

宇宙学中的哈勃常数危机

杨术银^{1,2}, 唐宇航^{1,2}, 沙艾德·艾力^{2,3}, 杨晓峰^{2,4*}, 刘雄伟¹

¹西华师范大学物理与天文学院, 四川 南充

²中国科学院新疆天文台, 新疆 乌鲁木齐

³新疆大学物理科学与技术学院, 新疆 乌鲁木齐

⁴中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京

收稿日期: 2023年4月24日; 录用日期: 2023年5月24日; 发布日期: 2023年5月31日

摘要

本文简要介绍了哈勃常数危机以及相关研究进展。首先, 我们阐述了一些测量哈勃常数的常用方法, 然后展示了近二十年来哈勃常数的测量结果, 证实了迄今为止哈勃常数危机是真实存在的。最后我们发现相关研究通过拓展理论模型做些小的修正, 除了让模型参数的不确定度稍稍增大以外, 并没有让高红移观测数据的中心值明显地接近近邻宇宙的局域直接测量值。

关键词

哈勃常数危机, 距离阶梯, 重子声学振荡, 引力波, 引力透镜

The Hubble Constant Tension in Cosmology

Shuyin Yang^{1,2}, Yuhang Tang^{1,2}, Xahyda Ali^{2,3}, Xiaofeng Yang^{3,4*}, Xiongwei Liu¹

¹School of Physics and Astronomy, China West Normal University, Nanchong Sichuan

²Xinjiang Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Urumqi Xinjiang

³School of Physical Science and Technology, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang

⁴School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing

Received: Apr. 24th, 2023; accepted: May 24th, 2023; published: May 31st, 2023

Abstract

This paper briefly introduces the tension of Hubble constant measurements and its related progresses. Firstly, we show several normal methods of the measurement of Hubble constant. Secondly, we present the results of the Hubble constant measurement in the recent twenty years,

*通讯作者。

which confirms the Hubble constant tension really exists up to now. Finally, we find that people extend the theoretical model with small modifications and then make the uncertainty of the model parameters mildly larger than before. However, those approaches didn't change the central value of high redshift observations significantly to the value of direct measurements in local universe.

Keywords

Hubble Constant Tension, Distance Ladder, Baryon Acoustic Oscillations, Gravitational Waves, Gravitational Lens

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

天文学作为人类最古老的科学，对人类文明的进步有着不可磨灭的贡献。自从远古的人类在好奇心的驱使下抬头仰望星空开始，一个探索宇宙、寻觅真理的梦想就深深地烙印在世世代代追梦者的心中。宇宙中，日月星辰有规律地运行，促使人们不断总结自然法则，并形成理论——历法。从某种程度上讲，正是这种人类与自然，好奇与交流的探索互动最终把人类同其他动物区分开来，称为高等智慧生命，并形成迄今已知唯一的智慧文明。

我国古代人民第一次把“宇宙”的概念与时间和空间联系在一起可追溯至中国战国时期著作《尸子》中的“四方上下曰宇，往古来今曰宙”。在汉语中，“宇”代表上下四方，即无限的空间，“宙”代表古往今来，即无限的时间。宇宙学是从整体的角度研究宇宙的起源、演化、前途和命运的天体物理学分支。17 世纪牛顿力学创立以后建立了静态的宇宙观，直到 20 世纪，在大量天文观测和现代物理学的基础上才建立了现代宇宙学。从地心说到日心说，从牛顿静态宇宙、爱因斯坦静态宇宙模型到膨胀宇宙模型，使得人们对宇宙的认识有了质的飞跃。随着望远镜的发明以及各种人造卫星技术的变革和发展，我们对宇宙的认识越来越科学也越来越深刻，观测数据和人类不断探索的精神促进了宇宙学的蓬勃发展。现在，我们已经进入精确宇宙学时代。然而，近些年出现了哈勃常数测量值的不一致问题，即哈勃常数危机问题，它的研究一直是宇宙学前沿课题之一，诸多修改理论模型和提高观测精度以及如何打破观测简并的方案也如雨后春笋般被研究者们提出来。

本文首先介绍了几种常用的哈勃常数测量方式，包括距离阶梯、重子声学振荡、宇宙微波背景辐射、引力透镜和引力波等，然后对综合不同观测方法得到的观测数据进行了比较，即对比哈勃常数的不同测量方法得到的不同结果；同时分析了可能的原因，并简要介绍了研究者们提出的可能解决这一危机的各种方案。最后对哈勃常数危机这一难题进行了总结和展望。

2. 哈勃常数

1920 年至 1929 年，美国天文学家爱德温·鲍威尔·哈勃(Edwin Powell Hubble)和比利时天文学家勒梅特(Lemaître)利用造父变星测量了仙女座星云的距离，通过对河外星系的光谱分析，哈勃发现远处的星系正在退行，并且距离 D 越远的星系退行速度 V 越大，即哈勃 - 勒梅特定律[1]

$$V = H_0 \times D$$

比例系数 H_0 称为哈勃常数，即红移等于零处(今天)的哈勃参数，它代表当前距离每增加 100 万秒差

距(Mpc)时, 星系退行速度增加的数值, 这一发现证明了我们的宇宙是在膨胀的。但是, 这让爱因斯坦(Albert Einstein)大为吃惊, 因为爱因斯坦在 1917 年用他的广义相对论研究宇宙时, 他坚信宇宙是静态的, 并且为了得到静态宇宙模型, 他还引入了宇宙学常数项。在得知哈勃的发现后, 爱因斯坦认为这是“一生最大的错误”。

