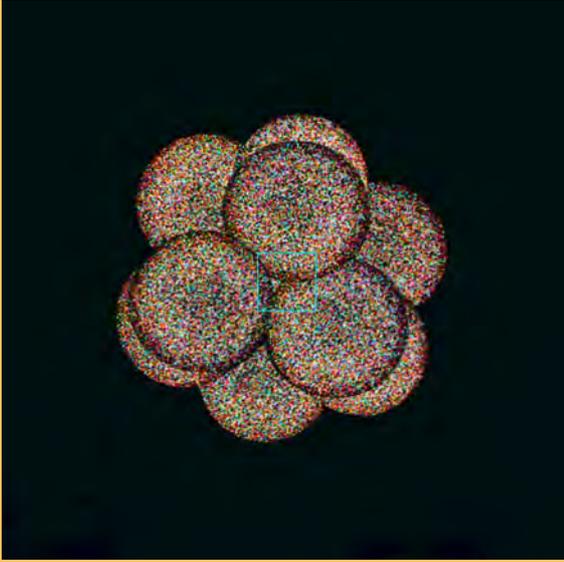


# DOS ÁTOMOS AOS



$10^{-14}$  m

Como são os átomos? Que tamanho têm? Do que são feitos?

Em 1905 Einstein publicou o seu famoso artigo, "Sobre a electrodinâmica dos corpos em movimento", que é universalmente considerado o trabalho que alicerçou a teoria da relatividade. Nesse mesmo ano, publicou um outro artigo referente ao estudo do movimento browniano.

Talvez não tão conhecido como o primeiro dos trabalhos referidos, este estudo explica o misterioso movimento errático de partículas em suspensão em líquidos. Esta explicação, que se baseia no choque das partículas com as moléculas do líquido, foi na altura considerada uma prova da teoria atómica da matéria. É interessante recordar que, apesar do enorme sucesso da interpretação atomista das leis das reacções químicas, no princípio do século passado a teoria atómica ainda estava longe de ser universalmente aceite. Hoje, passados quase cem anos, a situação é bem diferente. Sabemos que a cada elemento da tabela periódica corresponde um átomo. São estes átomos que interagindo entre si, reagindo, formam as inúmeras moléculas que ocorrem na Natureza e que todos os dias os químicos sintetizam nos seus laboratórios.

Como são os átomos? Que tamanho têm? De que são feitos? Como uma imagem vale mais do que mil palavras, a fig. 1 mostra os átomos à superfície de um cristal de silício. A fotografia foi obtida com um microscópio de efeito de túnel. Este dispositivo, ao varrer a superfície do cristal, consegue detectar a topografia da superfície. Os átomos são as cadeias montanhosas dispostas em filas separadas por vales com 1,63 nm (1 nanometro = 1 nm =  $10^{-9}$  m) de largura; dentro de cada fila, os átomos estão separados por

AUGUSTO BARROSO

Centro de Física Teórica e Computacional, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa,

barroso@ciif.fc.ul.pt

# QUARKS



Fig. 1. Imagem, feita com um microscópio STM, da superfície de um cristal de silício. (Foto APS).

0,77 nm. Em resumo, à escala do nanómetro, a superfície polida de um cristal de silício apresenta este aspecto rugoso. Como é o interior de cada um destes picos montanhosos? Dito por outras palavras, como são feitos os átomos? Infelizmente agora não tenho uma fotografia para mostrar. Mas, se tivesse uma fotografia à escala do fermi (1 fermi = 1 fm =  $10^{-15}$  m), verificaríamos que, no centro da montanha, existia uma estrutura quase esférica com raios que vão desde cerca de 1 fm, para os átomos mais leves, até cerca de 10 fm, para os átomos mais pesados, como por exemplo o chumbo. Rodeando esse núcleo central, que em alguns casos pode ser mais semelhante a uma bola de rãguebi ou a um disco do que a uma bola de futebol, a maior parte do espaço está vazio. É verdade: o átomo é cerca de 10 000 vezes maior do que o núcleo e em toda essa região enorme não existe quase nada: nela apenas se passeiam alguns electrões! Para ter uma ideia da diferença de escala, imaginem um grande estádio de futebol. No centro do relvado coloquem um berlinde com 1 cm

de raio. Se este berlinde fosse o núcleo de um átomo, os respectivos electrões distribuir-se-iam numa região esférica com 100 m de raio, isto é, uma região suficiente para cobrir o estádio da Luz com bancadas e tudo.

