

# A relação velocidade-distância para as galáxias estabelecida por Edwin Hubble

Daniel Iria Machado

Universidade Estadual do Oeste do Paraná

---

## Resumo

A relação linear entre as velocidades de recessão das galáxias e suas distâncias ou, de modo equivalente, entre os desvios para o vermelho nos espectros das galáxias e suas distâncias, atualmente denominada lei de Hubble-Lemaître, é um resultado fundamental na área da Cosmologia, que pode ser entendido, de acordo com o modelo cosmológico padrão, como consequência de um Universo em expansão. Em um trabalho pioneiro publicado em 1929, Edwin Hubble (1889-1953) forneceu evidências consistentes da validade desta lei, com base em dados observacionais. Apresenta-se aqui uma tradução do inglês para o português deste influente artigo.

## Abstract

The linear relation between the recession velocities of galaxies and their distances or, equivalently, between the redshifts in the spectra of galaxies and their distances, currently known as the Hubble-Lemaître law, is a fundamental result in the area of Cosmology, which can be understood, according to the standard cosmological model, as a consequence of an expanding Universe. In a pioneering work published in 1929, Edwin Hubble (1889-1953) provided consistent evidence for the validity of this law, based on observational data. An English to Portuguese translation of this influential article is presented here.

---

**Palavras-chave:** lei de Hubble-Lemaître, constante de Hubble, história da cosmologia.

**Keywords:** Hubble-Lemaître law, Hubble constant, history of cosmology.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v5n1.43115](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v5n1.43115)

## 1 Introdução

O astrônomo estadunidense Edwin P. Hubble (1889-1953) tornou-se renomado por suas investigações no campo da Astronomia Extragaláctica. A partir de 1919, ele passou a atuar no Observatório de Monte Wilson, na Califórnia, onde teve acesso ao poderoso telescópio Hooker, com diâmetro de 100 polegadas (2,5 m), o maior em operação na época, que o permitiu avançar no estudo das propriedades das galáxias [1].

Um primeiro resultado notável obtido por Hubble relaciona-se à determinação das distâncias das galáxias. Observando estrelas cefeidas na então chamada Nebulosa de Andrômeda (M31), Hubble pôde estabelecer o quão afastado este objeto se encontrava, utilizando a relação período-luminosidade descoberta por Henrietta Leavitt (1868-1921) e calibrada por Harlow Shapley (1885-1972) [2-4]. Este trabalho, divulgado no final de dezembro de 1924, mostrou que An-

drômeda situava-se além da Via Láctea e foi decisivo para encerrar o debate existente sobre a natureza das estruturas conhecidas como nebulosas espirais, que passaram a ser consideradas galáxias independentes pela maioria dos astrônomos, e não parte de nossa própria galáxia [1].

Neste período, chamavam a atenção as pesquisas realizadas pelo astrônomo estadunidense Vesto Slipher (1875-1969), sobre os espectros da luz das galáxias. Trabalhando no Observatório Lowell em Flagstaff, no Arizona, Slipher reuniu, entre 1912 e 1925, dados sobre 45 galáxias, das quais 41 delas apresentavam um espectro com desvio para o vermelho (*redshifts*), ou seja, mostravam linhas espectrais deslocadas para a região de comprimentos de ondas maiores, quando comparadas com linhas correspondentes do espectro de fontes estacionárias. Se isto fosse tratado como decorrente do efeito Doppler, implicaria um movimento de afastamento destas galáxias em relação à Terra [4].

O valor do *redshift* ( $z$ ) pode ser definido por  $z = (\lambda - \lambda_0)/\lambda_0$ , onde  $\lambda$  é o comprimento de onda observado de determinada linha do espectro eletromagnético de uma fonte que se afasta do observador e  $\lambda_0$  é o comprimento de onda da linha equivalente do espectro de uma fonte em repouso no laboratório. No efeito Doppler, se uma fonte se afasta com velocidade baixa em comparação com a velocidade da luz no vácuo ( $c$ ), a componente da velocidade na direção de observação, ou seja, a velocidade radial ( $v$ ), é dada por  $v = cz$  [5].

Prosseguindo em suas pesquisas sobre objetos extragalácticos, Hubble ocupou-se também da análise da relação entre as velocidades de recessão das galáxias, inferidas a partir das medidas do *redshift* em seus espectros, e suas distâncias. Dispondo de medidas, por ele consideradas razoáveis, das velocidades radiais e distâncias de 24 galáxias, constatou existir uma relação aproximadamente linear entre estas grandezas, publicando suas conclusões no início de 1929. Isto significava que havia também uma relação linear entre os *redshifts* e as distâncias das galáxias [4, 6].

Com a ampliação da base de dados, a relação linear entre velocidades de recessão e distâncias das galáxias ou, de modo equivalente, entre *redshifts* e distâncias, tornou-se firmemente estabelecida e passou, com o tempo, a ser conhecida como lei de Hubble [4]. Tal relação foi bem verificada empiricamente para  $v < 30.000$  km/s ( $z < 0,1$ ) [7]. Atualmente, esta lei é comumente escrita na forma  $v = H_0 d$ , onde  $v$  é a velocidade de recessão da galáxia,  $d$  sua distância e  $H_0$  é denominada constante de Hubble. De acordo com o modelo de evolução do Universo mais popular, a cosmologia do *big bang*, tal relação fornece suporte observacional para a concepção de que o Universo está em expansão e  $H_0$  informa a taxa com a qual isto ocorre atualmente [8].

