

# O QUE MUDA NO MUDA A TEMPERAT



$10^{19}$  m

O Universo já foi muito quente porque a expansão do Universo implica o seu arrefecimento.

O Universo é um local bastante frio. A sua temperatura foi medida, em 1965, por Wilson e Penzias e, mais recentemente, em 1992, com muito maior precisão, pelo satélite COBE. É apenas de 2,726 K ou seja  $-270^{\circ}\text{C}$ . A distribuição de energia da radiação cósmica de fundo pelos diferentes comprimentos de onda (fig. 1) é exactamente aquilo que é esperado para radiação a esta temperatura, sendo os desvios inferiores a dez partes num milhão. Mas, felizmente, o Universo tem, aqui e ali, algumas lareiras termo-nucleares e nós vivemos muito perto de uma, que se chama Sol.

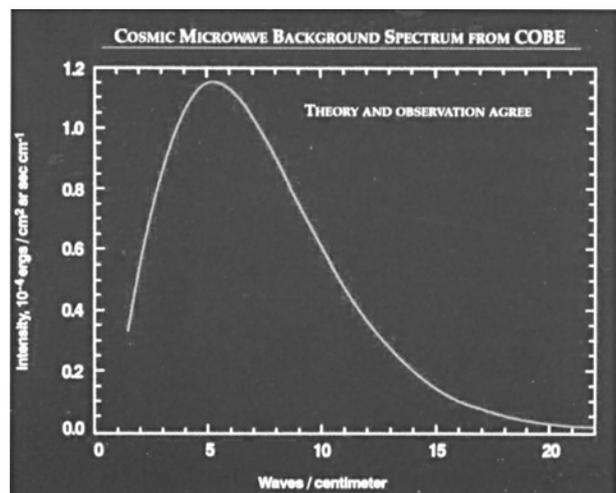


Fig.1. A distribuição de energia da radiação cósmica de fundo pelo espectro de frequências corresponde ao que é esperado para radiação em equilíbrio térmico a  $T=2,726$  K. Os dados e a curva de ajuste são indistinguíveis.[1]

JOÃO LOPES DOS SANTOS

Centro de Física do Porto e Departamento de Física, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto

jlsantos@fc.up.pt

# MUNDO QUANDO URA

Como veremos, o Universo já foi muito mais quente, porque a expansão do Universo implica o seu arrefecimento. O comprimento de onda da radiação aumenta exactamente do mesmo factor que as distâncias entre galáxias, o que corresponde a uma diminuição de temperatura. Os físicos pensam que a temperatura pode ter sido tão alta como 100 quintiliões de graus ( $10^{32}$ ), tanto faz Kelvin ou Celsius, mas apenas porque é a maior escala de temperatura que conseguem construir com as constantes universais que surgem na teoria da gravitação (constante de gravitação,  $G$ ) na relatividade ( $c$ , velocidade da luz) e na teoria quântica ( $h$ , constante de Planck) e com a constante de Boltzmann ( $k_B$ , ver abaixo).

A nossa ignorância sobre o que se possa ter passado cresce também muito rapidamente com a temperatura. Apesar disso, este campo de investigação está "quente" (não apenas por causa dos  $10^{32}$  K mas porque actividade recente em teorias de supercordas em espaços de 10 ou 11 dimensões parece prometer a construção de uma teoria quântica da gravitação consistente). No laboratório, os físicos conseguiram obter temperaturas muito inferiores a 2,726 K, tão baixas como um milésimo de milionésimo de grau acima do zero absoluto ( $10^{-9}$  K). Se não houver vida inteligente noutros planetas, este cantinho será o sítio mais frio de todo o Universo. Estas temperaturas são necessárias para poder observar o fenómeno de condensação de Bose-Einstein em nuvens muito diluídas de átomos, e que valeu o prémio Nobel da Física de 2001.

Os físicos estão pois activos em escalas de temperatura que diferem de 41 ordens de grandeza! O objectivo deste artigo é mostrar que estão também a trabalhar em mundos muito diferentes. À medida que a escala de temperatura varia, muda de tal modo o conteúdo do universo, (as partículas, as forças entre elas, "os actores") que quase podemos falar em *leis físicas diferentes*, embora mutuamente compatíveis. Mas, felizmente, o quadro geral de conceitos que usamos na descrição (os métodos de "encação") são os mesmos. Podemos, portanto, encontrar num laboratório, dentro de um criostato, a 10 K, fenómenos muito semelhantes aos que aconteceram quando o Universo estava tão quente que não passava de uma sopa de partículas, a maior parte das quais nem sequer existe actualmente, sem qualquer estrutura (sem estrelas, galáxias, átomos ou mesmo prótons e neutrões).

