

Um novo olhar para a constante de Hubble

Ranna Santana Pereira¹ e Fernando Marques de Oliveira Moucherek²

¹Universidade Estadual de Santa Cruz

²Universidade Estadual do Maranhão

Resumo

A constante de Hubble (H_0) é um parâmetro fundamental da cosmologia que descreve a velocidade com que o Universo está se expandindo atualmente, sendo este essencial para a definição da dinâmica cósmica. Contudo, os valores obtidos para H_0 apresentam uma crescente discrepância quando medidos por diferentes métodos observacionais, fenômeno conhecido na cosmologia como tensão em H_0 e sendo esse um dos desafios mais notáveis da cosmologia moderna, pois sugere que algo pode estar faltando em nosso entendimento atual do Universo ou dos métodos de medição. Este trabalho traz uma análise sobre a relevância da utilização de ondas gravitacionais na mensuração do valor da constante de Hubble, dado que sua recente detecção com contrapartida eletromagnética oferece uma nova ferramenta de medição, o que torna apropriado a mesma diante do atual panorama da tensão de H_0 . Assim, o estudo explora o histórico e o arcabouço matemático relacionados ao tema, sempre com base em fontes já publicadas na literatura científica. A conclusão destaca que a medição da constante de Hubble por meio de ondas gravitacionais resultou em um valor de $70.0_{-8.0}^{+12.0}$ km/s/Mpc. Embora esse resultado ainda tenha uma margem de incerteza considerável, ele mostra um potencial promissor para refinar e talvez solucionar a tensão existente em torno do valor da constante de Hubble, contribuindo assim para um melhor entendimento da expansão do Universo.

Abstract

The Hubble constant (H_0) is a fundamental parameter in cosmology. It describes today's expansion rate of the universe, and it is essential to the evaluation of cosmic dynamics. However, the measurements of H_0 show a discrepancy when obtained by different observational methods, a phenomenon known as the Hubble Tension. It is one of the greatest challenges of modern cosmology, since it suggests that something is missing in our current understanding of the Universe, or about our measurement procedures. This work brings an analysis on the importance of using gravitational waves when measuring the Hubble constant. Recent detections provide a new measurement tool in this discrepant scenario. Thus, this research explores the methodology and mathematical tools concerning this problem, in agreement with the literature on the topic. The conclusion highlights that the measurement of the Hubble tension via gravitational waves resulted in a value of $70.0_{-8.0}^{+12.0}$ km/s/Mpc. This result has still a considerable uncertainty margin, but it shows a great potential of refinement and a possibility to solve the Hubble tension, adding to our understating of the expansion of the Universe.

Palavras-chave: Constante de Hubble, Ondas Gravitacionais, Tensão em H_0 .

Keywords: Hubble Constant, Gravitational Waves, Hubble Tension

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v7nEspecial.53346](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v7nEspecial.53346)

1 Introdução

A constante de Hubble (H_0) representa um dos pilares fundamentais da cosmologia contemporânea, quantificando a taxa atual de expansão do Universo. Expressa em unidades de quilômetros por segundo por megaparsec (km/s/Mpc), onde 1 parsec (pc) equivale a 3,2 anos-luz, esta constante é crucial para definir a dinâmica cósmica e determinar propriedades fundamentais do Uni-

verso, incluindo sua idade, tamanho e destino final.

Por muito tempo, pensava-se que o Universo era estático e imutável [1]. No entanto, Alexander Friedmann (1888-1925) em 1922 e Georges Lemaitre (1894-1966) em 1927 encontraram soluções teóricas para as equações de Einstein que demonstravam um Universo dinâmico, porém, a concepção de Universo estático só foi mudada no início da década de 1930 após os trabalhos de

Edwin Hubble (1889 - 1953), onde foi possível perceber que há um aumento na velocidade de afastamento das galáxias em relação distância [2]. Utilizando o telescópio de Monte Wilson, Hubble fez uma descoberta muito significativa, ele observou que a Via Láctea não era a única no Universo. Os resultado de dois anos de estudos sobre nebulosas espirais (atualmente chamadas de galáxias espirais) foram publicados no início de 1925, no qual foi identificado um tipo de estrela variável, as Cefeidas, em diversas nebulosas, incluindo a galáxia conhecida atualmente como Andrômeda [3].

