

The evolution of methods for determining the Hubble constant

Razmi, H.¹  | Bordbar, M. R.¹  | Tohidinia, Z.¹ 

1. Department of Physics, University of Qom, Qom, Iran.

Corresponding Author E-mail: razmi@qom.ac.ir

(Received: 17 Sep 2024, Revised: 13 Oct 2024, Accepted: 4 Jan 2025, Published online: 10 June 2025)

Summary

With the failure of the idea of the static universe, and the discovery of the expansion of the universe by Hubble, the Hubble constant became of great importance in cosmology. Given the key role of this constant in determining many important parameters, including the age, acceleration, and density of the universe, the precise determination of its numerical value is becoming increasingly important. The numerical determination of the Hubble constant (H_0) has had a history of ups and downs, and in the last century, it has been the subject of much scientific research, as many prominent people who have addressed it with advanced methods and in new papers. Most methods of determining the numerical value of the Hubble constant are done by distance measurement. The important distance methods include: the methods of Cepheid variables, Type Ia supernovae, the Tully-Fisher relation, surface brightness fluctuation, the tip of the red giant branch, the Sunyaev-Zeldovich effect, Mega Maser and Baryon acoustic oscillations. To derive the Hubble constant value using distance methods, galaxies are used whose special velocities (the rate of local and catastrophic motion) are observable due to their great distance, compared to the speed of their neighbors (the rate of expansion of the universe). In this case, the distance and velocity of the galaxy can be calculated using Hubble's law to determine the value of the Hubble constant. The important non-distance methods are time-delayed gravitational lensing, gravitational waves and methods based on learning machines. In addition to these methods, there is also a method based on the cosmic microwave background radiation, in which the Hubble constant is determined universally, regardless of distance. What is certain is that the results of these studies show the evolutionary course of determination of the Hubble constant over the past decades, as well as the obvious changes in its numerical value. Here, while briefly describing the different methods of determining the Hubble constant, the numerical results presented over the past decades are finally summarized in a table in a comparative form. The summarized data in the table are classified based on the method of obtaining the Hubble constant, the maximum distance observed, the most recent numerical value obtained and their accuracy. Although the use of the new data has resulted in numerical values in the range of 67 to 75 (in $\text{km s}^{-1}/\text{Mpc}$) for the Hubble constant, the same amount of dispersion is also significant for a "constant". The Hubble constant value derived from the latest data in the Type Ia supernova method is about $67 \text{ km s}^{-1}/\text{Mpc}$, whereas with the Tully-Fisher relation, a value of about $75 \text{ km s}^{-1}/\text{Mpc}$ has been reported for this constant. Perhaps this dispersion can be attributed to whether the objects under consideration for the determination of the Hubble constant are local or cosmic; but, we still can't say for sure. The different reported values for the Hubble constant based on different methods and models which is now known as a "tension" (the Hubble tension) makes cosmologists propose alternative models and new physics for solving the problem.

Keywords: Expansion of the Universe, Hubble Constant, Hubble's Law.

Cite this article: Razmi, H., Bordbar, M. R., & Tohidinia, Z. (2025). The evolution of methods for determining the Hubble constant. *Journal of the Earth and Space Physics*, 51(1), 191-206. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2025.380089.1007620>

E-mail: (1) bordbar.r@gmail.com | daneshjoo500314@gmail.com



Publisher: University of Tehran Press.
DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2025.380089.1007620>

Print ISSN: 2538-371X
Online ISSN: 2538-3906

سیر تکاملی روش‌های تعیین مقدار ثابت هابل

حبیب‌الله رزمی^۱ | محمد رحیم بردبار^۱ | زینب توحیدی‌نیا^۱

۱. گروه فیزیک، دانشگاه قم، قم، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: razmi@qom.ac.ir

(دریافت: ۱۴۰۳/۶/۲۷، بازنگری: ۱۴۰۳/۷/۲۲، پذیرش نهایی: ۱۴۰۳/۱۰/۱۵، انتشار آنلاین: ۱۴۰۴/۳/۲۰)

چکیده

با کشف انبساط عالم توسط هابل، ثابت هابل در علم کیهان‌شناسی اهمیت زیادی یافت. با توجه به نقش کلیدی این ثابت در تعیین بسیاری از پارامترهای مهم، از جمله تعیین سن عالم، شتاب و چگالی کیهان، تعیین دقیق مقدار عددی آن اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. عمده روش‌های تعیین مقدار عددی ثابت هابل از طریق فاصله‌یابی، انجام گرفته‌اند. مهم‌ترین روش‌های فاصله‌ای عبارت‌اند از: روش‌های متغیرهای قیفاووسی، ابرنواخترهای نوع Ia، رابطه تولی فیشر، افت و خیز روشنایی سطحی، قله مرحله غول قرمز، اثر سانیاو-ژلدوویچ، مگا میزر، روش نوسانات صوتی. مهم‌ترین روش‌های غیر فاصله‌ای عبارت‌اند از: تأخیر زمانی همگرایی گرانشی، امواج گرانشی و روش‌های مبتنی بر یادگیری ماشین. به غیر از موارد ذکر شده، روش تابش ریزموج زمینه کیهانی نیز وجود دارد که در آن بدون در نظر گرفتن فاصله، به‌شکلی فراگیر و کیهانی ثابت هابل تعیین می‌شود. آنچه مسلم است این‌که، نتیجه این پژوهش‌ها سیر تحولی و تکاملی تعیین ثابت هابل در دهه‌های گذشته و همچنین تغییرات آشکار مقدار عددی آن را نشان می‌دهد. در اینجا، ضمن بیان هر چند کوتاه از روش‌های مختلف تعیین ثابت هابل در نهایت به شکل مقایسه‌ای نتایج عددی مطرح طی دهه‌های گذشته در یک جدول خلاصه و تجمیع شده است. مشکل تنش هابل که به اختلاف نتایج حاصل از طرق متفاوت اندازه‌گیری مقدار ثابت هابل بر می‌گردد، همچنین تلاش‌های انجام گرفته در راستای حل این مسئله به شکل کوتاه و مختصر مورد اشاره قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: انبساط عالم، ثابت هابل، قانون هابل.

۱. مقدمه

کهکشان‌های میزبان قیفاووسی‌ها را محاسبه کند. وی، در نموداری (شکل ۱)، سرعت‌ها را بر حسب فاصله رسم کرد و به نتیجه شگفت‌انگیزی رسید: «هرچه کهکشان‌های دورتر باشد دارای انتقال به سرخ بیشتری است و با سرعت بیشتری از ما دور می‌شود». نتیجه این مشاهدات که بعدها به نام قانون هابل معروف شد، عبارت است از:

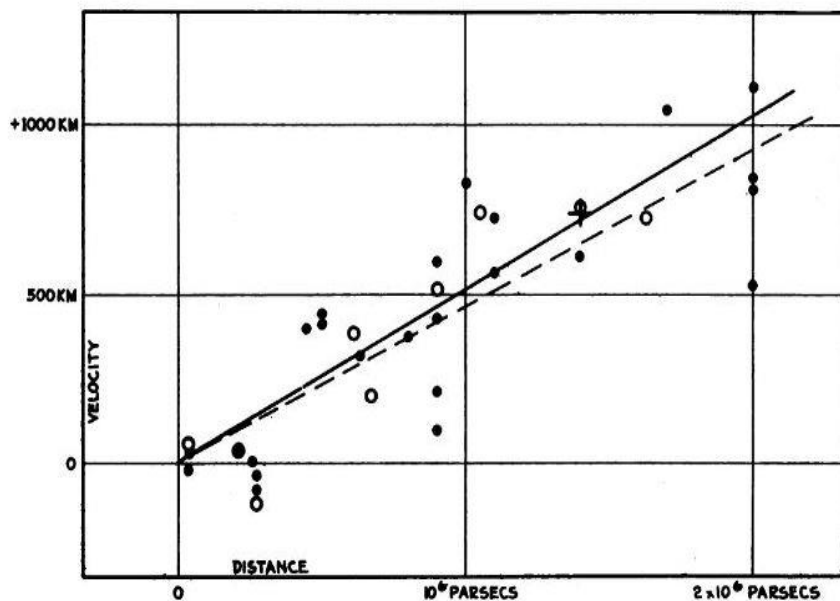
$$V = H_0 D \quad (1)$$

که در آن V سرعت شعاعی، D فاصله و H_0 ثابت هابل است که با واحد $\text{km s}^{-1}/(\text{Mpc})$ بیان می‌شود. مقدار این ثابت که اولین بار توسط خود او تعیین شد تقریباً برابر بود با $(\text{km s}^{-1})/(\text{Mpc})$. $H_0 = 50$. شکل کلی قانون هابل که برای همه زمان‌های کیهانی برقرار می‌باشد، عبارت است از:

$$V = H(t) D \quad (2)$$

که در آن $H(t)$ پارامتر هابل و وابسته به زمان است.

