

Tensões cosmológicas: status atual e perspectivas futuras

Leila L. Graef

Universidade Federal Fluminense

Resumo

Nos últimos anos tem sido reportada na literatura uma crescente discrepância (tensão) nos valores de importantes parâmetros cosmológicos quando inferidos através de diferentes observações. Além de ser um possível indicativo de problemas no Modelo Padrão da Cosmologia, ou na análise dos dados observacionais, a tensão coloca em questão a consistência de certos procedimentos tipicamente adotados na cosmologia. O problema da tensão na constante de Hubble H_0 é considerado por muitos como um dos problemas mais pertinentes da cosmologia atual, e o mesmo está relacionado a um segundo problema, a tensão no parâmetro σ_8 , associado à amplitude das flutuações lineares da matéria. Aqui serão discutidas algumas das razões pelas quais este problema alcançou tamanha relevância, sendo responsável por grande parte dos esforços na cosmologia moderna. Será apresentado também um breve panorama dos principais cenários que têm sido consideradas na tentativa de abordar tais problemas do ponto de vista da cosmologia. Também serão discutidos os principais desafios e perspectivas futuras nesta direção.

Abstract

In recent years, a growing discrepancy (tension) in the values of important cosmological parameters when inferred through different observations has been reported in the literature. In addition to being a possible indication of problems in the Standard Model of Cosmology, or in the analysis of observational data, the tension calls into question the consistency of certain procedures typically adopted in cosmology. The problem of tension in the Hubble constant H_0 is considered by many to be one of the most pertinent problems in current cosmology, and it is related to a second problem, the tension in the parameter σ_8 , associated with the amplitude of linear fluctuations of the matter. Here we will discuss some of the reasons why this problem has achieved such relevance, being responsible for a large part of the efforts in modern cosmology. A brief overview of the main scenarios that have been considered in an attempt to address such problems from the point of view of cosmology will also be presented. The main challenges and future perspectives in this direction will also be discussed.

Palavras-chave: cosmologia, tensões cósmicas, energia escura

Keywords: cosmology, cosmic tensions, dark energy

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v5nEspecial.44961](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v5nEspecial.44961)

1 Introdução

A cosmologia pode estar em uma encruzilhada. Dados precisos da Radiação Cósmica de Fundo (RCF) fornecem a condição inicial para a evolução subsequente da formação das estruturas no Universo. Podemos então usar o modelo cosmológico padrão atual, chamado de modelo Λ CDM (Λ *Cold Dark Matter*) para obter uma previsão para a estrutura em larga escala do Universo recente (como a distribuição de galáxias). As observações da estrutura em larga escala do Universo oferecem, assim, um “teste de ponta a ponta” dessa previsão.¹ Há, no entanto, indicações de que este teste de ponta a ponta possa estar

falhando. A evidência mais robusta vem da chamada “tensão na constante de Hubble (H_0)”, que se refere à discrepância no valor da constante de Hubble inferido por diferentes observações. A situação da tensão, conforme relatada em 2016, é ilustrada na Fig. 1 (retirada da Ref. [1]). Se compararmos o método astrofísico da escada de distâncias para medidas locais, um valor de $H_0 = 72,26 \pm 1,19 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ é encontrado, resultando em uma tensão de $3,7\sigma$ com o valor menor encontrado nos dados da RCF em 2016 [1–3]. A figura 1 mostra a função densidade de probabilidade (posterior) de H_0 usando o método de calibração da luminosidade absoluta de SNIa com base no *Tip of Red Giant Branch* - TRGB (curva vermelha) [1]; e com base em Cefeidas [2] (curva azul). O

¹E.Komatsu, [presentation hetdex-pfs](#)

valor obtido por Planck-2016 para de H_0 [3] é mostrado em preto.

Ao se pensar na tensão em H_0 , um outro parâmetro em particular que deve ser levado em consideração é o σ_8 . Este parâmetro é inferido tomando o espectro de potências da matéria na escala de $8 h^{-1} Mpc$, e o mesmo nos dá informações sobre como as flutuações da matéria crescem desde o universo primordial. Os dados do Planck, considerando o modelo padrão, estimam o valor de $\sigma_8 = 0,8099 \pm 0,0059$ [4]. Enquanto isso, medições de estruturas de larga escala feitas localmente por meio de lentes gravitacionais fracas pelo *Kilo-Degree Survey* (KiDS-1000) vinculam o valor $\sigma_8 = 0,766^{+0,021}_{-0,024}$ (veja Ref. [5]). Isso representa uma discrepância da ordem de 3σ a 4σ , ou seja, essa corresponde a uma segunda tensão na cosmologia que tem gerado preocupação. Ocorre que, como discutido na Ref. [6], ao se tentar aliviar a tensão em H_0 com uma nova física (um modelo cosmológico além do padrão) comumente a tensão em σ_8 sofre uma piora. Esta é a tendência observada na maioria dos modelos. Isto nos mostra que, conforme discutido na Ref. [6], o problema das tensões em H_0 e σ_8 devem ser analisados de forma conjunta.

