

NÚCLEOS E PARTÍCULAS

*Carlos Pajares Vales**
Universidade de Santiago
de Compostela

INTRODUCCIÓN

Desde os tempos máis remotos, nas máis antigas civilizacións, o home preguntouse polo interior das cousas, furgou dentro delas e tentou coñecer qué é o que lles dá consistencia e se existe algo subxacente e común a todas elas a pesar da súa infinita variedade.

Hai máis de 2500 anos, en Grecia, Tales constatou que calquera substancia podía clasificarse como sólido, líquido e gas; dado que a auga existía nas tres formas, ¿non se podía da-lo caso de que fose a auga o constituínte de toda a materia? Na mesma liña de pensamento, Aristóteles e os seus seguidores postularon que a materia estaba formada por terra, lume, aire e auga. O seu mestre Platón elaborou a idea da existencia de estruturas formais básicas, como as figuras xeométricas fundamentais a partir das cales se ‘formaban’ tódalas cousas. Platón supoñía que estas estruturas básicas eran triángulos. Anteriormente Leucipo e o seu discípulo Demócrito

(585 a. C.) suxeriron a posibilidade de que a materia estivese constituída por pequenas partículas indivisibles, os átomos (ατομος). A construción de tódalas cousas a partir doutras pezas elementais non é, desde logo, unha verdade necesaria que tarde ou cedo tiña que establecerse. Así, por exemplo, en culturas orientais e tamén en determinados momentos do século XX pensouse que existía unha globalidade, de tal xeito que todo estea composto de todo, así que calquera parte inflúe e dá consistencia, en maior ou menor medida, a calquera outra parte, e reciprocamente. Neste esquema non é certo que uns poucos elementos constrúan tódalas cousas; só podería selo no sentido dunha aproximación á realidade, válida en determinadas condicións cando se puidese despreza-la influencia da maior parte de elementos.

O século XIX comezou co establecemento da moderna teoría atómica da materia. Sabíase que unha gran variedade de substancias podían obterse combinando diferentes cantidades

* Catedrático de Física Teórica.

duns poucos elementos. Dalton, en 1808, propuxo que estas combinacións se entenderían se cada elemento estaba constituído por átomos. A combinación de átomos de distintos elementos producía as moléculas das substancias non elementais. Supuxo que os átomos eran indivisibles e por iso adoptou o nome grego. En 1869, Dimitri Mendeleev descubriu que ó ordena-los elementos atómicos do máis lixeiro (hidróxeno) ó máis pesado, as súas propiedades se repetían a intervalos regulares (sistema periódico dos elementos). Esta regularidade apuntaba, como se vería posteriormente, a que os átomos non son elementais senón sistemas complexos, compostos doutros 'elementos'. As diferentes combinacións destes elementos dan lugar ós distintos átomos, o que explicaría as regularidades.

O século remata con dous descubrimentos fundamentais na busca da elementalidade: o descubrimento do electrón por J. J. Thomson en 1897, premio Nobel 1906 (posteriormente Millikan mediría a carga, premio Nobel 1923) e o da radioactividade por H. Becquerel, Pierre e Marie Curie (p. N. 1903). Rutherford (p. N. de Química 1908), traballando no laboratorio Cavendish de Cambridge que dirixía Thomson, demostra nos anos 1896-1900 que a radiación de Becquerel tiña tres compoñentes diferentes: a radiación α , β e γ . Esta última resultou ser radiación electromagnética de alta frecuencia, incluso superior á dos raios X descubertos por Roentgen en 1896 (p. N. 1901). A radiación β consistía en

electróns e a α en partículas masivas cargadas positivamente e que posteriormente foron identificadas como núcleos de átomos de helio.

Co século estréase tamén a Mecánica cuántica. O día de Santa Lucía de 1900, Planck (p. N. 1918) explica a dependencia na frecuencia e na temperatura da densidade de enerxía do chamado corpo negro e introduce a hipótese de que a radiación era absorbida ou emitida en cantidades discretas proporcionais á frecuencia da dita radiación.

$$E = h \nu \quad (1)$$

A constante de Planck h escribíase e calculábase por primeira vez. Einstein (p. N. 1921) retomaba en 1905 a dita hipótese para explica-lo efecto fotoeléctrico, indo máis aló ó supoñer que a radiación electromagnética non só era absorbida ou emitida en cantidades $h\nu$, senón que eran partículas de enerxía $h\nu$. O mesmo ano 1905, Einstein tamén publicaba a Teoría da Relatividade Restrinxida, coa que se transformaba radicalmente o concepto de espacio e tempo e se contemplaban as transformacións de masa en enerxía e reciprocamente de enerxía en masa.

A Mecánica cuántica —construída na década dos anos vinte— e a Relatividade constitúen dúas grandes revolucións científicas conceptuais imprescindibles para comprender multitude de fenómenos físicos; en concreto, fixeron posible o avance na busca da elementalidade.

DESCUBRIMIENTO DO NÚCLEO ATÓMICO

Na mesma primeira década, Rutherford e Soddy descubriron que algúns átomos podían desintegrarse espontaneamente, producindo outros átomos. Tamén Pierre Curie e Marie Curi-Sklodowska descubren novos elementos radioactivos, o radio e o polonio (a Marie Curie concedéronlle por isto o premio Nobel de Química 1911) nos produtos de desintegración do uranio. Con todo isto empeza a sospeitarse que os átomos teñen estrutura interna e que esta debería diferir moi pouco duns átomos a outros próximos no sistema periódico.

Nos anos 1909-1913, Ernest Rutherford —agora en Manchester—, Ernest Marsden e Hans Geiger realizaron diversos experimentos cos que demostraban que efectivamente os átomos posuían unha estrutura interna: o núcleo. Os experimentos consistían en bombardear unha folla delgada de ouro con partículas α provenientes dunha fonte de radio⁽¹⁾ (ver figura 1).

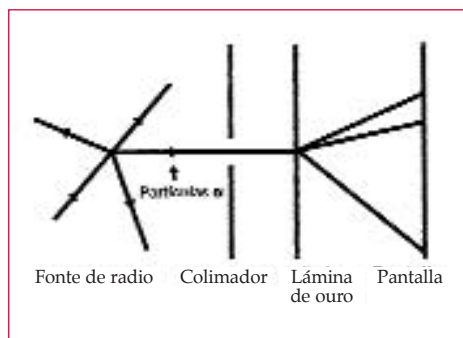


Figura 1. Experimento de Rutherford.

Se a distribución de materia dentro do átomo fose homoxénea, esperaríase que a maior parte de partículas α saísen cara a adiante e moi poucas a grandes ángulos. Sen embargo saían moitas máis das esperadas a grandes ángulos e mesmo algunhas rebotaban para atrás. Segundo Rutherford «foi coma se dispararas unha bala de 4 cm contra un anaco de papel de seda e rebotara cara a atrás golpeándote». Dentro dos átomos había concentracións de materia moito máis pesadas cás partículas. O átomo está composto de electróns situados en capas, no exterior dun núcleo cunha carga positiva igual ó número de electróns exteriores. O núcleo ten unhas dimensións duns cantos fermi $1 \text{ fm} = 10^{-13} \text{ cm}$. Como as dimensións dos átomos son da orde de amstrongs, $1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ cm}$, os núcleos son cen mil veces máis pequenos cós átomos. Isto non quere dicir que os átomos estean practicamente baleiros. Os electróns están ligados ós núcleos mediante a forza atractiva (por teren cargas opostas) coulombiana. Esta forza eléctrica entre cargas, responsable de que estean ligados os electróns ó núcleo e que non escapen, é debida á existencia dun campo eléctrico que dota de consistencia o espazo entre os electróns e o núcleo. Outra maneira de expresa-lo mesmo, é dicir que entre os electróns e o núcleo se intercambian fotóns, os 'cuantos' do campo electromagnético existente. Estes fotóns dan consistencia e enchen o espazo entre os electróns exteriores e o núcleo.