Com o uso de medições e a relação de período-luminosidade de Henrietta Leavitt (1868-1921)¹, Hubble conseguiu provar que Andrômeda e as demais galáxias estão muito distantes para estar dentro da Via Láctea [5]. O trabalho de Hubble permitiu concluir que o Universo está em expansão, pois a maioria dos objetos analisados por ele apresentavam velocidades positivas, ou seja, estavam se afastando do observador, e quanto mais distantes estavam, mais rápido se afastavam, ou seja, há uma relação linear entre a distância das galáxias e sua velocidade de recessão, e hoje é conhecida como Lei de Hubble-Lemaître [2]. Dessa forma, teve-se a confirmação observacional de que o Universo estava em expansão [6].

2 Um desafio na cosmologia moderna: Tensão em H_0

Apesar dos avanços e refinamentos observacionais ao longo dos anos, a determinação precisa da constante de Hubble permanece como um dos principais desafios da cosmologia moderna, uma vez que os valores obtidos dependem da metodologia observacional empregada, dando origem ao fenômeno conhecido como tensão em H_0 [7].

Para a determinação de H_0 , a comunidade científica utiliza majoritariamente duas abordagens distintas: a primeira é fundamentada na Radiação Cósmica de Fundo (RCF), a relíquia térmica do *Big Bang*, que permite mapear o estado do

Universo primordial cerca de 380.000 anos após o seu princípio [8]. A segunda baseia-se em supernovas, cujas explosões (sejam elas decorrentes do colapso de núcleos estelares isolados ou de processos termonucleares em sistemas binários) servem como indicadores de distância fundamentais para mensurar a expansão no Universo tardio [9].

Para determinar a constante de Hubble utilizando a RCF, é necessário combinar o efeito Sunyaev-Zeldovich (SZ)² com as medidas de emissão em raios-X provenientes dos aglomerados de galáxias. Já para o valor estimado por supernovas, majoritariamente são usadas as do tipo Ia, sendo o surgimento dessas supernovas advindo da transferência de massa entre as duas estrelas pertencentes a um sistema binário [9].

Supernovas Ia são velas padrão³, pois são fenômenos muito luminosos e que possuem um formato característico de sua curva de luz. Essa uniformidade permite aplicar correções empíricas para determinar sua magnitude absoluta, tornando o cálculo de distância independente de fatores externos ao objeto [12].

Para calcular o valor de H_0 através de supernovas, primeiramente é necessário estimar a distância até a mesma. Esse valor é obtido por meio da seguinte equação:

$$d = 10^{\left(\frac{m-M}{5}+1\right)}, \quad (1)$$

nessa relação, d representa a distância em parsecs, enquanto m e M correspondem às magnitudes aparente e absoluta, respectivamente. De maneira complementar, utiliza-se o cálculo do *redshift* (z), obtido através do desvio das linhas espectrais observadas em relação aos padrões de repouso medidos em laboratório. Esse deslocamento é então aplicado da seguinte forma:

²O efeito Sunyaev-Zeldovich acontece quando os fótons da Radiação Cósmica de Fundo são espalhados por elétrons no gás intra-aglomerado quente dos aglomerados de galáxias. Esse efeito resulta em uma dispersão característica na intensidade da radiação cósmica de fundo em diferentes frequências, sendo este efeito uma ferramenta valiosa para sondar o ambiente do aglomerado e as propriedades globais do Universo [10, 11].

³A vela padrão é um objeto astronômico de grande importância para o estudo da astronomia e cosmologia, trata-se de um corpo ideal que possui uma luminosidade bem conhecida e constante em todo o Universo, emitindo a mesma quantidade de luz, independentemente da distância em que se encontra [3].

