O efeito Hubble

Domingos S.L. Soares
Departamento de Física, ICEx, UFMG — C.P. 702
30123-970, Belo Horizonte, MG

13 de setembro de 2009

Resumo

A "lei de Hubble"é a relação linear existente entre os logarítmos dos desvios para o vermelho de objetos celestes distantes e as suas magnitudes aparentes. Ainda não existe uma explicação física satisfatória para esta lei. Proponho que o "efeito Hubble-– ainda por ser elucidado — seja o mecanismo físico responsável pela lei de Hubble. Apresento aqui um roteiro científico para a descoberta de tal efeito. Neste contexto, torna-se bastante útil uma discussão da descrição heurística do efeito fotoelétrico feita por Albert Einstein.

1 Introdução

O astrônomo norte-americano Edwin Powell Hubble (1889-1953) sistematizou e concluiu a pesquisa sobre os desvios para o vermelho das galáxias distantes, realizada por vários astrônomos, nas primeiras décadas do século XX. A relação entre os desvios para o vermelho de galáxias distantes e o seu brilho aparente ficou conhecida como "lei de Hubble". Esta relação se aplica a determinada classe de objetos, quais sejam, aqueles que possuem a mesma luminosidade intrínseca. Por exemplo, a lei de Hubble para as *galáxias mais brilhantes de aglomerados* é muito bem ilustrada na figura 1. Nela, vemos as fotografias das galáxias mais brilhantes de cinco aglomerados de galáxias ao lado dos espectros das mesmas.

