¿DE QUE ESTÁN FEITAS AS COUSAS? AS PARTÍCULAS ELEMENTAIS

Carlos Pajares
Universidade de Santiago de Compostela

INTRODUCCIÓN

O século XX viu como xurdían varias transformacións radicais en campos científicos que, sen lugar a dúbidas, influirán dunha maneira decisiva nas concepcións vitais e a vida mesma do xénero humano nos séculos futuros. Un destes campos é a Física. Dunha parte, a Teoría da Relatividade en 1905 e, posteriormente, a Teoría da Relatividade Xeral en 1916, e por outra parte a Mecánica Cuántica que empezaba co século e cristalizaba na década dos vinte, cambiaban dun xeito radical a nosa comprensión sobre o mundo físico modificando a visión sobre conceptos fundamentais. A dilatación do tempo e o aumento da vida media co movemento, a contracción de lonxitudes, a relativización do concepto de simultaneidade, o establecemento da posibilidade de transformación de materia en energía e desta naquela, son algunhas das consecuencias da Teoría da Relatividade, que implica unha nova e radical concepción do espacio-tempo. Esta concepción será novamente modificada na Teoría da Relatividade Xeral. A configuración do espacio-tempo, é dicir, as súas propiedades xeométricas (a súa métrica), queda determinada pola materia ou enerxía que se encontra na proximidade. O espacio-tempo non pode existir desprovisto de materia, e esta tampouco se non está inmersa nun espacio-tempo definido. Desde logo, o espacio e o tempo xa non son unhas formas *a priori* do noso pensamento á maneira de Kant, independentes de calquera posible modificación.

Se as Teorías da Relatividade e a Teoría da Relatividade Xeral levaban consigo unha gran carga conceptual que chocaba con ideas e prexuízos establecidos, non foi menor a revolución conceptual que introduciu a Mecánica Cuántica: empezando pola imposibilidade de determinar perfectamente a posición e o momento dun corpo e, polo tanto, a imposibilidade de falar de traxectorias, seguindo por asocia-lo azar á individualidade. Ó medir unha

magnitude física (presión, enerxía, momento, posición,...) nun estado dun sistema podo obter un valor, e se volvo medi-la mesma magnitude no mesmo estado, podo obter outro valor; os dous valores teñen diferente probabilidade. O determinismo e a causalidade saltan polos aires. Tamén a Mecánica Cuántica nos dirá o estraño comportamento das partículas idénticas. A un tipo delas (as que teñen spín semienteiro) gústalle-la soidade; non hai dúas coas mesmas propiedades (cos mesmos números cuánticos). Ó outro tipo, as que teñen spín enteiro, gústalle-lo amoreamento. Cantas máis partículas haxa cos mesmos números cuánticos máis alta será a probabilidade de que outra adquira os mesmos números cuánticos.

Tomando como base estas revolucións nacen moitas disciplinas, como a Física do Estado Sólido, Física Atómica, Física Nuclear, Electrónica, Óptica Cuántica, Física de Partículas Elementais ou a Cosmoloxía, que van cambia-lo panorama científico e tecnolóxico.

Palabras como transistor, semiconductor, isótopo, láser, escáner, resonancia magnética, fibra óptica, superconductor, tomografía, gammagrafía, chip, tecnoloxía da información, microscopio electrónico, microscopio de efecto túnel, nanotecnoloxía..., non serían posibles sen a existencia do soporte das ciencias básicas mencionadas anteriormente, nin tampouco serían posibles as tecnoloxías asociadas ás ditas palabras.

Sendo importante isto, non o son menos as respostas que a partir dos ditos avances se puideron ir dando a preguntas fundamentais que a humanidade leva facéndose ó longo da súa existencia. Dúas delas son: ¿De que están feitas as cousas? ¿Cal é a orixe de tódalas cousas, cal é a orixe do Universo, se este empezou algunha vez?

Neste artigo ímonos ocupar da primeira pregunta e algo da segunda, en canto esta ten que ver coa primeira, como xustamente puxo de relevo a Física neste século: o máis pequeno do Universo e o máis grande do Universo están intimamente relacionados.

AS CONSTITUÍNTES FUNDAMENTAIS

Desde as máis antigas civilizacións o home preguntouse ¿de que están feitas as cousas?. Aristóteles e Platón son dúas figuras representativas do pensamento da Grecia clásica. Para o primeiro, as cousas están compostas duns poucos elementos naturais. Para o outro, é a xeometría a partir de figuras sinxelas, triángulos, a que constrúe tódalas cousas. Demócrito introduciu os átomos como algo indivisible e a partir deles construíanse tódalas cousas. Non sempre se concibiu a existencia duns

elementos fundamentais, uns ladrillos elementais, a partir dos cales se fabrican tódalas cousas. Nalgunhas filosofías orientais mantense que todo está composto de todo, de tal maneira que nada se poida considerar cun carácter singular e indivisible. Esta clase de pensamento puxérono de moda os físicos na década dos sesenta, dirixidos por Geoffrey Chew, da Universidade de Berkeley. Sen embargo, os experimentos de Stanford de 1969 nos que se demostraba que o protón estaba composto por partículas máis pequenas, os quarks, desbotaron de vez aquela posibilidade, aínda que mesmo despois de 1969 houbera insignes seguidores das ideas de Chew, como é o caso de Heisenberg, un dos pais da Mecánica Cuántica que aínda no ano 1976 abundaba nas mesmas ideas.

É ben sabido que as cousas están compostas por moléculas que se unen para forma-los diferentes corpos. As moléculas, pola súa vez, están formadas por átomos. Os átomos non son indivisibles. Rutherford, en 1910, demostrou experimentalmente que estes posúen un núcleo central cargado positivamente e unha "casca" formada por electróns cargados negativamente, de tal maneira que compensen as cargas positivas do núcleo, dado que os átomos son electricamente neutros.

