

Energía en el choque de partículas elementales

13.1. Laboratorios de choques de partículas de altas energías

13.1.1. ¿Dónde se encuentran partículas con altas energías?

Cuando se habla de partículas con altas energías, generalmente, se entiende que estamos hablando de partículas subatómicas, constituyentes de la materia. En las secciones subsiguientes haremos una breve reseña de lo que se entiende por el modelo estándar de la materia, donde nombraremos el conjunto de partículas elementales.

Curiosamente, el protón y el neutrón no son partículas elementales, pues se las entiende como compuestos por *quarks*; como veremos más adelante. Pero cuando hablamos de partículas con altas energías, incluimos todas las partículas subatómicas, incluso las compuestas que no son elementales.

Pero la pregunta natural que surge es:

¿dónde se encuentran partículas con altas energías?

Por un lado se observa que diversos sistemas astrofísicos pueden ser fuente de partículas con muy alta energía; cuya existencia se puede observar de forma indirecta, por sus efectos en las vecindades de la fuente, o en forma directa por detectores en observatorios astronómicos. Por otro lado están los grandes laboratorios aceleradores de partículas que se han usado a lo largo del tiempo. En la actualidad mencionaremos la existencia de dos grandes laboratorios donde se vienen realizando diversos experimentos, el CERN ubicado en Europa y el Fermilab, ubicado en Estados Unidos. Mencionaremos detalles básicos de ellos en las próximas subsecciones. De los observatorios astronómicos de partículas de altas energías mencionaremos el Observatorio Pierre Auger.

13.1.2. El CERN

CERN es una sigla usada para la Organización Europea para la Investigación Nuclear. En 1952 se funda un cuerpo provisorio denominado en francés: “Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire”, o su equivalente en inglés: “European Council for Nuclear Research”; con el mandato de establecer una organización europea para la investigación básica en física. En aquella época la investigación se concentraba en el interior del átomo, por lo que se usó el término ‘nuclear’.

Cuando en 1954 se dio origen oficialmente a la Organización, se retuvo la sigla CERN. Hoy en día se realizan experimentos con los que se estudia la materia a escalas más pequeñas que el núcleo atómico. Es por ello que al CERN también se lo conoce

como el “Laboratorio Europeo de Física de Partículas”.

Los instrumentos usados en el CERN son aceleradores de partículas y detectores. Los aceleradores de partículas producen haces de partículas de muy alta energía los cuales se arreglan para hacerlos colisionar con blancos apropiados. Con los detectores se observa lo que sucede en esas colisiones.

En 1976 entra en operaciones el “Super Proton Synchrotron”(SPS) que fue el primer gran acelerador, en forma de anillo, construido en un túnel, con una circunferencia de 7 km. La construcción cruza el borde entre Francia y Suiza. El SPS fue concebido como un acelerador de protones. En la actualidad el SPS opera a 450 GeV; o sea, esta es la energía a la que puede acelerar las partículas. En 1983 se observaron las partículas W y Z , predichas por el modelo estándar. En esa ocasión se usó el SPS para hacer chocar protones con *antiprotones*.

En 1989 el acelerador “Large Electron-Positron”(LEP) entró en operaciones. Es un acelerador de electrones y positrones en forma de anillo con una circunferencia de 27 km; cuya ubicación se indica en la figura 13.1. El LEP operó por siete años a una energía de 100 GeV(giga electrón-volt). Con este acelerador se ganó mucha información sobre el detalle de la física de partículas; en particular se estableció que hay solo tres generaciones de partículas (ver tablas en las secciones subsiguientes). El LEP fue cerrado en noviembre de 2000 para la construcción del LHC (ver próximo párrafo) en el mismo túnel.



Figura 13.1.
Fotografía aérea de la construcción del CERN, en las cercanías de la ciudad de Ginebra en el límite de Francia y Suiza.

El “Large Hadron Collider”(LHC) ha sido construido para responder a preguntas fundamentales de la física de partículas. En particular se espera que se pueda observar el llamado ‘bosón de Higgs’; que es una partícula predicha en el modelo estándar. El LHC acelera dos haces de protones en direcciones opuestas para que luego se los hagan chocar unos con otros.

En la figura 13.2 se observa el interior del túnel donde está construido el LHC. Se pueden acelerar protones a una energía de 7 TeV(tera electrón-volt); lo que corresponde a una velocidad de 99,99% la velocidad de la luz. El LHC fue inaugurado en octubre de 2008. En la actualidad es el acelerador más poderoso construido.