¹Henrietta Leavitt foi uma astrônoma que trouxe diversas contribuições sobre as Variáveis Cefeidas. Em 1922, no observatório da Universidade de Harvard, ela descobriu que o período com que as Cefeidas mudam seu brilho, está diretamente relacionada com luminosidade verdadeira. Essa descoberta foi essencial para as descobertas de Hubble [4].

$$z = \frac{\lambda_{obs} - \lambda_{em}}{\lambda_{em}}, \quad (2)$$

a partir do valor de z , obtido da equação (2), é possível determinar a velocidade de recessão da galáxia hospedeira através da relação:

$$z = \frac{\mathbf{v}}{c}, \quad (3)$$

tendo o conhecimento da distância e a velocidade de recessão, essas informações podem ser adicionadas para então obter-se o valor da constante de Hubble. Chegamos então à seguinte equação:

$$\mathbf{v} = H_0 \cdot d. \quad (4)$$

A discrepância nos valores da constante de Hubble é evidenciada por diferentes estimativas observacionais, por exemplo, medidas baseadas na escada de distâncias cósmicas, realizadas pela colaboração SH0ES, resultam em $H_0 = 73.5 \pm 1.2 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ [13], enquanto estimativas derivadas das anisotropias da radiação cósmica de fundo, obtidas pela colaboração *Planck*, fornecem $H_0 = 67.4 \pm 0.5 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ [8]. Embora essas abordagens representem os métodos observacionais mais amplamente utilizados, determinações independentes de H_0 , como aquelas baseadas em ondas gravitacionais associadas a contrapartidas eletromagnéticas, constituem uma alternativa metodológica.

3 Relatividade Geral

Antes mesmo do estabelecimento da cosmologia observacional, Einstein já havia desenvolvido uma teoria para a descrição do campo gravitacional, a Teoria da Relatividade Geral (TRG), bem como um primeiro modelo cosmológico relativístico. A TRG teve sua formulação final em 1915, desenvolvida pelo físico alemão Albert Einstein (1879–1955), sendo esta a melhor teoria para descrever a gravidade em larga escala, ou seja, acima de 100 megaparsec (Mpc) [14]. A TRG descreve geometricamente a gravitação, e generaliza a relatividade restrita (também desenvolvida por Einstein) e a gravitação universal de Newton [15].

No contexto da Teoria da Relatividade Geral, o conceito clássico de força gravitacional é substituído pelo efeito dos corpos materiais movendo-se

em um espaço-tempo com geometria não Euclidi-ana, caracterizado pela curvatura. Nessa teoria, a matéria induz um campo gravitacional que curva o espaço-tempo, sendo descrito pelas equações de campo de Einstein:

$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}, \quad (5)$$

sendo $R_{\mu\nu}$ o tensor curvatura de Ricci, R é o escalar de Ricci, e os índices gregos $\mu, \nu = 0, 1, 2, 3$ são representações espaços-temporais, geralmente representadas como t, x, y, z . Com isso, pode-se reescrever as equações de campo de Einstein como:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}. \quad (6)$$

É pertinente observar que a equação (6) é referida como “equações” devido à sua representação compacta das 16 equações de Einstein, as quais são equações tensoriais simétricas. No lado esquerdo da igualdade há a descrição da curvatura do espaço-tempo, representada pelo tensor de Einstein $G_{\mu\nu}$, enquanto a parte direita corresponde a toda a informação energética e material do Universo, representada pelo tensor Energia-Momento $T_{\mu\nu}$. A partir dessa formulação, a gravitação deixa de ser interpretada, no sentido newtoniano, como uma força, e passa a ser entendida como uma manifestação da curvatura do espaço-tempo causada pela presença de matéria e energia. Assim, a dinâmica gravitacional passa a ser determinada pela interação entre geometria e conteúdo material, permitindo que diferentes configurações físicas do espaço-tempo sejam descritas como soluções dessas equações.

As equações de Einstein [16, 17], portanto, admitem soluções físicas diferentes dependendo das propriedades das fontes gravitacionais e da simetria do espaço-tempo a ser considerado. Em particular, quando o campo gravitacional é dinâmico e associado a distribuições de matéria aceleradas, a Teoria da Relatividade Geral de Einstein pode prever a existência de perturbações presentes na geometria do espaço-tempo [18]. Essas perturbações são conhecidas como ondas gravitacionais (OGs), constituindo uma consequência direta da natureza relativística da gravitação e representando um dos fenômenos mais notáveis previstos pela teoria e já detectados experimentalmente, sendo a primeira em 14 de setembro de 2015 atra-

vés do *Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory* (LIGO) [19].

