

O EXPERIMENTO LHCb DO GRAN COLISOR DE HADRÓNS E A ACHEGA DA USC NO SEU DESENVOLVEMENTO

BERNARDO ADEVA, XABIER CID VIDAL E

JOSÉ ÁNGEL HERNANDO

Abstract

LHCb is one of the four major detectors of the Large Hadron Collider (LHC) experiment, currently taking place at CERN (Geneva). LHCb will profit from the LHC proton-proton collisions at energies never achieved so far to study the physics of particles containing the b (beauty) quark. This will allow new measurements concerning, among others, the CP violation, one of the conditions required to explain the current known predominance of matter over anti-matter in our Universe. An introduction to the LHCb experiment and its physics goals will be seen, together with the important contribution from the University of Santiago, both in the construction of the detector and the analysis of the data taken.

RESUMO

LHCb é un dos catro maiores detectores do experimento LHC, situado no CERN (Xenebra). Aproveitase das colisións protón-protón a enerxías nunca antes acadadas para o estudo de partículas que conteñen o quark b (beauty). Isto permitirá novas medidas concernentes, entre outros, coa violación CP, precisa para comprender a predominancia actual da materia sobre a antimateria no Universo. Nese artigo preséntase unha introdución a este detector e aos seus obxectivos, xunto coa importante contribución da Universidade de Santiago de Compostela, tanto na construción do detector como na análise dos datos obtidos.

INTRODUCCIÓN: A VIOLACIÓN CP E A PREDOMINANCIA DE MATERIA SOBRE ANTIMATERIA

A teoría máis estendida sobre o noso Universo dinos que este comezou hai 13700 millóns de anos cunha “gran explosión” (Big Bang), a partir da cal o Universo se expandiu xerándose todos os elementos que o compoñen actualmente. Podemos estudar a evolución do Universo desde esta explosión realizando medidas de diferentes parámetros e intentando supor como debeu ser esta evolución para que estes teñan os seus valores actuais. Así, por exemplo, temos

coñecemento dun medio composto por materia. Tamén sabemos que a antimateria, formada por partículas con propiedades (como a carga eléctrica) xustamente contraria ás ordinarias, foi detectada nos colisores de partículas modernos ou mesmo nos raios cósmicos procedentes doutras partes do noso Universo. Está perfectamente entendido como a materia e antimateria se aniquilan cando entran en contacto, transformando a masa en pura enerxía en forma de radiación electromagnética. Isto permítenos saber que non existen grandes “bolsas” de antimateria noutros lugares do Universo, xa que a súa aniquilación coa materia ordinaria daríanos como resultado unha radiación enormemente enerxética procedente desas bolsas que non se observa. O que si observamos, porén, é unha Radiación de Fondo Cósmica de Microondas, CMB, que enche todo o Universo e que é practicamente igual en todas direccións cunha temperatura equivalente de 2.7 K, o que corresponde a unha baixa enerxía dos fotóns de microondas. As características desta radiación suxiren que se trata dun resto do Big Bang. Desta maneira, a baixa enerxía actual da radiación correspondería a outra moito maior cando o Universo era moito máis pequeno, pouco despois da súa creación. Esta radiación precisamente proviría, ao menos en parte, da aniquilación de materia e antimateria. Pero se todos os procesos fosen simétricos con respecto á materia-antimateria esta aniquilación debiera ser tido total, e non quedaría materia no mundo actual. No ano 1967 o físico ruso Andrei Sakharov estableceu tres condicións para explicar a permanencia da materia sobre a antimateria:

- 1 Que o protón, compoñente fundamental dos núcleos atómicos, poida desintegrarse.
- 2 Que exista unha interacción que viole a simetría CP.
- 3 Que houbera fases da expansión do Universo fóra do equilibrio térmico.

A simetría CP non é máis que a composición doutras dúas: a conxugación de carga (C, que muda partícula por antipartícula) e a paridade (P, que muda o signo do vector velocidade). Cando falamos de simetría ante unha transformación dicimos que a física non cambia tras tela realizado. Desta maneira, sabemos por exemplo que a mecánica clásica é invariante ante unha translación en ausencia de forzas actuando: o movemento dun corpo libre seguirá sendo igual sen importar cal sexa o lugar desde o cal tomemos a súa posición. Diremos entón que a translación espacial é unha simetría da mecánica clásica.

Os constituíntes fundamentais da materia máis estable (quarks, electróns, muóns e neutrinos) xiran arredor de si mesmos ao moverse. Esta propiedade chámase espín, e é sabido na Física Cuántica que só pode ter dúas orientacións: na dirección do movemento (helicidade positiva, partículas orientadas “a dereitas”) ou na contraria (helicidade negativa, partículas orientadas “a esquerdas”). Isto pódese ver graficamente na figura 1.