O experimento de Rutherford é típico de toda unha serie de ensaios que se sucederon ó longo do século para tratar de explora-lo interior de obxectos cada vez máis pequenos. Fundamentalmente, o experimento consta dun feixe de partículas (partículas α no experimento anterior) aceleradas para dotalas dunha enerxía E e un momento p suficientemente alto, que inciden sobre un branco. As ondas asociadas ás partículas do feixe teñen unha lonxitude λ relacionada co momento lineal p da partícula

$$P = h / \lambda \quad (2)$$

de tal maneira que se se quere explorar un branco de tamaño caracterizado polo radio R , se verifica $\lambda \leq R$ (figura 2).



Figura 2. Lonxitude de onda menor có tamaño do obxecto.

Ondas con lonxitude de onda maior có radio son insensibles ó branco, non se dan conta da súa existencia. Canto máis pequeno é o branco que queremos explorar, menor é a lonxitude de onda e máis grande debe ser p e, polo tanto, maior a enerxía da partícula lanzada como sonda. Por iso, a medida que se quere entrar máis no interior e explorar

tamaños máis pequenos, necesítanse aceleradores máis potentes.

ESTRUCTURA DO NÚCLEO. PROTÓNS E NEUTRÓNS

A estrutura electrónica dos átomos explícase rapidamente, primeiro cos modelos simplificados de Bohr (p. N. 1922) e Sommerfeld e despois coa formulación da Mecánica cuántica e en particular da ecuación de Schrödinger (p. N. 1933), o principio de incerteza de Heisenberg (p. N. 1932) e o principio de Pauli (p. N. 1945). Sen embargo, poucas cousas se sabían sobre o núcleo central, á parte de que



Erwin Schrödinger, premio Nobel de Física en 1933, na súa intervención no XIV Congreso da Asociación Española para o Progreso das Ciencias celebrado en Santiago de Compostela no ano 1934.

estaba cargado positivamente e que era moi denso. Diversos experimentos para estudia-lo núcleo foron realizados por Rutherford e Chadwick na década dos vinte, no Laboratorio Cavendish de Cambridge, ó que Rutherford volvera sucedendo a Thomson no cargo de director. Tamén Irene Joliot-Curie e Frederic Joliot (p. N. de Química 1935) realizaban uns experimentos similares en París.

Rutherford suxerira a existencia dunha partícula neutra, de masa practicamente igual á do protón. Chadwick (p. N. 1935) demostrou finalmente, en 1932, a existencia do neutrón mediante un experimento no que lanzaba partículas α provenientes dunha fonte radioactiva sobre un branco de berilio. Tíñase observado nos experimentos mencionados anteriormente que se producía radiación penetrante neutra. Chadwick estudiou esta radiación, facéndoa incidir sobre parafina de cera, substancia rica en hidróxeno. A radiación, ó chocar cos núcleos de hidróxeno, protóns, facíao retroceder⁽¹⁾ (ver figura 3). Estes protóns eran detectados por unha cámara de ionización que contén gas e dous electrodos. Cando os protóns entran na cámara, golpean os electróns dos átomos do gas facendo que estes queden ionizados con carga positiva, o que provoca unha diferenza de potencial nos electrodos. Se estes electrodos están encaixados nun circuíto exterior, aparece unha corrente eléctrica. Chadwick podía así medi-lo número de protóns e a súa enerxía para deducir que debían de ser golpeados

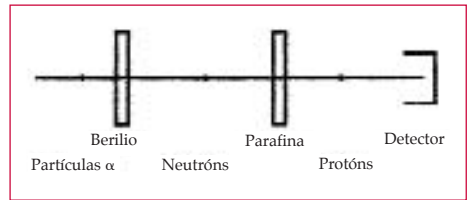


Figura 3. Experimento de Chadwick.

por partículas da mesma masa e neutras, neutróns. Un núcleo de masa A veces a dun protón ou neutrón ten Z protóns (igual número có de electróns) e $A - Z$ neutróns. O núcleo dun átomo de Z electróns ten que ter Z protones para ser neutro, pero pode ter diferente número de neutróns. Ós núcleos co mesmo Z e diferente A chámase isótopos. A forma dun núcleo é aproximadamente esférica cun radio R , $R = R_0 A^{1/3}$, $R_0 = 1.1$ fm, segundo revelaron definitivamente os experimentos de colisións de electróns con núcleos iniciados no acelerador de Stanford por Hofstadter en 1953 (p. N. 1961).

FORZAS NUCLEARES

Os protóns do núcleo atómico experimentan a repulsión coulombiana; sen embargo, o feito de permaneceren unidos no núcleo implica a existencia dunha forza atractiva moi poderosa capaz de vencer a repulsión electromagnética. Debido á súa intensidade chámase forza forte e é experimentada polos protóns e neutróns pero non polos electróns (en xeral exercérase entre todo un conxunto de partículas chamadas hadróns e non entre outro

conxunto de partículas chamadas leptóns); a forza é de curto alcance, uns poucos fermis, en contraste coa forza electromagnética que ten alcance infinito. Este comportamento diferente suxeriu a Yukawa en 1935 (p. N. 1949) predici-la existencia do mesón π (en realidade son tres π^+ , π^- , π^0 cunha masa de cerca de 140 Mev) que tiña nas interaccións fortes o mesmo papel có fotón nas electromagnéticas. En efecto, se considerámo-lo potencial $V = \exp(-\mu r) / r$ (potencial de Yukawa) a súa transformada de Fourier é $1 / (q^2 + \mu^2)$, que corresponde ó intercambio dunha partícula de masa μ , entre as partículas sometidas ó potencial V . No caso de interacción coulombiana, $V(r) = 1 / r$, alcance infinito e $\mu = 0$, masa do fotón. No caso de interacción forte $V(r) \sim \exp(-\mu r) / r$ se $r > 1/\mu \approx 1$ fermi. Polo tanto $\mu = 100-200$ Mev. Outra maneira equivalente de deduci-lo mesmo resultado é utilizando o principio de incerteza enerxía-tempo de Heisenberg. En 1947 o mesón π foi detectado por Powell (p. N. 1950) e outros colegas en experimentos de raios cósmicos. Anteriormente detectárase o mesón μ^- de masa 105 Mev que se cría que era a partícula predicida por Yukawa. Sen embargo non o era, dado que os muóns son leptóns e non interaccionan fortemente.

Os raios cósmicos consisten en diversas partículas⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾ (protóns, núcleos, electróns, neutrinos, fotóns) que inciden sobre a Terra provenientes do exterior (a orixe extraterrestre foi demostrada por Victor Hess, p. N.

1936, mediante experiencias realizadas nun globo en 1912) e son detectadas mediante técnicas baseadas nos trazos que deixan as partículas en emulsións fotográficas e na cámara de néboa de Wilson (p. N. 1927). As técnicas relacionadas con esta última foron desenvolvidas por Blackett (p. N. 1948) e os seus colaboradores.

O balance entre a forza forte e a electromagnética é responsable da estabilidade dos núcleos e, polo tanto, do rango de valores permitidos para A e Z . Núcleos con $Z > 118$ non se coñecen, pois a medida que aumenta o número de protóns crece fortemente a repulsión electrostática e é moi difícil compensala.

Para Z pequeno, os núcleos estables teñen aproximadamente o mesmo número de neutróns ca de protóns $N \approx Z \approx A/2$. Os núcleos máis pesados deben ter máis neutróns para compensalo aumento de interaccións coulombianas, ata que chega un momento en que a dita compensación xa non é posible. As estrelas de neutróns poden pensarse como núcleos estables aínda que neste caso $Z \approx 0$ e A é da orde de miles de billóns. Debido á gran disparidade entre o número de nucleóns (protóns e neutróns) dos núcleos usuais e as estrelas de neutróns, ultimamente especulouse coa posibilidade da existencia de materia estable que cubrise o gran salto en masa. Sería materia estraña, na que interviría conxuntamente cos quarks ordinarios o quark estraño do que falaremos máis adiante. A posibilidade de existencia de materia estraña en forma

de estrelas, así como a súa posible detección, é un tópico hoxe en día de grande interese.