در سال ۱۹۱۵ میلادی، اینشتین کوشید تا به پیروی از مدل‌های کیهان‌شناسی متداول در آن روزها، جوابی برای معادلات خود پیدا کند که عالم ایستا را توصیف کند. فریدمان (۱۹۲۲) بر پایه نظریه اینشتین، معادلاتی را ارائه کرد که نشان می‌داد عالم غیر ایستا و در حال تحول دینامیکی است؛ پس از او لمرتر (۱۹۲۷)، انبساط عالم را مطرح و نرخ تخمینی انبساط را ارائه کرد. تقریباً هم‌زمان با مباحث نظری مطرح‌شده درباره تحول یا سکون کیهان، اسلیفر (۱۹۱۷)، طیف ۱۵ کهکشان مارپیچی را ثبت و مشاهده کرد که طیف تمام کهکشان‌هایی که در فواصل دور از ما واقع شده‌اند؛ دارای انتقال به سرخ است. پس از آن هابل (۱۹۲۹)، با به‌دست آوردن میزان انتقال به سرخ طیف تعدادی از ستارگان متغیر قیفاووسی (Cepheid Variables) مربوط به کهکشان‌های دیگر توانست سرعت



شکل ۱. نمودار سرعت-فاصله مربوط به ۴۶ کهکشان: محور عمودی نشان‌دهنده سرعت کهکشان‌ها و محور افقی نشان‌دهنده فاصله کهکشان‌ها برحسب پارسک است. نقاط توپر و خط کامل مربوط به دسته اول کهکشان‌ها و نقاط توخالی و خط چین مربوط به دسته دوم کهکشان‌ها هستند (هابل، ۱۹۲۹).

$$q(t) = \frac{-S(t) \times \ddot{S}(t)}{\dot{S}(t)} \quad (۵)$$

دلیل به کارگیری اصطلاح "کندشونده" این است که ابتدا تصور می‌شد که گرانش ناشی از ماده‌ی موجود در عالم در نهایت انبساط را متوقف خواهد کرد، لذا انبساط باید کند شونده باشد؛ اما در اواخر دهه نود میلادی "پروژه کیهان‌شناسی ابرنواختر" (Supernovae Cosmology Project) به رهبری پرموتر (۱۹۹۸) و پروژه مجزای دیگر به نام "گروه تحقیقاتی ابرنواخترهای با انتقال به سرخ بالا" (High Redshift Supernova Research Group) به رهبری آدام ریس و اشمیت (ریس و همکاران، ۱۹۹۸) اعلام کردند که سرعت انبساط عالم در حال افزایش است؛ یعنی عالم با شتاب مثبت منبسط می‌شود. برای تطبیق نتایج رصدی (شتاب مثبت عالم) با کیهان‌شناسی نظری، انرژی تاریک به عنوان عامل این شتاب مطرح و ثابت کیهان‌شناسی (Λ) که قبلاً اینشتین آن را برای توصیف عالمایستا وارد معادلاتش کرده و با اثبات انبساط عالم آن را حذف کرده بود؛ دوباره وارد معادلات اینشتین شد!

یکی از کاربردهای مهم ثابت هابل تعیین سن عالم است. در دهه شصت میلادی که هنوز بحث انرژی تاریک مطرح

اینشتین با اطلاع از کشف هابل، ثابت کیهان‌شناسی را که قبلاً برای ایستا نشان دادن عالم به معادلاتش اضافه کرده بود را حذف، و از کار قبلی خود در به دست آوردن عالمی ایستا به عنوان بزرگترین اشتباه خود یاد کرد. در سال ۱۹۳۱، ادینگتون (Eddington)، با الهام از اصل کپرنیکی که هیچ نقطه ارجحی در عالم وجود ندارد، کیهان را مانند یک بالون در حال انبساط در نظر گرفت که کهکشان‌ها هم چون نقاطی روی سطح این بالون قرار دارند و با انبساط بالون همه کهکشان‌ها از هم دور می‌شوند. در این مدل، می‌توان دستگاه مختصات هم-حرکت را تعریف کرد که در آن، فواصل در هر زمان به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$D = rS(t) \quad (۳)$$

که در آن D فاصله از جسم $S(t)$ عامل مقیاس و دارای بعد طول و r مختصه شعاعی است.

با این تعریف می‌توان پارامتر هابل را برحسب عامل مقیاس نوشت:

$$H(t) = \frac{V}{D} = \frac{1}{D} \frac{dD}{dt} = \frac{\dot{S}(t)}{S(t)} \quad (۴)$$

همچنین پارامتر شتاب کند شونده $q(t)$ بر حسب عامل مقیاس عبارت است از:

نمود مدل‌های کیهان‌شناسی، عالم را تخت و در دوره غلبه ماده پیش‌بینی کرده بود، در این شرایط سن عالم عبارت است از:

$$t_0 = \frac{2}{3} \frac{1}{H_0} \quad (۶)$$

با توجه به مقدار تعیین شده این ثابت توسط هابل ($H_0 = 50 \text{ km s}^{-1}/(\text{Mpc})$) سن عالم در حدود $13/1 \times 10^8$ سال برآورد می‌شد؛ اما در اوایل دهه ۱۹۷۰، اخترشناسان با تعیین سن ستارگان پیر و مقایسه آن با سن برآورد شده برای عالم به تناقض رسیدند؛ در این مقایسه، سن ستارگان پیر تقریباً چندین برابر بیشتر از سن عالم بود! با مطرح شدن این موضوع، بررسی مقدار عددی ثابت هابل به دستور کار جدیدی برای دانشمندان این حوزه تبدیل شد. عددی که هابل در سال ۱۹۲۹ گزارش کرد بر مبنای فاصله تعدادی از ستارگان متغیر قیفاووسی بود. از آن زمان تا کنون روش‌های متعددی برای تعیین ثابت هابل به کار گرفته شده است که آخرین آنها استفاده از اطلاعات مربوط به تابش ریزموج زمینه کیهانی است، که مقدار این ثابت را کمتر از $70 \text{ km s}^{-1}/(\text{Mpc})$ گزارش کرده است. با توجه به تغییرات عمده مقدار عددی ثابت هابل و نیز نقش کلیدی آن در کیهان‌شناسی، در ادامه به‌طور خلاصه به روش‌های متعددی که طی یک قرن گذشته برای تعیین این ثابت و همچنین مقادیر به‌دست‌آمده را معرفی خواهیم کرد.

۲. روش‌های تعیین ثابت هابل

تاکنون برای تعیین ثابت هابل روش‌های متعددی به کار برده شده است. بیشتر این روش‌ها مستقیماً به تعیین فاصله بر می‌گردد. برای به‌دست‌آوردن ثابت هابل با روش‌های فاصله‌ای، کهکشان‌هایی مورد استفاده قرار می‌گیرند که به علت فاصله زیاد، سرعت‌های ویژه (ناشی از حرکت‌های محلی و کاتوره‌ای) آنها در مقایسه با سرعت پسرویشان (ناشی از انبساط عالم) قابل چشم‌پوشی باشد. در این صورت می‌توان با به‌دست‌آوردن فاصله و سرعت کهکشان و با به‌کارگیری قانون هابل، ثابت هابل را تعیین کرد.

۲-۱. روش‌های فاصله‌ای:

در روش‌های فاصله‌ای که برخی از آنها با عنوان روش نردبانی نیز شناخته می‌شوند، محققان با ترکیب داده‌های به‌دست‌آمده از مراحل مختلف، می‌توانند سرعت انبساط کیهان را محاسبه کنند و بنابراین به‌طور مستقیم ثابت هابل را تعیین کنند. در ذیل به موارد مختلف از این روش‌ها خواهیم پرداخت.

۲-۱-۱. متغیرهای قیفاووسی (Cepheid Variables)

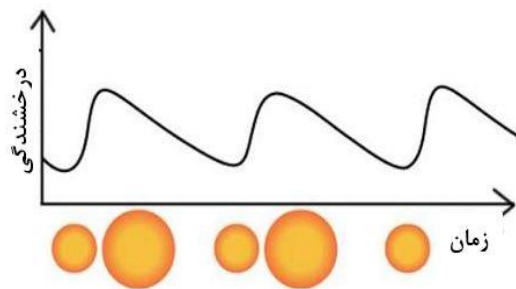
مهم‌ترین ستارگان تپنده، متغیرهای قیفاووسی هستند که دارای درخشندگی زیادی بوده و از فواصل دور نیز قابل رصدند. آنها ستارگانی هستند که به دلیل آن‌که در دوره‌های زمانی چند روزه، تعادل هیدرواستاتیکی آنها به هم می‌خورد، منبسط و منقبض می‌شوند. این پدیده اثر مستقیمی روی درخشندگی ذاتی قیفاووسی‌ها می‌گذارد (شکل ۲). لیویت و پیکرینگ (۱۹۱۲) که در رصدخانه دانشگاه هاروارد مشغول بررسی بیش از ۱۷۰۰ ستاره متغیر در ابرهای ماژلانی بود؛ با رصد و تمرکز بر روی ۲۵ نمونه از آنها در ابر ماژلانی کوچک و در نظر گرفتن فاصله تقریباً یکسان برای تمامی آنها نمودار دوره‌تناوب را بر حسب قدر ظاهری رسم کرد و به این نکته مهم پی برد که هرچه دوره‌تناوب متغیر قیفاووسی طولانی‌تر باشد تابندگی متوسط آن بیشتر است. با کشف رابطه دوره‌تناوب-تابندگی متغیرهای قیفاووسی، در سال‌های بعد اخترشناسان توانستند فاصله قیفاووسی‌های کهکشان‌های دیگر را به‌دست آورند و این روش برای مدت‌ها به روش اساسی تعیین فواصل برون‌کهکشانی تبدیل شد. هابل (۱۹۲۶) از همین روش استفاده کرد و در نهایت در سال ۱۹۲۹ مقاله مشهور خود، مبتنی بر قانون هابل (دال بر انبساط عالم) را ارائه و مقدار عددی $H_0 = 50 \text{ km s}^{-1}/(\text{Mpc})$ را گزارش کرد (هابل، ۱۹۲۹). باد (۱۹۴۴)، توانست طی مشاهداتی کشف کند که دو نوع متغیر قیفاووسی وجود دارد و با اندازه‌گیری فواصل آن‌ها، مقدار ثابت هابل را $H_0 = 25 \text{ km s}^{-1}/(\text{Mpc})$ گزارش کرد. فرنی (۱۹۶۹) پیشنهاد داد که برای افزایش دقت رابطه دوره‌تناوب-تابندگی، پارامتر رنگ به آن اضافه شود.

