

10^{-16} m *

A grande conquista da Cosmologia, no século XX, foi a existência de escalas para o Universo.

JORGE DIAS DE DEUS

Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa

jdd@mandrake.fisica.ist.utl.pt

O UNIVERSO E SUAS

Ao olhar à sua volta, a criança descobre que é o centro do mundo. Trata-se da grande ilusão infantil que, por sinal, vai deixar marcas profundas nas outras fases da vida. Claro que todos sabemos e aceitamos, com mais ou menos relutância, que não somos o centro do mundo. Mais: nem sequer somos observadores privilegiados. A nossa pequena vingança está nas escalas de medição, nos pés, nas polegadas, nas pulsações, tudo aquilo que a Revolução Francesa racionalizou acabando por converter nas escalas básicas: o metro, para o espaço, e o segundo para o tempo. No nosso sistema de unidades, dominam as nossas escalas, adaptadas às **nossas** dimensões espaciais e aos nossos ritmos temporais.

Só que o Universo tem uma quantidade enormíssima de escalas: que vão do (quase) infinitamente grande, ao (quase) infinitamente pequeno. Dos 10^{-20} m (dez elevado a menos vinte metros) aos 10^{26} m, no que respeita ao espaço, dos 10^{-23} s aos 3×10^{17} s (10^{10} anos), no que respeita ao tempo. Graças às escalas inventadas por nós, reencontramos a centralidade perdida da nossa infância e podemos deleitar-nos a pensar que somos a medida de todas as coisas! (Ver Tabela 1).

Do lado das escalas mais pequenas há uma questão que fica em aberto. Teremos de acreditar que as dimensões mínimas do espaço e do tempo, ligadas ao tamanho do electrão e ao tempo de vida de certas partículas elementares instáveis, são realmente as finais? Nada faz pensar que assim seja: a convicção mais generalizada é que a teoria e a tecnologia acabarão por chegar a "infinitos" ainda mais pequenos!

ESCALAS

O BIG-BANG: DESVIO PARA O VERMELHO

O esforço teórico no século XX para construir um modelo matemático para o Universo começou por envolver o próprio Einstein. Ele quis aplicar a relatividade geral ao Universo no seu todo. Como qualquer massa sofre atracção gravitacional, Einstein inventou um termo repulsivo, chamado constante cosmológica, para equilibrar e estabilizar o Universo. (Mais tarde, Einstein haveria de dizer, talvez precipitadamente, que esse tinha sido o maior erro da sua vida). O que Einstein tentava realmente era salvar um Universo material estático, imutável, eterno. Mas, logo a seguir, nos anos 1920-1930, de Sitter, Friedman, Robertson e Walker mostraram que, no caso dum Universo vazio ou uniformemente preenchido por matéria, existiam soluções não estáticas. Era a possibilidade de um Universo com história!

Pela mesma época iniciam-se as observações astronómicas que levaram à descoberta, primeiro, de outras galáxias para além da nossa, depois, de numerosas galáxias emitindo luz com desvios de Doppler para a banda do vermelho, e, por fim, de desvios que eram tanto maiores quanto mais distantes estavam as galáxias.

Portanto, tínhamos na época uma situação em que, do ponto de vista teórico, havia duas possibilidades, um Universo estático (com constante cosmológica *à la* Einstein) ou um Universo em evolução. Por outro lado, do ponto de vista observacional, era claramente favorecido um Universo em evolução. Vamos ver, com um pouco mais de pormenor, porquê.

As observações astronómicas das galáxias distantes feitas por Vesto Slipher nos anos 1910-1920, seguidas pelas observações de Edwin Hubble na década seguinte, foram decisivas para a construção do modelo do Universo em expansão. Por um lado, eles observaram que a matéria existente nas galáxias distantes era constituída pelos mesmos elementos que existem na nossa galáxia: hidrogénio, hélio, sódio, etc. Tal ajudava ao triunfo da ideia de que o Universo, por toda a parte, é mais ou menos parecido. Por outro lado, o espectro desses elementos tinha as riscas de identificação deslocadas para o vermelho.

