

O paradigma da luz cansada revisitado

Domingos Soares

Universidade Federal de Minas Gerais

Resumo

Discuto alguns aspectos do chamado “paradigma da luz cansada”, o qual representa uma das possíveis explicações para a dependência do desvio espectral para o vermelho de uma fonte cósmica distante com a sua distância até o observador. A mais popular representação fenomenológica do paradigma é apresentada em algum detalhe. Além disso, sendo o processo físico responsável pelo hipotético fenômeno ainda desconhecido, apresento também uma sugestão para a sua descoberta.

Abstract

I discuss some features of the so-called “tired-light paradigm”, which constitutes one of the possible explanations for the dependence of the spectral redshift of a distant cosmic source with its distance to the observer. The most popular phenomenological representation of the paradigm is presented in some detail. Furthermore, since the physical process responsible for the hypothetical phenomenon is still unknown, I suggest also guidelines for its discovery.

Palavras-chave: cosmologia, desvio para o vermelho, luz cansada.

Keywords: cosmology, redshift, tired light.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v2n1.32086](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v2n1.32086)

1 Introdução

Em 1929, no volume 15 dos Anais da Academia Nacional de Ciências dos Estados Unidos, foram publicados dois artigos cujos resultados reverberaram até aos dias de hoje.

No primeiro, na página 168, Edwin Hubble (1889-1953) apresenta a relação que ficou conhecida como a “lei de Hubble”, i.e, a relação linear entre velocidades e distâncias de galáxias distantes [1]. Este trabalho é uma fonte profícua de discussões (e.g., [2]).

Na página 773, aparece o segundo, um artigo do astrônomo Fritz Zwicky (1898-1974). Búlgaro de nascimento, cidadão suíço e radicado nos Estados Unidos de 1925 até sua morte, Zwicky era conhecido por ser uma personalidade forte e controversa. E no trabalho em questão, já no início, ele cita o artigo de Hubble e apresenta uma alternativa às ideias de expansão do universo que já se levantavam como explicação para a lei de Hubble. Ele inventa a hipótese que ficou conhecida como o “paradigma da luz cansada”.

Em seu artigo, Hubble obtém, na realidade,

uma relação entre desvios para o vermelho z e distâncias. Provisoriamente, Hubble converte os desvios para o vermelho em velocidades utilizando a expressão matemática do efeito Doppler $v = cz$, onde c é a velocidade da luz no vácuo. Zwicky, apropriadamente, raciocina em termos de desvios para o vermelho e não velocidades. Ele propõe a hipótese de que a luz ao “viajar” da fonte distante (uma galáxia, por exemplo) progressivamente perde energia. Ou seja, a luz se “cansa”. A luz é caracterizada por uma frequência ν e por um comprimento de onda $\lambda = c/\nu$. O seu quantum de energia, o fóton, possui energia $E = h\nu$, sendo h a constante de Planck. Se a energia diminui pela fadiga da viagem, isto significa uma diminuição em ν e, conseqüentemente, um aumento em seu comprimento de onda λ pois λ é inversamente proporcional a ν . Portanto, quanto maior a distância da fonte maior será o aumento de λ , em outras palavras, maior o desvio para o vermelho. Lembremos que, no espectro visível, que vai do violeta ao vermelho, o violeta possui o menor comprimento de onda e o vermelho o maior. Daí a nomenclatura “desvio para o vermelho” para se

referir a um aumento de comprimento de onda, seja na faixa do visível ou não.

Zwicky vai além de propor a hipótese — o paradigma — e propõe também um mecanismo físico para a fadiga da luz em sua viagem. O mecanismo que ele sugere é, em suas palavras, “*uma espécie de análogo gravitacional do efeito Compton*” (“*a sort of gravitational analogue of the Compton effect*”), [3, p.773]. Ele supõe que o fóton perde energia devido ao arrasto gravitacional (atrito dinâmico) durante sua viagem da fonte ao observador, arrasto este causado pela matéria existente ao longo da trajetória. O mecanismo de Zwicky possui atualmente apenas interesse histórico.

Um detalhe fundamental na busca para o mecanismo físico do paradigma é a necessidade de que o mecanismo proposto não cause o espalhamento da luz. Em geral, o espalhamento da luz é seletivo, i.e., dependente do comprimento de onda e neste caso as imagens de fontes extensas distantes seriam “borradas”, como se estivessem fora de foco, o que não é observado (e.g., [4, p.312]).