Dado un núcleo estable, é necesario proporcionar enerxía para extraer un dos seus nucleóns. Obviamente, esa enerxía será máis grande ou máis pequena dependendo de se o nucleón está na superficie ou no interior, pero en calquera caso podemos falar de enerxía media. É a enerxía de ligadura B , necesaria para romper-lo núcleo A causa da equivalencia entre enerxía e masa, $E = mc^2$, a diferenza entre a suma da masa dos nucleóns e a masa do núcleo $M(A, Z)$ é B/c^2 .

$$B/c^2 + M(A, Z) = Zm_p + (A-Z)m_n \quad (3)$$

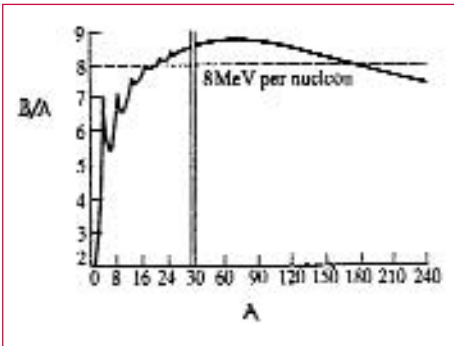


Figura 4. Enerxía de ligadura por nucleón en función de A .

A enerxía de ligadura por nucleón B/A depende de A (como se representa na figura 4). Apréciase que os valores maiores de B/A están no rango $50 < A < 120$, e polo tanto núcleos con A dentro dos ditos valores é máis difícil rompelos.

Ademais da interacción forte, responsable entre outras cousas de que os protóns e neutróns estean ligados formando os núcleos, existe outra forza a nivel nuclear, a interacción débil responsable da desintegración β de núcleos. Unha desintegración β é a que experimenta o neutrón que se transforma nun protón e emite un electrón. Se só fose así, por conservación de enerxía e momento, o electrón saínte debe ter unha enerxía fixa. Sen embargo a enerxía que se medía variaba dunha maneira continua entre dous límites. Igualmente, dado que o neutrón ten spin $1/2$ non pode desintegrarse en protón e electrón só, pois ó te-las dúas spin $1/2$, ó combinalas conxuntamente co momento angular orbital que é enteiro, dá un número enteiro. Niels Bohr, nunha carta a Pauli, expresa que chegou a pensar que a escala nuclear quizais non se conservaba a enerxía. Pauli non podía considerar tal hipótese e en 1931 propuxo a existencia dunha misteriosa partícula, o neutrino, que debería ter spin $1/2$ para que se conservase o momento angular, masa nula ou moi pequena e carga cero, e que interaccionase moi debilmente coa materia. A reacción sería: $n \rightarrow p + e^- + \nu$.

A proposta foi acollida con grande escepticismo pola comunidade científica, escepticismo que crecía a medida que pasaba o tempo sen que fose detectado o neutrino. Finalmente, en 1956, despois de máis de dúas décadas, Cowan e Reines (p. N. 1985), nun experimento realizado no reactor nuclear de Savannah River, (afluente do río

Columbia nos Estados Unidos), lográban detectalo gracias a que no reactor hai unha gran cantidade de neutróns, de tal maneira que ó se desintegrar podía alcanzarse unha estatística alta de neutrinos (un billón por cm^2 e segundo) e así, colocando no seu camiño moitas toneladas dunha solución de cadmio, conseguir que algún puidese interaccionar ocasionalmente. Ó observarlos produtos da interacción, deduciron a existencia do neutrino incidente.

Ademais do electron existe o muón μ^- $m_\mu = 105 \text{ Mev}$ xa mencionado anteriormente e o tauón τ^- , $m_\tau = 1.77 \text{ Gev}$, descuberto por M. Perl (p. N. 1995) en 1975. Ademais do neutrino ν_e asociado ó electrón, L. Lederman, M. Schwartz e J. Steinberger (p. N. 1988) demostraron en 1964 a existencia doutras clases de neutrinos. Ós membros das tres xeracións

$$\begin{array}{ccc} e & \mu & \tau \\ \nu_e & \nu_\mu & \nu_\tau \end{array} \quad (4)$$



Jack Steinberger, premio Nobel de Física en 1988, durante unha conferencia na Universidade de Santiago de Compostela.

chámaselles leptóns. A todas elas asígnaselle-lo número cuántico leptónico +1. O número cuántico leptónico é conservado nas reaccións entre partículas.

A interacción débil é de moi curto alcance. Similarmente á interacción electromagnética na que se realiza intercambiando un fotón, neste caso intercámbianse as partículas W^\pm e Z^0 que teñen unha gran masa, 80 e 91 GeV respectivamente, responsable do curto alcance da interacción⁽²⁾ (tamén da súa débil intensidade, dado que esta é inversamente proporcional neste caso ó cadrado das masas das partículas intermediarias). A predicción da existencia das ditas partículas pesadas realizouse dentro do contexto da teoría unificadora das interaccións débiles e fortes proposta por S. Weinberg e A. Salam en 1967 (p. N. 1979). A teoría baseábase nas teorías de campos de gauge non abelianos proposta por Yang e Mills en 1954, englobaba por unha parte a descrición das interaccións débiles mediante o lagrangiano de Fermi, primeiramente proposto por este nos anos 33 e 34 para describi-la interacción β de núcleos (foi a primeira utilización dos campos asociados a partículas de spin 1/2 cuantificados) e posteriormente mellorado por N. Cabibbo; por outra parte, a electrodinámica cuántica desenvolvida independentemente por R. P. Feynman, J. Schwinger e S. Tomonaga (p. N. 1965) que é a cuantificación da teoría electromagnética. A teoría de unificación de Weinberg e Salam non empezou a tomarse en consideración seriamente

ata que G.'t Hooft —na súa tese de doutoramento dirixida por M. Veltman— demostrou a renormalización da teoría, é dicir, que as diverxencias que aparecían nesa teoría de campos podían tratarse coherentemente. G.'t Hooft e Veltman foron galardoados por iso co p. N. 1999. A teoría de unificación electrodébil prediciu a existencia de correntes débiles neutras que foron observadas por primeira vez en 1973 no Centro Europeo de Partículas Elementais de Xenebra. No ano 83, Carlo Rubbia, á fronte dunha colaboración de máis de douscentos físicos, detectou por primeira vez as tres partículas W^\pm e Z^0 predicidas, polo que recibiu o p. N. en 1984 que compartiu con S. Van der Meer, quen desenvolveu unhas determinadas técnicas de aceleradores (arrefriamento estocástico) que fixeron posible alcanzar nos aceleradores enerxías necesarias para detecta-las ditas partículas. O éxito do descubrimento foi unha empresa europea de grande importancia. A modo de exemplo, citemos que o *New York Times* en primeira páxina encabezaba a noticia do descubrimento co título “Europa 3 USA 0”.