颇有戏剧性的是, 1998 年, 萨尔·波尔马特(Saul Perlmutter)、布莱恩·施密特(Brian Schmidt)以及亚当·里斯(Adam Riess)利用 *Ia* 型超新星发现了宇宙在加速膨胀, 该发现获得 2011 年诺贝尔物理学奖, 此后宇宙加速膨胀被世界公认, 哈勃常数的研究也越来越备受关注。

3. 哈勃常数的测量

宇宙学中的所有绝对距离和时间尺度都跟哈勃常数相关, 因此得到精确且确定的哈勃常数值对宇宙学研究意义重大。本文介绍几种常用的经典测量方法。

3.1. 基于宇宙微波背景辐射的测量

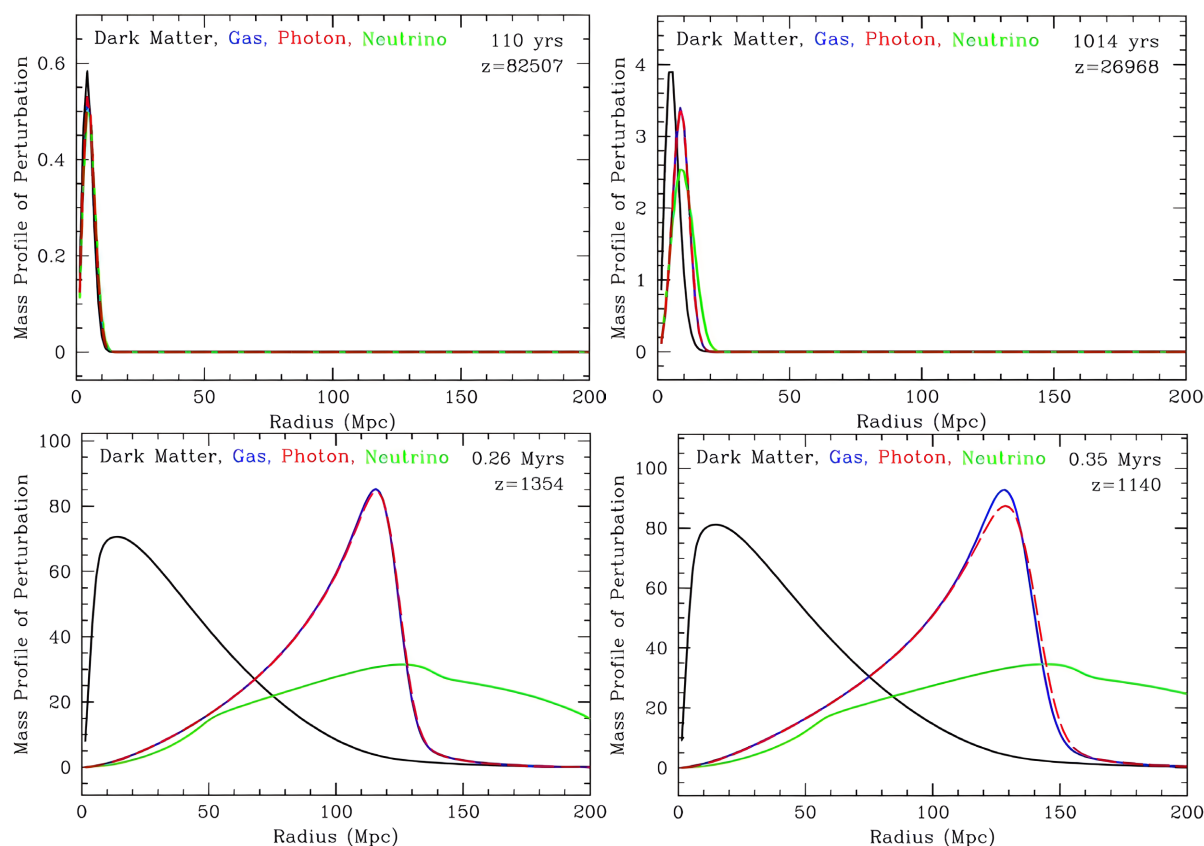


Figure 1. The evolution of perturbation with time for different material components. At the earliest time (approximately $z \geq 1300$), baryons and photons evolved together, while dark matter did not interact with photons. Subsequently, at a redshift of approximately 1100, the baryons and photons decouple and then propagate freely, forming CMB finally

图 1. 不同物质成分微扰随时间演化。最早(大约 $z \geq 1300$), 重子和光子耦合在一起演化, 而暗物质不和光子发生相互作用; 随后在红移大约 1100 左右, 重子光子解耦, 光子自由传播, 形成 CMB

CMB 形成过程如图 1 所示。

基于大爆炸宇宙学说, 在极早期宇宙中, 物质存在的形式是高温高密的等离子体, 光子和电子频繁相碰发生散射, 光子自由程很短, 使得这个时期的宇宙不透明。随着宇宙的持续膨胀, 温度不断下降,

当温度大约为 3000 K 时, 宇宙此时会进入复核阶段, 自由电子和质子会结合形成中性氢原子, 其数密度下降, 所以光子和电子碰撞几率减少, 光子平均自由程增加, 此过程宇宙越来越明朗。之后光子会从热平衡系统中退耦, 开始自由传播, 且频率处于微波波段, 最后这些散射面上的光子在行进了约 137 亿年后到达地球, 成为我们观测到的微波背景辐射(Cosmic Microwave Background, 简称 CMB)。CMB 是宇宙大爆炸时期流的遗迹, 是目前能探测到的最古老的辐射。

通过 CMB 观测的是早期的宇宙, 它记录了宇宙膨胀的信息, 利用这些信息, 研究者可以测量哈勃常数、暗物质、暗能量等诸多宇宙学参数, CMB 也可以为研究者提供光子退耦的共动距离和光子退耦时期的共动声世界[2]。

