

O efeito Hubble revisitado

Domingos Soares

Departamento de Física
Universidade Federal de Minas Gerais
Belo Horizonte, Brasil

11 de fevereiro de 2020

Resumo

O astrônomo estadunidense Edwin Hubble foi o responsável pela formulação definitiva da relação fenomenológica conhecida como “*lei de Hubble*”. O mecanismo físico responsável pelo fenômeno descrito pela lei de Hubble é denominado aqui “*efeito Hubble*”, ainda não conhecido. Discuto alguns aspectos observacionais e teóricos relacionados a este fenômeno e apresento os mecanismos físicos mais populares a ele atribuídos.

1 Introdução

O astrônomo norte-americano Edwin Powell Hubble (1889-1953) realizou, durante a sua vida científica, quatro grandes empreendimentos [1, seq. 3] e cada um deles garante a Hubble um lugar de destaque na história da ciência moderna. Eles são:

- (a) o esquema de classificação morfológica de galáxias,
- (b) a descoberta de estrelas Cefeidas em NGC 6822, e trabalho similar em M31 e M33, estabelecendo definitivamente a natureza das galáxias,
- (c) a determinação da homogeneidade da distribuição das galáxias, tomadas em média sob vários ângulos sólidos, e

(d) a relação linear velocidade-distância.

Todos os quatro — exceto talvez um (b) — foram passíveis de controvérsias na época de sua apresentação e o são ainda hoje.

Tratarei aqui da controvérsia em torno do item (d), a relação conhecida como “*lei de Hubble*”. Esta “*lei*” é contemporaneamente usada como uma das justificações empíricas do chamado “*Modelo Padrão da Cosmologia*” (MPC), também conhecido como Modelo do *Big Bang*, ou Modelo do Estrondão (cf. [2]). O MPC pressupõe um universo de idade finita, homogêneo, isotrópico e em expansão.

As descobertas de Hubble enumeradas acima foram baseadas em observações realizadas, primordialmente, no telescópio Hooker de 2,5 m de abertura do Observatório de Monte Wilson, localizado no estado americano da Califórnia. A figura 1 mostra Hubble e outros proeminentes cientistas do lado de fora do observatório.

