O teste do desvio para o vermelho para a expansão do universo

Domingos Soares

22 de janeiro de 2018

Resumo

O teste do desvio para o vermelho é uma das maneiras de se investigar a realidade da expansão do universo. Apresento alguns detalhes do teste tendo por base a discussão feita por Allan Sandage em um artigo de 1962. O teste, irrealizável àquela época, torna-se possível com a tecnologia astronômica atual.

1 Introdução

A **lei de Hubble** ou, como prefiro, o **efeito Hubble** (cf. [1]) continua sendo matéria de discussão e de investigação. O artigo dos astrônomos e cosmólogos Georges Paturel (França), Pekka Teerikorpi (Finlândia) e Yurij Baryshev (Rússia) intitulado ***Hubble law: measure and interpretation*** mostra exatamente isto (o texto está disponível na ref. [2]). Comentarei apenas um aspecto que aparece no artigo e que trata da variação do desvio para o vermelho z de determinado objeto cósmico com o tempo t, matematicamente representado pela derivada dz/dt. A observação de dz/dt é um dos testes diretos do paradigma do universo em expansão espacial.

O astrônomo americano Allan Sandage (1926-2010), um dos "pais" da cosmologia relativista moderna, foi o primeiro, em 1962, a propor e a fazer estimativas numéricas de dz/dt em universos desacelerados. O universo de expansão acelerada de Fred Hoyle (1915-2001) e colaboradores (Teoria do Estado Estacionário, daqui para frente TEE) é também considerado na sua análise, mas com uma ressalva pois, segundo Sandage, a expansão acelerada requer uma força repulsiva e ***"no physical theory for the origin of this***

repulsive force is given" (pág. 324 de [3]), o que é irônico se considerarmos as "estrepolias" que são feitas atualmente para se criar a expansão acelerada que caracteriza o Modelo Padrão da Cosmologia.

O cálculo teórico de dz/dt, no contexto das equações dinâmicas do universo relativista em expansão, foi feito pelo matemático e cosmólogo britânico George McVittie (1904-1988) em um apêndice [4] que segue o artigo de Sandage. A expressão obtida por McVittie é

$$\frac{dz}{dt} = (1 + z)H_o - H(z), \tag{1}$$

onde $H(z)$ é o parâmetro de Hubble no desvio para o vermelho z e $H_o = H(z = 0)$ (veja dedução alternativa da equação de McVittie em ***Cosmic dynamics in the era of Extremely Large Telescopes*** por J. Liske et al. [5, p. 1194]). O valor absoluto de dz/dt será próximo de zero para fontes com pequenos desvios para o vermelho pois $(1 + z)H_o \cong H(z \cong 0)$. Isto implica em que as fontes ideais para o teste devem ter grandes desvios para o vermelho e terão pequena luminosidade pois estarão a grandes distâncias (efeito Hubble). Uma consequência importante é que as observações para a realização do teste exigirão um enorme tempo de observação, como veremos na seção 2.

Na prática Sandage calcula cdz/dt, onde c é a velocidade da luz no vácuo. Sandage utiliza a unidade **(cm/s)/ano** para cdz/dt. Ele faz estimativas do valor médio $c\Delta z/\Delta t$ e usa a fórmula de McVittie para obter o valor instantâneo cdz/dt. As estimativas de Sandage para cdz/dt, em valores absolutos, são da ordem de **1 (cm/s)/ano**, o que o levou a considerar que em 1962, com a tecnologia observacional da época (mesmo com o telescópio de 5 m de Monte Palomar), dever-se-ia esperar pelo menos 10 milhões de anos para se ter uma quantidade mensurável para z (cerca de 10.000.000 cm/s = 100 km/s). Acontece que muita coisa mudou nestes últimos 50-60 anos, especialmente no que se refere aos telescópios e aos espectrógrafos utilizados para a determinação de z. Além do mais, com o advento dos telescópios de muito grande abertura (os ELTs, *"Extremely Large Telescopes"*), torna-se possível a realização do teste.