El LHC consta de varios detectores, en la figura 13.3 se ve una foto del detector ALICE. Sus dimensiones se pueden estimar observando el tamaño del operador que aparece en la fotografía.



Figura 13.2.
Fotografía del túnel por donde viajan las partículas que se hacen colisionar en el laboratorio del CERN.

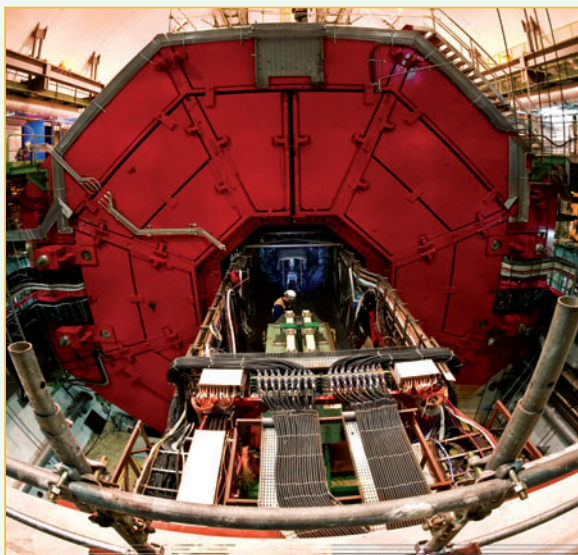


Figura 13.3.
Fotografía del detector ALICE, que está en un tramo del túnel del laboratorio del CERN.

13.1.3. El Fermilab

Se usa el término Fermilab para denotar al “Fermi National Accelerator Laboratory”; que se encuentra cerca de la ciudad de Chicago en Estados Unidos. En la figura 13.4 se presenta una fotografía aérea del laboratorio.



Figura 13.4. Fotografía aérea del Fermilab.

El Tevatron es un acelerador en forma de anillo, en el Fermilab, con una circunferencia de unos 6,28 km. En él se aceleran protones y antiprotones a una energía de 0,980 TeV; para arreglar choques de frente entre las partículas. En 1995 en este detector se observó el quark top. Se debe aclarar que a los quarks se los observa en forma indirecta ya que no se los puede encontrar en estados libres.

13.1.4. Observatorio Pierre Auger

Como mencionamos anteriormente se pueden generar partículas de altas energías en sistemas astrofísicos. Estas partículas viajan por el espacio y pueden impactar en la Tierra. Este fenómeno constituye los llamados *rayos cósmicos*. Los rayos cósmicos están constituidos, principalmente, por núcleos atómicos o electrones y bombardean la Tierra desde todas las direcciones. También se deben mencionar la incidencia sobre nuestro planeta de fotones muy energéticos, como los que aparecen en los llamados “gamma ray bursts”, lo que en castellano sería algo así como *estallido de rayos gama*; aunque su rango estudiado de energías $\approx 15\text{--}150$ keV (kilo electrón volt), corresponde a energías mucho menores que la que tienen los rayos cósmicos de partículas cargadas.

El estudio de los rayos cósmicos no ha sido fácil pues al ingresar en la atmósfera, normalmente interacciona con las partículas que hay en ella. Es así que, usualmente, a la superficie de la Tierra llegan los efectos secundarios de estas interacciones. Por este motivo muchos de los estudios de los rayos cósmicos se han venido realizando en satélites en órbita alrededor de la Tierra.

Otro aspecto de los rayos cósmicos a tener en cuenta, es que las partículas cargadas interaccionan con los campos magnéticos interestelares; los cuales afectan fuertemente la trayectoria de los rayos cósmicos. Por este motivo, debido a la existencia de campos magnéticos en nuestra galaxia y en las cercanías del Sol y la Tierra, es un poco complicado inferir el origen de una trayectoria, sólo del estudio de la incidencia de un rayo cósmico.

Históricamente los rayos cósmicos fueron la primer fuente de partículas energéticas

que tuvieron acceso los físicos, antes de que se construyesen los grandes aceleradores de partículas. Así es como la partícula llamada *muón* es descubierta en 1937 del estudio de los rayos cósmicos.

Debido a la existencia de la radiación cósmica de fondo, se calculó que los rayos cósmicos deberían interaccionar con la misma. Los cálculos indicaban que no se podría detectar partículas provenientes de distancias cosmológicas con energías mayores a 5×10^{19} eV.