O tamaño do átomo é de arredor de varios angstroms, 1A = 10^{-8} cm,

¿De que están feitas as cousas? Dende o que ollamos ata as máis pequenas partículas. Tomada de *El País-Altea*

mentres que os núcleos son moito máis pequenos, preto de varios fermis, 1 fm = 10^{-13} cm. Entón, os núcleos son de aproximadamente cinco ordes de magnitude máis pequenos. Esta gran diferencia de tamaños podería facernos pensar que os átomos están practicamente baleiros pois se compoñen de núcleos cen mil veces máis pequenos ca eles e de electróns externos que son puntuais. Sen embargo, entre os electróns e o núcleo central existe a forza coulombiana que é a responsable de mantelos unidos formando o átomo. A existencia desa forza coulombiana implica a existencia dun campo eléctrico e polo tanto de fotóns, do "cuanto" electromagnético. O átomo non está formado só por electróns na codia e un núcleo central, senón que entre eles hai un intercambio de fotóns. Estes fotóns actúan como a argamasa, o pegamento que mantén ligados os electróns ó núcleo.

O experimento de Rutherford, físico de Nova Celandia, foi realizado en Manchester en colaboración co físico alemán Hans Geiger e un discípulo deste, E. Marsden. É un experimento típico de exploración do interior dun obxecto, neste caso dun átomo.

Se se quere explora-lo interior dun obxecto de tamaño caracterizado polo seu radio R debemos facer incidir sobre el un feixe que teña unha lonxitude de onda máis pequeña có radio, de acordo coa figura 1. Se tivese unha lonxitude de onda máis grande, o feixe non se decataría da existencia do obxecto. Dado que a lonxitude de onda dunha partícula é inversamente proporcional ó momento da dita partícula $\lambda = h/p$, explorar obxectos máis pequenos require momentos máis grandes e, xa que logo, necesitaranse feixes de partículas con enerxías maiores. A curiosidade de preguntarnos de qué están feitas as cousas e de furgar dentro de obxectos cada vez máis pequenos, fai que teñamos que construír aceleradores de partículas que consigan enerxías cada vez máis grandes.

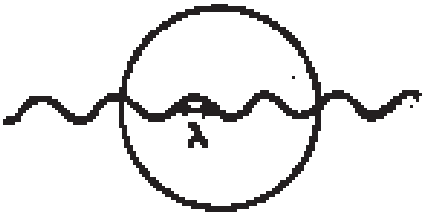


FIG. 1

Rutherford quixo investiga-la dispersión dun feixe de partículas alfa durante o paso pola materia. As partículas alfa son aproximadamente catro veces máis pesadas có núcleo de hidróxeno e con dúas veces máis carga positiva ca este. Cando un feixe de raios alfa incide nunha lámina metálica moi delgada, as partículas alfa penétrana e esperaríase que fosen desviadas lixeiramente, formando ángulos moi pequenos respecto á dirección do feixe. Isto sería polo menos o esperable se os

átomos da lámina metálica tivesen unha distribución uniforme de materia. Sen embargo, encontrouse con que algunhas das partículas retrocederan. Segundo Rutherford, este foi o acontecemento máis asombroso de toda a súa vida: "Era case tan incrible como disparar un obús de 375 milímetros a unha folla de papel e que o obús volvera e lle pegara a un". En efecto, as partículas chocaran contra os núcleos dos átomos. Os átomos están formados por un núcleo central cargado positivamente e uns electróns exteriores que compensan a carga do núcleo.

OS LEPTÓNS

O electrón é quizais a partícula coa que estamos máis familiarizados; foi descuberto debido á súa carga eléctrica e por esta causa é detectado hoxe en día. Aínda que o papel que xoga o electrón na materia ordinaria é único dado que forma parte dos átomos, sen embargo existen outras dúas partículas que posúen a mesma carga eléctrica e tódalas demais propiedades iguais, diferindo só nas súas masas, que son moi diferentes. Trátase do muón e o tauón. O muón é 200 veces máis pesado có electrón, e o tauón 3.500 veces máis. O muón e o tauón foron descubertos en 1947 e 1975 respectivamente. O primeiro descubrírono, durante uns experimentos de raios cósmicos, tres xoves italianos, Conversi, Pancini e Piccioni, que iniciaron o seu traballo nun soto de Roma durante a Segunda Guerra Mundial, onde se esconderan para evitaren ser enviados a un campo de concentración alemán. A pesar das penosas condicións de traballo realizaron moi boas medidas das desintegracións de muóns, mostrando unha vez máis que para facer boa Física non é indispensable ter grandes orzamentos. O tauón foi producido no acelerador de Stanford ó colisionaren a altas enerxías electróns e positróns. O positrón ten as mesmas propiedades do electrón e maila mesma masa pero ten oposta a súa carga eléctrica; é a antipartícula do electrón. Martin Perl, xefe do equipo que detectou o tauón, compartiu o premio Nobel de Física 1995.

O electrón, o muón e o tauón son partículas fundamentais e, ó contrario do que ocorre coas moléculas, os átomos e os núcleos, non se poden romper en pezas máis pequenas. Tense pensado moitas veces que eran partículas indivisibles e estábase nun erro. A materia ordinaria está formada de moléculas, divisibles en átomos e estes en núcleos e electróns. Os núcleos, pola súa vez, están formados por protóns e neutróns, e estes por quarks. ¿Por que agora se pensa que efectivamente o electrón, o muón e o tauón son indivisibles?

