funcionan las interacciones entre partículas está representada en la lámina 17. A la izquierda, el esquema representa dos partículas que se mueven en el tiempo de abajo hacia arriba y que interactúan intercambiando un mediador (la línea vibratoria). A la derecha se ven otros casos de interacciones de orden superior (es decir, que involucran un número mayor de fotones), que, según la teoría, también hay que tener en cuenta. Se trata de efectos en donde fotones son emitidos y absorbidos por la misma partícula en una especie de auto-interacción. Los éxitos que se han obtenido con la EDC son notables. Voy a dar dos ejemplos.

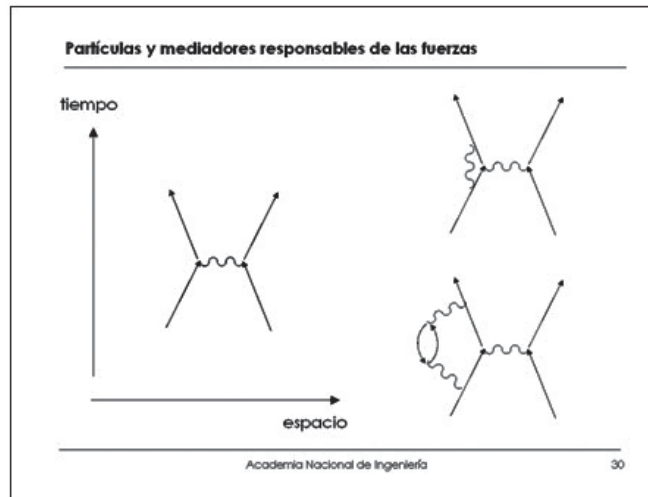


Lámina 17

Una partícula cargada eléctricamente moviéndose en un círculo genera un campo magnético que se denomina momento magnético, como se ilustra en la parte inferior de la lámina 18. En la física clásica, este momento magnético es proporcional al momento angular de la partícula, y se expresa en términos de cantidades cuyos valores son conocidos (la carga, la masa, el radio de la trayectoria circular y la velocidad de la partícula). Sin embargo, para el caso del electrón, las mediciones de su momento magnético diferían del valor clásico en un factor que se denominó “g” y que valía aproximadamente 2. Uno de los éxitos de la ecuación de Dirac, como lo hemos mencionado, fue que dicho valor 2 surgía naturalmente de la misma. Sin embargo, mediciones más precisas posteriores mostraron que el verdadero valor difiere de 2 en aproximadamente

0,1% (ver último renglón en la parte superior de la lámina 18). Esta medición es sorprendentemente precisa, ya que su error es $4 \times 10^{-11} \%$ (!) (el número entre paréntesis es el error de la última cifra). Pues bien, la inclusión de los términos de orden superior en la interacción entre electrones (diagramas a la derecha de la lámina 17) da lugar en la EDC a una corrección del valor $g = 2$ que conduce a un extraordinario acuerdo con el experimento (ver los dos últimos renglones en la parte superior de la lámina 18). Pocas teorías, si alguna, han alcanzado a producir este tipo de precisión en la descripción de un fenómeno físico.

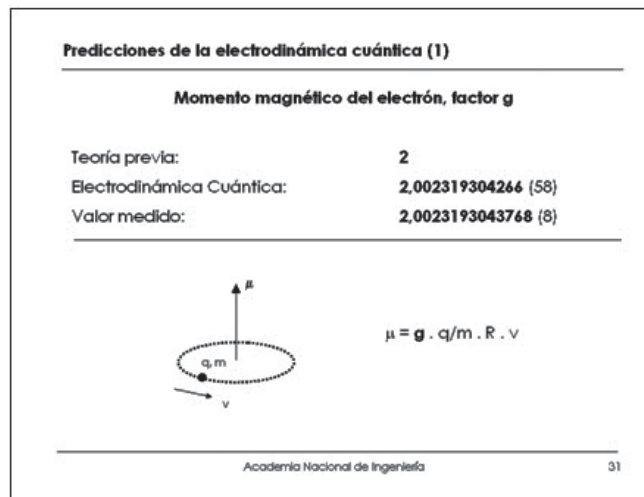
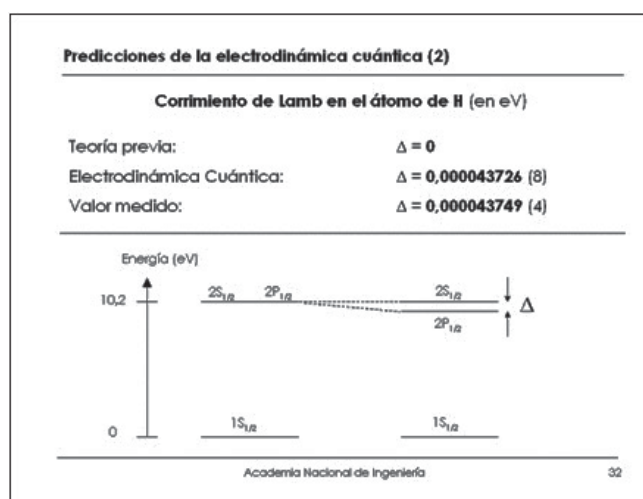