El caso es que, en observaciones de rayos cósmicos, se han detectado rayos con energías superiores a 10^{20} eV. Esto, mínimamente, provoca el interrogante de cuál puede ser el origen de dichos rayos. Notar que si expresamos esta energía en tera electrón-volt se obtiene 10^{20} eV = 10^8 TeV; o sea que estas energías son alrededor de diez millones de veces mayores a las que se obtienen en los más grandes aceleradores de partículas construidos hasta ahora.

El flujo de partículas energéticas que impactan la superficie de la Tierra disminuye con la energía de las partículas. Para energías alrededor de $1 \text{ GeV} = 10^9$ eV llegan, aproximadamente, 10.000 partículas por metro cuadrado por segundo. Para energías alrededor de $1 \text{ TeV} = 10^{12}$ eV llega aproximadamente 1 partícula por metro cuadrado por segundo. Para energías alrededor de 10^{16} eV llegan pocas partículas por metro cuadrado por año. Para energías alrededor de 10^{19} eV llega aproximadamente 1 partícula por kilómetro cuadrado por año.

El Observatorio Pierre Auger consta de un gran conjunto de detectores esparcidos en grandes extensiones de la superficie terrestre. Al presente existe un observatorio en el hemisferio sur y un proyecto de construir otro en el hemisferio norte. El observatorio del hemisferio sur está ubicado en la provincia de Mendoza, cerca de Malargüe y cubre una superficie de unos 3.000 km^2 . El proyecto para el hemisferio norte está ubicado en el estado de Colorado en Estados Unidos.

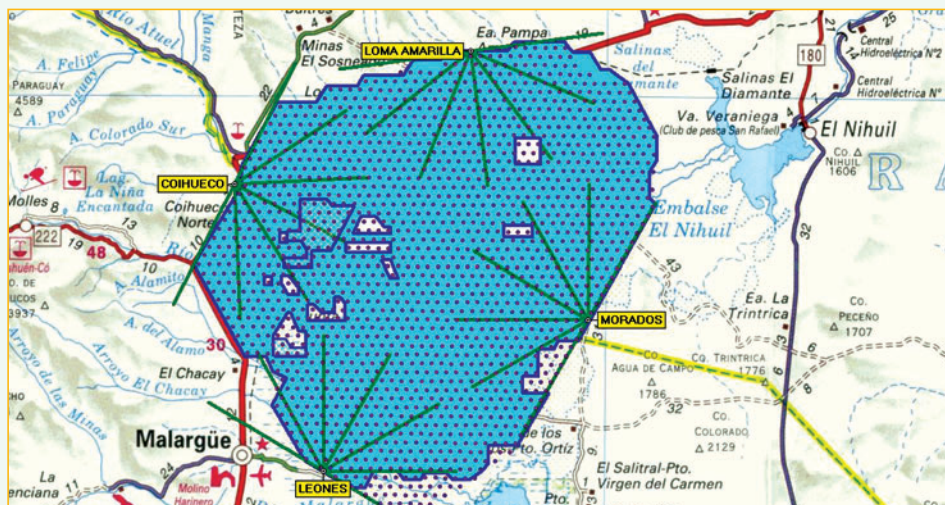


Figura 13.5.
Porción de mapa donde se muestra la ubicación del Observatorio Pierre Auger, cerca de Malargüe, Mendoza, Argentina.

El Observatorio Auger usa dos técnicas para detectar y estudiar rayos cósmicos muy energéticos. En una técnica se detecta la interacción de partículas energéticas con agua, ubicada en tanques sobre la superficie terrestre. La otra técnica estudia el fenómeno del desarrollo de cascada de partículas observando la luz ultravioleta emitida a grandes alturas en la atmósfera, cuando pasa un rayo cósmico muy energético.

En el primer método se usan 1.600 tanques de 12.000 litros, separados entre ellos por una distancia de 1,5 km. En el segundo método se detecta la fluorescencia del nitrógeno ubicado en la alta atmósfera.

En la figura 13.7 se muestra una fotografía de detectores de fluorescencia usado en el observatorio.

La figura 13.8 muestra una reconstrucción gráfica de un evento muy energético en que los cuatro telescopios pudieron detectar la entrada del rayo cósmico.