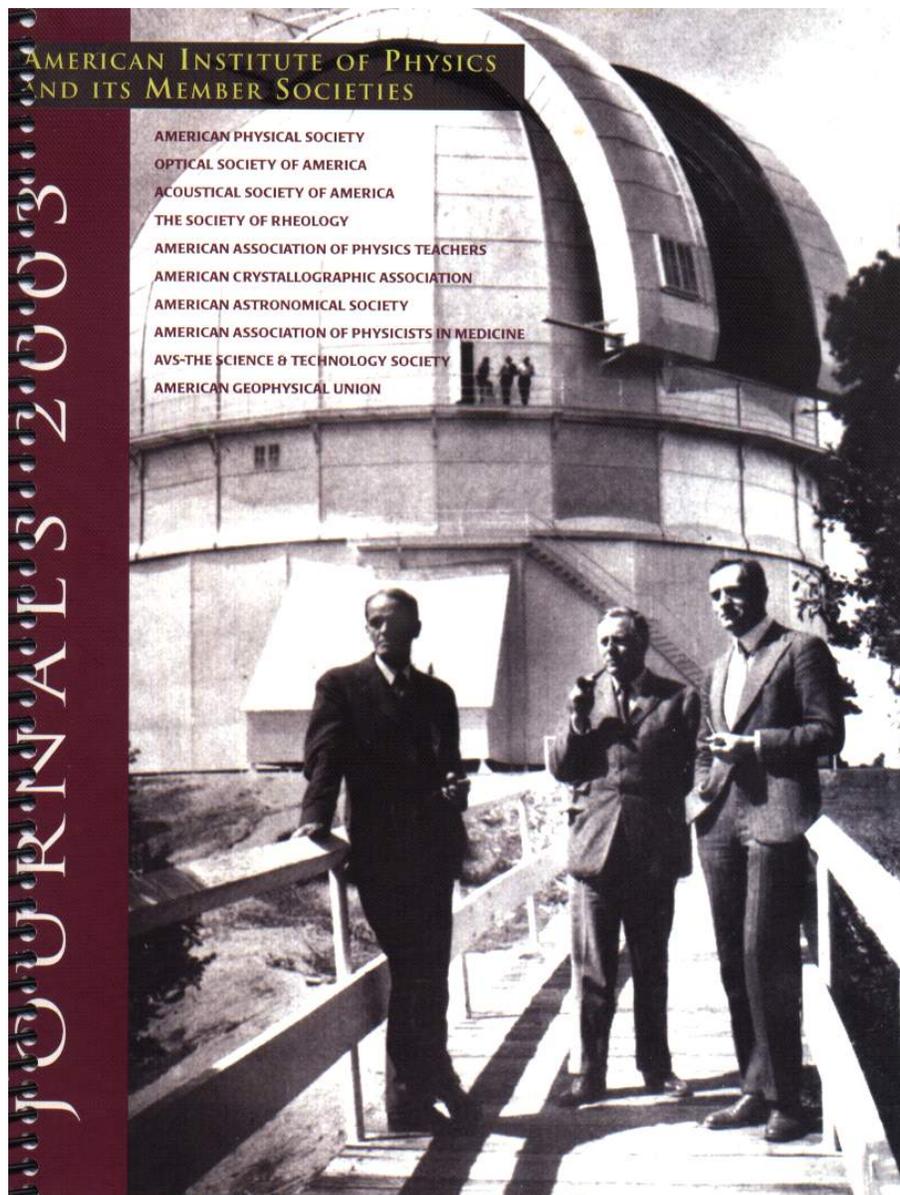


Figura 1: Da esquerda para a direita, do lado de fora do Observatório de Monte Wilson: o diretor do observatório Walter Sidney Adams (1876-1956), o físico James Hopwood Jeans (1877-1946) e Edwin Powell Hubble, no início de 1931. As principais descobertas de Hubble já haviam sido realizadas, neste observatório, na década de 1920 (Emilio Segrè Visual Archives, <https://photos.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/photos>).

O MPC é ainda um modelo provisório. A lei de Hubble é consistente com este modelo e nele é associada ao mecanismo físico da expansão do universo. Mas sendo o MPC provisório, este mecanismo pode não ser o verdadeiro. O verdadeiro mecanismo físico responsável pela lei de Hubble é denominado aqui “efeito Hubble” e não é ainda conhecido. O mecanismo proposto pelo MPC para o efeito Hubble é um dos que serão discutidos aqui.

Na seção 2 apresento o conceito de desvio espectral, básico na formulação da lei de Hubble. Na seção 3 discuto o efeito Hubble e os mecanismos físicos mais populares associados a ele. Termino com algumas considerações adicionais.

2 Desvio espectral

Quando se fala em *desvio espectral* pode-se ter em mente duas coisas diferentes: (1) $\Delta\lambda$, o deslocamento do comprimento de onda de uma linha espectral em relação ao seu valor normal medido de uma fonte no laboratório, e (2) $\Delta\lambda/\lambda$, o deslocamento *relativo* de uma linha espectral, ou seja, o valor especificado em (1) dividido pelo comprimento de onda normal da linha.

Define-se $\Delta\lambda \equiv \lambda_o - \lambda$, onde λ_o é o comprimento de onda observado para determinada linha espectral e λ é o comprimento de onda da mesma linha determinado em laboratório na Terra. Desta forma, em princípio, tanto (1) como (2) podem ser positivos ou negativos. O efeito Hubble trata de valores positivos para (2), ou seja, $\Delta\lambda/\lambda$ é um desvio para o vermelho, i.e., para comprimentos de ondas maiores do que os comprimentos de onda observados no laboratório.