2 O teste do desvio para o vermelho

Uma fonte de luz distante (uma galáxia, um aglomerado de galáxias, um quasar, etc.) emite radiação de comprimento de onda λ no instante cósmico

t, a qual é observada no instante cósmico presente $t_o > t$ com comprimento de onda λ_o sempre maior do que λ em um universo em expansão. Dizemos que a luz sofreu um "desvio para o vermelho" $z = (\lambda_o - \lambda)/\lambda$ (o vermelho possui o maior comprimento de onda no espectro visível, o que inspirou a nomenclatura).

A expansão do universo é parametrizada por uma grandeza adimensional chamada *fator de escala cósmico* ou simplesmente *fator de escala* $R(t)$. O fator de escala fornece a razão entre a escala espacial do universo em um instante t qualquer e a escala espacial em um instante t_o de referência, usualmente o instante presente. Os modelos cosmológicos são especificados pelas expressões matemáticas da função $R(t)$. O desvio para o vermelho z de uma radiação emitida em t e detectada agora é obtido de:

$$1 + z = \frac{R_o}{R} = \frac{1}{R}, \tag{2}$$

onde $R_o = R(t = t_o) \equiv 1$. Tudo se passa como se a onda fosse "esticada" pela expansão espacial durante a sua viagem desde a emissão no passado até agora quando atinge o nosso telescópio. A eq. 2 é obtida a partir das equações de Friedmann para a cosmologia relativista (ver Sandage 1962, pág. 320, eqs. 3 e 5). A ideia do teste vem do fato de que se aguardarmos um certo intervalo de tempo Δt, observaremos uma variação Δz na luz emitida por determinada fonte distante pois o fator de escala R varia com o tempo (cf. eq. 2). Para os modelos clássicos com expansão desacelerada dz/dt será negativo e para modelos com expansão acelerada dz/dt será positivo e para um modelo sem aceleração ou desaceleração $dz/dt = 0$.

A figura 1 ilustra três modelos de expansão espacial, a saber, o modelo de Friedmann crítico, que possui expansão desacelerada, o modelo de expansão uniforme e o modelo de expansão acelerada da TEE. A concavidade da curva, dada matematicamente por $d/dt(dR/dt)$, é positiva para o TEE (expansão acelerada), nula para a expansão uniforme e negativa (concavidade "para baixo") para o modelo desacelerado de Friedmann. Como veremos a seguir, estes são os mesmos sinais algébricos de dz/dt.

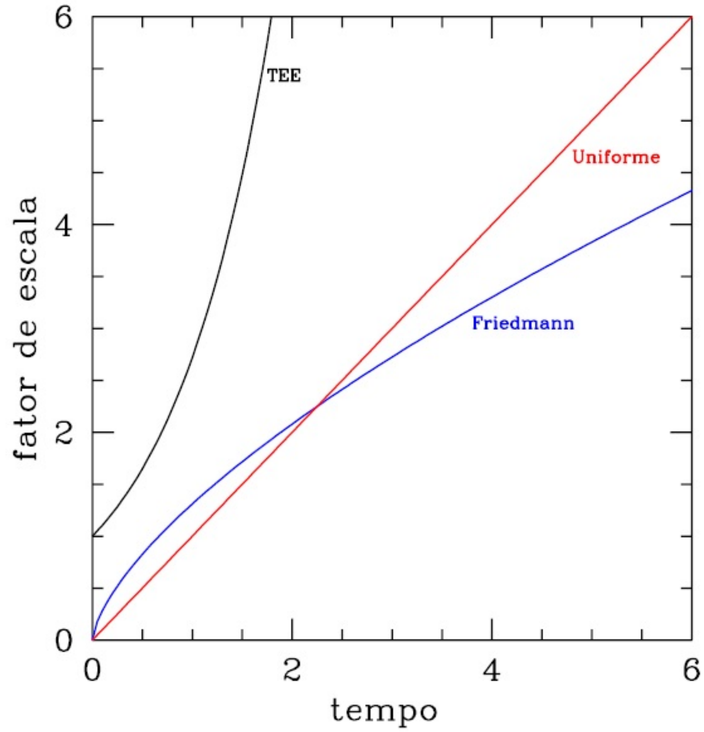

Figura 1: Três modelos hipotéticos do universo com expansão. Note a concavidade de cada curva pois ela indica se o modelo é acelerado (TEE, concavidade para cima), sem aceleração (Uniforme, sem concavidade) e desacelerado (Friedmann, concavidade para baixo).