3.2. 基于哈勃 - 勒梅特定律的测量

根据哈勃 - 勒梅特定律可知, 精确测量哈勃常数首先需要精确确定天体退行速度和距离。

天体退行的速度可以通过红移来测量。根据光波的多普勒效应, 只要光源和观察者之间有相对运动, 观察者接收到的频率与光源发出的频率就会不一致, 当天体远离我们而去的时候我们接收到的频率比天体发出的频率要低, 其特征谱线波长向电磁波谱的红端方向移动, 这种效应称为红移, 反之称为蓝移。天文学家经常用的宇宙红移 z 是指宇宙当前大小的 $1/(1+z)$ 时刻, 即当天体红移为 z , 表示天体发出的光线到达观测者的时候其波长已经红移了 $1+z$ 。

距离的测量最简单的方法就是三角视差法。观测者在两个不同位置看到同一天体的方向角度差称为视差, 以地球绕太阳公转轨道的直径为基线, 只要知道视差和直径就可以测距, 但是这种方法只适合银河系内 1 kpc 范围。距离较远的河外星系视差太小, 连最精密的仪器也无法测得。测量较远距离的其中一种方法就是标准烛光, 当知道标准烛光的光度就可以测算距离我们的距离, 最常见的标准烛光是脉动超巨星(常被称为造父变星), 它们内部不稳定, 亮度随着膨胀和收缩周期性变化, 亮度与周期之间存在着确定的关系(周光关系, 越亮周期越长), 测量得到周光关系即可计算亮度, 通过比较测得的恒星亮度, 就可以知道距离, 但是这种方法测距范围不超过四千万光年。不过, 幸运的是, 我们还有另外一种标准烛光——Ia 型超新星, 这类超新星是大质量恒星演化末期发生剧烈热核反应爆炸而形成的, 所有 Ia 型超新星在爆发中的最大光度都比较接近, 并且光度极高(太阳的 50 亿倍), 其少量差异可用光度随时间衰减的快慢关系(菲利普斯关系)来修正, 使得研究者能够精确测定总光度, 进而计算距离。以超新星爆发为参照物可以测定几十亿光年外的遥远星系的距离, 但是超新星爆发是较为罕见和短暂的天文现象, 仅在少数星系中才能观测到。在赫罗图的顶端分支, 红巨星可以作为超新星的校准器, 红巨星几乎耗尽了核心的氢, 开始燃烧氦, 它们可以作为明亮的标准蜡烛用于超新星校准。另外 Mira 变星也可用于超新星校准。远距离的星系或星系核光谱质量差, 要观测这些星系, 还有最直接的解决方法是建造更大口径的望远镜, 收集更多的光线, 从而获得比较明显的信号, 例如我国的全世界最大的单口径射电望远镜——贵州 500 米射电望远镜。除了研发制造新式天文观测仪器来搜寻暗弱天体, 研究者还可以利用现有设备观测那些虽然遥远但较为明亮的天体, 特别是类星体和活动星系核。

3.3. 基于时间延迟——引力透镜效应的测量

引力透镜效应是由于背景源光线(或辐射)通过大质量天体(比如星系或星系团)时, 由于引力引起的偏折或会聚现象。光线通过不同的路径, 使得背景源在透镜周围形成多幅像, 光源越远, 像扭曲得越厉害, 如图 2 所示。类星体的亮度常常变化, 如果它在引力透镜下生成两个像, 由于每个像的光走过的路程不同使得光到达地球的时间不同, 利用时差就可以用来估计透镜距离。如果星系距离太远, 暗到无法拍摄光谱, 就可以用引力透镜来测量可观测宇宙学尺度上的时间延迟, 从时间延迟推导出哈勃常数。

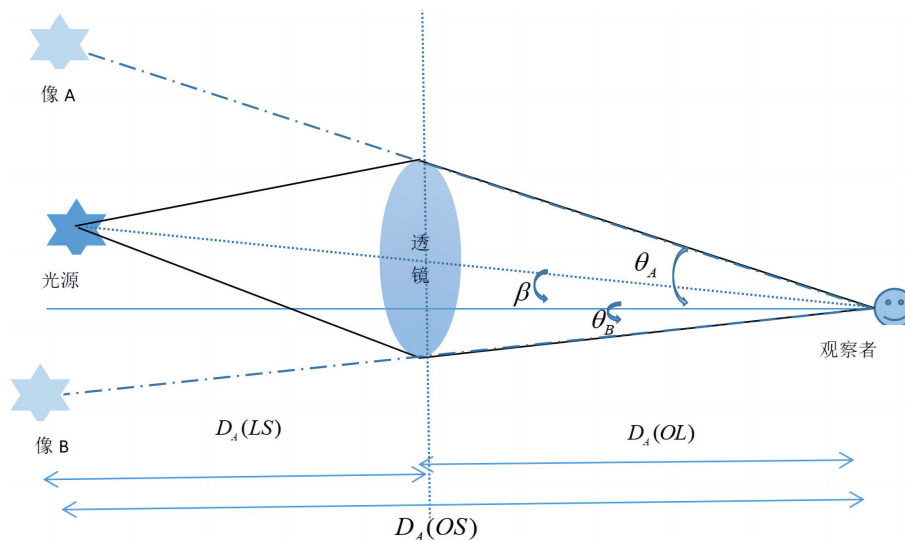


Figure 2. Schematic diagram of gravitational lens effect
图 2. 引力透镜效应原理图

3.4. 基于标准汽笛——引力波的测量

另一种非常具有潜力的方法是引力波观测，尤其是具有电磁对应物的引力波脉冲(称为标准汽笛)。研究者利用标准汽笛直接测量引力波源的光度距离和红移信息。目前观测到的引力波暴都在宇宙学尺度，例如目前观测到的双黑洞合并都发生在红移为 $z \sim (0.1 \sim 0.2)$ 、双中子星的合并发生在 $z \sim 0.01$ 。预计在 2030 年投入使用的第三代地基引力波探测器，预言未来可以探测到红移为 $z \sim 2$ 甚至更高红移处的引力波暴事件[3]。