O que quer isto dizer? Quando a luz passa através de determinada substância, o gás hélio por exemplo, há certas cores, ou comprimentos de onda, que são absorvidas, pelo que elas faltam na imagem final (o que se chama o

ESCALAS DE ESPAÇO (EM METROS)	
UNIVERSO	100 000 000 000 000 000 000 000 000 000
GALÁXIAS	10 000 000 000 000 000 000 000 000
SISTEMA SOLAR	1 000 000 000 000
TERRA	10 000 000
HUMANOS	1
MOLÉCULAS	0,000 000 001
ÁTOMOS	0,000 000 000 1
NÚCLEOS	0,000 000 000 000 001
ELECTRÕES	0,000 000 000 000 000 000 000 01(?)

Tabela 1

Já do lado das escalas maiores a situação parece ser radicalmente diferente. A grande conquista da Física do Universo (Cosmologia), no século XX, foi a **existência** de escalas para a Universo, isto é, para cada instante do Universo, há um tamanho máximo e uma duração máxima, não independentes mas ligados pela velocidade máxima de transmissão de informação, a velocidade da luz ($c=3 \times 10^8$ m / s):

$$\text{Tamanho} = \text{Duração} \times \text{Velocidade da Luz} \quad (1)$$

ou seja,

$$10^{26} \text{ m} = (3 \times 10^{17} \text{ s}) \times (3 \times 10^8 \text{ m / s})$$

Tentar explicar como é que se chegou a esta conclusão é o objectivo deste artigo.

espectro), aparecendo riscas escuras. Os espectros são, de facto, muito parecidos com os códigos de barras dos produtos dos supermercados, e têm uma função semelhante: são a assinatura de identificação do produto, num caso, e da substância, no outro. Se se conseguia identificar o hélio na galáxia a milhares de anos-luz através da sua assinatura (do seu espectro), a verdade é que cada risca não estava bem no sítio certo: como se a cor absorvida estivesse deslocada para a zona do vermelho (maior comprimento de onda). Uma risca dum elemento que, na Terra, correspondia ao comprimento de onda λ , quando esse elemento estava numa galáxia distante, a mesma risca aparecia com o comprimento de onda λ_0 . Define-se o **desvio para o vermelho** (*red shift*) z da seguinte maneira:

$$z = \frac{\lambda_0 - \lambda}{\lambda} = \frac{\lambda_0}{\lambda} - 1, \quad (2)$$

sendo, experimentalmente, $z > 0$.

A culminar todo o trabalho de Slipher e Hubble está a **lei de Hubble** (1929), segundo a qual o desvio para o vermelho z aumenta linearmente com a distância D da galáxia relativamente à nossa, ou seja,

$$zc = HD, \quad (3)$$

sendo H a famosa **constante de Hubble**. A constante não tem que ser realmente constante. Na nossa época $H = H_0 = (70 \pm 7)$ km/Mpc/s, mas pode ter tido outros valores noutros instantes do Universo. Note-se que $1 \text{ Mpc} = 3,26 \times 10^6$ anos-luz.

Qual é a explicação para o desvio para o vermelho? A mais natural que ocorre é a baseada no efeito Doppler. Se uma fonte emitir sinais luminosos com periodicidade T , que se propagam com velocidade c , a distância espacial entre os sinais, num dado instante, será λ (comprimento de onda), com $\lambda/T = c$. Se a fonte se estiver a afastar de nós com velocidade V , à distância λ haverá que acrescentar o caminho percorrido pela fonte, VT , pelo que o comprimento de onda observado será $\lambda_0 = \lambda + VT = \lambda \left(1 + \frac{V}{c}\right)$ (efeito de Doppler não relativista). A explicação do desvio para o vermelho ($\lambda_0 > \lambda$) estaria então no **afastamento** das galáxias (ter-se-á $\lambda + VT$ e não $\lambda - VT$). Neste caso,

$$z = V/c. \quad (4)$$

Do lado da teoria, é possível um Universo com afastamento de galáxias, um Universo em expansão. No caso de um Universo

sempre uniformemente preenchido (ou vazio) tem-se necessariamente

$$V = HD, \quad (5)$$

sendo V a velocidade instantânea de afastamento, D a distância e H a constante de proporcionalidade. Num balão em que estejam pintados pontos (galáxias) o afastamento destes, quando este se enche, segue a regra (5). Em particular, na nossa galáxia, tem-se sempre $V = 0$ e $D = 0$. (Ver caixa.)