O que é peculiar na radiação observada de objetos cósmicos distantes é o fato de que *toda* a radiação é sistematicamente deslocada para comprimentos de onda maiores do que os comprimentos de onda existentes na emissão da radiação. Tanto (1) quanto (2) são positivos, mas apenas z é constante. A interpretação do deslocamento para o vermelho (1) é dependente de λ , i.e., para cada valor de λ da radiação observada haverá um $\Delta\lambda$ diferente.

Em seu livro *The Realm of the Nebulae* [3, p. 121], Hubble mostra claramente que a expressão “*desvio para o vermelho*” refere-se aos valores positivos da interpretação (2) acima. Note que o termo “*nebulosa*” no texto de Hubble corresponde ao termo moderno “*galáxia*”:

As observações mostram que os detalhes nos espectros das nebulosas estão deslocados de suas posições normais em direção ao

vermelho, e que os desvios para o vermelho aumentam com a fraqueza aparente da nebulosa. A fraqueza aparente é interpretada confiavelmente em termos de distância. Portanto, o resultado observacional pode ser reformulado — os desvios para o vermelho aumentam com a distância.

As interpretações dos próprios desvios para o vermelho não inspiram uma confiança tão grande como esta. Os desvios para o vermelho podem ser expressos como frações, $d\lambda/\lambda$, onde $d\lambda$ é o deslocamento de uma linha espectral cujo comprimento de onda normal é λ . Os deslocamentos, $d\lambda$, variam sistematicamente ao longo de qualquer espectro particular, mas a variação é tal que a fração, $d\lambda/\lambda$, permanece constante. Assim $d\lambda/\lambda$ especifica o deslocamento para qualquer nebulosa, e é a fração que aumenta linearmente com as distâncias das nebulosas. Daqui para a frente, a expressão desvio para o vermelho será empregada para a fração $d\lambda/\lambda$.

Além do mais, os deslocamentos, $d\lambda$, são sempre positivos (em direção ao vermelho) e então o comprimento de onda de uma linha deslocada, $\lambda + d\lambda$, é sempre maior do que o comprimento de onda normal, λ .

Os desvios para o vermelho, $z \equiv \Delta\lambda/\lambda$, estão indicados, na figura 2, 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. As galáxias estão identificadas pelos nomes dos aglomerados em que se situam. As distâncias, na coluna do meio, são expressas em anos-luz. Todas as galáxias são as mais brilhantes dos aglomerados e são galáxias elípticas.

