

The evolution of methods for determining the Hubble constant

۱. حبیب الله رزمی

استاد گروه فیزیک دانشگاه قم، قم، جمهوری اسلامی ایران.

1. Habibollah Razmi

Professor of Physics at the Physics Department of the University of Qom, Qom, I. R. Iran.

Email: razmi@qom.ac.ir

۲. محمدرحیم بردبار

استادیار گروه فیزیک دانشگاه قم، قم، جمهوری اسلامی ایران.

2. Mohammad Rahim Bordbar

Assistant Professor of Physics at the Physics Department of the University of Qom, Qom, I. R. Iran.

Email: bordbar.r@gmail.com

۳. زینب توحیدی نیا

دانش آموخته کارشناسی ارشد فیزیک دانشگاه قم، قم، جمهوری اسلامی ایران.

3. Zeinab Tohidinia

Graduate with a Master degree in Physics at the University of Qom, Qom, I. R. Iran.

Email: daneshjoo500314@gmail.com

Abstract

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 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.

سیر تکاملی روشهای تعیین مقدار ثابت هابل

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 می کند. عمده روشهای تعیین مقدار عددی ثابت هابل از طریق فاصله یابی، انجام گرفته اند. مهمترین روش های فاصله ای عبارتند از: روشهای متغیرهای قیفاووسی، ابرنواخترهای نوع Ia، رابطه تولی فیشر، افت و خیز روشنایی سطحی، قله مرحله غول قرمز، اثر سانیائو-زلدوویچ، مگا میزر، روش نوسانات صوتی. مهمترین روش های غیر فاصله ای عبارتند از: تاخیر زمانی همگرایی گرانشی، امواج گرانشی و روش های 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، به شکلی فراگیر و کیهانی ثابت هابل تعیین می گردد. آنچه مسلم است اینکه، نتیجه این پژوهش ها سیر تحولی و تکاملی تعیین ثابت هابل در دهه های گذشته و همچنین تغییرات آشکار مقدار عددی آن را نشان می دهد. در اینجا، ضمن بیان هر چند کوتاه از روش های مختلف تعیین ثابت هابل در نهایت به شکل مقایسه ای نتایج عددی مطرح طی دهه های گذشته در یک جدول خلاصه و جمع بندی گردیده است. مشکل تنش هابل که به اختلاف نتایج حاصل از طرق متفاوت اندازه گیری مقدار ثابت هابل بر می گردد، همچنین تلاش های انجام گرفته در راستای حل این مساله به شکل کوتاه و مختصر مورد اشاره قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: انبساط عالم، ثابت هابل، قانون هابل

۱. مقدمه

در سال ۱۹۱۵ میلادی، اینشتین کوشید تا به پیروی از مدل های کیهانشناسی متداول در آن روزها، جوابی برای معادلات خود پیدا کند که

عالم ایستا را توصیف کند. الکساندر فریدمان (Friedman) (۱۹۲۲) بر پایه نظریه اینشتین، معادلاتی را ارائه کرد که نشان می داد عالم غیر ایستا و در حال

تحول دینامیکی است؛ پس از اولمتر (۱۹۲۷)، انبساط عالم را مطرح و نرخ تخمینی انبساط را ارائه نمود. تقریباً هم‌زمان با مباحث نظری مطرح شده درباره

تحول یا سکون کیهان، اسلیفر (Slipher) (۱۹۱۷)، طیف ۱۵ کهکشان مارپیچی را ثبت و مشاهده نمود که طیف تمام کهکشان‌هایی که در فواصل دور از

ما واقع شده‌اند؛ دارای انتقال به سرخ است. پس از آن هابل (Hubble) (۱۹۲۹)، با به‌دست آوردن میزان انتقال به سرخ طیف تعدادی از ستارگان متغیر

قیفاووسی (Cepheid Variables) مربوط به کهکشان‌های دیگر توانست سرعت 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 شد از:

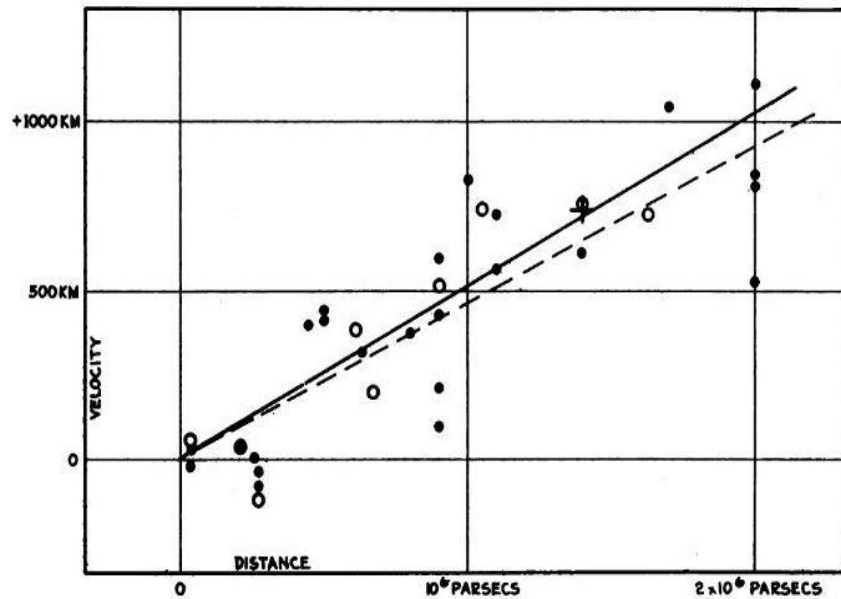
$$V = H_0 D \quad (1)$$

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 $H_0 = 500 \text{ Km s}^{-1}/(\text{Mpc})$. 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.