O importante na contribuição de Zwicky é a ideia por trás do paradigma. A luz perde energia (por um processo físico ainda desconhecido) durante a sua trajetória desde a fonte distante até o observador. O desvio para o vermelho será portanto tanto maior quanto maior for a distância até a fonte de luz e assim esta possibilidade seria uma alternativa para se explicar a lei de Hubble. Conseqüentemente, o modelo de um universo em expansão poderia ser dispensado, o que seria conveniente, já que este modelo encontra-se em sérias dificuldades para se estabelecer (ver, por exemplo, [5]).

Apresento, na próxima seção, uma expressão matemática bastante popular para o paradigma da luz cansada. Deve-se ressaltar que discutirei apenas a expressão matemática e não o possível mecanismo responsável por ela. Na seção 3, discuto o roteiro proposto por Soares [1] para a descoberta deste mecanismo. Na última seção faço algumas considerações adicionais.

2 Uma descrição instrumental da luz cansada

Antes de discutir a luz cansada, apresentarei duas descrições alternativas para a dependência do desvio para o vermelho z com a distância r , as quais servirão para demarcar o posicionamento

da luz cansada no espaço dos parâmetros relevantes z e r .

A primeira delas é a relação observacional conhecida como lei de Hubble. A figura 1 de [6] mostra a relação linear velocidade–distância para as *nebulosas extragalácticas* (hoje denominadas *galáxias*). Esta relação é expressa matematicamente como $v = H_0 r$, onde v é a velocidade associada à galáxia (por meio de $v = cz$), r é a sua distância e H_0 é a chamada constante de Hubble. Na verdade, o que Hubble mede é o desvio para o vermelho z . A transformação $v = cz$ supõe implicitamente a adoção do efeito Doppler para explicar a origem dos desvios para o vermelho. Hubble tem plena consciência disto, como ele afirma, dois anos depois, em outro local [7, p.73]:

The quantities actually observed in the present investigation are redshifts and apparent magnitudes. (...) The fact that **the redshifts are expressed on a scale of velocities is incidental**; for the present purpose they might as well be expressed as $d\lambda/\lambda$.

(O negrito é meu; note que $d\lambda/\lambda$ é a própria definição do desvio para o vermelho z . Incidentalmente, o artigo de Hubble e Humason de 1931 possui o título *The Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae*, enquanto que o artigo de Hubble de 1929 [6] intitula-se *A Relation between Distance and Radial Velocity among Extra-Galactic Nebulae*, ou seja, ambos tratam do mesmo problema; o artigo com Humason constitui-se numa versão mais detalhada além de conter novas observações, estendendo a faixa de distâncias.)

A relação $v = H_0 r$ mais a “interpretação incidental” $v = cz$ (cf. [7] citado acima) leva à seguinte expressão para a função $z(r)$:

$$z = \frac{H_0}{c} r \quad . \quad (1)$$

A segunda é uma relação teórica originada de uma das soluções da Teoria da Relatividade Geral, a saber, as soluções de Friedmann [8, seq. 4.2]. O Modelo Padrão da Cosmologia (MPC) é baseado nestas soluções (ver detalhes em [9]). Existem três modelos clássicos de Friedmann, dependendo da densidade de matéria do modelo de universo. Se a densidade do universo for igual à densidade crítica de Friedmann temos o modelo crítico, o qual possui geometria espacial euclidiana. Este modelo é, dos três, aquele que possui a descrição matemática mais simples (ver, por

exemplo, a Eq. (2) de [9]). A função $z(r)$ para o modelo de Friedmann crítico é dada por ([10, Eq. (3.16)], [11, Eq. (A8)]),

$$z = \left(1 - \frac{H_0 r}{2c}\right)^{-2} - 1, \quad (2)$$

onde r é a distância comóvel até a fonte. Esta expressão reduz-se à Eq. (1) para $H_0 r/2c \ll 1$ ($r \ll 8$ Gpc, para $H_0 = 72$ km/s Mpc⁻¹, cf. [12]), com o auxílio da expansão em série de potências do binômio de Newton $(1+x)^n = 1 + nx/1! + n(n-1)x^2/2! + \dots$, tomando-se apenas os dois primeiros termos.

Para obtenção da função $z(r)$ para a luz cansada, frente ao desconhecimento de seu mecanismo físico, podemos utilizar uma definição instrumental do paradigma. A mais popular é (item 6, Apêndice A de [11], [13, Eq. (2)] com $dt = dr/c$),

$$\frac{dE}{E} = -\frac{H_0}{c} dr, \quad (3)$$

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 $r = 0$,

$$\int_E^{E_0} \frac{dE}{E} = -\frac{H_0}{c} \int_0^r dr, \quad (4)$$

$$\ln \frac{E_0}{E} = -\frac{H_0}{c} r. \quad (5)$$

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. (3),

$$E = h\nu = h\frac{c}{\lambda}, \quad (6)$$

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\lambda_0 - \lambda}{\lambda} = \frac{\lambda_0}{\lambda} - 1, \quad (7)$$

$$z = e^{\frac{H_0}{c} r} - 1, \quad (8)$$

a qual, novamente, reduz-se à Eq. (1) 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. A Eq. (8) é a mesma Eq. (A24) de [11].