ابرنواخترهای نوع Ia هستند. وقتی جرم کوتوله سفید به حد جرم چاندراسهکار (Chandrasekhar) برسد انفجار ابرنواختر نوع Ia رخ می‌دهد. پس با معلوم بودن جرم، درخشندگی ستاره معین خواهد بود. بنابراین حد چاندراسهکار مسئول اصلی برای آن است که ابرنواخترهای نوع Ia به‌طور تقریبی به‌عنوان شمع استاندارد برای فاصله‌یابی شناخته شوند. برانچ و پچت (۱۹۷۳) با استفاده از ابرنواخترهای نوع Ia برای ثابت هابل مقدار عددی $H_0 = 40^{+1} \text{ (Mpc)}$ را تخمین زد. در اقدامی دیگر و بر اساس مشاهدات ابرنواخترهای نوع Ia در پروژه کیهان‌شناسی ابرنواختر، مقدار عددی ثابت هابل $H_0 = 65 \text{ km s}^{-1} \text{ (Mpc)}$ گزارش شد (پرموتر، ۲۰۰۰). سندیج و همکاران (۲۰۰۶) با واسنجی فواصل ابرنواخترها به مقدار $\text{kms}^{-1} \text{ (Mpc)}$ $H_0 = 62/3$ دست یافتند.

۲-۱-۴. رابطه تولی فیشر (Tully-Fisher Relation)

تولی و فیشر (۱۹۷۷) روش جدیدی برای به‌دست آوردن فواصل کهکشان‌های مارپیچی ارائه دادند. آنها دریافتند که بین قدر مطلق کهکشان‌های مارپیچی و پراکندگی بسامد خط ۲۱ سانتی‌متری هیدروژن خنثی رابطه‌ای وجود دارد. هرچه خط ۲۱ cm پهن‌تر می‌شود، درخشندگی بیشتر می‌شود. بنابراین رابطه تولی فیشر رابطه‌ای تجربی بین سرعت چرخشی (یا پهنای خط نشری) و درخشندگی (یا جرم) یک کهکشان مارپیچی است (شکل ۳). تولی و فیشر با به‌دست آوردن فاصله خوشه‌های ویرگو (دوشیزه) و دب-اکبر از این روش، مقدار ثابت هابل را $\text{kms}^{-1} \text{ (Mpc)}$ $H_0 = 80^{+1}$ تخمین زدند. جیووانلی و همکاران (۱۹۹۷) برای محاسبه مقدار ثابت هابل از رابطه تولی فیشر، ۲۴ خوشه کهکشانی را مورد بررسی قرار دادند. نتیجه بررسی آنها برای ثابت هابل، مقدار $\text{kms}^{-1} \text{ (Mpc)}$ $H_0 = 69 \pm 5$ بود. در سال ۲۰۱۳ (سورس و همکاران، ۲۰۱۳)، با استفاده از واسنجی فروسرخ میانی رابطه تولی فیشر برای فواصل بیش از ۵۰ Mpc، $\text{kms}^{-1} \text{ (Mpc)}$ $H_0 = 74 \pm 5$ به‌دست آمد.

فیست و واکر (۱۹۸۷) توانستند با بررسی تعدادی از قیفاووسی‌های فراکهکشانی مقدار ثابت هابل را $H_0 = 100 \text{ km s}^{-1} \text{ (Mpc)}$ به‌دست آورند. یکی از جدیدترین مقادیر گزارش شده توسط تیم کفش‌های هابل (HUBBLE SHOES) که با استفاده از متغیرهای قیفاووسی به‌دست آمده عبارت از $\text{kms}^{-1} \text{ (Mpc)}$ $H_0 = 74/0.3 \pm 1/4.2$ می‌باشد (ریس و همکاران، ۲۰۲۱).



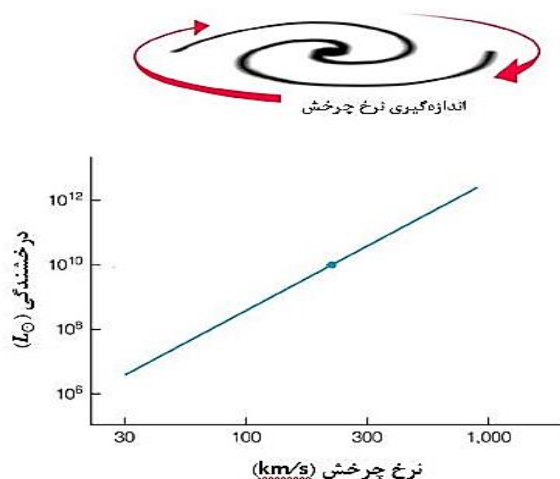
شکل ۲. تغییر اندازه و درخشندگی ذاتی یک قیفاووسی در دوره‌تناوب مشخص.

۲-۱-۲. طرح کلید تلسکوپ فضایی هابل (Hubble Space Telescope Key Project)

این طرح بزرگ به رهبری وندی فریدمن (۱۹۹۹)، انجام شده که نتیجه اولیه آن برای مقدار ثابت هابل $H_0 = 73 \text{ km s}^{-1} \text{ (Mpc)}$ بود. فریدمن و همکاران (۲۰۰۱) با واسنجی رابطه دوره‌تناوب-تابندگی قیفاووسی‌ها (داده‌های طرح کلید تلسکوپ هابل) و همچنین با استفاده از مشاهدات فروسرخ میانی (داده‌های تلسکوپ فضایی اسپیتزر (Spitzer))، مقدار $H_0 = 74/1 \text{ kms}^{-1} \text{ (Mpc)}$ را برای این ثابت به‌دست آورد (فریدمن و همکاران، ۲۰۱۲). با ادامه بررسی قیفاووسی‌های فراکهکشانی، ریس و همکاران (۲۰۱۶) توانست با استفاده از تلسکوپ هابل، با رصد متغیرهای قیفاووسی در ۱۱ کهکشان، مقدار ثابت هابل را $H_0 = 72/25 \text{ km s}^{-1} \text{ (Mpc)}$ برآورد کند.

۲-۱-۳. ابرنواخترهای نوع Ia (Supernova Ia)

یکی از درخشان‌ترین اجرام شناخته شده برای فاصله‌یابی



شکل ۳. رابطه تولی فیشر برای کهکشان‌های مارپیچی.

مورد توجه قرار دادند. در زمینه تعیین ثابت هابل، اگرچه ستاره‌های مرحله غول قرمز نمی‌توانند از فواصل بسیار دور دیده شوند؛ ولی در فواصلی در حدود ۲۰ مگاپارسک می‌توانند به‌عنوان شاخص‌هایی مستقل از قیفاووسی‌ها و برای واسنجی مقادیر به‌دست آمده از آنها مورد استفاده قرار گیرند. روش قله مرحله غول قرمز از لحاظ دقت، قابل مقایسه با روش قیفاووسی است اما از لحاظ رصدی، از قیفاووسی‌ها بسیار کارآمدتر است؛ چراکه در روش قیفاووسی برای تعیین فاصله، نیاز به دنبال کردن یک چرخه از تغییرات نور ستاره برای به‌دست آوردن دوره تناوب آن داریم ولی در روش قله مرحله غول قرمز، یک دوره مشاهده که دو طول موج را (برای فراهم کردن رنگ) به‌وجود می‌آورد، کافی است. سالاریس و کاسیسی (۱۹۹۸) با استفاده از این روش، فاصله خوشه ویرگو را تعیین و برای ثابت هابل مقدار $H_0 = 77 \pm 8 \text{ km s}^{-1}/(\text{Mpc})$ به‌دست آوردند. در بررسی دیگری با تعیین فاصله تا خوشه کما (گیسو) ثابت هابل $H_0 = 60 \pm 11 \text{ km s}^{-1}/(\text{Mpc})$ تخمین زده شد (هریس و همکاران، ۱۹۹۸). مولد و ساکی (۲۰۰۸) برای به‌دست آوردن ثابت هابل از قله مرحله غول قرمز برای واسنجی مقیاس فاصله قیفاووسی استفاده کردند. آنها با به‌دست آوردن فواصل قله مرحله غول قرمز مربوط به ۱۴ کهکشان مختلف، مقدار $H_0 = 73 \pm 5 \text{ km s}^{-1}/(\text{Mpc})$ را برای ثابت هابل تخمین زدند. تامان و ریندل (۲۰۱۲) با بعید دانستن مقدار بیشتر از $70 \text{ km s}^{-1}/(\text{Mpc})$ برای

۲-۱-۵. قله مرحله غول قرمز (Tip of the Red Giant

(Branch

در سیر تحولی ستارگان کم جرم و کم فلز، زمانی که در مرکز ستاره، هسته هلیومی وجود دارد و توسط فشار تبهگن الکترونی پشتیبانی می‌شود؛ در اطراف هسته، یک پوسته هیدروژنی در حال سوختن است. هلیوم ناشی از سوختن این پوسته هیدروژنی به‌طور سامانه‌ای باعث افزایش جرم هسته با زمان می‌شود و به‌طور هم‌زمان شعاع هسته کاهش می‌یابد و در نتیجه هر دوی این‌ها درخشندگی ستاره افزایش می‌یابد. ستاره با افزایش درخشندگی و دمای هسته به مرحله غول قرمز می‌رسد. زمانی که دمای هسته از دمای فیزیکی تعریف شده بیشتر شود (تقریباً به‌صورت مستقل از جرم اولیه ستاره و ترکیبات آن)، هلیوم در سراسر هسته می‌سوزد. احتراق هسته هلیوم، ستاره را روشنتر نمی‌کند بلکه در عوض از طریق یک انفجار گرمایی، پوسته را به بیرون پرتاب می‌کند و در نتیجه باعث برداشته شدن تبهگنی الکترون در هسته می‌شود. این تغییر قابل ملاحظه، به‌شکل یک جرقه هلیوم رخ می‌دهد که به آن "قله مرحله غول قرمز" می‌گویند و درخشندگی آن تقریباً ۲۵۰۰ برابر درخشندگی خورشید است. قدر قله مرحله غول قرمز در پهنای فروسرخ، دارای خواص فوق‌العاده مطلوب به‌عنوان یک شاخص فاصله است و در این پهنای روشنایی قله، کمترین وابستگی را به رنگ دارد. لی و همکاران (۱۹۹۳) به‌طور خاص قله مرحله غول قرمز را به‌عنوان شاخص فاصله

۲۰۰۲). فریتز (۲۰۱۲) با استفاده از فاصله خوشه کما که با این روش محاسبه شده بود، مقدار $km\ s^{-1}/(Mpc)$ $H_0=11\pm 85$ را برای ثابت هابل پیشنهاد داد. کانتیلو و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از داده‌های یکی از دوربین‌های فرسرخ تلسکوپ فضایی هابل، فاصله تا کهکشان NGC ۴۹۹۳ را $40/4\ Mpc \pm 1$ تعیین کردند که با بررسی میزان انتقال به سرخ طیف آن، منجر به ثابت هابل $km\ s^{-1}/(Mpc)$ $H_0=71/7\pm 9/1$ شد.