Utilizarei a equação de McVittie (eq. 1) para calcular os valores de dz/dt dos modelos hipotéticos do universo mostrados na figura 1.

1) O modelo concebido pela TEE, que possui expansão acelerada, com o fator de escala espacial dado por $R(t) = \mathrm{e}^{H(t-t_o)}$, onde H e t_o são constantes, sendo $H = (dR/dt)/R$ a constante de Hubble. O fator $(1+z)$ que aparece na equação de McVittie (eq. 1) vale $1/R(t)$ conforme a eq. 2. Então, $dz/dt = H/R(t) - H$, onde coloquei $H_o = H(z) = H$. Mas $1/R = \mathrm{e}^{-H(t-t_o)}$, o que resulta $dz/dt = H(\mathrm{e}^{-H(t-t_o)} - 1)$, que é sempre maior do que zero, pois $\mathrm{e}^{-H(t-t_o)} = \mathrm{e}^{H(t_o-t)}$ é sempre maior do que 1, já que $t < t_o$.

2) O modelo de expansão uniforme, cujo fator de escala é dado por $R(t) =$

$H_o t$ e o parâmetro de Hubble (a "constante" de Hubble neste caso não é constante) $H(t) = (dR/dt)/R = 1/t$ (ver também `COSMOS:03mar14` [6]). A equação de McVittie fornece $dz/dt = H_o/R(t) - H(t) = 1/t - 1/t = 0$. Aqui vemos, portanto, um modelo com expansão mas com $dz/dt = 0$.

3) O modelo de Friedmann crítico, que é o mais simples dos modelos desacelerados. Nele $R(t) = (t/t_o)^{2/3}$ e $H(t) = (dR/dt)/R = 2/(3t)$. A equação de McVittie implica agora em $dz/dt = H_o/R(t) - H(t) = 2/(3t_o)(t_o/t)^{2/3} - 2/(3t) = 2/(3t_o)[(t_o/t)^{2/3} - t_o/t] < 0$, para $t < t_o$.

Vemos nos exemplos acima que o sinal de dz/dt nos informa sobre o tipo de expansão, e que $dz/dt = 0$ não implica necessariamente ausência de expansão, mas a possibilidade de uma expansão uniforme. é importante salientar, nesta altura, que o resultado de qualquer teste de expansão do universo deve ser confrontado — e compatível — com outras restrições observacionais.

Sandage mostra em seu artigo de 1962 o cálculo de dz/dt para os três modelos de Friedmann (fechado, crítico e aberto) e para o modelo de expansão acelerada da TEE. Apresentarei a seguir, como exemplificação do método, o cálculo do valor de dz/dt para o modelo de Friedmann crítico que Sandage denomina "modelo euclidiano" — as coordenadas espaciais do modelo de Friedmann crítico formam um espaço plano ou euclidiano. A propósito, Sandage denomina o modelo de Friedmann fechado "modelo oscilatório" e o aberto "modelo hiperbólico".

Primeiramente Sandage faz o cálculo do valor médio $\Delta z/\Delta t$ para uma galáxia qualquer G que possui desvio para o vermelho z=0,4, quando observada no presente (em $t = t_o$). Ele supõe uma nova observação da mesma galáxia G no futuro em $t_F = 2t_o$. Com o auxílio das equações de Friedmann ele obtém o novo desvio para o vermelho $z = 0,2999$. Obtém também o instante de emissão de luz pela galáxia G observada no presente ($t_1 = t_o/1,6565$) e o instante de emissão de luz quando a galáxia é observada no futuro ($t_x = t_F/1,3495$). Tudo isto está ilustrado na figura 2.