De facto, se duas galáxias estiverem às distâncias D e D' da minha galáxia, com a expansão tem-se sempre a relação de homotetia

$$D/D' = \text{const.} \quad (6)$$

(ver Fig.1). Diferenciando (6)

$$\frac{dD}{D'} - \frac{D}{D'^2} dD' = 0 \quad (7)$$

e ainda, escrevendo $V = dD/dt$ e $V' = dD'/dt$,

$$\frac{V}{D} = \frac{V'}{D'} = \text{const.} = H \quad (8)$$

que é a relação (5).

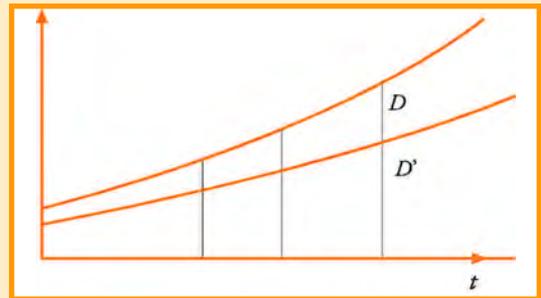


Fig. 1. Em qualquer instante, a razão entre as distâncias a duas galáxias de referência é constante: $D/D' = \text{constante}$

É uma tentação identificar (5) com (3), o que é automático no caso do efeito Doppler não relativista (4). Mas, se fizermos isso, a consequência imediata, vinda da Relatividade restrita, é que

$$z \leq 1. \quad (9)$$

Ora hoje em dia medem-se desvios para o vermelho com $z > 1$! Mas note-se que falta a correcção relativista à fórmula de Doppler (devido à dilatação do tempo), ou seja, que se deverá usar não (4) mas

$$z = \sqrt{\frac{1 + V/c}{1 - V/c}} - 1 \quad (10)$$

o que permite $z = 0$ para $V = 0$.

Há duas observações de extrema importância a fazer agora:

1) DESVIO PARA O VERMELHO DEVIDO À EXPANSÃO

O desvio para o vermelho não é, de facto, resultado do efeito Doppler. As galáxias não se estão a **mover no espaço**, a afastar-se umas das outras (aí sim, teríamos efeito Doppler), mas é o **espaço que expande** (o balão que enche). As galáxias são teoricamente tratadas como se estivessem incrustadas no espaço (o que faz lembrar as estrelas fixas no céu!) e os movimentos relativos (rotação de uma galáxia, por exemplo) são ignorados. Há um rescalonamento geral e o desvio para o vermelho não é mais do que a consequência desse efeito:

$$z = \frac{\lambda_0}{\lambda} - 1 = \frac{D_0}{D} - 1, \quad (11)$$

sendo D_0 a distância medida hoje a determinada galáxia e D a distância na altura da emissão da luz.

O curioso é que na fórmula (11) não entra a velocidade V de afastamento da galáxia! A maneira como se enche o balão não é importante, pois só contam os tamanhos inicial e final do balão. Isto não é efeito Doppler!

O desvio para o vermelho é infinito quando $D = 0$ (já veremos o que isso quer dizer). A informação mais antiga que temos provém da radiação electromagnética de fundo e corresponde a $z = 1000$. A partir do estudo de galáxias distantes (em particular, de supernovas) chegou-se a $z = 1,5$.

Convém notar que, para distâncias pequenas, valores de z pequenos, a velocidade V de afastamento poderá ser muito menor do que as velocidades locais (lembrar a Eq. (5)). Tal significa que, quando estudamos o sistema solar ou outros sistemas na nossa galáxia, podemos esquecer a expansão!