A razón estriba no seu tamaño minúsculo. De feito, pénsase que son

puntuais, que non teñen tamaño. O tamaño do electrón mídese indirectamente, medindo o momento magnético do electrón que depende pola súa vez da distribución espacial da carga do electrón. O resultado experimental está de acordo cos datos teóricos, asumindo que o electrón é puntual. O resultado reproduce o valor teórico en nove cifras. É o acordo máis preciso entre teoría e experimento que se coñece en Física. Este acordo non existiría se o electrón tivese un tamaño dez mil veces máis pequeno que 1 fermi. Polo tanto, as medidas experimentais dinnos que o electrón é polo menos máis pequeno que 10^{-4} fm. Outros datos experimentais confírmannos que o muón tamén é puntual, aínda que a cota para o seu tamaño non é tan pequena. Sobre o tauón coñécese moito menos, aínda que non hai nada ata o de agora que indique que non sexa puntual.

Cada compoñente do trío ten un neutrino asociado, chamados neutrino electrónico, neutrino muónico e neutrino tauónico. Os neutrinos son moi difíciles de detectar; non teñen carga eléctrica, teñen unha masa moi pequena ou nula e a penas interaccionan; son producidos abundantemente no Sol e nas estrelas, chegando moitos deles á Terra. Dez billóns deles atravésannos cada segundo sen interaccionar.

O neutrino foi predito en 1931 polo físico austríaco Wolfgang Pauli (antes do descubrimento do neutrón en 1932), para explica-la desintegración de núcleos atómicos. Pauli propuxo que ademais do electrón emitido na desintegración se emitía unha partícula adicional, o neutrino, sen carga, sen masa ou con moi pequena masa e que levase parte da enerxía liberada no proceso. A reacción fundamental é

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\upsilon}_e$$

mediante a cal se desintegra un neutrón nun protón, un electrón (os raios β) e o neutrino (neste caso é antineutrino $\bar{\upsilon}$). Pauli propuxo a existencia do neutrino porque, se non, na dita reacción non se conservaban nin o momento, nin a enerxía, nin o momento angular. A predicción non foi crida por moitos colegas, incluído Niels Bohr, quen chegou a enviarlle a Pauli un proxecto de artigo para publicar no que se indicaba que no mundo da microfísica, en núcleos, non se conservaba a enerxía. Pauli recomendou que non publicara o artigo e Bohr seguiu o consello.

Tardouse un cuarto de século en confirma-la predicción de Pauli. En 1956 Cowan e Reines, utilizando un reactor nuclear, foron capaces de poñer en evidencia a existencia do neutrino. Hai que dicir que no reactor nuclear se producía un enorme fluxo de neutrinos, 10^{13} por segundo e cm^2 pero, sen embargo, debido á débil

interacción destes coa materia, soamente tres deles por hora provocaban reaccións que eran detectadas. Cowan e Reines compartiron con M. Perl o premio Nobel de Física en 1995.

Igual que na desintegración beta de núcleos se emitían ademais de electróns, neutrinos (en realidade antineutrinos), hai reaccións nas que se produce conxuntamente cun muón, un neutrino. En 1962, Leon Lederman, Mel Schwartz e Jack Steinberger demostraron que esta clase de neutrinos son diferentes ós que aparecen conxuntamente con electróns. A uns chámanlles neutrinos electrónicos e a outros neutrinos muónicos. Lederman, Schwartz e Steinberger foron galardoados co premio Nobel no ano 1987 por este descubrimento. Tamén o tauón ten asociado un neutrino, o neutrino tauónico.

Estas seis partículas, agrupadas en tres xeracións de acordo coa figura 2, son os seis leptóns, que experimentan a chamada forza débil, caracterizada por ter un alcance moi curto, ser sentida só a distancias da orde do fermi, e ter un valor moi pequeno. Da mesma maneira que diciamos que as forzas electromagnéticas entre partículas cargadas se realizaban mediante o intercambio de fotóns, a forza débil realízase mediante o intercambio dunhas partículas, que son as chamadas W^+,W^- y Z_O e posúen unha gran masa, máis de 80 veces as

As tres xeracións de leptóns e quarks. FIG. 2

dúas primeiras e 91 veces a terceira, a masa do átomo de hidróxeno. A predicción destas tres partículas, así como o valor das súas masas, foi reflectida pola teoría que unifica a forza electromagnética coa débil, formulada nos anos 1967-68 por Weinberg e Salam que, conxuntamente con Glashow, obtiveron o premio Nobel. Os W y Z^O foron detectados no supercolisionador de protóns do Centro Europeo de Partículas Elementais (CERN) de Xenebra, en 1983, por un equipo encabezado polo italiano Carlo Rubbia que gañou o premio Nobel, compartido co holandés Van der Meer quen desenvolveu as técnicas usadas no acelerador que fixo posible a súa detección.

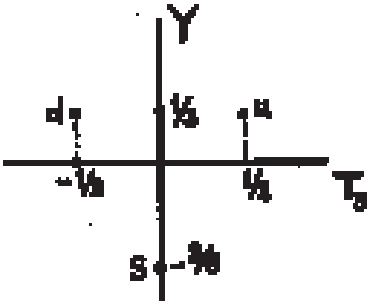
¿Por que non hai máis que tres xeracións de leptóns, nin unha máis nin unha menos? Non hai ningunha razón teórica para que isto sexa así. Hai dúas razóns experimentais. A vida media da partícula Z^O é moi sensible ó número de xeracións de leptóns. Se fose menos (maior) de 3 esa vida media

tería que ser sensiblemente maior (menor) que a medida experimentalmente. A segunda razón provén do mundo da astrofísica. O número de clase de neutrinos inflúe decisivamente na nucleosíntese dos diversos elementos que se encontran no Universo, en particular de deuterio e helio. Da abundancia observada destes elementos conclúese que o número de clases de neutrino debe estar arredor de 3. Vemos que o mundo das partículas elementais e o da astrofísica están moi ligados.