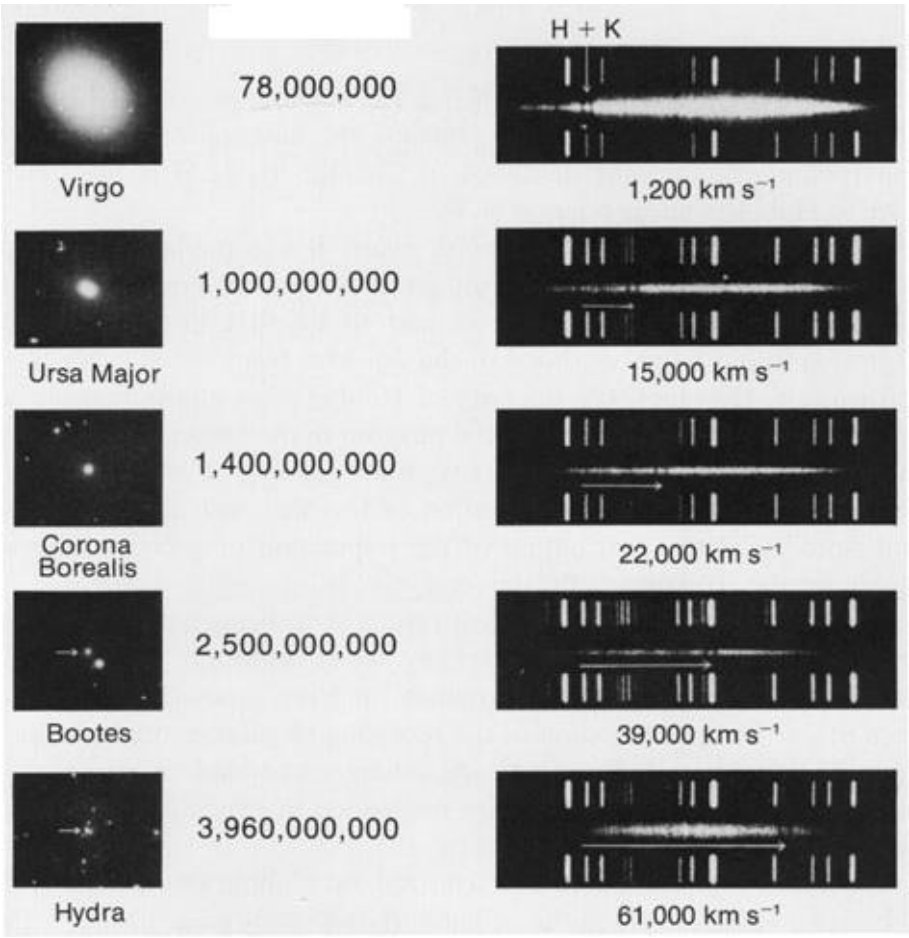

Figura 1: Fotografias, distâncias e desvios para o vermelho das galáxias mais brilhantes de aglomerados de galáxias. As galáxias estão identificadas pelos nomes dos aglomerados em que se situam. As distâncias, na coluna do meio, estão expressas em anos-luz. As setas, na parte central dos espectros, indicam os desvios das linhas H (λ =3968 Å) e K (λ =3934 Å) do elemento químico cálcio — no seu primeiro estado de ionização, ou, CaII ("cálcio dois"), no jargão dos astrônomos. Os desvios $\Delta\lambda$ são medidos relativamente ao espectro de comparação, neste caso o espectro de emissão do hélio. Os desvios para o vermelho $z = \Delta\lambda/\lambda$ são indicados abaixo de cada espectro como velocidades, calculadas a partir da expressão do desvio Doppler não relativista $v = cz$, onde c é a velocidade da luz no vácuo (Observatório Palomar, Instituto de Tecnologia da California, Estados Unidos).

Os dados observacionais disponíveis a partir da figura 1 são os desvios para o vermelho z — obtidos diretamente do espectro — e as magnitudes aparentes das galáxias — obtidas diretamente das fotografias das galáxias.

Supondo-se que todas as galáxias mais brilhantes de aglomerados possuem a mesma luminsidade intrínseca, i.e., a mesma magnitude absoluta, as suas distâncias podem ser calculadas. Os dados da figura 1 são consistentes com uma proporcionalidade direta entre "velocidades" e distâncias r, a lei de Hubble:

$$v = H_\circ r, \tag{1}$$

onde a constante de proporcionalidade $H_\circ$ é chamada de "constante de Hubble". Esta expressão, no entanto, não é a que relaciona os dados observacionais. A expressão observacional da lei de Hubble é dada por

$$m = 5 \log cz + \text{constante}, \tag{2}$$

onde m é a magnitude aparente (ver [1, figs. 3.1 e 3.2, eq. 3.1]). A relação linear dada pela eq. 1 foi apresentada por Hubble, pela última vez, em 1953 [2], o ano em que faleceu. No artigo, aparecem dados de outros aglomerados, além daqueles mostrados na figura 1, mas a galáxia mais distante é a galáxia do aglomerado de *Hydra*, com $z = 0,20$.

Hubble utilizava a conversão de z em velocidade através da fórmula do desvio Doppler clássico, mas ele a considerava como uma velocidade "aparente". Em outras palavras, ele não acreditava que o desvio para o vermelho de uma galáxia era causada por seu movimento de afastamento de nós, o que justificaria a utilização do desvio Doppler. Ao contrário do que é apresentado em livros textos e em abordagens populares da cosmologia, Hubble não aceitava a idéia da expansão do universo. Ele tinha vários motivos para isto — todos ditados pelo seu trabalho observacional. Uma discussão detalhada desta característica de Hubble foi feita por Assis et al. [3].

Um dos motivos mais fortes considerados por Hubble era a questão da idade do universo. Para um universo em expansão, a sua idade é aproximadamente igual ao inverso da constante de Hubble — note que a constante de Hubble tem a dimensão física de inverso de tempo. Utilizando-se o valor da constante de Hubble conhecida até o ano de sua morte, 1953, a idade do universo resultava menor do que a idade geológica da Terra. Isto era um sinal que Hubble, um cientista bastante ciente do valor dos dados observacionais e experimentais, não podia ignorar.

2 Desvio para o vermelho e velocidade

O Modelo Padrão da Cosmologia (MPC) — também conhecido como Modelo do *Big Bang*, ou ainda, Modelo do Estrondão (cf. [4]) — fornece a função $v(z)$, a qual pode ser inserida na eq. 2.

Mostrarei, a seguir, como o MPC transforma a eq. 2 na popular equação $v = H_\circ r$ (eq. 1).

Como ilustração do resultado esperado a partir do MPC, utilizarei o modelo de Friedmann crítico (geometria espacial plana; ver [5, caps. 2 e 3] e [6, caps. 14 e 15]). O desvio para o vermelho é causado pela expansão do espaço. O espaço-tempo nas teorias relativistas, i.e., derivadas da Teoria da Relatividade Geral, é caracterizado por uma métrica que pode variar com o tempo. Assim, nos modelos de Friedmann, o espaço se expande. Esta expansão é uma propriedade intrínseca do espaço, e não relativa a algo externo. O valor de z depende da velocidade de expansão, como ilustrado na figura 2. É interessante observar que a velocidade de expansão pode ser maior que a velocidade da luz no vácuo.

