

MATERIA VERSUS ANTIMATERIA. DE MENDELEEV AO LHCB.

XABIER CID VIDAL

Departamento de Física de Partículas (USC)

“... conquistar a materia é entendela, e facelo é necesario para entender o universo e a nós mesmos: e é por isto que a táboa periódica de Mendeleev, que perante so aquelas semanas aprendiamos a desleiar, era pura poesía...”

A táboa periódica. Primo Levi (escritor e químico).

Neste 2009 a máquina mais grande construída pola ciencia, o LHC, está a piques de comezar a xerar datos que deben desvelar algúns dos secretos aínda agochados da natureza. Tamén celebramos o 140 aniversario do inicio doutro longo camiño: a sistematización das propiedades dos elementos químicos. Demasiada coincidencia como para non aproveitar a ocasión de unir estas dúas celebracións.

Se Meendeleev “levantase a cabeza” habería dúas cousas que de seguro ían ser as máis abraiantes para el. A primeira sería comprobar que os elementos químicos que el coñecía case se teñen duplicado, sentíndose moi orgulloso de que a súa lei periódica seguise intacta. A segunda tería que ver coa enorme complexidade que se agacha no que el cría “verdadeiros elementos”. Pensemos que o químico ruso non chegou a aceptar o modelo de Thomson, porque pensaba, con ese mal xenio que lle caracterizaba, que o electrón era unha parvada.

Porén, aos catro anos de morrer a cousa complicouse co descubrimento do núcleo (Rutherford, 1911) coa presenza do protón, e máis tarde coa necesidade de admitir a existencia do neutrón, mesmo antes de ser descuberto (Chadwick, 1932), para poder entender as masas dos átomos.



Selos conmemorativos dos 100 anos do nacemento e 50 da morte do químico ruso

Pero imaxinemos a Mendelev saltando alporizado cando lle contasen que na década dos trinta houbo que aceptar a existencia dun estraño xemelgo para cada partícula –a antipartícula– como resultado das divagacións teóricas doutro xenio (Dirac, 1928). Unha “Anti-Táboa periódica? Máis parvadas”, diría.

E non obstante, hoxe en día, non soamente podemos especular xa sobre a existencia da nosa “antitáboa periódica” (da que so nos separa, en teoría, a nosa inaptitude técnica) senón que poderíamos pensar noutra cunha terceira dimensión da propia táboa introducindo partículas subatómicas con estrañeza e, por exemplo, hiperátomos. E divagando de xeito similar podemos falar dunha “Táboa escura” clasificando os compoñentes da materia escura, que sabemos que está aí en enormes proporcións pero precisamente cunha natureza aínda por descubrir.

A ANTIMATERIA.

Paul Maurice Adrian Dirac, en 1928 reformulou a ecuación de Schrödinger tendo en conta principios relativistas. Resolvéndoa para unha partícula libre (como pode ser un electrón non interactuando) obtense, coa formulación de Dirac, para a súa enerxía o valor:

$$E = \pm \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4}$$

A enerxía negativa non ten explicación, dado que unha partícula libre só posúe enerxía cinética e esta sempre é positiva. Dirac postulou como explicación, que o baleiro é aquel estado precisamente ocupado por partículas, por exemplo electróns, coas enerxías máis baixas (negativas). Como os estados que ocupan son os máis estábeis -de mínima enerxía- non interaccionan con nada e polo tanto pasan para nós desapercibidos. Se por unha acción exterior suficiente (por exemplo a incidencia dun fotón moi enerxético) extraemos un deses electróns con enerxía negativa, este pasará a ocupar un estado baleiro de enerxía positiva. Daquela “materialízase” un electrón, e ademais no baleiro queda un “oco” de enerxía negativa que a tódolos efectos se comporta como unha partícula de carga positiva (para “compensar” a negativa do electrón) e de igual masa que este.