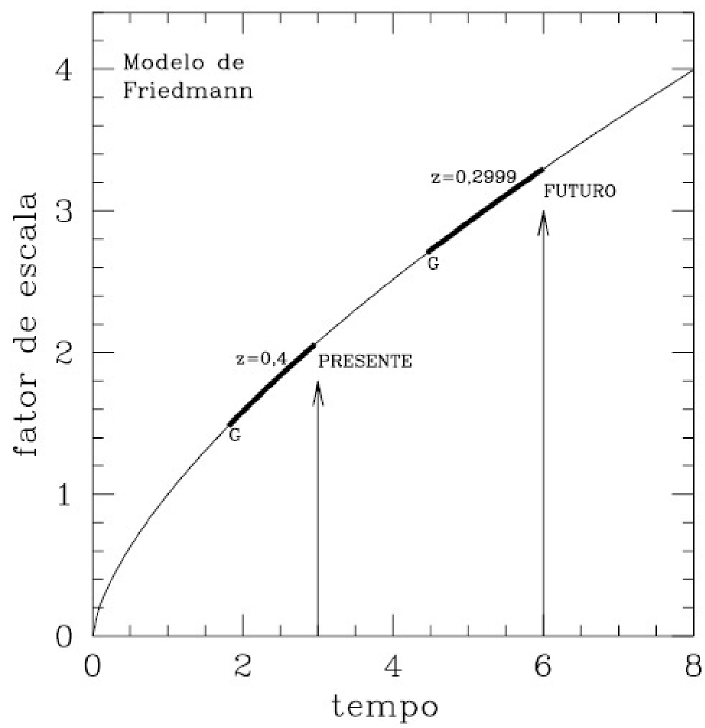

Figura 2: Esquema usado por Sandage [3] para o cálculo de $\Delta z/\Delta t$ para o modelo de Friedmann crítico. A galáxia G é observada no presente ($t = t_o$) com $z = 0,4$ e emitiu luz em $t = t_1$ no passado. Supõe-se nova observação de G no futuro em $t = t_F = 2t_o$. A galáxia G passa a ter $z = 0,2999$ e emitiu luz em $t = t_x$ (a figura é uma adaptação da figura 2 de [3]). Sandage usa as equações de Friedmann para obter $t_o/t_1 = 1,6565$ e $t_F/t_x = 1,3495$. A linha grossa do presente começa em t_1 e termina em t_o; a do futuro começa em t_x e termina em t_F.

Sandage adota a constante de Hubble $H(t = t_o) \equiv H_o = 75$ (km/s)/Mpc. Este valor fornece $t_o = 2/(3H_o) = 9$ bilhões de anos, de acordo com o modelo de Friedmann crítico. Temos então, para este modelo, $c\Delta z/\Delta t = 3 \times 10^{10}$ cm/s (0,2999 − 0,4)/(18 bilhões de anos − 9 bilhões de anos) = − 0,34 (cm/s)/ano = $-\ 3,4 \times 10^{-6}$ (km/s)/ano. Sandage usa em seguida a equação de McVittie para obter o valor instantâneo de cdz/dt, que vale $cdz/dt = c(1 + z)H_o - H(z)$, de acordo com a eq. 1. Como se quer cdz/dt em $z = 0,4$ (ver a figura), temos $H(z = 0,4) = H_o(t_o/t_1)$, já que no modelo de Friedmann crítico $H(t) = 2/(3t)$, ou seja, o parâmetro de

Hubble $H(t)$ é inversamente propocional ao tempo cósmico t. Lembrando que $t_o/t_1 = 1,6565$, teremos, portanto, $cdz/dt = 3 \times 10^{10}$ cm/s (1+0,4)75 (km/s)/Mpc – 75 (km/s)/Mpc(1,6565) = – $5,8 \times 10^{11}$ cm/s (km/s)/Mpc = – $5,9 \times 10^{-6}$ (km/s)/ano (1 Mpc = $3,1 \times 10^{19}$ km e 1 ano = $3,15 \times 10^7$ s). Sandage conclui então que deveremos esperar pelo menos 10^7 anos para termos um valor de cdz/dt razoável ($\approx$ 100 km/s) para a tecnologia astronômica da época.