O átomo mais simples, o átomo de hidrogénio, só tem um electrão e o seu núcleo é simplesmente constituído por uma única partícula, o protão. Este tem uma carga eléctrica positiva ( $e = 1,6 \times 10^{-19}$  C) que é exactamente igual e de sinal oposto à carga eléctrica do electrão. Deste modo, o átomo é neutro. É assim para todos os outros átomos. O número de electrões,  $Z$ , vai crescendo. É dois para o hélio, seis para o carbono, noventa e dois para o urânio, por exemplo. O valor de  $Z$  caracteriza o elemento químico de que estamos a tratar. Para cada  $Z$  os átomos respectivos têm núcleos com  $Z$  protões e  $N$  neutrões. Como estes últimos são electricamente neutros, a igualdade entre os módulos das cargas do electrão e do protão é o elemento crucial que assegura a neutralidade da matéria. Dito de outra maneira, a carga eléctrica só pode existir em múltiplos desta carga elementar  $e$ . A carga eléctrica está quantificada.

Quando se estuda o mundo à escala do átomo não são apenas as dimensões que mudam. As leis que descrevem a Física à escala atómica não podem ser inferidas das leis que regem o mundo a escala humana por uma mera extrapolação da escala. Assim, por exemplo, os átomos para além de poderem existir no seu estado fundamental, isto é, no seu estado de energia mínima, podem existir em estados com mais energia, estados excitados. Contudo, estas energias de excitação também estão quantificadas. Só podem tomar valores bem determinados que são específicos de cada espécie atómica. Quando um determinado átomo excitado passa ao estado fundamental emite essa energia na forma de luz. Como os níveis de energia são bem determinados para cada átomo, a luz que cada um pode emitir é uma característica desse átomo. Funciona como uma impressão digital que univocamente permite caracterizar o elemento que emitiu essa luz. Deste modo, a análise da luz emitida pode ser usada para determinar os elementos presentes numa dada amostra. Foi deste modo que, analisando a luz solar, em 1868, Janssen e Lockyer descobriram o hélio. Só cerca de trinta anos depois, em 1895, é que Sir William Ramsay detectou o mesmo elemento em minérios de urânio.

## OS NÚCLEOS ATÓMICOS

Voltemos aos núcleos. É neles que está concentrada a maior parte da massa dos átomos. A sua densidade é enorme, da ordem de  $10^{17}$  kg/m<sup>3</sup>, e é praticamente constante para todos os núcleos. Cada átomo, caracterizado, como vimos, por um determinado número atómico  $Z$  pode ter vários possíveis núcleos. Todos têm o mesmo número de prótons,  $Z$  mas diferem no número  $N$  de neutrões. A soma  $Z+N$  da o total de nucleões e designa-se por número de massa,  $A$ . Os diferentes núcleos com o mesmo  $Z$  e diferente  $A$  designam-se por isótopos. Por exemplo, conhecem-se quinze isótopos do elemento oxigénio ( $Z=8$ ) com números de massa que vão de  $A=12$  a  $A=26$ . Destes, apenas os de número atómico  $A=16, 17$  e  $18$  são estáveis e o primeiro  $^{16}\text{O}$  corresponde a mais de 99% do oxigénio natural. Os restantes são radioactivos, isto é, transformam-se espontaneamente noutros núcleos. A sua grande maioria tem este destino em virtude da interacção fraca, que é uma das quatro interacções fundamentais que explicam o funcionamento do universo. Assim, o  $^{19}\text{O}_8$  transforma-se em  $^{19}\text{F}_9$ , emitindo um electrão e um antineutrino. Como resultado da mesma interacção fraca, o mercúrio 197 ( $^{197}\text{Hg}_{80}$ ) transforma-se em ouro 197 ( $^{197}\text{Au}_{79}$ ). O sonho dos alquimistas, transmutar elementos noutros e em particular os metais no metal mais nobre de todos, o ouro, é feito "voluntariamente" pela Natureza.