۷-۱-۲. اثر سانیاو-زلدوویچ (Sunyaev-Zeldovich Effect)

خوشه‌های کهکشانی به علت میدان گرانشی قوی خود، دارای یک پلاسمای داغ کاملاً یونیزه هستند که به آن محیط میان‌خوشه‌ای می‌گویند. محیط میان‌خوشه‌ای، تابشی از نوع تابش ترمزی پرتوی ایکس ساطع می‌کند؛ از طرفی فوتون‌های ریزموج زمینه کیهانی با عبور از میان خوشه‌های سنگین، با الکترون‌های پر انرژی محیط میان‌خوشه‌ای برهم‌کنش می‌کنند. برهم‌کنش غالب، برهم‌کنش کامپتون معکوس است که در آن فوتون ریزموج زمینه کیهانی در حین برهم‌کنش با ماده، انرژی جذب کرده، طول‌موج آن کوتاه‌تر شده و در نتیجه یک انحراف کوچک (کمتر از یک میلی‌درجه کلونین) در طیف فوتون‌های ریزموج زمینه کیهانی ایجاد می‌شود. این پدیده را برای اولین بار سانیاو و زلدوویچ در سال ۱۹۶۹ مشاهده کردند. میزان این انحراف در طیف فوتون‌های ریزموج زمینه کیهانی به چگالی، دمای الکترون‌های محیط میان‌خوشه‌ای و ابعاد خوشه بستگی دارد ولی کاملاً مستقل از فاصله خوشه است. برای اندازه‌گیری این انحراف معمولاً از تلسکوپ‌های رادیویی و برای تعیین ویژگی‌های محیط میان‌خوشه‌ای از رصدخانه اشعه ایکس چاندرا استفاده می‌شود؛ در این صورت ابعاد فیزیکی مشخص شده و با اندازه‌گیری بزرگی زاویه‌ای آن، فاصله تا خوشه محاسبه می‌شود. اگرچه این روش، روشی یک مرحله‌ای برای تعیین ثابت هابل است اما مشکلاتی نیز دارد. اولاً شامل دو اندازه‌گیری است و

ثابت هابل از طریق فاصله‌یابی قله مرحله غول قرمز، مقدار $km\ s^{-1}/(Mpc)$ $H_0=63/2\pm 7/3$ را گزارش کردند. جنگ و لی (۲۰۱۷) با بررسی فواصل قله مرحله غول قرمز مربوط به کهکشان‌های میزبان ابرنواخترهای نوع Ia، $km\ s^{-1}/(Mpc)$ $H_0=71/3\pm 17/5$ را برای ثابت هابل اعلام کرد.

۶-۱-۲. افت و خیز روشنایی سطحی (Surface Brightness Fluctuation)

در این روش، افت و خیز در توزیع نور تصویر یک کهکشان که ناشی از تفاوت در تعداد و درخشندگی ذاتی ستاره‌های کهکشان است به کمک CCD (Charged-Coupled Device) در هر عنصر تفکیک‌پذیر (پیکسل (Pixle)) اندازه‌گیری می‌شود. دامنه این افت و خیزها با معکوس فاصله تا کهکشان متناسب است. در واقع برای روشنایی سطحی معین، اختلاف در یک پیکسل (با اندازه زاویه معین) تابعی از فاصله است؛ به این دلیل که تعداد کل منابع گسسته که به هر پیکسل می‌رسد با مربع فاصله رابطه عکس دارد. در این روش که بیشتر برای به‌دست آوردن فواصل تا کهکشان‌های بیضوی و مارپیچی کاربرد دارد، نقش کلیدی بر عهده جمعیت ستارگان غول قرمز کهکشان مورد نظر است؛ با این حال نسبت به روش قله مرحله غول قرمز مناسب‌تر است. تونری و اشنایدر (۱۹۸۸) برای اولین بار فاصله کهکشان‌های M32 و N3379 را به‌دست آورده با بیان این مطلب که فاصله M32 به‌طور واضح برای تخمین ثابت هابل مناسب نیست، با استفاده از فاصله N3379 و محاسبه سرعت خوشه لئو (که N3379 عضوی از آن است) در حدود ۸۸۰ کیلومتر بر ثانیه، ثابت هابل را تقریباً برابر $km\ s^{-1}/(Mpc)$ $H_0=90$ تخمین زدند. تونری و همکاران (۲۰۰۰) توانستند دقت این روش را بهبود بخشند و با محاسبه فاصله ۳۰۰ کهکشان با این روش و واسنجی این فواصل با قیفاووسی‌ها، مقدار ثابت هابل را $km\ s^{-1}/(Mpc)$ $H_0=77$ گزارش کردند. سپس، او، مقدار H_0 را به $km\ s^{-1}/(Mpc)$ $H_0=73\pm 4$ کاهش داد (بلیکسلی و همکاران،

هرکدام از این اندازه‌گیری‌ها دارای خطاهایی هستند و ثانیاً این خطاها به مدل‌سازی خوشه موردنظر بستگی دارد. استفاده از اثر سانیو-زلدویچ در اوایل دهه ۱۹۹۰ مورد توجه کیهان‌شناسان رصدی قرار گرفت و توانستند با به‌دست آوردن فواصل تا برخی از خوشه‌های کهکشانی، روی مقدار عددی ثابت هابل قید بگذارند. نکته قابل توجه آن‌که، مقادیر ثابت هابل به‌دست آمده از این روش پراکندگی زیادی از ۴۰ تا بیش از ۶۰ (در واحد $\text{km s}^{-1}/(\text{Mpc})$) نشان می‌دهند. بیرکینشاو و همکاران (۱۹۹۱) با استفاده از اثر سانیو-زلدویچ مقدار ثابت هابل را $H_0 = 40 \pm 9 \text{ km s}^{-1}/(\text{Mpc})$ به دست آوردند؛ وی و هیوز (Hughes) سپس این مقدار را $H_0 = 55 \pm 17 \text{ km s}^{-1}/(\text{Mpc})$ برآورد کردند (بیرکینشاو و هیوز، ۱۹۹۴). رییس و همکاران (۲۰۰۰) توانستند با استفاده از این روش، ثابت هابل را $H_0 = 63^{+12}_{-9} \text{ km s}^{-1}/(\text{Mpc})$ به‌دست آورند. رییس و همکاران (۲۰۰۲) مقدار این ثابت را به $\text{km s}^{-1}/(\text{Mpc})$ و همکاران $H_0 = 60^{+13}_{-18}$ کاهش دادند.

۲-۱-۸. مگا میزر (Megamaser)

مگامیزرها پدیده‌های طبیعی قابل توجهی هستند که به علت درخشندگی زیاد، از فواصل بسیار دور نیز قابل تشخیص‌اند. سامانه مگامیزر در یک کهکشان، شامل توده‌هایی گازی و حلقه‌مانند است که معمولاً در فاصله تقریباً 0.01 pc از آبرسیاه‌چاله مرکزی کهکشان واقع شده است. این توده‌ها به‌طور هماهنگ در یک خط طیف آب (H_2O) در فرکانس تقریباً 22 GHz تابش می‌کنند؛ که این تابش می‌تواند در مقیاس تفکیک‌پذیری میلی‌ثانیه‌قوسی در شیوه تداخل‌سنجی خط پایه بسیار طولانی Very Long Baseline Interferometry (VLBI) مشاهده شود. با طیف‌سنجی VLBI می‌توان سرعت توده‌ها را با دقت اندازه گرفت و با مشاهدات پی‌درپی حرکات توده‌ها می‌توان شتاب آنها را به دست آورد. همچنین با فرض این‌که توده‌ها در حال چرخش کپلری هستند، می‌توان شعاع توده‌ها را محاسبه کرد. با دانستن این شعاع همراه با جدایی زاویه‌ای