FISIÓN E FUSIÓN NUCLEAR

Se un núcleo pesado rompe en dous máis lixeiros, a curva da figura 4 indica que a enerxía de ligadura por nucleón é máis grande nos núcleos fisionados ca no núcleo pesado orixinal e, polo tanto, liberarase enerxía no proceso. A fisión espontánea é un proceso

moi raro; sen embargo a fisión pode ser inducida bombardeando un núcleo, por exemplo o uranio 235, con neutróns. O proceso de fisión máis típico é

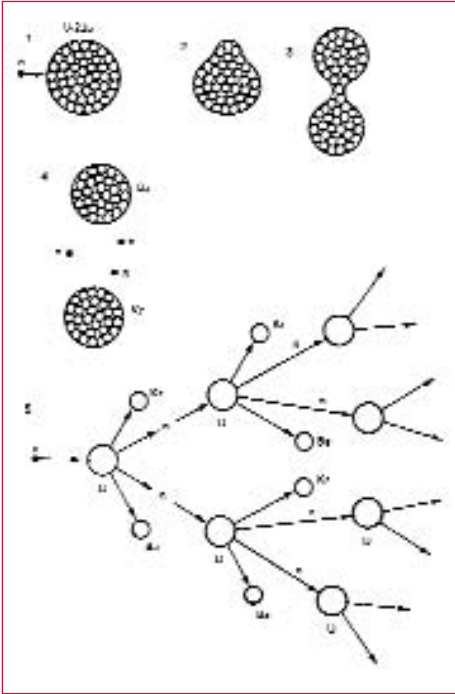


Figura 5. Reacción en cadea.

o debuxado na figura 5, no que: 1) neutrón lento, de baixa enerxía, é absorbido por un núcleo de uranio 235; 2) o núcleo faise inestable; 3) o núcleo defórmasse, dividíndose en dous; 4) como resultado da fisión aparecen os núcleos estables de bario e criptón conxuntamente con dous ou tres neutróns. Na reacción libérase enerxía; 5) os neutróns producidos que sexan lentos poden chocar contra outro núcleo de

uranio 235 dando lugar de novo ó proceso. É a reacción en cadea orixe da explosión nuclear, a chamada bomba atómica. Nun reactor nuclear esa explosión contrólase mediante 'moderadores' que usualmente son barras de boro ou cadmio que absorben neutróns e polo tanto reducen o número de fisións. A enerxía liberada, que é da orde de máis dun millón de veces a liberada nun proceso químico, utilízase para quentar un fluído, normalmente auga, que pola súa vez se dirixe a unha turbina para a xeración de corrente eléctrica.

A historia da fisión nuclear e a da obtención da bomba atómica é moi interesante. Digamos brevemente que nos primeiros anos da década dos trinta, E. Fermi en Italia conseguira a técnica de enlentecer neutróns e modifica-los núcleos de varios átomos, logrando diversos isótopos. Irradiou uranio en 1934 pero non interpretou correctamente o que sucedía. Por outra parte, aproveitou a viaxe para recolle-lo premio Nobel en 1938 para non volver á Italia de Mussolini. En Alemaña, Otto Hahn (p. N. de Química 1944) e Lisa Meitner fixeron experimentos análogos e atoparon como subproduto bario, que é moito máis lixeiro có uranio. Lisa Meitner, xudía, tivo que fuxir de Alemaña a Suecia, onde contactou con Otto Frisch, quen interpretou correctamente o fenómeno físico. Italia e Alemaña perderon moito tempo elaborando a bomba atómica, tempo que non perderon os aliados, que desenvolveron o proxecto

Manhattan no que precisamente Fermi tivo un papel importante.

Na fusión nuclear, dous núcleos moi lixeiros fúndense nun máis pesado. De novo (de acordo coa figura 4), a enerxía de ligadura por nucleón do estado inicial (os núcleos moi lixeiros) é inferior á correspondente ó estado final (o núcleo pesado) e polo tanto libérase enerxía. O proceso de fusión máis coñecido é o que se produce no interior das estrelas, queimando hidróxeno, protóns e liberando enerxía que permite contrabalancea-la forza gravitatoria que tende a aperta-la estrela. Os diversos procesos foron estudados en detalle por H. A. Bethe (p. N. 1967). Tamén son os procesos de fusión os responsables da chamada nucleosíntese dos elementos que sucedeu nos primeiros instantes do universo, calculada por W. A. Fowler (p. N. 1983).

Aínda que o potencial destructivo da fusión foi ensaiada inicialmente en 1952 coa bomba de hidróxeno, experimentos liderados na Unión Soviética por Andrei Sakharov e nos Estados Unidos por E. Teller, o desenvolvemento da fusión para producir electricidade aínda non se conseguiu a pesar do enorme esforzo realizado e das grandes vantaxes da fusión como fonte de enerxía. En efecto, o combustible básico é deuterio ou auga pesada abundante e, polo tanto, barato. A fusión non produce materiais radioactivos de longa vida. O proceso de fusión párase instantaneamente se se cesa a subministración de combustible, así que é seguro fronte a accidentes.

Con tantas vantaxes, é máis dramática a pregunta: ¿por que é tan difícil a fusión controlada? As reaccións de fusión dependen de tres parámetros básicos⁽⁶⁾: temperatura, densidade e tempo de confinamento. Para que os núcleos de dous átomos cheguen a fusionarse, teñen que aproximarse ás súas distancias nucleares e por iso deben estar despoxados dos electróns que os rodean, polo que o combustible ha estar en estado de plasma, é dicir, gas ionizado. Un plasma no que os ións deben ter enerxía abonda como para vencer-la repulsión coulombiana e así producir numerosas reaccións de fusión e polo tanto moita enerxía neta.

Para dota-los ións do plasma de suficiente enerxía, este debería de estar a unha temperatura de cen millóns de graos. Por outra parte, tamén é necesario que haxa un número mínimo de colisións para que se produza unha cantidade apreciable de reaccións de fusión e polo tanto o plasma debe ter unha densidade mínima. Unha vez creado o plasma a alta temperatura, cómpre mantelo á dita temperatura durante un certo tempo suficiente para que se produza enerxía neta. Manter un plasma quente non é doado, pois tende a arrefriarse por difusión, é dicir, movementos de partículas desde onde existe unha concentración alta a outras onde haxa unha baixa concentración. O tempo que tardaría o plasma en arrefriarse se non se quentase constantemente, chámase tempo de confinamento.

Para conseguir que o plasma non arrefría, o método máis eficaz é o seguido no modelo Tokamak (Toroidal Kamera Magnetik) no que se confina mediante campos magnéticos (ver figura 6). Desta maneira, evítase que o

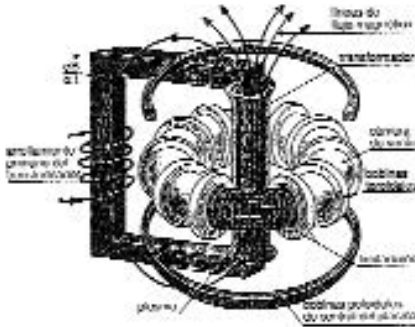


Figura 6. Esquema dun dispositivo Tokamak. (Tomado de J. A. Tagle, *La fusión nuclear*, Edit. Debate, Madrid, 1995).

plasma perda enerxía ó bater coas paredes de recintos convencionais e tamén a deterioración destes. As partículas do gas ionizado xiran arredor das liñas de campo magnético e se non existe difusión transversal a elas, ó non as poder atravesar quedarían atrapadas. En 1969, investigadores rusos conseguiron cun Tokamak un plasma a cinco millóns de graos a alta densidade durante centésimas de segundo. Logo en Harwell (Reino Unido) e Princeton obtivéronse resultados importantes, pero aínda se está lonxe da meta perseguida. Diversos programas internacionais apuntan a conseguir un prototipo de reactor nuclear de fusión, produc-

ción de enerxía neta, antes do primeiro cuarto de século.

MODELOS NUCLEARES. NÚMEROS MÁXICOS

A gran complexidade das interaccións fortes, xunta o feito de que os núcleos poden ter ata máis de 250 nucleóns, fai que sexa moi difícil desenvolver un tratamento exacto da estrutura nuclear. Por iso se desenvolveron modelos aproximados, razoablemente simples e capaces de describi-lo comportamento dos núcleos.

Un dos modelos máis vellos é o da gota líquida, inventado por G. Gamow. Nunha gota líquida os compoñentes, átomos ou moléculas, están ligados formando a gota dun xeito que nalgún sentido é similar ó que sucede no núcleo, aínda que a forza sexa moi diferente en alcance e intensidade. Así, como exemplo de similitude, nos dous sistemas, a gota e o núcleo, hai na superficie unha forza cara a adentro exercida sobre os seus compoñentes, resultando un efecto de tensión superficial que fai que tanto a gota coma o núcleo teñan unha forma aproximadamente esférica. O modelo da gota líquida, engadíndolle a repulsión eléctrica entre protóns, é capaz de reproducir a dependencia da enerxía de ligadura en A (fig. 4); sen embargo non pode reproducir propiedades importantes como os niveis de enerxía do núcleo.

