

## Supersimetria

Experiências tentam confirmar teoria que relaciona partículas subatômicas.

POR JAN JOLIE



Esse conceito estranho e de difícil compreensão, proposto na teoria das partículas elementares, começa a ser confirmado pela experimentação

### Supersimetria

MAÇÃS E LARANJAS são tão diferentes entre si quanto as partículas quânticas denominadas férmions e bósons. Assim como um espelho comum não pode fazer com que uma maçã tenha a aparência de uma laranja, não existe, na física, uma simetria simples capaz de transformar um férmion em um bóson - ou vice-versa. Para fazer essa mágica, é preciso empregar a supersimetria, uma categoria extraordinária de simetria, que pode conter a chave para uma profunda compreensão do

A supersimetria é uma simetria notável. Na física de partículas elementares, ela inter-relaciona partículas completamente diferentes: os férmions (como os elétrons, prótons e nêutrons), que constituem o mundo material, e os bósons (como os fótons), que geram as forças da natureza. Os férmions são os individualistas e solitários do mundo das partículas: dois férmions jamais ocupam o mesmo estado quântico. Sua aversão a companheiros íntimos é forte o bastante para evitar o colapso de uma estrela de nêutrons, mesmo quando a gravidade supera todas as outras forças da natureza. Os bósons, ao contrário, são imitadores de fácil convívio, e unem-se prontamente em estados idênticos. Cada bóson que se encontra num certo estado instiga os outros de sua espécie a imitá-lo. Sob condições propícias, os bósons formam exércitos de clones. É o que ocorre com os fótons de um raio laser ou os átomos do hélio-4 superfluido. Porém, no espelho mágico da supersimetria, os anti-sociais férmions de alguma maneira se parecem com os sociáveis bósons - e vice-versa.

### RESUMO/SUPERSIMETRIA

Na física quântica, todas as partículas e campos dividem-se em duas categorias extremamente diferentes: férmions e bósons. Os férmions incluem os elétrons, prótons e nêutrons, que constituem a matéria. Os bósons incluem os fótons (responsáveis pelo eletromagnetismo) e os glúons (que mantêm os quarks estruturados).

As simetrias possuem papéis importantes em toda a física. Todas as simetrias simples respeitam a distinção entre bósons e férmions. Porém, as teorias da supersimetria

De forma figurada, pode-se dizer que a supersimetria é um tipo de simetria que permite comparar maçãs e laranjas. Segure uma maçã diante do espelho da supersimetria, e o reflexo dessa maçã terá a aparência e o sabor de uma laranja. Nenhuma simetria simples existente na física possui essa magia. Simetrias simples podem agir como os espelhos deformadores de um parque de diversões, fazendo, por exemplo, com que inofensivos elétrons se pareçam com fantasmagóricos neutrinos, mas nunca poderiam transformar um férmion num bóson. Só a supersimetria é capaz de fazê-lo. Essa é, pelo menos, a teoria. Os teóricos das partículas elementares estudam com afinco a supersimetria desde sua invenção, na década de 1970, e muitos crêem que ela guarda a chave para o próximo grande avanço em nossa compreensão das partículas e das forças fundamentais. Os pesquisadores experimentais, no entanto, procuraram as partículas previstas pela supersimetria em seus aceleradores de altíssima energia, até agora sem resultado.

Na década de 1980, os teóricos propuseram que as colisões violentas de partículas não seriam necessariamente a única maneira de detectar a supersimetria. Eles previram que uma forma diferente de supersimetria poderia existir em determinados núcleos atômicos. Neste caso, também, a supersimetria relaciona objetos físicos que são muito diferentes entre si: núcleos com números pares de prótons e nêutrons e núcleos com números ímpares de prótons e nêutrons. Mais uma vez, isso envolve férmions e bósons, pois uma partícula composta que contém um número ímpar de férmions é ela mesma um férmion, ao passo que um número par de férmions produz um bóson.

Para compreender melhor a supersimetria nuclear, imagine um salão cheio de pessoas dançando, representando os núcleons que formam um núcleo. Quando há um número par de pessoas, todos têm seus parceiros e o salão fica cheio de casais dançando. Quando há um número ímpar de pessoas, uma delas fica vagando sozinha pelo salão. No espelho supersimétrico, porém, essa pessoa se parece magicamente com qualquer outro casal e dança em sincronia com os demais.