Iremos discutir a seguir como a situação das duas tensões tem evoluído ao longo do tempo, e as propostas que têm surgido no contexto da cosmologia para abordá-las. Iniciaremos discutindo a tensão em H_0

2 A tensão em H_0

Após vários anos de análises e aprimoramento dos dados, a tensão no valor previsto para H_0 entre os dados da RCF e os vínculos diretos não só persistem como vão aumentando com o tempo em diversas análises. Isso pode ser visto claramente na Fig.2 (retirada da Ref. [7]), que mostra uma compilação das previsões para a constante de Hubble a partir de medições relativas ao universo primordial e tardio. Nesta figura são mostrados valores recentes de H_0 vinculados pelo Planck 2018 [4], junto com dados de DES+BAO+BBN, comparados com os vínculos recentes das medições do universo tardio. Entre as medições tardias podemos citar os resultados das colaborações SH0ES, CCHP, MIRAS. Da Fig.2 podemos ver uma diferença de mais de 4σ (e menos de 6σ) entre os vínculos advindos de fontes primordiais e tardias. As duas previsões independentes baseadas nos dados primordiais do Universo são mostrados no

topo esquerda, enquanto o painel do meio mostra medições do Universo tardio com três variantes do método de escada de distância local (SH0ES=Cepheids; CCHP=TRGB; MIRAS). O painel inferior mostra combinações das medições (desconsiderando a covariância entre os dados). O valor exato da discrepância depende dos dados considerados e do tratamento dado aos mesmos, e portanto diferentes valores serão encontrados na literatura, implicando em um aumento ou diminuição a tensão. Embora algumas análises recentes chegaram a reivindicar um significativo alívio da tensão, usualmente esta interpretação está associada ao aumento da barra de erro nas medidas, como no caso do trabalho da Ref. [8] por exemplo. Apesar da falta de um consenso sobre o valor exato da tensão, a grande maioria dos trabalhos concorda que atualmente a discrepância entre as medições é da ordem de 4σ a 6σ [9].

O que pode estar falhando? Pelo que entendemos, as possíveis causas da discrepância são: Ou nossas medições de distância e posterior análise de dados estão incorretas; ou o modelo cosmológico que usamos para ajustar todas essas distâncias estão incompletos. Supondo que as medições estejam corretas, encontrar uma solução requer, portanto, descrever um modelo cosmológico que possa fitar as principais distâncias cosmológicas conhecidas. Neste contexto várias possibilidades têm sido investigadas. Entre elas podemos mencionar abordagens que incluem desde variar o número de espécies relativísticas do universo ou o comportamento da energia escura e/ou da matéria escura até adicionar curvatura espacial no universo, ou mesmo alterar a temperatura de monopolo da RCF. Outra possibilidade importante neste contexto é considerar um curto período de domínio da energia escura no universo antigo (os chamados modelos de *early dark energy*), ou também considerar alternativas à inflação padrão (para um *review* das várias propostas veja por exemplo as Refs. [9] e [10]). Apesar dos esforços para resolver este problema, o único consenso até agora foi que medições futuras juntamente com uma melhor compreensão do problema são necessárias para esclarecer a causa da tensão.

3 A tensão em σ_8

Ao se modificar a taxa de expansão nos primeiros instantes do universo, ou ao adicionar nova física na era pós-recombinação, ou mesmo mudando a igual-

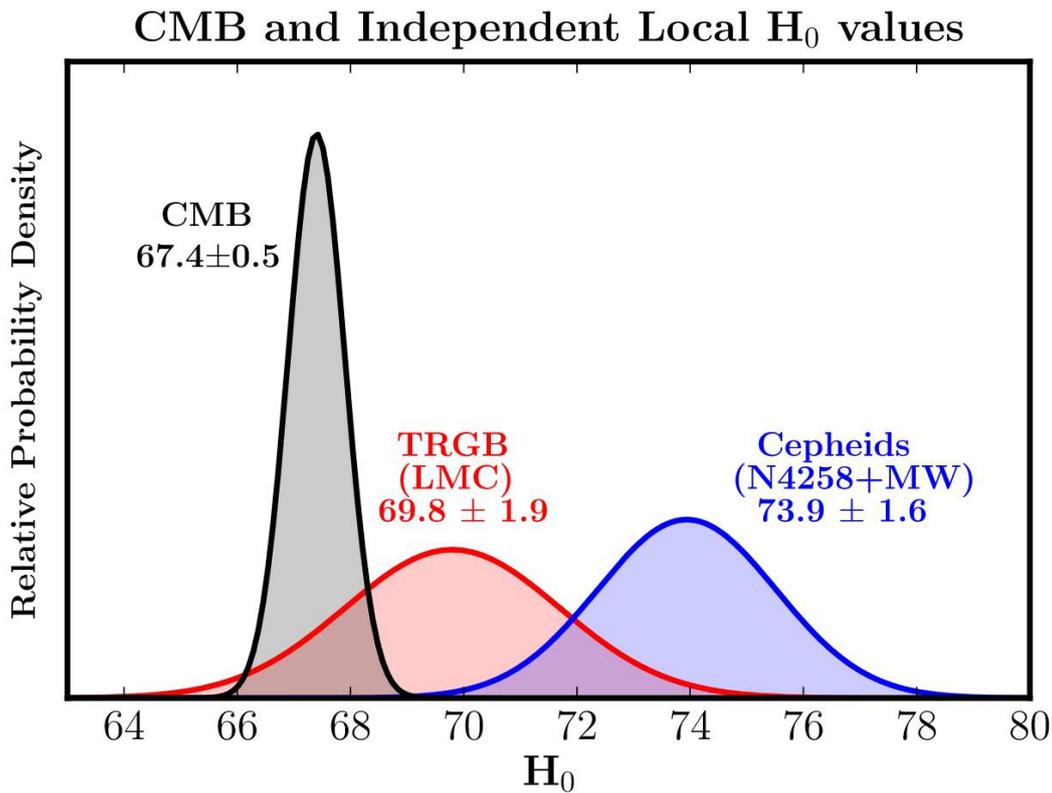


Figura 1: Fig. retirada da Ref. [1]. A figura mostra a função densidade de probabilidade (posterior) de H_0 usando o método de calibração da luminosidade absoluta de SNIa com base no *Tip of Red Giant Branch* - TRGB (curva vermelha) [1]; e com base em Cefeidas [2] (curva azul). O valor obtido por Planck-2016 [3] para H_0 é mostrado em preto.

dade matéria-energia escura para antes do previsto no modelo Λ CDM, o valor inferido para a constante H_0 é deslocado para um novo valor. No entanto, o valor da taxa de expansão atual do universo não pode ser inferido sem considerar toda a evolução do universo, pois o mesmo depende dos demais parâmetros que descrevem a evolução do universo. Devemos lembrar que $H_0 \equiv H(z=0)$ é meramente um valor em um instante, de uma descrição dinâmica da expansão cosmológica. Portanto, o mesmo deve ser estudado em conjunto com os demais parâmetros cosmológicos, especialmente o parâmetro σ_8 , cujo vínculo é fortemente afetado pelo valor de H_0 .