O fotón incidente crea un par de partículas: $\gamma \rightarrow e^- + e^+$

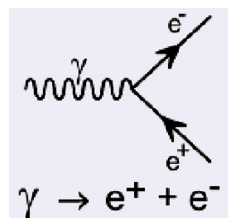
Trátase dunha fenómeno claramente en sintonía coa famosa relación masa-enerxía de Einstein.

Por outra banda, dado que hai un estado de baixa enerxía baleiro, un electrón calquera de enerxía positiva “baixará” a ocupalo desaparecendo o oco e aparecendo a enerxía “liberada” por ese electrón en forma de fotón. Xa que logo, a relación masa-enerxía de Einstein volve a estar detrás do proceso.

$$e^- + e^+ \rightarrow \gamma$$

O primeiro proceso chámase de creación de pares e este segundo de aniquilación.

Polo tanto, a unión da mecánica cuántica coa relatividade especial da como resultado que tódalas partículas posúen unha especie de antagonista, a antipartícula, de igual masa e demais características físicas pero diferenciándose no signo contrario dalgunhas características de interacción, como son a carga eléctrica ou o momento magnético.



No caso particular visto do electrón, denominamos á antipartícula positrón (e^+).

En 1932, Carl Anderson descubriu os positróns nos raios cósmicos. En 1955 Emil Segre e Owen Chamberlain descubriron, xa coa axuda dun acelerador de partículas, o antiprotón, mentres que en 1956 Cork e Lambertson descubriron o antineutrón. Leon Lederman no 1965 detecta o antideuterón e en 1969 Prokoshkin detecta o antihelio-3. O CERN en 1996 anunciou que fabricaran 9 átomos de antihidróxeno, é dicir un átomo formado por un positrón que xira arredor dun antiprotón. Foron os primeiros antiátomos fabricados.

Dan Brown –o autor de “O código Da Vinci”- tentou tirar proveito dos descubrimentos sobre antimateria no CERN na súa novela “Anxos e demos” pero foi demasiado lonxe.

Pero volvendo a xa mencionada “irascibilidade de Mendeleev”, teríamos que aceptar que unha pregunta airada, pero moi lóxica, tamén sería feita polo químico ruso: “¿Por que o universo coñecido está formado de só un deses tipos de partículas?”

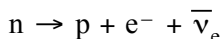
Experimentos derivados da “fábrica de antimateria” do CERN, como ASACUSA, ATHENA e ATRAP, e por outra, os baseados en aceleradores de partículas, como BABAR nos EEUU, BELLE en Xapón, e LHCb no CERN (entre outros) están detrás da resposta a esa intrigante pregunta. Precisamente o Departamento de Física de Partículas da USC participa activamente no experimento LHCb.

AS SIMETRÍAS (E A SÚA VIOLACIÓN).

A busca de simetrías na Natureza é unha das constantes da Física. Ocorre que estas son tremendamente útiles nesta ciencia, xa que permiten avaliar o comportamento real dos sistemas. Así, por exemplo, as leis da conservación da enerxía ou do momento lineal son unha consecuencia da simetría do tempo e do espazo.

Foi en 1956 cando un extraordinario experimento dunha xenial física, Chien Shiung Wu (estadounidense de orixe china), sinala a dirección a seguir na procura dunha explicación á asimetría entre materia e antimateria

O Cobalto-60 desintégrese seguindo o mecanismo beta menos (interacción feble):



O que Wu atopou é que as partículas emitidas escapan preferentemente nunha dirección do espazo. Ata o de aquela, os físicos pensaban que as interaccións deste tipo eran insensíbeis a unha operación de simetría que invertese as coordenadas espaciais. Esta operación coñécese no mundo da mecánica cuántica como “Paridade”. Xa que logo, polo menos a interacción feble presentaba “unha violación” desta simetría: a violación P.

Por certo que onde si hai simetría é na inxustiza cometida polo comité Nobel con Wu e Mendeleev, posto que ningún dos dous recibiu ese premio. O ruso, porén, ten o seu nome hai moito tempo incluído na Táboa Periódica, e quen sabe se un dos novos elementos, aínda sen nome, chegará a ser chamado “Wuium”.