Da mesma forma, um núcleo com um número ímpar de prótons e nêutrons tem por imagem um núcleo com número par de núcleons - e vice-versa.

incorporam poderosas propriedades matemáticas que inter-relacionam bósons e férmions. Essas teorias podem ser cruciais para uma compreensão profunda da física de partículas, mas os pesquisadores experimentais ainda não detectaram a supersimetria em partículas elementares. Nos núcleos dos átomos, no entanto, os prótons e nêutrons formam pares que se comportam como bósons compostos. Assim, os núcleos formam quatro classes distintas (par-par, par-ímpar, ímpar-par e ímpar-ímpar), dependendo da presença ou ausência de paridade completa entre cada próton e nêutron. Os físicos previram que uma variante da supersimetria deveria relacionar um "quadrado mágico" de quatro núcleos desses tipos. Agora, os experimentos confirmaram essa previsão.

## MODELOS NUCLEARES



Cem trilhões (10<sup>14</sup>) de vezes mais densos do que a água, os núcleos (a) são pacotes extremamente compactos de prótons (bolas alaranjadas) e nêutrons (bolas azuis). Devido à força e complexidade da poderosa atração nuclear que mantém os núcleos coesos, há muito os físicos recorrem a modelos aproximados para descrever os seus estados quânticos.

O modelo de camadas (b) é muito semelhante ao que descreve os elétrons nos átomos. Ele considera o núcleo atômico como um conjunto de nêutrons e prótons (núcleons) interagindo fracamente, mantidos num poço de energia potencial. Os núcleons podem ocupar várias órbitas, de forma análoga aos elétrons no átomo, mas constituindo dois conjuntos distintos - um para os prótons e outro para os nêutrons. Assim como os elétrons, os núcleons são partículas fermiônicas, e o princípio de exclusão de Pauli aplica-se a eles. Isso significa que dois núcleons não podem ocupar a mesma órbita. As órbitas formam camadas ou conjuntos de órbitas com energias similares, com grandes vazios entre elas. Núcleos com uma camada fechada (cheia) de prótons ou uma camada fechada de nêutrons, e especialmente aqueles com ambas, apresentam grande estabilidade, assim como os átomos de gases nobres, que possuem camadas fechadas de elétrons.

No caso de núcleos que, além de uma camada fechada, possuem alguns núcleons adicionais (c),

podemos ignorar, até certo ponto, os núcleons individuais na camada fechada, e nos concentrarmos nos poucos núcleons que se encontram fora dela. As interações entre esses núcleons externos é que devem ser levadas em conta. Em núcleos pesados, com muitos núcleons fora da última camada fechada, os cálculos tornam-se proibitivamente complexos, até mesmo para computadores modernos.

O modelo coletivo, ou modelo da gota líquida (d), aplica-se a núcleos pesados, compostos por cem ou mais núcleons. O modelo não considera os núcleons individuais, mas vê o núcleo como uma gota de líquido quântico, capaz de sofrer diversas vibrações e rotações. As propriedades do núcleo são, então, representadas por grandezas simples como densidade, tensão superficial e carga elétrica distribuída no líquido. Este modelo mostrou-se extremamente eficaz na descrição de certos tipos de núcleos bem diferentes dos de camadas fechadas: aqueles que contêm uma grande quantidade de núcleons na camada exterior.

Na física quântica, excitações, como as vibrações de uma gota, assumem muitas propriedades características das partículas, e podem comportar-se como férmions ou bósons. Quando o modelo coletivo é aplicado aos sistemas mais simples (núcleos par-par, que contêm quantidades pares de prótons e nêutrons), as vibrações superficiais, que são os constituintes básicos do modelo, comportam-se como bósons. No caso de um número ímpar de núcleons, o último núcleon ocupa uma órbita que depende do estado da gota, e as excitações são férmions.

O modelo de bósons interativos (e) unifica o modelo de camadas e o modelo da gota líquida, empregando a propriedade de paridade da força nuclear. O modelo analisa os núcleos pesados par-par como conjuntos de pares de núcleons fora de uma camada fechada, como se fossem casais movimentando-se numa pista de dança, em vez de indivíduos. Quando dois núcleons formam um par, assemelham-se a um bóson, porém, diferentes tipos de pares são possíveis. Em analogia à dança, alguns casais dançam uma valsa lenta, enquanto outros dançam um rock acelerado.