No entanto, quando Hubble anunciou os resultados que havia obtido, não estava claro para os pesquisadores se o Universo era estático ou estava em expansão. A maioria dos astrônomos aceitou a validade da relação linear encontrada por Hubble entre velocidades de recessão e distâncias das galáxias, porém a interpretação desta como evidência de que o Universo estava em expansão desenvolveu-se mais gradualmente [4].

A relação velocidade-distância estabelecida empiricamente por Hubble, em conjunto com con-

siderações teóricas, fez com que, por volta de 1933, a maior parte dos cosmólogos admitisse a ideia de que o Universo estava em expansão [4].

Quando Hubble divulgou sua descoberta, não estava ciente do trabalho do cosmólogo belga Georges Lemaître (1894-1966), que em 1927 havia publicado um artigo em um periódico pouco conhecido, no qual expunha sua teoria de um Universo em expansão, fundamentada na Relatividade Geral de Albert Einstein (1879-1955). Lemaître argumentou que o movimento de afastamento das galáxias era um efeito cosmológico devido à expansão do espaço, derivou teoricamente uma relação linear entre as velocidades e as distâncias das galáxias, e estimou o valor da constante de proporcionalidade ( $H_0$  na terminologia atual) com base nos dados observacionais então disponíveis [4, 9].

O reconhecimento das contribuições de Lemaître fez a União Astronômica Internacional recomendar, em 2018, que a relação velocidade-distância fosse designada lei de Hubble-Lemaître [10].

A lei de Hubble-Lemaître viabilizou o desenvolvimento de diversas áreas de pesquisa, ao facilitar a determinação das distâncias de galáxias e quasares, a partir das medidas de *redshifts* e das correspondentes velocidades de recessão. O conhecimento das distâncias de mais de um milhão de galáxias e quasares tornou possível, por exemplo, estabelecer a localização e a distribuição tridimensional destes objetos, revelando a estrutura em larga escala do Universo, com uma rede interconectada de galáxias, aglomerados de galáxias, filamentos e vazios [11].

A constante de Hubble ( $H_0$ ), por sua vez, está presente também nos cálculos para a determinação de várias grandezas cosmológicas, dentre as quais a idade do Universo e o tamanho do Universo observável. Isto motivou a condução de investigações para a medição de  $H_0$  com precisão crescente [12, 13].

O trabalho publicado por Hubble em 1929 contendo a relação velocidade-distância para as galáxias é considerado um marco na Cosmologia. A tradução do inglês para o português deste célebre artigo será apresentada a seguir. No artigo original, as referências são apresentadas com algarismos arábicos em sobrescrito. No entanto, esta tradução apresenta as referências no método

numérico tradicional dos *Cadernos de Astronomia*, além de fornecê-las de forma mais completa, incluindo autor, título e *link* para acesso *online*.

### Sobre o tradutor

Daniel Iria Machado ([imachadodaniel23@gmail.com](mailto:imachadodaniel23@gmail.com)) é Bacharel em Física, Mestre em Educação e Doutor em Educação para a Ciência. É professor da Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste) no *campus* de Foz do Iguazu. Atua na área da Educação em Ciências, com foco principal no campo da Educação em Astronomia. Desenvolve projetos de extensão dedicados ao ensino e à divulgação da Astronomia. Participou de pesquisas em Astronomia observando ocultações estelares, fenômenos mútuos das luas galileanas de Júpiter e aproximações mútuas desses satélites.

### Referências

- [1] G. J. Whitrow, *Dicionário de biografias científicas* (Contraponto, Rio de Janeiro, 2007).
- [2] H. S. Leavitt e E. C. Pickering, *Periods of 25 Variable Stars in the Small Magellanic Cloud*, HCOG **173**(1) (1912). Disponível em <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1912HarCi.173...1L>, acesso em jan. 2024.
- [3] D. Iria Machado, *As estrelas Cefeidas enquanto velas-padrão: A relação período-luminosidade tal qual apresentada por sua descobridora*, *Cadernos de Astronomia* **2**(2), 170 (2021).
- [4] H. S. Kragh, *Conceptions of Cosmos: From Myths to the Accelerating Universe: A History of Cosmology* (Oxford University Press, Oxford, 2007).
- [5] B. W. Carroll e D. A. Ostlie, *An Introduction to Modern Astrophysics* (Pearson Addison-Wesley, Boston, 2007).
- [6] E. Hubble, *A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae*, *PNAS* **15**(3), 168 (1929).
- [7] G. Paturel, P. Teerikorpi e Y. Baryshev, *Hubble Law: Measure and Interpretation*, *Found Phys.* **47**(9), 1208 (2017). [ArXiv:1801.00128](https://arxiv.org/abs/1801.00128).
- [8] A. Liddle, *An Introduction to Modern Cosmology* (Wiley, Chichester, 2015), 3<sup>a</sup> ed.
- [9] G. Lemaître, *Un univers homogène de masse constante et de rayon croissant, rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extra-galactiques*, *Ann. Soc. Sci. Bruxelles* **A47**(49) (1927). Disponível em <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1927ASSB...47...49L/abstract>, acesso em jan. 2024.
- [10] E. Gibney, *Belgian priest recognized in Hubble-law name change*, *Nature - News*, 30 out. (2018).
- [11] N. A. Bahcall, *Hubble's law and the expanding universe*, *PNAS* **112**(11), 3173 (2015).
- [12] W. L. Freedman et al., *Final results from the Hubble Space Telescope key project to measure the Hubble constant*, *ApJ* **553**(1), 47 (2001). [ArXiv:astro-ph/0012376](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0012376).
- [13] W. L. Freedman, *Measurements of the Hubble constant: tensions in perspective*, *ApJ* **919**(1), 16 (2021).