O modelo de capas é especialmente axeitado para isto e resulta

análogo en certo sentido a unha descrición do tipo niveis atómicos ó nivel do núcleo. Considerando un neutrón, mentres estea no centro non experimentará ningunha forza neta xa que se compensarán as forzas exercidas por tódolos nucleóns sobre el. Polo tanto o potencial sería constante para $r \sim 0$. Sen embargo, se o neutrón está próximo á superficie do núcleo, experimentará unha forza atractiva cara ó interior, que será máis forte canto máis preto estea da superficie (tensión superficial). Finalmente, a forza e o potencial serán nulos cando o nucleón estea fóra do núcleo. O potencial será similar ó representado na figura 7. Os protóns están igualmente confinados nun pozo de potencial como na figura, cunha lixeira diferenza na superficie debido á forza eléctrica que experimentarán.

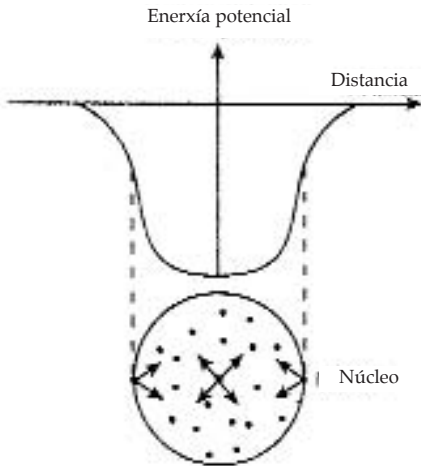


Figura 7. Enerxía potencial media que sente un nucleón nun núcleo.

Neses pozos, os nucleóns ocuparán toda unha serie de niveis de enerxía espaciados de acordo coa solución da ecuación de Schödinger co dito potencial. Os niveis de enerxía están caracterizados por diversos números cuánticos, da mesma maneira que os niveis de enerxía dun electrón nun átomo. Debido ó principio de Pauli, os neutróns (protóns), ó seren partículas de spin $1/2$, non poden dous deles ter os mesmos números cuánticos e isto fai que cada nivel teña un número máximo de neutróns e protóns; cando o alcanza dise que a capa está chea. As capas están cheas no momento en que o número de protóns Z e o de neutrones $A - Z$ toma os valores

$$Z = 2, 8, 20, 28, 50, 82$$

$$A - Z = 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126$$

que son os números máxicos.

Os núcleos coas capas cheas son máis estables cós núcleos con A e Z próximos a elas. Exemplos deles son: helio ($Z = 2$ $A = 4$), osíxeno ($Z = 8$ $A = 16$), chumbo ($Z = 82$ $A = 208$). O cometido que desempeñan é similar ó dos gases nobres cando se fala de átomos. As propiedades de núcleos cuns poucos nucleóns en exceso ou defecto respecto ós que teñen as capas cheas explícanse facilmente en termos deses 'buratos'. Sen embargo, cando hai moitos buratos a situación faise máis complicada e é máis apropiado o uso do chamado modelo colectivo, desenvolvido por Aage Bohr (fillo de Niels), B. Mottelson e J. Raiwater (p. N. 1975). Polas súas achegas ó modelo de capas

(o modelo de capas con encaixe jj , que inclúe o encaixe spin-órbita) a María Goeppert Mayer e a Jensen foilles concedido o p. N. 1963. A traxectoria de María Goeppert Mayer é un exemplo de tenacidade e intelixencia, coas que vence obstáculos tradicionais que inclúen a discriminación por ser muller. Estudiu con Max Born en Gottingen e logo de obte-lo doutoramento casou cun americano, Joseph Mayer, con quen foi ós Estados Unidos en 1930 onde non conseguiu un posto universitario debido ás regras discriminatorias existentes. Só moito máis tarde, en 1946, cando o seu marido se trasladou á Universidade de Chicago, ela conseguiu un posto de traballo a tempo parcial no recentemente creado Laboratorio Nacional de Argonne, situado a sesenta quilómetros de Chicago⁽⁷⁾.

ANTIPARTÍCULAS

No ano 1930, Dirac postulou que por cada partícula debía existir outra partícula chamada antipartícula, con tódalas propiedades intrínsecas iguais (masa, spin) agás a carga eléctrica e outros números cuánticos considerados como cargas (número bariónico, número leptónico, extrañeza...) que teñen as opostas ás que ten a partícula. Entre as reaccións posibles, as antipartículas poden aniquilarse ó colisionar coas partículas, producindo fotóns. Así, a un electrón correspóndelle a antipartícula chamada positrón que

se aniquila mediante a reacción $e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma$

Dirac introduciu o seu postulado para esquivar-la existencia de estados con enerxía negativa solucións da ecuación relativista para partículas de spin $1/2$ que el mesmo propuxera. Dirac supuxo que tódolos niveis de enerxía negativa estaban ocupados por electróns e que o conxunto formaba o baleiro, é dicir, o estado de enerxía máis baixa. Cando faltaba un electrón (de enerxía negativa) dese baleiro, aparecía un oco que se comportaba coma se tivese carga positiva e enerxía positiva. Ese 'oco' é o positrón e tapábase mediante un electrón de enerxía positiva, transformándose a enerxía do oco (positrón) e do electrón en fotóns.

A hipótese de Dirac ten os seus puntos febles e carece de autoconsistencia (o baleiro supono neutro, aínda que estea cheo de electróns de enerxía negativa) e só despois de que se introducira a cuantificación dos campos (segunda cuantificación) se clarificou o problema. En calquera caso, a súa predicción espectacular da existencia de antipartículas foi comprobada axiña ó descubrir C. D. Andersen (p. N. 1936), en 1932, positróns nas cascadas atmosféricas producidas polos raios cósmicos.

Posteriormente descubríronse antiprotóns, antineutróns e numerosas antipartículas. Tamén se obtiveron, en experimentos con aceleradores, núcleos lixeiros de antimateria, é dicir, formados por antiprotóns e antineutróns.



Figura 8. Apantallamento da carga eléctrica.

Apuntemos que por primeira vez aparece o baleiro cunha estrutura. Este aparente paradoxo: o baleiro ten 'algo', é común nas teorías cuánticas de campos. Así, en electromagnetismo, se colocamos unha carga negativa ó seu redor créanse cargas positivas e negativas debido á existencia dun campo eléctrico producido pola carga orixinaria. As cargas positivas e negativas oriéntanse como se ilustra na figura 8, de tal maneira que o medio no que están se polariza. Microscopicamente, na electrodinámica cuántica, a explicación deste fenómeno é que unha partícula cargada, por exemplo un electrón, emite fotóns que pola súa vez producen pares positrón-electrón. Estes pares oriéntanse de tal xeito que os positróns estean máis cerca do electrón orixinario cós electróns (debido á interacción coulombiana, cargas de signo oposto atraense e do mesmo signo repélense). Desta forma o medio queda polarizado.

A creación de pares electrón-positrón e a súa posterior aniquilación non

require por forza a existencia dun electrón orixinario que emita fotóns, senón que pola contra pode darse no baleiro. A aparente violación da conservación da enerxía non sería tal se se aniquilan nun tempo Δt que cumpra o principio de incerteza enerxía-tempo de Heisenberg

$$\Delta E \Delta t \sim h \quad (5)$$

Desta maneira o baleiro queda dotado de estrutura.

CLASIFICACIÓN DAS PARTÍCULAS ELEMENTAIS

Con motivo do estudio das interaccións fortes, mediante experimentos de aceleradores empezáronse a descubrir toda unha serie de partículas (pola súa activa participación neste proceso, L. W. Álvarez obtivo o p. N. 1968). A principios dos sesenta, o número superaba amplamente as cen. ¿Como se podería poñer orde en todo aquel zoo?