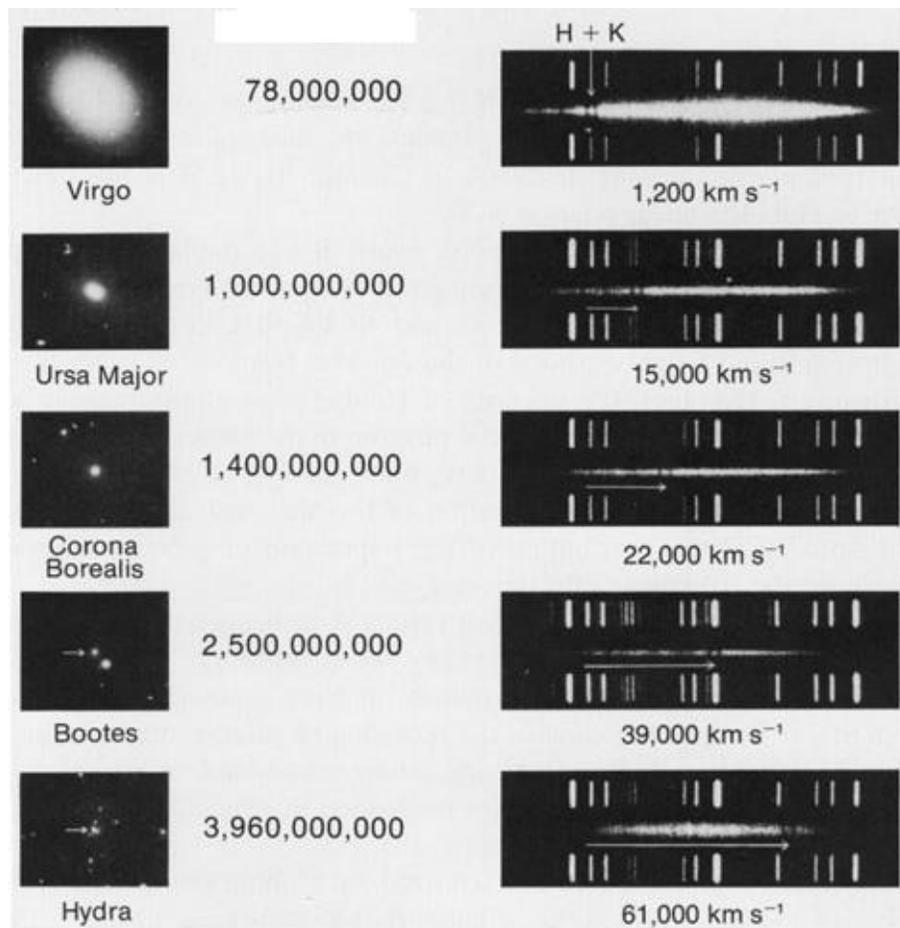


Figura 2: Fotografias, distâncias e desvios para o vermelho das galáxias mais brilhantes de aglomerados de galáxias. As setas, na parte central dos espectros, indicam os desvios das linhas H ($\lambda = 3968 \text{ \AA}$) e K ($\lambda = 3934 \text{ \AA}$), em absorção, do elemento químico cálcio no 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, mostrado acima e abaixo do espectro da galáxia (Observatório Palomar, Instituto de Tecnologia da Califórnia, Estados Unidos).

Uma montagem semelhante à figura 2, porém com outras galáxias, aparece em [3, p. 118]. As linhas de CaII parecem em absorção sobre o contínuo luminoso de cada galáxia.

À guisa de exemplos de espectros modernos de galáxias, a figura 3 mostra um espectro de absorção [4, fig. 5.15] e outro de emissão [5, fig. 5.28]. Os espectros foram obtidos em fevereiro de 1998 no telescópio Hale de 5 m de abertura do Observatório de Monte Palomar; os detalhes da redução e análise dos dados podem ser vistos nas referências correspondentes. Os espectros estão corrigidos pelos desvios para o vermelho calculados identificando-se linhas conhecidas de elementos químicos nos próprios espectros observados. No espectro de absorção de NGC 3819, uma galáxia elíptica como as observadas por Hubble e mostradas na figura 2, as linhas H e K do cálcio ionizado são aparentes (note as linhas em $\lambda = 3968 \text{ \AA}$ e $\lambda = 3934 \text{ \AA}$ no eixo horizontal do espectro de NGC 3819). Estas linhas são também muito bem identificadas no espectro da mesma galáxia apresentado na figura 5.1 da referência [5].