شکل ۱: نمودار سرعت-فاصله مربوط به ۴۶ کهکشان: محور عمودی نشان دهنده سرعت کهکشانها و محور افقی نشان دهنده 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).

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

نقطه‌ی 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 می توان پارامتر هابل را بر حسب عامل مقیاس نوشت:

$$H(t) = \frac{V}{D} = \frac{1}{D} \frac{dD}{dt} = \frac{\dot{S}(t)}{S(t)} \quad (4)$$

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

$$q(t) = \frac{-S(t) \times \ddot{S}(t)}{\dot{S}(t)^2} \quad (5)$$

دلیل به کارگیری اصطلاح "کندشونده" این است که ابتدا تصور می شد که گرانش ناشی از ماده ی موجود در عالم در نهایت انبساط را متوقف خواهد

کرد، لذا انبساط باید کند شونده باشد؛ اما در اواخر دهه نود میلادی "پروژه کیهان شناسی ابرنواختر" (Supernovae Cosmology Project) به رهبری

پرموتر (Perlmutter) (۱۹۹۸) و پروژه مجزای دیگر به نام "گروه تحقیقاتی ابرنواخترهای با انتقال به سرخ بالا" (High Redshift Supernova Research)

Group) به رهبری آدام ریس (Riess) و اشمیت (Schmidt) (ریس و همکاران، ۱۹۹۸) اعلام کردند که سرعت انبساط عالم در حال افزایش است؛ یعنی

عالم با شتاب مثبت منبسط می شود. برای تطبیق نتایج رصدی (شتاب مثبت عالم) با کیهان شناسی نظری، انرژی تاریک به عنوان عامل این شتاب مطرح و

ثابت کیهان شناسی (Λ) که قبلاً اینشتین آن را برای توصیف عالمایستا وارد معادلاتش نموده 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 نبود مدل های کیهان شناسی، عالم

را تخت و در دوره غلبه ماده پیش بینی کرده بود، در این شرایط سن عالم عبارت است از:

$$t_0 = \frac{2}{3} \frac{1}{H_0} \quad (6)$$

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 به

طور خلاصه به روش‌های متعددی که طی یک قرن گذشته برای تعیین این ثابت و همچنین مقادیر به‌دست آمده‌ها 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 به‌دست

آوردن ثابت هابل با روش‌های فاصله‌ای، کهکشانی‌هایی مورد استفاده قرار می‌گیرند که به علت فاصله زیاد، سرعت‌های ویژه (ناشی از حرکت‌های محلی

و کانونی) آن‌ها در مقایسه با سرعت پسروی‌شان (ناشی از انبساط عالم) قابل چشم‌پوشی باشد. در این صورت می‌توان با به‌دست آوردن فاصله و

سرعت کهکشان و با به کارگیری قانون هابل، ثابت هابل را تعیین کرد.

۲-۱. روش‌های فاصله‌ای:

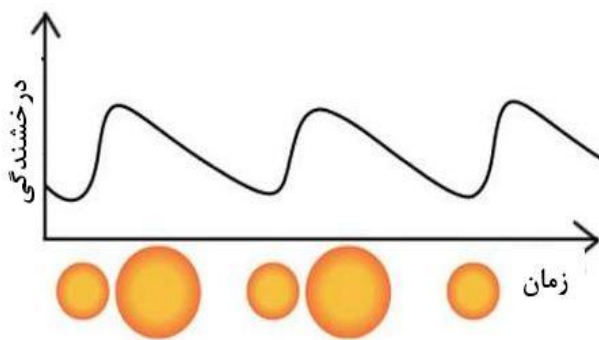
در روش‌های فاصله‌ای که برخی از آنها با عنوان روش نردبانی نیز شناخته می‌شوند، محققان با ترکیب داده‌های به دست آمده از مراحل مختلف،

می‌توانند سرعت انبساط کیهان را محاسبه کنند و بنابراین به طور مستقیم ثابت هابل را تعیین نمایند. در ذیل به موارد مختلف از این روش‌ها خواهیم

پرداخت.