Chien Shiung Wu

Outra lei de conservación fundamental é a da carga eléctrica. A simetría correspondente chámase C, e consiste en substituír nun proceso unha partícula pola súa antipartícula. Pensouse

entón que se a vez que se violaba a simetría P se violaba simultaneamente a simetría C as cousas volverían ao seu sitio. É dicir as partículas elementais satisfacerían a simetría CP.

Unha forma orixinal de entender o que significan esta simetría e a través do “logo” do propio experimento LHCb. Apliquemos o proceso a un conxunto de letras con diferente cores como as da figura. Así, a transformación CP consistiría en: C) intercambiar as cores (onde estaba escuro pasa a claro e viceversa), e, P) facelas reflectir tal e como se vería ante un espello. As letras LHCb de abaixo son as transformadas CP das de arriba (e viceversa)! Para partículas, a simetría esencialmente implica que o sistema non muda ante unha transformación de tipo CP (tras aplica-la transformación volven quedar igual).

A mediados dos anos 60 do século pasado Cronin, Fitch e outros descubren en Brookhaven (EEUU) que o mesón K (un mesón é unha partícula composta por unha parella quark-antiquark) non respectaba a simetría CP.

Así os anti-kaons transfórmanse espontaneamente en kaons, pero o proceso inverso ocorre con moito menos frecuencia.

A diferenza destes procesos, aparentemente simétricos, coñécese como “violación espontánea da simetría CP” e a súa comprensión pode dar resposta a asimetría entre materia e antimateria no universo.

Por iso no logo do LHCb aparece tamén unha liña inclinada indicando a rotura do comportamento especular.

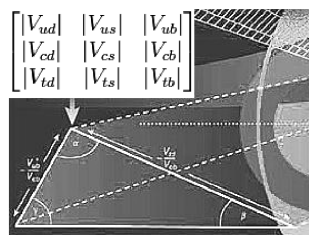
Esta violación é unha das tres famosas condicións expostas no ano 1967 polo físico ruso Andrei Sakharov para explicar esta asimetría. Outras das condicións é a necesidade dunha fase de violento desequilibrio termodinámico, e a terceira é a aparición de procesos favorables para a creación de barións (partículas formadas por tres quarks), como son os protóns ou os neutróns.

Pénsese na importancia de verificar o fenómeno da violación CP de forma incontestable e cuantitativa. Estaríamos a atopar a resposta buscada a por que o universo está feito de materia. En efecto, se a interconversión entre partículas e antipartículas ou os procesos de desintegración, non son simétricos, é fácil entender que unhas acabaron por “triunfar” fronte as outras.

Esta é a principal materia de estudo do experimento LHCb (experimento do CERN), no que como xa se mencionou participa o Departamento de Física de Partículas da USC. O obxectivo de atopar esta rotura da simetría CP é un dos fundamentos deste experimento.



Logo de LHCb



Triángulo de unitariedade.
Matriz CKM.

A FÍSICA DOS MESÓNS B.

A comezos dos anos 70 críase na existencia de dúas familias de quarks, (u,d) e (s,c), aínda que o c (*encanto*) aínda non fora atopado experimentalmente. É entón cando os xaponeses Kobayashi e Maskawa, seguindo os traballos do italiano Cabbibo, introducen un formalismo que explica as probabilidades de que se produzan interaccións nas que un quark se transforma noutro a través da interacción feble (*matriz CKM*). Pero o máis interesante é que este formalismo

estaba tamén fondamente relacionado co estudo da violación CP, dependendo os elementos da matriz CKM desa violación. Precisamente Kobayashi e Maskawa veñen de seren galardoados co Premio Nobel de Física 2008 por eses traballos.

Hoxe en día o Modelo Estándar de Partículas debuxa un escenario con tres familias de quarks: (u,d),(s,c) e (b,t), tendo sido todos eles xa observados. Ábrese pois o campo de estudio da violación CP observando transformacións de quarks entre as tres familias. Precisamente as relacións entre as amplitudes destas transformacións pode ser representado graficamente nun triángulo chamado “triángulo de unitaridade” e que se ten convertido nunha ferramenta imprescindible neste campo de investigación.

