

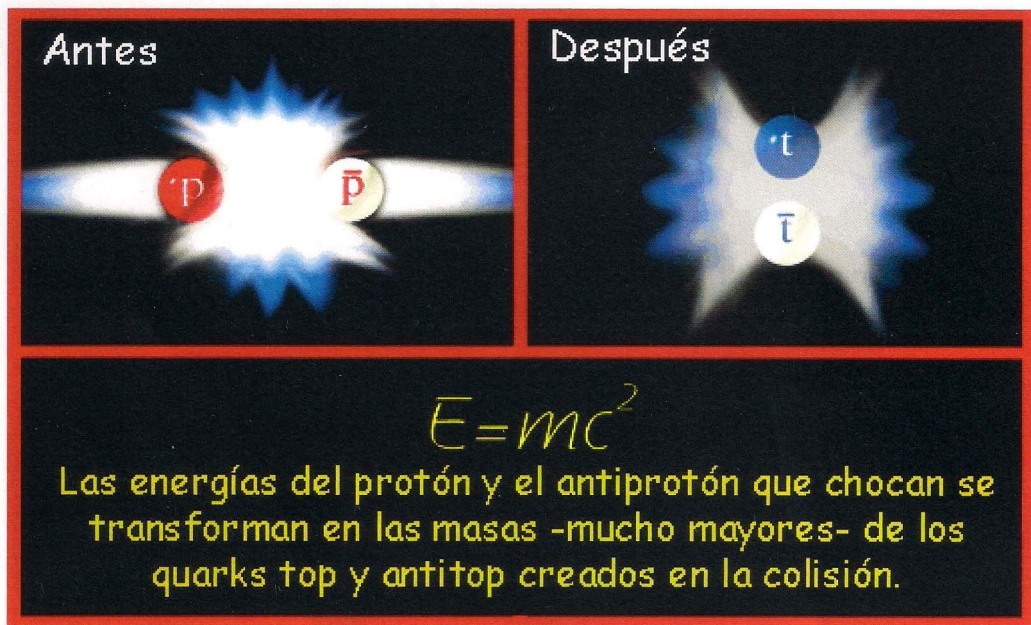
Calculando la masa del quark top

Introducción

La famosa ecuación de Einstein se comprueba a diario en aceleradores de partículas de todo el mundo. Los físicos se dedican a convertir energía en masa casi con la misma facilidad con la que los estudiantes de secundaria saltan de un canal de televisión a otro. Nosotros seremos capaces de hacerlo gracias a un suceso muy particular registrado en el detector **DØ** de Fermilab.

La mayoría de los sucesos que los físicos analizan son más complicados que el que, a continuación, la naturaleza nos dio de forma casual. La idea de que la masa y energía son intercambiables es esencial para quienes quieran entender cómo se crean dos quarks top (o más exactamente un top y un anti-top) a partir de la colisión de dos protones (mejor dicho, un protón y un anti-protón). Se podría comparar el experimento con una colisión de dos canicas que diera lugar a la producción de dos bolas de acero del mismo tamaño pero masa **considerablemente** mayor. Los protones de alta energía chocan creando quarks top cuya masa es más de 180 veces la del protón. La **energía** de los protones de menor masa se convierte entonces en enorme **masa** de los quarks top resultantes.

Quizá la conversión entre energía y masa parezca más razonable al tener en cuenta que el par protón/anti-protón iba a una velocidad tan cercana a la de la luz que entre ambos disponían de unos 1.8×10^{12} eV de energía. Después, esa energía se convirtió en la masa de los quarks recién descubiertos, tal como se muestra en este diagrama:



Los científicos miden la energía de estas partículas subatómicas en electronvoltios, que son unidades de energía, justo como los julios. También miden sus masas en electronvoltios/ c^2 , es decir, como energía dividida entre c^2 , donde "c" es la velocidad de la luz, aprovechando el hecho de que $E = mc^2$ para poner la masa en eV/c^2 . Para hacer las cosas más sencillas, al hablar de las masas y energías de las partículas los físicos usan como unidad el GeV (gigaelectronvoltio, que a veces se dice "jev"). 1 GeV