Pequisadores experimentais detectaram recentemente uma versão dessa extraordinária simetria em isótopos de ouro e de platina, com prótons e nêutrons agindo como dois grupos de estudantes, de duas escolas diferentes, dançando no mesmo salão de baile. Nessa supersimetria nuclear, quatro casos estão presentes, em vez de dois: o caso em que ambas as escolas têm um dançarino sobrando (números ímpares de prótons e nêutrons), os dois casos em que uma das escolas tem um dançarino sobrando (número par de prótons e número ímpar de nêutrons, ou vice-versa), e o caso em que todos têm parceiros (números pares de prótons e de nêutrons).

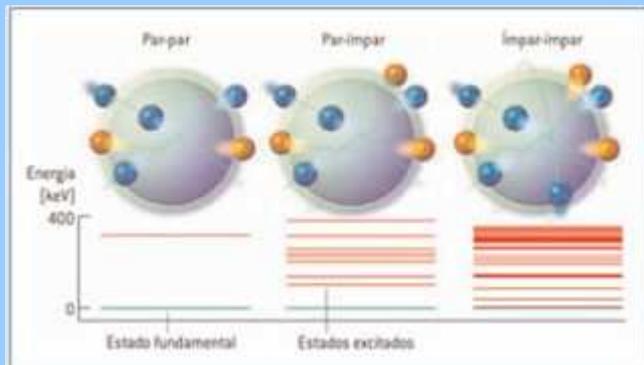
O núcleo atômico é um sistema quântico fascinante, que contém muitos segredos. Por décadas, seu estudo tem sido uma fonte contínua de descobertas inesperadas. Os teóricos têm de empregar diversas ferramentas para compreender todas as facetas da física extremamente complexa dos núcleos. O novo resultado incorpora a supersimetria ao conjunto das ferramentas - e demonstra que a supersimetria não é uma mera curiosidade matemática, mas algo que existe mesmo no mundo.

A pesquisa em física nuclear também fornece ferramentas para a compreensão de outros sistemas quânticos com características gerais semelhantes às dos núcleos - os chamados sistemas finitos de muitos corpos, contendo desde um punhado de partículas até centenas delas. Os métodos experimentais permitem agora o estudo de objetos como esses, constituídos por pequenas quantidades de átomos ou moléculas. E a supersimetria pode ser importante também para esses campos da física.

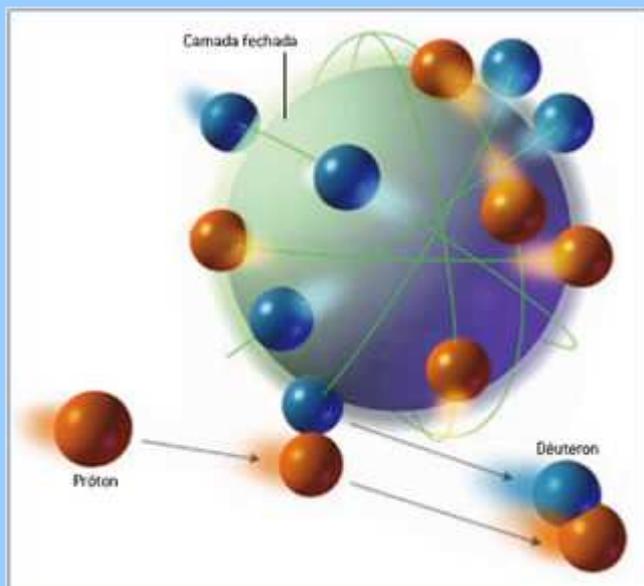
## **MEDINDO E IDENTIFICANDO ESTADOS NUCLEARES**

Os núcleos diferem muito entre si, dependendo da quantidade par ou ímpar de prótons e nêutrons que contenham (veja a imagem à direita). Essas diferenças existem porque, separadamente, os prótons e os nêutrons tendem a formar pares, que se movimentam em estados coordenados e estáveis. Maria Goeppert Mayer apresentou esse conceito na década de 1950, quando trabalhou na Universidade de Chicago. No tipo mais simples de núcleo, o par-par, todos os prótons e nêutrons estão emparelhados. Esses núcleos têm pouquíssimos estados excitados de baixa energia. Nos núcleos par-ímpar, que possuem um número par de um tipo de núcleon e um número ímpar do outro tipo, o núcleon desemparelhado introduz mais excitações. Os

núcleos ímpar-ímpar possuem um próton e um nêutron desemparelhados, e são proporcionalmente mais complexos.