## O QUE É A TEMPERATURA?

Todos os sistemas físicos têm um espectro de energia. O átomo de hidrogénio, por exemplo, um sistema constituído por um electrão e um próton, possui um conjunto de níveis de energia discretos e as transições entre esses níveis são acompanhadas por emissão de radiação com comprimento de onda bem definido - o espectro de riscas. Esse é apenas parte do espectro, pois acima da energia de ionização existe um conjunto contínuo de níveis que descrevem estados em que o electrão e o próton podem estar infinitamente afastados. O estado de energia mais baixa é conhecido por estado fundamental. É uma característica universal de qualquer sistema que *tenha um estado fundamental*.

Um sistema isolado está normalmente num dos seus estados de energia e a conservação de energia implica que aí permaneça para sempre (enquanto estiver isolado). As interacções com outros sistemas (o "ambiente") permitem transitar de estado e de energia. A temperatura caracteriza a probabilidade de o sistema estar num determinado estado. A  $T = 0$  está com probabilidade um no estado fundamental. Para  $T > 0$ , tem uma probabilidade que decresce com o aumento da energia do estado e, muito rapidamente, se torna desprezável acima de uma energia proporcional a  $T$ ,  $k_B T$ . A constante de Boltzmann,  $k_B$ , permite-nos estabelecer uma relação entre unidades diferentes de energia. Por exemplo, para ionizar um átomo de hidrogénio no seu estado fundamental (separar o electrão do próton) é necessária uma energia de 13,6 electrões-volt (eV)<sup>1</sup>.

A unidade de temperatura é o kelvin (K), sendo um kelvin igual a um grau Celsius. A constante de Boltzmann vale  $8,6 \times 10^{-5} \text{ eV K}^{-1}$ , isto é, a uma temperatura de 100 000 K equivale uma energia  $k_B T$  eV. A temperatura à superfície do Sol, cerca de 5600 K,  $k_B T = 0,48 \text{ eV}$ , já é suficiente para encontrar com frequência átomos de hidrogénio ionizados. Daqui em diante usaremos indiscriminadamente as unidades eV e K para energias e temperaturas, com o sentido aqui referido.

Da caracterização da probabilidade de ocupação de *um* estado resulta que o estado fundamental é sempre (a qualquer temperatura) o mais provável. A regra de probabilidade acima indicada diz respeito à probabilidade de ocupação de um estado. O número de estados cresce em geral muito rapidamente com a energia. Embora o estado fundamental seja o mais provável, ele é apenas um entre muitos estados acessíveis a uma temperatura finita.

## COMO MUDA A RECEITA COM A TEMPERATURA

Imagine-se que toda a matéria e radiação desapareciam: um universo vazio. Outro universo que não este, certamente. Bem, na realidade, esse é apenas *um dos estados do nosso Universo*. Na descrição quântica da matéria e radiação (que são essencialmente a mesma coisa) as partículas e ondas como que se fundem numa entidade chamada um *campo quântico*. Tomemos um exemplo simples. Suponhamos que queremos descrever o movimento de uma corda de guitarra. A cada ponto da corda temos que associar uma grandeza (deslocamento) que depende do tempo. Obtemos então um campo definido por uma função de duas variáveis, a coordenada do ponto e o tempo. A corda tem movimentos particularmente simples, em que a forma da oscilação é sinusoidal, com um dado comprimento de onda. A cada comprimento de onda corresponde uma frequência determinada. Estes modos simples de vibração, conhecidos por modos normais, são características universais de campos lineares. Os campos quânticos também têm modos normais (cada um com a sua frequência e comprimento de onda), mas cada modo normal torna-se num estado possível para um dado tipo de partículas. Para o electrão (e a sua anti-partícula, o positrão) há o campo electrónico, para o fóton o campo electromagnético, etc. A frequência do modo é proporcional à energia da partícula e o comprimento de onda inversamente proporcional à sua quantidade de movi-

mento. A relação entre a frequência e o comprimento de onda determina a relação entre a energia e a quantidade de movimento.