Nos anos 80 comeza o interese polo estudo dos procesos de violación dos chamados mesóns B, que están formados como todas as partículas deste tipo por una parella quark-antiquark, sendo neste caso un dos membros da parella de “sabor” b (ou anti-b).

Os estudos cos mesóns B comezan nos 80 en aceleradores de partículas en Hamburgo (Alemaña) e Cornell (EEUU), e seguen nos 90 coas experiencias BELLE (Xapón) e BABAR (EEUU).

A principio dos anos 2000 desde BABAR e BELLE anunciouse que esta violación está presente na desintegración dos mesóns B, en particular as correspondentes ao ángulo beta do triángulo de unitaridade.

Para completar o estudo no experimento LHCb do CERN unha cantidade moitísimo maior de mesóns B serán producidos nas colisións protón-protón do acelerador LHC. En particular, serán de moito interese os mesóns B's formados por parellas de quarks (s,b) o que permitirá coñecer os resultados para o terceiro ángulo (o gamma) do triángulo de unitaridade.

O EXPERIMENTO LHCb

No plano experimental, o quark b desintégrese “relativamente lento”, o que quere dicir que un mesón B pode percorrer unha distancia medible dentro dun detector preparado para iso.

O acelerador LHC de 14 TeV, o máis potente do mundo, vai producir choques protón-protón que permitirán estudar nos seus catro enormes detectores (ATLAS, CMS, ALICE e LHCb) moitos dos enigmas da Física das Partículas Elementais.

No experimento LHCb interesan a aparición de pares antagonistas de mesóns B: uns levando un quark b na súa composición quark-antiquark, e os outros levando como antiquark o anti-b. Poderemos estudar as diferenzas de comportamento na desintegración deses mesóns B antagónicos.

En realidade trátase de continuar o xa realizado en BABAR e BELLE pero a unha escala moitísimo maior.

O detector para este experimento é moi singular, pois non se trata do “típico” esquema cilíndrico ocorrendo a colisión no centro do aparato. Neste caso, o choque protón-antiprotón ocorre nun extremo do detector e soamente vanse estudar, xa que logo, o 50 % dos sucesos. As razóns económicas (soamente precisamos a metade da instrumentación) non teñen sido menores para o deseño deste detector.

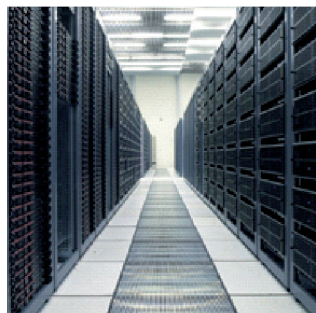
Outra característica radica na forma “pseudocónica” que presenta, sendo o vértice do cono o punto de colisión. A razón deste deseño, cun ángulo de abertura de 17.2° , débese a que nese volume cónico pódense estudar o 43 % dos sucesos buscados (lémbrese que o máximo sería o 50 %). Preto do 90 % das aparicións de mesóns B producidos a partir dos choques protón-protón de 7 TeV cada un, prodúcese nese ángulo duns 17° a un lado e ao outro do punto de colisión.

Desde o punto de colisión ata o final do detector van aparecendo unha enorme variedade de dispositivos (sub-detectores) que deberán ir dando información do paso das partículas a través deles.