As reações de transferência forneceram dados cruciais para a observação da supersimetria nuclear, ao determinar os estados excitados do ouro 196. Numa típica reação de transferência (veja a imagem à esquerda), um próton acelerado atinge o núcleo-pai e carrega consigo um de seus nêutrons, formando um dêuteron. O núcleo-filho fica num estado excitado, cuja energia pode ser determinada diretamente a partir da energia do dêuteron.



la (veja o quadro na página 63). Alguns modelos tratam o núcleo como uma gota de fluido quântico capaz de vibrar e oscilar de modos específicos. Outros imitam a estrutura que tão bem se aplica aos elétrons em órbita: camadas de orbitais discretos, sucessivamente preenchidas pelos nucleons, a partir do nível de energia mais baixo.

Os diferentes modelos tendem a funcionar melhor para classes específicas de núcleos, dependendo do total de nucleons envolvidos e do nível de preenchimento das camadas externas de prótons e nêutrons. Como prótons e nêutrons gostam de formar pares, o comportamento do núcleo varia drasticamente de acordo com uma quantidade par ou ímpar de prótons e nêutrons (veja a ilustração na página 64). Os chamados núcleos par-par são geralmente os mais simples, seguidos pelos par-ímpar, sendo os ímpar-ímpar os mais complexos de todos.

A simetria é uma ferramenta importante e poderosa para o desenvolvimento e uso desses modelos. Os princípios da simetria ocorrem em toda a física, muitas vezes de formas inesperadas. Por exemplo, a lei da conservação da energia pode ser derivada de um princípio de simetria envolvendo o fluxo de tempo. Um

## Núcleos misteriosos

Tudo o que tem substância no mundo que nos cerca é composto por átomos - nuvens de elétrons envolvendo núcleos minúsculos e de grande massa. Os físicos e químicos compreendem muito bem a organização desses elétrons, e sabem que as propriedades que governam nosso mundo material surgem dessas estruturas. As previsões mais bem-sucedidas da ciência devem-se a um detalhamento minucioso dos níveis de energia dos elétrons presentes nos átomos. Os núcleos atômicos, por outro lado, continuam bem menos compreensíveis.

A principal razão dessa disparidade é a natureza das forças envolvidas. Os elétrons são mantidos em órbita em torno dos núcleos pela força eletromagnética, que é relativamente fraca. A força predominante no interior dos núcleos é aproximadamente cem vezes maior (daí seu nome: força nuclear forte). Técnicas teóricas capazes de descrever atrações fracas, como o eletromagnetismo, não se aplicam a fenômenos tão fortes como a força nuclear. Além disso, os elétrons são partículas elementares desprovidas de estrutura, ao passo que os prótons e nêutrons são aglomerados complexos de partículas chamados quarks e glúons. A força existente entre esses nucleons não é uma força fundamental como a eletromagnética, cujas equações são conhecidas com precisão. Pelo contrário, a atração nuclear entre os nucleons é um complicado subproduto das interações entre os quarks e glúons que os constituem.

A força nuclear é fortemente atrativa em distâncias de alguns femtômetros, (10-15 metro). Daí em diante, cai a zero. Essa força une os nucleons, mantendo-os muito próximos e fazendo cada nucleon interagir intensamente com todos os outros nucleons ao seu alcance (em contraste, as órbitas dos elétrons são cerca de 10 mil vezes mais distantes). A estrutura resultante é um dos mais desafiadores sistemas quânticos conhecidos. Durante décadas, os físicos desenvolveram vários modelos teóricos para tentar descrevê-

aspecto central de simetria na física quântica é a divisão das partículas em bósons e férmions: partículas que possuem estados quânticos fundamentalmente diferentes e comportamentos completamente distintos. Os férmions obedecem ao princípio de exclusão de Pauli, segundo o qual dois férmions da mesma espécie não podem permanecer simultaneamente no mesmo estado. Os bósons, ao contrário, preferem unir-se em estados idênticos, como demonstram os átomos de hélio-4 superfluido.