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

مهم ترین 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 (Leavitt) (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 دوره تناوب را بر حسب قدر ظاهری رسم کرد و به این نکته مهم پی برد که هرچه دوره تناوب متغیر قیفاووسی طولانی‌تر باشد تابندگی متوسط آن بیشتر است. با کشف رابطه دوره تناوب-تابندگی متغیرهای قیفاووسی، در سال‌های بعد اخترشناسان توانستند فاصله قیفاووسی‌های کهکشان‌های دیگر را به دست آورند و این روش برای مدت‌ها به روش اساسی تعیین فواصل برون کهکشانی 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 $H_0 = 500 \text{ Km s}^{-1}/(\text{Mpc})$ را گزارش نمود (هابل، ۱۹۲۹). باد (Baade) (۱۹۴۴)، توانست طی مشاهداتی کشف کند که دو نوع متغیر قیفاووسی وجود دارد و با اندازه‌گیری فواصل آن‌ها، مقدار ثابت هابل را $H_0 = 250 \text{ Km s}^{-1}/(\text{Mpc})$ گزارش کرد. فرنی (Ferne) (۱۹۶۹) پیشنهاد داد که برای افزایش دقت رابطه دوره تناوب-تابندگی، پارامتر رنگ به آن اضافه شود. فیست و واکر (Feast and Walker) (۱۹۸۷) توانستند با بررسی تعدادی از قیفاووسی‌های فراکهکشانی مقدار ثابت هابل را $H_0 = 100 \text{ Km s}^{-1}/(\text{Mpc})$ به دست آورند. یکی از جدیدترین مقادیر گزارش شده توسط تیم کفش‌های هابل (HUBBLE SHOES) که با استفاده از متغیرهای قیفاووسی به دست آمده عبارت از $\text{Km s}^{-1}/(\text{Mpc})$ 74.03 ± 1.42 می‌باشد (ریس و همکاران، ۲۰۲۱).



شکل ۲: تغییر اندازه و درخشندگی ذاتی یک قیفاووسی در دوره تناوب مشخص

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

این طرح بزرگ به رهبری وندی فریدمن (Freedman) (۱۹۹۹)، انجام شده که نتیجه اولیه آن برای مقدار ثابت هابل $H_0 = 73 \text{ Km s}^{-1}/(\text{Mpc})$ بود. فریدمن

(۲۰۰۱) با واسنجی رابطه دوره تناوب-تابندگی قیفاووسی ها (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 به دست آورد (فریدمن، ۲۰۱۲). با ادامه بررسی

قیفاووسی‌های فراکهکشانی، ریس (۲۰۱۶) توانست با استفاده از تلسکوپ هابل، با رصد متغیرهای قیفاووسی در ۱۱ کهکشان، مقدار ثابت هابل را Km

$H_0 = 72/25 \text{ s}^{-1}/(\text{Mpc})$ برآورد کند.

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

یکی از درخشان‌ترین اجرام شناخته شده برای فاصله‌یابی ابرنواخترهای نوع Ia هستند. وقتی جرم کوتوله سفید به حد جرم چاندراسخار

(Chandrasekhar) برسد انفجار ابرنواختر نوع Ia رخ می‌دهد. پس با معلوم بودن جرم، درخشندگی ستاره معین خواهد بود. بنابراین حد چاندراسخار

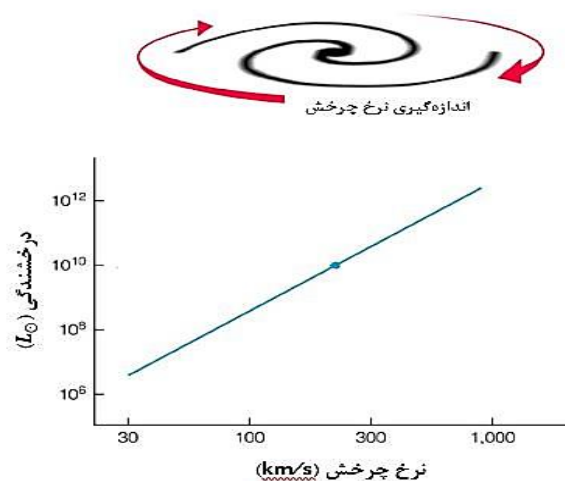
مسئول اصلی برای آن است که ابرنواخترهای نوع Ia به طور تقریبی به عنوان شمع استاندارد برای فاصله‌یابی شناخته شوند. برانچ (Branch) (۱۹۷۳) با

استفاده از ابرنواخترهای نوع Ia برای ثابت هابل مقدار عددی $H_0 = 40 \text{ Km s}^{-1}/(\text{Mpc})$ 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 (Sandage) و همکاران (۲۰۰۶) با واسنجی فواصل ابرنواخترها به مقدار $H_0 = 62/3 \text{ Kms}^{-1}/(\text{Mpc})$ دست یافتند.

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

تولی و فیشر (۱۹۷۷) روش جدیدی برای به دست آوردن فواصل کهکشان‌های مارپیچی ارائه دادند. آن‌ها دریافتند که بین قدر مطلق کهکشان-های مارپیچی و پراکندگی بسامد خط ۲۱ سانتی متری هیدروژن خنثی رابطه‌ای وجود دارد. هر چه خط ۲۱ cm پهن تر می شود، درخشندگی بیشتر می گردد. 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 به دست آوردن فاصله خوشه‌های ویرگو (دوشیزه) و دب اکبر از این روش، مقدار ثابت هابل را $H_0 = 80 \text{ Kms}^{-1}/(\text{Mpc})$ تخمین زدند. جیوانلی (Giovannelli) 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 $H_0 = 69 \pm 5 \text{ Km s}^{-1}/(\text{Mpc})$ بود. در سال ۲۰۱۳ (سورس (Sorce) و همکاران، ۲۰۱۳)، با استفاده از واسنجی فروسرخ میانی رابطه تولی فیشر برای فواصل بیش از ۵۰ Mpc، $H_0 = 74 \pm 5 \text{ Km s}^{-1}/(\text{Mpc})$ به دست آمد.