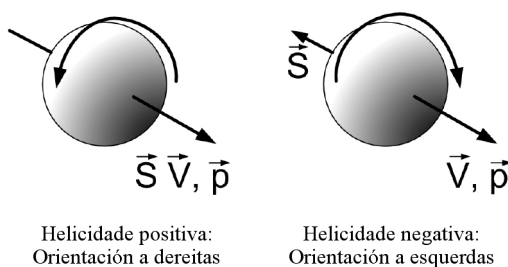


Figura 1: Definición da helicidade

A interacción feble é unha das catro interaccións fundamentais que a física establece, e é de moi curto alcance. As outras tres son a forte (tamén de curto alcance), a electromagnética e a gravitatoria. A interacción feble é a candidata para a violación requirida nas condicións de Sakharov. Sinalaremos que, na nosa definición anterior de C e P, ningunha destas simetrías altera a orientación do espín. Vexamos como se soubo experimentalmente que ambas as dúas eran violadas pola interacción feble.

En 1957 tivo lugar un gran avance na historia da Física ao descubrirse que as desintegracións nucleares β , que son parte da radioactividade natural e están mediadas pola interacción feble, só producen electróns a esquerdas, nunca a dereitas. O experimento pioneiro foi realizado por C. S. Wu na Universidade de Columbia con núcleos Cobalto-60, e rapidamente comprobouse que esta era unha característica xeral da radioactividade β . Ao longo dese mesmo ano de 1957 descubriuse que o muón, partícula de carga eléctrica negativa similar ao electrón, tamén se desintegra exclusivamente en electróns a esquerdas (experimentos de Garwin-Ledermann en Brookhaven e da Universidade de Liverpool). A súa antipartícula (o muón positivo) desintegrábase loricamente en positróns (a antipartícula do electrón), pero estes eran sempre a dereitas. É dicir, que todas as formas de desintegración β producían sempre partículas a esquerdas e antipartículas a dereitas. Isto deu pé ao novelista Isaac Asimov a publicar o seu famoso libro “A man esquerda da electrónica” en 1972. A este fenómeno chamóuselle quiralidade, por analoxía co electromagnetismo. Para investigar este e outros fenómenos, J. Steinberger, autor dun artigo nesta mesma revista, levou a cabo varios experimentos rigorosos unha década despois con feixes de neutrinos e antineutrinos muónicos creados no CERN en Xenebra e no Laboratorio de Fermi en Chicago. Neles descubriuse que os quarks que interveñen nas desintegracións β , ao ser golpeados por neutrinos, son tamén estritamente a esquerdas (antiquarks a dereitas). Convén saber que as desintegracións β , en xeral, converten un quark de tipo u (*up*) noutro quark de tipo d (*down*), emitindo un muón (ou electrón) e un antineutrino. Unha consecuencia disto, por exemplo, é que os protóns se transmutan en neutróns. Foi evidente que todos estes procesos quebraban ao 100% tanto a simetría C como a simetría P.

Pese á sorpresa inicial, os físicos adaptáronse rapidamente a este feito, pois ao final tampouco alteraba as nocións básicas da teoría da relatividade, que levaran a P.A.M. Dirac en 1932 a concibir a idea mesma de antipartícula. Esta aséntase fundamentalmente no feito de que as antipartículas teñen helicidades opostas. R. P. Feynman explicouno admirablemente en 1947, deixando claro que o positrón non é outra cousa que un electrón viaxando cara atrás no tempo. Polo tanto, na medida en que as propiedades das partículas elementais fosen idénticas para as súas antipartículas de helicidade oposta, non había razón para pór en cuestión as ideas básicas da teoría da relatividade, a pesares de que electróns e quarks presentasen misteriosamente unha quiralidade determinada nas súas interaccións febles. Noutras palabras, a simetría CP era sempre respectada en todos os cálculos relativistas. Porén, a Natureza resulta ser moito máis sutil, e cando se comparan con precisión as desintegracións dos quarks e dos antiquarks de helicidade oposta, descóbrese que existen diferenzas constatables. Xa en 1964 J. Cronin e V. Fitch mediron estas diferenzas con quarks lixeiros (co quark s, *strange*), resultando ser do 2.3 por mil, o cal os fixo merecedores do Premio Nobel en 1980. Hoxe en día sabemos que, no caso dos quarks pesados (co quark b, *beauty* ou *bottom*), chegan a acadar o 35%, grazas a resultados dos experimentos BABAR (EUA) e BELLE (Xapón) publicados en 2001.