为了探测频率略低($10^{-4} \sim 10^2$ 赫兹)的引力波源，人们还计划发展空间的引力波探测器，比如将在 2034 年发射的 LISA (Laser Interferometer Space Antenna)，我国的天琴计划和太极计划也在顺利实施，预计在 2030 年左右发射。引力波观测主要是测量引力波的振幅，引力波振幅依赖于波源的啁啾质量(双星质量组合)和光度距离，质量可以被引力波信号的相位测量精确确定，所以只需要同时测量到波源的振幅和相位信息就可以得到波源的光度距离，从而计算哈勃常数。

3.5. 其它测量方法

Tully Fisher (TF)方法是一种历史上有用的距离指示器，基于螺旋星系的本征总光度(或恒星质量)与其旋转速度(或中性氢(HI) 21 cm 发射线宽)之间的经验关系[4]。这种方法已被广泛用于测量河外距离。利用河外星系背景光的射线衰减基于这样一个事实：银河系外背景光是一种漫反射辐射场，从红外波到紫外波的波段充满整个宇宙，导致由光子相互作用引起的超高能光子不透明。在这个过程中，星系间介质中，射线和超高能光子可能会湮灭并产生电子-正电子对。宇宙演化和宇宙物质含量，决定了射线光学深度和沿视线的射线衰减量。因此，可以通过使用射线望远镜测量射线光学深度来推导哈勃常数。这一推导与标准烛光和宇宙微波背景的推导是独立和相互补充的[5]。电离氢气星系(HIIG)可用于探测宇宙的演化和测定哈勃常数，该测定方法是基于光度、速度和色散关系的标准烛光校准，这种关系存在于附近螺旋星系和不规则星系的巨型河外电离氢气星系中[6] [7]。用宇宙微波背景声世界作为标准尺，对重子声学震动摆动模式的分析是测量宇宙距离的另一种独立的方法。早期宇宙在重子引力作用下会向内收缩，在收缩的过程中，光子的斥力作用与引力抗衡，当斥力达到一定程度时，光子重子气体会向外扩张，扩张到一定程度又会收缩，此消彼长，重子光子气体就会产生周期性振荡，这种振荡称为重子声学振荡(Baryon Acoustic Oscillations，简称 BAO)。在光子退耦时，振荡也就随之停止，但是这种振荡的最终状态刻在了

CMB 和大尺度结构上。通过观测位于特定距离上的物质的成团的分布来测量 BAO 的信号，可以获得早期宇宙最后散射面时刻的声学视界的尺度信息。BAO 为宇宙学距离测量提供了一把标准尺[8]。

但是重子声学振荡数据不能独立限制哈勃常数，如图 3 所示，需要结合其他数据打破简并。虽然其中重子物质的信息未知，但比如原初核合成(Big Bang Nucleosynthesis, 简称 BBN)提供了宇宙中的氦和氘的含量对有效自由度数目和物理的重子密度比例的依赖关系，该关系与实际测量到的宇宙中的氦和氘的含量相对比即可得到，因此可以联合 BBN 测量哈勃常数。