Unha situación similar producírase nos diversos elementos, átomos, do sistema periódico, ou nos diversos núcleos. A orde nos átomos e os núcleos establecérase acudindo a un principio de simetría, o de Pauli, que permitía nun caso clasificar en capas os diversos electróns e noutro os protóns e neutróns. Por iso, ante a gran variedade de partículas buscábase a simetría que permitise entender tal diversidade e clasificalas partículas.

M. Gell-Mann, Zweig e Y. Ne'eman independentemente, propuxeron que a simetría buscada era SU(3)

(o conxunto de matrices 3×3 , unitarias e determinante 1). É dicir, as interaccións fortes eran invariantes fronte ás transformacións do dito grupo, cando ese grupo se aplicaba ás partículas elementais que senten as interaccións fortes (hadróns). En linguaxe máis matemática, asignaron a cada partícula un vector que fose vector base dunha representación irreducible do grupo. Todas estas representacións pódense obter a partir de dúas, que se chaman fundamentais⁽⁶⁾ e teñen dimensión 3, 3 e 3^* . Ós tres vectores base da representación 3, Gell-Mann chamoulles quarks (nome arbitrario tomado de *Finnegans Wake* de James Joyce, sen significado en inglés): o quark up u , o quark down d e o quark estraño s . Os vectores das representacións désígnanse polos números cuánticos: hipercarga Y , isospín T e terceira compoñente de isospín T_3 . O isospín T foi introducido por Heisenberg para describir que o protón e o neutrón eran 'iguais' respecto á interacción forte. Os dous tiñan o mesmo $T(T=1/2)$, diferenciándose pola terceira compoñente, $T_3 = +1/2$ para o protón e $T_3 = -1/2$ para o neutrón. Igualmente, a tódolos hadróns se lles asigna un T e un T_3 . A hipercarga está relacionada coa carga eléctrica mediante a relación de Gell-Mann e Nishijima

$$Q = T_3 + Y/2 \quad (6)$$

Os quarks d , u e s teñen $Q = -1/3$, $2/3$ e $-1/3$ respectivamente; u e d son dobretes con $T=1/2$ e $T_3=-1/2$ respectivamente. Os vectores da representación 3^* son os antiquarks, d , u e s que teñen Q , Y e T_3 opostos ós correspon-

dentos ós quarks. Tódolos hadróns de spin enteiro (mesóns) obtéñense a partir dun quark e un antiquark $q\bar{q}$ (os quarks suponse que teñen spin $1/2$). Os hadróns de spin semienteiro (barións) fórmanse a partir de 3 quarks qqq . Desta maneira, tódolos hadróns quedan clasificados e obtéñense os seus números cuánticos a partir de $q\bar{q}$ ou qqq (ver, por exemplo, referencias 1, 2 e 8). Ademais de clasificar tódolos hadróns coñecidos, tamén prediciu a existencia dalgúns como a Ω^- , partícula de spin $3/2$ formada por 3 quarks s , confirmado en 1964 en experimentos do acelerador de Brookhaven. M. Gell-Mann recibiu o p. N. en 1969; na explicación, o comité Nobel tamén mencionaba a Y . Ne'eman. A este, o mesmo ano, foille concedido o premio Einstein que por primeira vez se outorgaba a alguén non norteamericano.

Aínda que os quarks deran lugar a prediccións espectacularmente comprobadas e á clasificación dos hadróns, non se posuía evidencia física real da súa existencia. Por iso en 1969 se realizaron no acelerador lineal de Stanford colisións profundamente inelásticas electrón-protón. Nos choques en que o electrón é desviado a grande ángulo, o fotón intermedio formado (ver figura 9) ten gran momento e por tanto pequena λ co que puede 'ver' o interior do protón. O experimento (análogo ó de Rutherford no seu día) demostraba inequivocamente que o protón tiña partes, os hipotéticos quarks. Ós tres principais responsables do experimento, J. J. Friedman, H. W. Kendall e



Figura 9. Colisión $e+p \rightarrow e+x$ (x denota particulares que resultan da rotura do protón).

R. Taylor, concedéronlle-lo p. N. en 1990.

Ós tres quarks d , u e s engadíronse outros tres. Primeiro en 1974, S. Ting e B. Richter (p. N. 1976) descubriron, traballando independentemente un en Brookhaven e outro en Stanford, a partícula $J\psi$ de masa 3.1 Gev estado ligado do quark encantado c e do seu anti-quark \bar{c} . En seguida se descubriron mesóns e barións que contiñan o quark c ou o anti-quark \bar{c} . En 1975, un equipo liderado por L. Lederman descubriu a partícula upsilon de masa 9.45 Gev,



De esquerda a dereita, primeiro J. Cronin (premio Nobel de Física en 1980), segundo I. Prigogine (premio Nobel de Química en 1972) e cuarto B. Richter (premio Nobel de Física en 1976), nun acto na Universidade de Santiago de Compostela.

traballando co acelerador do laboratorio Fermi. Esta partícula é un estado ligado dun novo quark b (bottom) e o seu antiquark \bar{b} . Finalmente en 1994, tamén no laboratorio Fermi, descubríronse sucesos que non poderían interpretarse sen a existencia dun novo quark t (top) e o seu antiquark. Desta maneira temos tres xeracións de quarks:

$$\begin{array}{ccc} u & c & t \\ & , & , \\ d & s & b \end{array} \quad (7)$$

que agrupamos en tres dobretes. ¿Por que hai o mesmo número de xeracións de quarks có que viramos de leptóns? No cálculo da vida media de desintegracións de certas partículas aparecerían infinitos que só poden cancelarse se se cumpre unha relación entre as cargas dos leptóns e a dos quarks da xeración correspondente. Tamén xorde a pregunta: ¿por que só tres xeracións de pares de quarks e leptóns? Hai dúas evidencias experimentais⁽⁹⁾ de que non pode haber máis: nos experimentos do CERN mediuse a desintegración de Z^0 con gran precisión, estando en total acordo coa existencia de tres xeracións de leptóns. Por outra parte, a nucleosíntese do deuterio e do helio efectuada nas primeiras etapas do universo é moi sensible tamén ó número de xeracións de leptóns. A proporción actual dos citados elementos exclúe case definitivamente máis xeracións. Observemos que, unha vez máis, o máis pequeno do universo ten que ver co máis grande.

CONFINAMENTO DOS QUARKS

Os quarks existen dentro dos hadróns e mesmo así non se viron libres fóra das partículas. ¿Poderíamos obter quarks libres e polo tanto carga fraccionaria?, ¿como son as forzas entre os quarks dentro do hadrón?

Os quarks interaccionan intercambiando unhas partículas chamadas gluóns (*glue* en inglés significa pegamento). Os quarks mantéñense ligados no protón debido ós gluóns que se intercambian, que actúan como unha especie de pegamento. Os gluóns, a diferenza do que sucedía na interacción electromagnética cos fotóns, interaccionarán entre eles directamente, é dicir, péganse uns a outros. Os gluóns son os portadores da interacción forte e a teoría que os estudia chámase Cromodinámica cuántica⁽¹⁾.

Na figura 8 ilustrábase o fenómeno da polarización. Debido ó apantallamento de carga, se medímo-la carga neta en valor absoluto a unha distancia maior có tamaño da carga orixinal, atopámonos que esta é menor cá carga orixinal. Se diminuímo-la distancia, a carga aumenta. No caso da Cromodinámica cuántica, a constante que desempeña o papel da carga eléctrica é a carga de cor, pero neste caso, debido a que os gluóns interaccionan con eles mesmos, o apantallamento da carga de cor é completamente diferente. A carga de cor diminúe coa distancia. Por iso, a forza entre os quarks a moi pequenas distancias é nula, o que explica por qué

os quarks se comportan coma se estivesen libres dentro do protón. É a liberdade asintótica.