Os primeiros en avanzar unha posible explicación deste fenómeno foron os físicos xaponeses M. Kobayashi e T. Maskawa xa en 1973, ao relacionalo brillantemente coa existencia de varias xeracións idénticas (ou réplicas) de pares de quarks a esquerdas e coa adquisición de masa por parte deses quarks, a través do chamado mecanismo de Higgs. A contribución de Kobayashi e Maskawa foi fundamental na construción do noso Modelo Estándar, que é a ferramenta máis certa que temos ata agora para describir as interaccións fundamentais coñecidas entre as partículas elementais que compoñen toda a materia. Grazas ao seu traballo, que lles mereceu o Premio Nobel de Física en 2007, sabemos que as masas dos quarks e a violación CP son fenómenos que teñen unha orixe común. É dicir, dous dos problemas centrais da Física Fundamental resultan ser un único. Aínda que a teoría de Kobayashi-Maskawa (KM)

non proporciona unha explicación última do fenómeno da creación das masas, relaciónao coa violación CP dunha maneira específica. O cambio de xeración que experimentan os quarks ao ter desintegracións β fica explicado polo feito de que estamos a falar de dous estados distintos dos quarks: aqueles que adquiriron masa (os que se desintegran) e aqueles que ven a interacción electrofeble na orixe, que carecen dela. Isto exprésase nunha táboa de dobre entrada ou matriz 3×3 (chamada matriz CKM, en honor tamén ao físico italiano N. Cabibbo) que ten uns elementos que permiten calcular as transicións respectivas entre os quarks de tipo u, c (*charm*) ou t (*top*), nas columnas, e os quarks de tipo d, s ou b, nas filas. Xa que se trata ao fin dunha matriz de rotación entre os dous tipos de estados cuánticos citados, nela aparecen números complexos, como é habitual na Mecánica Cuántica. As fases destes números complexos son precisamente as responsables da violación CP. Pese á indubidable beleza desta teoría, hoxe en día sabemos que a magnitude de violación CP que predí é inferior á requirida polos datos en Astrofísica que sinalamos ao principio.

O experimento LHCb, que tivo entre os seus propoñentes en 1996 á Universidade de Santiago de Compostela, ten como un dos seus obxectivos principais o de estudar con precisión a falta de simetría entre as desintegracións dos quarks e dos antiquarks de helicidade contraria, é dicir, a violación CP. Grazas á copiosa produción de quarks pesados no LHC, onde se reproducen as condicións do Universo primitivo, agárdase saber se esta pode ser explicada enteiramente pola teoría de Kobayashi-Maskawa. Para isto, construíuse un dispositivo experimental que permite distinguir con nitidez entre as distintas xeracións de quarks, grazas ao RICH (quark s), ao VELO (quarks c e b) e medir a masa dos mesóns, como explicaremos máis adiante.

Unha das formas mas claras de estudar estas asimetrías baséase en que existen partículas (como os mesóns B_s) que se converten espontaneamente na súa antipartícula desde o mesmo momento de producirse no acelerador, e logo retornan ao seu estado de partícula ao cabo dun tempo, oscilando periodicamente como un resorte cunha frecuencia determinada, antes de desintegrarse finalmente dentro do noso dispositivo tras percorrer varios milímetros. As frecuencias das que estamos a falar están no rango do picosegundo (10^{-12} s). O experimento vai poder seguir no tempo esta oscilación materia-antimateria, grazas ao detector VELO. Neste proceso de oscilación, pode verse claramente como a materia adianta a súa fase fronte a antimateria, ou viceversa. Estes adiantos de fase, que son un sinal característico da violación CP, relaciónanse directamente coas fases medibles da matriz CKM. Elixindo distintos mesóns e distintos modos de desintegración, podemos pór a proba a teoría de forma moi detallada, e polo tanto saber se a violación CP observada é ou non suficiente para explicar a asimetría do Universo primitivo. Existen catro fases medibles na matriz CKM, que se denominan habitualmente na literatura β , γ , ϕ_s e ϕ_d .

Se os datos non corroboran a teoría de KM, será debido a que novas partículas pesadas existentes no baleiro, descoñecidas ata agora (partículas “supersimétricas”, novos bosóns, ou outras) alteran estas fases interferindo nas amplitudes de desintegración. Seremos capaces polo tanto de detectar a presenza de novas partículas pesadas directamente no baleiro, sen necesidade de extraelas cara o laboratorio. Este método permite explorar masas realmente elevadas, que doutra forma atoparíanse fóra do alcance do acelerador.

O DETECTOR LHCb

O experimento LHCb está concibido para funcionar a unha luminosidade instantánea de $2.5 \cdot 10^{32} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, menor que a nominal do LHC de $10^{34} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Para acadar este valor, os feixes de protóns son desfocalizados preto do punto de interacción de LHCb. O motivo disto é facer máis doada a correcta identificación dos vértices primarios (onde ocorre a colisión inicial dos protóns) e secundarios (onde se desintegra o mesón B de interese).

LHCb é un espectrómetro de brazo único cunha cobertura angular de aproximadamente 10 mrad a 300 mrad no plano de curvatura magnético (250 no plano de non curvatura magnética). A escolla da xeometría do detector vén xustificada polo feito de que a altas enerxías os dous hadróns b e anti b son producidos predominantemente no mesmo cono cara adiante ou cara atrás.

A distribución do espectrómetro de LHCb amósase na figura 2. O sistema de coordenadas cara a dereita escollido adopta o eixo z ao longo do feixe e o eixo y ao longo da vertical.