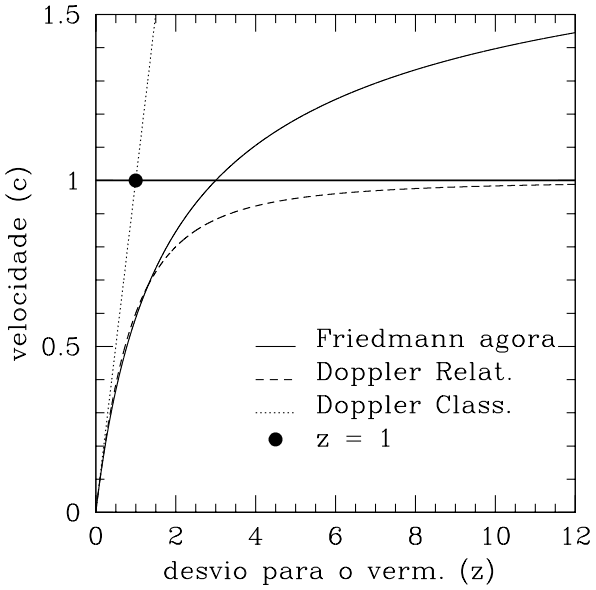

Figura 2: As funções $v(z)$ para o modelo de Friedmann e para o desvio Doppler. A curva identificada como "Friedmann agora"representa a função $v(z)$ correspondente à velocidade de expansão do universo prevalecente no instante da detecção da luz. Note que a velocidade de expansão pode ser maior que a velocidade da luz.

Para o modelo de Friedmann, existem duas funções possíveis: o valor de z observado pode ser associado à velocidade de expansão do universo no instante em que a luz foi emitida, ou à velocidade de expansão no instante em que foi detectada. A figura 2 mostra esta última, identificada como "Friedmann agora"(veja esta mesma curva na figura 1 de [7], que compara os desvios para o vermelho Doppler relativista e cosmológico).

A figura 2 apresenta também, para comparação, as funções $v(z)$ esperadas a partir do efeito Doppler — clássico e relativista. No efeito Doppler, o desvio para o vermelho é o resultado do movimento de recessão da fonte de luz.

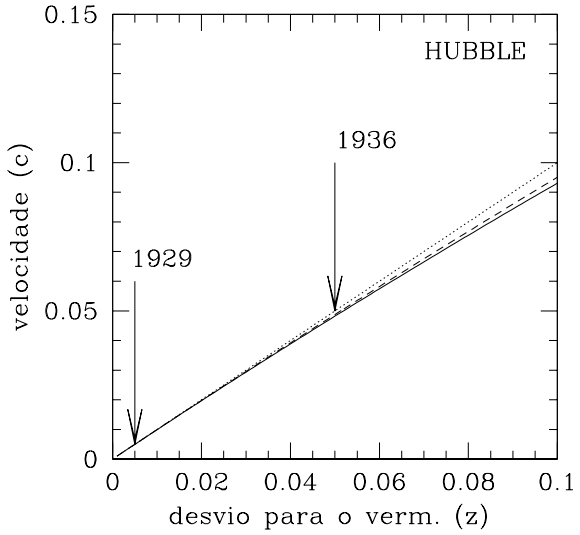

Figura 3: As funções $v(z)$ ilustradas na figura 2 aparecem aqui para um faixa restrita de desvios para o vermelho, $0 \leq z \leq 0,1$. As setas indicam os valores máximos de z apresentados por Hubble em seus trabalhos de 1929 [8] e 1936 [9]. Note que as três funções não diferem substancialmente nesta faixa de desvios para o vermelho.

Hubble apresentou pela primeira vez a relação dada pela eq. 1 em 1929 [8], e posteriormente ampliou a faixa de desvios para o vermelho [9]. O trabalho de 1929 é geralmente considerado como o trabalho da descoberta da lei de Hubble, apesar de que recentemente tem havido muita discussão a respeito disto (e.g., [10] e as referências lá apresentadas).