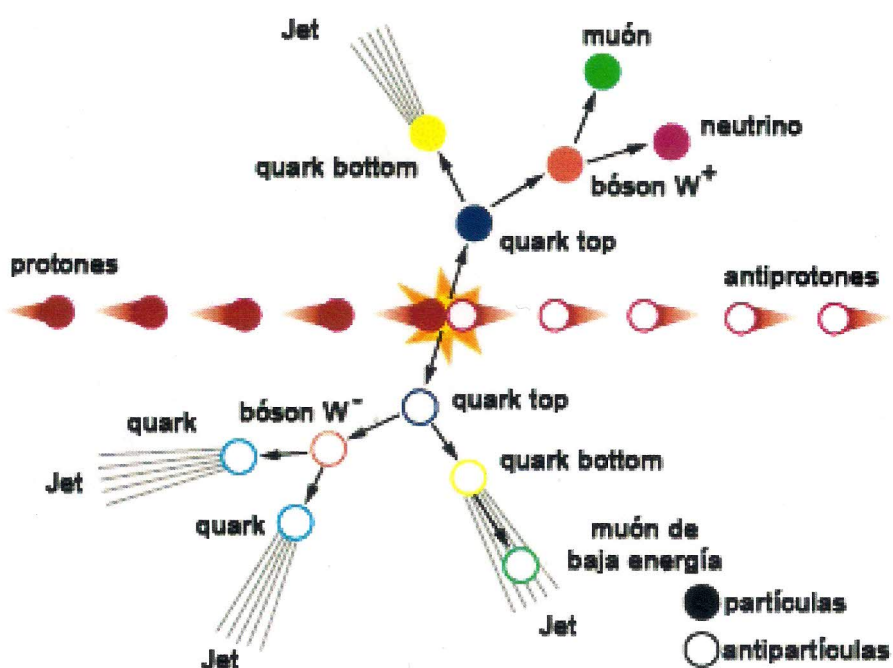
equivale a 10^9 eV y los físicos lo emplean de la misma manera que los astrónomos cuando miden las distancias en años - luz en lugar de en kilómetros o millas.

Los científicos de Fermilab descubrieron el quark top en 1995 haciendo chocar protones y antiprotones con energías de $900 \text{ GeV}/c^2$. Las masas de estas partículas medidas por los científicos son:

Masa del protón	$9.38 \times 10^8 \text{ eV}/c^2$	$0.938 \text{ GeV}/c^2$
Masa del quark top	$1.75 \times 10^{11} \text{ eV}/c^2$	$175 \text{ GeV}/c^2$

Para ayudar a los estudiantes a entender que masa y energía son intercambiables, esta actividad examina las señales dejadas por la producción de un par top/antitop que tuvo lugar en el [detector D-Cero](#) de Fermilab el 9 de julio de 1995.

Es importante señalar que los quarks top y antitop son partículas de muy corta vida y rápidamente se desintegran en partículas "hijas" y éstas a su vez en "nietas" y "bisnietas". Es ésta descendencia la que detectan los científicos de Fermilab. Otro diagrama muestra las auténticas [partículas de la colisión que registra el detector D0](#). En este suceso se ve que los quarks top y antitop quarks (cuyos símbolos son respectivamente t y t-barra) nunca se detectan directamente, ya que se desintegran muy rápidamente en cuatro "jets" (grandes chorros de partículas), un muón (verde) y un neutrino (magenta) en la esquina superior derecha de la [interpretación artística](#).



Un suceso top - antitop registrado en el detector D0 de Fermilab

Instrucciones para el profesor sobre la presentación en el aula

Esta actividad se basa en la comprensión de la suma de vectores por parte de sus estudiantes y requiere únicamente breves explicaciones de física de partículas por parte del profesor.