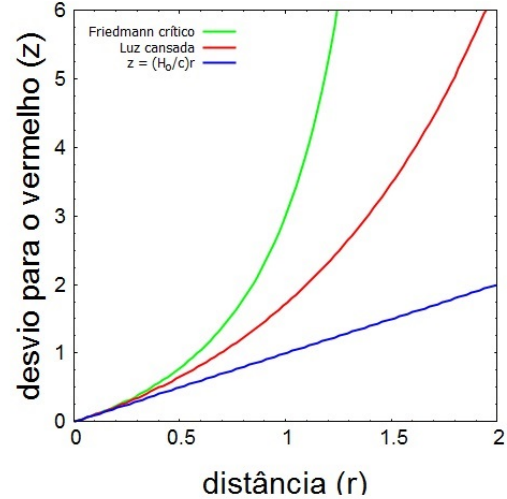


Figura 1: A função $z(r)$ para os modelos representados pelas Eqs. (1), (2) e (8). O modelo “Friedmann crítico” (ou plano; ver [9]) é também conhecido como modelo de “Einstein-de Sitter”. Todos convergem para uma função linear para $r \ll 1$. A escala do eixo das abscissas r está em unidades de $c/H_0 = 4,2$ Gpc.

A Figura 1 mostra as três funções $z(r)$ dadas pelas Eqs. (1), (2) e (8). Os eixos coordenados estão em escalas arbitrárias. Vale a pena ressaltar que o modelo de luz cansada situa-se exatamente entre a lei de Hubble e o modelo de expansão do espaço. Resta agora uma importante questão. Qual é o mecanismo ou processo físico responsável pela luz cansada? Encontrar tal mecanismo significa também encontrar o mecanismo físico responsável pela lei de Hubble [Eq. (1)]. Por este motivo Soares [1] denominou este mecanismo de *efeito Hubble* e apresentou um programa heurístico para a sua descoberta, como descrito na próxima seção.

3 Um mecanismo físico para a luz cansada

As observações de Hubble são consistentes com a idéia da expansão do universo, mas não são necessariamente uma prova dela. O próprio Hubble estava ciente disto [2] 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?

Buscaremos, por conseguinte, um mecanismo físico — o *efeito Hubble* — válido para o paradigma da luz cansada. De modo geral, como vimos acima, 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 [14, 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 itens (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 [14, 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. [14, 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. (9.2) da Ref. [1];
- (b) o desvio para o vermelho não depende — ou depende muito pouco — do comprimento de onda da radiação;
- (c) o efeito é quantizado ([15], [16] 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. [4, 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., [17] e [18], 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. O mecanismo físico que satisfizer estas imposições observacionais poderá ou não ser compatível com a descrição instrumental representada pela Eq. (3) já que ela é apenas uma hipótese de trabalho.

4 Considerações finais

A ideia da luz cansada surgiu para servir de alternativa à explicação dos desvios para o vermelho como sendo originários da expansão do espaço — que, a propósito, é matematicamente indistinguível do efeito Doppler para pequenos desvios para o vermelho [19]. Mas 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. O cosmólogo britânico Edward Harrison (1919-2007) [4, p. 315] cita, neste contexto, a afirmação do astrofísico francês Evry Schatzman (1920-2010), “*Para qualquer um que não aceita a expansão do universo, o desvio para o vermelho das linhas espectrais permanece como um fenômeno físico importante mas completamente inexplicável.*”, e comenta:

Notemos que os desvios para o vermelho da luz cansada e os desvios para o vermelho da expansão têm muito em comum. Diferentemente do efeito Doppler, ambos consistem de um paulatino deslocamento em direção à extremidade vermelha do espectro à medida que a luz atravessa vastas regiões do espaço. Pode-se mesmo com justiça chamar o desvio para o vermelho da expansão uma teoria de luz cansada. Os raios de luz são progressivamente roubados de energia e

tornam-se fatigados pela expansão do universo. Ironicamente todas as dificuldades da teoria da luz cansada são afastadas pela mudança de seu nome e pela atribuição da fadiga à expansão: temos fadiga mas não espalhamento; (...)