A tensão em σ_8 é ilustrada na figura 3, a qual mostra os contornos de confiança para σ_8 obtidos por diferentes colaborações. Esta tensão também pode ser ilustrada pela Figura 4, a qual mostra as barras de erro no parâmetro S_8 , o qual é relacionado com o σ_8 de acordo com a definição $S_8 \equiv \sigma_8 \sqrt{\Omega_m/0.3}$. Na figura vemos que, preferindo um valor mais alto para o parâmetro S_8 existem as medições dos dados do primeiro ano do HSC, para os quais $S_8 = 0,804^{+0,032}_{-0,029}$.

Já prevendo um valor inferior, $S_8 = 0,703 \pm 0,045$, existe a estimativa do BOSS *Galaxy Power Spectrum* [11]. Foi apontado [12] que essa tensão poderia estar relacionada ao excesso de lente medido pelo Planck, vinculando um S_8 maior. No entanto, ACT+WMAP também encontrou um valor grande para $S_8 = 0,840 \pm 0,030$, mesmo sem vincular uma amplitude peculiar para o lenteamento.

Como mencionado anteriormente, ao se tentar aliviar a tensão em H_0 considerando-se extensões do modelo Λ CDM, a nova física que aumenta a taxa de expansão atual geralmente suprime a formação de estruturas, o que leva a um aumento da densidade de matéria escura fria, elevando a tensão em σ_8 na maioria dos modelos. Esta dinâmica ficará mais clara a seguir ao discutirmos como extensões do Modelo Padrão alteram as principais grandezas cosmológicas envolvidas no problema da tensão.

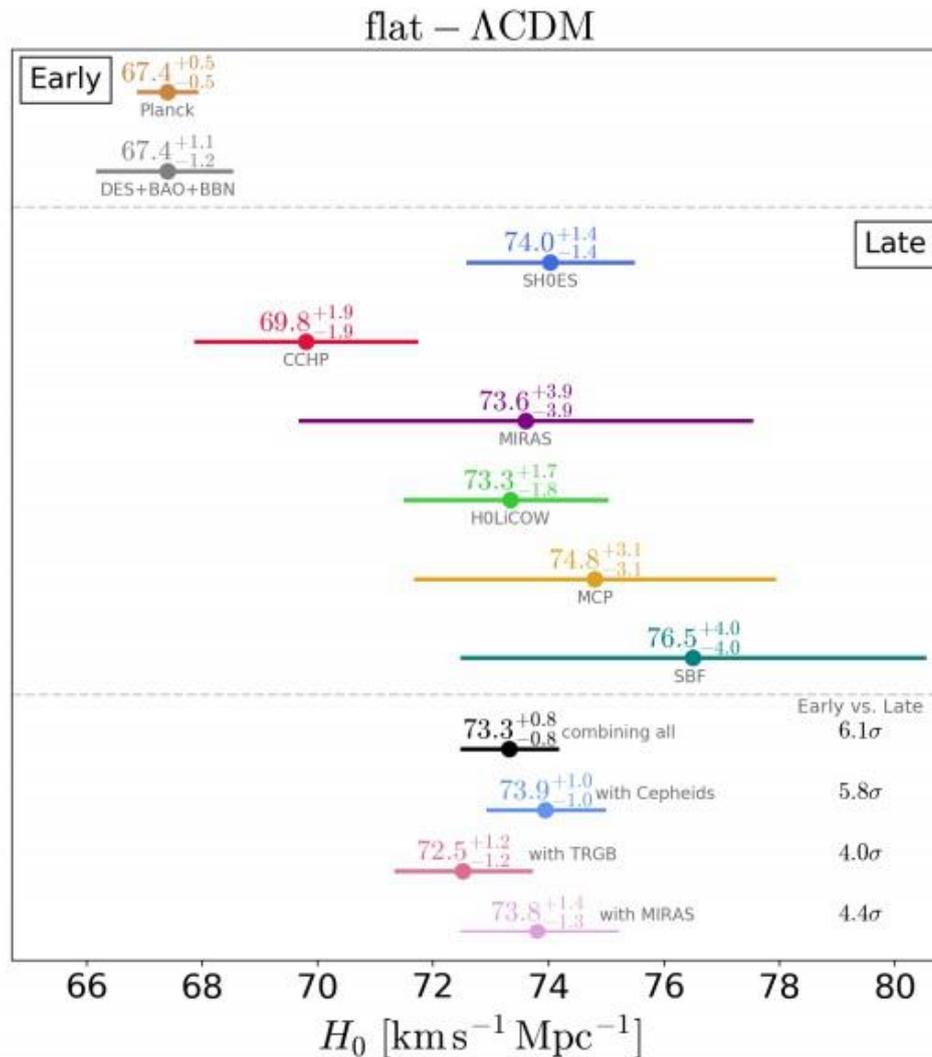


Figura 2: Fig. Retirada da Ref. [7]. Compilação de previsões para a constante de Hubble retiradas da literatura recente. Duas previsões independentes baseadas em os dados iniciais do Universo [4] são mostrados no topo esquerda, enquanto o o painel do meio mostra medições do Universo tardio com três variantes do método de escada de distância local. O painel inferior mostra combinações das medições (desconsiderando a covariância entre os dados).