4 Ondas Gravitacionais

Ondas gravitacionais podem ser descritas como distorções propagantes do espaço-tempo, na qual qualquer objeto massivo acelerado pode produzir ondas gravitacionais, no entanto, só é possível fazer a detecção da mesma quando estas são causadas por eventos astronômicos muito energéticos, como é o caso de supernovas, fusões de buracos negros ou estrelas de nêutrons [20]. A Figura 1 abaixo ilustra os estágios finais da fusão entre duas estrelas de nêutrons, conforme detectado no evento de ondas gravitacionais GW170817 [21].

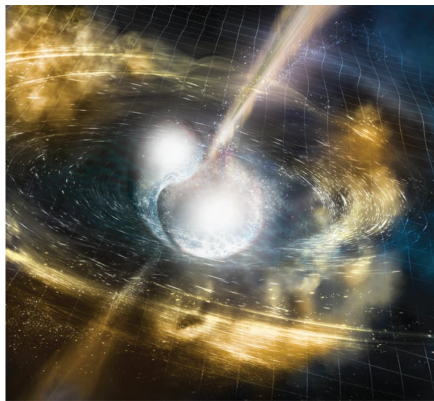


Figura 1: Representação de como seria os últimos momentos da fusão de um sistema binário de estrelas de nêutrons detectado pelo VIRGO em 2017. Retirado de [22].

As ondas gravitacionais provenientes da fusão de sistemas binários compactos fornecem uma nova maneira independente para a determinação da constante de Hubble. A partir da forma de onda e da amplitude do sinal gravitacional é possível inferir diretamente a distância luminosa em relação a fonte, caracterizando esses eventos como “sirenes padrão”⁴ [21]. Essas ferramentas cosmológicas são classificadas em duas categorias principais: sirenes padrão brilhantes e sirenes padrão escuras.

As sirenes padrão brilhantes são caracterizadas pela combinação da fonte de Ondas Gravitacionais com as ondas eletromagnéticas adqui-

⁴As sirenes padrão estão associadas às Ondas Gravitacionais e seu nome faz alusão às velas padrão, que são objetos astronômicos com luminosidade conhecida, como as cefeidas e supernovas tipo Ia

ridas a partir da fusão de estrelas de nêutrons, sendo a primeira dessa natureza a GW170817, captada pela colaboração LIGO-Virgo no dia 17 de agosto de 2017 [23], já as sirenes padrão escuras consistem em Ondas Gravitacionais sem a contrapartida eletromagnética proveniente de fusão de buracos negros binários [24]. Embora também permitam estimar a distância até a galáxia hospedeira de forma independente da escala de distâncias cósmicas tradicional, o presente estudo delimita-se ao emprego exclusivo das sirenes padrão brilhantes.

A principal vantagem dessa abordagem reside na obtenção do valor para H_0 sem a necessidade de medições astronômicas intermediárias. A partir da detecção da GW170817, foi possível estimar a constante de Hubble através da combinação da distância até a fonte, inferida a partir do sinal da onda gravitacional, com a velocidade de recessão a partir de medições do *redshift*. O valor encontrado a partir da OG foi de $70.0^{+12.0}_{-8.0}$ km/s/Mpc, com 68,3% de confiabilidade [21].

5 Resultados e Discussões

Quando têm-se OGs com contrapartida eletromagnética, consegue-se localizar sua galáxia hospedeira e, portanto, o seu *redshift*, além da análise das mesmas poderem ser usadas para estimar a distância luminosa diretamente em escalas cosmológicas, sem o uso de medições de distância astronômica intermediárias. A análise da GW170817 como sirene padrão por exemplo, permitiu uma estimativa direta da constante de Hubble, resultando no valor de $H_0 = 70.0^{+12.0}_{-8.0}$ km/s/Mpc [21]. Este resultado, embora obtido a partir de uma única detecção, ainda tem algumas implicações profundas para o debate que provém da tensão de H_0 . A figura (2) contém um gráfico que mostra o valor de H_0 através da detecção de agosto de 2017 em comparação com outras formas de obtê-lo.