شکل ۳: رابطه تولی فیشر برای کهکشان‌های مارپیچی

۵-۱-۲. 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 به عنوان یک شاخص فاصله است و در این پهنای روشنایی قله، کمترین وابستگی را به رنگ دارد. لی (Lee) و همکاران (۱۹۹۳)

به‌طور خاص قله مرحله غول قرمز را به عنوان شاخص فاصله 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 به عنوان 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 (Harris) و همکاران،

۱۹۹۸). مولد و ساکایی (Mould and Sakai) (۲۰۰۸) برای به‌دست آوردن ثابت هابل از قله مرحله غول قرمز برای واسنجی مقیاس فاصله قیفاووسی

استفاده کردند. آن‌ها با به دست 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 (Tamman and Reindl) (۲۰۱۲) با بعید دانستن مقدار بیشتر از $70 \text{ Kms}^{-1}/(\text{Mpc})$ برای ثابت هابل از طریق فاصله‌یابی قله مرحله غول قرمز، مقدار $H_0 = 63/2 \pm 7/3 \text{ Kms}^{-1}/(\text{Mpc})$ را گزارش کردند. جنگ (Jang) و لی (۲۰۱۷) با بررسی فواصل قله مرحله غول قرمز مربوط به کهکشان‌های میزبان ابرنواخترهای نوع Ia، $H_0 = 71/3 \pm 17/53 \text{ kms}^{-1}/(\text{Mpc})$ را برای ثابت هابل اعلام کرد.

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

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 به دست 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 اشنايدر (Tonry and Schneider) (۱۹۸۸) برای اولین بار فاصله کهکشان‌های M32 و N3379 را به به دست آورده با بیان این مطلب که فاصله M32 به طور 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 $H_0 = 90 \text{ Km s}^{-1}/(\text{Mpc})$ 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 $H_0 = 77 \pm 4 \text{ Km s}^{-1}/(\text{Mpc})$ گزارش کردند. سپس، او، مقدار H_0 را به $H_0 = 73 \pm 4 \text{ Km s}^{-1}/(\text{Mpc})$ کاهش داد (بلیکسلی (Blakeslee) و همکاران، ۲۰۰۲). فریتز (Fritz) (۲۰۱۲) با استفاده از فاصله خوشه کما که با این روش محاسبه شده بود، مقدار $H_0 = 85 \pm 11 \text{ Km s}^{-1}/(\text{Mpc})$ را برای ثابت هابل پیشنهاد داد. کانتیلو (Cantiello)

و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از داده های یکی از دوربین های فرسرخ تلسکوپ فضایی هابل، فاصله تا کهکشان NGC ۴۹۹۳ را $40 \pm 1/4 \text{ Mpc}$ تعیین کردند که با بررسی میزان انتقال به سرخ طیف آن، منجر به ثابت هابل $H_0 = 71/7 \pm 9/1 \text{ Km s}^{-1}/(\text{Mpc})$ شد.

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

خوشه های کهکشانی به علت میدان گرانشی قوی خود، دارای یک پلاسمای داغ کاملاً یونیزه هستند که به آن محیط میان خوشه ای می گویند. محیط میان خوشه ای، تابشی از نوع تابش ترمزی پرتوی ایکس ساطع می کند؛ از طرفی فوتون های ریزموج زمینه کیهانی با عبور از میان خوشه های سنگین، با الکترون های پر انرژی محیط میان خوشه ای برهم کنش می کنند. برهم کنش غالب، برهم کنش کامپتون معکوس است که در آن فوتون ریزموج زمینه کیهانی در حین برهم کنش با ماده، انرژی جذب کرده، طول موج آن کوتاه تر شده و در نتیجه یک انحراف کوچک (کمتر از یک میلی درجه کلونین) در طیف فوتون های ریزموج زمینه کیهانی ایجاد می شود. این پدیده را برای اولین بار سانیاو و زلدوویچ در سال ۱۹۶۹ مشاهده کردند. میزان این انحراف در طیف فوتون های ریزموج زمینه کیهانی به چگالی، دمای الکترون های محیط میان خوشه ای و ابعاد خوشه بستگی دارد ولی کاملاً مستقل از فاصله خوشه است. برای اندازه گیری این انحراف معمولاً از تلسکوپ های رادیویی و برای تعیین ویژگی های محیط میان خوشه ای از رصدخانه اشعه ایکس چاندرا استفاده می شود؛ در این صورت ابعاد فیزیکی مشخص شده و با اندازه گیری بزرگی زاویه ای آن، فاصله تا خوشه محاسبه می گردد. اگرچه این روش، روشی یک مرحله ای برای تعیین ثابت هابل است اما مشکلاتی نیز دارد. اولاً شامل دو اندازه گیری است و هر کدام از این اندازه گیری ها دارای خطاهایی هستند و ثانیاً این خطاها به مدل سازی خوشه مورد نظر بستگی دارد. استفاده از اثر سانیاو-زلدوویچ در اوایل دهه ۱۹۹۰ مورد توجه کیهان شناسان رصدی قرار گرفت و توانستند با به دست آوردن فواصل تا برخی از خوشه های کهکشانی، روی مقدار عددی ثابت هابل قید بگذارند. نکته قابل توجه آن که، مقادیر ثابت هابل به دست آمده از این روش پراکندگی زیادی از ۴۰ تا بیش از ۶۰ (در واحد $\text{Km s}^{-1}/(\text{Mpc})$) نشان می دهند. بیرکینشاو (Birkinshaw) و همکاران (۱۹۹۱) با استفاده از اثر سانیاو-زلدوویچ 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). اریک رییس (Reese) و همکاران (۲۰۰۰) توانستند با استفاده از این