O átomo de hélio-4 é um exemplo de partícula composta que é um bóson. Ele é composto por seis férmions (dois prótons, dois nêutrons e dois elétrons). Os próprios núcleons são, na verdade, férmions compostos, contendo três férmions básicos (quarks). A regra geral determina que um número par de férmions forma um bóson composto, ao passo que um número ímpar forma um férmion composto. As simetrias simples interrelacionam necessariamente bósons com bósons e férmions com férmions. Ao inter-relacionar bósons com férmions e vice-versa, a supersimetria inaugura uma nova categoria de relações entre partículas. Além disso, os cálculos matemáticos dessas relações possibilitam análises e previsões muito melhores sobre o comportamento de um sistema.

A simetria desempenha um papel-chave no chamado modelo de bósons interativos do núcleo, apresentado em meados da década de 1970 por Akito Arima, da Universidade de Tóquio, Japão, e por Francesco Iachello, da Universidade de Groningen, Holanda (leia o quadro da página 63). Esse modelo descreve os núcleos como pares de prótons e nêutrons - os pares são os bósons do modelo. Arima e Iachello descobriram três tipos especiais de núcleos par-par, cada um deles associado a uma simetria particular. Dois desses tipos e suas respectivas simetrias já eram conhecidos através do modelo anterior da gota líquida, e haviam sido estudados em experimentos, mas o terceiro envolvia uma simetria nunca antes observada em núcleos. No final da década de 1970, Richard F. Casten e Jolie A. Cizewski, ambos do Laboratório Nacional de Brookhaven, descobriram que os núcleos de platina apresentavam essa nova simetria. Logo ficou evidente que o modelo de bósons interativos era uma boa aproximação para diversos tipos de núcleos.

## RESUMO/SUPERSIMETRIA

No modelo padrão da física de partículas, todas as partículas que constituem a matéria (quarks e elétrons) são férmions, assim como as partículas a elas relacionadas (múon, o taúon e os neutrinos). Todas as partículas que geram forças (fótons, glúons e partículas W e Z), são bósons. O mesmo ocorre com hipotéticos grávitons e partículas de Higgs.

As simetrias formam a base do modelo-padrão. Elétrons e neutrinos de elétrons, por exemplo, estão relacionados por uma simetria, que também relaciona quarks up a quarks down. Uma manifestação diferente dessa mesma simetria associa as partículas Z e W. Todos os glúons estão relacionados por uma simetria de "cor", que também relaciona diferentes "cores" de quarks. Todas essas simetrias relacionam férmions a férmions e bósons a bósons, porque os estados quânticos de bósons e férmions são diferentes demais para serem comparados por meio de uma simetria simples.

A diferença entre bósons e férmions é a seguinte: num conjunto de partículas, se dois férmions idênticos (por exemplo, dois elétrons) são invertidos, o estado quântico total do conjunto se inverte (imagine picos e vales de uma onda se alternando). A inversão de dois bósons idênticos, por outro lado, não altera o estado. Essas características resultam no princípio de exclusão de Pauli, que impede dois férmions de ocuparem o mesmo estado, e na propensão dos bósons a se reunirem num mesmo estado, como ocorre nos raios laser e nos condensados de Bose-Einstein.

As simetrias simples são descritas matematicamente pelos grupos e pela álgebra de Lie (uma referência ao matemático norueguês Sophus Lie). As álgebras e grupos de Lie não são capazes de cancelar ou criar a estranha inversão que ocorre quando os férmions são invertidos, sendo impotentes, portanto, para transformar férmions em bósons ou vice-versa. A supersimetria, desenvolvida na década de 1970, utiliza as "álgebras de Lie reticuladas", ou superálgebras. Em essência, as

As simetrias previstas no modelo de bósons interativos são de um tipo especial, conhecidas como simetrias dinâmicas. As simetrias simples (não-dinâmicas) são muito parecidas com as simetrias cotidianas que nos cercam. Por exemplo, um objeto possui simetria especular quando apresenta a mesma imagem se observado num espelho. Sua mão esquerda é aproximadamente a imagem especular de sua mão direita. As simetrias dinâmicas, ao contrário, não se relacionam aos objetos em si, mas às equações que governam a dinâmica dos objetos. Infelizmente, para os pesquisadores experimentais, somente uma categoria limitada de núcleos é capaz de exibir simetrias dinâmicas. O modelo de bósons interativos naturalmente se aplica melhor aos núcleos par-par. Os núcleos ímpar-par sempre possuem um núcleon desemparelhado, como uma pessoa vagando sozinha numa pista de dança. Um núcleon desse tipo é descrito, no modelo, por  $n$  bósons e 1 férmion (o núcleon sem par). Em alguns casos, as simetrias dinâmicas podem ser usadas para analisar núcleos ímpar-par, porém, o procedimento é

muito mais complicado do que no caso par-par. Em 1980, Iachello, então na Universidade de Yale, sugeriu uma ousada extensão do modelo de bósons interativos, visando a descrever com maior clareza os núcleos ímpar-par.