No gráfico, é mostrado em verde claro o valor da constante de Hubble para os dados coletados pelo satélite espacial Planck que mede Radiação Cósmica de Fundo, em laranja os dados coletados pela SH0ES que mede supernovas, e uma curva em azul que representa o valor da constante de Hubble baseado na Onda Gravitacional.

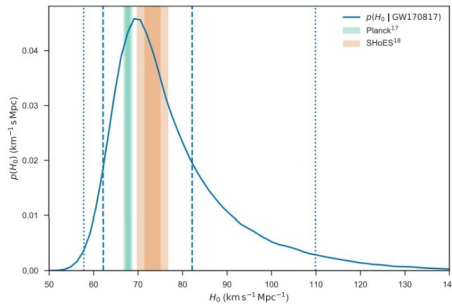


Figura 2: Medições de H_0 a partir dos dados da GW170817, Satélite Planck e Supernovas. Retirado de [21]

cional GW170817. Observa-se que o valor central (70.0) situa-se em uma região intermediária entre os resultados obtidos pela Colaboração Planck (67.4 ± 0.5 km/s/Mpc) e pelo projeto SH0ES (73.5 ± 1.2 km/s/Mpc), como já mencionados anteriormente. Devido à sua grande barra de erro, o resultado das ondas gravitacionais é estatisticamente consistente com ambos os métodos a um nível de confiança de 1σ . Contudo, a importância deste resultado não reside na sua precisão atual, mas na sua independência metodológica em relação aos demais.

A partir da detecção da Onda Gravitacional foi possível localizar no céu primeiramente 31 graus quadrados a uma distância luminosa de 40^{+8}_{-8} Mpc com massa equivalente as de uma estrela de nêutrons. Com isso, eles concluíram que se tratava de uma fusão de um sistema binário de estrela de nêutron localizado na galáxia NGC 4993 [25].

A galáxia NGC 4993 reside em um grupo de galáxias cuja velocidade de recessão do centro de massa em relação a Radiação Cósmica de Fundo é de 3327 ± 72 km/s. Para calcular a constante de Hubble foi utilizado a eq.(4), onde para obter o valor de v , assumiu-se que todas as galáxias do grupo estavam todas na mesma distância e com mesma velocidade, portanto, mediante os cálculos, para o medição de H_0 assumiu-se $v = 3.017 \pm 166$ km/s, com uma incerteza de 68,3 %, em parte, essa dificuldade de mensurar o valor da velocidade da galáxia é um dos principais fatores para o alto valor de incerteza da constante de Hubble [21].

Até o momento, GW170817 é a única detecção de onda gravitacional com contrapartida eletromagnética advinda de um sistema binário de es-

trelas de nêutrons. Esse evento, no entanto, marcou o início da astronomia multimensageira e, a partir de detecções similares a ela, como sirenes padrão, será possível entender melhor o Universo e trazer melhor esclarecimento acerca da tensão de Hubble.

6 Conclusão

Ao decorrer deste trabalho, observa-se que as detecções de Ondas Gravitacionais marcam o começo de uma nova era no campo da astronomia, e o uso da mesma representa uma inovação metodológica com grande potencial para a cosmologia. A sirene padrão GW170817 mostrou-se uma alternativa viável às abordagens tradicionais, e apesar da incerteza significativa, os resultados são consistentes com os métodos existentes, abrindo caminho para uma possível resolução da tensão em H_0 a partir de uma abordagem multimensageira.

Sobre os autores

Ranna Santana Pereira (rspereira.profisica@uesc.br) é graduada em Física pela Universidade Estadual do Maranhão (UEMA). Atualmente, é mestranda na Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC), onde desenvolve pesquisas na área de Astrofísica Extragaláctica. Integrante do grupo de pesquisa Astrofísica de Grandes Levantamentos, vinculado à Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS).