La figura 13.9 muestra la gráfica de la esfera celeste en coordenadas galácticas donde se muestran la dirección de procedencia de algunos de los eventos más energéticos.



Figura 13.6.
Esquema del diseño del Observatorio Pierre Auger.

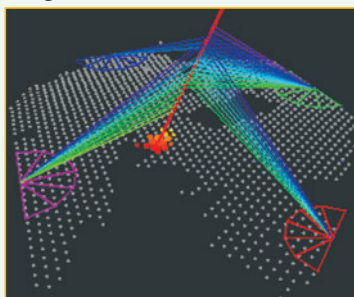


Figura 13.8.
Reconstrucción gráfica de un evento de muy alta energía que fue detectado por los cuatro telescopios ubicados en los costados del campo de observación.

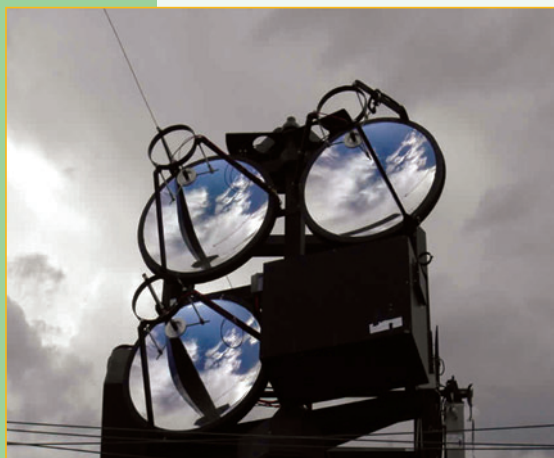


Figura 13.7.
Fotografía de detectores de fluorescencia del Observatorio Pierre Auger Sur.

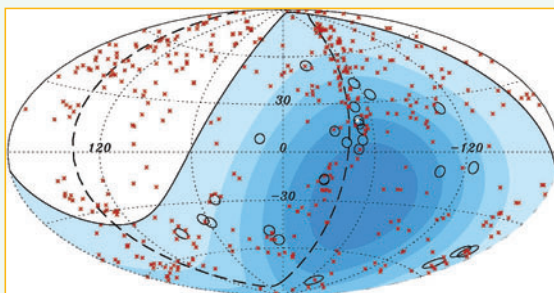


Figura 13.9.
Ubicación de los eventos más energéticos, marcados con círculos rojos, en la esfera celeste en coordenadas galácticas. Las marcas puntuales señalan la ubicación de conglomerados de galaxias.

13.2. La estructura de la materia

13.2.1. Algunas de las partículas observadas

La materia está compuesta por átomos que, a su vez, pueden formar moléculas. El átomo más pequeño es el átomo de hidrógeno; cuyas dimensiones son del orden de $5 \times 10^{-11}\text{m}$.

La distancia intermolecular en un sólido es del orden de 10^{-10}m ; por lo que es comparable a las dimensiones atómicas.

Toda la materia la podemos entender como compuesta por partículas elementales. Por ejemplo, los átomos se pueden entender como compuestos fundamentalmente por protones, electrones y neutrones.

Sin embargo existen otras partículas elementales.

Las distintas partículas se han venido descubriendo por medio de distintas técnicas a lo largo de los años. La tabla 13.1 muestra la secuencia de descubrimiento de algunas partículas.

electrón	protón	neutrón	positrón	muón	mesón pi	neutrino	quark encanto	tau	gluón	bosones W^+ , W^- y Z	quark top
1897	1919	1932	1932	1937	1947	1956	1974	1975	1979	1983	1995

Tabla 13.1. Tabla de descubrimientos a lo largo de los años

Una manera de organizar el estudio de partículas es considerar aquellas que son estables cuando están en estado libre. Ellas son enumeradas en la tabla 13.2.

Denotamos con e la carga eléctrica del electrón. El símbolo $[\hbar]$ se usa para el valor de la constante de Planck h dividida por 2π . La masa la hemos presentado en unidades de energía; luego de haberla multiplicado por la velocidad c al cuadrado. Un eV es la energía que adquiere una carga de un electrón cuando su potencial electrostático es incrementado en un Volt. Un MeV es un millón de veces un eV.