روش، ثابت هابل را $H_0 = 63^{+12}_{-9} \text{ Km s}^{-1}/(\text{Mpc})$ به دست آوردند. وی و همکاران در سال ۲۰۰۲ مقدار این ثابت را به $H_0 = 60^{+13}_{-18} \text{ Km s}^{-1}/(\text{Mpc})$ کاهش دادند (رییس و همکاران، ۲۰۰۲).

۸-۱-۲. مگامیزر (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 0.1 pc از آبرسیاه چاله مرکزی کهکشان واقع شده است. این توده‌ها به طور هماهنگ در یک خط طیف آب (H_2O) در فرکانس تقریباً 22 GHz تابش می‌کنند؛ که این تابش می‌تواند در مقیاس تفکیک‌پذیری میلی ثانیه‌فوسی در شیوه تداخل سنجی خط پایه بسیار طولانی (VLBI) Very Long Baseline Interferometry 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 این که توده‌ها در حال چرخش کپلری هستند می‌توان شعاع توده‌ها را محاسبه نمود. با دانستن این شعاع همراه با جدایی زاویه‌ای توده از مرکز کهکشان، فاصله کهکشان به دست می‌آید.

اولین سامانه میز که در یک کهکشان کشف شد NGC 4258 بود؛ اما از آنجایی که فاصله $7/0 \pm 2/5 \text{ Mpc}$ به دست آمد برای تعیین ثابت هابل مورد استفاده قرار نگرفت. رصدخانه ملی رادیواخترشناسی آمریکا طرحی برای یافتن مقدار دقیق ثابت هابل با استفاده از مگامیزرها اجرا کرده است؛ طرح کیهان‌شناسی مگامیزر، که در اولین نتیجه آن در سال ۲۰۰۸ کهکشان مگامیزر UGC 3789 مورد بررسی قرار گرفت. با به دست آوردن فاصله $49/5 \pm 6/1 \text{ Mpc}$ برای این کهکشان، $H_0 = 68/7 \pm 9/1 \text{ Kms}^{-1}/(\text{Mpc})$ (رید (Reid) 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، به جای در نظر گرفتن یک حلقه باریک به عنوان سامانه میز، یک سامانه چند شعاعی در نظر می‌گیرند و با تعمیم آن به سه بعد و حل سه بعدی معادله، فاصله تا کهکشان را به دست می‌آورند. طرح مگامیزر در سال ۲۰۱۳ با استفاده از کهکشان NGC 6264 در فاصله $144 \pm 19 \text{ Mpc}$ ، مقدار $\text{Km s}^{-1}/(\text{Mpc})$

$H_0 = 68/9 \pm 9$ را برای ثابت هابل به دست آورد (کوو (Kuo) و همکاران، ۲۰۱۳). چند سال بعد، به عنوان 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

(Gao) و همکاران، ۲۰۱۶). در سال ۲۰۱۸، با بررسی کهکشان مگامیزر UGC 6093 (شکل ۲-۳) به فاصله $151/7$ مگاپارسک، مقدار ثابت هابل Km s^{-1}

$H_0 = 70 \pm 5/(\text{Mpc})$ محاسبه شد (ژائو (Zhao) و همکاران، ۲۰۱۸).

۹-۱-۲. 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 به دلیل

تفاعلات بین ماده و تابش 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 (Cuceu) 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:

SDSS (Sloan Digital Sky Survey) و DESI (Dark Energy Spectroscopic Instrument)

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. روش‌های غیر فاصله‌ای در تعیین ثابت هابل

۲-۲-۱. تاخیر زمانی همگرایی گرانشی (Gravitational Lens Time Delay)

نخستین بار رفسدال (Refsdal) (۱۹۶۴) دریافت که اندازه‌گیری اختلاف در زمان رسیدن نور و جدایی زاویه‌ای تصاویر عدسی‌های قوی از یک شی

متغیر با زمان (مانند اختروش‌ها یا ابرنواخترها) می‌تواند برای تعیین ثابت هابل مورد استفاده قرار گیرد (به‌طوری 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 تاخیر زمانی تصاویر