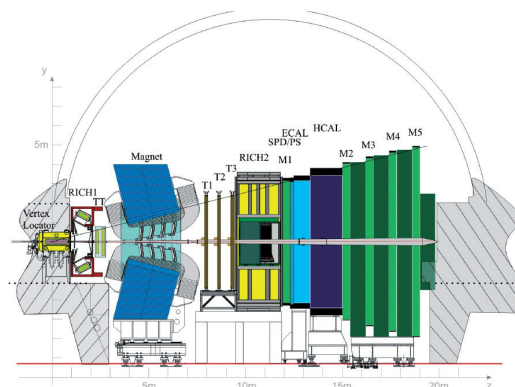


Figura 2: Visión lateral do detector LHCb

O Punto de Intersección 8, empregado antes polo experimento DELPHI durante os tempos do LEP, foi preparado para albergar o detector LHCb. Unha modificación na óptica do LHC, desprazando o punto de interacción 11.25 m desde o centro, permite o uso máximo da caverna por parte dos compoñentes do detector. Os principais elementos de LHCb son:

- un imán dipolar a temperatura ambiente que proporciona un campo integrado de 4 T·m, preciso para a medición do momento das partículas,
- un sistema localizador de vértices (*VELO*), explicado con máis detalle a continuación,
- un sistema de trazado, composto polo *Tracker Turicensis* (*TT*, un detector de microtiras de silicio) en fronte do imán, e tres estacións de trazado (*T stations*) detrás do imán, compostas por microtiras de silicio na parte interior (*IT*, fabricado na Universidade de Santiago) e de fibras de Kapton/Al nas partes exteriores (*OT*),
- dous contadores por Imaxe de Aneis Cherenkov (*RICH1* e *RICH2*) que se serán explicados con máis detalle tamén logo,
- un sistema de calorímetros composto por un Detector Escintilador e *Preshower* (*SPD/PS*), un calorímetro electromagnético (*ECAL*) e outro hadrónico (*HCAL*),
- e un sistema de detección de muóns composto por 5 estacións equipadas con cámaras proporcionais multi-fío, *MWPC*, (excepto na zona máis interior da primeira estación, onde se empregan multiplicadores gas-electrón, *GEM*, triples).

O VELO e os detectores RICH1 e RICH2 destacan en LHCb tanto pola innovación tecnolóxica que supoñen como por ser específicos deste experimento, o que se debe ás necesidades particulares do tipo de física que se pretende levar a cabo, como se viu na introdución.

O VELO (figura 3) ten como obxectivo obter con gran precisión a posición na que se produciu a colisión inicial dos dous protóns e, separada deste, a de calquera outro vértice correspondente a partículas que voan só uns milímetros antes de desintegrarse, como é o caso dos mesóns B .

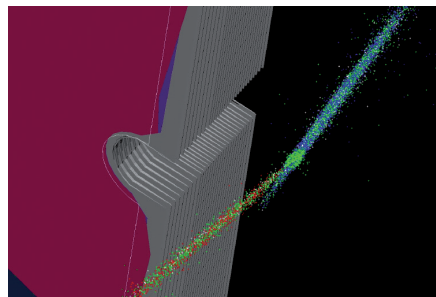


Figura 3: O VELO arredor dos feixes de protóns. A figura foi obtida coas primeiras colisións do LHC a finais de 2009

Para iso, contén 21 estacións posicionadas ao longo do eixe do feixe perpendicularmente a este. Úsanse dous tipos de sensores de silicio: uns miden a coordenada r con tiras circulares centradas arredor do eixe do feixe e os outros miden a coordenada ϕ con tiras rectas situadas radialmente. Os sensores teñen o mesmo tamaño que a metade dun CD de música e están posicionados en parellas de sensores r e ϕ .

A xeometría r - ϕ ten a vantaxe de que pode dar directamente unha proxección no plano rz utilizando unicamente medidas en r . Nesta proxección, as partículas que voan separadas do vértice primario (como as partículas fillas das mesóns B) son identificadas doadamente.

Canto máis curta sexa a extrapolación dunha traza cara á rexión de interacción, menor será o erro na posición reconstruída do vértice. Este requirimento de proximidade implica que os sensores deben ser retirados durante a inxección do feixe, para evitar danos serios por culpa da radiación. Consecuentemente, o VELO está deseñado para que as dúas metades do detector poidan ser afastadas do feixe na dirección horizontal.

Os detectores RICH permiten determinar a identidade de partículas cargadas a través da medida da súa velocidade. Unha vez coñecida esta, e sabendo tamén o momento das mesmas (obtido da curvatura da súa traxectoria en presenza do imán de LHCb) pódese obter a masa das partículas que atravesan o detector, permitindo a súa correcta identificación. As medicións no RICH baséanse na radiación de Cherenkov, que consiste na emisión de fotóns cando unha partícula cargada atravesa un medio cunha velocidade maior que a velocidade da luz nese medio. A velocidade das partículas determínase mediante o ángulo da emisión dos fotóns de Cherenkov con respecto á traxectoria da partícula. Este ángulo dependerá do índice de refracción do medio ademais da propia velocidade das partículas. Como a radiación de luz de Cherenkov se produce a partir dun ángulo límite, un índice de refracción grande permite identificar partículas de baixo momento, mentres que un máis pequeno é útil para aquelas de alto momento. O RICH1 e RICH2 están compostos de distintos medios (con distinto índice de refracción) para identificar respectivamente partículas de baixo e alto momento.