Tipo	Nombre	Símbolo	Antipartícula	Carga [e]	Espín [\hbar]	Masa c^2 [MeV]	Vida media [s]
bosones	fotón	γ	γ	0	1	0	∞
leptones	electrón	e^-	e^+	-1	1/2	0,511	∞
	neutrino del electrón	ν_e	$\bar{\nu}_e$	0	1/2	< 0,00002	∞
	neutrino del muón	ν_μ	$\bar{\nu}_\mu$	0	1/2	< 0,3	∞
	neutrino tau	ν_τ	$\bar{\nu}_\tau$	0	1/2	< 40	∞
bariones	protón	p	p^-	1	1/2	938	> 10^{40}

Tabla 13.2. Tabla de las partículas estables

Si bien no se ha visto decaer al protón, existe una teoría que da la posibilidad de que pueda decaer.
Se observa la ausencia de esta tabla del neutrón, dado que en estado libre tiene una vida media de aproximadamente 900 segundos. Si considerásemos como estables todas las partículas con tiempo de decaimiento mayor a 15 minutos, entonces la tabla tendría una sola entrada más y esta sería la del neutrón.

13.2.2. Partículas fundamentales del modelo estándar

Cuando se observó experimentalmente que los protones y neutrones se comportaban como si tuviesen estructura interna no trivial; se intentó dar una explicación de ellos en término de partículas fundamentales. Esto condujo a la postulación de la existencia de los quarks. Con posterioridad se construyó una teoría que hoy completa lo que se puede denominar el modelo estándar de la materia.
Los constituyentes del modelo estándar observados se muestran en las tablas [Gro08] 13.3 y 13.4.

Tipo	Cargas eléctricas [e]	Familias		
		I	II	III
quarks	2/3	<i>u</i> [0,003]	<i>c</i> [1,27]	<i>t</i> [171]
	-1/3	<i>d</i> [0,006]	<i>s</i> [0,1]	<i>b</i> [4,2]
leptones	0	ν_e [$<10^{-8}$]	ν_μ [$<0,0002$]	ν_τ [$<0,02$]
	-1	<i>e</i> [0,000511]	μ [0,106]	τ [1,777]

Tabla 13.3. Constituyentes del modelo estándar. Al lado de cada partícula, entre corchetes, se muestra la masa de cada partícula en unidades de energía giga electrón volt [GeV]; por lo que para obtener la masa en kg se debe primero expresar la cantidad en joule y luego dividir el valor obtenido por c^2 .

Notamos en la tabla 13.3 la aparición de seis quarks; todos ellos tienen espín $\frac{1}{2}$. Se denominan *up* (arriba), *down* (abajo), *charm* (encanto), *strange* (extraño), *top* (superior) y *bottom* (inferior); usándose la primera letra de estas palabras inglesas como símbolo de las partículas. También vemos los leptones que se encontraban en la tabla 13.2. Los leptones también tienen espín $\frac{1}{2}$.

Bosones de interacción	Interacción
<i>g</i> (<i>gluon</i>) [0]	<i>fuerte</i>
γ (<i>fotón</i>) [0]	<i>electromagnética</i>
<i>W</i> [80,4]	<i>débil</i>
<i>Z</i> [91,2]	<i>débil</i>

Tabla 13.4. Partículas encargadas de las interacciones. Como en el caso anterior, al lado de cada partícula, entre corchetes, se muestra la masa de cada partícula en unidades de energía giga electrón-volt [GeV]

En la tabla 13.4 se muestran los bosones detectados del modelo estándar. La interacción entre quarks está gobernada por los gluones; que en castellano se traduciría algo así como ‘pegatones’ (deformación de la palabra pegamento). La interacción entre partículas cargadas se realiza por medio de los fotones, que se denotan por γ . Las interacciones débiles se realizan por medio de los bosones W y Z . Todos estos bosones tienen espín 1.

13.2.3. Las interacciones

En la tabla 13.5 se muestra el conjunto de las interacciones que usamos para describir las propiedades de la materia, donde se indica el alcance y el tipo de descripción que se tiene para cada una de ellas.

<i>Interacción</i>	<i>Teoría</i>	<i>Alcance</i>	<i>Tipo de descripción</i>
<i>Gravitación</i>	<i>Relatividad General</i>	<i>Infinito</i>	<i>Clásica (al presente)</i>
<i>Electromagnética</i>	<i>Electrodinámica</i>	<i>Infinito</i>	<i>Clásica y cuántica</i>
<i>Débil</i>	<i>Modelo electrodébil</i>	<i>Corto</i>	<i>Cuántica</i>
<i>Fuerte</i>	<i>Cromodinámica</i>	<i>Corto</i>	<i>Cuántica</i>

Tabla 13.5. Interacciones

A principios del siglo 20 se notó que la materia obedece a leyes que se apartan de las predicciones de la física newtoniana, también llamada física clásica. Esto obligó al desarrollo de la llamada física cuántica. Uno de los aspectos característicos de la física cuántica es que no se puede medir la posición y momento de una partícula con infinita precisión; dado que existe el llamado principio de incertidumbre de Heisenberg.