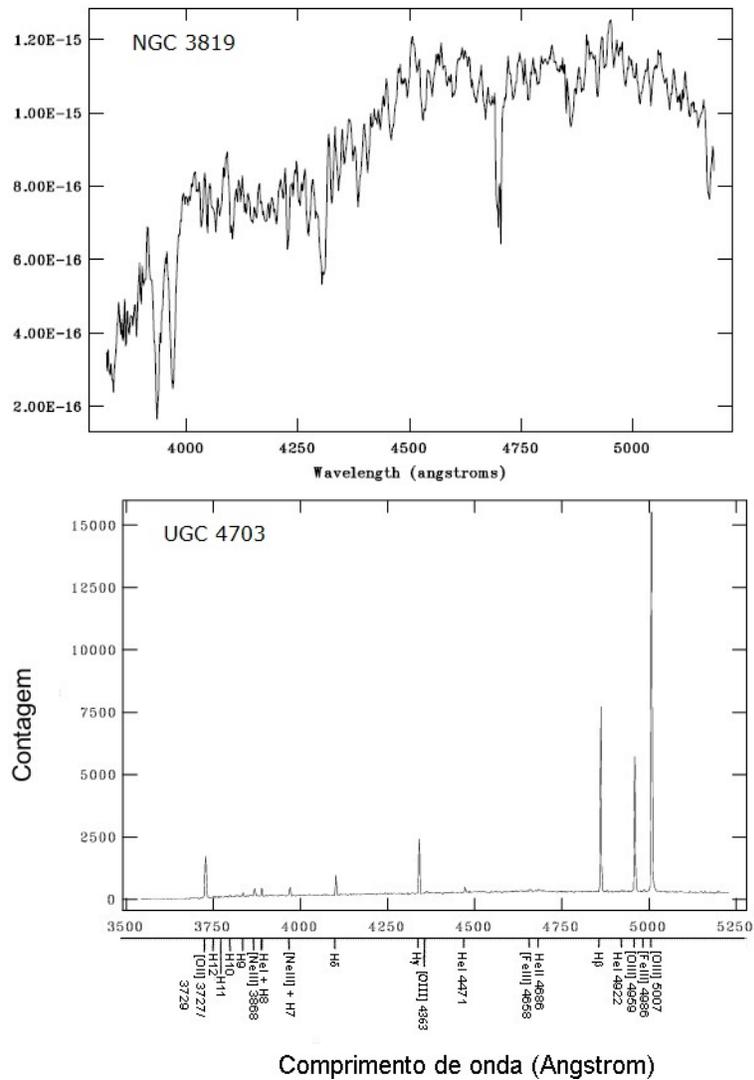


Figura 3: No alto, espectro de absorção da galáxia elíptica NGC 3819 e espectro de emissão da galáxia irregular UGC 4703. As linhas de absorção H e K do cálcio (cf. figura 2) são conspícuas no espectro da elíptica. Os espectros foram determinados e analisados por N.R. Landin (NGC 3819) [4] e D.B. de Carvalho [5].

O próprio Hubble não estava muito confiante em relação à interpretação do desvio para o vermelho como indicativo de uma velocidade de recessão, o que era implicado pela utilização da fórmula do desvio Doppler $v = cz$.

Uma discussão detalhada sobre este aspecto está feita em [6], mas o excerto de *The Realm* abaixo [3, p. 33] dá uma mostra clara da dúvida de Hubble (novamente, onde ele escreve “*nebulosa*”, leia-se “*galáxia*”):

Pequenos desvios microscópicos, tanto para o vermelho quanto para o violeta, têm sido conhecidos há muito tempo nos espectros de corpos astronômicos distintos das nebulosas. Estes deslocamentos são interpretados confiavelmente como os resultados de movimento na linha de visada — velocidades radiais de recessão (desvios para o vermelho) ou de aproximação (desvio para o violeta). A mesma interpretação é aplicada aos desvios para o vermelho dos espectros das nebulosas e tem dado origem à expressão relação “velocidade-distância” para a relação entre desvios para o vermelho e fraqueza aparente. Baseado neste pressuposto, supõe-se que as nebulosas estejam se afastando de nossa região do espaço, com velocidades que aumentam diretamente com a distância. Embora não se tenha encontrado nenhuma outra explicação plausível dos desvios para o vermelho, a interpretação como desvios de velocidade pode ser considerada como uma teoria ainda a ser testada pelas observações reais. Testes decisivos provavelmente podem ser feitos com os instrumentos existentes. As fontes de luz em recessão rápida deveriam aparecer mais fracas do que fontes estacionárias às mesmas distâncias, e dentro dos limites dos telescópios as velocidades “aparentes” são tão grandes que os efeitos deveriam ser apreciáveis.