اختروش Q0957+561 صورت گرفت. کاندیک (Kundić) و همکاران (۱۹۹۷) با محاسبات دقیق، توانستند مقدار $H_0 = 64 \pm 13 \text{ Km s}^{-1}/(\text{Mpc})$ را به-

دست آورند. فالکو (Falco) و همکاران (۱۹۹۷) به‌طور مستقل، با بررسی تصاویر مربوط به اختروش Q0957+561، ثابت هابل را Km s^{-1}

$H_0 = 62 \pm 7 \text{ Km s}^{-1}/(\text{Mpc})$ برآورد کردند. در سال ۱۹۹۸، با تجدید نظر در توزیع جرم عدسی گرانشی، مقدار ثابت هابل به $H_0 = 67 \pm 13 \text{ Km s}^{-1}/(\text{Mpc})$

افزایش یافت (وامبسگانس (Wambsganss)، ۱۹۹۸). در ۲۰۱۰، با استفاده از تاخیر زمانی ۱۸ عدسی گرانشی مقدار عددی $H_0 = 76 \pm 3 \text{ Km s}^{-1}/(\text{Mpc})$

به‌دست آمد (پارافچ و هیورث (Paraficz and Hjorth)، ۲۰۱۰). در سال ۲۰۱۷، طرحی با عنوان H0LiCOW (H0 Lenses in COSMOGRAIL's

Wellspring) آغاز به کار کرد که وظیفه آن به‌دست آوردن ثابت هابل از ۵ عدسی گرانشی (HE1104-1805،

HE0435-1223، RXJ1131-1231، B1608+656 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 (Suyu) و همکاران، ۲۰۱۷). در دوازدهمین مقاله منتشر شده از این طرح و با بررسی عدسی گرانشی (WFI2033-4723) ثابت هابل

$H_0 = 71.6^{+4.9}_{-3.8} \text{ Km s}^{-1}/(\text{Mpc})$ تخمین زده شد (روسو (Rusu) 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 اینکه 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 $\text{Km s}^{-1}/(\text{Mpc})$ $^{+12}_{-8}$

$H_0 = 70$ برای ثابت هابل شد (پروژه لایگو و ویرگو، 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

(فیشباخ (Fishbach) و همکاران، ۲۰۱۹).

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

ناهمسانگردی در تابش ریزموج زمینه کیهانی به صورت نوسانات صوتی باریونی درمی آیند که به دلایل فیزیکی، به شکل قله‌ها و دره‌هایی در طیف

ظاهر می شوند. با توجه به این که این نوسانات ناشی از ناپایداری‌های گرانشی اند 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

به دست می‌آید، نه به شکل یک اندازه‌گیری مستقیم از یک شیء محلی، بلکه حاصل بهترین بهینه سازی معادلات فریدمن برای $(\Omega_m + \Omega_k + \Omega_\Lambda = 1)$

است. در سال ۲۰۱۸، بر اساس مدل استاندارد کیهان‌شناسی (مدل ΛCDM) و طبق داده‌های ماهواره WMAP مقدار ثابت هابل Km s^{-1}

$H_0 = 68/33^{+1}/(\text{Mpc})$ (آقانیم (Aghanim) و همکاران، ۲۰۱۸) و بر پایه داده‌های ماهواره پلانک مقدار $H_0 = 67 \pm 4/05 \text{ Km s}^{-1}/(\text{Mpc})$ برآورد شد

(کیبل (Kable) و همکاران، ۲۰۱۹؛ همکاران پروژه پلانک، ۲۰۲۰).

۲-۲-۴. روش‌های مقیدسازی بر اساس مدل‌های کیهان‌شناسی و یادگیری ماشین

یادگیری ماشین (Machine Learning) به عنوان یک ابزار قدرتمند در تحلیل داده‌های کیهان‌شناسی، به ویژه در تعیین ثابت هابل، به کار گرفته می‌شود.

این روش‌ها می‌توانند به طور مستقل از مدل‌های کیهان‌شناسی، به شناسایی الگوها و روابط پیچیده در داده‌ها بپردازند. به عنوان 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 به عنوان نمونه ای دیگر با شبکه‌های عصبی می‌توانند برای پیش‌بینی رفتار

کیهان را پیش بینی و ثابت هابل را تعیین نمایند. این شبکه‌ها می‌توانند به طور 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. به طور خلاصه، استفاده از روش‌های یادگیری ماشین در کیهان‌شناسی، به ویژه در تعیین ثابت هابل، به محققان این امکان را می‌دهد که به طور 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 به دست آمده و به عنوان یکی از تخمین‌های معتبر در نظر گرفته می‌شود (بنگالی (Bengaly) 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 (Chen) و همکاران، ۲۰۲۲).

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

این مطالعه به بررسی رابطه بین روشی خط هیدروژن و سرعت انبساط گازهای یونیزه در کهکشان‌ها پرداخته و به عنوان 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 (Fernández and Terlevich)، ۲۰۱۸).