Examinemos com mais detalhe os dois exemplos de declínios radioactivos que apresentámos. Em ambos os casos o número  $A$  permaneceu constante. Contudo, no primeiro exemplo, o  $Z$  aumentou de uma unidade, ao passo que no segundo diminuiu também de uma unidade. Sabemos hoje que estes dois tipos de interacção fraca correspondem, no primeiro caso, a um neutrão que passou a próton e, no segundo caso, à transição inversa, isto é, à passagem de um próton a neutrão. Percorrendo a tabela dos vários núcleos conhecidos, os que ocorrem naturalmente e aqueles, mais numerosos, que o homem aprendeu a fabricar, poderíamos dar centenas de exemplos de declínios fracos. Mas não faz muito sentido multiplicar os exemplos. Apenas gostaria de apresentar mais uma reacção também devida à força fraca. Para que não fiquem com a ideia de que a interacção fraca apenas origina a transformação de um núcleo noutro, escolhi um exemplo oposto. Trata-se da fusão entre dois prótons para originarem um núcleo de deutério ( $^2\text{H}$ ) um positrão ( $e^+$ ) e um neutrino ( $\nu$ ). Esta é a primeira de uma série de reacções que ocorrem no Sol e que, ao consumirem hidrogénio, produzem a energia que nos aquece e ilumina. Por outras palavras, sem a interacção fraca o Sol não brilharia!

À escala de  $10^{-16}$  m os prótons e neutrões não são objectos simples. Apresentam uma estrutura interna que pode ser descrita como se cada um deles fosse constituído por três constituintes elementares chamados quarks que, incessantemente, trocam entre si gluões. Antes de tentarmos explicar o que fazem estes novos actores voltemos aos átomos. O que é que mantém os electrões ligados aos respectivos núcleos dos átomos? Penso que mesmo os leitores mais afastados da cultura científica saberão que cargas eléctricas de sinais contrários se atraem. Pois bem, é essa força, designada por interacção electromagnética, a responsável pela estabilidade dos átomos. Numa linguagem mais correcta, as forças fundamentais, das quais até agora já é a segunda que apresento, estão também quantificadas. Cada uma das partículas não exerce sobre a outra a força que quer. Antes interage com ela permutando como que "grãos de força" a que chamamos quanta do campo. Para a interacção electromagnética estes quanta chamam-se fótons. São justamente os "grãos de luz" que conhecemos...

## OS QUARKS

Podemos agora voltar aos quarks. Estes têm uma espécie de carga eléctrica que os físicos designam por cor. O campo da cor é parecido ao campo electromagnético e os gluões são os quanta deste campo. Dito de outro modo, dois quarks atraem-se porque ambos têm cor e permutam entre si gluões. Desta permuta resulta a força que os une, denominada interacção forte. Assim, ao nível subatómico, existem duas interacções de cuja existência não suspeitávamos. A interacção forte descrita por uma teoria chamada cromodinâmica e a interacção fraca de que já falámos. Devo acrescentar que também esta interacção é mediada pela permuta de quanta que são os bosões  $W^+$ ,  $W^-$  e  $Z$ , descobertos no princípio da década de oitenta no CERN em Genebra, na Suíça (Fig. 2).



Fig. 1. Equipa da experiência Delphi, no CERN, diante do detector. (Foto do CERN).

A última das interações fundamentais é a interacção gravítica. É tão fraca que o seu efeito é irrelevante à escala subatómica. Para que apreciemos quão fraca é a gravidade digo-vos que a atracção gravítica entre dois electrões colocados a uma dada distância é  $10^{42}$  vezes menor do que a repulsão eléctrica entre as mesmas partículas colocadas à mesma distância. A primeira força é  $10^{42}$  da segunda! Este número é tão pequeno que é difícil apercebermo-nos da sua grandeza. Comparemo-lo com outro. A velocidade da luz é muito grande, cerca de 300 000 quilómetros por segundo. Um protão é muito pequeno, tem cerca de  $2 \times 10^{-16}$  m. Então o tempo que a luz leva a percorrer esta distância é extremamente pequeno. Quando comparado com a idade do universo este tempo é também cerca de  $10^{42}$  vezes mais pequeno.

