

# LAS MASAS DE LOS QUARKS Y LA SIMETRÍA CP

B. Adeva Andany

Departamento de Física de Partículas, universidade de Santiago de Compostela

Es bién conocida hoy en día la existencia de seis quarks, distribuídos en tres familias, o generaciones, tal como sigue:

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$$

El primer doblete forma parte de la materia ordinaria, dentro del núcleo de los átomos, y los otros dos se han podido estudiar hasta ahora únicamente en los aceleradores de partículas. Los quarks son partículas inestables de espín  $\frac{1}{2}$  y, al igual que el electrón  $e^-$ , pueden tener su espín orientado en su dirección de movimiento (**helicidad a derechas**) o en la contraria (**helicidad a izquierdas**). Sus masas son enormemente distintas entre sí (desde aproximadamente  $2 \text{ MeV}/c^2$  para  $u$  hasta  $174300 \text{ MeV}/c^2$  para  $t$ ), hasta el punto que cuesta creer que los más pesados no tengan más estructura interna conocida que su espín.

La representación en dobletes obedece al hecho de que sus desintegraciones débiles tipo beta, por ejemplo  $c \rightarrow s e^+ \nu_e$  (donde  $\nu_e$  denota el neutrino del electrón), los asocian de esta manera, acoplándose únicamente los quarks a izquierdas. Existen también los quarks a derechas, y es notorio que éstos no se acoplan en dobletes como los anteriores, sino individualmente (singletes), a través de las corrientes neutras o del electromagnetismo. En éste último caso, que servirá de referencia para muchos, se producen quarks a derechas y a izquierdas en proporciones exactamente iguales.

La radical diferencia que existe entre el comportamiento a izquierdas (en dobletes) y a derechas (en singletes) de quarks, electrones y neutrinos, no ha impedido la creación de una teoría capaz de unificar las interacciones débiles (entre ellas, la radioactividad) con el electromagnetismo, y que recibe el nombre de Teoría Electrodébil. Esta teoría constituye un gran éxito de la Física, y nos permite calcular con precisión gran número de procesos. Es parte del llamado Modelo Estándar de la Física de partículas. Sin embargo, la teoría no nos aclara cuál es el tipo de energía condensada en las masas de los quarks.

En relatividad, la masa de una partícula de espín  $\frac{1}{2}$  no es fácilmente conciliable con la distinta estructura (singlete, doblete) de su parte a derechas y de su parte a izquierdas. Por esa razón, y con objeto de preservar su simetría interna, la teoría electrodébil se ha visto obligada a introducir una nueva partícula sin espín (un doblete), que interacciona simétricamente con los quarks y les proporciona masas. En ningún caso la teoría predice el valor que adquieren estas masas, que pasan a ser parámetros arbitrarios, pero se logra en cambio una gran coherencia en su estructura simétrica y relativista, lo cuál hace posible muchas predicciones experimentales. Quizá el único problema de este mecanismo estriba en que aún no se ha logrado descubrir en el laboratorio la citada partícula sin espín.

Cualquiera que sea el mecanismo responsable de las masas, éste es capaz de crear estados cuánticos (los quarks con masa), que no se corresponden, sin embargo, con aquéllos que se acoplan a las interacciones tipo beta en cada uno de los tres dobletes mencionados al principio. Es decir, existe una sorprendente mezcla entre generaciones cuando los quarks adquieren masa. Esto se traduce en curiosos “saltos” entre unas generaciones y otras en sus desintegraciones, con probabilidades diversas. Por ejemplo,  $b \rightarrow c$  está muy favorecido frente a  $b \rightarrow u$ . No tenemos ni idea de porqué esto es así, ni ello se deduce en modo alguno de la teoría electrodébil simétrica que acabamos de mencionar. Como físicos experimentales, nos interesa medir con precisión estas probabilidades, y confiar que algún día sean entendidas. En la teoría electrodébil estándar, estas amplitudes son parámetros tan fundamentales como pueda serlo la carga del electrón.

Más interesante aún es el hecho de que estas superposiciones lineales de quarks de distintas familias, que corresponden al estado cuántico de aquéllos que han adquirido masa, contienen números complejos con fases relativas observables. Es decir, no se trata de meras superposiciones estadísticas, sino de estados cuánticos coherentes. En ellos están marcados adelantos y retrasos de fase entre distintas desintegraciones de quarks acoplados, que resultan ser medibles en el laboratorio a través de sorprendentes procesos de interferencia y oscilación. Curiosamente, estos procesos elementales no son reversibles en el tiempo.

Sabemos ([Kobayashi-Maskawa, 1973](#)) que basta la presencia de una de éstas fases, que no sea simplemente  $180^\circ$ , para provocar un fenómeno muy notable en Física, que es la no conservación de la simetría CP. Esta no conservación consiste en que las desintegraciones de quarks y antiquarks, con orientaciones opuestas de su helicidad, no tienen lugar con igual probabilidad. Este fenómeno se descubrió en 1964, apareciendo como un leve ( $10^{-3}$ ), pero significativo efecto en desintegraciones de partículas con quarks ligeros. Datos recientes han permitido observar, por primera vez, la no conservación CP en desintegraciones de quarks pesados, y los datos indican que ésta alcanza valores sensiblemente altos, de hasta un 30%.

Un resultado clásico bien conocido ([Sakharov, 1967](#)) es que la no conservación CP en las interacciones que tuvieron lugar en los primeros instantes del universo, es un ingrediente necesario para hacer posible la notoria ausencia de antimateria que apreciamos actualmente en el espacio galáctico, a pesar de que en el laboratorio pueda aparecer como un efecto misteriosamente pequeño.