Nos detectores RICH a luz Cherenkov producida refléxase en espellos esféricos e planos, de xeito que os conos de luz proxéctanse como círculos (aneis) sobre un plano de fotodetectores. O raio de cada anel permite obter o ángulo de Cherenkov e, polo tanto, a identificación das partículas (figura 4).

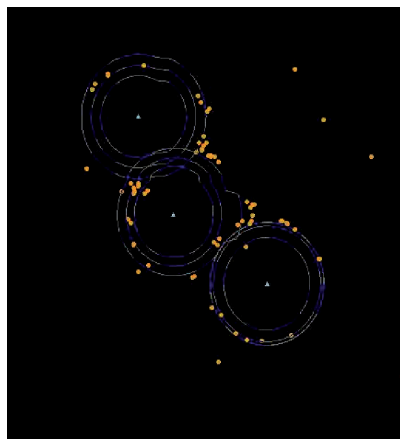


Figura 4: Algúns aneis Cherenkov do RICH orixinados por partículas producidas nas colisións de 2009

FÍSICA DE MESÓNS BELOS NO LHCb

Nas colisións entre os feixes de protóns do LHC vanse producir milleiros de partículas, entre as que están os mesóns “belos”, que conteñen o quark b. No LHCb esperamos que se produzan cen mil pares de mesóns belos... cada segundo! Con tal cantidade de mesóns podemos estudar fenómenos raros ou pouco frecuentes que esperamos que aclaren as interaccións entre as partículas ou, mellor aínda, nos dean sorpresas e permitan abrir a porta da nova física. Os fenómenos que imos estudar no LHCb reciben o nome técnico de correntes neutras de cambio de sabor. Estas correntes están prohibidas a primeira orde no Modelo Estándar, pero poden ter

lugar a través dos procesos virtuais que os físicos chamamos, non sen algo de imaxinación, lazos ou pingüíns. Estes son procesos de segunda orde e polo tanto menos frecuentes. Neles participan todo tipo de partículas, as coñecidas, das que podemos calcular a súa contribución, e tamén as descoñecidas. Podemos imaxinar o LHCb como unha gran lupa coa que desleiar os lazos e observar indirectamente as partículas que neles interveñen. Hai moitos exemplos de observacións indirectas, quizais a máis espectacular sexa a de que a Terra é redonda. O raio da Terra mediuno Eratóstenes no século II antes de Cristo, pero tiveron que pasar máis de dous mil anos ata que Yuri Gagarin puidese contemplar a Terra suspendida no Cosmos.

No LHCb imos realizar decenas de medidas, pero comentaremos brevemente aquí dúas das máis importantes. A primeira delas é a posible observación de violación de CP a través da desintegración feble do mesón $B_s \rightarrow J/\Psi \Phi$. Como se comentou na introdución, o xeito no que esta violación ocorre é de gran importancia para explicar a actual predominancia de materia sobre antimateria no noso Universo. Esta desintegración é unha das que mellor nos permiten acceder ás fases medibles da matriz CKM en LHCb, sendo estas as que conteñen a información sobre a violación CP. Neste caso, estas fases maniféstanse dun xeito moi sutil na desintegración dunha mesón B_s indo a J/Ψ e Φ . Como vimos antes, a mesón B_s oscila á súa antipartícula (anti B_s) antes de desintegrarse, de xeito que a parella $J/\Psi \Phi$ pode proceder de calquera de ambas as dúas. A dependencia da desintegración $B_s \rightarrow J/\Psi \Phi$ coas fases da matriz CKM pódese calcular con precisión no Modelo Estándar. O observable final é unha asimetría. Así, nun instante posterior á colisión, medimos o número de veces nas que o mesón inicial se desintegrou a $J/\Psi \Phi$ menos o número de veces que o fixo o seu antimesón, dividido pola suma. Esta asimetría é unha función sinusoidal atenuada en función do tempo e a súa amplitude de oscilación esta relacionada coa fase que queremos medir, co que nos permite estudar en detalle a violación CP. Se esta fora nula, a asimetría sería igualmente nula en función do tempo.