4 Extensões do modelo padrão da Cosmologia

A origem das tensões ainda é tema de muito debate. Embora possam ser o resultado de efeitos sistemáticos desconhecidos, elas poderiam ser consequências também de uma nova física além do modelo Λ CDM. Muitos modelos foram propostos na literatura com o objetivo de resolver uma ou mesmo ambas as tensões. Para a tensão no parâmetro de Hubble, esses modelos foram classificados como soluções de tempos antigos quando uma nova física pré-recombinação é adicionada, e como soluções tardias para o caso de extensões pós-recombinação.

As soluções de tempos antigos visam aumentar o tamanho físico do horizonte sonoro no último espa-

lhamento, o que leva a um aumento em H_0 . Isso pode ser feito de diferentes maneiras, por exemplo, aumentando $H(z)$ antes da recombinação [13], [14] considerando componentes adicionais, alterando o *redshift* do último espalhamento, ou o *redshift* da igualdade matéria-radiação ao considerar uma nova física na era pós-recombinação [15–19], ou mesmo alterando a velocidade do som do fluido fóton/bárion (para uma revisão veja [10, 20]).

É possível também se considerar modificações ainda mais antigas na física durante a era da inflação, as quais poderiam implicar em um valor ainda mais alto para H_0 [21–23]. Por outro lado as soluções tardias pra tensão de H_0 buscam aumentar a taxa

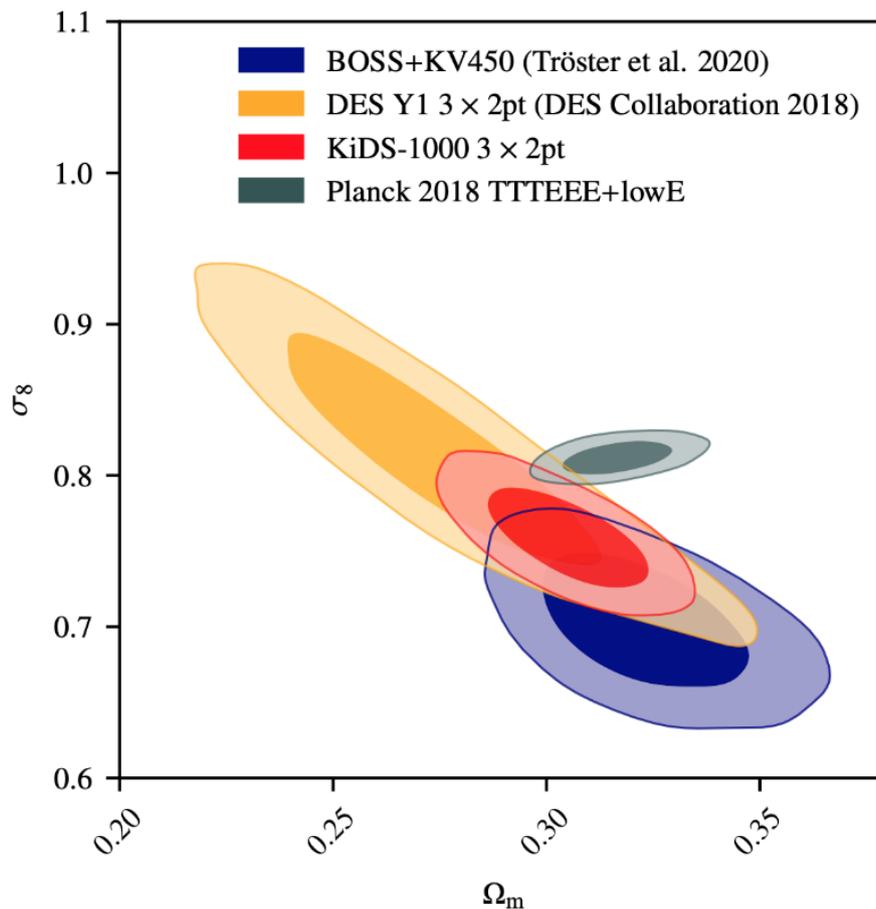


Figura 3: Contornos de confiança (68% CL e 95% CL) de σ_8 e Ω_m obtidos por diferentes colaborações (Figura retirada da Ref. [11]).

de expansão atual de maneira mais direta [9, 19, 24]. Já com relação à tensão em σ_8 , a maioria dos modelos propostos para resolvê-la são baseados em uma diminuição do valor previsto para Ω_m ou em uma supressão tardia do espectro da matéria.

Grande parte das extensões do modelo Λ CDM propostas neste contexto exibem uma correlação positiva entre os parâmetros H_0 e σ_8 , onde um aumento em H_0 implica em um aumento em σ_8 , ou vice versa [9, 25, 26], levando a um agravamento de uma das tensões enquanto a outra é aliviada. Existem, no entanto, algumas classes de modelos que alegam aliviar ambas as tensões. Entre eles podemos mencionar algumas classes de modelos de interação matéria/energia escuras [16–19, 27], alguns novos modelos de energia escura antiga - *new early dark energy* [28–30] (veja também Refs. [31–33]), modificações na inflação padrão [21–23], modelos com alteração tardia da equação de estado da matéria escura [15], entre outras propostas (veja também o modelo da Ref. [34]

por exemplo). No entanto estes modelos ainda merecem uma investigação mais aprofundada para serem confirmados como soluções viáveis para as tensões cosmológicas.

Embora nenhum mecanismo simples tenha sido confirmado como capaz de resolver ambas tensões, é importante se compreender melhor como cada um deles está relacionado e como eles impactam os parâmetros H_0 , r_s e σ_8 . Para ilustrar o efeito de como uma nova física no universo antigo/tardio pode impactar os parâmetros relacionados às tensões, vamos aqui tomar como exemplo os casos dos modelos com número extra de espécies relativísticas, N_{eff} (universo antigo), e também modelos de quintessência com equação de estado $w \neq -1$ (universo tardio).