Iachello propôs o uso da supersimetria para relacionar um núcleo contendo  $n$  bósons e 1 férmion a um núcleo contendo  $n + 1$  bósons. Se essa supersimetria dinâmica existisse na natureza, ela se revelaria no padrão de estados excitados de um núcleo ímpar-par e no núcleo par-par adjacente - por exemplo, nos estados do arsênio 75 (33 prótons e 42 nêutrons) e do selênio 76 (34 prótons e 42 nêutrons). Os estados quânticos são classificados de acordo com seus números quânticos, o que permite organizar os estados em grupos, segundo propriedades tais como o momento angular. Na supersimetria dinâmica, um único conjunto de números quânticos serviria para classificar os estados de dois núcleos em grupos relacionados. Um deles poderia começar pelos estados mais simples do selênio 76 par-par, e prever os estados do arsênio 75 (isto é, prever quais estados existiriam e propriedades como seus momentos angulares e energias aproximadas). Na década de 1980, pesquisadores experimentais reuniram dados de núcleos capazes de exibir simetrias dinâmicas e descobriram evidências de supersimetria, mas não conseguiram confirmar em definitivo a idéia de Iachello. A estrutura de um núcleo ímpar-par não pôde ser completamente determinada a partir do núcleo par-par associado.

## Quadrados mágicos

Em 1984, Pieter Van Isacker, Kristiaan L. G. Heyde e eu (todos nós então na Universidade de Ghent, Bélgica), juntamente com Alejandro Frank, da Universidade do México, propusemos uma extensão para

transformações supersimétricas adicionam outro componente fermiônico a cada partícula, o que basta para a conversão entre férmions e bósons.

Para que as partículas conhecidas obedeçam à supersimetria, cada uma delas deve ter um super-par - cada bóson deve ter um complemento fermiônico e vice-versa. Como as partículas conhecidas não possuem as propriedades adequadas para terem pares, novas partículas estão previstas.

O modelo-padrão é então estendido ao modelo-padrão supersimétrico. Os pares fermiônicos recebem os nomes de fotino, gluino, wino, zino, gravitino e higgsino. Os pares bosônicos recebem o prefixo "s" em seus nomes: selétron, smúon, sneutrino, squark e assim por diante.

Nenhuma dessas partículas foi detectada até o momento. Essa supersimetria de partículas elementares também está intimamente ligada às simetrias de espaço-tempo que servem de base para a teoria da relatividade especial de Einstein. Isto é, a supersimetria estende-se àquelas simetrias. A supersimetria dos núcleos é completamente diferente porque não tem relação com o espaço-tempo. O terreno comum a essas duas aplicações da supersimetria na física reside no fato de que ambas baseiam-se em superálgebras.-J.J.



a supersimetria de Iachello. Essa supersimetria estendida permite a descrição de um quarteto de núcleos em um esquema comum. Tal quarteto, chamado quadrado mágico, é formado por núcleos com o mesmo número total de bósons e férmions. Ele é formado por um núcleo par-par, dois núcleos ímpar-par e um núcleo ímpar-ímpar. Os núcleos ímpar-ímpar pesados, isto é, aqueles contendo mais de cem núcleons, são os objetos mais complexos encontrados no estudo da estrutura nuclear de baixa energia, mas se essa nova supersimetria funcionasse na natureza, seria possível prever o espectro energético do núcleo a partir dos espectros mais simples de seus outros três companheiros. A verificação experimental dessa simetria foi importante não apenas para a física nuclear, mas para todas as outras aplicações da supersimetria na física, pois, apesar de amplamente utilizada pelos teóricos, a supersimetria ainda não possuía comprovação experimental.