As dificultades experimentais son considerables nesta análise. Debemos primeiramente seleccionar os sucesos onde tivo lugar unha desintegración $B_s \rightarrow J/\Psi \Phi$ e separalos do ruído de fondo. En total, agardamos unhas decenas de miles de sucesos ao ano. Debemos igualmente identificar o sabor do mesón inicial, se era a mesón ou antimesón, o que se fai a partir do resto de partículas do suceso. E finalmente temos que reconstruír o vértice de desintegración do B_s , xa que isto estará relacionado co tempo que voou (viviou) esta partícula. Os experimentos CDF e D0, no Laboratorio de Fermi, realizaron as primeiras medidas desta asimetría, e o seu resultado, a pesar de estar de acordo co Modelo Estándar, ergueu gran expectación, xa que, se cos datos deste ano obtemos no LHCb o mesmo valor da asimetría e dada a nosa mellor resolución, estaremos en condicións de amosar unha primeira evidencia contra o Modelo Estándar.

A segunda análise do LHCb da que lles queremos falar é a procura da desintegración estraña do mesón B_s a dous muóns, $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-$. Esta desintegración (figura 5) ten lugar a través de lazos e pingüíns, comentados antes, e é polo tanto un proceso raro, de xeito tal que un B_s desintégrese a dous muóns... unhas poucas veces de cada mil millóns! Os experimentos CDF e D0, mencionados antes, buscaron esta desintegración sen éxito, o que lles permitiu establecer un límite: de cada

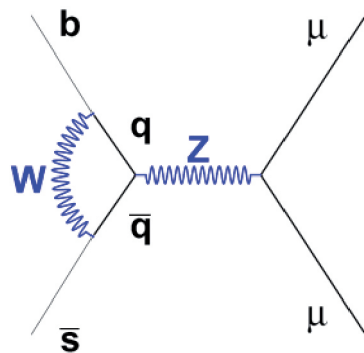


Figura 5: Exemplo dos diagramas con pingüíns que dan lugar á desintegración $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-$

cen millóns de desintegracións de B_s menos de 5 poden ser a dous muóns. O bosón de Higgs intervén nun dos pingüíns desta desintegración. O Modelo Estándar propón un só bosón de Higgs, pero ben puidesen existir máis, como propoñen todos os modelos “supersimétricos”, e nese caso a probabilidade da desintegración podería ser maior. Se o Modelo Estándar está no certo esperamos que se produzan ao ano unhas decenas de desintegracións $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-$ no LHCb, pero se existen máis Higgses, ou outra partícula non descuberta similar, ben puidesen aparecer centenas.

Cómpre salientar que esta medida é moi relevante tamén na comprensión do noso Universo. Na actualidade, crese que este está composto nun 72% de “enerxía escura” e nun 23% de “materia escura”, mentres que a materia ordinaria que nos rodea só forma un 5% do total. Mentres que a orixe da enerxía escura é bastante incerto hoxe en día, diversos modelos especularon sobre a natureza da materia escura. Sábese que esta non interacciona coa materia ordinaria nin coa luz (de aí que sexa escura), e os mencionados modelos supersimétricos propuxeron diversas partículas que, cumprindo estas características, ben poderían formar a materia escura. Polo tanto, se conseguimos confirmar algún modelo supersimétrico mediante a medida da frecuencia de desintegración do $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-$ quizais poidamos entender a composición desta materia, que é moitísimo máis abundante que a ordinaria no Universo.

Claro que realizar esta medida trátase case de buscar unha agulla nun pallaio. Para ilustrar as dificultades do proceso propómoslles seguir o estudo da tese de doutoramento de Diego Martínez, da Universidade de Santiago. En primeiro lugar, é preciso identificar dous muóns nun suceso. Estas partículas son altamente penetrantes e as únicas capaces de acadar o último detector do LHCb. Aínda así, existe un posible erro de asociación dun 5 por mil: de cada mil partículas que non son muóns 5 veces cremos que si o son. A desintegración do B_s que máis se parece á nosa é $B_s \rightarrow \pi^+ \pi^-$, a dous pións, que ten unha probabilidade aproximada dunha entre un millón. A posibilidade de que teñamos unha desintegración como á anterior na que tomamos os dous pións erroneamente por muóns é da orde dunha parte en cen mil millóns. Un dos autores deste artigo, Xabier Cid, traballa intensamente no desenvolvemento de algoritmos de identificación de muóns. O seguinte reto é reconstruír a desintegración do B_s e separala do ruído de fondo; para iso contamos cos dous sinais principais que deixa a desintegración. Os mesóns belos teñen unha vida media de picosegundos e á velocidade da luz percorren uns milímetros antes de desintegrarse. Así, como se comentou, grazas ao VELO podemos medir a traxectoria das partículas con precisión de decenas de micras. Isto permítenos reconstruír separadamente o vértice de desintegración do B_s , de onde parten os dous muóns, do vértice primario, onde tivo lugar a colisión dos protóns e de onde se orixinou o B_s . O segundo sinal é a masa invariante dos dous muóns, neste caso ambos os dous teñen que ter un momento que corresponda á masa da partícula que os orixinou. Para establecer os límites desta busca utilizamos unha serie de programas de simulación por ordenador. Estes programas inclúen detalles tan precisos como a distribución da estrutura mecánica do soporte e cables dos nosos detectores. En LHCb poderemos observar a desintegración de $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-$ cos datos de 2010 se a súa probabilidade de desintegración é 10 veces maior que a que predí o Modelo Estándar. Se a probabilidade é a agardada por este, teríamos que agardar uns tres anos antes de observala. O estudo non acaba aquí, será preciso realizar unha serie de probas a partir dos datos do experimento para garantir que a medida sexa correcta. Podemos utilizar por exemplo a desintegración $B_s \rightarrow \pi^+ \pi^-$ da que falamos antes, que se parece extraordinariamente ao sinal a excepción de que en lugar de dous muóns hai dous pións, para obter as dúas distribucións máis importantes: a distancia de separación entre o vértice de desintegración do B_s e o da súa produción e a súa masa invariante.