Iniciando pelo primeiro exemplo, ao assumir uma geometria plana para o universo, o parâmetro de Hubble $H(z)$ pode ser relacionado ao número efetivo de espécies relativísticas N_{eff} através da expressão

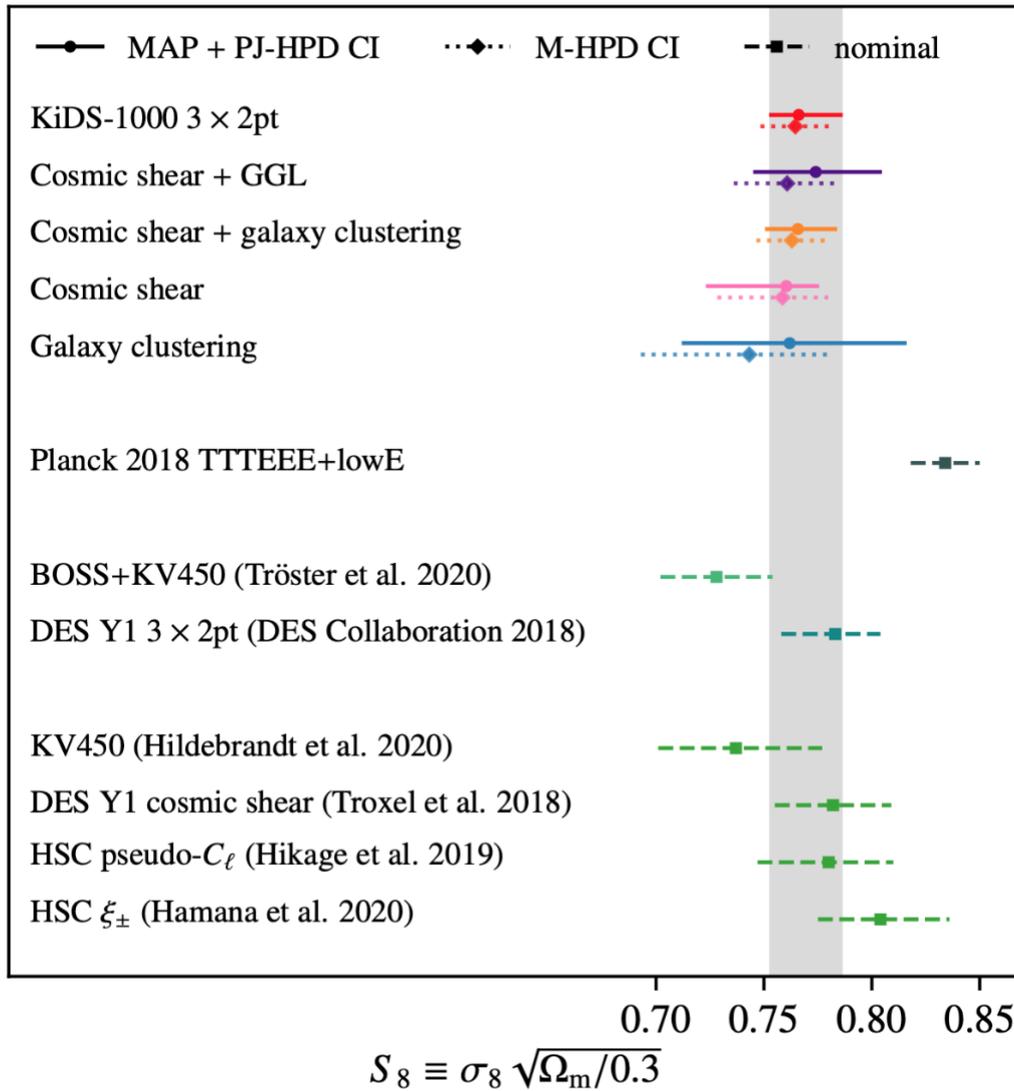


Figura 4: Gráfico mostrando as barras de erro de S_8 (68% C.L.) Figura retirada da Ref. [11]

abaixo (veja Ref. [35] para maiores detalhes),

$$\frac{H(z)}{H_0} = \left[\Omega_m (1+z)^3 + \Omega_\gamma (1 + 0.2271 N_{eff}) (1+z)^4 + \Omega_\Lambda \right]^{1/2}, \quad (1)$$

onde a densidade total de matéria Ω_m é a soma de Ω_{cdm} e Ω_b , matéria escura fria e bárions, respectivamente; Ω_γ representa a densidade de fótons (fixada pela temperatura da RCF), enquanto Ω_Λ indica a constante cosmológica. A partir da expressão acima é fácil ver como, ao alterar o valor de N_{eff} em relação ao padrão, altera-se a evolução de $H(z)$.

No que diz respeito ao universo recente, podemos ver a conexão entre o parâmetro de Hubble e a equação de estado da atual componente dominante do universo ao escrever a equação de evolução do *back-ground* como a seguir,

$$\frac{H(z)}{H_0} = \left[\Omega_m (1+z)^3 + \Omega_r (1+z)^4 + \Omega_\Lambda (1+z)^{3(1+w)} \right]^{1/2}, \quad (2)$$

onde w é a equação de estado da componente dominante do universo tardio, considerada como sendo a energia escura. Note que estamos assumindo um universo plano, portanto $\Omega_\Lambda = 1 - \Omega_m - \Omega_r$. Veja que

uma equação de estado $w = -1$ recupera a constante cosmológica, cuja evolução independe do *redshift*, enquanto que diferentes valores de w levam à evoluções diferentes para $H(z)$.

A tensão em H_0 também pode ser pensada da perspectiva de uma incompatibilidade no horizonte sonoro no último espalhamento, r_s . A estimativa da colaboração SH0ES combinada com dados de BAO+Pantheon requerem $r_s \sim 137$ Mpc, enquanto que dados do Planck assumindo o modelo Λ CDM indicam $r_s \sim 147$ Mpc. Isto significa que uma diferença de 10 Mpc ($\sim 5\%$) na estimativa do horizonte sonoro no último espalhamento poderia resolver a tensão em H_0 [36].