A confirmação dessas idéias exigiu um conhecimento detalhado dos núcleos ímpar-ímpar, e diversos grupos teóricos e experimentais em todo o mundo iniciaram estudos desse tipo. Foram descobertas provas limitadas da supersimetria, mas o Santo Graal dessas investigações, um detalhado mapa dos estados do ouro 196, permaneceu inacessível. Esse núcleo, com 79 prótons e 117 nêutrons, é considerado o teste final da supersimetria na física nuclear. Por três motivos. Primeiro, sabe-se que ele pertence a uma faixa de núcleos (aqueles com cerca de 80 prótons e 120 nêutrons) que exibe simetrias dinâmicas e preenche outras condições técnicas para que a supersimetria se revele. Segundo, essa faixa é a mais difícil de descrever, em termos de núcleos ímpar-ímpar. Terceiro, em 1989, quando nós usamos a supersimetria para prever vários de seus estados, nenhum desses estados era conhecido experimentalmente; e os experimentos poderiam confirmar ou destruir a teoria.

Para estudar os núcleos atômicos, os físicos os bombardeiam com fótons, nêutrons ou outras partículas aceleradas, com o intuito de excitá-los, e observam suas reações. Os estados excitados são instáveis, e o núcleo volta rapidamente ao seu estado de energia mais baixo, cascadeando por uma série de estados, emitindo fótons energéticos de raios-gama ou raios x, que podem ser medidos com precisão.

## UNIVERSO SIMÉTRICO

O mundo que nos cerca está repleto de simetrias e simetrias aproximadas - a simetria bilateral da maioria dos animais, a simetria rotacional do sol, a simetria de cinco partes de muitas estrelas do mar e as simetrias múltiplas das frutas e flores. A simetria é tão comum que é preciso algo extraordinário, como um floco de neve, para despertar nosso espanto.

Grande parte da física fundamental, na verdade, consiste em desvendar outros tipos de simetria que caracterizam o Universo. A teoria da relatividade especial de Einstein, por exemplo, é uma teoria das simetrias de espaço e tempo vazios, governadas pelo grupo de Poincaré (os grupos são as estruturas matemáticas que descrevem as simetrias). Efeitos gravitacionais, como a contração do espaço e a dilatação do tempo, são operações do grupo de simetria, equivalentes a girar seu ponto de vista no espaço, mas incluindo o tempo como parte da "rotação".

A física de partículas está repleta de simetrias: em particular, as forças fundamentais são ditadas por simetrias denominadas simetrias de calibre. A partir da especificação do grupo de calibre e da intensidade da interação, determina-se, basicamente, todo o comportamento da força. Por exemplo, o eletromagnetismo envolve um conjunto de simetria de calibre chamado  $U(1)$ , que é a simetria das rotações circulares num plano.

A conservação da carga elétrica é consequência da simetria  $U(1)$ . Como foi provado pela matemática Emmy Noether em 1915, sempre que uma simetria surge na mecânica, surge também uma lei de conservação. O teorema de Noether aplica-se tanto à mecânica clássica quanto à mecânica quântica e informa, por exemplo, que a lei da conservação da energia deriva da simetria em relação às translações no tempo. Ou seja, a energia se conserva porque as equações do movimento de ontem são as mesmas de hoje. As conservações do momento (simetria em relação à translação no espaço) e do momento angular (simetria em relação à rotação) são semelhantes.

Finalmente, temos a própria definição de "partícula" na teoria dos campos quânticos, desenvolvida pelo físico Eugene Wigner: uma partícula é uma "representação irredutível do grupo de Poincaré". Essa relação direta entre simetrias e a estrutura mais fundamental da matéria e das forças é o que exige que os elétrons e outras partículas tenham uma quantidade intrínseca de momento angular, conhecida como spin. O spin funciona como um rótulo, especificando qual é a "representação irredutível" que constitui a partícula, e se associa às rotações, portanto ao momento angular. A massa de uma partícula também é um rótulo relacionado à simetria.

Comparados às simetrias que governam o Universo, os flocos de neve começam a parecer bem comuns.

Graham P. Collins, editor de Scientific American



A radiação observada em núcleos ímpar-ímpar é extremamente complexa, porque muitos estados são ocupados e as energias dos fótons são as diferenças entre as energias dos estados. Os núcleos par-par e par-ímpar são mais simples, pois possuem menos estados em baixas energias. O isótopo do ouro 196 apresenta um desafio a mais, porque é radiativo e decai em mais ou menos uma semana, geralmente capturando um elétron e transformando-se em platina 196. Os pesquisadores experimentais têm de criá-lo continuamente, bombardeando um isótopo estável com partículas aceleradas, como os prótons.