# Uma Relação entre Distância e Velocidade Radial entre Nebulosas Extragalácticas

Edwin Hubble

*Observatório de Monte Wilson, Instituto Carnegie de Washington*

Comunicado em 17 de janeiro de 1929

Determinações do movimento do Sol em relação às nebulosas extragalácticas<sup>1</sup> envolveram um termo  $K$  de várias centenas de quilômetros que parece ser variável.<sup>2</sup> Explicações deste paradoxo foram buscadas em uma correlação entre velocidades radiais aparentes<sup>3</sup> e distâncias, porém até agora os resultados não foram convincentes. O presente artigo é um reexame da questão, baseado apenas naquelas distâncias nebulares que se acredita serem razoavelmente confiáveis.

As distâncias das nebulosas extragalácticas dependem, em última análise, da aplicação de critérios de luminosidade absoluta às estrelas envolvidas cujos tipos podem ser reconhecidos. Estes incluem, entre outros, variáveis cefeidas, novas e estrelas azuis envolvidas em nebulosidade de emissão. Os valores numéricos dependem do ponto zero da relação período-luminosidade entre as cefeidas, os outros critérios apenas verificam a ordem das distâncias.<sup>4</sup> Este método está restrito às poucas nebulosas que são bem resolvidas pelos instrumentos existentes. Um estudo dessas nebulosas, juntamente com aquelas nas quais alguma estrela pode ser reconhecida, indica a probabilidade de um limite superior aproximadamente uniforme para a luminosidade absoluta das estrelas, pelo menos nas espirais de tipo tardio e nas nebulosas irregulares, da ordem de  $M(\text{fotográfica}) = -6,3$  [1]. As luminosidades aparentes das estrelas mais brilhantes em tais nebulosas são, portanto, critérios que, embora imperfeitos e de aplicação cautelosa, fornecem estimativas razoáveis das distâncias de todos os sistemas extragalácticos nos quais ao menos algumas estrelas podem ser detectadas.<sup>5</sup>

<sup>1</sup>[N.T.]: O que atualmente denominamos “galáxia” era referido como “nebulosa extragaláctica” por Hubble, ou simplesmente “nebulosa”, quando o contexto deixa claro se tratar de um objeto extragaláctico.

<sup>2</sup>[N.T.]: Conforme Hubble explica em seu livro *The realm of the nebulae*, publicado em 1936, assumia-se que a Via Láctea estaria se movimentando rapidamente em relação às galáxias, transportando consigo o Sol. O movimento solar seria então uma combinação do movimento do Sol no interior da Via Láctea e do movimento desta em relação às galáxias. Supunha-se inicialmente que as galáxias estariam se deslocando com velocidades similares em direções aleatórias. O movimento individual de uma galáxia no referencial das galáxias (movimento peculiar), combinado com o movimento do sistema de referência das galáxias em relação ao Sol (reflexo do movimento solar), levaria à velocidade observada da galáxia em relação ao Sol. Ao se observar um conjunto suficientemente grande de galáxias, os movimentos peculiares, ocorrendo de modo aleatório, tenderiam a se cancelar, restando apenas o reflexo do movimento solar. Esperava-se que, ao se eliminar o movimento solar, velocidades de aproximação fossem tão numerosas quanto de afastamento. Entretanto, os dados indicavam existir, além do movimento solar, um movimento sistemático de recessão das galáxias. Tal situação motivou o astrônomo alemão Carl Wirtz (1876-1939), em 1918, a introduzir um termo  $K$  constante a ser subtraído das velocidades observadas das galáxias, antes de se determinar o movimento solar. Análises adicionais indicavam que o termo  $K$  poderia ser variável, dependendo da distância a que uma galáxia se encontrava.

<sup>3</sup>[N.T.]: Hubble se refere aqui a velocidades radiais “aparentes”, pois, como esclarece na obra *The realm of the nebulae*, pensava ser necessário reunir mais evidências para que os *redshifts* constatados nos espectros das galáxias pudessem ser interpretados, com segurança, como sendo consequência do movimento de afastamento destes objetos. Embora considerasse essa interpretação plausível, ele não havia descartado a possibilidade de os *redshifts* observados serem decorrentes de um princípio físico ainda desconhecido.

<sup>4</sup>[N.T.]: Devido a um erro na calibração da relação período-luminosidade utilizada por Hubble, as distâncias estimadas por ele com base no estudo das estrelas cefeidas são inferiores aos valores atualmente aceitos. Por exemplo, a distância até a galáxia de Andrômeda encontrada por Hubble foi de cerca de 900 mil anos-luz, enquanto o valor adotado nos dias de hoje é de aproximadamente 2,5 milhões de anos-luz.

<sup>5</sup>[N.T.]: Na terminologia astronômica atual, o brilho intrínseco (ou absoluto) de uma estrela está associado à sua

**Tabela 1:** NEBULOSAS CUJAS DISTÂNCIAS FORAM ESTIMADAS A PARTIR DE ESTRELAS ENVOLVIDAS OU A PARTIR DAS LUMINOSIDADES MÉDIAS EM UM AGLOMERADO.