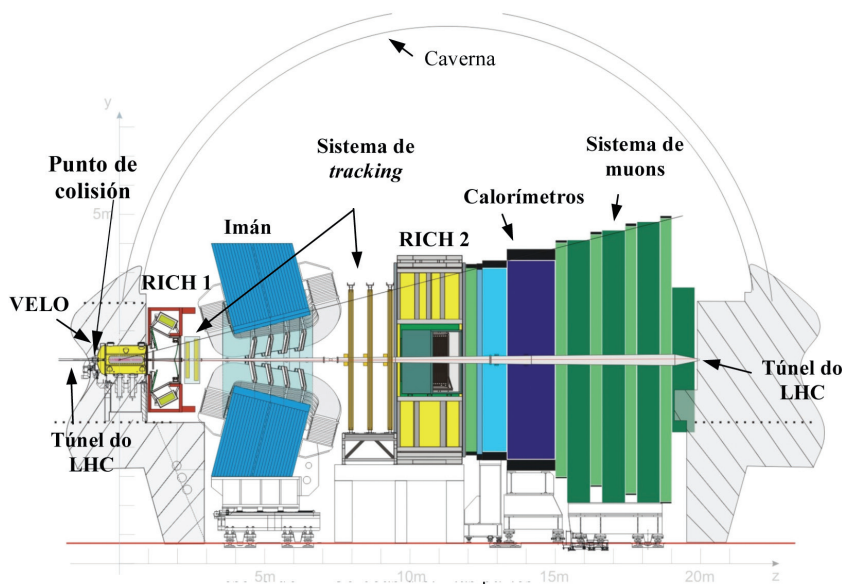
Aínda que non alcanza as dimensión de ATLAS (44 m de longo x 20 m de alto) ou CMS (22 m de longo x 15 m de alto), as dimensión son notábeis: 20 m de longo x 10 m de alto.

As súas partes máis senlleiras son, seguindo o *percorrido das partículas* trala colisión:

- VELO (detector de vértices): construído arredor do punto de interacción protón-protón ten como obxectivo principal situar este exactamente,
- RICH 1: permite identifica-las partículas de baixo momento,
- imán: pensado para curva-la traxectoria das partículas cargadas medindo así o momento destas,
- sistema de tracking: Situado antes e despois do imán permite reconstruí-las traxectorias, medindo así ademais, grazas ao mencionado efecto do imán, o momento das partículas. Na construción e deseño dunha das súas partes fundamentais (o *Silicon Tracker*) participa a USC,
- RICH 2: deseñado para identifica-las partículas de alto momento,
- calorímetros: dan unha boa medida da enerxía que teñen as diferentes partículas que saen da colisión,
- sistema de muóns: co propósito específico de identificar este tipo de partículas.



"A Granxa de PCs" no CERN.



Deseño de LHCb coas distintas partes

A INFORMÁTICA NO LHCb.

No acelerador LHC os protóns crúzanse cada 25 nanosegundos, e por tanto 40 millóns de veces por segundo. O número de colisións “visíbeis” no detector LHCb estímase en 16 millóns por segundo. Deles soamente uns poucos son de interese para os obxectivos deste experimento, e por tanto hai que decidir moi rapidamente que sucesos deben ser rexistrados e cales non.

Unha electrónica de gran precisión e un software sen precedentes deberán facer o traballo. Nunha primeira etapa, cada subdetector reducirá o número de sucesos a 1 millón por segundo en tan só 4 microsegundos. Nunha segunda etapa, unha gran instalación de ordenadores interconectados (chamada “granxa de PCs”), diminuírá nun factor de 500 en 10 milisegundos o número de eventos que cheguen a el.

Aínda así, hai que rexistrar 2000 sucesos por segundo. Cada un deles comprende datos dunhas 140 partículas, polo que estaremos falando duns 250 Megabytes por segundo. É dicir, o equivalente a encher un CD de música cada tres segundos. Agora pénsese nunhas 10 horas diarias, semanas, meses case sen interrupción.

Este reto tentará ser resolto mediante a GRID da que falamos no seguinte epígrafe.

A USC NO LHCb.

A colaboración LHCb agrupa a 600 científicos procedentes de 47 universidades e laboratorios de investigación, de 14 países de Europa, Asia e América. A Universidade de Santiago, xunto coa Autónoma de Barcelona, forman parte deste experimento. A súa responsabilidade nel é diversa e o equipo está composto por físicos de partículas titulares da Universidade, físicos electrónicos e enxeñeiros contratados e estudantes de doutoramento, como o que firma este traballo.