ACHEGA DO GRUPO DE ALTAS ENERXÍAS DA USC AO EXPERIMENTO LHCb

O grupo de Física de Altas Enerxías da Universidade de Santiago de Compostela foi uns dos creadores do experimento LHCb no CERN. Participou desde o principio na defensa da súa proposta ante o comité científico do LHC, logo nos proxectos de investigación e desenvolvemento para establecer as tecnoloxías máis axeitadas dos detectores, e finalmente na etapa de construción e instalación no pozo do detector. O experimento formouse na carta de intención (*Letter of Intent*) de 1996, que foi aprobada polo CERN dous anos máis tarde, sendo líder do experimento o físico xaponés Tatsuya Nakada. Nakada foi convidado a visitar Santiago xusto naquelas datas, nas que conseguiu tamén o apoio de importantes centros en Reino Unido, Italia, Francia e Rusia. Tras a luz verde outorgada polo CERN, novos grupos uníronse ao proxecto, ata completar unha lista de 54 universidades e institucións, con máis de 700 investigadores membros.

A responsabilidade técnica de Santiago quedou fixada no *Inner Tracker* (IT, situado na parte interna das estacións T1, T2 e T3 da figura 2), unha peza clave do dispositivo experimental de LHCb destinada a medir con precisión os puntos de impacto das partículas estables que proveñen das desintegracións dos quarks b, xusto na zona máis irradiada polas colisións do acelerador. O noso equipo levou a cabo a construción e instalación do 50% deste dispositivo no período 1998-2008 (figura 6), sendo o outro grupo colaborador o Instituto Politécnico Federal de Lausanne (EPFL). O detector IT é a parte principal doutro conxunto máis amplo, o Silicon Tracker (ST), caracterizado pola utilización de micropistas de Silicio como elemento sensor para a detección de partículas cargadas. O ST supera as 300000 canles electrónicas, o cal o converte nun proxecto técnico nada desprezable. Un membro do noso grupo da USC é na actualidade coordinador adxunto do ST de LHCb, e membro do Comité Técnico do experimento.



Figura 6: Inner Tracker (fabricado pola USC) instalado como parte do detector LHCb

Unha vez instalado o dispositivo experimental no acelerador, realizaremos a verdadeira vocación do noso grupo, que é a análise física dos datos, e a preparación das publicacións científicas, que esperamos que teñan un grande impacto na Física Fundamental. Como se explicou antes, estas permitirán establecer os límites do Modelo Estándar que goberna a Física na escala de distancias moi pequenas (o attometro). Estas publicacións son, en definitiva, a razón de ser do experimento, pois os nosos obxectivos non son especificamente tecnolóxicos, senón científicos.

Un dos aspectos máis interesantes deste tipo de investigación é que o físico que desexa facer avanzar a Ciencia debe utilizar con intelixencia os avances tecnolóxicos dispoñibles no mercado no momento de construír o seu experimento, e concentrar os seus esforzos de desenvolvemento e innovación en aspectos que en moitos casos non foron desenvolvidos antes por empresas multinacionais ou tecnolóxicas. Citemos como exemplos: os compoñentes electrónicos de baixo ruído, os sistemas de actuación mecánica e metroloxía de precisión, as fontes de alimentación estabilizadas, os detectores de imaxe de alta precisión, a transmisión por fibra óptica de alto ancho de banda, os ordenadores de alta capacidade de cálculo, os sistemas de monitorización lenta e robótica, as salas limpas e a instrumentación de microsensores, os detectores de fotóns,

a instrumentación nuclear, etc. Afortunadamente, moitos destes elementos teñen na actualidade un alto nivel de desenvolvemento e son accesibles comercialmente, o cal facilita a tarefa do físico, pero cómpre combinalos nun gran dispositivo conxunto, cunhas prestacións técnicas que son moi específicas e a miúdo ao límite do realizable. Todos os elementos citados anteriormente déronse en distintas facetas da realización do IT por parte do grupo de Santiago.