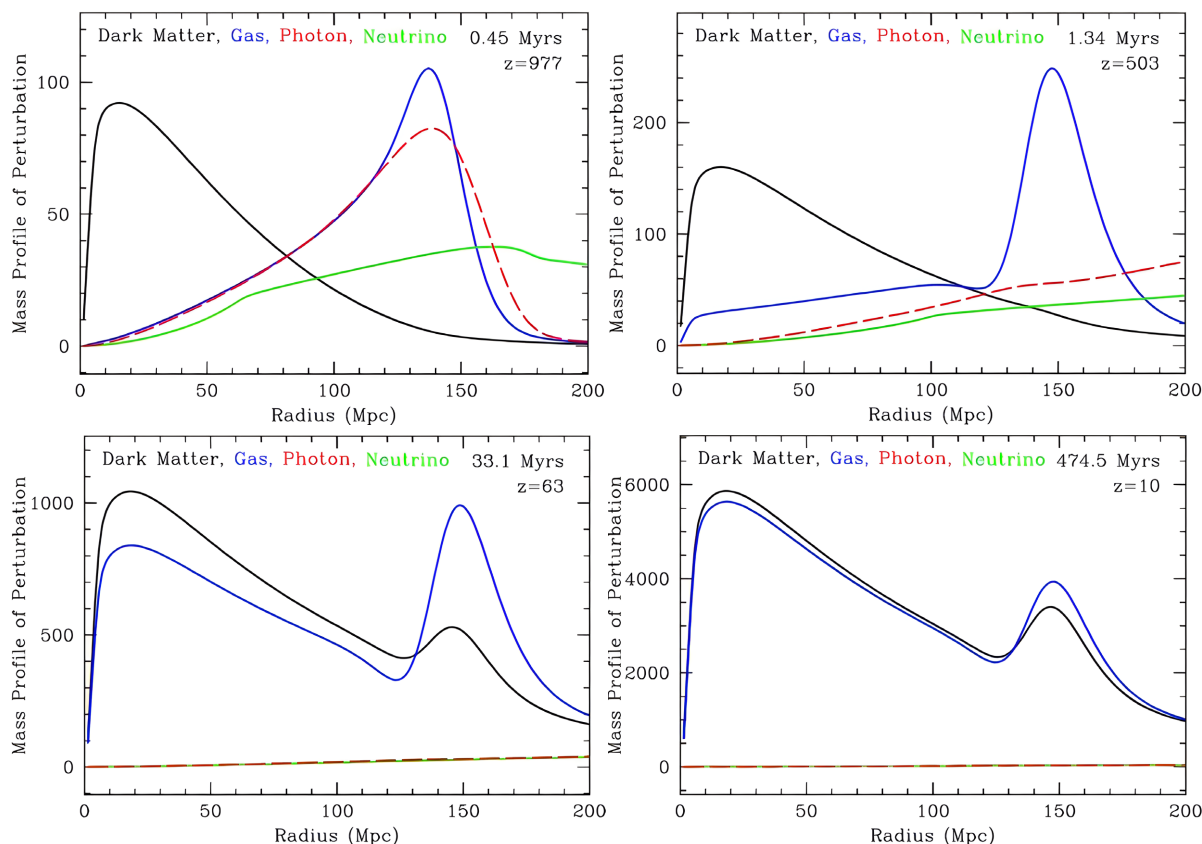


Figure 3. After the photon baryons are decoupled, the baryons that were previously pushed outward by photons remained at 150 Mpc and then formed a peak, which is so-called BAO. The scale of BAO is roughly equivalent to the speed of sound in a photon baryon fluid multiplied by the time to decoupling. This distance is related to other cosmological constant such as the relative density of photons and baryons. Afterwards, baryons began to recombine as dark matter under the influence of gravity for a long time

图 3. 当光子重子解耦之后，之前由光子推着往外走的重子留在 150 Mpc 处形成一个峰，这就是 BAO。BAO 的尺度大致相当于光子重子流体中的声速乘以到解耦的时间。这个距离和光子，重子的相对密度等其他宇宙学常数有关。随后很长一段时间重子开始像暗物质一样在引力作用下重组

4. 各种方法的哈勃常数测量结果

4.1. 基于宇宙微波背景辐射

通过普朗克卫星 2018 年(Planck18)测得的温度谱、透镜功率谱以及偏振谱获得的最佳拟合值为 $H_0 = 67.36 \pm 0.54 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ [2]，阿塔卡马宇宙望远镜(Atacama Cosmology Telescope, 简称 ACT)和威尔金森微波各向异性探测器(Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, 简称 WMAP)的组合对 CMB 的测量，计算的哈勃常数为 $H_0 = 67.9 \pm 1.5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ [9]。

4.2. 基于标准烛光测距

通过测量 *Ia* 超新星的峰值光度来获得其距离与红移的关系。最新和最大的数据集是 Pantheon 样本, 其包含了来自 6 个不同调查的数据, 总共由 1048 个红移范围 $0.01 < z < 2.3$ 的 *Ia* 超新星组成 ($z > 1.4$ 的 *Ia* 超新星数量只有 6 个) [10]。通过对哈勃太空望远镜观测数据的分析, SHOES 团队使用大麦哲伦星云中的 70 颗长周期造父变星进行超新星校准, 测量的哈勃常数结果为 $H_0 = 74.03 \pm 1.42 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ [11], 这与 Planck18 在标准宇宙学模型下利用宇宙微波背景测量的结果产生 4.4 倍标准差 [12]。其后 SHOES 团队利用最新的 Gaia 数据, 其精度达到 1.8%, 测得结果 $H_0 = 73.2 \pm 1.3 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$, 与 Planck18 测得的结果产生的标准差为 4.2 倍 [12]。芝加哥卡内基项目利用亮红巨星对超新星进行校准以及最新文献中报道了使用欧洲航天局盖亚早期数据三角视差校准的亮红巨星距离指标测量数据分别为 $H_0 = 69.8 \pm 0.8 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$, $H_0 = 72.1 \pm 2.0 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ [13]。

4.3. 基于强引力透镜

最新强引力透镜时间延迟的测量影响较大的是 H0LiCOW (H0 Lenses in COSMOGRAIL's Wellspring) 工作组, 用此方法测得的哈勃常数情况如表 1 所示。

Table 1. Gravitational lens measurements of Hubble constant data

表 1. 引力透镜测哈勃常数数据

方法	H_0 [km · s ⁻¹ · Mpc ⁻¹]	时间	参考文献
引力透镜	$71.8_{-3.3}^{+3.9}$	2021	[14]
引力透镜	$73.3_{-1.8}^{+1.7}$	2020	[15]
引力透镜	$72.8_{-1.7}^{+1.6}$	2020	[16]
引力透镜	$74.2_{-3.0}^{+2.7}$	2020	[17]
引力透镜	$74.5_{-6.1}^{+5.6}$	2020	[18]

4.4. 基于引力波

用此方法测得的哈勃常数情况如表 2 所示。

Table 2. Gravitational wave measurements of Hubble constants

表 2. 引力波测哈勃常数

方法	H_0 [km · s ⁻¹ · Mpc ⁻¹]	时间	参考文献
引力波	75_{-13}^{+59}	2020	[19]
引力波	$50.4_{-19.5}^{+28.1}$	2020	[20]
引力波	$67.6_{-4.2}^{+4.3}$	2020	[20]
引力波	48_{-10}^{+23}	2020	[21]
引力波	69.0_{-8}^{+16}	2019	[22]
引力波	75_{-32}^{+40}	2019	[22]
引力波	$68.9_{-4.6}^{+4.7}$	2019	[23]
引力波	77_{-18}^{+37}	2019	[24]
引力波	70.0_{-8}^{+12}	2017	[25]