O horizonte sonoro no último espalhamento (*redshift* z_*) é dado pela seguinte expressão,

$$r_s = \int_{z_*}^{\infty} dz \frac{c_s(z)}{H(z)} \quad (3)$$

onde usamos $r_s(z_*) = r_s$ por simplicidade. Acima, $c_s(z)$ é a velocidade do som do fluido fóton/bárion.

Já o tamanho angular do horizonte sonoro, θ_s , é dado por,

$$\theta_s = \frac{r_s}{D_A(z_*)}, \quad (4)$$

onde a distância de diâmetro angular, D_A , é uma quantidade dependente de modelo, como mostra sua expressão abaixo,

$$D_A(z_*) = \frac{1}{1+z_*} \int_0^{z_*} dz \frac{1}{H(z)}. \quad (5)$$

Quanto menor é o tamanho angular do horizonte sonoro, mais os picos do espectro da RCF são deslocados para as menores escalas (maiores multipolos). Isto pode ser compensado ao se aumentar a taxa de expansão no universo antigo, por exemplo via uma contribuição extra á N_{eff} [37], ou ao alterar a taxa de expansão atual [20]. No primeiro caso, um aumento no número de espécies relativísticas no momento da recombinação é capaz de tanto aumentar o valor de H_0 como diminuir o valor de r_s , movendo as duas quantidades na direção correta para aliviar a tensão (embora não o suficiente para resolvê-la) [36–38]. Já no segundo caso, o valor de $D_A(z_*)$ decresce, recuperando um valor alto de θ_s consistente com o valor previsto por Planck, enquanto que r_s não é significativamente afetado.

É importante mencionar aqui um outro problema que ocorre frequentemente na abordagem usual de

modelos que consideram extensões do Modelo Padrão para aliviar as tensões. Um procedimento comum consiste em adicionar novos parâmetros além dos 6 do Λ CDM, o que aumenta a complexidade do modelo cosmológico. No caso em que se deixam esses parâmetros livres para variar na análise, isto pode resultar em grandes incertezas em H_0 . Isto muitas vezes é considerado (questionavelmente) como um alívio na tensão por permitir com estes dados um espaço de parâmetros mais próximo do previsto pelas medidas locais, porém sem um verdadeiro deslocamento no valor médio de H_0 inferido via dados da RCF (para uma melhor discussão sobre o assunto veja Ref. [9]). Ou seja, este procedimento tende a aumentar a barra de erro devido ao parâmetro livre, causando um aparente relaxamento na tensão devido ao alargamento no posterior, em vez de uma mudança genuína no valor central de H_0 .

Para evitar este problema, em alguns trabalhos foi considerada uma abordagem empírica que assume valores específicos fixos diferentes do padrão nas extensões do Λ CDM (ao invés de considerar parâmetros livres) [25, 39]. A partir daí analisou-se como os parâmetros importantes no contexto da tensão variavam de acordo. Considerando este tipo de análise, no trabalho da Ref. [6] propusemos uma ferramenta ilustrativa para auxiliar na classificação e comparação de grandes quantidades de modelos em relação às suas performances com respeito à ambas as tensões. Neste trabalho fixamos diferentes valores para o parâmetro extra de diversas extensões do modelo padrão e através de uma análise estatística os valores inferidos para H_0 e σ_8 para cada cenário foram plotados. Foi mostrado como o plano H_0/σ_8 resultante é capaz de ilustrar claramente a situação da correlação entre H_0 e σ_8 em cada modelo. Este método pode ser usado como diagnóstico para se analisar candidatos a resolverem as tensões.

Devido á frequente correlação observada entre a tensão em H_0 e σ_8 , é importante ressaltar a necessidade de se analisar ambas as tensões em conjunto, para buscar entender quais classes de modelos e com quais características vão na direção correta do espaço de parâmetros para quebrar a degenerescência entre as duas tensões. Tais análises, além de auxiliar em uma compreensão geral do papel de cada parâmetro extra nas tensões, também deverão auxiliar na compreensão do papel de cada conjunto de dados em vincular os parâmetros importantes neste contexto. Tais esforços teóricos nos permitirão fazer melhor pro-

veito da grande quantidade de dados observacionais que estão por vir e que deverão dar grandes contribuições neste contexto. Um melhor entendimento do problema das tensões cosmológicas, em última instância nos permitirá testar a consistência de procedimentos fundamentais adotados na cosmologia.

5 Perspectivas

O problema das tensões é um dos problemas da cosmologia que mais tem ganhado atenção na literatura recente. Após anos de análises observacionais, e diversos modelos sendo propostos, a tensão se mantém um crescente problema. Dado o grande número de modelos propostos neste contexto, o momento é oportuno para se buscar, a partir do panorama de modelos construídos, análises gerais e comparativas [6], e que considerem ambas tensões em conjunto, a fim de compreender quais características favorecem os modelos mais promissores. Isto também deverá ajudar a esclarecer qual o papel dos mecanismos extras ao modelo padrão considerados no universo antigo comparado aos mecanismos considerados no universo recente, quais combinações de mecanismos primordiais e tardios são mais promissoras e por quê.

Na parte observacional as perspectivas são bastante promissoras. Em um futuro próximo são esperadas medições da taxa de expansão do universo e da história de crescimento nos experimentos mais diversos. Para os vínculos em H_0 , na próxima década, um papel importante será desempenhado pelas sirenes padrão (GWSS), o análogo gravitacional das velas padrão astronômicas [40–43]. As observações da fusão do sistema binário de estrelas de nêutrons GW170817231 forneceu recentemente o valor $H_0 = 70_{-8}^{+12} \text{ km/s/Mpc}$ [44]. Embora este vínculo ainda possua grande incerteza, tal método tem a vantagem de não requerer qualquer forma de “escada de distância” cósmica além de ser mais independente do modelo. Uma incerteza de 1-2% em H_0 é esperada nos próximos anos, a partir da análise de eventos de ondas gravitacionais com equivalentes eletromagnéticos.