13.2.4. Características de partículas atómicas y subatómicas

En la tabla 13.6 se muestran dimensiones características de algunas de las partículas atómicas y subatómicas.

<i>Sistema o partícula</i>	<i>Constituyentes</i>	<i>Dimensiones características</i>
<i>átomo</i>	<i>núcleo y nube electrónica</i>	10^{-10} m
<i>núcleo</i>	<i>protones y neutrones</i>	10^{-14} m
<i>protón</i>	<i>dos quarks u y un quark d</i>	10^{-15} m
<i>neutrón</i>	<i>dos quarks d y un quark u</i>	10^{-15} m
<i>quark</i>	<i>“elemental”</i>	$< 10^{-19} \text{ m}$
<i>electrón</i>	<i>“elemental”</i>	$< 10^{-18} \text{ m}$

Tabla 13.6. Dimensiones del mundo subatómico

En el caso del quark y del electrón sólo se ha puesto un límite superior a alguna noción de tamaño. Es probable que estas partículas no tengan estructura, con lo que se quiere decir que en la descripción de un espaciotiempo continuo serían puntua-

les. Pero por ejemplo, en el caso del quark es difícil asignarle propiedades de partículas a los mismos pues hasta ahora no se ha observado ningún quark libre. En realidad se entiende que los quarks deben estar siempre confinados, por lo que no se los observará en estado libre.

La tabla 13.7 muestra algunas características básicas de los protones y neutrones. Notar que la masa de los mismos es mucho mayor que la suma de las masas de los quarks correspondientes.

Nombre	Símbolo	Contenido de quarks	Carga eléctrica [<i>e</i>]	Masa [GeV]	Espín
protón	<i>p</i>	<i>uud</i>	1	0,938	1/2
neutrón	<i>n</i>	<i>udd</i>	0	0,940	1/2

Tabla 13.7. Características de protones y neutrones.

13.2.5. La necesidad de partículas con altas energías

La historia del conocimiento que tenemos de las partículas elementales [Gri87] tiene la constante que siempre se buscó experimentos que involucren cada vez mayor energía. Es así que a medida que pasó el tiempo se pudo detectar partículas con masas cada vez mayores.

Además del interés en descubrir partículas con mayores masas, existe otra razón para realizar experimentos con partículas de altas energías. Partículas con altas energías viajan con velocidades muy grandes, lo que implica que su momento *p* es también muy alto. La longitud de onda λ de ‘de Broglie’ para una partícula de momento *p* está dada por $\lambda = h/p$, donde *h* es la constante de Planck. Cuando uno hace chocar una partícula de momento *p*, a lo sumo puede resolver distancias del orden de λ ; por lo que para poder tener información de distancias muy pequeñas, se debe realizar choques de partículas con momentos muy grandes, y por ende de altas energías.

13.2.6. Leyes de conservación en choques de partículas de altas energías

En los procesos de choques de partículas de altas energías normalmente uno prepara un experimento u observación donde se distingue claramente un grupo de partículas que se envía a chocar (que denotaremos *en*) y otro grupo que sale del proceso de colisión (que denotaremos *sal*). Por leyes de conservación se entiende números característicos asignados al conjunto de partículas *en* que también se observan en las partículas *sal*. Por ejemplo, si en el conjunto de partículas *en* se observa que la carga eléctrica es $3e$, en el conjunto de partículas *sal* también se observa que la carga eléctrica es $3e$.

Seguidamente mencionamos algunos de los números característicos que se conservan [Gro08] en los choques de partículas de altas energías y a continuación explicaremos el significado de los números nuevos. Se conservan:

- la carga eléctrica;
- números leptónicos L_e , L_μ y L_τ . (Estos números se conservan excepto por los recientes efectos detectados de mezcla de neutrinos. Si los neutrinos tienen una

pequeña masa, entonces los números leptónicos no se conservarían por separado);

- sabor hadrónico: se conserva en interacciones fuertes y electromagnéticas. El cambio de sabor en procesos de interacción débil está determinado por la teoría;
- número bariónico.