目前，它对哈勃常数的测量精度约 15%，原因是观测数据太少。正在进行的双中子星并合引力波观测有望在未来将标准汽笛测量哈勃常数的精度提高到约 2%。

4.5. 基于重子声学振荡

结合重子声学振荡(BAO)扩展模型打破简并测量的哈勃常数情况如表 3 所示

Table 3. Combined measurements of Hubble constant data by BAO and other data

表 3. BAO 与其他数据联合测哈勃常数数据

方法	H_0 [km · s ⁻¹ · Mpc ⁻¹]	时间	参考文献
BAO + RSD	69.13 ± 2.34	2017	[26]
BAO + WMAP CMB	68.36 ^{+0.53} _{-0.52}	2019	[27]
BAO + BBN	66.98 ± 1.18	2018	[28]
BAO + BBN + WLCC	67.2 ^{+1.2} _{-1.0}	2018	[29]
BAO + CC + SniIa	68.52 ^{+2.51} _{-0.94}	2018	[30]

5. 总结和展望

在本文中，我们绘制出了哈勃常数的早期宇宙和晚期宇宙测量结果，如图 4 所示。

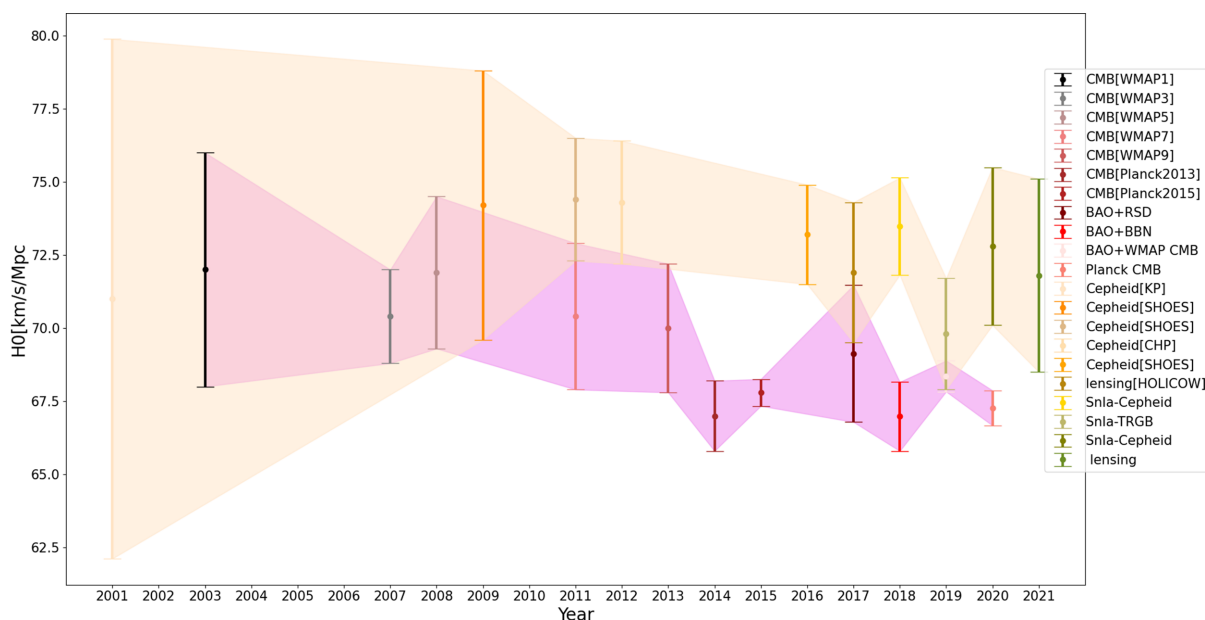


Figure 4. The yellow band in the above figure shows the independent measurement of the Hubble constant that does not depend on the standard cosmological model. The purple band represents the Hubble constant values that depend on the standard cosmological model

图 4. 上图黄色带所展示的是不依赖于标准宇宙学模型的独立测量的哈勃常数，紫色带表示依赖于标准宇宙学模型所测量的哈勃常数值

综合这么多的观测数据，绝大多数直接测量都倾向于一个较大的哈勃常数；绝大多数间接测量都给出一个相对较小的哈勃常数，可以确定哈勃常数危机是真实存在的。我们还发现通过扩展理论模型做些小的修正，除了让模型参数的不确定度稍稍增大以外，并没有让高红移的测量如宇宙微波背景辐射得出哈勃常数值明显地接近局域低红移的直接测量值。近二十年来哈勃常数的不一致性已经逐渐演变成了宇

宙学的重大危机，即哈勃常数危机问题。

这一危机出现后，研究者们认为主要的原因可能有两个方面：首先是系统误差，比如我们观测手段、观测仪器、观测过程中还有未考虑的影响因素等，但是，随着我们科技的进步，我们的观测精度已经达到 1% [31]，而早期宇宙观测(基于宇宙微波背景辐射)与近邻宇宙的标准烛光测量之间的不一致性已经到达 4 到 6 倍标准差，几乎不可能由某个单独天文观测的问题或简单的系统误差造成的；其次，有一些研究者认为，那可能是我们的标准宇宙学模型存在未知的错误，需要发展新的物理，即人们对 Λ CDM 模型进行修正，使早期宇宙的哈勃常数增大以解决问题，而对 Λ CDM 模型所进行的修正，即意味着在宇宙演化过程中存在相应的新物理。对 Λ CDM 的修正至少可以分为三类：第一类是对暗物质进行修正，第二类是对暗能量进行修正，第三是将暗物质和暗能量合并作为整体，即所谓的暗部分。此外还有其它各种理论上的修正，如修改引力理论来缓解哈勃常数危机。修改引力理论模型主要是通过修改爱因斯坦场方程来研究，目前国内外主要有以下几大类：第一类是在爱因斯坦场方程中假设暗能量，暗能量具有负压力的性质，可以提供斥力，使得宇宙会加速膨胀，这种做法类似于爱因斯坦本人在 1917 年将宇宙学常数引入爱因斯坦场方程，对于暗能量是什么，目前国内外还没有统一的认识，其候选者很多，所以，研究者又提出一系列动力学演化的暗能量模型，例如全息暗能量(holographic dark energy)、精质场(Quintessence)等等；第二类是在宇宙学尺度上修改广义相对论，在已有的实验中已经证明过广义相对论在亚毫米到太阳系尺度上精确适用，但在宇宙学尺度(1Gpc)上并没有得到完美的证明和检验，在这种情况下为了解释宇宙加速膨胀，人们提出常常见的修改模型有 $f(R)$ 理论、标量 - 张量理论、 $f(T)$ 理论[32] 等。目前在国际上，哈勃常数危机的上述各种解决方案都有很多学者在研究。近几年，国内外关于哈勃常数危机的国际会议也越来越多，比如“Beyond Λ CDM”，“Hubble Tension Headache”，“Tensions between the Early and the Late Universe”等等。在“Beyond Λ CDM”会议上，69%的参与者认为新物理学是最有可能的解释；相反，在“Hubble Tension Headache”会议上，超过 50%的参与者支持观测数据中仍有我们未知的系统学解释[33]。