No caso do campo electromagnético, a frequência vai a zero quando o comprimento de onda se torna infinito ( $\omega = 2 \pi c/\lambda$ ). A relação entre a energia e a quantidade de movimento fica  $E = cp$ , que descreve uma partícula de massa em repouso nula que se move a velocidade  $c$ , o fóton ou partícula de luz. Nesta linguagem, a massa de uma partícula é proporcional à frequência de um modo normal para comprimento de onda infinito (quantidade de movimento nula).

Há dois tipos fundamentais de partículas: bosões, em que cada estado pode ser ocupado por muitas partículas, e fermiões, em que em cada estado só pode ser ocupado por uma. O modo de quantificar um campo é que determina se ele origina bosões ou fermiões.

Uma partícula (fóton, electrão ou protão) é pois um estado excitado de um campo. O estado fundamental deste sistema - *o vácuo* - não tem partículas (nem radiação, que no caso electromagnético são partículas de massa nula). Para cada partícula de massa não nula podemos calcular uma temperatura abaixo da qual será muito pouco provável encontrar o Universo com essa energia de excitação. Essa temperatura limiar é simplesmente dada por  $T = mc^2 / k_B$ . A tabela 1 mostra essas temperaturas para várias partículas.

Partícula	Símbolo	Energia em Repouso ( $10^6 \text{ eV}$ )	Temperatura Limiar ( $10^9 \text{ K}$ )
FOTÃO		0	0
ELECTRÃO	$e^-, e^+$	0,511	5,93
MUÃO	$\mu^-, \mu^+$	105,7	1226,2
PROTÃO	$p, \bar{p}$	938,26	10 888
NEUTRÃO	$n, \bar{n}$	939,55	10 903

Tabela 1. Temperaturas correspondentes à energia em repouso de várias partículas.

Como se vê, o Universo está demasiado frio para que existam sequer electrões ( $T = 5,9 \times 10^9 \text{ K}$ ) e muito menos protões ( $T = 1,1 \times 10^{13} \text{ K}$ ). Porque é que ainda há alguns, então? Ou seja, porque é que há matéria, que, no estado actual do Universo, é formada por todas as partículas de massa não nula, já que às outras chamamos radiação? Acontece que nem todas as transições são possíveis. Por

exemplo, o campo associado ao electrão não pode transitar entre os estados de zero e de um electrão. Tal violaria um princípio de conservação de carga. Mas tem modos que correspondem à anti-partícula do electrão, o positrão (que tem as mesmas características do electrão, mas carga oposta), e é possível a criação ou destruição de um par electrão-positrão. Estas regras (incluindo os princípios de conservação) estão contidas na própria estrutura dos campos associadas às partículas. A única razão porque existe algo mais do que partículas de massa nula (o electrão é a partícula de massa não nula mais leve)<sup>2</sup> é que, quando o universo estava muito mais quente, havia um ligeiro excesso de matéria sobre anti-matéria e ficaram alguns electrões, prótons e neutrões, que não puderam desaparecer em virtude de leis de conservação. Mas, quando o Universo estava (muito) mais quente, existiam muito mais partículas. Se as conhecemos hoje, é porque algumas são criadas em fenómenos celestes de alta energia (supernovas por exemplo) e porque construímos enormes instrumentos científicos como o LEP, Large Electron Positron Collider, no CERN, com um túnel de quase 27 km de perímetro, para obter temperaturas que chegam aos  $10^{15}$  K em pequenas regiões, no interior de detectores extremamente sofisticados [2].

Mas a descida da temperatura não faz apenas desaparecer as partículas com massas demasiado elevadas. Cria também partículas novas. O próton, por exemplo, só apareceu quando a temperatura se tornou inferior a cerca de  $10^{12}$  K. Acima desta temperatura, além de leptões (electrões e positrões, neutrinos e mais duas famílias idênticas, mas um pouco mais pesadas), havia um outro tipo de partículas, os quarks. A estas partículas temos ainda que juntar bosões, semelhantes aos fotões, e que são responsáveis pelas interações entre as anteriores. Mas de prótons e neutrões nem rasto... Acontece que os estados de baixa energia de quarks (que tenham sobrevivido à aniquilação com anti-quarks) são três quarks confinados a uma região espacial muito pequena (da ordem de  $10^{-13}$  cm). É a isso que chamamos prótons e neutrões. Algo de muito parecido aconteceu, muito mais tarde, quando a temperatura era de centenas de milhares de kelvin. Os electrões e prótons, nos seus estados de mais baixa energia, agruparam-se em pares formando os primeiros átomos de hidrogénio na história do Universo.