Lámina 18

Otro ejemplo parecido es el llamado “corrimiento de Lamb” que se ilustra en la lámina 19. Se trata de una muy pequeña diferencia que separa dos niveles de energía del hidrógeno que la teoría previa predecía coincidentes (esto es parecido al doblete debido al spin mencionado más arriba pero se trata de otro efecto debido a la auto-interacción del electrón en el átomo de hidrógeno como la mostrada arriba y a la derecha de la lámina 17). Como se puede ver en la parte superior de la lámina 19, nuevamente, la EDC conduce a un extraordinario acuerdo con el valor medido.

**Lámina 19**

Otros muy importantes avances tuvieron lugar en la década de 1960. Uno fue la hipótesis de los quarks como componentes de los protones y neutrones, propuesta por Gell Mann y Ne'eman, que permitió restituir la simplicidad de la descripción de la estructura de la materia que se había alcanzado en 1932 (entonces sólo 3 partículas, el electrón, el protón y el neutrón explicaban la estructura de todos los elementos conocidos) y que luego se había perdido con el descubrimiento de muchas nuevas partículas producidas con los nuevos aceleradores.

Otro importante avance fue el trabajo de Glashow, Weinberg y Salam (1967), que unificó las fuerzas débil y electromagnética, dando gran impulso a la idea de la Gran Unificación, es decir, alcanzar una teoría que describa todas las fuerzas, incluyendo la interacción fuerte y la gravitación, con un origen común. Unificar las fuerzas significa encontrar una teoría que, a muy altas temperaturas, como las que existen cerca del Big Bang (dentro de los primeros 10^{-12} seg), prediga que los mediadores de las distintas fuerzas son uno solo, el cual, en un proceso de "rompimiento de la simetría" a menores temperaturas (como cuando el agua se congela), se desdobra en diferentes componentes con las propiedades con que hoy los conocemos. El trabajo de Glasgow, Weinberg y Salam predijo las propiedades de los mediadores de la fuerza débil los que poco después fueron descubiertos en el CERN con propiedades en pleno acuerdo con la teoría.

4. Las dudas del presente, desafíos para el LHC

Los importantes resultados mencionados y unos cuantos otros han dado lugar a lo que se llama el Modelo Standard, que ha sido tan exitoso hasta el momento que ha merecido comentarios como el que sigue.

Cito a Peter Woit autor del libro *Not Even Wrong*:

“El Modelo Standard ha sido un éxito tan extraordinario que la física de partículas está ahora en la situación, históricamente sin paralelo, de que no exista ningún fenómeno experimental que esté en desacuerdo con el modelo.

“Cada uno de los experimentos de física de partículas, que se ha podido concebir y realizar, ha confirmado el modelo con un grado de precisión espectacular”.

Sin embargo, no todo está explicado aún. La teoría contiene 18 parámetros que no explica, entre otros —y principalmente—, las masas de las partículas elementales sobre las cuales el modelo se basa. La masa es una propiedad que no es como las otras que caracterizan a las partículas elementales, que, por ejemplo, en el caso de la carga eléctrica se obtienen multiplicando el valor absoluto de la carga del electrón por $-1/3$ o $2/3$ (en el caso de los quarks), por 0 o 1 (en el caso del neutrón y el protón) y por -1 , 0 o 1 (en el caso de los mesones pi). En este caso, la carga total antes y después de una reacción es siempre igual. Con la masa no ocurre lo mismo. La masa no se conserva, sino que lo que se conserva es la energía total, y las masas conocidas no son múltiplos de un único valor. El origen de la masa es una de las principales incógnitas que el proyecto LHC intenta responder.

La idea actual sobre la cuestión de la masa está ilustrada en la lámina 20. A la izquierda se representa el proceso de la interacción de un campo electromagnético (un fotón) con un electrón. Esta interacción no sólo modifica la trayectoria del electrón (como ocurre con dos bolitas que chocan), sino que la presencia de esta interacción y la de todos los órdenes superiores, como los ejemplificados en la lámina 17, hace que en esa teoría la masa efectiva del electrón (que es igual antes y después del choque) sea distinta de su masa “desnuda”, que es la que tendría en una teoría en que el electrón se desacoplara del campo electromagnético (es decir, en que se anulara su carga eléctrica). En el diagrama de la derecha de la lámina 20 está representado un proceso similar de interacción entre una partícula elemental y un nuevo campo, el campo de Higgs. La conjetura actual es que este campo de Higgs es responsable de las masas de las partículas elementales (no se trata de una pequeña modificación de la masa sino de dar origen a la misma). Como en el caso del campo electromagnético que se manifiesta a través de la “partícula” fotón, la existencia del campo de Higgs

debiera dar lugar a una “partícula” Higgs pasible de ser producida y observada en una reacción nuclear. Sin embargo, para crearla, la energía disponible debe ser al menos igual a la masa de la partícula multiplicada por la velocidad de la luz al cuadrado (según la relación de Einstein). Sólo la energía del LHC sería adecuada para esta finalidad (con tal de que la masa del Higgs no sea excesivamente alta) y efectivamente, como fue mencionado, es la producción (y observación) del Higgs la principal motivación del proyecto LHC.