迄今为止，研究者们已经提出近 300 多种哈勃常数危机的解决方案。虽然有的模型看起来可以很好地缓解哈勃常数不一致性，但是它们要么自由参数过多，违反了奥卡姆剃刀原理，即理论需要尽可能地简洁，同时观测数据并不支持这样的模型；要么其代价是使另一种不一致性(如物质密度涨落的测量不一致性)反而变大了。目前流行的各种扩展模型本质上并没有哪个可以真正解决哈勃常数不一致的问题。哈勃常数危机的解决需要天体物理学家在未来获取到更大更多的引力波、引力透镜和超新星等天文观测数据，更重要的是也需要发展新的、独立的宇宙学探针，同时需要理论物理学家在宇宙学理论方面的深度思考和发展新模型等。

再大胆一些考虑，也许需要引入新的物理学，也许需要添加重子、暗物质与暗能量之外的未知组分，借鉴相对论和量子物理学的成功经验，在探索未知的时候，我们应该秉持开放包容的态度，借哈勃常数危机打开一个百花齐放、百家争鸣的宇宙学新时代。

基金项目

中国科学院率先行动“BR 计划”择优入选项目(杨晓峰主持)。

参考文献

- [1] Hubble, E. (1929) A Relation between Distance and Radial Velocity among Extra-Galactic Nebulae. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **15**, 168-173. <https://doi.org/10.1073/pnas.15.3.168>
- [2] Aghanim, N., Ghosh, T., Bock, J.J., et al. (2018) Planck 2018 Results. VI. Cosmological Parameters. *Astronomy & Astrophysics (A&A)*, **641**, Article No. A6.