Formalmente, nada impede, por exemplo, que o modelo de Friedmann crítico [Eq. (2)] seja adotado como o mecanismo físico para a luz cansada. E se este for o caso, como mencionado no final da seção anterior, ele não precisa obedecer exatamente à descrição instrumental expressa pela Eq. (3). E é exatamente o que ocorreria, como ilustra a figura 1. De qualquer forma, este não é o processo físico procurado, porque o que se pretende é uma alternativa aos modelos de expansão, devido à inadequação dos mesmos (cf. [5]).

Agradecimentos

Agradeço ao Prof. André K.T. Assis pela importante lembrança da possibilidade de que o desvio para o vermelho possa ter alguma dependência com λ . Agradeço ao parecerista anônimo, cujos comentários contribuíram para maior clareza na apresentação deste trabalho.

Sobre o autor

Domingos Soares (dsoares@fisica.ufmg.br) possui graduação em Física (Departamento de Física, Universidade Federal de Minas Gerais, 1976), mestrado em Astrofísica (UFMG, 1982) e doutorado em Astrofísica (Instituto Astronômico Kapteyn, Universidade de Groningen, Holanda, 1989). Realizou estágio de pós-doutoramento no Departamento de Astronomia, Universidade Cornell, Ithaca, NY, Estados Unidos (1997). É professor e astrofísico aposentado (Departamento de Física, UFMG). Tem experiência em astrofísica extragaláctica, galáxias binárias, grupos de galáxias e aspectos históricos e conceituais da cosmologia. Seus trabalhos recentes e passados estão listados em www.fisica.ufmg.br/dsoares.

Referências

- [1] D. Soares, *O efeito Hubble*, in *Tópicos em cosmologia relativista*, disponível em www.researchgate.net/publication/338842995 (acesso em dez. 2020).
- [2] A.K.T. Assis, M.C.D. Neves e D.S.L. Soares, *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*, editado por M.C.D. Neves e J.A.P. Silva (Editora Massoni e LCV Edições, Maringá, 2008), 199.
- [3] F. Zwicky, *On the red shift of spectral lines through interstellar space*, Proceedings of the National Academy of Sciences **15**(10), 773 (1929).
- [4] E. Harrison, *Cosmology – The science of the Universe* (Cambridge University Press, Cambridge, 2000).
- [5] D. Soares, *Uma pedra no caminho da teoria da relatividade geral*, in *Tópicos em cosmologia relativista*, disponível em www.researchgate.net/publication/338842995 (acesso em dez. 2020).
- [6] E.P. Hubble, *A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae*, Proceedings of the National Academy of Sciences **15**(3), 168 (1929).
- [7] E.P. Hubble e M.L. Humason, *The velocity-distance relation among extra-galactic nebulae*, Astrophys. J. **74**, 43 (1931).
- [8] D. Soares, *Os fundamentos físico-matemáticos da cosmologia relativista*, Rev. Bras. Ens. Fís. **35**, n. 3, 3302 (2013).
- [9] A. Viglioni e D. Soares, *Observações sobre as soluções clássicas da equação de Friedmann*, Rev. Bras. Ens. Fís. **33**, n. 4, 4702 (2011).
- [10] R. E. de Souza, *Introdução à Cosmologia* (EDUSP, São Paulo, 2004).
- [11] M. López-Corredoira, *Alcock-Paczynski cosmological test*, Astrophys. J. **781**(2), 96 (2014).
- [12] D. Soares, *A idade do universo, a constante de Hubble e a expansão acelerada*, in *Tópicos em cosmologia relativista*, disponível em www.researchgate.net/publication/338842995 (acesso em dez. 2020).
- [13] A.K.T. Assis e M.C.D. Neves, *O desvio para o vermelho revisitado*, in *Ciência, filosofia e política: uma homenagem a Fernando Bunchaft*, editado por O. Freire Jr. e S. Carneiro (EDUFBA, Salvador, 2013).

- [14] J. Stachel (org.) *Einstein's miraculous years: five papers that changed the face of physics* (Princeton University Press, Princeton, 1998).
- [15] W. G. Tifft, *Redshift periodicities, the galaxy-quasar connection*, *Astrophysics and Space Science* **285**, 429 (2003).
- [16] H. Arp, *O Universo vermelho: desvios para o vermelho, cosmologia e ciência acadêmica* (Editora Perspectiva, São Paulo, 2001).
- [17] A. Sandage, *Optical redshifts for 719 bright galaxies*, *Astronomical Journal* **83**, 904 (1978).
- [18] H. J. Rood, *Gravitational mechanics of systems of galaxies. I - Corrections for errors in redshifts*, *Astrophysical Journal Suppl. Ser.* **49**, 111 (1982).
- [19] D. Soares, *Universo relativista: expansão no espaço ou do espaço?*, in *Tópicos em cosmologia relativista*, disponível em www.researchgate.net/publication/338842995 (acesso em dez. 2020).