Como se lê no final deste texto, Hubble sugere um método observacional para se testar a interpretação dos desvios para o vermelho como indicadores de velocidades de recessão. Este teste foi implementado teoricamente pelo cosmólogo americano Richard Tolman (1881-1948) na década de 1930 e é conhecido como “teste do brilho superficial de Tolman” e tem sido implementado, mas ainda sem resultados conclusivos (ver, por exemplo, [7]). Um teste alternativo e que ainda não foi realizado na prática está descrito em [8].

3 Efeito Hubble

A lei de Hubble [9, 10, 11] é popularmente expressa como:

$$v = H_0 r, \tag{1}$$

onde a constante de proporcionalidade H_0 é chamada de “*constante de Hubble*”. Esta expressão, no entanto, não é a que relaciona os dados observacionais. Como vimos acima, Hubble usava, de modo provisório, na falta de melhor qualificação do desvio para o vermelho z , a relação do efeito Doppler clássico $v = cz$ para obter a eq. 1.

De modo mais geral ainda, a expressão observacional da lei de Hubble [10] é dada por

$$m = 5 \log cz + \text{constante}, \quad (2)$$

onde m é a magnitude aparente do objeto cósmico (cf. [12, figs. 3.1 e 3.2, eq. 3.1]) e indica, por definição a distância do objeto.

Desta expressão pode-se chegar à eq. 1 através de *duas suposições*. A *primeira suposição* é a usada por Hubble, i.e., a de que o efeito Doppler é responsável pelo desvio para o vermelho z , ou seja,

$$v = cz. \quad (3)$$

A distância, em termos da magnitude aparente m , é dada, por definição, pela expressão:

$$m - M = 5 \log r - 5,$$

ou

$$m = 5 \log r + \text{constante}, \quad (4)$$

onde se faz a *segunda suposição* de que as galáxias da amostra possuem a mesma magnitude absoluta M , sendo as variações em m originadas apenas das diferentes distâncias.

A substituição das eqs. 3 e 4 na eq. 2 resulta na eq. 1, como pode ser facilmente verificado.

A eq. 2 é a mais geral para a lei de Hubble e, observacionalmente, implica em que *quanto maior a distância do objeto, tanto maior o seu desvio para o vermelho*. A questão fundamental é:

Qual é a causa do aumento de z com a distância?

A causa é o *efeito Hubble*, um mecanismo físico ainda não conhecido. Uma estratégia para descobri-lo foi apresentada de forma detalhada na referência [10].

Na presente revisitação do efeito Hubble, apresentarei três mecanismos físicos possíveis para o efeito. Nenhum deles satisfaz plenamente a prescrição apresentada em [10], mas eles satisfazem o requisito básico de que $z = \Delta\lambda/\lambda$ é constante, i.e., independente de λ . Eles aparecem aqui como meros indicadores de caminhos a seguir e estão descritos abaixo.

3.1 Efeito Doppler

A expressão $v = cz$ relaciona o desvio para o vermelho $z = \Delta\lambda/\lambda$ de uma fonte luminosa com a sua velocidade de afastamento v . Este é o chamado *efeito Doppler* e é o mecanismo mais simples para se explicar o desvio para o vermelho. Claramente z só depende de v , não importando o comprimento de onda considerado.

A motivação para esta escolha vem da aplicação do efeito Doppler com sucesso em observações de estrelas binárias, da rotação de galáxias espirais, etc. Este foi o mecanismo utilizado, provisoriamente, por Hubble na apresentação de seus resultados observacionais de $z \times \text{distância}$ em termos de velocidades.