OBJETO	$m_s$	$r$	$v$	$m_t$	$M_t$ <sup>6</sup>
P. N. Mag. <sup>7</sup>	. .	0,032	+170	1,5	-16,0
G. N. Mag. <sup>8</sup>	. .	0,034	+290	0,5	17,2
N. G. C. 6822	. .	0,214	-130	9,0	12,7
598	. .	0,263	-70	7,0	15,1
221	. .	0,275	-185	8,8	13,4
224	. .	0,275	-220	5,0	17,2
5457	17,0	0,45	+200	9,9	13,3
4736	17,3	0,5	+290	8,4	15,1
5194	17,3	0,5	+270	7,4	16,1
4449	17,8	0,63	+200	9,5	14,5
4214	18,3	0,8	+300	11,3	13,2
3031	18,5	0,9	-30	8,3	16,4
3627	18,5	0,9	+650	9,1	15,7
4826	18,5	0,9	+150	9,0	15,7
5236	18,5	0,9	+500	10,4	14,4
1068	18,7	1,0	+920	9,1	15,9
5055	19,0	1,1	+450	9,6	15,6
7331	19,0	1,1	+500	10,4	14,8
4258	19,5	1,4	+500	8,7	17,0
4151	20,0	1,7	+960	12,0	14,2
4382	. .	2,0	+500	10,0	16,5
4472	. .	2,0	+850	8,8	17,7
4486	. .	2,0	+800	9,7	16,8
4649	. .	2,0	+1090	9,5	17,0
Média					-15,5

$m_s$  = magnitude fotográfica das estrelas mais brilhantes envolvidas.

$r$  = distância em unidades de  $10^6$  parsecs. As duas primeiras são valores de Shapley.

$v$  = velocidades medidas em km/s.<sup>9</sup> N. G. C. 6822, 221, 224 e 5457 são determinações recentes de Humason.<sup>10</sup>

luminosidade ( $L$ ), que corresponde à energia total emitida pela fonte a cada segundo. O brilho aparente, conforme visto da Terra, está relacionado ao fluxo radiante ( $F$ ). Se a estrela se encontra a uma distância  $r$  do observador, tem-se  $F = L/4\pi r^2$ , supondo-se que a luz se propaga sem ser absorvida ou espalhada. No sistema de medição de brilho tradicional utilizado na Astronomia, define-se a magnitude aparente ( $m$ ) de uma estrela de tal modo que quanto maior o brilho aparente, menor a magnitude. Na escala de magnitudes, uma estrela de magnitude aparente  $m$  é 100 vezes mais brilhante que uma estrela de magnitude aparente  $m + 5$ . As magnitudes aparentes  $m_1$  e  $m_2$  de duas estrelas com fluxos radiantes  $F_1$  e  $F_2$ , respectivamente, podem ser relacionadas pela expressão  $F_2/F_1 = 100^{(m_1 - m_2)/5}$ . Sirius, a estrela mais brilhante do céu noturno, por exemplo, possui magnitude aparente visual de  $-1,44$ . Define-se também a magnitude absoluta ( $M$ ) de uma estrela como a magnitude aparente que ela teria se estivesse a uma distância de 10 parsecs da Terra. As magnitudes absolutas  $M_1$  e  $M_2$  de duas estrelas com luminosidades  $L_1$  e  $L_2$ , respectivamente, podem ser relacionadas pela equação  $L_2/L_1 = 100^{(M_1 - M_2)/5}$ . A magnitude absoluta visual de Sirius, por exemplo, é de  $+1,45$ . Medindo-se  $m$  e conhecendo-se  $M$ , é possível determinar a distância  $r$  de uma estrela (em parsecs) pela expressão  $m - M = 5 \log_{10}(r/10)$ , na qual  $m - M$  é o chamado módulo de distância.

<sup>6</sup>[N.T.]: As magnitudes absolutas visuais totais indicadas nesta coluna são todas negativas, embora só tenha sido incluído explicitamente o sinal negativo para o primeiro objeto e o valor médio da grandeza.

<sup>7</sup>[N.T.]: Pequena Nuvem de Magalhães.

<sup>8</sup>[N.T.]: Grande Nuvem de Magalhães.

<sup>9</sup>[N.T.]: Estas são velocidades radiais heliocêntricas, ou seja, medidas na direção de observação de cada galáxia e expressadas em relação ao Sol, após correções realizadas para se levar em conta o movimento de rotação da Terra em torno de seu eixo (com velocidade da ordem de 0,5 km/s) e o movimento orbital da Terra ao redor do Sol (com velocidade de cerca de 30 km/s).

<sup>10</sup>[N.T.]: A maior parte das velocidades radiais utilizadas por Hubble neste artigo foi obtida do trabalho pioneiro de Vesto Slipher. Uma lista de objetos astronômicos com velocidades radiais determinadas por Slipher e outros pesquisadores

$m_t$  = magnitude visual de Holetschek tal como corrigida por Hopmann. Os três primeiros objetos não foram medidos por Holetschek, e os valores de  $m_t$  representam estimativas do autor com base nos dados disponíveis.