۳. روش‌های تعیین ثابت هابل در یک نگاه

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

جدول ۱: مقایسه روش های تعیین ثابت هابل

روش	شیوه به دست آوردن (H_0)	حدود مقدار به دست آمده $Km\ s^{-1}/(Mpc)$
ستارگان متغیر قیفاووسی	فاصله سنجی از طریق مشاهده یک دوره تناوب ستاره قیفاووسی	۷۴
قله مرحله غول قرمز (TRGB)	فاصله سنجی از طریق مشاهده درخشندگی فوق العاده جرقه هلیوم در غول قرمز	۶۹
مگامیزر	فاصله سنجی از طریق به دست آوردن شعاع توده مگامیزر مرکزی کهکشان	۶۹
افت و خیز روشنایی سطحی (SBF)	فاصله سنجی از طریق اندازه گیری افت و خیز توزیع نور تصویر CCD یک کهکشان	> 70
رابطه تولی فیشر	فاصله سنجی از طریق محاسبه سرعت چرخشی و تابندگی کهکشان مارپیچی	۷۵
ابرناختر نوع Ia	فاصله سنجی از طریق مشاهده نور حاصل از انفجار ابرناختر	۶۷
اثر سانیو-زلدوویچ	فاصله سنجی از طریق بررسی انحراف طیف فوتون های زمینه کیهانی در اطراف خوشه های کهکشانی	۶۰
نوسانات صوتی باریونی BAO	اندازه گیری فاصله و سرعت انبساط کیهان از مبتنی بر توزیع کهکشان ها	۶۷-۷۴
همگرایی گرانشی	محاسبه تاخیر زمانی حاصل از پدیده همگرایی گرانشی	۷۰
تابش ریزموج زمینه کیهانی (CMBR)	استفاده از نظریه های تشکیل ساختار در بررسی نوسانات آکوستیکی باریونی طیف CMBR	۶۸
یادگیری ماشین	شناسایی الگوها و روابط پیچیده در داده ها به طور مستقل از مدل های کیهان شناسی	۶۸-۷۰
تلسکوپ فضایی جیمز وب	جدیدترین تلاش ها در راستای حل مشکل تنش هابل	۶۹

۴. مقایسه ای کلی بین روش های مختلف و مساله تنش هابل (Hubble Tension)

تنش هابل به اختلاف قابل توجهی اشاره دارد که بین مقادیر ثابت هابل به دست آمده از اندازه گیری های محلی و مقادیر پیش بینی شده از مدل های کیهانی وجود دارد. این اختلاف به طور خاص بین اندازه گیری های محلی مانند ابرنواخترهای نوع Ia و اندازه گیری های مربوط به تابش ریز موج زمینه ای کیهانی مشاهده می شود. فرض های همگنی و همسانگردی به این معنا هستند که کیهان در مقیاس های بزرگ به طور یکنواخت و مشابه در همه جهات رفتار می کند. این فرض ها به محققان اجازه می دهند تا از مشاهدات محلی برای تعمیم به کل کیهان استفاده کنند (اصل کیهان شناسی). با این حال، اگر این فرض ها نقض شوند، ممکن است مقدار ثابت هابل تغییر کند و نتایج متفاوتی به دست آید. به عنوان مثال، در برخی از تحقیقات اخیر، به وجود "تنش هابل" اشاره شده که نشان می دهد مقادیر اندازه گیری شده از ثابت هابل با پیش بینی های مدل های استاندارد مطابقت ندارد. مقادیر گزارش شده از طریق یادگیری ماشین در مقایسه با مقادیر گزارش شده بر اساس مدل Λ CDM نشان دهنده تنش های موجود در اندازه گیری های مختلف است (ورده (Verde) و همکاران ۲۰۱۹؛ فریدمن ۲۰۲۱). این تنش ها نیاز به تحقیقات بیشتر و بهبود روش های اندازه گیری را نشان می دهند. در روش های فاصله ای که از اندازه گیری های ابرنواخترها و متغیرهای قیفاووسی استفاده می شود معمولاً مقادیر بالاتری (به طور مثال در حدود ۷۳ کیلومتر بر ثانیه بر مگاپارسک) برای ثابت هابل ارائه می شود. اندازه گیری های مربوط به تابش ریز موج زمینه ای کیهانی معمولاً مقادیر پایین تری (حدود ۶۷ کیلومتر بر ثانیه بر مگاپارسک) برای ثابت هابل ارائه می دهند. اختلافات بین نتایج به دست آمده از روش های مختلف به عنوان مثال، اختلاف ۹ درصدی بین نتایج به دست آمده از روش های BAO و روش های فاصله ای به عنوان مصادیقی از مساله تنش هابل مطرح اند. این موضوع (تنش هابل) می تواند به عدم درک کامل ما از کیهان و مدل های کیهان شناسی موجود مرتبط باشد. برخی محققان بر این باورند که حل مشکل تنش هابل ممکن است با وجود فیزیک جدید (هو و ونگ (Hu and Wang)، ۲۰۲۳)، انرژی تاریک اولیه (پولین (Poulin) و همکاران، ۲۰۱۹؛ نیدرمن و اسلوث (Niedermann and Sloth)، ۲۰۲۰) یا تعاملات نوترینوها (ساکستاین و ترودن (Sakstein and Trodden)، ۲۰۲۰)، و یا مدل های گرانشی اصلاح شده انجام گیرد (دی والتینو (Di Valentino) و همکاران، ۲۰۲۱). در جدیدترین گزارش ها براساس و به کمک داده های تلسکوپ فضایی جیمز وب JWST (James Web Space Telescope) که