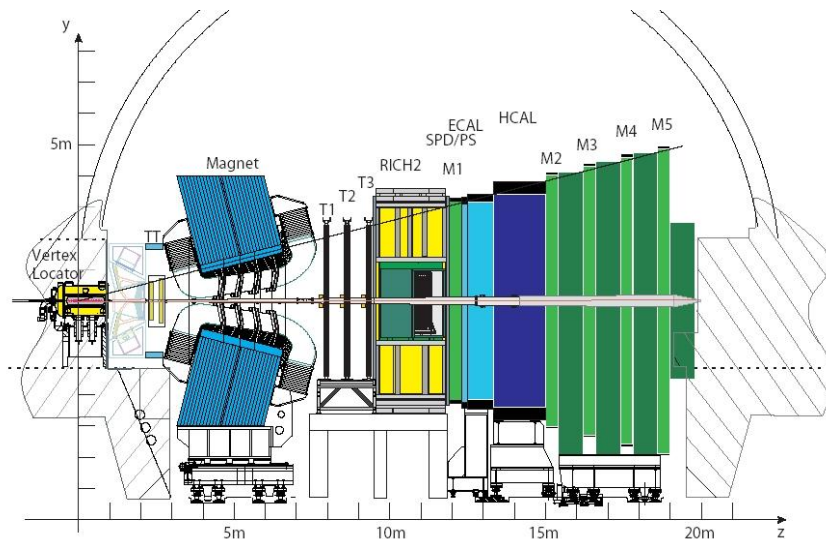
Motivados por la idea de determinar las fases relativas entre las distintas generaciones de quarks, un conjunto de grupos de físicos en torno al CERN hemos concebido un experimento de gran tamaño ([LHCb Technical Proposal, CERN/LHCC 98-4](#)) que nos permitirá medirlas con precisión, simultáneamente en las tres generaciones.

Es precisamente la necesidad de medir sobre las tres generaciones la que nos lleva a producir en el laboratorio quarks pesados como el b, y hacerlo además de forma tan copiosa que podamos disponer, en nuestros ordenadores, de centenares de miles de desintegraciones de estos quarks totalmente reconstruidas.

Las fases relativas que perseguimos determinar las vamos a extraer de las asimetrías CP observadas en desintegraciones específicas de partículas que contienen quarks b. Para medir estas asimetrías, es importante identificar con claridad los distintos tipos de quarks involucrados, y ello requiere construir un dispositivo de precisión. La elevada masa del quark b exige un gran acelerador para producirlo, y disponemos para ello del mayor acelerador del mundo, el Large Hadron Collider del CERN. Esta máquina, actualmente a punto de iniciar de forma estable su operación, será capaz de hacer chocar simétricamente dos protones con una energía de  $14 \times 10^{12}$  eV, y de repetirlo cada 25 nanosegundos, durante el tiempo que dure el experimento. Ningún otro acelerador puede producir un flujo comparable de quarks b, alcanzándose valores de  $10^7/s$  en la región hacia adelante. La dificultad principal del experimento estriba por tanto en separar electrónicamente las colisiones de interés a un ritmo tan elevado.

En la USC nos enfrentamos, a la hora de hacer el experimento, con dos retos importantes. En primer lugar, ser capaces de procesar la inmensidad de datos que se empezarán a producir a partir de 2009, que alcanzarán el nivel de docenas de Pbytes por año, tras la primera reducción electrónica. Para ello hemos preparado un sistema GRID de acceso a los datos dentro del campus de la USC, en cooperación con el CESGA y con una serie de grupos españoles de física de altas energías, cuyo centro de distribución para España se encuentra en el PIC de Barcelona.

En segundo lugar, debemos realizar la parte que es nuestra responsabilidad en la construcción de los detectores de trazado de bajo ángulo, basados en la tecnología de micropistas de Silicio. Para ello hemos montado, junto con otros grupos colaboradores, una cadena de ensamblaje de precisión de estos detectores en el propio CERN, que luego hemos instalado en la caverna del LHC, a 100 m bajo tierra. Estos detectores serán clave para la reconstrucción de las desintegraciones, y surgen de una colaboración entre la USC y las universidades de Zurich, Lausanne y Heidelberg.



*Experimento LHCb del CERN*

Naturalmente, la tarea que se nos presentará a continuación será la de analizar el enorme volumen de datos disponibles, sobre una amplia variedad de canales. Ello requerirá sin duda la participación de un buen número de físicos bien formados, que sean capaces de ayudarnos en encontrar las desintegraciones de interés, y a explorar en ellas si se

observan o no las simetrías básicas, y en qué medida. Esto sin dejar de estar atentos a la presencia de desintegraciones no previstas, que pudieran revelar nueva física de por sí.

Estamos convencidos de que seremos capaces de aportar nuevos datos que podrán esclarecer si el fenómeno de la no conservación CP en la naturaleza se atiene exclusivamente a las fases de mezcla en las tres generaciones conocidas de quarks, o por el contrario recibe también contribuciones de partículas pesadas no previstas en el Modelo Estándar. En el momento de revisar este artículo, Kobayashi y Maskawa han sido distinguidos con el [Premio Nobel de Física en el año 2008](#), en reconocimiento por su admirable teoría, y por la indudable repercusión que el tema ha suscitado en la Física fundamental.

**O Gato de Schrödinger. Revista cuántica da Faculdade de Física** (versión original Otoño 2003).