OS QUARKS

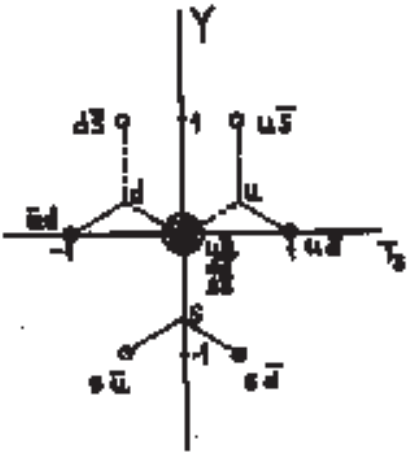
Como dixemos anteriormente, o núcleo atómico está formado por protóns e neutróns. ¿Como é posible que varios protóns que teñen carga positiva se manteñan xuntos formando cos neutróns os núcleos atómicos e superando a forza coulombiana que faría que se repelesen? Para isto é necesaria a existencia dunha nova forza exercida a distancias pequenas e de intensidade forte, moito máis forte que a forza electromagnética. Trátase da interacción forte. Con motivo do estudio das características da interacción forte empezaron a descubrirse toda unha serie de partículas. A principios dos anos sesenta o número de partículas detectadas superaba amplamente as cen. ¿Como se podería poñer orde naquel zoo de partículas? En física coñecemos casos parecidos e sabemos cómo proceder e qué é o que hai que investigar para poder dar coa clave. O sistema periódico dos elementos é un exemplo. Unha gran variedade de elementos puideron ser clasificados cando se coñeceu a simetría subxacente, o principio de Pauli. Por iso, diante da gran variedade de partículas buscouse a simetría que nos permitira entender tal diversidade e clasifica-las partículas.

Murray Gell-Mann, George Zweig e Yuval Ne´eman, independentemente, propuxeron que a simetría buscada era o grupo SU(3). As interaccións fortes aproximadamente non cambiaban mediante as transformacións do dito grupo, clasificando os hadróns, é dicir, as partículas elementais que sofren interaccións fortes. En linguaxe máis matemática, asignaron a cada partícula un vector que é vector base dunhas determinadas representacións irreducibles do grupo. Como toda representación irreducible de SU(3) pódese obter a partir de 2 fundamentais, de dimensión 3, a 3 e a conxugada 3^*, facendo os productos (tensoriais) convenientemente. Ós 3 vectores base da representación 3, Gell-Mann chamoulles quarks, nome arbitrario, tomado do *Finnegans Wake* de James Joyce, sen significación en inglés. Os da 3^* son os antiquarks. Os vectores das representacións de SU(3) desígnanse polos valores dos números cuánticos da hipercarga Y, o isospín T e a terceira

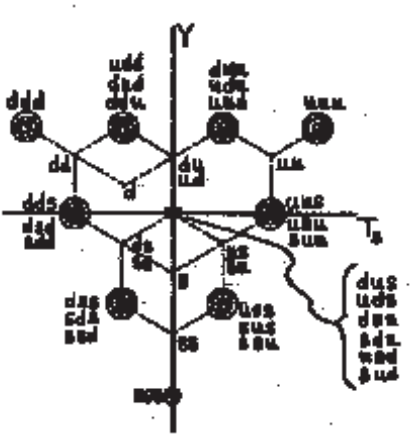


Os quarks u, d, s. FIG. 3

Os antiquarks $\bar{u}$, $\bar{d}$, $\bar{s}$. FIG. 4



Producto quark-antiquark. FIG. 5



Producto quark-quark-quark. FIG. 6

compoñente de isospín T_3. Se representamos en ordenadas a hipercarga Y, en abscisas a terceira compoñente de isospín T_3 , chamando *u*, *d* e *s* ós 3 quarks e $\bar{u}$, $\bar{d}$, $\bar{s}$ ós tres antiquarks, témo-las figuras 3 e 4. Dado que a carga usual Q e a hipercarga están conectadas pola relación de Gell-Mann-Nishijima $Q = T_3 + Y/2$, as cargas dos quarks *d*, *u* e *s* non son enteiras, sendo o seu valor -1/3, 2/3 e -1/3 respectivamente.

Os números cuánticos das partículas chamadas mesóns poden obterse mediante o producto quark--antiquark. En efecto, se tomando

como centro cada punto *d*, *u*, *s* do diagrama Y, T_3 debuxámo-la figura 4, obtémo-los nove puntos da figura 5. Estes nove puntos teñen os números cuánticos dados pola figura 5 e representan nove vectores. En linguaxe máis matemática, o que se fixo é o producto tensorial dos vectores base de 3 e 3* que dá lugar a 9 vectores, 8 vectores base dunha representación irreducible de dimensión 8 e 1 vector, o base da representación de dimensión 1.