A tarefa da USC no experimento esténdese a diversos campos, que tocan tanto aspectos máis técnicos como outros máis puramente físicos. Brevemente, podemos describir as nosas áreas de traballo en:

- Adaptación e mantemento do CESGA no GRID do CERN. O GRID é un dos proxectos máis ambiciosos asociados ao LHC do CERN e un dos grandes beneficios indirectos que aportará á sociedade o experimento. Como se explicou, a cantidade de datos xerada será inmensa, co que o seu tratamento requirirá unha potencia de cálculo moito maior do que se pode atopar no propio emprazamento de Xenebra. Xa que logo, precísase colaboración doutros puntos de xeito que as máquinas de calquera lugar estean dispoñíbeis para seren usadas polos científicos independentemente de onde estean. Xa que logo, o GRID consiste esencialmente dunha rede internacional de ordenadores interconectados para realizar traballos asociados ao experimento. Para os físicos, esta rede será como un único “superordenador” ao que entregarán as tarefas para seren realizados en calquera punto do planeta que estea dispoñíbel. As vantaxes deste tipo de sistema son obvias noutras aplicacións. O obxectivo a acadar para o equipo da USC é a incorporación do CESGA (Centro de Supercomputación de Galiza) ao GRID de xeito que as súas máquinas estean dispoñíbeis para todo o mundo.
- Instalación do “Silicon Tracker” e preparación da súa electrónica. O Silicon Tracker é un dos sistemas máis importantes e avanzados para a detección de partículas no LHCb. Como se comentou, é empregado en diversas partes do sistema de *tracking*, que ten como misión axudar a reconstruír a traxectoria das partículas grazas aos choques destas

co propio detector. O Silicon Tracker está composto basicamente por chips de Silicio que, seguindo os principios da física de semicondutores, son capaces de determinar con moita exactitude por onde pasou esa partícula. Estes chips producen sinais que logo deben ser dixitalizados e enviados ao ordenador correcto, para a súa análise en tempos moi pequenos, tal e como se explicou anteriormente. Hai que ter en conta que estes choques son o sinal de identidade das partículas, o único xeito que temos de saber que están aí e como se comportan. Xa que logo, o correcto funcionamento e coordinación de cada subdetector é fundamental para que o experimento funcione. Isto converte pois o Silicon Tracker nun tema especialmente delicado.

- Análise e preparación da física do experimento. Unha vez os datos son recibidos e unha parte é filtrada procédese á súa análise. Hai que ter en conta que o que se recibe non é para nada un sinal limpo co tipo de desintegracións procuradas (como as dos exemplos anteriores). A física experimental de hoxe en día dista bastante de tomar unha simple medida, requírese unha análise fonda e intensa dos datos. Hai que saber como discriminar o que estamos a buscar doutras cousas parecidas. Hai que saber como variará o que estamos a observar en función de que modelo teórico esteamos a considerar. A todo isto é ao que se dedican os grupos da física, nos que tamén participa activamente a USC. Cada grupo céntrase nun tipo de reacción de interese e, mediante a utilización de datos simulados (simulacións de Monte Carlo), tenta extraer dos datos que ofrecerá o detector a información concreta. Pódese ademais prever que ocorrerá para cada modelo teórico existente e proporcionado polas simulacións.
- Tracking e Trigger. Como xa foi indicado, o detector ao final o que ofrece son unha serie de choques nos subdetectores que hai que converter en información máis clara para seren empregada polos grupos da física. Igualmente non é tecnicamente posíbel recoller toda a información producida nas colisións. Xa que logo, faise tremendamente importante ir eliminando datos segundo se van recollendo. Isto fai precisa unha reconstrución parcial do suceso (recrear o que sucedeu no interior do detector) e a existencia dunha serie de cortes para eliminar aqueles sucesos que se considera non é probábel que correspondan a partículas co quark b (que lembremos que era o principal obxectivo de LHCb). Nisto esencialmente consiste o trigger. Unha vez o trigger selecciona que sucesos gravar estes son almacenados e poden ser analizados con máis calma. A parte de reconstrución das traxectorias e vértices (lugar onde se cruzan as traxectorias) pode ser levada a cabo previamente á entrega dos datos aos grupos da física, pois é común a tódalas reaccións a estudar. É o que xeralmente se coñece como “tracking”. Nalgúns destes temas participan tamén investigadores da nosa Universidade.