2) A IDADE DO UNIVERSO

Se a taxa de afastamento de determinada galáxia for constante ao longo do tempo, isto é, se

$$\frac{dD}{dt} = V, \quad (12)$$

com

$$V = V_0 \quad (13)$$

o valor actual, tem-se então

$$D_0 - D = V_0 (t_0 - t) \quad (14)$$

(ver Fig. 2). Mais uma vez encontramos uma relação de homotetia (no tempo). A recta da minha galáxia e a recta da galáxia em estudo encontram-se num ponto: $D = 0$, $t = 0$. Este ponto corresponde ao "começo" do Universo (*Big-Bang*), obtendo-se de (14) que

$$t_0 = \frac{1}{H_0} = 10^{10} \text{ anos}, \quad (15)$$

que é a "idade" do Universo. Nesta mesma aproximação, $V = V_0 = \text{const.}$, haverá galáxias que se estão a afastar com a velocidade da luz,

$$V = V_0 = c. \quad (16)$$

Tal define o Universo observável,

$$D_{MAX} = c \times \frac{1}{H_0} = 10^{10} \text{ anos-luz}, \quad (17)$$

já que, para velocidades de afastamento $V > c$, não existe informação que possa chegar até nós.

Em geral V não é constante no tempo e podemos ter um Universo acelerado ou desacelerado. (Ver caixa.)

É de notar que estes cálculos só são válidos se $V = \text{constante}$ ao longo do tempo cosmológico. Em geral, D não cresce linearmente com t , como na Fig.2, e portanto

$$\ddot{D} = \frac{d^2 D}{dt^2} \begin{matrix} > 0 \\ = 0 \\ < 0 \end{matrix} \quad (18)$$

Podemos ter aceleração ou **desaceleração** na expansão do Universo. Tal como se define uma constante universal (dependente do tempo!) H , define-se um termo de desaceleração invariante de escala (dependente do tempo!) q_0 ,

$$q_0 = - \frac{\ddot{D}}{DH^2} \quad (19)$$

Este termo é positivo quando há desaceleração.

Por exemplo, se $H = \text{constante}$ no tempo, vem.

$$\frac{dD}{dt} = H_0 D \quad (20)$$

e, procedendo como antes,

$$D_0 = D e^{H_0 t} \quad (21)$$

com

$$\dot{D}_0 = D_0 H_0,$$

$$\ddot{D}_0 = D_0 H_0^2,$$

$$q_0 = -1 \text{ (aceleração)} \quad (22)$$

Este Universo é o chamado **Universo inflacionário** que introduz um crescimento exponencial das distâncias com o tempo, Eq.(21), e que permite perceber a homogeneidade e a isotropia do Universo para largas escalas.

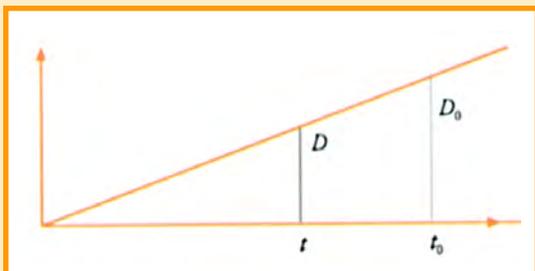


Fig. 2. Se a velocidade de afastamento V_0 de dada galáxia for constante, a distância cresce linearmente com o tempo, $D = V_0 t$, e tem-se a Eq.(14).

Não sabemos se vivemos num Universo inflacionário, em que a expansão é exponencial no tempo, mas tudo indica (a partir da observação de supernovas em galáxias distantes) que, pelo menos, o Universo tem expansão acelerada!

ESCALAS E COISAS

As considerações feitas até aqui têm tido um carácter essencialmente geométrico. Mas o Universo não é só geometria, tem coisas, coisas essas que, aliás, ajudam a definir a geometria (Einstein *dixit!*). O uso da palavra "coisas", com toda a sua ambiguidade, é propositado, já que as "coisas" podem ser diferentes em épocas diferentes: um Universo de galáxias e radiação de fundo, como acontece hoje, um Universo que é uma sopa de quarks e glúões, como poderá ter acontecido nos primeiros 10 microsegundos ou, caminhando ainda mais para trás no tempo, um Universo de supercordas...

Seja como for, se as "coisas" estiverem, ou tiverem estado, em interacção umas com as outras, podemos definir propriedades termodinâmicas para o Universo, em particular, podemos falar de temperatura T . E, se formos aos livros, recordaremos que a temperatura é energia por grau de liberdade.