$M_t$  = magnitude absoluta visual total calculada a partir de  $m_t$  e  $r$ .<sup>11</sup>

Finalmente, as próprias nebulosas parecem ser de uma ordem definida de luminosidade absoluta, exibindo uma amplitude de quatro ou cinco magnitudes em torno de um valor médio  $M(\text{visual}) = -15,2$  [1]. A aplicação desta média estatística a casos individuais raramente pode ser explorada com proveito, porém onde números consideráveis estão envolvidos, e especialmente nos diversos aglomerados de nebulosas, luminosidades aparentes médias das próprias nebulosas oferecem estimativas confiáveis das distâncias médias.

Velocidades radiais de 46 nebulosas extragalácticas estão agora disponíveis, mas distâncias individuais foram estimadas para apenas 24. Para uma outra, N. G. C. 3521, uma estimativa provavelmente poderia ser feita, porém não há fotografias disponíveis em Monte Wilson. Os dados são fornecidos na tabela 1. As sete primeiras distâncias são as mais confiáveis, fiando-se, exceto para M32,<sup>12</sup> a companheira de M31,<sup>13</sup> em extensas investigações de muitas estrelas envolvidas. As treze distâncias seguintes, dependentes do critério de um limite superior uniforme de luminosidade estelar, estão sujeitas a erros prováveis consideráveis, mas julga-se que são os valores mais razoáveis disponíveis atualmente. Os quatro últimos objetos parecem estar no Aglomerado da Virgem. A distância atribuída ao aglomerado,  $2 \times 10^6$  parsecs, é derivada da distribuição de luminosidades nebulares, juntamente com as luminosidades de estrelas em algumas das espirais de tipo tardio, e difere um pouco da estimativa de Harvard de dez milhões de anos-luz [2].<sup>14</sup>

Os dados na tabela indicam uma correlação linear entre distâncias e velocidades, quer as últimas sejam usadas diretamente ou corrigidas quanto ao movimento solar, de acordo com as soluções mais antigas. Isso sugere uma nova solução para o movimento solar na qual as distâncias são introduzidas como coeficientes do termo  $K$ , isto é, assume-se que as velocidades variam diretamente com as distâncias e, portanto,  $K$  representa a velocidade à distância unitária devido a esse efeito.<sup>15</sup> As equações de condição então assumem a forma<sup>16</sup>

$$r K + X \cos \alpha \cos \delta + Y \operatorname{sen} \alpha \cos \delta + Z \operatorname{sen} \delta = v$$

---

foi fornecida por Gustaf Strömberg (1882-1962) no artigo *Analysis of radial velocities of globular clusters and non-galactic nebulae*, publicado em 1925, no volume 61 do *Astrophysical Journal*.

<sup>11</sup>[N.T.]: O valor de  $M_t$  pode ser calculado pela expressão  $m_t - M_t = 5 \log_{10}(r/10)$ , com  $r$  em parsecs.

<sup>12</sup>[N.T.]: A galáxia NGC 221 também é catalogada como M32.

<sup>13</sup>[N.T.]: M31 ou NGC 224 são designações da Galáxia de Andrômeda.

<sup>14</sup>[N.T.]: Visto que 1 parsec equivale a aproximadamente 3,26 anos-luz, a estimativa de Harvard para a distância do Aglomerado da Virgem era de cerca de  $3 \times 10^6$  parsecs.

<sup>15</sup>[N.T.]: Este termo  $K$  corresponde ao que atualmente se chama constante de Hubble, designada por  $H_0$ .

<sup>16</sup>[N.T.]: Nestas equações,  $\alpha$  e  $\delta$  correspondem, respectivamente, à ascensão reta e à declinação de uma galáxia, no sistema equatorial de coordenadas celestes. Os parâmetros  $X$ ,  $Y$  e  $Z$  representam as componentes escalares da velocidade  $\vec{v}_{R\odot}$  do sistema de referência das galáxias em relação ao Sol, expressadas em coordenadas retangulares no sistema equatorial heliocêntrico. A velocidade  $\vec{v}_{\odot R}$  do Sol em relação ao sistema de referência das galáxias é o simétrico de  $\vec{v}_{R\odot}$ , com componentes escalares  $X_{\odot} = -X$ ,  $Y_{\odot} = -Y$  e  $Z_{\odot} = -Z$ . O termo  $X \cos \alpha \cos \delta + Y \operatorname{sen} \alpha \cos \delta + Z \operatorname{sen} \delta$  corresponde à projeção de  $\vec{v}_{R\odot}$  na direção de observação de uma galáxia. Se este termo for denominado  $v_s$ , as equações de condição podem ser escritas na forma  $v = v_s + K r$ , indicando que a velocidade radial de uma galáxia medida em relação ao Sol ( $v$ ) é uma combinação da projeção, na direção radial, da velocidade do sistema de referência das galáxias em relação ao Sol ( $v_s$ ) e da velocidade radial da galáxia verificada no sistema de referência das galáxias ( $K r$ ). O método utilizado por Hubble para estabelecer as equações de condição é discutido por Domingos Soares e Luiz Paulo R. Vaz no artigo *Solar-motion correction in early extragalactic astrophysics*, publicado em junho de 2014 no *Journal of the Royal Astronomical Society of Canada*, volume 108, número 3.