Mas há ainda um último efeito, mais subtil, da descida de temperatura. O Universo actual é formado sobretudo por electrões, prótons, fotões e neutrões. Como reagiria o leitor se lhe dissesse que não existe qualquer interacção entre o próton e o electrão? Então cargas opostas não se atraem?

A interacção entre partículas resulta da influência que o movimento do campo de uma tem sobre o da outra. Nesse sentido, o electrão e o próton só interagem com o campo electromagnético, com fotões. A altas temperaturas, prótons e electrões emitem e absorvem fotões. A temperaturas baixas já não surgem fotões de alta energia. Mas o campo quântico associado ao electrão continua ligado ao campo electromagnético. Aquilo que chamamos um electrão (um estado com energia de excitação  $m_e c^2$ ) é um modo de vibração do campo electrónico que distorce o campo electromagnético. O electrão transporta consigo uma deformação do campo de fotões, ou, por outras palavras, uma nuvem de fotões virtuais (não são reais, pois esses são outros estados, mais excitados, dos dois campos acoplados). O mesmo acontece com o próton e as duas partículas interagem apenas através dessa deformação do vácuo electromagnético. Isso é a interacção de Coulomb. Um pouco como duas bolas pesadas numa membrana elástica que só se atraem quando se sobrepõem as deformações que causam. A fig. 2, retirada do livro de Feynman, *QED, A estranha teoria da luz e da matéria*, é uma representação do átomo de hidrogénio nesta linguagem.

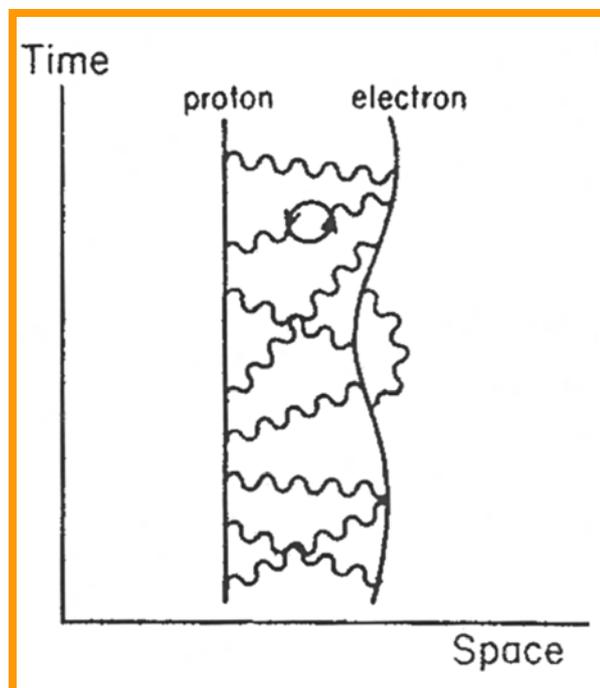


Fig.2. O átomo de hidrogénio, visto por Feynman. A interacção entre o electrão e próton resulta da troca de fotões [3].

## ARREFECENDO

Quando a temperatura baixa, surgem partículas novas, desaparecem outras, que deixam interações (que não existiam) entre as partículas que sobrevivem. Por outras palavras, muda toda a descrição que fazemos do Universo. E se continuarmos a baixar a temperatura em direcção a  $T=0$  ?

As surpresas são muito semelhantes às que descrevi acima. Muitos dos ingredientes das teorias que descrevem a evolução do Universo exprimem conceitos descobertos em física de baixas temperaturas. Um exemplo é a supercondutividade. O movimento dos electrões num metal está ligado ao dos átomos da rede cristalina. As vibrações da rede (um campo) estão associadas a partículas muito semelhantes às do campo electromagnético. Essas "partículas" são conhecidas como fonões. Pois bem, elas originam uma interacção entre dois electrões, um pouco como os fotões dão origem à interacção de Coulomb. Acontece que essa interacção é atractiva (a deformação que um electrão causa na rede é "confortável" para outro que passe por ali). A baixas temperaturas os electrões formam pares que se comportam como bósons e podem ocupar o mesmo estado. O campo quântico associado aos pares de electrões passa a ter um estado de "repouso" (*vácuo*) com valor médio não nulo. Esse vácuo é carregado. Pode conduzir corrente sem dissipação porque esta está associada ao transporte por "partículas", as excitações do campo (já não são electrões), que não existem no *vácuo*. O metal conduz electricidade sem qualquer resistência.