¿Que sucede a distancias máis grandes, cando intentamos separar un quark dos outros dous nun protón ou un quark dun antiquark nun mesón? Crese que en condicións normais é imposible obter quarks libres, aínda que no hai unha demostración rigorosa deste confinamento. O fenómeno do confinamento dos quarks dentro dos hadróns é moi similar ó que sucede nun material superconductor. Un superconductor ten a susceptibilidade magnética cero $\mu = 0$ e polo tanto as liñas do campo magnético externo H son rexeitadas e non penetran nel. A analogía coa situación en Cromodinámica cuántica (QCD) realízase cambiando o campo magnético polo campo creado polas cargas de cor dos quarks dentro do hadrón, o material superconductor polo baleiro externo en QCD e o baleiro externo en QED ($\mu=1$) polo interior do hadrón (ver figura 10).

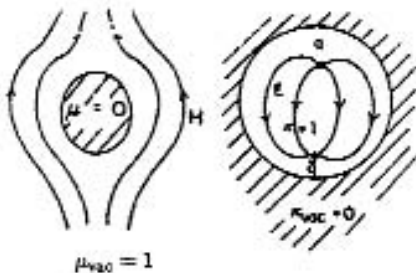


Figura 10. Material superconductor (diamagnetismo perfecto, $\mu=0$) versus o baleiro en cromodinámica cuántica (perfecto dialéctrico de cor $K=0$).

O interior e o exterior están intercambiados nos dous casos. Da mesma maneira que as liñas de H son rexeitadas, as liñas do campo debido ás cargas de cor son rexeitadas polo baleiro e polo tanto confinadas ó interior do hadrón. Así, os quarks non poden saír do hadrón.

LIBERACIÓN DOS QUARKS. SOPA DE QUARKS E GLUÓNS

O confinamento dos quarks podería deixar de cumprirse a altas temperaturas e presións. De feito, nunha etapa da evolución do universo, próxima á orixe, arredor de 10^{-5} seg., debeu de existir unha sopa de quarks e gluóns a moi altas temperaturas. Na busca da elementalidade foise do complexo ó simple; de macromoléculas pasamos a moléculas, átomos, núcleos, protóns e neutróns, quarks e gluóns. O proceso na historia do universo foi ó revés. Despois da etapa na que habería quarks e gluóns a moi altas temperaturas, empezáronse a condensar os quarks, ó se arrefría-la temperatura por efecto da expansión do universo, sufrindo unha transición de fase, formando os hadróns. Posteriormente, os protóns e neutróns empezáran a nucleosíntese formando núcleos atómicos (ata o ferro), seguindo o proceso en dereitura á complexidade.

¿Pódense obter en laboratorio quarks e gluóns libres⁽⁹⁾, verificando a transición de fase? Desde a década dos

oitenta, estanse facendo no Centro Europeo de Partículas (CERN) de Xenebra experimentos consistentes en colisións de núcleos pesados a moi alta enerxía, contra núcleos pesados para intentar obter quarks e gluóns libres. A idea subxacente é a seguinte: moitas das colisións prodúcense entre os protóns e neutróns dun núcleo e os doutro núcleo. En cada colisión individual, dada a alta enerxía do choque, poderíanse producir moitas partículas e, por mor da colisión resultarían tamén miles delas. Sen embargo, cada partícula ocupa un determinado volume e, ó seren moitas, o volume dispoñible ó colisionar os dous núcleos, ó menos durante un certo tempo da orde de 1-2 segundos, é moito menor có volume necesario para producir tal cantidade de partículas. Durante un certo tempo só terémo-los constituíntes das partículas, os quarks e gluóns nun volume de arredor de $\pi R^2 v \tau$, sendo V a velocidade do choque e $\tau \sim 1-2$ seg. Despois ese volume aumentará, diminuírá a súa temperatura e os quarks e gluóns formarán os hadróns observados. O feito de se produciren ou non como etapa intermedia os quarks e gluóns ten diversas consecuencias que poden verificarse experimentalmente.

Actualmente hai unha certa polémica sobre se se obtivo ou non a sopa de quarks e gluóns, sobre todo en colisións centrais Pb-Pb. En calquera caso, os experimentos do novo acelerador de Brookhaven (EUA), do

que se esperan os primeiros datos para este mesmo ano, e os do futuro gran colisionador de hadróns (LHC) do CERN, dilucidarán a cuestión e permitirannos coñecer cómo foi aquela transición de fase próxima á orixe do universo e cómo son as forzas responsables do confinamento dos quarks.

SIMETRÍAS NAS PARTÍCULAS ELEMENTAIS

O concepto de simetría é tan vello coma a civilización. Cómo naceu é un misterio que se cadra permaneza para sempre. Sen embargo o home sempre se sentiu profundamente impresionado polas estruturas simétricas do mundo físico e biolóxico. Na medida en que a civilización humana se desenvolve, a simetría penetra en tódalas disciplinas da actividade humana: pintura, literatura, arquitectura, escultura, música. O «Crab Canon» de J. S. Bach é un dueto de violíns no que a música dun é o resultado de aplica-la moviola á música do outro; a música dun é o resultado de lle aplica-la inversión temporal ó outro⁽⁹⁾.

O concepto de simetría tal como o usamos no exemplo musical, é dicir, transformación baixo a cal o sistema obtido coincide co orixinal, tivo a súa materialización matemática no século XIX, primeiro con Galois (1811-1832), e logo con Sophus Lie (1842-1899) que crearon o concepto de grupo e a teoría de grupos continuos (grupos de Lie) respectivamente. Sen embargo, o papel

importantísimo da simetría en Física non é coñecido ata este século e xustamente son a Teoría da Relatividade e a Mecánica cuántica as dúas teorías que revolucionan a Física, as que determinaron o papel decisivo das simetrías. Na primeira establécese que as leis da Física son invariantes fronte ás transformacións de Lorentz, e despois do establecemento da Mecánica cuántica quedou claro que as leis de conservación son unha consecuencia dunha simetría (esta relación poderíase ter establecido na Mecánica clásica).

No dominio das partículas elementais xa apuntámo-lo papel da simetría na introducción dos quarks. As interaccións débiles posúen unha determinada simetría de gauge e as interaccións fortes outra. É a simetría a que establece e determina a interacción.

Respecto ás simetrías discretas, críase que tódalas interaccións eran invariantes fronte á paridade P , intercambio da esquerda e a dereita, a C conxugación de carga cambio de signo das cargas ($Q, Y, T, S...$) e da inversión temporal. Esta crenza viuse incrementada coa demostración por Pauli e Lüders, independentemente en 1955, de que o produto das tres debía ser invariante para calquera interacción. Emporiso, T. D. Lee e C. N. Yang (p. N. 1957) propuxeron en 1956 que a paridade era violada nas interaccións débiles, indicando un experimento de desintegración β de núcleos no que se podería verifica-la súa proposta. O experimento foi realizado por Madame



C. N. Yang, premio Nobel de Física en 1957, nunha das súas visitas a Santiago de Compostela.

Wu un ano despois e confirmou a violación. Pauli non creu moito na proposta de Lee e Yang e dedicouse a poñer papeliños no despacho de Madame Wu dicindo que o experimento daría un resultado negativo.

O produto de CP tampouco é conservado polas interaccións débiles como demostraron experimentalmente en 1964 J. Cronin, V. Fitch (p. N. 1980) e colaboradores, estudiando as desintegracións do mesón K^0 e a súa antipartícula \bar{K}^0 en 2 e 3 pións. A violación de CP supón unha evidencia indirecta da violación da inversión temporal. A violación de CP é un dos requisitos necesarios para explicar por qué o universo no que vivimos está composto de materia e non de antimateria (materia formada por estados ligados de positróns con antinúcleos, é dicir, núcleos formados por antiprotóns e antineutróns). De acordo coa proposta de Andrei Sakharov (p. N. da Paz), ademais disto necesítase que o protón sexa inestable, aínda que a súa vida media sexa extremadamente grande como predín algunhas teorías de unificación de tódalas interaccións e que o universo tivese unha etapa inicial de rapidísima expansión.