توده از مرکز کهکشان، فاصله کهکشان به‌دست می‌آید. اولین سامانه میزر که در یک کهکشان کشف شد NGC 4258 بود؛ اما از آنجایی که فاصله $7.0 \pm 2.5 \text{ Mpc}$ به‌دست آمده برای تعیین ثابت هابل مورد استفاده قرار نگرفت. رصدخانه ملی رادیواخترشناسی امریکا طرحی برای یافتن مقدار دقیق ثابت هابل با استفاده از مگا میزرها اجرا کرده است؛ طرح کیهان‌شناسی مگامیزر، که در اولین نتیجه آن در سال ۲۰۰۸ کهکشان مگامیزر UGC 3789 مورد بررسی قرار گرفت. با به‌دست آوردن فاصله $49.5 \pm 6.1 \text{ Mpc}$ برای این کهکشان، $H_0 = 68.7 \pm 9.1 \text{ km s}^{-1}/(\text{Mpc})$ برای ثابت هابل برآورد شد (رید و همکاران، ۲۰۱۳). استفاده از روش مگامیزر، امکان فاصله‌یابی برای کهکشان‌های بسیار دور که در شار هابل قرار می‌گیرند را فراهم کرده است. در این روش، برای فواصل فراتر از ۱۰۰ مگاپارسک، به‌جای در نظر گرفتن یک حلقه باریک به‌عنوان سامانه میزر، یک سامانه چند شعاعی در نظر می‌گیرند و با تعمیم آن به سه بعد و حل سه بعدی معادله، فاصله تا کهکشان را به‌دست می‌آورند. طرح مگامیزر در سال ۲۰۱۳ با استفاده از کهکشان NGC 6264 در فاصله $144 \pm 19 \text{ Mpc}$ ، مقدار $\text{km s}^{-1}/(\text{Mpc})$ $H_0 = 68.9 \pm 9.9$ را برای ثابت هابل به‌دست آورد (کو و همکاران، ۲۰۱۳). چند سال بعد، به‌عنوان بخشی از طرح کیهان‌شناسی مگامیزر، فاصله هندسی تا کهکشان مگامیزر NGC 5765b، در حدود $126/11 \pm 3/6 \text{ Mpc}$ ، مگاپارسک تعیین و ثابت هابل $H_0 = 66 \pm 6 \text{ km s}^{-1}/(\text{Mpc})$ تخمین زده شد (گائو و همکاران، ۲۰۱۶). در سال ۲۰۱۸، با بررسی کهکشان مگامیزر UGC 6093 (شکل ۲-۳) به فاصله $151/7 \text{ Mpc}$ مگاپارسک، مقدار ثابت هابل $\text{km s}^{-1}/(\text{Mpc})$ $H_0 = 70 \pm 5$ محاسبه شد (ژائو و همکاران، ۲۰۱۸).

۲-۱-۹. تعیین ثابت هابل از طریق اندازه‌گیری‌های

BAO

BAO یا "Baryon Acoustic Oscillations" به نوسانات صوتی باریونی اشاره دارد که در زمان‌های اولیه کیهان به وجود آمدند. این نوسانات به‌دلیل تعاملات بین ماده و تابش

Q0957+561 صورت گرفت. کاندیدیک و همکاران (۱۹۹۷) با محاسبات دقیق، توانستند مقدار $H_0 = 64 \pm 13 \text{ km s}^{-1}/(\text{Mpc})$ را به دست آورند. فالکو (۱۹۹۷) به طور مستقل، با بررسی تصاویر مربوط به اختروش Q0957+561، ثابت هابل را $H_0 = 62 \pm 7 \text{ km s}^{-1}/(\text{Mpc})$ برآورد کردند. در سال ۱۹۹۸، با تجدید نظر در توزیع جرم عدسی گرانشی، مقدار ثابت هابل به km s^{-1} (و امبسگانس، ۱۹۹۸). در ۲۰۱۰، با استفاده از تأخیر زمانی ۱۸ عدسی گرانشی مقدار عددی $H_0 = 76 \pm 3 \text{ km s}^{-1}/(\text{Mpc})$ به دست آمد (پارافیچ و هیورث، ۲۰۱۰). در سال ۲۰۱۷، طرحی با عنوان H_0 Lenses in COSMOSGRIL's (Wellspring) آغاز به کار کرد که وظیفه آن به دست آوردن ثابت هابل از ۵ عدسی گرانشی (HE1104-1805، B1608+656، RXJ1131-1231، HE0435-1223 و WFI2033-4723) با خطای کمتر از ۴ درصد اعلام شد و توانست $H_0 = 72 \text{ km s}^{-1}/(\text{Mpc})$ را برآورد کند (سویو و همکاران، ۲۰۱۷). در دوازدهمین مقاله منتشر شده از این طرح و با بررسی عدسی گرانشی (WFI2033-4723) ثابت هابل $H_0 = 71^{+6}_{-3} \text{ km s}^{-1}/(\text{Mpc})$ تخمین زده شد (روسو و همکاران، ۲۰۱۹).

۲-۲-۲. امواج گرانشی (Gravitational Waves)

زمانی که همکاری پروژه‌های لایگو (Ligo) و ویرگو (Virgo) منجر به آشکارسازی امواج گرانشی شد؛ آنها با فرض این که کهکشان NGC4993 به عنوان کهکشان میزبان این موج گرانشی باشد، سرعت شار هابل این موقعیت مکانی را به دست آوردند. نتیجه این کار منجر به $H_0 = 70^{+12}_{-8} \text{ km s}^{-1}/(\text{Mpc})$ برای ثابت هابل شد (ابوت و همکاران، ۲۰۱۷). کمی بعد، در سال ۲۰۱۹ گروهی دیگر با در نظر گرفتن تمامی کهکشان‌های روشنتر از یک مقدار معین به عنوان کهکشان‌هایی که ممکن است میزبان این موج گرانشی باشند مقدار عددی ثابت هابل را $H_0 = 77^{+37}_{-18} \text{ km s}^{-1}/(\text{Mpc})$ تخمین زدند (فیثباخ و

در دوران اولیه جهان شکل گرفتند و به عنوان یک الگوی ساختاری در توزیع کهکشان‌ها و ماده تاریک در کیهان مشاهده می‌شوند. اندازه‌گیری‌های BAO به عنوان یک ابزار کلیدی در تعیین ثابت هابل عمل می‌کنند. این اندازه‌گیری‌ها به ما اجازه می‌دهند تا فاصله‌ها و سرعت انبساط کیهان را با دقت بیشتری محاسبه کنیم (کوسیو و همکاران، ۲۰۱۹). به طور خاص، BAO به عنوان یک مقیاس استاندارد عمل می‌کند که می‌توان از آن برای تعیین فاصله‌های کیهانی استفاده کرد. با بررسی توزیع کهکشان‌ها در مقیاس‌های بزرگ، می‌توان الگوهای BAO را شناسایی کرد. این الگوها به ما کمک می‌کنند تا فاصله‌ها را به دقت تعیین کنیم. داده‌های مربوط به تابش ریزموج زمینه کیهانی (CMB) نیز می‌توانند به تعیین مقیاس BAO کمک کنند (در یکی از بخش‌های پیش رو به آن خواهیم پرداخت). با مقایسه این داده‌ها با توزیع کهکشان‌ها، می‌توان ثابت هابل را محاسبه کرد. امروزه بر اساس داده‌های به دست آمده از پروژه‌های مختلف (آلام (Alam) و همکاران، ۲۰۱۸) مانند: DESI (Dark Energy Spectroscopic Instrument) و SDSS (Digital Sky Survey Sloan) محققان با دقت بالا به مقادیر مختلفی برای ثابت هابل دست یافته‌اند. این مقادیر معمولاً در محدوده ۶۷ تا ۷۴ کیلومتر بر ثانیه بر مگاپارسک قرار دارند.

۲-۲-۲. روش‌های غیر فاصله‌ای در تعیین ثابت هابل

۲-۲-۱. تأخیر زمانی همگرایی گرانشی

(Gravitational Lens Time Delay)

نخستین بار رفسدال (۱۹۶۴) دریافت که اندازه‌گیری اختلاف در زمان رسیدن نور و جدایی زاویه‌ای تصاویر عدسی‌های قوی از یک شیء متغیر با زمان (مانند اختروش-ها یا ابرنواخترها) می‌تواند برای تعیین ثابت هابل مورد استفاده قرار گیرد (به طوری که $\tau \propto \frac{1}{H_0}$). پس از کشف اولین اختروش (quasar) در سال ۱۹۷۹، عدسی گرانشی اهمیت بیشتری یافت. اولین استفاده از این روش در سال ۱۹۹۷ با استفاده از تأخیر زمانی تصاویر اختروش

همکاران، ۲۰۱۹).

کنند. این شبکه‌ها می‌توانند به‌طور خودکار ویژگی‌های مهم داده‌ها را شناسایی کنند و به بهبود دقت اندازه‌گیری‌ها کمک کنند. همچنین، با استفاده از یادگیری ماشین در تحلیل داده‌های تلسکوپی، به ویژه در پروژه‌هایی مانند تلسکوپ فضایی هابل، محققان این امکان را دارند که با دقت بیشتری به بررسی انبساط کیهان بپردازند و ثابت هابل را تعیین کنند. به‌طور خلاصه، استفاده از روش‌های یادگیری ماشین در کیهان‌شناسی، به ویژه در تعیین ثابت هابل، به محققان این امکان را می‌دهد که به‌طور مستقل از مدل‌های کیهان‌شناسی، به تحلیل داده‌ها بپردازند. این رویکرد می‌تواند به بهبود دقت اندازه‌گیری‌ها و درک بهتر از ساختار کیهان کمک کند. در مقالات اخیر که به بررسی تعیین مقدار ثابت هابل با استفاده از یادگیری ماشین پرداخته‌اند، مقادیر مختلفی گزارش شده است. از جمله مقدار $68/4$ کیلومتر بر ثانیه بر مگاپارسک که این مقدار از تحلیل داده‌های هابل با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین به‌دست آمده و به‌عنوان یکی از تخمین‌های معتبر در نظر گرفته می‌شود (بنگالی و همکاران، ۲۰۲۳) و یا مقدار 70 کیلومتر بر ثانیه بر مگاپارسک که مربوط به یک پژوهش جدید دیگر با استفاده از همین روش بوده است (چن و همکاران، ۲۰۲۲).

۲-۲-۵. روشی مستقل برای تعیین ثابت هابل

این مطالعه به بررسی رابطه بین روش‌های خط هیدروژن و سرعت انبساط گازهای یونیزه در کهکشان‌ها پرداخته و به‌عنوان یک روش مستقل عمل کرده است. مقدار ثابت هابل گزارش شده از این طریق حدود 73 کیلومتر بر ثانیه بر مگاپارسک می‌باشد (فرناندز و ترلویچ، ۲۰۱۸).