Duas soluções foram produzidas,<sup>17</sup> uma usando as 24 nebulosas individualmente, a outra combinando-as em 9 grupos de acordo com a proximidade em direção e em distância. Os resultados são<sup>18</sup>

	24 OBJETOS	9 GRUPOS
$X$	$-65 \pm 50$	$+3 \pm 70$
$Y$	$+226 \pm 95$	$+230 \pm 120$
$Z$	$-195 \pm 40$	$-133 \pm 70$
$K$	$+465 \pm 50$	$+513 \pm 60$ km/s por $10^6$ parsecs
$A$	$286^\circ$	$269^\circ$
$D$	$+40^\circ$	$+33^\circ$
$V_0$	$306$ km/s	$247$ km/s

Para um material tão escasso, tão mal distribuído, os resultados são razoavelmente definidos. As diferenças entre as duas soluções devem-se, em grande parte, às quatro nebulosas da Virgem, que, sendo os objetos mais distantes e todos compartilhando o movimento peculiar do aglomerado, influenciam indevidamente o valor de  $K$  e, por isso, de  $V_0$ . Novos dados sobre objetos mais distantes serão necessários para reduzir o efeito de tal movimento peculiar. Enquanto isso, números arredondados, intermediários entre as duas soluções, representarão a ordem provável dos valores. Por exemplo, permita que  $A = 277^\circ$ ,  $D = +36^\circ$  (Long. gal.<sup>19</sup> =  $32^\circ$ , lat. gal.<sup>20</sup> =  $+18^\circ$ ),  $V_0 = 280$  km/s,  $K = 500$  km/s por milhão de parsecs.<sup>21</sup> O Sr. Strömberg muito gentilmente verificou a ordem geral destes valores por meio de soluções independentes para diferentes agrupamentos dos dados.

Descobriu-se que um termo constante, introduzido nas equações, é pequeno e negativo. Isso parece remover a necessidade do antigo termo  $K$  constante. Soluções desse tipo foram publicadas por Lundmark [3], que substituiu o antigo  $K$  por  $k + lr + mr^2$ . Sua solução preferida produziu  $k = 513$ , em comparação com o valor anterior da ordem de 700 e, portanto, ofereceu pouca vantagem.

Os resíduos para as duas soluções dadas acima perfazem a média de 150 e 110 km/s e devem representar os movimentos peculiares médios das nebulosas individuais e dos grupos, respectivamente. Para exibir os resultados de maneira gráfica, o movimento solar foi eliminado das velocidades observadas e os restos, os termos de distância mais os resíduos, foram plotados contra as distâncias.<sup>22</sup> A disposição dos resíduos é quase tão regular quanto se pode esperar e, em geral, a forma das soluções parece ser adequada.

As 22 nebulosas para as quais as distâncias não estão disponíveis podem ser tratadas de dois modos. Em primeiro lugar, a distância média do grupo derivada das magnitudes aparentes médias pode ser comparada com a média das velocidades corrigidas quanto ao movimento solar. O resultado, 745 km/s para uma distância de  $1,4 \times 10^6$  parsecs, situa-se entre as duas soluções anteriores e indica um valor para  $K$  de 530 em comparação com o valor proposto, 500 km/s.

<sup>17</sup>[N.T.]: A solução pode ser obtida por meio do método dos mínimos quadrados.

<sup>18</sup>[N.T.]: Nos resultados apresentados,  $A$  e  $D$  representam a ascensão reta e a declinação, respectivamente, do ponto da esfera celeste para onde o Sol se dirige em seu movimento analisado em relação às galáxias, e  $V_0$  corresponde ao módulo da velocidade do Sol em relação ao sistema de referência das galáxias. Estas grandezas podem ser calculadas pelas seguintes expressões:  $A = \arctan(Y_\odot/X_\odot)$ ,  $D = \arctan[Z_\odot/(X_\odot^2 + Y_\odot^2)^{1/2}]$  e  $V_0 = (X_\odot^2 + Y_\odot^2 + Z_\odot^2)^{1/2}$ .

<sup>19</sup>[N.T.]: Longitude galáctica.

<sup>20</sup>[N.T.]: Latitude galáctica.

<sup>21</sup>[N.T.]: Este valor de  $K$  é cerca de sete vezes superior às medidas mais precisas da constante de Hubble disponíveis atualmente, compreendidas entre 67 e 74 km/s por megaparsec, dependendo do método utilizado. Este intervalo de valores foi apresentado por Wendy L. Freedman no artigo *Measurements of the Hubble constant: tensions in perspective*, publicado em setembro de 2021 no *Astrophysical Journal*, volume 919, número 1.

<sup>22</sup>[N.T.]: A eliminação do movimento solar das velocidades radiais observadas das galáxias ( $v$ ) pode ser feita subtraindo-se de  $v$  o termo  $v_s = X \cos \alpha \cos \delta + Y \sin \alpha \cos \delta + Z \sin \delta$ . As velocidades radiais corrigidas quanto ao movimento solar ( $v_c$ ) são dadas então por  $v_c = v - v_s$ . No gráfico apresentado na Figura 1, plotou-se  $v_c$  em função da distância ( $r$ ).