Os ELTs atuais possuem abertura de $\approx$ 40 m e possibilitarão a obtenção observacional de cdz/dt. O valor obtido acima por Sandage e McVittie de $cdz/dt = -5,9 \times 10^{-6}$ (km/s)/ano $\approx$ 1 (cm/s)/ano, inobservável na década de 1960, torna-se observável agora (cf. Paturel, Teerikorpi e Baryshev 2017, pág. 16, citado na seção 1). Liske et al. 2008 (ver seção 1) são mais específicos. De acordo com eles (pág. 1211), um ELT de 42 m de abertura, observando uma amostra de 20 quasares, com $z \gtrsim 2,5$, durante 4.000 horas, poderá resultar numa precisão de 2 cm/s, o que permitiria a determinação inequívoca de cdz/dt, seja ele positivo, negativo ou nulo, em observações separadas por 20 anos — não mais os 10 milhões de anos de Sandage 1962. (O desvio para o vermelho limite z = 2,5 corresponde a uma velocidade de expansão de 90% da velocidade da luz, de acordo com o modelo de Friedmann crítico, como se vê na figura 2 de [1].)

3 Considerações finais

3.1 Observação de 4.000 horas

Tempos de exposição longos não são estranhos à história da astronomia, mas nada ainda desta magnitude. Observar um objeto do solo por 4.000 horas significa observar durante 800 noites, considerando a média de 5 horas/noite, o que é razoável em um bom sítio astronômico. Isto representa um projeto observacional de pouco mais de 2 anos. Depois deve-se aguardar 20 anos e repetir o processo. De novo, nada mal em vista dos 10 milhões de anos de Sandage.

Milton L. Humason (1891-1972), o assistente noturno de Edwin P. Hubble (1889-1953), observou as galáxias com os maiores desvios para o vermelho de sua época. Uma de suas observações pioneiras foi feita no final da década de 1920 no telescópio de Monte Wilson, Califórnia, Estados Unidos, que tem 2,5 m de abertura e era na ocasião o maior telescópio do mundo (veja [7]).

Humason observou a mesma galáxia (a galáxia elíptica NGC 7619) por um total de 33 horas durante várias noites. A mesma placa fotográfica, o detector da época, era recolocado no espectrógrafo a cada noite de observação para o registro de mais fótons até se obter um espectro mensurável (ver ***"The man who measured the cosmos"*** [8]).

Recentemente — no final da década de 1990 e início dos anos 2000 — o Telescópio Espacial Hubble observou algumas regiões selecionadas do céu por tempos de exposição de 10-12 dias para obter as imagens das galáxias mais distantes do universo (cf. [9]).

Mas a tarefa das 4.000 horas não será tão árdua, pois hoje em dia com os processos de automação em plena operação na astronomia, a observação consecutiva de um mesmo objeto por centenas de noites será um acontecimento relativamente trivial, com a intervenção humana ocasional.

3.2 Universo sem expansão

O valor observacional de dz/dt pode ser nulo e não excluir a expansão, como vimos acima para o modelo de expansão uniforme [$H(t) = 1/t$]. é claro que este modelo não é apropriado pois como a idade do universo vale neste caso $t_o = 1/H_o$, o modelo cai no *dilema da idade* [10] se considerarmos o valor medido atualmente de H_o.

é importante salientar que o teste do desvio para o vermelho descrito acima é baseado no *paradigma do universo em expansão*, de acordo com as equações relativistas de Friedmann (ver [11]). Na eventualidade plausível de existirmos em um universo *sem expansão* do espaço (cf. discussão em [12], **Universo em expansão. . . ou não?**), o resultado observacional do teste deverá ser interpretado à luz de outros princípios físicos, ainda por serem explicitados. Em outras palavras, valores não nulos de dz/dt, fora do paradigma da expansão, podem fornecer pistas para a descoberta do mecanismo físico por trás do efeito Hubble (cf. seção 3 de [1]).