Devido às enormes possibilidades que têm de experimentar, variando materiais, temperatura, geometria (podem fazer-se sistemas que "vivem" em uma ou duas dimensões espaciais), os físicos de baixas temperaturas são por vezes invejados pelos seus colegas que fazem física fundamental. Em física de baixas temperaturas podem criar-se situações que nunca ocorreram no Universo, e nas quais surgem partículas (aqui mais conhecidas por excitações) com propriedades e interações inesperadas e que não raro lançam luz sobre as teorias fundamentais.

Para concluir gostaria de mencionar uma das descobertas realizadas a uma das mais baixas temperaturas que é possível atingir. Trata-se da condensação de Bose-Einstein de nuvens de átomos diluídos, prevista teoricamente há mais de 75 anos, mas que só ocorre a temperaturas inferiores a um milésimo de milionésimo de kelvin. Tal como na supercondutividade podemos olhar para este fenómeno como o aparecimento de um estado em que o campo quântico

associado às partículas (átomos de rubídio, sódio, hidrogénio, etc.), no *vácuo*, o seu estado sem excitações, tem um valor não nulo (o quadrado desse valor é a densidade de átomos na nuvem). Note-se que as excitações (partículas) definidas a partir desse estado já não são os átomos originais. Ao sobrepor dois campos, com amplitude e fase, observam-se em geral interferências, com alternância entre bandas em que os campos se reforçam e outras em que estes se anulam.

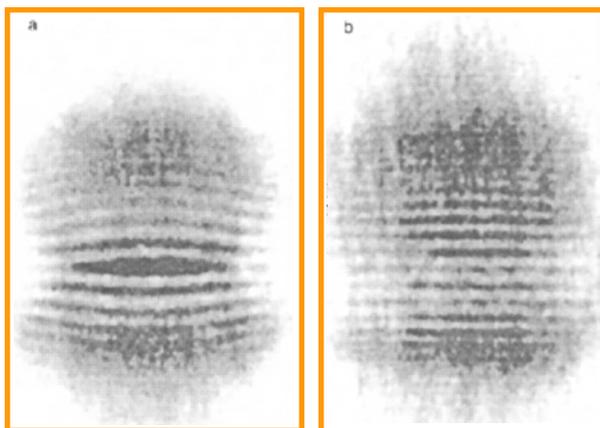


Fig.3- Duas nuvens de átomos condensados interferem.

Na fig. 3 vemos um fenómeno de interferência entre duas nuvens de átomos condensados. O campo quântico está, no essencial, no seu estado de mais baixa energia - o *vácuo*. Veja-se como pode ser recompensador, do ponto de vista da física fundamental, estudar fenómenos a baixas temperaturas. Onde mais se pode observar a interferência do vácuo com ele próprio?

### NOTAS

- 1 Um electrão-volt é a energia adquirida por um electrão quando acelerado por uma diferença de potencial de um volt. Trata-se de uma energia extremamente pequena à escala macroscópica, pois envolve apenas um electrão.
- 2 Pode não ser verdade. Experiências recentes sugerem que o neutrino pode ter uma massa não nula, ainda que inferior a 103 K.

### REFERÊNCIAS

- [1] - <http://space.gsfc.nasa.gov/astro/cobe/>
- [2] Pedro Teixeira Dias, *A caça à partícula Higgs*, Gazeta de Física 24, fasc. 3, p. 4 (2001)
- [4] R. P. Feynman, *QED, the strange theory of light and matter*, Princeton University Press, New Jersey, 1985
- [5] Barbara Gross Levi, Bose Condensates are Coherent, Inside and Outside an Atom Trap, *Physics Today*, March 1997, p.17.

COLECCÃO

# Biblioteca Científica

Uma reconhecida colecção científica para quem se interessa por temas vários da Ciência moderna. Baseada em originais de grande qualidade por autores de renome, publicados pela "Scientific American Library", aborda os assuntos de forma profunda, embora clara e acessível, com imagens e esquemas a cores que complementam e explicam o texto de forma eficaz.