PROBLEMAS NON RESOLTOS E PERSPECTIVAS

Anteriormente xa mencionamos unha das principais incógnitas: o confinamento dos quarks.

Unha segunda incógnita fundamental é o problema das masas, é dicir, cómo adquiren as partículas as súas masas e en concreto os quarks e as partículas de gauge, como W^\pm , Z^0 . O problema das masas das partículas gauge púxose de relevo desde o comezo da súa formulación. Nun seminario, en Princeton en 1955, sobre as teorías de

Yang-Mills, Yang foi requirido varias veces por Pauli sobre o dito problema; o seminario interrompeuse e só proseguiu debido á insistencia do anfitrión Oppenheimer. Sería quince anos despois cando Higgs e, independentemente, Brout e Engels, propuxeron o mecanismo de 'rotura espontánea da simetría', introducindo a(s) partícula(s) de spin cero, chamada de Higgs, e o campo asociado a ela. A busca do Higgs é un dos principais obxectivos e desafíos que ten a Física de partículas elementais e unha das razóns polas que Europa, coa colaboración dos Estados Unidos e Xapón, aprobou adapta-lo acelerador de 27 quilómetros de perímetro, actual LEP (gran colisionador electrón-positrón) para que se puidesen acelerar hadróns, transformándose no LHC (gran colisionador de hadróns) que colisionará hadróns cunha enerxía ata $7 \cdot 10^{12}$ ev contra hadróns coa mesma enerxía. 'Cazar' o Higgs ou demostrar a súa non existencia pode ensinarnos a comprender qué é a masa. Macroscopicamente, Newton estableceu qué é a resistencia (inercia) que teñen os corpos ó cambio de movemento. ¿Como se xera esta resistencia microscopicamente? Un ministro de investigación do Reino Unido ofreceu hai uns anos unha botella de champaña decente a quen, nunha páxina, lle explicara qué é a partícula Higgs e por qué se quere atopar, mesmo gastando gran cantidade de diñeiro dado que se tiña que construí-lo LHC. A explicación tiña de ser comprensible para un avogado como era el. Un dos gañadores da oferta, D. Miller, deu a seguinte expli-

cación de cómo a partícula Higgs actúa para que as partículas teñan masa e cómo o mesmo adquire masa: consideremos un cóctel ofrecido a unha colectividade, por exemplo, membros do partido conservador. O salón está cheo, coas persoas uniformemente repartidas. En cada sitio hai alguén. O campo asociado á partícula Higgs ten un valor no espacio. Neste caso é constante, é o mesmo xa sexa nun lugar ou noutro, posto que hai o mesmo número de xente en calquera lugar. De repente entra Margaret Thatcher. A medida que ela vai pasando polo salón, os admiradores forman unha aglomeración local arredor dela. Esta aglomeración aumenta a inercia a deixar de moverse. Ela non pode pasar porque hai moitos que van detrás. Noutras palabras, ela adquire masa. Igualmente se houberse un rumor entre os asistentes, sen necesidade de que estivese Margaret Thatcher, provocaríanse aglomeracións provocando resistencia a que deixase de propagarse o rumor. O mesmo campo asociado á partícula de Higgs adquire masa.

Mediante esta analogía simple descríbense dúas das ideas fundamentais: as partículas teñen diferente masa porque interaccionan de forma distinta co campo asociado á partícula de Higgs que impregna todo o espacio. A maior interacción, maior masa. A segunda idea fundamental é a rotura espontánea da simetría. Ó principio hai a mesma densidade de persoas en calquera sitio do salón. É unha simetría perfecta. Despois, aparecen as aglome-

racións, rompe a simetría. Esa rotura dá lugar a que as partículas adquiren diferente masa. A diferenciación non se pode dar doutra maneira que rompendo a simetría. Unha partícula só pode ser ela mesma e diferente das outras, porque hai unha rotura da perfección, da orde da simetría.

Un terceiro problema na Física de Partículas é o descoñecemento teórico que se ten sobre toda unha serie de constantes e parámetros, como a velocidade da luz c , a constante de Planck h , a constante de gravitación universal G , a carga do electrón e , etc. Incluso en teorías ambiciosas, como a que unifica as interaccións electromagnéticas e débiles, aparecen constantes non establecidas teoricamente e o seu valor só é determinado experimentalmente. Ten-se especulado que o valor desas constantes é ese e non outro porque se non non podería haber vida intelixente na Terra. É o famoso principio antrópico. Non imos entrar a discutir aquí ese principio. Máis ambiciosa fisicamente é a busca dunha teoría que unifique tódalas interaccións, a electromagnética-débil, a forte e a gravitatoria, na que queden determinadas tódalas constantes e parámetros dentro da mesma teoría. Sería unha teoría do todo. Hoxe en día, unha esperanza desa teoría constitúena as Teorías de supercordas, que poden englobala chamada supersimetría, simetría na que clasifican no mesmo grupo fermións e bosóns.

Non cabe dúbida de que estes tres problemas fundamentais farán que a busca da elementalidade sexa no sécu-

lo XXI tan apaixonante como o foi no século XX e que estea chea de insospeitadas sorpresas como sucedeu neste último.

Algún lector podería estar pensando: ¿para que serve todo isto? É a pregunta que fixo o ministro de Facenda británico e ilustre economista Gladstone ó físico Michael Faraday no século XIX. A resposta foi: “Non o sei, pero seguro que os seus sucesores cobrarán impostos por iso”. Efectivamente, Faraday acababa de descubri-la inducción electromagnética, clave para o funcionamento dos motores eléctricos, entre outras cosas.

Igualmente, no noso caso o fundamental foi o impresionante avance no coñecemento do máis pequeno. Indirectamente tamén foi a orixe de importantísimos instrumentos aplicados a moi diversos campos. A busca do elemental deu lugar historicamente a múltiples aplicacións. A xeito de exemplo citémo-lo descubrimento dos raios X, o escáner, a resonancia magnética nuclear, o squid (dispositivo superconductor de interferencia cuántica), a tecnoloxía de baleiro, as melloras no tratamento de datos, a arquitectura de ordenadores, a rede www, a electrónica de alta velocidade e un longo etcétera que sen ningunha dúbida reverteu en beneficio da Humanidade. Sendo todo isto importante, no é comparable co feito de que a Humanidade continúe buscando alén, no máis pequeno e no máis grande, seguindo o impulso inicial que lle permitiu saír dos bosques tropicais e propagarse pola Terra toda.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) Close, F., *La cebolla cósmica*, Barcelona, Edit. Crítica, 1988.
- (2) Braun, M., “As partículas elementais e as súas interaccións”, *Revista Galega do Ensino*, 25, 1999, 29-44.
- (3) Pajares C., “Os raios cósmicos”, *Revista Galega do Ensino*, 27, 2000, 73-85.
- (4) Zas, E., *Revista Española de Física* 10, 2, 1996, 4-10.
- (5) Cronin, J., T. K. Gaisser e S. P. Sworidy, *Investigación y Ciencia*, marzo 1997.
- (6) Tagle, J. A., *La fusión nuclear*, Madrid, Edit. Debate, 1995.
- (7) *Twentieth Century Physics*, Vol. I, II, III, Inst. Of Physics Publishing and American Institute of Physics Press, Bristol e Nova York, 1995.
- (8) Pajares, C., “¿De que están feitas as cousas? As partículas elementais”, *Revista Galega do Ensino*, 16, maio 1997, 31-48.
- (9) Steinberger, J., C. N. Yang, A. Capella, D. Fernández de Labastida e M. Báez, en *Estructuras del Universo*, Edit. Univ. Santiago de Compostela, 1994.
- (10) Pajares, C., *De lo más pequeño a lo más grande del Universo*, Santiago de Compostela, Ed. Compostela, 1996.