A figura 3 apresenta as mesmas curvas da figura 2 para o intervalo $0 \leq$

$z \leq 0,1$. Nesta faixa de z, todas as funções $v(z)$ podem ser escritas como:

$$v(z) \simeq cz. \tag{3}$$

No caso do desvio Doppler clássico temos exatamente $v(z) = cz$. A lei de Hubble só é válida para desvios para o vermelho muito menores do que a unidade ($z \ll 1$), i.e., aqueles considerados na figura 3. O modelo de Friedmann, nesta faixa de z, pode, portanto, ser aproximado por $v(z) = cz$.

Para se obter a eq. 1, a partir da eq. 2, devemos usar a aproximação $v(z) = cz$ e a definição da magnitude aparente m. Em termos da magnitude absoluta M e da distância r, a magnitude aparente é dada por:

$$m - M = 5 \log r - 5, \text{ou}$$

$$m = 5 \log r + \text{constante}. \tag{4}$$

Inserindo-se a eq. 4 e $v(z) = cz$ na eq. 2 obtemos $v = H_\circ r$. Desta forma, fica evidente que a lei de Hubble é *consistente* com um modelo de expansão do espaço.

O grande problema é que o modelo de expansão do universo, descrito pelo MPC, *não é comprovado pelas observações*. Para que este modelo seja válido é necessário admitir-se a existência de quantidades substanciais de *matéria escura* — isto é, não detectada — e de uma componente *escura* de energia não eletromagnética. Apenas 0,5% do conteúdo total de matéria e energia do universo são observados diretamente; um sumário das quantidades de matéria e energia no universo, de acordo com o MPC, está descrito em [11]. A *energia escura* possui propriedades não triviais e seria responsável pela expansão acelerada do universo, existente no momento atual. A realidade da expansão acelerada também é questionável. Uma discussão deste aspecto é apresentada em [12].

Concluindo, o MPC ainda não é completamente satisfatório para a explicação da lei de Hubble, como visto acima. Torna-se perfeitamente razoável, então, a busca de um mecanismo físico que ofereça uma alternativa para esta explicação.

3 Um mecanismo físico para a lei de Hubble

As observaçẽs de Hubble são consistentes com a idéia da expansão do universo, mas não são necessariamente uma prova dela. O próprio Hubble estava ciente disto e procurou durante toda a sua vida a resposta correta para

a questão apresentada pela sua descoberta: o que causa os desvios para o vermelho? [3].

Uma possibilidade considerada por ele foi o chamado *paradigma da luz cansada*. Esta possibilidade foi originalmente sugerida por um dos maiores amigos de Hubble, Fritz Zwicky [13, 14]. Buscaremos, por conseguinte, um mecanismo físico — o *efeito Hubble* — válido para o paradigma da luz cansada. De modo geral, o paradigma da luz cansada estabelece que a luz perde energia — o seu comprimento de onda aumenta —, quando a luz "viaja"da fonte para o observador.

Que mecanismo físico poderia ser este?

Neste ponto, é interessante relembrar o que aconteceu no passado, em uma situação semelhante, quando Einstein apresentou uma interpretação heurística do *efeito fotoelétrico*. Pode-se fazer aqui um contraponto bastante útil para o caminho da descoberta do mecanismo responsável pelo efeito Hubble.

O modelo heurístico de Einstein partiu das seguintes evidências experimentais (ver discussão em [15, p. 36]):

(a) o efeito não depende da intensidade da fonte de radiação;

(b) a radiação de corpo negro, para pequenos comprimentos de onda, é descrita pelo limite de Wien;

(c) a radiação de corpo negro, para grandes comprimentos de onda, é descrita pela distribuição de Rayleigh-Jeans.

Os ítens (b) e (c) foram incorporados na explicação de Planck para a radiação do corpo negro, e que introduziu na física os *quanta* de energia. Esta concepção levou Einstein à idéia de que a luz consiste em quanta de energia, e daí à explicação do efeito fotoelétrico [15, p. 217]. No entanto, para a formulação de seu modelo para o efeito fotoelétrico, em 1905, Einstein não utilizou a lei de distribuição completa, para a radiação de corpo negro, obtida por Planck em 1900 (cf. [15, p. 37]).

Um programa heurístico para o efeito Hubble deve, de forma semelhante, contemplar as seguintes evidências observacionais:

(a) o efeito depende do fluxo da fonte de radiação de acordo com a lei de Hubble, dada pela eq. 2;

(b) o desvio para o vermelho não depende — ou depende muito pouco — do comprimento de onda da radiação;

(c) o efeito é quantizado ([16], [17] e referências citadas).