Los leptones tienen número leptónico por familia; o sea, por ejemplo el electrón y el neutrino del electrón ν_e tienen número leptónico $L_e = 1$, $L_\mu = 0$ y $L_\tau = 0$. Similarmente para las otras partículas. Donde se debe recordar que las antipartículas tienen la misma masa pero sus “cargas” con signos opuestos. Un ejemplo de conservación del número leptónico lo da el decaimiento del neutrón:

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e; \quad (13.1)$$

dado que el electrón e^- tiene $L_e = 1$ y el antineutrino del electrón $\bar{\nu}_e$ tiene $L_e = -1$. Vemos entonces, que el decaimiento del neutrón en sólo un protón y un electrón, sin antineutrino, está prohibido por la ley de conservación del número leptónico.

Cada tipo de quark tiene un número característico llamado *sabor* o *sabor hadrónico*; por lo que hay 6 sabores.

Los quarks tienen número bariónico $1/3$. Por lo que los bariones, como el protón y el neutrón, tienen número bariónico 1. Los mesones tienen número bariónico cero, dado que los antiquarks tienen número bariónico $-1/3$. Desde el punto de vista teórico se especula con que el número bariónico no se conserve exactamente [RS96], pero no se encuentran evidencias observacionales para ello.

13.3. Notas históricas

Haremos aquí una muy breve reseña de algunos descubrimientos y avances en el conocimiento de la física de partículas elementales.

La primera observación de una partícula elemental se suele asociar a los experimentos de J. J. Thomson en 1897 que resultaron en el descubrimiento del electrón.

Posteriormente experimentos de Rutherford aclararon que la estructura del átomo consistía en un núcleo masivo con cargas positivas rodeado de la nube de electrones. Un tiempo más tarde, en 1932, se descubre el neutrón, con lo que se completa una imagen más o menos sencilla de la estructura atómica.

A principios del siglo XX, también, queda claro que la radiación electromagnética está cuantizada en la forma de fotones, como ya vimos anteriormente.

Como los fotones se entienden como los mediadores de las interacciones electromagnéticas, se pensó que debían existir partículas mediadoras de las interacciones nucleares, que explicasen la atracción entre neutrones y protones en los núcleos atómicos. Alrededor de 1934 Yukawa estimó que dichas partículas deberían tener una masa de alrededor de 300 veces la masa del electrón, o lo que es lo mismo aproximadamente un sexto de la masa del protón. Por este motivo a estas partículas se las llamó *mesones*.

La teoría relativista del electrón indicó la existencia del antielectrón; lo que a su vez sugirió la existencia de antipartículas en general. En 1931, se descubre al positrón,

la antipartícula del electrón, con su misma masa pero carga eléctrica opuesta. No se entiende bien porqué el Universo está compuesto de materia en vez de anti-materia. Pero la asimetría es saludable dado que cuando materia y antimateria se juntan, se aniquilan.

En su momento el estudio del llamado decaimiento β , o sea la emisión de un electrón por un núcleo, condujo a una incógnita respecto de la conservación de la energía. Como la física del mundo atómico y subatómico está explicada por la mecánica cuántica, se sabía que las energías de los núcleos debían formar un espectro discreto. Sin embargo se observaba que los electrones del decaimiento β tenían un espectro continuo de energía. Alrededor de 1930 Wolfgang Pauli predijo la existencia de una partícula neutra de muy poca masa, con el objeto de preservar el principio de conservación de la energía y momento en los procesos de desintegración de partículas. Hubo que esperar hasta 1953 para poder observar la existencia de los neutrinos.

Con el correr del tiempo, se fueron descubriendo muchas partículas y con ellas nuevas leyes de conservación que involucraron nuevas cargas; como por ejemplo la extrañeza. Al acomodar los bariones en término de carga eléctrica y carga de extrañeza se observó un arreglo en octetos.

Con los mesones conocidos a ese momento también se observó un arreglo en octetos. A esto se lo llamó 'El Camino Óctuple' (The Eightfold Way). Estas observaciones de las distintas partículas comenzaron a sugerir que las mismas eran probablemente compuestas de otras partículas más elementales; lo que finalmente condujo al modelo de quarks.