Em outro contexto, um papel importante também deverá ser desempenhado pelos telescópios SKA e medição de lentes gravitacionais fracas usando mapeamento de intensidade de 21 cm [45–47]. Um grande avanço será dado também pelos futuros experimentos de CMB, como o Observatório Simon ou

CMB-S4 [48], que combinado com gigantescos levantamentos cósmicos, como Euclid e LSST [49, 50] espera-se que atinja uma incerteza de 0,15% na estimativa de H_0 . Todos destes esforços deverão revelar uma causa sistemática ou levar a uma revisão do Modelo Padrão da Cosmologia.

A próxima década construirá a geração de experimentos que dará início a uma nova era da cosmologia. Com ela o Modelo Padrão e suas extensões poderão ser testados de forma sem precedentes. Veremos se isto nos mostrará uma resolução deste cenário de tensão crescente, ou se nos indicará um novo caminho na busca da compreensão destas questões.

Agradecimentos

L.L.G agradece ao suporte da Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ), Grant No. E-26/201.297/2021 e ao CNPq Grant No. 307636/2023-2.

Sobre a autora

A autora Leila L. Graef (leilagraef@id.uff.br) fez sua pós-graduação na Universidade de São Paulo e pós doutorado na McGill University, no Observatório Nacional e na Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Atualmente é Professora Adjunta do Instituto de Física da Universidade Federal Fluminense (UFF), onde leciona, orienta estudantes de pós-graduação e desenvolve pesquisa. É membro do Cosmoverse e da colaboração NANOGrav. Tem experiência em Cosmologia e Gravitação, atuando principalmente nos seguintes temas: universo primordial, gravitação quântica, ondas gravitacionais estocásticas, energia escura e o problema das tensões cosmológicas.

Referências

- [1] W. L. Freedman et al., *The Carnegie-Chicago Hubble Program. VIII. An Independent Determination of the Hubble Constant Based on the Tip of the Red Giant Branch*, *The Astrophysical Journal* **882**(1), 34 (2019).

- [2] A. G. Riess et al., *A 2.4% determination of the local value of the Hubble constant*, *The Astrophysical Journal* **826**(1), 56 (2016).
- [3] Planck Collaboration et al., *Planck 2015 results. XIII. Cosmological parameters*, *Astronomy & Astrophysics* **594**, A13 (2016). [ArXiv:1502.01589](#).
- [4] Planck Collaboration et al., *Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters*, *Astronomy & Astrophysics* **641**, A6 (2020). [ArXiv:1807.06209](#).
- [5] M. Asgari et al., *KiDS-1000 cosmology: Cosmic shear constraints and comparison between two point statistics*, *Astronomy & Astrophysics* **645**, A104 (2021). [ArXiv:2007.15633](#).
- [6] I. d. O. C. Pedreira et al., *Visual tool for assessing tension-resolving models in the H_0 - σ_8 plane*, *Physical Review D* **109**(10), 103525 (2024). [ArXiv:2311.04977](#).
- [7] L. Verde, T. Treu e A. G. Riess, *Tensions between the early and late Universe*, *Nature Astronomy* **3**(10), 891 (2019).
- [8] P. L. Kelly et al., *The Magnificent Five Images of Supernova Refsdal: Time Delay and Magnification Measurements*, *The Astrophysical Journal* **948**(2), 93 (2023).
- [9] E. Di Valentino et al., *In the realm of the Hubble tension—a review of solutions*, *Classical and Quantum Gravity* **38**(15), 153001 (2021). [ArXiv:2103.01183](#).
- [10] N. Schöneberg et al., *The H_0 Olympics: A fair ranking of proposed models*, *Physics Reports* **984**, 1 (2022). [ArXiv:2107.10291](#).
- [11] C. Heymans et al., *KiDS-1000 Cosmology: Multi-probe weak gravitational lensing and spectroscopic galaxy clustering constraints*, *Astronomy & Astrophysics* **646**, A140 (2021). [ArXiv:2007.15632](#).
- [12] E. Di Valentino e S. Bridle, *Exploring the Tension between Current Cosmic Microwave Background and Cosmic Shear Data*, *Symmetry* **10**(11) (2018).
- [13] M. Benetti, L. L. Graef e J. Alcaniz, *The H_0 and σ_8 tensions and the scale invariant spectrum*, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **2018**(07), 066 (2018).
- [14] L. L. Graef, M. Benetti e J. S. Alcaniz, *Primordial gravitational waves and the H_0 -tension problem*, *Phys. Rev. D* **99**, 043519 (2019).
- [15] K. Naidoo et al., *Dark matter solution to the H_0 and S_8 tensions, and the integrated Sachs-Wolfe void anomaly*, *Physical Review D* **109**(8), 083511 (2024). [ArXiv:2209.08102](#).
- [16] M. Benetti et al., *Looking for interactions in the cosmological dark sector*, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **2019**(12), 023 (2019).
- [17] H. Borges et al., *Testing the growth rate in homogeneous and inhomogeneous interacting vacuum models*, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **2023**(06), 009 (2023).
- [18] M. Benetti et al., *Dark sector interactions and the curvature of the universe in light of Planck’s 2018 data*, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **2021**(8), 014 (2021).
- [19] V. Salzano et al., *J-PAS: forecasts on interacting vacuum energy models*, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **2021**(09), 033 (2021).
- [20] L. Knox e M. Millea, *Hubble constant hunter’s guide*, *Phys. Rev. D* **101**, 043533 (2020).
- [21] J. G. Rodrigues et al., *Higgs inflation: Constraining the top quark mass and breaking the $H_0 - \sigma_8$ correlation*, *Physics Letters B* **852**, 138607 (2024). [ArXiv:2301.11788](#).
- [22] J. G. Rodrigues, M. Benetti e J. S. Alcaniz, *Possible discrepancies between cosmological and electroweak observables in Higgs Inflation*, *Journal of High Energy Physics* **2021**(11), 91 (2021). [ArXiv:2105.07009](#).
- [23] J. G. Rodrigues et al., *Probing the seesaw mechanism with cosmological data*, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **2020**(7), 007 (2020). [ArXiv:2002.05154](#).