**Tabela 2:** NEBULOSAS CUJAS DISTÂNCIAS SÃO ESTIMADAS A PARTIR DE VELOCIDADES RADIAIS

OBJETO	$v$	$v_s$ <sup>23</sup>	$r$ <sup>24</sup>	$m_t$	$M_t$ <sup>25</sup>
N. G. C 278	+ 650	-110	1,52	12,0	-13,9
404	- 25	- 65	. .	11,1	. .
584	+1800	+ 75	3,45	10,9	16,8
936	+1300	+115	2,37	11,1	15,7
1023	+ 300	- 10	0,62	10,2	13,8
1700	+ 800	+220	1,16	12,5	12,8
2681	+ 700	- 10	1,42	10,7	15,0
2683	+ 400	+ 65	0,67	9,9	14,3
2841	+ 600	- 20	1,24	9,4	16,1
3034	+ 290	-105	0,79	9,0	15,5
3115	+ 600	+105	1,00	9,5	15,5
3368	+ 940	+ 70	1,74	10,0	16,2
3379	+ 810	+ 65	1,49	9,4	16,4
3489	+ 600	+ 50	1,10	11,2	14,0
3521	+ 730	+ 95	1,27	10,1	15,4
3623	+ 800	+ 35	1,53	9,9	16,0
4111	+ 800	- 95	1,79	10,1	16,1
4526	+ 580	- 20	1,20	11,1	14,3
4565	+1100	- 75	2,35	11,0	15,9
4594	+1140	+ 25	2,23	9,1	17,6
5005	+ 900	-130	2,06	11,1	15,5
5866	+ 650	-215	1,73	11,7	-14,5
Média				10,5	-15,3

Em segundo lugar, a dispersão das nebulosas individuais pode ser examinada assumindo-se a relação entre distâncias e velocidades tal como determinada anteriormente. Distâncias podem então ser calculadas a partir das velocidades corrigidas quanto ao movimento solar, e magnitudes absolutas podem ser derivadas das magnitudes aparentes. Os resultados são dados na tabela 2 e podem ser comparados com a distribuição de magnitudes absolutas entre as nebulosas na tabela 1, cujas distâncias são derivadas a partir de outros critérios. N. G. C. 404 pode ser excluída, pois a velocidade observada é tão pequena que o movimento peculiar deve ser grande em comparação com o efeito da distância. No entanto, o objeto não é necessariamente uma exceção, visto que uma distância pode ser atribuída para a qual o movimento peculiar e a magnitude absoluta estejam ambos dentro do intervalo previamente determinado. As duas magnitudes médias, -15,3 e -15,5, as amplitudes, 4,9 e 5,0 mag., e as distribuições de frequência são estritamente semelhantes para esses dois conjuntos de dados inteiramente independentes; e mesmo a ligeira diferença nas magnitudes médias pode ser atribuída às nebulosas selecionadas, muito brilhantes, no Aglomerado da Virgem. Essa concordância inteiramente natural corrobora a validade da relação velocidade-distância em um caso muito evidente. Por fim, vale registrar que a distribuição de frequência de magnitudes absolutas nas duas tabelas combinadas é comparável àquelas encontradas nos diversos aglomerados de nebulosas.

Os resultados estabelecem uma relação aproximadamente linear entre velocidades e distâncias entre nebulosas para as quais velocidades foram publicadas anteriormente; e a relação parece dominar a distribuição de velocidades. A fim de investigar o assunto em uma escala muito maior, o Sr. Humason,

<sup>23</sup>[N.T.]:  $v_s$  corresponde à projeção, na direção de observação de uma galáxia, da velocidade  $\vec{v}_{R\odot}$  do sistema de referência das galáxias em relação ao Sol.

<sup>24</sup>[N.T.]: A distância  $r$  de uma galáxia pode ser estimada a partir da expressão  $rK + v_s = v$ , adotando-se  $K = 500$  km/s por megaparsec.

<sup>25</sup>[N.T.]: As magnitudes absolutas visuais totais indicadas nesta coluna são todas negativas, embora só tenha sido incluído explicitamente o sinal negativo para a primeira e a última galáxia, bem como para o valor médio da grandeza.

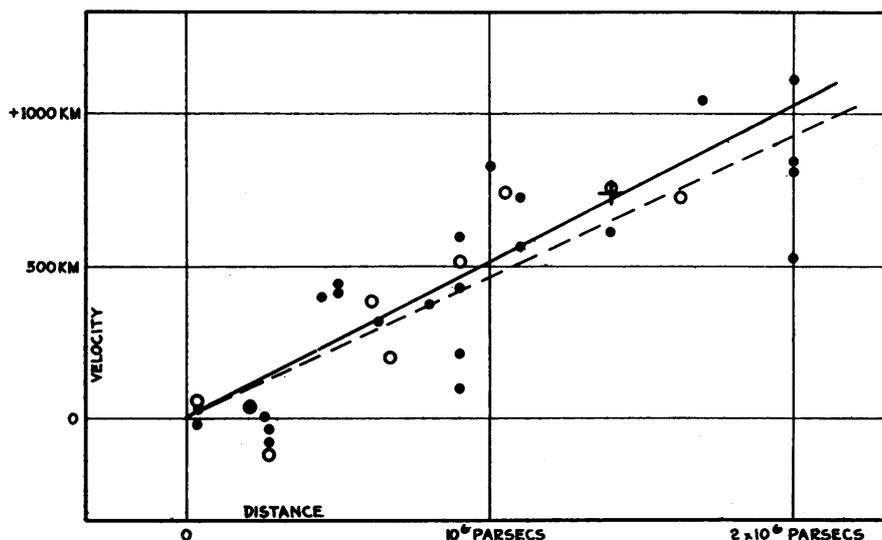


Figura 1

Relação Velocidade-Distância entre Nebulosas Extragalácticas.