Se escrevermos a fórmula relativista que relaciona a energia E , o momento linear p e a massa m , vem

$$(E/c)^2 = p^2 + (mc)^2, \quad (23)$$

e, se nos lembrarmos da relação entre momento linear e comprimento de onda (relação de de Broglie),

$$p = h/\lambda, \quad (24)$$

sendo h a constante de Planck, e nos esquecermos do termo de massa em (23), que é irrelevante para energias muito grandes, obtemos

$$E \sim 1/\lambda, \quad (25)$$

Isto quer dizer que a energia associada às "coisas" sofre um desvio para o vermelho e que, portanto, o mesmo ocorre com a temperatura,

$$T \sim 1/\lambda \sim 1/D, \quad (26)$$

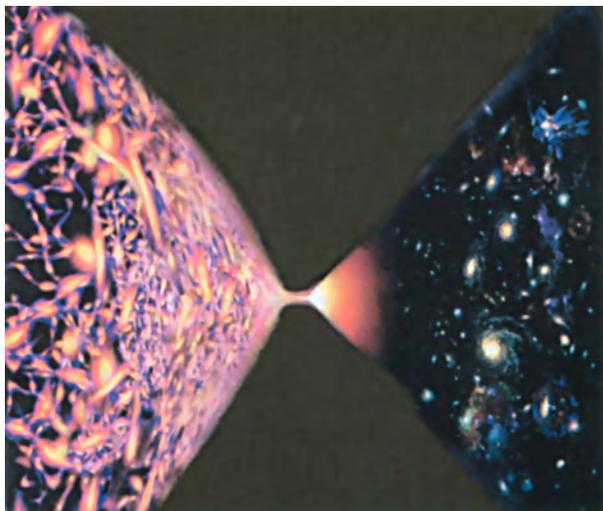
sendo D uma distância característica de escala. Em conclusão: a temperatura diminui à medida que a expansão avança.

Se andarmos para trás no tempo a temperatura vai, portanto, aumentar. Ora, se a temperatura aumenta, a estabilidade das "coisas" pode ser posta em causa, já que as estruturas existem enquanto a energia potencial de ligação – que origina as forças da ordem – se sobrepuser à energia térmica – que origina as forças da desordem.

E aqui chegamos ao segundo grande argumento – agora não puramente geométrico – em favor do *Big-Bang*: a existência duma relíquia do Universo passado, a radiação electromagnética de fundo. Nos anos 60 do século passado, Penzias e Wilson descobriram que havia uma radiação electromagnética, dominante na banda das micro-ondas e ondas de rádio, que era isotrópica (pelo menos, quando vista da Terra!) que parecia indicar que o Universo, como um todo, radiava. O Universo era um objecto de estudo dos cientistas...

A história da radiação electromagnética, dita de fundo, é a história da criação dos átomos – electricamente neutros – deixando a radiação – fotões – perdida no espaço-tempo. Electrões e protões podem radiar (emitir) fotões, enquanto átomos, quer dizer, electrões + protões, já que são neutros, não radiam nada. A radiação de fundo retrata esse momento na expansão em que a temperatura, que vai baixando, deixou de ser capaz de destruir as ligações entre protões e electrões e em que os fotões ficaram livres.

O retrato obtido é, mais uma vez, um retrato que sugere isotropia e homogeneidade. É, afinal, o retrato que está de acordo com a expansão do *Big-Bang*.



CONCLUSÕES

É difícil fugir à conclusão de que vivemos num Universo em expansão, provavelmente uma expansão acelerada. É possível inferir uma idade para o Universo e, a partir daí, um tamanho máximo para o que é possível observar. Chegamos assim aos 10^{10} anos e aos 10^{26} metros.

Qual é o grau de confiança que existe quanto a estas conclusões? É razoável, mas, como sempre em ciência, cada resposta levanta novas perguntas. Por exemplo: porquê um *Big-Bang*? Porquê uma condição inicial tão singular, um concentrado de matéria com densidade e temperatura tão grandes? Como é que se chegou ao *Big-Bang*? Como era o Universo antes do tempo que nós conhecemos?

Como habitualmente, há mais perguntas do que respostas...

NOTA

* Esta e todas as outras imagens que abrem os artigos principais foram retiradas do livro "Potências de Dez", Philip Morrison, Phyllis Morrison e Eames Office, Porto Editora, 2001, com a amável autorização da editora.