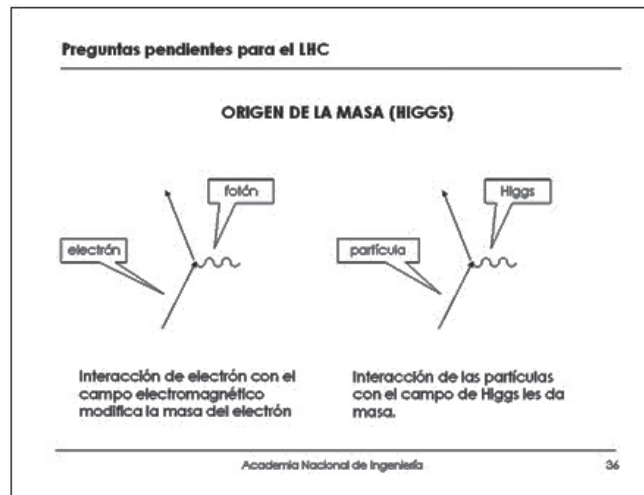


Lámina 20

Otras cuestiones que permanecen sin respuesta y, quizás los experimentos programados en el LHC pueden ayudar a elucidar, son: el problema de —o el anhelo de lograr— la Gran Unificación, quizás en el marco de la Teoría de Cuerdas (el argentino Juan Maldacena ha adquirido singular fama por una promisoriosa conjetura que expuso hace unos años en este tema); la naturaleza de la materia oscura (que explicaría la velocidad de expansión del Universo) y el carácter excepcional del Big Bang. En esto último no me puedo extender, pero mencionaré uno de los hechos que hacen a esta condición de excepcionalidad. En nuestra discusión previa de las teorías cosmológicas mencionamos que las ecuaciones de Einstein dan lugar a la posibilidad de un Universo en expansión permanente o de un Universo que, por el contrario, merced a la fuerza gravitatoria, se irá frenando en su expansión y eventualmente se contraerá nuevamente hasta alcanzar la condición original del Big Bang (llamado Big Crunch en este caso).

Existe, obviamente, un valor de equilibrio entre estas dos posibilidades que es la de un Universo cuya masa es justo la necesaria —y no más que ella— para que el Universo no se contraiga. Todos los datos disponibles en la actualidad apuntan a que el Universo corresponde justamente a esta condición singular, lo que constituye un hecho por el momento (hasta que no exista explicación de esta excepcionalidad) extraordinario.

Queda, finalmente, la cuestión de qué había antes del Big Bang. A esto se lo ha llamado la “era de San Agustín”, pues fue San Agustín quien dijo que antes de la creación de Universo no había ni siquiera tiempo y esta idea coincide con las teorías cosmológicas actuales, que sostienen que en el Big Bang no sólo se crea el Universo sino también el espacio y el tiempo.

El objeto de esta presentación ha sido explicar las motivaciones para construir el gran acelerador LHC, un proyecto que ha insumido ingentes cantidades de dinero y esfuerzos. Comenzamos describiendo los aspectos instrumentales del LHC y de otros aceleradores construidos con similar finalidad. Luego mencionamos la evolución de las ideas cosmológicas y su vinculación con la física de lo “pequeño”, pues los experimentos a llevarse a cabo en el LHC están íntimamente ligados a estas dos disciplinas del pensamiento tan opuestas en cuanto a las dimensiones de los fenómenos que tratan y, sin embargo, tan entrelazadas. En tercer lugar era necesario hacer un repaso de los avances en nuestro conocimiento de la estructura subatómica, que sorprendentemente han tenido lugar en el corto tiempo de poco más de un siglo. Obviamente, en una charla de 45 minutos no es posible entrar en detalles de esta fascinante historia, pero el problema de prescindir de los detalles es que entonces no se puede apreciar el valor singular de la aventura del entender de los cuales estos hechos son testimonios. Por esta razón hemos optado por dar, al menos, unos pocos ejemplos, como la ecuación de Dirac y su acertada predicción del spin y de la antimateria, la postulación del pión como mediador de la fuerza fuerte por parte de Yukawa y su sorprendente confirmación posterior, y algunas de los espectaculares éxitos de la teoría EDC. Estos grandes descubrimientos, junto con la hipótesis de los quarks, la unificación de las fuerzas electromagnética y débil y otras que no he mencionado, han conducido al Modelo Standard que hoy describe todos los fenómenos conocidos. Naturalmente, la parte final de esta charla ha estado dirigida a señalar las incógnitas que aún existen y el papel del LHC para ayudar a resolverlas.

Muchas gracias.

P.S. Agradezco las valiosas sugerencias de Daniel R. Bes, Héctor Vucetich y Alberto Pignotti, que han enriquecido esta presentación.