As velocidades radiais,<sup>26</sup> corrigidas quanto ao movimento solar, foram plotadas contra as distâncias estimadas a partir das estrelas envolvidas e das luminosidades médias de nebulosas em um aglomerado. Os discos pretos e a linha cheia representam a solução para o movimento solar usando as nebulosas individualmente; os círculos e a linha tracejada representam a solução combinando as nebulosas em grupos;<sup>27</sup> a cruz representa a velocidade média correspondente à distância média de 22 nebulosas cujas distâncias não puderam ser estimadas individualmente.

em Monte Wilson, iniciou um programa de determinação de velocidades das nebulosas mais distantes que podem ser observadas com confiança. Estas, naturalmente, são as nebulosas mais brilhantes em aglomerados de nebulosas. O primeiro resultado definido [4],  $v = 3779$  km/s para N. G. C. 7619, é totalmente consistente com as presentes conclusões. Corrigida quanto ao movimento solar, esta velocidade vale +3910, a qual, com  $K = 500$ , corresponde a uma distância de  $7,8 \times 10^6$  parsecs. Visto que a magnitude aparente vale 11,8, a magnitude absoluta a tal distância vale  $-17,65$ , que é da ordem correta para as nebulosas mais brilhantes em um aglomerado. Uma distância preliminar, derivada independentemente do aglomerado do qual esta nebulosa parece ser membro, é da ordem de  $7 \times 10^6$  parsecs.

Novos dados esperados no futuro próximo podem modificar a relevância da presente investigação ou, se confirmatórios, conduzirão a uma solução com muitas vezes mais peso.<sup>28</sup> Por essa razão, considera-se prematuro discutir em detalhes as consequências óbvias dos presentes resultados. Por exemplo, se o movimento solar em relação aos aglomerados representa a rotação do sistema galáctico, este movimento poderia ser subtraído dos resultados para as nebulosas e o resto representaria o movimento do sistema

<sup>26</sup>[N.T.]: Na Figura 1, reproduzida do artigo original de Hubble, embora a unidade exibida no eixo das velocidades radiais seja km, os valores utilizados de fato estão em km/s.

<sup>27</sup>[N.T.]: As retas correspondentes a cada solução foram plotadas a partir da função  $v_r = Kr$  na qual  $v_r$  é a velocidade radial calculada no sistema de referência das galáxias e  $r$  a distância, utilizando-se os valores de  $K$  encontrados ao se resolver as equações de condição.

<sup>28</sup>[N.T.]: Em julho de 1931, Hubble publicou, em conjunto com Milton Humason (1891-1972), o artigo *The velocity-distance relation among extra-galactic nebulae* no volume 74 do *Astrophysical Journal*, no qual a relação velocidade-distância foi reexaminada, com o acréscimo de 40 velocidades radiais e envolvendo galáxias situadas a uma distância de até 32 milhões de parsecs. Neste trabalho, a relação linear foi verificada com maior robustez e o termo  $K$  foi determinado com o valor de 558 km/s por megaparsec.

galáctico em relação às nebulosas extragalácticas.

A característica notável, no entanto, é a possibilidade de que a relação velocidade-distância possa representar o efeito de Sitter e, portanto, que dados numéricos possam ser introduzidos em discussões sobre a curvatura geral do espaço. Na cosmologia de de Sitter, deslocamentos dos espectros surgem de duas fontes, um retardamento aparente das vibrações atômicas e uma tendência geral das partículas materiais se espalharem. Esta última envolve uma aceleração e, portanto, introduz o elemento do tempo.<sup>29</sup> A importância relativa desses dois efeitos deve determinar a forma da relação entre distâncias e velocidades observadas; e, neste contexto, pode-se enfatizar que a relação linear encontrada na presente discussão é uma primeira aproximação representando uma faixa restrita de distâncias.

## Referências

- [1] E. P. Hubble, *Extra-galactic nebulae*, *The Astrophysical Journal* **64**, 321 (1926), reimpresso em *Contributions from the Mount Wilson Observatory*, **324**, 1 (1926).
- [2] H. Shapley e A. Ames, *A Study of a Cluster of Bright Spiral Nebulae*, Harvard College Observatory Circular **294**, 1 (1926). Disponível em <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1926HarCi.294...1S>, acesso em fev. 2024.
- [3] K. Lundmark, *The Motions and the Distances of Spiral Nebulae*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **85**, 865 (1925).
- [4] M. L. Humason, *The Large Radial Velocity of N. G. C. 7619*, *Proceedings of the National Academy of Science* **15**(3), 167 (1929).

---

<sup>29</sup>[N.T.]: Conforme esclarece Helge S. Kragh no livro *Conceptions of the Cosmos*, o cosmólogo holandês Willem de Sitter (1872-1934) obteve, em 1917, uma solução para as equações de campo cosmológicas da Relatividade Geral correspondente a um Universo sem matéria e espacialmente fechado. Este modelo previa desvios sistemáticos para o vermelho das linhas espectrais das galáxias, que tendiam a crescer com a distância ao observador (o chamado “efeito de Sitter”). No entanto, as velocidades radiais positivas associadas não eram consideradas como resultantes da expansão do espaço, pois se assumia que o modelo proposto era estático. Para de Sitter, havia a possibilidade de a densidade do Universo ser tão baixa que o seu modelo, embora desprovido de matéria, pudesse ser aplicado ao mundo real como uma aproximação de densidade nula.