El modelo en término de quarks afirma que: [Gri87]

- cada barión (partículas pesadas) está compuesto de tres quarks;
- cada mesón (partículas de peso medio) está compuesto por un quark y un antiquark.

En 1964, O. W. Greenberg propuso que los quarks debían tener, además, otro tipo de carga que se la llamó *color*, con tres variantes: *rojo*, *verde* y *azul*. De esta forma un quark rojo tiene una carga de rojizo, cero carga de verdoso y cero carga de azulado. Se debe enfatizar que el uso de los términos ya conocidos como: color, rojo, azul, verde; sólo se eligieron por el hecho que se necesitaban tres posibilidades. Pero, además, porque resulta que los bariones, usando esta analogía, deben ser blancos; esto es, deben tener un quark de cada color. Similarmente, como los mesones están compuestos de un quark y un antiquark, tampoco tienen color; dado que los antiquarks tienen la carga opuesta del color, por ejemplo: menos rojizo. Se tiene, entonces que todas las partículas naturales no tienen color. Esta regla entonces excluye por ejemplo la posibilidad de tener en la naturaleza una partícula constituida por dos quarks, o por cuatro quarks, o dos quarks y un antiquark. El caso de seis quarks se lo entendería como el caso de dos bariones en estado ligado.

Hacia el principio de la década de 1970 la materia se explicaba en término de sólo tres quarks *u*, *d* y *s*. Sin embargo el descubrimiento en 1974 de una nueva partícula, en ocasiones llamada J/Ψ , sugirió la existencia de otras variantes de quarks. A las variantes de quarks se las llamaba *sabores*. Fue así como se introdujo el quark *c*.

Ulteriores descubrimientos de partículas necesitaron de la inclusión de los quarks b y t . La teoría electrodébil introducida independientemente por Weinberg y Salam, describía las interacciones débiles por medio de dos bosones mediadores cargados: el W^+ y el W^- , y de un bosón mediador neutro, el Z . Estas partículas fueron luego observadas en el CERN en 1983.

La visión actual que se tiene del modelo estándar, es que la materia y sus interacciones son explicadas en término de tres clases de partículas elementales: leptones, quarks y mediadores (o bosones de interacción).

En la tabla 13.3 (pág. 130) vemos que hay 6 leptones. Naturalmente también están los correspondientes 6 antileptones; por lo que en total se dispone de 12 leptones.

Vemos también que hay 6 ‘sabores’ de quark; los cuales como dijimos vienen en 3 colores, lo que lleva a un total de 18 quarks. Pero como también se deben considerar los antiquarks, se dispone en total de 36 quarks y antiquarks.

Entre los mediadores contamos el fotón, los bosones W^+ , W^- , y Z y 8 gluones; lo que hace un total de 12 mediadores.

Además el modelo Glashow-Weinberg-Salam predice la existencia de otro bosón, la llamada partícula de Higgs. El experimento que se está llevando a cabo en el CERN es casualmente para detectar la partícula de Higgs.

Así se llega a una descripción de toda la materia en término de 61 partículas elementales.

Ante esta situación, uno se podría preguntar si tal vez los quarks son partículas compuestas constituidas por otras verdaderas partículas elementales. O tal vez se pueda decir lo mismo de los bosones.

Por un lado se puede afirmar que por ejemplo los leptones y el fotón, son partículas elementales. Pues no hay ningún indicio en los experimentos que indique ninguna estructura extra de estas partículas.

Por otro lado, podemos hacer una breve reflexión y recordar las palabras de Dirac. En una descripción clásica de la materia uno intentaría explicar el comportamiento de un sistema en término de pequeñas partes constituyentes del mismo. Cada parte a su vez se la puede pensar constituida por otras partes más pequeñas. Si este procedimiento se lo considera iterativamente sin ningún límite, nos conducirá a la necesidad de manejar una información infinita para describir cualquier pedazo finito de materia. Ante esto Dirac afirmó: “Mientras *grande* y *pequeño* sean conceptos relativos, no será de ayuda explicar lo grande en término de lo pequeño. Es entonces necesario modificar las ideas clásicas de tal forma de dar un significado absoluto al tamaño”. [Dir58]

Tomando en cuenta todo esto, nos da la impresión que estamos en presencia de un modelo, el llamado modelo estándar de la materia, que hace uso de los constituyentes fundamentales de la misma.

El avance del conocimiento científico probablemente nos provea de un mejor entendimiento de la teoría que explica el comportamiento de la materia.