۳. روش‌های تعیین ثابت هابل در یک نگاه

به‌طور کلی، می‌توان روش‌های ذکر شده را بر اساس شیوه به‌دست آوردن مقدار ثابت هابل، در جدول (جدول ۱) خلاصه کرد:

۲-۲-۳. تابش ریزموج زمینه کیهانی (Cosmic Microwave Background Radiation)

ناهمسانگردی در تابش ریزموج زمینه کیهانی به صورت نوسانات صوتی باریونی درمی‌آیند که به دلایل فیزیکی، به شکل قله‌ها و دره‌هایی در طیف ظاهر می‌شوند. با توجه به این که این نوسانات ناشی از ناپایداری‌های گرانشی‌اند و به مدل خاصی بستگی ندارند، قله‌های مربوط به این نوسانات اطلاعات با ارزشی در مورد برخی پارامترهای کیهانی از قبیل چگالی عالم و ثابت هابل به ما می‌دهند. مقدار عددی ثابت هابل که در این روش به‌دست می‌آید، نه به شکل یک اندازه‌گیری مستقیم از یک شیء محلی، بلکه حاصل بهترین بهینه‌سازی معادلات فریدمن برای $(\Omega_m + \Omega_k + \Omega_\Lambda = 1)$ است. در سال ۲۰۱۸، بر اساس مدل استاندارد کیهان‌شناسی (مدل Λ CDM) و طبق داده‌های ماهواره WMAP مقدار ثابت هابل $H_0 = 68/33 \text{ km s}^{-1}/(\text{Mpc})$ (آقانیم و همکاران، ۲۰۲۰) و بر پایه داده‌های ماهواره پلانک مقدار $H_0 = 67 \pm 4/0.5 \text{ km s}^{-1}/(\text{Mpc})$ برآورد شد (کیبل و همکاران، ۲۰۱۹؛ همکاران پروژه پلانک، ۲۰۲۰).

۲-۲-۴. روش‌های مقیدسازی بر اساس مدل‌های

کیهان‌شناسی و یادگیری ماشین

یادگیری ماشین (Machine Learning) به‌عنوان یک ابزار قدرتمند در تحلیل داده‌های کیهان‌شناسی، به ویژه در تعیین ثابت هابل، به کار گرفته می‌شود. این روش‌ها می‌توانند به‌طور مستقل از مدل‌های کیهان‌شناسی، به شناسایی الگوها و روابط پیچیده در داده‌ها بپردازند. به‌عنوان نمونه با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین، می‌توان داده‌های نوری و مادون قرمز را برای شناسایی کهکشان‌ها و محاسبه فاصله آنها تحلیل کرد. این روش به محققان این امکان را می‌دهد که ثابت هابل را با دقت بیشتری اندازه‌گیری کنند. یا به‌عنوان نمونه‌ای دیگر با شبکه‌های عصبی می‌تواند برای پیش‌بینی رفتار کیهان را پیش‌بینی و ثابت هابل را تعیین

جدول ۱. مقایسه روش‌های تعیین ثابت هابل.

روش	شیوه به‌دست‌آوردن (H_0)	حدود مقدار به‌دست‌آمده $\text{Km s}^{-1}/(\text{Mpc})$
ستارگان متغیر قیفاووسی	فاصله‌سنجی از طریق مشاهده یک دوره تناوب ستاره قیفاووسی	۷۴
قله مرحله غول قرمز (TRGB)	فاصله‌سنجی از طریق مشاهده درخشندگی فوق‌العاده جرقه هلیوم در غول قرمز	۶۹
مگامیزر	فاصله‌سنجی از طریق به‌دست‌آوردن شعاع توده مگامیزر مرکزی کهکشان	۶۹
افت و خیز روشنایی سطحی (SBF)	فاصله‌سنجی از طریق اندازه‌گیری افت و خیز توزیع نور تصویر CCD یک کهکشان	> ۷۰
رابطه تولی فیشر	فاصله‌سنجی از طریق محاسبه سرعت چرخشی و تابندگی کهکشان مارپیچی	۷۵
ابرنواختر نوع Ia	فاصله‌سنجی از طریق مشاهده نور حاصل از انفجار ابرنواختر	۶۷
اثر سانیاو-زلدوویچ	فاصله‌سنجی از طریق بررسی انحراف طیف فوتون‌های زمینه کیهانی در اطراف خوشه‌های کهکشانی	۶۰
نوسانات صوتی باریونی BAO	اندازه‌گیری فاصله و سرعت انبساط کیهان از مبتنی بر توزیع کهکشان‌ها	۶۷-۷۴
همگرایی گرانشی	محاسبه تأخیر زمانی حاصل از پدیده همگرایی گرانشی	۷۰
تابش ریزموج زمینه کیهانی (CMBR)	استفاده از نظریه‌های تشکیل ساختار در بررسی نوسانات آکوستیکی باریونی طیف CMBR	۶۸
یادگیری ماشین	شناسایی الگوها و روابط پیچیده در داده‌ها به‌طور مستقل از مدل‌های کیهان‌شناسی	۶۸-۷۰
تلسکوپ فضایی جیمز وب	جدیدترین تلاش‌ها در راستای حل مشکل تنش هابل	۶۹

۴. مقایسه‌ای کلی بین روش‌های مختلف و مسئله تنش

هابل (Hubble Tension)

تنش هابل به اختلاف قابل توجهی اشاره دارد که بین مقادیر ثابت هابل به‌دست‌آمده از اندازه‌گیری‌های محلی و مقادیر پیش‌بینی‌شده از مدل‌های کیهانی وجود دارد. این اختلاف به‌طور خاص بین اندازه‌گیری‌های محلی مانند ابرنواخترهای نوع Ia و اندازه‌گیری‌های مربوط به تابش ریزموج زمینه‌ای کیهانی مشاهده می‌شود. فرض‌های همگنی و همسانگردی به این معنا هستند که کیهان در مقیاس‌های بزرگ به‌طور یکنواخت و مشابه در همه جهات رفتار می‌کند. این فرض‌ها به محققان اجازه می‌دهند تا از مشاهدات محلی برای تعمیم

به کل کیهان استفاده کنند (اصل کیهان‌شناسی). با این حال، اگر این فرض‌ها نقض شوند، ممکن است مقدار ثابت هابل تغییر کند و نتایج متفاوتی به‌دست آید. به‌عنوان مثال، در برخی از تحقیقات اخیر، به وجود "تنش هابل" اشاره شده که نشان می‌دهد مقادیر اندازه‌گیری‌شده از ثابت هابل با پیش‌بینی‌های مدل‌های استاندارد مطابقت ندارد. مقادیر گزارش‌شده از طریق یادگیری ماشین در مقایسه با مقادیر گزارش‌شده بر اساس مدل ΛCDM ، نشان‌دهنده تنش‌های موجود در اندازه‌گیری‌های مختلف است (ورده و همکاران ۲۰۱۹؛ فریدمن، ۲۰۲۱). این تنش‌ها نیاز به تحقیقات بیشتر و بهبود روش‌های اندازه‌گیری را نشان می‌دهند. در

روش‌های فاصله‌ای که از اندازه‌گیری‌های ابرنواخترها و متغیرهای قیفاووسی استفاده می‌شود معمولاً مقادیر بالاتری (به‌طور مثال در حدود ۷۳ کیلومتر بر ثانیه بر مگاپارسک) برای ثابت هابل ارائه می‌شود. اندازه‌گیری‌های مربوط به تابش ریزموج زمینه‌ای کیهانی معمولاً مقادیر پایین‌تری (حدود ۶۷ کیلومتر بر ثانیه بر مگاپارسک) برای ثابت هابل ارائه می‌دهند. اختلافات بین نتایج به‌دست‌آمده از روش‌های مختلف به‌عنوان مثال، اختلاف ۹ درصدی بین نتایج به‌دست‌آمده از روش‌های BAO و روش‌های فاصله‌ای به‌عنوان مصادیقی از مسئله تنش هابل مطرح‌اند. این موضوع (تنش هابل) می‌تواند به عدم درک کامل ما از کیهان و مدل‌های کیهان‌شناسی موجود مرتبط باشد. برخی محققان بر این باورند که حل مشکل تنش هابل ممکن است با وجود فیزیک جدید (هو و ونگ، ۲۰۲۳)، انرژی تاریک اولیه (پولین و همکاران، ۲۰۱۹؛ نیدرمن و اسلو، ۲۰۲۰) یا تعاملات نوترینوها (ساکشتاین و تروتن، ۲۰۲۰)، و یا مدل‌های گرانشی اصلاح‌شده انجام گیرد (دی والتینو و همکاران، ۲۰۲۱). در جدیدترین گزارش‌ها براساس و به کمک داده‌های تلسکوپ فضایی جیمز وب JWST (James Web Space Telescope) که به نحوی به‌عنوان رفع مشکل تنش هابل نیز معرفی شده، مقدار ثابت هابل حدود ۶۹ کیلومتر بر ثانیه بر مگاپارسک گزارش شده است (ریس و همکاران، ۲۰۲۴).