(d) o efeito não causa o espalhamento da luz que é, em geral, seletivo, i.e., dependente do comprimento de onda. Caso contrário, as imagens de fontes extensas distantes seriam "borradas", como se estivessem fora de foco, o que não é observado (cf. [6, p. 312]).

Não se observa, em geral, grandes discrepâncias quando se mede o desvio para o vermelho de uma fonte distante, relativamente ao comprimento de onda utilizado (e.g., [18] e [19], onde se estudam desvios em comprimentos de onda no visível e em rádio). O fato de z ser independente de λ é uma característica, tanto do MPC — z é uma consequência da expansão do espaço —, quanto da hipótese do efeito Doppler — $z = v/c$. Não se deve descartar, no entanto, a possibilidade de que exista uma pequena dependência de z com λ, o que seria uma feição interessante do putativo efeito Hubble.

Tem-se, portanto, um programa que certamente abriria o caminho para uma teoria física satisfatória para o paradigma da luz cansada, em outras palavras, para a descoberta do efeito Hubble.

Agradecimento — Agradeço ao Prof. André K.T. Assis pela leitura cuidadosa do manuscrito, e pela importante lembrança da possibilidade de que o desvio para o vermelho possa ter alguma dependência com λ.

Referências

[1] Hoyle, F., Burbidge, G. and Narlikar, J.V. 2000, *A Different Approach to Cosmology: from a Static Universe through the Big Bang towards Reality*, Cambridge University Press, Cambridge

[2] Hubble, E. 1953, *The law of red-shifts*, MNRAS 113, 658

[3] Assis, A.K.T., Neves, M.C.D., Soares, D.S.L. 2008, *A cosmologia de Hubble: de um universo finito em expansão a um universo infinito no espaço e no tempo*, in Evoluções e revoluções: o mundo em transição (orgs. Neves, M.C.D., Silva, J.A.P.), Editora Massoni, LCV Edições, Maringá, PR, pp. 199-221
(http://www.fisica.ufmg.br/~dsoares/ensino/Hubble-pt.doc)

[4] Soares, D.S.L. 2002a, *A tradução de Big Bang*, http://www.fisica.ufmg.br/~dsoares/aap/bgbg.htm

[5] de Souza, R.E. 2004, *Introdução à Cosmologia*, EDUSP, São Paulo, SP

[6] Harrison, E. 2000, *Cosmology, the Science of the Universe*, Cambridge University Press, Cambridge

[7] Bedran, M.L. 2002, *A comparison between the Doppler and cosmological redshifts*, Am. J. Phys. 70, 406

[8] Hubble, E. 1929, *A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae*, Proceedings of the National Academy of Sciences, 15, 168

[9] Hubble, E. 1936, *The Realm of the Nebulae*, Dover, New York (edição de 1958)

[10] Livio, M. 2011, *Mystery of the missing text solved*, Nature 479, 171

[11] Soares, D.S.L. 2002b, *Do we live in an anthropic universe?*, http://arXiv.org/abs/physics/0209094

[12] Soares, D.S.L. 2009, *A idade do universo, a constante de Hubble e a expansão acelerada*, http://www.fisica.ufmg.br/~dsoares/ageunv/idadeunv.pdf

[13] Zwicky, F. 1929, *On the redshift of spectral lines through interstellar space*, Proceedings of the National Academy of Sciences, 15, 773

[14] Soares, D.S.L. 2014, *O paradigma da luz cansada revisitado*, http://www.fisica.ufmg.br/~dsoares/ensino/luzcans/luzcans.htm

[15] Stachel, J. 1998, (org.) *Einstein's Miraculous Years: Five Papers that Changed the Face of Physics,* Princeton University Press, Princeton

[16] Tifft, W.G. 2003, *Redshift periodicities, The Galaxy-Quasar Connection*, Ap&SS, 285, 429

[17] Arp, H. 2001, *O Universo Vermelho: Desvios para o Vermelho, Cosmologia e Ciência Acadêmica*, Editora Perspectiva, São Paulo

[18] Sandage, A. 1978, *Optical redshifts for 719 bright galaxies*, AJ, 83, 904

[19] Rood, H.J. 1982, *Gravitational mechanics of systems of galaxies. I - Corrections for errors in redshifts*, ApJS 49, 111