Cálculo de los momentos lineales de los productos de la colisión

El profesor debería explicar simplemente a los alumnos que se trata de un ejercicio sobre la conservación del momento lineal. Se trata de determinar el momento del neutrino “indetectable” sumando los correspondientes vectores (que representan los momentos lineales de jets o partículas) con las direcciones que se ven en los diagramas y los módulos que se indican en la vista frontal (END VIEW) del suceso. El resultado debería parecerse al que determinó la colaboración D0. Estos valores se recogen a continuación como referencia para el profesor.

Valores de la colaboración D0 usando las computadoras de Fermilab

Suceso real	14022	momento del neutrino	53.9 GeV/c
Suceso simulado por computadora	26	momento del neutrino	76.1 GeV/c
Suceso simulado por computadora	153	momento del neutrino	43.6 GeV/c
Suceso simulado por computadora	553	momento del neutrino	45.3 GeV/c

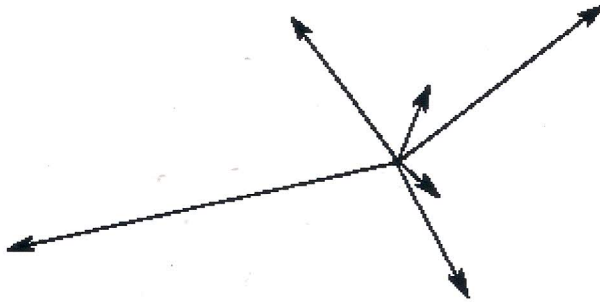
La dirección deducida para el neutrino se puede contrastar examinando los gráficos de las tres vistas antes mencionadas. **Tenga en cuenta que no todos los estudiantes obtendrán los valores exactos de la tabla ni las direcciones precisas que aparecen en la imágenes.** Esto se deberá, en primer lugar, a su elección de las direcciones de movimiento de los productos y además a efectos producidos por problemas como los descritos en la nota [1]. El valor que nosotros obtuvimos con regla y transportador de ángulos fue de unos 42 GeV/c.

[1] Es importante darse cuenta de que este procedimiento funciona únicamente si los productos de la colisión no tienen ninguna componente de sus velocidades en la dirección de los haces que chocan, que definimos como eje Z, es decir, si el suceso está enteramente contenido en un plano perpendicular al eje de los haces de protones y antiprotones. La tercera gráfica (DST LEGO) muestra que la Madre Naturaleza ha sido tan amable de proporcionarnos justamente un suceso así. Fíjese en que todas las trayectorias resultan estar próximas al eje $\eta = 0.0$. Esto nos permite aproximar este suceso por un problema bidimensional. También se ve que hay cierto “ruido” en los gráficos, correspondiente a la incertidumbre existente en cualquier experimento y que afectará negativamente al diagrama vectorial.

A pesar de todo, después de que varios grupos de estudiantes hayan dibujado sus diagramas, se podrá obtener un valor razonable para el momento del neutrino.

Como ayuda para el profesor, se encontrará más abajo un diagrama vectorial posible para el suceso 14022. Si hace clic sobre él, verá un gráfico que muestra la correspondencia entre los vectores y los datos.

Diagrama vectorial del suceso



Más datos sobre los cálculos de energía, masa y momento lineal para el profesor

Para que sus estudiantes puedan hallar la masa del quark top, han de entender que su deducción del momento lineal "desaparecido" del neutrino es crucial y les proporciona todo lo necesario para hallar la masa del quark top. Para ello, tendrá que proporcionarles la siguiente información que, para ser honrados, va más allá de la Física de la enseñanza secundaria (y de la de muchos cursos universitarios también), pero el salto no es tan grande que no se pueda dar (aunque quizá se necesite un pequeño acto de fe). Desde luego, el profesor es quien mejor lo sabe.