- [3] 赵文. 引力波标准汽笛与宇宙学[J]. 中国科学(物理学 力学 天文学), 2018, 48(7): 65-81.
- [4] Sakai, S., Mould, J.R., Hughes, S.M.G., *et al.* (2000) The *Hubble Space Telescope* Key Project on the Extragalactic Distance Scale. XXIV. The Calibration of Tully-Fisher Relations and the Value of the Hubble Constant. *The Astrophysical Journal*, **529**, 698-722. <https://doi.org/10.1086/308305>
- [5] Hauser, M.G. and Dwek, E. (2001) The Cosmic Infrared Background: Measurements and Implications. *Annual Review of Astronomy & Astrophysics*, **39**, 249-307. <https://doi.org/10.1146/annurev.astro.39.1.249>
- [6] Tsiapi, P., Basilakos, S., Plionis, M., *et al.* (2021) Cosmological Constraints Using the Newest VLT-KMOS HII Galaxies and the Full Planck CMB Spectrum. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **506**, 5039-5045. <https://doi.org/10.1093/mnras/stab1933>
- [7] Kyle, L. and Fulvio, M. (2018) A Two-Point Diagnostic for the HII Galaxy Hubble Diagram. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **474**, 4507-4513. <https://doi.org/10.1093/mnras/stx3109>
- [8] Slepian, Z., Eisenstein, D.J., Brownstein, J.R., *et al.* (2017) Detection of Baryon Acoustic Oscillation Features in the Large-Scale Three-Point Correlation Function of SDSS BOSS DR12 CMASS Galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **469**, 1738-1751. <https://doi.org/10.1093/mnras/stx488>
- [9] Mallaby-Kay, M., Atkins, Z., Aiola, S., *et al.* (2021) The Atacama Cosmology Telescope: Summary of DR4 and DR5 Data Products and Data Access. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, **255**, 11-26. <https://doi.org/10.3847/1538-4365/abfcc4>
- [10] Scolnic, D.M., Jones, D.O., Rest, A., *et al.* (2018) The Complete Light-Curve Sample of Spectroscopically Confirmed SNe Ia from Pan-STARRS1 and Cosmological Constraints from the Combined Pantheon Sample. *The Astrophysical Journal*, **859**, 101-128. <https://doi.org/10.3847/1538-4365/abfcc4>
- [11] Riess, A.G., Casertano, S., Yuan, W., Bowers, J.B., Macri, L., Zinn, J.C. and Scolnic, D. (2021) Cosmic Distances Calibrated to 1% Precision with Gaia EDR3 Parallaxes and Hubble Space Telescope Photometry of 75 Milky Way Cepheids Confirm Tension with Λ CDM. *The Astrophysical Journal*, **908**, L6-L16. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/abdbaf>
- [12] Marra, V. and Perivolaropoulos, L. (2021) A Rapid Transition of G_{eff} at $z_t = 0.01$ as a Solution of the Hubble and Growth Tensions. *Physical Review D*, **104**, L021303.
- [13] Soltis, J., Casertano, S. and Riess, A.G. (2021) The Parallax of ω Centauri Measured from Gaia EDR3 and a Direct, Geometric Calibration of the Tip of the Red Giant Branch and the Hubble Constant. *The Astrophysical Journal Letters*, **908**, L5-L13. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/abdbad>
- [14] Denzel, P., Coles, J.P., Saha, P., *et al.* (2020) The Hubble Constant from Eight Time-Delay Galaxy Lenses. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **501**, 784-801. <https://doi.org/10.1093/mnras/staa3603>
- [15] Wong, K.C., Suyu, S.H. and Chen, C.F. (2020) HoLiCOW—XIII. A 2.4% per cent Measurement of H_0 from Lensed Quasars: 5.3 σ Tension between Early and Late-Universe Probes. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **498**, 1420-1439. <https://doi.org/10.1093/mnras/stz3094>
- [16] Liao, K., Shafieloo, A., Keeley, R.E., *et al.* (2020) Determining Model-Independent H_0 and Consistency Tests. *The Astrophysical Journal Letters*, **895**, L29-L35. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab8dbb>
- [17] Shajib, A.J., Birrer, S., Treu, T., *et al.* (2020) STRIDES: A 3.9 per cent Measurement of the Hubble Constant from the Strong Lens System DES J0408-5354. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **494**, 6072-6102.
- [18] Birrer, S., Shajib, A.J., Galan, A., *et al.* (2020) TDCOSMO IV: Hierarchical Time-Delay Cosmography—Joint Inference of the Hubble Constant and Galaxy Density Profiles. *Astronomy & Astrophysics (A&A)*, **643**, Article No. A165. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038861>
- [19] Abbott, R., Abbott, T.D., Abraham, S., Acernese, F., Ackley, K., Adams, C., Adhikari, R.X., Adya, V.B., Affeldt, C. and Agathos, M. (2020) GW190814: Gravitational Waves from the Coalescence of a 23 Solar Mass Black Hole with a 2.6 Solar Mass Compact Object. *The Astrophysical Journal*, **896**, L44-L64.
- [20] Mukherjee, S., Ghosh, A., Graham, M.J., *et al.* (2020) First Measurement of the Hubble Parameter from Bright Binary Black Hole GW190521. (Preprint)
- [21] Chen, H.Y., Haster, C.J., Vitale, S., Farr, W.M. and Isi, M. (2020) A Standard Siren Cosmological Measurement from the Potential GW190521 Electromagnetic Counterpart ZTF19abanrhr. (Preprint)
- [22] Stuver, A.L., Matas, A., Lazzaro, C., *et al.* (2021) Gravitational-Wave Searches in the Era of Advanced LIGO and Virgo. *Modern Physics Letters A*, **36**, Article ID: 2130022.
- [23] Jones, D. (2019) First Measurement of the Hubble Constant from a Dark Standard Siren Using the Dark Energy Survey Galaxies and the LIGO/Virgo Binary–Black-Hole Merger GW170814. *The Astrophysical Journal Letters*, **876**.
- [24] Hotokezaka, K., Nakar, E., Gottlieb, O., *et al.* (2019) A Hubble Constant Measurement from Superluminal Motion of

-
- The jet in GW170817. *Nature Astronomy*, **3**, 940-944. <https://doi.org/10.1038/s41550-019-0820-1>
- [25] Chen, H.Y., Fishbach, M. and Holz, D.E. (2018) A Two per cent Hubble Constant Measurement from Standard Sirens within Five Years. *Nature*, **562**, 545-547. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0606-0>
- [26] Abbott, B.P., *et al.* (2017) A Gravitational-Wave Standard Siren Measurement of the Hubble Constant. *Nature*, **551**, 85-88.
- [27] Wang, Y., Xu, L. and Zhao, G.B. (2017) A Measurement of the Hubble Constant Using Galaxy Redshift Surveys. *Astrophysical Journal*, **849**, 84-87. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa8f48>
- [28] Zhang, X. and Huang, Q.G. (2019) Constraints on H_0 from WMAP and BAO Measurements. *Communications in Theoretical Physics*, **71**, 826-830. <https://doi.org/10.1088/0253-6102/71/7/826>
- [29] Addison, G.E., Watts, D.J., Bennett, C.L., Halpern, M., Hinshaw, G. and Weiland, J.L. (2018) Elucidating Λ CDM: Impact of Baryon Acoustic Oscillation Measurements on the Hubble Constant Discrepancy. *The Astrophysical Journal*, **853**, 119-130. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aaa1ed>
- [30] Haridasu, B.S., Lukovi, V.V., Moresco, M. and Vittorio, N. (2018) An Improved Model-Independent Assessment of the Late-Time Cosmic Expansion. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, **2018**, 015. <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2018/10/015>
- [31] Verde, L., Treu, T. and Riess, A.G. (2019) Tensions between the Early and Late Universe. *Nature Astronomy*, **3**, 891-895. <https://doi.org/10.1038/s41550-019-0902-0>
- [32] Briffa, R., Escamilla-Rivera, C., Said, L.J. and Mifsud, J. (2023) Constraints on $f(T)$ Cosmology with Pantheon+. *NASA Astrophysics Data System*, **552**, 6024-6034. <https://doi.org/10.1093/mnras/stad1384>
- [33] Hu, J.-P. and Wang, F.-Y. (2023) Hubble Tension: The Evidence of New Physics. *Universe*, **9**, Article 94. <https://arxiv.org/abs/2302.05709>
<https://doi.org/10.3390/universe9020094>