3.3 Sandage

Os astrônomos norte-americanos Allan Sandage e Halton Arp (1927-2013; ver, por exemplo, *Arp's Indomitable Universe* na ref. [13]) foram os mais notáveis estudantes e discípulos de Hubble, cada um com suas peculiaridades e contradições científicas. Sandage 1962 [3] é o segundo artigo de Sandage sobre o qual eu me debruço com mais atenção e que resultou no presente texto. O primeiro foi um artigo de 2001, um trabalho de colaboração com L.M. Lubin, no qual eles aplicam um outro teste da expansão, a saber, o teste do brilho superficial de galáxias. O estudo que fiz então resultou no artigo intitulado ***Sandage versus Hubble on the reality of the expanding universe*** [14], em que eu concluo pela falha de Sandage em demonstrar a realidade da expansão, apesar de sua conclusão em contrário. Neste artigo eu apresento uma atitude bastante crítica, e mesmo dura, a respeito do trabalho de Sandage, que considerei tendencioso e com recursos algumas vezes a argumentos de autoridade. Já no presente estudo do teste do desvio para o vermelho eu reconheço um Sandage bastante preciso e rigoroso em seu tratamento do teste e com uma genuína intenção de se investigar a realidade dos modelos relativistas do universo.

A razão para a diferença nas abordagens de Soares 2006 e de agora, relativamente à visão sobre o cientista Sandage, pode ser exatamente esta: no primeiro Sandage realiza o teste de brilho superficial de maneira forçada de modo a concluir pela realidade da expansão e no segundo, por ser impossível a realização do teste observacional com a tecnologia astronômica da época, ele se concentra na proposição teórica do teste e o faz com bastante competência.

Agradecimento: As figuras foram confeccionadas em um dos computadores do Instituto Astronômico Kapteyn, Groningen, Holanda, sob os auspícios do Prof. Reynier Peletier.

Referências

[1] D. Soares, *O efeito Hubble* in *Tópicos em cosmologia relativista*, https://www.researchgate.net/publication/338842995, pp. 69-76 (2020).

[2] G. Paturel, P. Teerikorpi, Y. Baryshev, *Hubble law: measure and interpretation*, Found. Phys. 47, 1208 (2017).

[3] A. Sandage, *The change of redshift and apparent luminosity of galaxies due to the deceleration of selected expanding universes*, Astrophys. J. 136, 319 (1962).

[4] G. C. McVittie, *Appendix*, Astrophys. J. 136, 334 (1962).

[5] J. Liske et al., *Cosmic dynamics in the era of Extremely Large Telescopes*, Mon. Not. R. Astron. Soc. 386, 1192 (2008).

[6] D. Soares, *COSMOS:03mar14*, http://lilith.fisica.ufmg.br/dsoares/cosmos/14/cosmos6.htm (2014).

[7] Segrè Collection, *Hubble outside Mount Wilson Observatory*, http://lilith.fisica.ufmg.br/dsoares/hubble/mtwilson.htm (1931).

[8] R. L. Voller, *The man who measured the cosmos*, Astronomy, Janeiro 2012, p. 52.

[9] D. Soares, *As galáxias mais distantes do universo* in *O Reino das Galáxias*, https://www.researchgate.net/publication/337719531, pp. 27-30 (2021).

[10] D. Soares, *O dilema da idade do universo*, http://lilith.fisica.ufmg.br/dsoares/UAI/idade.htm (2015).

[11] D. Soares, *Observações sobre as soluções clássicas da equação de Friedmann* in *Tópicos em cosmologia relativista*, https://www.researchgate.net/publication/338842995, pp. 61-68 (2020).

[12] D. Soares, *Universo em expansão... ou não?*, http://lilith.fisica.ufmg.br/dsoares/extn/naoexp/naoexp.htm (2017).

[13] D. Soares, M. Neves, A. Assis, *Arp's Indomitable Universe*, https://arxiv.org/abs/1705.09696 (2017).

[14] D. Soares, *Sandage versus Hubble on the reality of the expanding universe*, https://arxiv.org/abs/physics/0605098 (2006).