- [24] E. Abdalla et al., *Cosmology intertwined: A review of the particle physics, astrophysics, and cosmology associated with the cosmological tensions and anomalies*, *Journal of High Energy Astrophysics* **34**, 49 (2022). [ArXiv: 2203.06142](#).
- [25] R. de Sá, M. Benetti e L. Graef, *An empirical investigation into cosmological tensions*, *European Physical Journal Plus* **137**(10), 1129 (2022). [ArXiv:2209.11476](#).
- [26] K. Jedamzik, L. Pogosian e G.-B. Zhao, *Why reducing the cosmic sound horizon alone can not fully resolve the Hubble tension*, *Communications Physics* **4**(1), 123 (2021). [ArXiv: 2010.04158](#).
- [27] E. Di Valentino et al., *Interacting dark energy in the early 2020s: A promising solution to the H_0 and cosmic shear tensions*, *Physics of the Dark Universe* **30**, 100666 (2020). [ArXiv:1908.04281](#).
- [28] J. S. Cruz, F. Niedermann e M. S. Sloth, *Cold New Early Dark Energy pulls the trigger on the H_0 and S_8 tensions: a simultaneous solution to both tensions without new ingredients*, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **2023**(11), 033 (2023). [ArXiv:2305.08895](#).
- [29] V. Pettorino, L. Amendola e C. Wetterich, *How early is early dark energy?*, *Phys. Rev. D* **87**, 083009 (2013). [ArXiv:1301.5279](#).
- [30] V. Poulin et al., *Early Dark Energy can Resolve the Hubble Tension*, *Phys. Rev. Lett.* **122**, 221301 (2019).
- [31] A. Reeves et al., *Restoring cosmological concordance with early dark energy and massive neutrinos?*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **520**(3), 3688 (2023). [ArXiv:2207.01501](#).
- [32] L. Herold e E. G. M. Ferreira, *Resolving the Hubble tension with early dark energy*, *Physical Review D* **108**(4), 043513 (2023). [ArXiv: 2210.16296](#).
- [33] L. Herold, E. G. M. Ferreira e E. Komatsu, *New Constraint on Early Dark Energy from Planck and BOSS Data Using the Profile Likelihood*, *The Astrophysical Journal Letters* **929**(1), L16 (2022).
- [34] S. Basilakos et al., *Alleviating both H_0 and σ_8 tensions in Tsallis cosmology*, *European Physical Journal C* **84**(3), 297 (2024). [ArXiv: 2308.01200](#).
- [35] M. Maggiore, *Gravitational wave experiments and early universe cosmology*, *Physics Reports* **331**(6), 283 (2000). [ArXiv:gr-qc/9909001](#).
- [36] J. L. Bernal, L. Verde e A. G. Riess, *The trouble with H_0* , *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **2016**(10), 019 (2016). [ArXiv: 1607.05617](#).
- [37] N. Arendse et al., *Cosmic dissonance: are new physics or systematics behind a short sound horizon?*, *Astronomy & Astrophysics* **639**, A57 (2020). [ArXiv:1909.07986](#).
- [38] X. Zhang e Q.-G. Huang, *Hubble constant and sound horizon from the late-time Universe*, *Phys. Rev. D* **103**, 043513 (2021).
- [39] S. Vagnozzi, *New physics in light of the H_0 tension: An alternative view*, *Physical Review D* **102**(2), 023518 (2020). [ArXiv:1907.07569](#).
- [40] B. F. Schutz, *Determining the Hubble constant from gravitational wave observations*, *Nature* **323**(6086), 310 (1986).
- [41] D. E. Holz e S. A. Hughes, *Using Gravitational-Wave Standard Sirens*, *The Astrophysical Journal* **629**(1), 15 (2005). [ArXiv:astro-ph/0504616](#).
- [42] H.-Y. Chen, M. Fishbach e D. E. Holz, *A two per cent Hubble constant measurement from standard sirens within five years*, *Nature* **562**(7728), 545 (2018). [ArXiv:1712.06531](#).
- [43] E. Di Valentino et al., *Cosmological impact of future constraints on H_0 from gravitational-wave standard sirens*, *Physical Review D* **98**(8), 083523 (2018). [ArXiv:1806.07463](#).
- [44] B. P. Abbott et al., *A gravitational-wave standard siren measurement of the Hubble constant*, *Nature* **551**(7678), 85 (2017). [ArXiv: 1710.05835](#).

- [45] A. Pourtsidou e R. B. Metcalf, *Gravitational lensing of cosmological 21 cm emission*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **448**(3), 2368 (2015).
- [46] M. Santos et al., *Cosmology from a SKA HI intensity mapping survey*, in *Advancing Astrophysics with the Square Kilometre Array (AASKA14)* (2015), 19. [ArXiv:1501.03989](#).
- [47] P. Bull et al., *Measuring baryon acoustic oscillations with future SKA surveys*, in *Advancing Astrophysics with the Square Kilometre Array (AASKA14)* (2015), 24. [ArXiv:1501.04088](#).
- [48] K. N. Abazajian et al., *CMB-S4 Science Book, First Edition* (2016). [ArXiv:1610.02743](#).
- [49] G. Fanizza, *Precision Cosmology and Hubble tension in the era of LSS surveys*, in *The Sixteenth Marcel Grossmann Meeting* (World Scientific, 2023), 1792–1802.
- [50] C. A. P. Bengaly, C. Clarkson e R. Maartens, *The Hubble constant tension with next-generation galaxy surveys*, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **2020**(5), 053 (2020). [ArXiv:1908.04619](#).