۵. خلاصه و نتیجه‌گیری

با کشف قانون انبساط عالم توسط هابل، ثابت هابل در علم کیهان‌شناسی اهمیت زیادی یافت. تعیین مقدار عددی H_0 تاریخچه‌ای پرفراز و فرود داشته و در یک قرن گذشته، بسیاری از کارهای پژوهشی دانشمندان را به خود اختصاص داده است؛ به‌طوری‌که بسیاری از افراد برجسته با روش‌های پیشرفته و در مقالات جدید به این موضوع پرداخته‌اند. با توجه به اهمیت ثابت هابل و تغییرات عمده مقدار عددی آن و نیز نقش کلیدی آن در کیهان‌شناسی، در این مقاله سعی شد ضمن بررسی برخی از روش‌های عملی که برای تعیین ثابت هابل طی یک قرن گذشته به کار برده شده،

تحولات مقدار عددی این ثابت را بررسی کنیم. در بخش‌های مقاله حاضر، مجموعه‌ای از مهم‌ترین روش‌ها در تعیین H_0 گردآوری شده و نقاط قوت و ضعف آنها بیان شده است. روش‌های بیان‌شده عبارت‌اند از متغیرهای قیفاووسی، ابرنواخترهای نوع Ia، رابطه تولی فیشر، افت وخیزروشنایی سطحی، قله مرحله غول قرمز، اثر سانیاو-زلدوویچ، مگامیزر، نوسانات صوتی باریونی، تأخیر زمانی همگرایی گرانشی، تابش ریزموج زمینه کیهانی و روش‌های مبتنی بر یادگیری ماشین. اگرچه به‌کارگیری داده‌های جدید در این روش‌ها، منجر به مقدار عددی در محدوده ۶۷ تا ۷۵ (در واحد $\text{km s}^{-1}/(\text{Mpc})$) برای ثابت هابل شده است اما همین مقدار از پراکندگی نیز برای یک "ثابت" قابل‌توجه است. همان‌طور که در جدول ۱-۳ اشاره شد، ثابت هابل ناشی از آخرین داده‌ها در روش ابرنواخترهای نوع Ia، $67.8 \pm 1.3 \text{ km s}^{-1}/(\text{Mpc})$ به‌دست‌آمده درحالی‌که با رابطه تولی فیشر، مقدار $75.2 \pm 3.3 \text{ km s}^{-1}/(\text{Mpc})$ برای این ثابت گزارش شده است. از آنجایی که هرکدام از این روش‌ها مربوط به فاصله معینی از اجسام پیرامون ما می‌شود؛ شاید بتوان این پراکندگی را به محلی یا کیهانی بودن اجسام نسبت داد. اما هنوز هم نمی‌توان به‌طور قطعی به این مطلب استناد کرد ولی این گونه اختلاف نوعی به اصطلاح تنش تحت عنوان تنش هابل می‌سازد که در سال‌های اخیر مورد توجه محققین بوده و در راستای رفع آن به مطالب و رویکردهای جدید پرداخته‌اند؛ البته، همان‌گونه که اشاره شد، در جدیدتری ادعا بر اساس داده‌های مربوط به تلسکوپ فضایی جیمز وب به نظر می‌رسد این مشکل مرتفع شده است و مقداری در حدود $69 \text{ km s}^{-1}/(\text{Mpc})$ گزارش شده است.

تشکر و قدردانی

در پایان لازم به‌ذکر است که عمده مطالب این مقاله مستخرج از پایان‌نامه (توحیدی نیا، ۱۳۹۸) انجام گرفته توسط نویسندگان است؛ همچنین، همان‌گونه که مشخص است اگر چه سعی نویسندگان در ارجاع به منابع اصلی و دست اول بوده اما لازم است گفته شود که از پایان‌نامه‌های

کارشناسی / ارشد. استاد راهنما: حبیب الله رزمی. استاد مشاور: محمد رحیم بردبار. قم: دانشگاه قم، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک.

سلیمانی، م. (۱۳۹۲). تعیین فاصله خوشه ستاره‌ای باز با استفاده از ستاره متغیر قیفاووسی. *پایان‌نامه کارشناسی ارشد*. استاد راهنما: حبیب اله عصاره. اهواز: دانشگاه شهید چمران اهواز. دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک. عشاق، م. (۱۳۸۸). اندازه‌گیری‌های ثابت هابل. *پایان‌نامه کارشناسی ارشد*. استاد راهنما: امیر حسین عباسی. تهران: دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک.

(عشاق، ۱۳۸۸؛ سلیمانی، ۱۳۹۲؛ تمنا، ۱۳۹۳) که همگی با بخش یا بخش‌هایی از موضوع این مقاله مرتبط بوده‌اند نیز بهره برده‌ایم.

مراجع

تمنا، ا. (۱۳۹۳). تعیین پارامتر هابل با استفاده از ابرنواخترها. *پایان‌نامه کارشناسی ارشد*. استاد راهنما: حبیب اله عصاره. اهواز: دانشگاه شهید چمران اهواز. دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک. توحیدی نیا، ز. (۱۳۹۸). مطالعه و بررسی تحولات و سیر تکاملی روش‌های تعیین مقدار دقیق ثابت هابل. *پایان‌نامه*

- Abbott, B. P. et al. (2017). The LIGO Scientific Collaboration and The Virgo Collaboration., The 1M2H Collaboration., The Dark Energy Camera GW-EM Collaboration and the DES Collaboration. et al. A gravitational-wave standard siren measurement of the Hubble constant. *Nature* 551 (7678), 85-88.
- Aghanim, N. et al. (2020). Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters. *A & A* 641, A6, 1-67.
- Alam, S., et al. (2017). The clustering of galaxies in the SDSS-III Baryon Oscillation Spectroscopic Survey: 1. The data. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 470 (3), 2610-2630.
- Baade, W. (1944). The Resolution of Messier 32, NGC 205, and the Central Region of the Andromeda Nebula. *The Astrophysical Journal*, 100, 137-146.
- Bengaly, C., Dantas, M. A., Casarini, L. & Alcaniz, J. (2023). Measuring the Hubble constant with cosmic chronometers: a machine learning approach. *European Physical Journal C*, 83, 548, 1-13.
- Birkinshaw, M. Hughes, J. P. & Arnaud, K. (1991). A Measurement of the Value of the Hubble Constant from the X-Ray Properties and the Sunyaev-Zel'dovich Effect of Abell 665. *The Astrophysical Journal* 379, 466-481.
- Birkinshaw, M. & Hughes, J. P. (1994). A measurement of the Hubble constant from the X-ray properties and the Sunyaev-Zel'dovich effect of Abell 2218. *The Astrophysical Journal* 420 (1), 33-43.
- Blakeslee, J. P., Lucey, J. R., Tonry, J. L., Hudson, M. J., Narayanan, V. K., & Barris, B. J. (2002). Early-type galaxy distances from the Fundamental Plane and surface brightness fluctuations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 330 (2), 443-457.
- Branch, D. & Patchett, B. (1973). Type I Supernovae, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 161 (1), 71-83.
- Cantiello, M., Jensen, J.B., Blakeslee, J.P., Berger, E., Levan, A.J., Tanvir, N.R., Raimondo, G., Brocato, E., Alexander, K.D., Blanchard, P.K., & Branchesi, M. (2018). A Precise Distance to the Host Galaxy of the Binary Neutron Star Merger GW170817 Using Surface Brightness Fluctuations. *The Astrophysical Journal Letters* 854 (2), L31, 1-7.
- Chen, H. Y., Fishbach, M., & Holz, D. E. (2022). Machine Learning the Hubble Constant. *Astrophysical Journal*, 944 (2), 1-15.
- Cuceu, A., Farr, J., Lemos, P., & Font-Ribera, A. (2019). Baryon Acoustic Oscillations and the Hubble Constant: Past, Present and Future. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 10, 044.
- Di Valentino, E., Mena, O., Pan, S., Visinelli, L., Yang, W., Melchiorri, A., Mota, D. F., Riess, A. G., & Silk, J. (2021). In the realm of the Hubble tension—a review of solutions. *Nature Astronomy*, 5 (1), 1-12.
- Falco, E. E. (1997). An Estimate of H_0 from Keck Spectroscopy of the Gravitational Lens System 0957+561. *The Astrophysical Journal*, 484 (1), 70-78.
- Feast, M. W. & Walker, A. R. (1987). Cepheids as distance indicators, *Annual review of Astronomy and Astrophysics*, 25 (1), 345-375.
- Fernández Arenas, D., & Terlevich, E. (2018). An independent determination of the local Hubble constant. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 481 (1), 1-10.
- Fernie, J. D. (1969). The Period–Luminosity Relation: A Historical Review, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 81, 707-731.
- Fishbach, M., Gray, R., Hernandez, I.M., Qi, H.,