Simbolicamente:

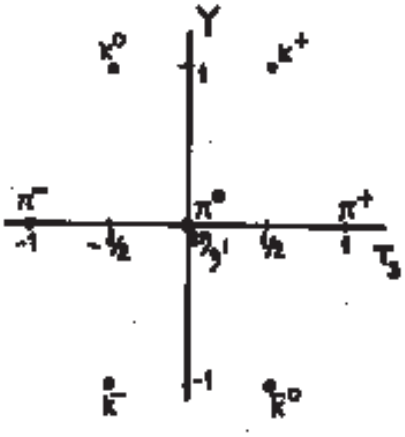
$$3 \otimes 3^* = 1 \oplus 8$$

As partículas chamadas barións poden obterse mediante o producto quark-quark-quark. Procedendo de xeito similar ó caso anterior, obtense a figura 6 cos números cuánticos dos 27 vectores. Agora simbolicamente:

$$3 \otimes 3 \otimes 3 = 1 \oplus 8 \oplus 8 \oplus 10$$

Ós barións asígnaselle-lo número cuántico bariónico B = + 1, tendo os quarks B = + 1/3 e os antiquarks B= - 1/3.

Desta maneira puidéronse clasifica-los hadróns coñecidos. Como exemplo, na figura 7 representámo-lo octete e singlete de mesóns de spín 0, e na 8 os de spín 1. Na figura 9 representámo-lo octete de barións de spín 1/2 e na 10 o decuplete de spín 3/2.



Octete e singlete de mesóns de spín cero. FIG. 7

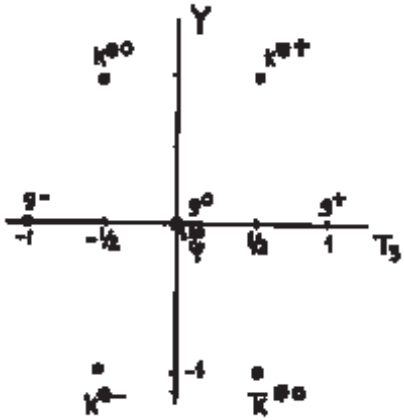


FIG. 8

O zoo de partículas elementais quedaba clasificado e ordenado desta elegante maneira. Hai que dicir que cando Gell-Mann clasificou as partículas non estaban detectadas todas, en particular a omega non o

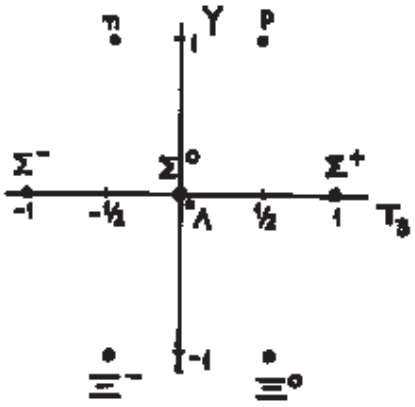


FIG. 9

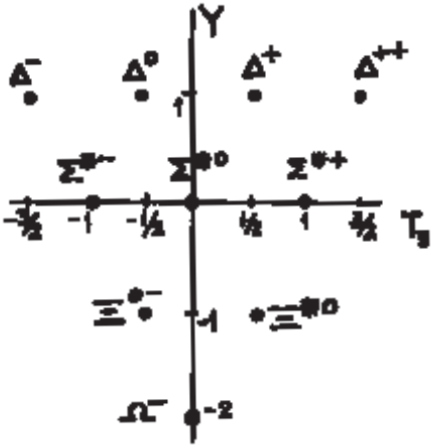


FIG. 10

estaba. A predicción era clara e a súa detección supoñía un test para a teoría. A Ω^- axiña foi "cazada" nunha cámara de burbullas, en experiencias realizadas no acelerador do laboratorio nacional americano de Brookhaven.

En 1969 Gell-Mann foi galardoado co premio Nobel. Na citación poñíase de relevo o descubrimento da estrañeza (o número cuántico estrañeza S= Y + B) e da vía-óctuple. Tamén mencionaba o traballo realizado polo israelí Nee´man. A este déronlle o mesmo ano o premio Einstein, que por primera vez se concedía a alguén non norteamericano.

Aínda que a introducción dos quarks dera lugar a uns grandes avances e a predicciónes espectacularmente confirmadas de forma experimental, non había ningunha evidencia de que estes quarks existisen realmente; poderían ser entes meramente matemáticos, extremadamente útiles pero sen existencia física. A pregunta fundamental era: aínda que matematicamente tódolos hadróns están formados por quarks ou por quarks e antiquarks, ¿é realmente certo que os hadróns están compostos destes obxectos? Para contesta-la pregunta preparouse e realizouse no ano 1969 un experimento no acelerador de Stanford. Lanzáronse electróns contra protóns; buscábanse sucesos en que os electróns foran desviados a grandes ángulos. É unha especie de adaptación do experimento de Rutherford, para explorar neste caso o protón en lugar de átomos metálicos. Entre o electrón e o protón intercámbiase un fotón dunha lonxitude de onda moi pequena, menos de 1 fm, o tamaño do protón. O

resultado do experimento foi claro: o protón tiña partes, hipotéticos quarks, de spín 1/2. Ós tres principais responsables do experimento de Stanford, J. I. Friedman, H. W. Kendall e R. Taylor foilles concedido o premio Nobel.

Ós tres quarks, *d*, *u* e *s* engadíronse outros tres. Primero en 1974, Ting no acelerador de Brookhaven e Richter (irmán do famoso xeólogo que dá nome á escala que cuantifica os sismos) no de Stanford, descubriron independentemente a partícula J/Ψ de masa 3.1 Gev., estado ligado do quark en canto c e o seu antiquark $\bar{c}$. En seguida se descubriron outras partículas que contiñan o quark c. Ting e Richter recibían o premio Nobel en 1976. En 1975, un equipo liderado por Lederman, traballando no acelerador do laboratorio Fermi, descubriu a partícula upsilon de 9.46 Gev e formada por un novo quark b e o seu antiquark $\bar{b}$. Finalmente, en 1994, no acelerador do laboratorio Fermi descubríronse sucesos que proviñan da fragmentación dun quark t e do seu antiquark $\bar{t}$.