A tabela 1 resume os constituintes básicos da matéria. Até agora só falámos das partículas que nessa tabela constituem a coluna denominada primeira família. Efectivamente, para "fazer" os protões, p, e os neutrões, n, só precisamos dos quarks chamados u e d. Com dois u e um d temos um p e com dois d e um u fazemos um n. Tendo p e n podemos fazer os núcleos de todos os isótopos e tendo os núcleos e juntando-lhes o respectivo número de Z electrões fabricamos os átomos de todos os elementos. Daqui em diante, com a química apropriada fazemos todas as moléculas desde as mais pequenas, como o ácido clorídrico ou a água, até às gigantes, como o DNA. O outro elemento da primeira família é o neutrino electrónico, parceiro do electrão, e, tal como ele, insensível à interacção forte. Designam-se ambos genericamente por leptões.

	1ª Família	2ª Família	3ª Família
Leptões	Neutrino electrónico e	Neutrino muónico $\mu$	Neutrino do tau
	Electrão e	Muão $\mu$	Tau
Quarks	Up u	Charme c	Top t
	Down d	Strange s	Bottom b

Tabela 1

Para que servem então os outros leptões e quarks? Não sabemos. O que podemos dizer é que a Natureza decidiu fazer mais duas cópias de si própria. O muão é em tudo parecido com um electrão. Apenas tem uma massa que é

cerca de duzentas vezes maior. Em tudo o resto é idêntico ao electrão. Tão idêntico que podemos fazer átomos substituindo electrões por muões. De igual modo o tau também parece um electrão mas tem uma massa ainda maior, cerca de 3500 vezes maior. Quanto aos outros quarks também podemos fazer com eles partículas idênticas aos nucleões. Assim o  $p$  é constituído pelos quarks u, d e b, e o  $n^+$  é o estado uus. Todos estes estados de três quarks, dos quais se conhecem centenas de exemplos, são sistemas neutros do ponto de vista da cor. Do mesmo modo que a sobreposição de duas cargas eléctricas iguais em módulo e de sinal contrário produz um sistema electricamente neutro, a sobreposição das três cores também produz um estado de cor neutra, branco digamos. Contudo, na cromodinâmica existe ainda uma outra possibilidade de formar estados brancos. Com efeito, a cada partícula corresponde uma anti-partícula que tem a mesma massa mas tem anti-cor em vez de cor. Então um sistema constituído por um quark de cor y e um anti-quark com anti-cor  $\bar{y}$  também é neutro. Estes estados chamam-se mesões, ao passo que os estados de três quarks se designam por bariões. O mais leve dos mesões é constituído por um quark u e por um anti-quark d,  $u\bar{d}$ , e chama-se  $\pi^+$ . A sua anti-partícula é, obviamente,  $\bar{u}d$ , e chama-se  $\pi^-$ . As anti-partículas dos bariões são evidentemente formadas por três anti-quarks. Assim,  $\bar{u}\bar{u}\bar{d}$  é o anti-protão, que foi produzido pela primeira vez no acelerador Bevatron, em Berkeley, na Califórnia, em Outubro de 1955, por uma equipa liderada por Emílio Segre.

Com um anti-protão e um positrão (anti-partícula do electrão) podemos fazer o átomo mais simples de anti-matéria: o anti-hidrogénio. Com este átomo, que foi obtido pela primeira vez no CERN em 1995, iniciou-se a pesquisa sistemática das propriedades da anti-matéria. A teoria, tal como a conhecemos actualmente, implica que este átomo de anti-matéria deverá ser igual ao átomo de hidrogénio normal. Com efeito, a interacção electromagnética é simétrica para esta troca de partículas em anti-partículas a que se dá o nome de simetria C ou simetria de conjugação de carga. Este é um exemplo das várias simetrias que desempenham um papel relevante no estudo das partículas elementares. Seria interessante aprofundar este assunto, mas terá que ficar para uma outra oportunidade...

Nesta procura da compreensão da estrutura da matéria chegámos aos quarks e leptões. Poderá perguntar-se: e estes que tamanho têm? Qual é a sua estrutura? A resposta actual a estas perguntas é que não têm estrutura. São os constituintes elementares. Com eles tudo é feito e eles não são feitos de nada. Esta é a resposta actual, mas não será certamente a resposta definitiva. Aliás, em ciência nunca nenhuma resposta é definitiva.