- Sur, A., Acernese, F., Aiello, L., Allocca, A., Aloy, M. A., Amato, A., & Antier, S., (2019). A Standard Siren Measurement of the Hubble Constant from GW170817 without the Electromagnetic Counterpart. *The Astrophysical Journal Letters* 871 (1), L13, 1-10.
- Freedman, W. L. & Feng, L. L. (1999). Determination of the Hubble constant. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 96 (20), 11063-11064.
- Freedman, W. L., Madore, B. F., Gibson, B. K., Ferrarese, L., Kelson, D. D., Sakai, S., Mould, J. R., Kennicutt, R. C. Jr, Ford, H. C., Graham, J. A., Huchra, J. P., Hughes, S. M. G., Illingworth, G. D., Macri, L. M., & Stetson, P. B. (2001). Final Results from the Hubble Space Telescope Key Project to Measure the Hubble Constant. *The Astrophysical Journal*, 553(1), 47-72.
- Freedman, W. L. & Madore, B. F. (2010). The Hubble Constant. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 48, 673-710.
- Freedman, W. L., Madore, B. F., Scowcroft, V., Burns, C., Monson, A., Persson, S. E., Seibert, M., & Rigby, J. (2012). Carnegie Hubble Program: A Mid-Infrared Calibration of the Hubble Constant. *The Astrophysical Journal* 758 (1), 24, 1-10.
- Freedman, W. L. (2021). Measurements of the Hubble constant: tensions in perspective. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 59, 1-30.
- Friedman, A. (1922). *Z. Phys. (in German)* 10, 377. (English translation: Friedman, A. (1999). On the Curvature of Space. *General Relativity and Gravitation*, 31, 1991-2000.
- Fritz, A. (2012). Distance Measurements and Stellar Population Properties via Surface Brightness Fluctuations. *Publications of the Astronomical Society of Australia*, 29(4), 489-508.
- Gao, F., Braatz, J. A., Reid, M. J., Lo, K. Y., Condon, J. J., Henkel, C., Kuo, C. Y., Impellizzeri, C. M. V., Pesce, D. W., & Zhao, W. (2016). The Megamaser Cosmology Project. VIII. A Geometric Distance to NGC 5765b. *The Astrophysical Journal*, 817(2), 128, 1-17.
- Giovanelli, R., Haynes, M. P., Da Costa, L. N., Freudling, W., Salzer, J. J., & Wegner, G. (1997). The Tully-Fisher Relation and H0. *The Astrophysical Journal Letters*, 477(1), L1-L4.
- Harris, W. E., Durrell, P. R., Pierce, M. J., & Secker, J. (1998). Constraints on the Hubble constant from observations of the brightest red-giant stars in a Virgo-cluster galaxy. *Nature*, 395(6697), 45-47.
- Hu, J. P. & Wang, F. Y. (2023). Hubble tension: The evidence of new physics. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2023(1), 1-20.
- Hubble, E. P. (1926). Extragalactic nebulae. *The Astrophysical Journal*, 64, 321-369.
- Hubble, E. P. (1929). A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 15(3), 168-173.
- Jang, I. S. & Lee, M. G. (2017). The Tip of the Red Giant Branch Distances to Type Ia Supernova Host Galaxies V. NGC 3021, NGC 3370, and NGC 1309 and the Value of the Hubble Constant. *The Astrophysical Journal*, 836(1), 74, 1-13.
- Kable, J. A., Addison, G. E. & Bennett, C. (2019). Quantifying the CMB Degeneracy between the Matter Density and Hubble Constant in Current Experiments. *The Astrophysical Journal*, 871(1), 77, 1-7.
- Kundić, T., Turner, E. L., Colley, W. N., Gott, J. R., Rhoads, J. E., Wang, Y., Bergeron, L. E., Gloria, K. A., Long, D. C., Malhotra, S., & Wambsganss, J. (1997). A Robust Determination of the Time Delay in 0957+561A, B and a Measurement of the Global Value of Hubble's constant. *The Astrophysical Journal*, 482(1), 75-82.
- Kuo, C. Y., Braatz, J. A., Reid, M. J., Lo, K. Y., Condon, J. J., Impellizzeri, C. M. V., & Henkel, C. (2013). The Megamaser Cosmology Project. V. An Angular-Diameter Distance To NGC 6264 At 140 Mpc. *The Astrophysical Journal*, 767(2), 155, 1-13.
- Leavitt, H. S. & Pickering, E. (1912). Periods of 25 Variable Stars in the Small Magellanic Cloud. *Harvard College Observatory Circular*, 173, 1-3.
- Lee, M. G., Freedman, W. L., & Madore, B. F. (1993). The Tip of the Red Giant Branch as a Distance Indicator for Resolved Galaxies. *The Astrophysical Journal* 417, 553-559.
- Lemaître, G. (1927). *Annales de la Société Scientifique de Bruxelles* (in French). Un Univers homogène de masse constante et de rayon croissant rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extragalactiques, A47, 49-59.
- Mould, J. & Sakai, S. (2008). The Extragalactic Distance Scale without Cepheids. *The Astrophysical Journal Letters*, 686(2), L75-L78.
- Niedermann, F. & Sloth, M. S. (2020). Resolving the Hubble tension with new early dark energy. *Physical Review D*, 102 (2), 023511.
- Paraficz, D. & Hjorth, J. (2010). The Hubble Constant Inferred From 18 Time Delay Lenses. *The Astrophysical Journal* 712 (2), 1378-1384.
- Perlmutter, S. et al. (1998) The Supernovae Cosmology Project (1998). Discovery of a Supernova Explosion at Half the Age of the

- Universe. *Nature*, 391, 51-54.
- Planck Collaboration. (2020). Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters. *Astronomy & Astrophysics*, 641, A6.
- Poulin, V., Smith, T. L., Karwal, T., & Kamionkowski, M. (2019). Early Dark Energy can Resolve the Hubble Tension. *Physical Review Letters*, 122 (22), 221301.
- Reese, E. D., Mohr, J. J., Carlstrom, J. E., Joy, M., Grego, L., Holder, G. P., Holzapfel, W. L., Hughes, J. P., Patel, S. K., & Donahue, M. (2000). Sunyaev-Zeldovich Effect-derived Distances to the High-Redshift Clusters MS 0451.6-0305 and Cl 0016+16. *The Astrophysical Journal*, 533 (1), 38-49.
- Reese, E. D., Mohr, J. J., Carlstrom, J. E., Joy, M., Grego, L., & Holzapfel, W. L. (2002). Determining the Cosmic Distance Scale From Interferometric Measurements of the Sunyaev-Zeldovich Effect. *The Astrophysical Journal*, 581(1), 53-85.
- Refsdal, S. (1964). On the Possibility of Determining Hubble's Parameter and the Masses of Galaxies from the Gravitational Lens Effect. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 128, 307-310.
- Reid, M. J., Braatz, J. A., Condon, J. J., Lo, K. Y., Kuo, C. Y., Impellizzeri, C. M. V., & Henkel, C. (2013). The Megamaser Cosmology Project. IV. A Direct Measurement of the Hubble Constant From UGC 3789. *The Astrophysical Journal*, 767 (2), 154, 1-11.
- Riess, A. G., Filippenko, A. V., Challis, P., Clocchiatti, A., Diercks, A., Garnavich, P. M., Gilliland, R. L., Hogan, C. J., Jha, S., Kirshner, R. P., Leibundgut, B., Phillips, M. M., Reiss, D., Schmidt, B. P., Schommer, R. A., Smith, R. C., Spyromilio, J., Stubbs, C., Suntzeff, N. B., & Tonry, J. (1998). Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant. *The Astronomical Journal*, 116, 3, 1009-1038.
- Riess, A. G., Macri, L. M., Hoffmann, S. L., Scolnic, D., Casertano, S., Filippenko, A. V., Tucker, B. E., Reid, M. J., Jones, D. O., Silverman, J. M., Chornock, R., Challis, P., Yuan, W., Brown, P. J., & Foley, R. J. (2016). A 2.4% Determination of the Local Value of the Hubble Constant, *The Astrophysical Journal* 826(1), 56, 1-31.
- Riess, A. G., et al. (2021). Measurements of the Hubble Constant: Tensions in Perspective. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 59, 1-30.
- Riess, A.G., Anand, G.S., Yuan, W., Casertano, S., Dolphin, A., Macri, L.M., Breuval, L., Scolnic, D., Perrin, M., & Anderson, R.I. (2024). JWST Observations Reject Unrecognized Crowding of Cepheid Photometry as an Explanation for the Hubble Tension at 8σ Confidence. *The Astrophysical Journal Letters*, 962 (1) L17.
- Rusu, E. C., Wong, K. C., Bonvin, V., Sluse, D., Suyu, S. H., Fassnacht, C. D., Chan, J. H. H., Hilbert, S., Auger, M. W., Sonnenfeld, A., Birrer, S., Courbin, F., Treu, T., Chen, G. C. F., Halkola, A., Koopmans, L. V. E., Marshall, P. J., & Shajib, A. J. (2020). H0LiCOW XII. Lens mass model of WFI2033-4723 and blind measurement of its time-delay distance and H_0 . *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 498, 1, 1440-1468.
- Salaris, M. & Cassisi, S. (1998). A new analysis of the red giant branch 'tip' distance scale and the value of the Hubble constant. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 298 (1), 166-178.
- Sakstein, J. & Trodden, M. (2020). Early Dark Energy from Massive Neutrinos as a Natural Resolution of the Hubble Tension. *Physical Review Letters*, 124 (18), 181301.
- Sandage, A., Tammann, G. A., Saha, A., Reindl, B., Macchetto, F. D., & Panagia, N. (2006). The Hubble Constant: A Summary of the *Hubble Space Telescope* Program for the Luminosity Calibration of Type Ia Supernovae by Means of Cepheids. *Astrophys. J.* 653, 843-860.
- Slipher, V. M. (1917). Nebulae, *Proceedings of the American Philosophical Society*, 56 (1917) 403-409.
- Sorce, J. G., Courtois, H. M., Tully, R. B., Seibert, M., Scowcroft, V., Freedman, W. L., Madore, B. F., Persson, S. E., Monson, A., & Rigby, J. (2013). Calibration of the Mid-Infrared Tully-Fisher Relation. *The Astrophysical Journal*, 765(2), 94, 1-11.
- Suyu, S. H. et al. (2017). H0LiCOW-I. H0 Lenses in COSMOGRAIL's Wellspring: program overview. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 468 (3), 2590-2604.
- Tammann, G. A. & Reindl, B. (2012). Advancing the Physics of Cosmic Distances. *Proceedings of the International Astronomical Union* 8 (S289), 13-25.
- Tonry, J. & Schneider, D. P. (1988). A New Technique for Measuring Extragalactic Distances. *The Astronomical Journal* 96, 807-815.
- Tonry, J. L., Blakeslee, J. P., Ajhar, E. A., & Dressler A. (2000). The SBF Survey of Galaxy Distances. II. Local and Large-Scale Flows. *Astrophys. J.* 530:625-651.
- Tully, R. B. & Fisher, J. R. (1977). A new method of determining distances to galaxies. *Astronomy and Astrophysics* 54, 661-673.
- Verde, L., Treu, T., & Riess, A.G. (2019). Tensions between the Early and Late Universe. *Nature Astronomy*, 3 (10), 891-895.
- Wambsganss, J. (1998). Gravitational Lensing in Astronomy. *Living Reviews in Relativity* 1, 12,

1-70.

Zhao, W., Braatz, J. A., Condon, J. J., Lo, K. Y., Reid, M. J., Henkel, C., Pesce, D. W., Greene, J. E., Gao, F., Kuo, C. Y., & Impellizzeri, C. M. V. (2018). The Megamaser Cosmology Project. X. High-resolution Maps and Mass Constraints for SMBHs. *The Astrophysical Journal* 854 (2), 124, 1-12.