3.2 Expansão do espaço

O Modelo Padrão da Cosmologia relativista (MPC, e.g., [13, cap. 3], [14]) relaciona o desvio para o vermelho com o *fator de escala* espacial do universo. Este é uma medida da expansão do espaço desde a singularidade inicial, quando ele é nulo. Uma onda eletromagnética com o comprimento de onda λ , quando o universo possui um fator de escala R , é detectada *hoje* com λ_o , quando o universo possui um fator de escala R_o igual a 1, por convenção. O comprimento de onda *estica-se* durante a expansão e pode ser calculado por

$$z = \frac{\lambda_o - \lambda}{\lambda} = \frac{R_o - R}{R}.$$

Fazendo-se uso da convenção $R_o = 1$, obtém-se

$$z = \frac{1 - R}{R} = \frac{1}{R} - 1,$$

e finalmente:

$$1 + z = \frac{1}{R},$$

exatamente como aparece em [13, eq. 3.11] e em [15, eq. 15.4]. O desvio para o vermelho z só depende do fator de escala do universo.

3.3 Luz cansada

O astrônomo Fritz Zwicky (1898-1974), búlgaro de nascimento, cidadão suíço e radicado nos Estados Unidos de 1925 até sua morte, foi o primeiro a propor a ideia da “luz cansada” para explicar a lei de Hubble [16]. Ele propõe

também um mecanismo físico para o fenômeno que, no entanto, não foi satisfatório, tendo atualmente apenas interesse histórico (mais detalhes em [17]).

As equações do paradigma da luz cansada são apresentadas em [17] e reproduzidas abaixo. O *cansaço* da luz é dado pela definição instrumental:

$$\frac{dE}{E} = -\frac{H_0}{c} dr \quad , \quad (5)$$

a qual nos diz que, em termos infinitesimais, a diminuição relativa da energia da radiação é proporcional à distância percorrida. Esta equação deve ser integrada para se obter a energia E_0 do fóton observado, o qual foi emitido, com energia E , pela fonte localizada em $r = 0$:

$$\int_E^{E_0} \frac{dE}{E} = -\frac{H_0}{c} \int_0^r dr$$

$$\ln \frac{E_0}{E} = -\frac{H_0}{c} r$$

Expressando a energia em termos do comprimento de onda da radiação λ e com a definição de desvio para vermelho z , chegamos à expressão matemática de $z(r)$ correspondente à descrição instrumental dada pela eq. 5:

$$E = h\nu = h\frac{c}{\lambda}$$

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\lambda_0 - \lambda}{\lambda} = \frac{\lambda_0}{\lambda} - 1$$

$$z = e^{\frac{H_0}{c}r} - 1 \quad , \quad (6)$$

a qual reduz-se a $z = \frac{H_0}{c}r$ para $H_0 r/c \ll 1$ ($r \ll 4$ Gpc), com o auxílio da expansão em série da função exponencial $e^x = 1 + x/1! + x^2/2! + \dots$, tomando-se apenas os dois primeiros termos. Tudo parece perfeito, a não ser que, obviamente, falta apresentar o mecanismo físico responsável pelo “cansaço” definido pela eq. 5.

Note que o fundamental aqui é ter-se chegado a um resultado consistente com as observações i.e., *o desvio para vermelho aumenta com a distância*. Esta é a principal razão da escolha da definição instrumental dada pela eq. 5.

4 Considerações adicionais

Já apresentei em outros locais as razões pelas quais o MPC não possui comprovação observacional definitiva [14, seç. 2] [18, seç. 4]. Assim, a explicação dada pelo MPC para a existência do desvio para o vermelho cosmológico, a saber, a *expansão espacial*, também não é definitiva. Da mesma forma, o mecanismo físico do *efeito Doppler* também não possui suporte em nenhum modelo cosmológico viável e consistente. O *paradigma da luz cansada* representa uma ideia geral bastante promissora, mas no momento não existe qualquer mecanismo físico a ele associado que seja satisfatório.

Então, a pergunta apresentada na seção anterior “*O que causa o desvio espectral para o vermelho observado na luz de objetos cósmicos distantes?*” é, portanto, fundamental. A correta resposta a esta questão representa um passo gigantesco no caminho para a descoberta de uma teoria cosmológica apropriada.