Vexamos tamén algúns exemplos das ideas que cumpriu desenvolver para facer viable o experimento, dentro das nosas responsabilidades. Precisamos mecanizar materiais ultralixeiros que ao mesmo tempo sexan ríxidos e condutores eléctricos, desenvolver e controlar chips electrónicos integrados (ASICs), capaces de ver os sinais das partículas en sincronía co entrecruzamento dos pulsos de protóns no acelerador (cada 25 nanosegundos), e tamén crear un laboratorio especial de microsoldadura onde estes chips poidan ser unidos aos elementos sensores do detector, de maneira que millóns de microsoldaduras permanezan estables durante un período de irradiación de polo menos 10 anos. Precisamos tamén que os detectores e a súa electrónica sexan resistentes á radiación, o cal obrigou a realizar previamente numerosas probas en distintos aceleradores. A circulación de elementos refrixerantes capaces de levarse a gran cantidade de calor xerada, sen apenas introdución de materia, é todo un reto de enxeñaría que tivemos que abordar, canda os nosos colegas de Lausanne. Éo tamén a transmisión de datos desde o acelerador cara os ordenadores a través de ligazóns de alta velocidade sen erros nin degradación do sinal. Necesitamos que a electrónica que deseñamos procese, coa frecuencia do acelerador (40 Mhz), sinais externos que permitan seleccionar as desintegracións dos quarks pesados, e abortar o resto. A consecución destes obxectivos esixe a creación de equipos mixtos de físicos e enxeñeiros, que deben traballar cóbado con cóbado, e onde son os primeiros quen lóxicamente orientan a dirección do proxecto.

Para comprender mellor a estrutura destes grandes experimentos, convén destacar que os catro detectores do LHC foron construídos polas universidades (europeas e americanas), nalgúns casos coa axuda de centros tecnolóxicos. Son estes grupos universitarios os que se responsabilizan das distintas partes, dentro dunha estreita coordinación técnica que ten como centro de operacións e de reunións o propio CERN. Como laboratorio, o CERN ten a responsabilidade primordial da construción e posta en funcionamento do acelerador, o Gran Colisor de Hadróns (LHC), que proporciona as colisións aos catro experimentos.

O noso grupo universitario da USC ten un tamaño similar ao doutros grupos europeos, arredor de 20 científicos e tecnólogos, incluíndo estudantes de doutoramento. Non sería xusto dicir que o noso nivel de financiamento ou de experiencia no campo é inferior ao dos nosos homólogos europeos, nin tampouco o nivel de responsabilidade no experimento, no caso concreto de LHCB. Ben é verdade que non todas as universidades europeas poden afirmar que están metidas neste tipo de investigación. Por exemplo, no Reino Unido temos como grupos de referencia no LHCB ao Imperial College, Oxford, Liverpool, Glasgow e Edimburgo. A participación española fórmaa, xunto ao grupo da Universidade de Santiago de Compostela, o da Universidade Central de Barcelona. O financiamento destas investigacións provén do Programa Nacional de Física de Partículas e Astropartículas, e está ligada á participación española como país membro do CERN.

Como resumo das contribucións realizadas ata agora pola USC ao experimento LHCB temos que facer notar, ademais das xa sinaladas, o desenvolvemento de partes esenciais do sistema de selección *on-line* de trazas de desintegracións de quarks *b*, chamado *High Level Trigger* (HLT), e tamén a creación dun sistema computacional baixo tecnoloxía GRID, ao servizo do experimento, do tipo chamado TIER2 ou de segundo nivel. Estas instalacións foron construídas polos dous grupos españois en LHCB, e atópanse na súa maior parte no campus da Universidade de Santiago.

No seu conxunto, o sistema proporciona aproximadamente o 5% da potencia de cálculo do experimento. Sinalaremos tamén que existe unha instalación en España no primeiro nivel de computación para o LHC (TIER1). Esta instalación encóntrase no centro PIC de Barcelona, e foi deseñada para dar servizo permanente aos 6 grupos españois involucrados no proxecto LHC (experimentos ATLAS, CMS e LHCb), proporcionando unha liña continua de transmisión e procesado dos datos procedentes do acelerador. Esta será especialmente importante cando o LHC acade a súa luminosidade máxima e facilitará o acceso dos grupos españois á análise destes experimentos.

Quixéramos salientar neste artigo que o estudo da Física Fundamental, que atraeu sempre a xeracións de estudantes novos, ten a súa raíz na curiosidade e o interese polos novos descubrimentos, que se esperan con frecuencia no Ensino Secundario. A Física como ciencia experimental non é pura teoría, senón unha equilibrada mestura entre teoría e tecnoloxía, e gustaríanos transmitir a idea de que formarse nestes temas é algo que está ao alcance dos alumnos, dentro do seu propio medio.

Bernardo Adeva é catedrático no Departamento de Física de Partículas da USC, foi membro do “staff” científico do CERN (1987-1991) e lidera actualmente o Grupo de Altas Enerxías de Santiago (GAES).

José Angel Hernando é profesor titular no Departamento de Física de Partículas da USC, foi membro do “staff” científico do CERN (2005-2009).

Xabier Cid Vidal está no Departamento de Física de Partículas da USC, realizando a súa tese de doutoramento no experimento LHCb.