Polo tanto, non temos 3 quarks diferentes senón 6 agrupados en tres xeracións, da mesma maneira que os leptóns, segundo se reproduce na figura 2. ¿Por que hai o mesmo número de xeracións de quarks que de leptóns? Non hai actualmente unha resposta convincente á dita pregunta. Unha razón é o feito de que no cálculo de determinadas desintegracións de partículas se obteñen varios infinitos (en contradicción, por suposto, co valor experimental), se non houbese unha cancelación deles que se efectúa debido a unha relación moi determinada que satisfan as cargas dos leptóns e dos quarks dunha mesma xeración. Esta relación poida que teña a súa orixe nunha simetría subxacente que nos permita relaciona-los leptóns e os quarks pero, en calquera caso, cada xeración de leptóns debe ir acompañada dunha de quarks para que poida darse a cancelación mencionada anteriormente.

O experimento de Stanford fíxonos constatar que os quarks eran entes físicos reais e non obxectos matemáticos útiles pero ficticios. Sen embargo, eses quarks víranse dentro do protón, non fóra del. ¿Poderíanse caza-los quarks libres, non ligados dentro dun hadrón? ¿Poderíase, entón, detectar carga fraccionaria?

En 1973, Fritzsch, Gell-Mann e Leutwyler propuxeron a teoría chamada cromodinámica cuántica, que intenta describi-la interacción forte, é dicir, as forzas entre os hadróns a partir da forza entre os quarks. Os quarks interaccionan intercambiándose unhas partículas chamadas gluóns, do inglés *glue* que significa pegamento. En efecto, os quarks mantéñense ligados dentro do protón

debido ó pegamento existente entre eles, os gluóns, que son os portadores da forza forte.

Se temos unha carga eléctrica negativa, o campo eléctrico producido por esta dá lugar ó fenómeno coñecido como polarización do baleiro, mediante o cal arredor da carga orixinal se crean pares de cargas positivas e negativas que, debido á forza eléctrica que atrae as cargas positivas e repele as negativas, se orientan tal como aparece na figura 11. Se medímo-la carga neta a unha distancia maior có tamaño da carga orixinal atopámonos que esta é menor. A carga aumenta ó diminuí-la distancia na que miramos. No caso da interacción forte, a constante que establece a magnitude da forza e que xoga polo tanto o mesmo papel que a carga eléctrica respecto á forza coulombiana, sofre un fenómeno parecido á polarización do baleiro, pero neste caso, debido ás peculiaridades da forza, o efecto é o oposto: a constante, e polo tanto a intensidad da forza, diminúe coa distancia. Este comportamento explica por qué os quarks se comportan coma se estivesen libres dentro do protón.

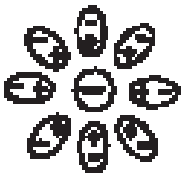


FIG. 11

¿Que sucede a distancias grandes, cando se quere separar un quark dos outros dous no protón, ou un quark dun antiquark en calquera mesón? Non hai unha demostración rigorosa, pero crese que en condicións normais é imposible obter un quark libre. Se se quere separar un quark dun antiquark dentro dun mesón, as forzas entre eles son tales que ó estirar non se conseguirá un quark illado por unha parte e un antiquark pola outra, senón que se obteñen dous mesóns, cada un formado por un quark e un antiquark. É moito máis fácil crear un par quark-antiquark, e polo tanto rompe-lo mesón en dous mesóns, que illar un quark e un antiquark. É parecido ó que sucede se queremos illar un polo magnético, o máis que conseguiremos rompendo un imán será dous imáns, nunca un polo magnético illado (prohíbeo a lei div B = 0).

Rotura dun mesón en dous mesóns. FIG. 12

Na busca do infinitamente pequeno, da resposta á pregunta ¿de que están feitas as cousas?, teríase chegado por primeira vez a uns constituíntes que non poden ter unha existencia separada, o que permitirá pensar que son efectivamente os constituíntes últimos da materia.

¿Non terán os quarks unha estructura interna? En principio nada impide que os quarks teñan unha estructura interna. Sen embargo, a idea xeralmente aceptada hoxe en día é que os quarks, coma os leptóns, son elementais. Os datos experimentais non só non presentan signo ningún do posible carácter composto dos quarks, senón que parecen indicar que estes non teñen estructura interna.

Hoxe en día a natureza aparece construída de 12 ladrillos fundamentais, 6 leptóns e 6 quarks, utilizando de argamasa as partículas W^+, W^- e Z^O no caso da interacción débil, os gluóns no caso de seren hadróns, e o fotón se a unión é debida á interacción electromagnética como son os casos de enlace molecular e dos átomos.

Neste panorama non están contestadas nin moito menos tódalas preguntas. En particular, non sabemos por qué os quarks e os leptóns teñen masa diferente, nin cál é o mecanismo que os fai distintos. Algunhas contestacións parciais coñécense, mais non imos entrar nelas por falta de espacio, non por falta de interese.