É curioso notar que duas das possibilidades para explicar o desvio para o vermelho (expansão espacial e luz cansada) podem se constituir na verdade em uma só. Conforme afirmado em [17], no final das contas, a expansão do espaço pode até mesmo ser considerada como um dos processos físicos aceitáveis para a explicação da “fadiga” da luz ao viajar da fonte para o observador na Terra [15, p. 315].

Há dois aspectos sobre o desvio espectral cosmológico z que ainda precisam ser investigados, que são as seguintes.

- (i) A possibilidade de $z = \Delta\lambda/\lambda$ ser uma função de λ ; já apresentei esta questão na seção 3 da referência [10].
- (ii) A possibilidade de $z = \Delta\lambda/\lambda$ ser quantizado; ver também a seção 3 de [10] e as referências relevantes lá citadas.

Mas as questões cosmológicas fundamentais aqui são: *Por que $\Delta\lambda$ é deslocado para o vermelho?* e *Por que $\Delta\lambda/\lambda$ é constante?* A resposta, para ambas as questões, está no *efeito Hubble*, como definido na seção 1. O grande problema é que não sabemos o que é o efeito Hubble. A sua elucidação representará um avanço significativo na compreensão da estrutura em grande escala do universo.

Referências

- [1] Soares, D. 1999, *O prêmio Nobel de Hubble*,
<http://lilith.fisica.ufmg.br/dsoares/hubble/hubble-p.pdf>
- [2] Soares, D. 2002, *A tradução de Big Bang*,
<http://lilith.fisica.ufmg.br/dsoares/aap/bgbg.htm>
- [3] Hubble, E. 1936, *The Realm of the Nebulae*, Dover, New York (edição de 1958)
- [4] Landin, N.R. 2002, *Espectroscopia da galáxia NGC 3819 e companheiras*,
<https://www.fisica.ufmg.br/posgraduacao/defesas/mestrado-2002-natalia-landin/>
- [5] Carvalho, D.B. 2006, *Espectroscopia de galáxias em sistemas múltiplos*,
<https://www.fisica.ufmg.br/posgraduacao/defesas/mestrado-2006-david-carvalho/>
- [6] 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://lilith.fisica.ufmg.br/dsoares/ensino/Hubble-pt.pdf>)
- [7] Soares, D. 2006, *Sandage versus Hubble on the reality of the expanding universe*, <https://arxiv.org/abs/physics/0605098>,
<http://lilith.fisica.ufmg.br/dsoares/svsh/svsh.htm>
- [8] Soares, D. 2018, *O teste do desvio para o vermelho para a expansão do universo*, <http://lilith.fisica.ufmg.br/dsoares/cosmolg/dzdt/dzdt.htm>
- [9] Soares, D. 2014, *UGE, Universo da Gominha Esticada*, Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 36, n. 4, 4301
- [10] Soares, D. 2009, *O efeito Hubble*,
<http://lilith.fisica.ufmg.br/dsoares/ensino/efhub.pdf>
- [11] Soares, D. e Vaz, L.P.R. 2013, *Correção do movimento solar na astrofísica extragaláctica primitiva*,
<https://www.researchgate.net/publication/335276626>

- [12] 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
- [13] de Souza, R.E. 2004, *Introdução à Cosmologia*, EDUSP, São Paulo, SP
- [14] Soares, D. 2016, *Universo do Estrondão Quente*,
<http://lilith.fisica.ufmg.br/dsoares/extn/ueq/ueq.htm>
- [15] Harrison, E. 2000, *Cosmology, the Science of the Universe*, Cambridge University Press, Cambridge
- [16] Zwicky, F. 1929, *On the redshift of spectral lines through interstellar space*, Proceedings of the National Academy of Sciences, 15, 773
- [17] Soares, D.S.L. 2014, *O paradigma da luz cansada revisitado*,
<http://lilith.fisica.ufmg.br/dsoares/ensino/luzcans/luzcans.htm>
- [18] Soares, D. 2009, *Uma pedra no caminho da Teoria da Relatividade Geral*,
<http://lilith.fisica.ufmg.br/dsoares/ensino/trg-pdr.pdf>