A estrutura do ouro 196 mostrou-se tão difícil de deduzir que algumas equipes desistiram da tentativa. Um time afirmou que os dados experimentais sugeriam que a supersimetria dinâmica teria sido quebrada. Naquele momento de desespero, em meados da década de 1990, uma nova colaboração foi estabelecida, unindo o meu grupo, da Universidade de Friburgo, na Suíça, aos grupos de Christian Günther, da Universidade de Bonn, e Gerhard Graw, da Universidade de Munique, ambos na Alemanha. Mais tarde, o grupo de Casten, da Universidade de Yale, também contribuiu. Planejamos uma última tentativa de estudo, empregando a espectroscopia em feixe, que mede a radiação emitida pelos íons do ouro 196 criados num feixe de partículas. Fizemos uso de três equipamentos: o ciclotron Philips, do Instituto Paul Scherrer, na Suíça, o ciclotron de Bonn e o acelerador Tandem WSNL, de Yale.

### Experimento de transferência

O grupo de Graw realizou um experimento de transferência que complementou os resultados da espectroscopia em feixe e solucionou um enigma fundamental: a causa das dificuldades que frustraram as tentativas anteriores. Num experimento de transferência, o projétil atinge o núcleo-alvo e leva consigo

um de seus núcleons, deixando para trás um núcleo-filho em estado excitado (veja ilustração na página 64). Identificamos a partícula que se desprende e medimos sua energia. A partir daí, é possível calcular a energia de excitação do núcleo-filho. Assim, os experimentos de transferência produzem dados diferentes daqueles gerados pela espectroscopia em feixe: eles determinam diretamente a energia dos estados excitados de um núcleo, em vez do número muito maior de diferenças energéticas entre os estados. Além disso, empregando feixes de projéteis polarizados e estudando o desprendimento dos produtos da colisão, podemos aprender sobre os momentos angulares dos estados excitados.

Para estudar os níveis de energia do ouro 196, extremamente próximos entre si, utilizamos o instrumental de última geração proporcionado pelo espectrômetro magnético Q3D, do laboratório de aceleração de Munique. Quando Alexander Metz e seus colaboradores da Universidade de Munique analisaram os experimentos de transferência, descobriram que o estado fundamental do ouro 196 é um alótropo, com dois níveis de energia muito próximos. Essa descoberta foi crucial para esclarecer os problemas encontrados anteriormente. Os experimentos também revelaram diretamente as energias da maior parte dos estados excitados. Estabelecido esse referencial, os dados do feixe podiam então ser empregados para estabelecer o spin e a paridade de cada excitação.

Os resultados concordaram bem com as previsões teóricas baseadas na supersimetria dinâmica. Os estados dos quatro núcleos podiam ser classificados por um mesmo conjunto de números quânticos supersimétricos, e uma única expressão matemática, com poucos parâmetros, ajusta bem os níveis de energia. A constatação de que isso é possível num dos núcleos atômicos mais complexos é um forte indício a favor da supersimetria dinâmica, mas coloca também um novo desafio aos teóricos: estudar o ouro 196 como um caso individual de vários objetos quânticos interagindo entre si. Os teóricos deveriam explicar, sob essa perspectiva da teoria quântica de muitos corpos, por que as excitações do ouro 196 são ditadas pela supersimetria dinâmica. Diversos grupos estão trabalhando com afinco nessa questão.

Pares de férmions comportando-se como bósons ocorrem em vários campos da física, inclusive em supercondutividade. A supersimetria dinâmica encontrada nos núcleos atômicos pode ser útil também nesses outros campos. Uma coisa é certa: as simetrias, sejam elas simples ou "super", continuarão ditando o avanço da física quântica.

#### OS AUTORES

**JAN JOLIE** recebeu seu Ph.D. em física teórica na Universidade de Ghent, na Bélgica, em 1986. Após cinco anos no Instituto Laue-Langevin, em Grenoble, França, voltou sua atenção para o trabalho experimental quando, em 1992, aceitou uma cátedra na Universidade de Friburgo, Suíça. Além dos experimentos relatados neste artigo, ele trabalhou com aplicações mais práticas, tomografias de nêutrons e de raios gama e a construção de fontes ajustáveis de raios gama. Atualmente, dirige o Instituto de Física Nuclear da Universidade de Colônia, na Alemanha. Em 2000, recebeu o Prêmio Leigh Page, da Universidade de Yale, por seu trabalho com simetrias dinâmicas e supersimetrias em núcleos atômicos.