En todo o dito ata o de agora non mencionámo-la forza gravitatoria. A razón é a nosa ignorancia e non a súa importancia que de maneira ningunha é desprezable. A nosa ignorancia provén da incompatibilidade da Teoría Xeral da Relatividade e da Mecánica Cuántica, posta de manifesto cando se entra a analizar distancias menores a 10^{-33} cm ou tempos menores a 10^{-43} seg ou masas superiores a 10^{19} Gev, coñecidas como a lonxitude, tempo e masa de Planck. En efecto, polo principio de incerteza cuántica de Heisenberg, se queremos investigar a distancias moi pequenas da orde Δx, teremos que utilizar partículas con momento p ou enerxía E moi alta, de tal maneira que $E \approx p \geq 1/\Delta x$ (utilizámo-lo sistema de unidades natural $h = c = 1$). Por outra parte, unha partícula de tan alta enerxía crea un potencial gravitatorio $U = G\,E/\Delta x$ (G é a constante de gravitación) que distorsiona de acordo coa Teoría da Relatividade Xeral de Einstein, o espacio-tempo. Esta distorsión exprésase a través da métrica que para a parte tempo-tempo se expresa en función do potencial gravitatorio mediante a fórmula

$$g_{00} \cong 1 + 2U$$

que para que teña sentido, U debe ser << 1. Tendo en conta o dito anteriormente, tal desigualdade implica que $GE/\Delta x << 1$ e polo tanto $G/(\Delta x)^2 << 1$, é dicir,

$$\Delta x >> \sqrt{G}$$

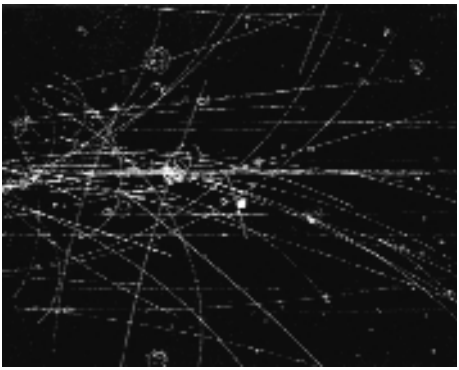
As distancias que podemos explorar teñen que ser maiores que a raíz cadrada da constante de gravitación universal. Utilizando o valor da dita constante, obtémo-lo valor 1.6×10^{-33} cm, a lonxitude de Planck. Igualmente, podemos traduci-

lo razoamento en masa, obtendo 1.22 x 10^{19} Gev, a masa de Planck; o de tempo obtendo t = 10^{-43} seg, o tempo de Planck.

Hai outras preguntas sobre o esquema dos constituíntes fundamentais da natureza relacionados coa orixe e evolución do Universo. Non é o momento de describir e analizar este punto, aínda que si queremos mencionar que os quarks case libres puideron existir cerca da orixe do Universo, a enormes temperaturas e a grandes densidades. Sería unha sopa de quarks.

SOPA DE QUARKS

Na historia da resposta á pregunta ¿de que están feitas as cousas? progrésase nunha dirección: Obxectos→ moléculas → átomos → →núcleos e electróns → quarks e leptóns. Vaise da diversidade á unidade, da complexidade á simplicidade. A historia do Universo progresa en sentido contrario. A 10^{-43} seg, teriamos un universo dunha única clase de partículas, e só existiría unha única clase de interaccións. Habería unha simetría perfecta e tódalas forzas da natureza estarían unificadas. O Universo estaría a moi altas temperaturas. A medida que este se foi expandindo e arrefriando, foron sucedéndose os procesos de diferenciación e diversificación, aparecendo as diferentes forzas da natureza así como



Os grandes aceleradores de partículas permiten o estudio das partículas elementais; estas e as súas interaccións pódense detectar nas cámaras de burbullas como esta do CERN

os diferentes leptóns e quarks. Arredor de 10^{-5} segundos, o Universo tería unha temperatura duns 150 Mev (2.10^{12} Kelvin) e unha densidade de materia arredor de 10 veces máis cá densidade de materia existente nos núcleos, e entón esperaríase que estivese constituído por unha sopa quente de quarks e gluóns. A distancia entre os quarks sería moi pequena. De acordo co dito arriba, a interacción entre eles sería tamén moi pequena e estes comportaríanse como libres. Posteriormente e na medida en que o Universo se foi expandindo e arrefriando, os quarks condensáronse formando protóns e neutróns, así como partículas. Estes protóns e neutróns, despois, ó baixa-la temperatura, formarían núcleos que pola súa vez se recombinarían con electróns para formaren átomos, e estes agruparíanse en determinadas condicións para formaren moléculas. O Universo,

conforme diminúe a súa temperatura, realiza diversas transicións de fase de maneira análoga ás transicións que experimenta o vapor de auga pasando a agua e posteriormente a xeo.

Se existiron os quarks libres a moi altas temperaturas e en gran densidade, ¿non existirá algunha pegada dese estado inicial no Universo? ¿Será posible reproduci-la sopa de quarks en laboratorio? Para contestar sobre todo á segunda pregunta realizáronse diversos experimentos, principalmente en Brookhaven e no CERN, e proxectáronse experiencias nos futuros aceleradores RHIC (colisionador ultrarrelativista de ións pesados) e LHC (gran colisionador hadrónico) de Brookhaven en Long Island e do CERN en Xenebra, respectivamente, que se espera que entren en funcionamiento en 1999 e no 2005. A idea subxacente nestas experiencias é a seguinte: ó lanzar un núcleo pesado contra outro a moi altas enerxías produciranse moitas colisións entre os protóns e neutróns dun núcleo e do outro. Dado que en cada colisión a moi alta enerxía se producen moitas partículas, o resultado da colisión núcleo pesado contra núcleo pesado sería a producción de decenas de miles de partículas. Sen embargo, para que se poida falar de partícula, esta debe ocupar polo menos un volume mínimo. Na colisión frontal de dous núcleos a moi alta enerxía, durante un curto período de tempo –arredor de un segundo–, as partículas producidas non poden ter existencia pois non hai volume dispoñible. Durante ese tempo, en lugar de partículas, terémo-los seus constituíntes, os quarks a moi altas temperaturas. A sopa de quarks.

¿Como poderemos saber se realmente se obtivo en laboratorio a sopa de quarks libres?