Aínda que o noso é un grupo pequeno e con medios limitados a nosa contribución é importante e toca temas de moi diferente enfoque pero de gran importancia para o detector. Agardamos agora con gran expectación o comezo das colisións neste ano 2009.

FINALIZANDO.

Tense dito que experimentos como LHCb constitúen as novas catedrais da humanidade (e por descontado da ciencia), e desde logo é indiscutíbel que desde o punto de vista do coñecemento así é. O LHC foi posto en marcha en setembro de 2008, pero por mor dunha avaría os primeiros datos de certa importancia comezarán a chegar a finais de 2009, polo que a tensión é máxima. Atópanse o que se atope, fágase o que se faga, nada terá que ver co que se comprendía do Universo 100 anos atrás. Pero tamén con total certeza, nun futuro non tan afastado, cando se celebre o cabodano destes experimentos científicos actuais, a nosa concepción do que nos rodea será xa inimaxinábel para nós, e o que pretendemos comezar a albiscar como un “todo” converterase nunha pequena parte do que a Natureza nos ten preparado.

É difícil saber que é o que pensaría Mendelev do que está a piques de ocorrer 140 anos despois de que el propuxera a primeira ordenación periódica dos elementos. Pero a pesares da súa enorme personalidade e mesmo soberbia, é imposible que non se sentise abraiado a 100 m de profundidade pola máquina máis grande e complexa construída polos seres humanos.

Con Mendelev comezou o camiño para comprender as propiedades dos elementos coñecidos, e agora, 100 anos despois do seu pasamento, seguimos tratando de dar resposta a preguntas non moi diferentes.

“Poderíamos vivir no presente sen un Platón, pero requírese o dobre de *Newtons* para descubrir os segredos da Natureza, e para traer a vida en harmonía coas súas leis.”

Dmitry Ivanovich Mendelev

REFERENCIAS

1. Adeva B., Garrido LL. (2008). "*El experimento LHCb*". Revista Española de Física 22 (2), pp 23-31.
2. Albajar C., et al (2006). "*El programa experimental del LHC*". Revista Española de Física 20(2), pp 18-24.
3. Cid X., Cid R. (2009) "*Taking energy to Physics classroom from LHC (CERN)*" Physics Education 44 (1), pp 78-83.
4. Cid X., Cid R. (2008) "*¿Es segura la tierra para el LHC (CERN)?*". Revista Española de Física 22 (4), pp 33-36.
5. DANINOS F. (2006). "*La curieuse disparition de l'antimatière*". La Recherche, Dossier N° 23. PARIS, pp. 42-49.
6. ELEMENTAIRE. (2007). "*LHCb: un détecteur de toute beauté*". Elementaire, N° 5 Revue d'Information Scientifique . PARIS, pp. 55-57.
7. GAES (Grupo Experimental de Altas Enerxías da Universidade de Santiago de Compostela) <http://www.usc.es/gaes/>
8. GRUSZOW S. (2006). "*Les particules élémentaires point par point*". La Recherche, Dossier N° 23. PARIS, pp. 82-87.
9. JONES C., KERZEL U. (2007). "*LHCb prepares for a RICH harvest of rare beauty*". CERN COURIER, Vol 47 N° 6. XENEBRA, pp 30-33.
10. LHC The Guide - CERN FAQ (2008). Communication Group, January 2008 CERN -Brochure 2008-001-Eng.
11. LHCb WEBSITE: <http://lhcb.web.cern.ch/lhcb/>
12. RTDInfo (2007). "*The promise of the large collider*". Magazine of European Research. February 2007, pp 10-11.
13. SITIO WEB: "*Achegándonos ao LHC*". www.lhc-closer.es