Empezamos con una relación muy común en Física de Altas Energías:

$$E^2 - p^2 = m^2.$$

La forma particular en la que se escribe aquí se debe a la convención de elegir un sistema en el que la velocidad de la luz, c , se hace igual a la unidad por definición. En este caso en que las partículas viajan casi a la velocidad de la luz, $E = mc^2$ se transforma en $E = m$ y la relación entre masa y momento, $p = mv$, pasa a ser prácticamente $p = mc$ y de ahí a $p = m$. Por supuesto que esta elección cambia las unidades a las que estamos acostumbrados, pero hace que la conversión entre masa, energía y momento sea más fácil.

En nuestro caso particular, se deduce que debemos escribir la energía y el momento en términos de la masa del quark top:

$$E^2 - p^2 = (2m_t)^2$$

[N. del T.: recuérdese que el producto inmediato de la colisión protón-antiprotón es una pareja top-antitop y que la masa de estas dos partículas es igual y vale m_t]

Al observar que el momento neto en un plano perpendicular a la dirección de los haces de protones y antiprotones ha de ser el mismo antes y después de la colisión y que su valor es cero, resulta:

$$E^2 = (2m_t)^2$$

o, haciendo la raíz cuadrada,

$$E = 2m_t$$

Puesto que casi toda la energía de la colisión es el resultado de la desintegración del top y el antitop, basta sumar las energías de los cuatro jets, el muon de baja energía, el otro muón y el neutrino y dividir entre dos (por la pareja top-antitop) para obtener la masa del último quark descubierto.

Los estudiantes emplearán los valores calculados para los momentos (ahora en forma de energías) e incorporarán su nuevo valor para el neutrino invisible antes de sumar escalarmente todas las energías e igualar a $2m_t$.

Si usamos los 42 GeV que obtuvimos mediante los vectores dibujados con regla y transportador de ángulos, obtenemos:

$$61.2 \text{ GeV} + 7.3 \text{ GeV} + 95.5 \text{ GeV} + 58.6 \text{ GeV} + 54.8 \text{ GeV} + 17.0 \text{ GeV} + \mathbf{42} \text{ GeV} = 336.3 \text{ GeV}$$

$$336.3 \text{ GeV}/2 = 168 \text{ GeV}$$

y si empleamos el valor de 53.0 GeV que calcularon las computadoras de la colaboración DØ, tendríamos:

$$61.2 \text{ GeV} + 7.3 \text{ GeV} + 95.5 \text{ GeV} + 58.6 \text{ GeV} + 54.8 \text{ GeV} + 17.0 \text{ GeV} + \mathbf{53.9} \text{ GeV} = 348.2 \text{ GeV}$$

$$348.2 \text{ GeV}/2 = 174.2 \text{ GeV}.$$

Aun más cercano al valor actualmente aceptado de unos 174.3 +/- 5.1 GeV [T].

Tal como se indicó, el “momento desaparecido” se puede encontrar al analizar más cuidadosamente el suceso, que además así se comprenderá mejor.

Sus estudiantes pueden repetir este procedimiento relativamente simple en sucesos generados por las computadoras de Fermilab, a las que se hizo simular diversas energías que darían lugar a este mismo tipo de suceso. Hemos encontrado que cuando diversos grupos de estudiantes promedian los resultados obtenidos para todos los sucesos, el resultado está razonablemente cercano al valor aceptado de la masa del quark top.

Conclusión

El resultado final de este ejercicio debería ser que los estudiantes hubiesen adquirido cierta experiencia en el uso de datos reales para ver cómo los científicos analizan las colisiones. Además, sus estudiantes empezarán a entender que algunas de las últimas piezas del rompecabezas que es el Modelo Standard se han montado a partir de la energía del acelerador, lo que confirma que se puede obtener masa a partir de la energía, tal como Einstein predijo.