Hai diversas trazas propostas. Algunhas delas son: aumento do número de fotóns producidos con baixo momento, diminución da masa e aumento da vida media dalgunhas partículas determinadas como a ς, aumento de partículas producidas que conteñen un quark *s*, e *c* ou os seus antiquarks, supresión da producción da partícula J/Ψ. Vexamos con máis detalle esta última.

O mesón J/Ψ formado polo quark c e o seu antiquark c prodúcese raramente en colisións núcleo-núcleo. Para forma-lo mesón J/Ψ o quark c e antiquark $\bar{c}$ están ligados pola interacción forte. Sen embargo, nunha sopa de quarks libres o quark *c* e o antiquark $\bar{c}$ móvense libres, de tal maneira que cando a sopa de quarks arrefríe e se produza a transición de fase e a interacción forte volva actuar, será practicamente imposible que o *c* e o $\bar{c}$ volvan recombinarse, pois estarán lonxe. Será moito máis fácil que o quark *c* se recombine con outros

quarks máis frecuentes, por exemplo cos u, d formando mesóns do tipo $c\bar{u}$, $c\bar{d}$, por unha parte, e $\bar{c}u$, $\bar{c}d$, por outra. Polo tanto, se se obtén a sopa de quarks en colisións núcleo-núcleo produciranse menos mesóns J/Ψ que no caso de que non se obtivese.

Unha colaboración internacional, esencialmente franco-portuguesa, traballando no CERN con colisións osíxeno-uranio e xofre-uranio, encontrou en 1987 unha supresión significativa da producción de J/Ψ; sen embargo, de contado teóricos da colaboración Orsay-Santiago de Compostela apuntaron que as características da dita supresión se explicaban mediante física máis convencional: simplemente, os mesóns J/Ψ, unha vez producidos, chocaban con outros protóns e neutróns do núcleo branco, rompéndoos.

En 1996, a colaboración franco-portuguesa encontrou en colisións chumbo-chumbo unha supresión maior nun factor 2 do que se esperaría facendo simples extrapolacións das explicacións convencionais. En ambientes científicos hai unha gran polémica acerca de se estes datos experimentais son unha mostra clara da obtención da sopa de quarks. Agora, sen embargo, a situación é diferente á de 1987, e os datos experimentais non teñen unha fácil explicación convencional.

EPÍLOGO. SIMETRÍAS

Na aventura de dar resposta ás preguntas ¿de que están feitas as cousas? ¿cal é a orixe e evolución do Universo?, atopámonos sempre cunha palabra clave e máxica: simetría.

O concepto de simetría é tan vello coma a civilización. Cómo naceu é un misterio que quizais permaneza oculto para sempre. Sen embargo, o home sempre se sentiu profundamente impresionado polas estructuras simétricas do mundo físico e biolóxico. A medida que a civilización humana se desenvolve, a simetría penetra gradualmente en tódalas disciplinas da actividade humana: pintura, escultura, literatura, arquitectura, música. As elegantes formas visuais que aparecen nestas actividades responden a formas simétricas. Tamén aparece en formas sonoras. O "Crab Canon" da oferta musical de J. S. Bach é un dueto de violíns no que a música de cada un deles é o resultado de aplica-la "moviola" á musica do outro. É dicir, se se dá marcha atrás á música dun dos violíns obtense a música do outro. Unha música é o resultado de aplica-la inversión temporal á outra. A música dos dous violíns é simétrica respecto á inversión temporal.

O concepto de simetría tal como o usamos neste exemplo, é dicir, transformación baixo a cal o sistema obtido coincide co inicial, tivo a súa

confirmación matemática no século XIX, primeiro con Galois (1811-1832) mediante o concepto de grupo, e máis tarde con Sophus Lie (1842-1899) que xeneralizou a idea de grupo creando a teoría de grupos continuos ou grupos de Lie. O concepto de grupo e o de grupos continuos son a materialización matemática do concepto de simetría.

Sen embargo, o importantísimo papel da simetría en física non é coñecido ata este século, e son xustamente as dúas teorías físicas máis relevantes do século XX as que axudan a establecelo: a Teoría da Relatividade e a Teoría Cuántica. A primeira dinos que as leis da física quedan igual ó aplicarlles unhas transformacións determinadas que mesturan o espacio e o tempo. É a simetría do grupo de Lorentz. O segundo avance conceptual provén da Teoría Cuántica que deixa claro que as leis de conservación están relacionadas coa simetría.

As leis de conservación eran ben coñecidas incluso en tempos de Newton, e a súa relación coas simetrías pode establecerse á marxe da Teoría cuántica, pero non foi ata despois do establecemento desta que se viu clara a relación. A conservación da enerxía é unha consecuencia de que ó traslada-lo tempo, o sistema estudiado non cambia. A conservación do momento angular é unha consecuencia da invariancia respecto ós xiros. Tódalas leis de conservación son unha consecuencia dunha simetría.

Esta profunda conexión entre dúas cousas, en principio tan diferentes, é unha das maiores achegas conceptuais realizadas no século XX. Sen embargo, non é a única relacionada coa simetría. En efecto, a partir do traballo realizado por C. N. Yang e R. L. Mills en 1954, establécese que un determinado tipo de simetrías, as "simetrías de gauge" determinan totalmente as forzas da natureza. O problema de consegui-la unificación de tódalas forzas da natureza queda reducido a achar un grupo adecuado tal que a simetría gauge correspondente dea lugar ás forzas correctas. A simetría establece as forzas.

Ó final, a busca das respostas ás preguntas ¿de que están feitas as cousas? ¿cal é a orixe do Universo?, a busca da unificación total, é a busca da simetría perfecta ou, se se quere, da beleza perfecta.