Fernando Marques de Oliveira Moucherek (fernando@fisica.uema.br) é graduado em Física pela Universidade Federal do Maranhão (UFMA), com mestrado e doutorado em Física pela UFMA e Universidade de Brasília (UnB). É professor adjunto da Universidade Estadual do Maranhão (UEMA) desde 2009, atuando no Curso de Física Licenciatura. Coordena o Laboratório de Astronomia OBAFIS, voltado à divulgação científica em Astronomia, e o Mestrado em Engenharia Aeroespacial da UEMA.

Referências

- [1] D. Soares, *O universo estático de Einstein*, Revista Brasileira de Ensino de Física **34**, 1302 (2012).
- [2] E. Hubble, *A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae*, Proceedings of the national academy of sciences **15**(3), 168 (1929).
- [3] B. W. Carroll e D. A. Ostlie, *An introduction to modern astrophysics* (Cambridge University Press, 2017).
- [4] S. P. Maran, *Astronomia para leigos* (Alta Books Editora, 2012).
- [5] L. M. KRAUS, *Um universo que veio do nada: porque há criação sem Criador*, São Paulo: Paz e Terra (2013).
- [6] G. P. d. Silva Neto, *Estimando parâmetros cosmológicos a partir de dados observacionais*, Revista Brasileira de Ensino de Física **40**(2) (2018).
- [7] K. Agatsuma, *The expansion of the universe in binary star systems*, Physics of the Dark Universe **30**, 100732 (2020).
- [8] N. Aghanim et al., *Planck 2018 results-VI. Cosmological parameters*, Astronomy & Astrophysics **641**, A6 (2020).
- [9] E. Scannapieco e L. Bildsten, *The type IA supernova rate*, The Astrophysical Journal Letters **629**(2), L85 (2005).
- [10] J. E. Carlstrom, G. P. Holder e E. D. Reese, *Cosmology with the Sunyaev-Zel'dovich effect*, Annual Review of Astronomy and Astrophysics **40**(1), 643 (2002).
- [11] Y. Rephaeli, S. Sadeh e M. Shimon, *The sunyaev-zeldovich effect*, La Rivista del Nuovo Cimento **29**(12), 1 (2006).
- [12] M. M. Phillips, *The absolute magnitudes of Type IA supernovae*, Astrophysical Journal, Part 2-Letters (ISSN 0004-637X), vol. 413, no. 2, p. L105-L108. **413**, L105 (1993).
- [13] A. G. Riess et al., *A comprehensive measurement of the local value of the Hubble constant with 1 km s⁻¹ Mpc⁻¹ uncertainty from the Hubble Space Telescope and the SH0ES team*, The Astrophysical journal letters **934**(1), L7 (2022).
- [14] O. F. Piattella et al., *O artigo fundador da teoria da relatividade restrita*, Cadernos de Astronomia **1**(1), 157 (2020).
- [15] G. Matsas, *Relatividade geral*, Revista USP (66), 22 (2005).
- [16] A. Einstein, *Die feldgleichungen der gravitation*, Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften 844–847 (1915).
- [17] A. Einstein, *Näherungsweise integration der feldgleichungen der gravitation*, Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften 688–696 (1916).
- [18] C. Misner, Thorne K and Wheeler *JA/Gravitation* (1973).
- [19] J. M. F. Bassalo e M. Cattani, *Deteção de ondas gravitacionais*, Caderno Brasileiro de Ensino de Física **33**(3), 879 (2016).
- [20] K. S. Thorne, *Gravitational waves*, arXiv preprint gr-qc/9506086 (1995).
- [21] DLT40 Collaboration et al., *A gravitational-wave standard siren measurement of the Hubble constant*, Nature **551**(7678), 85 (2017).
- [22] M. C. Miller e N. Yunes, *The new frontier of gravitational waves*, Nature **568**(7753), 469 (2019).
- [23] S. Palit, *Multi-Messenger Astronomy in the GW Era*, Advances in Modern and Applied Sciences 31 (2022).
- [24] S. Borhanian et al., *Dark sirens to resolve the Hubble–Lemaître tension*, The Astrophysical Journal Letters **905**(2), L28 (2020).
- [25] B. P. Abbott et al., *Multi-messenger observations of a binary neutron star merger*, The Astrophysical Journal Letters **848**(2), L12 (2017).