به نحوی به عنوان 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 نتیجه گیری

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؛ به‌طوری که 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 گردیده است. روش‌های بیان شده عبارت‌اند از متغیرهای قیفاووسی، ابرنواخترهای نوع Ia، رابطه تولی فیشر، افت وخیزروشنایی سطحی، قله مرحله غول قرمز، اثر سانیاو-زلدوویچ، مگامیزر، نوسانات صوتی باریونی، تاخیر زمانی همگرایی گرانشی، تابش ریزموج زمینه کیهانی و روش‌های مبتنی بر یادگیری ماشین. اگرچه به کارگیری 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" قابل توجه است. همان‌طور که در جدول ۱-۳ اشاره شد، ثابت هابل ناشی از آخرین داده‌ها در روش ابرنواخترهای نوع Ia، $67.8 \pm 1.3 \text{ Km s}^{-1}/(\text{Mpc})$ به دست آمده در حالی که با رابطه تولی فیشر، مقدار $\text{Km s}^{-1}/(\text{Mpc})$ 75.2 ± 3.3 برای این ثابت گزارش شده است. از آنجایی که هر کدام 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 پرداخته اند؛ البته، همان گونه که اشاره شد، در جدیدتری ادعا بر اساس داده های مربوط به تلسکوپ فضایی جیمز وب به نظر می

رسد این مشکل مرتفع گردیده است و مقداری در حدود $69 \text{ Km s}^{-1}/(\text{Mpc})$ گزارش شده است.

در پایان لازم به ذکر است که عمده مطالب این مقاله مستخرج از پایان نامه (توحیدی نیا، ۱۳۹۸) انجام گرفته توسط نویسندگان است؛

همچنین، همان گونه که مشخص است اگر چه سعی نویسندگان در ارجاع به منابع اصلی و دست اول بوده اما لازم است گفته شود که از پایان نامه های

(عشاق، ۱۳۸۸؛ سلیمانی، ۱۳۹۲؛ تمنا، ۱۳۹۳) که همگی با بخش یا بخشی هایی از موضوع این مقاله مرتبط بوده اند نیز بهره برده ایم.

تمنا، ا. (۱۳۹۳). تعیین پارامتر هابل با استفاده از ابرنواختر ها. *پایان نامه 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. *پایان نامه کارشناسی ارشد*. استاد راهنما: حبیب اله

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. *پایان نامه کارشناسی ارشد*. استاد راهنما: حبیب اله عصاره. اهواز:

دانشگاه شهید چمران اهواز. دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک.

عشاق، م. (۱۳۸۸). اندازه‌گیری‌های ثابت هابل. *پایان نامه کارشناسی ارشد*. استاد راهنما: امیر حسین عباسی. تهران: دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده علوم

پایه، گروه فیزیک.

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.

Baade, W. (1944). NGC 147 and NGC 185, Two New Members of the Local Group of Galaxies. *The Astrophysical Journal* 100, 147-150.

- Bengaly, C. et al. Y. (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. et al. (2002). Early-type galaxy distances from the Fundamental Plane and surface brightness fluctuations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 330 (2), 443-457.
- Blakeslee, J. P. (2012). Surface brightness fluctuations as primary and secondary distance indicators. *Astrophysics and Space Science* 341 (1), 179-186.
- Branch, D. & Patchett, B. (1973). TYPE I SUPERNOVAE, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 161 (1), 71-83.
- Cantiello, M. et al. (2009). Distances and Stellar Population properties using the SBF method. *Mem. S. A. It. Vol.* 75, 282-285.
- Cantiello, M. et al. (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. et al. (2019). Baryon Acoustic Oscillations and the Hubble Constant: Past, Present and Future. *JCAP* 10, 044.
- Di Valentino, et al. (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.
- Fernie, J. D. (1969). The Period–Luminosity Relation: A Historical Review, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 81, 707-731.

- Fischer, et al. (1997). The Mass distribution of the Cluster 0957+561 from Gravitational Lensing. *Astronomical Journal*, 113, 2, 521-530.
- Fishbach, M. et al. (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.
- 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.
- Freedman, W. L. (2000). The Hubble Constant and the Expansion Age of the Universe. *Physics Reports* 333, 13-31.
- Freedman, W. L. et al. (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. et al. (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. et al. (2016). THE MEGAMASER COSMOLOGY PROJECT. VIII. A GEOMETRIC DISTANCE TO NGC 5765b. *The Astrophysical Journal* 817 (2) (2016) 128, 1-17.
- Giovanelli, R. et al. (1997). THE TULLY-FISHER RELATION AND H_0 . *The Astrophysical Journal Letters* 477 (1), L1-L4.

- Gordon, J. P. Zeiger, H. J. & Townes, C. H. (1955). The Maser—New Type of Microwave Amplifier, Frequency Standard, and Spectrometer. *Physical Review* 99 (4) 1264-1274.
- Harris, W. E. et al. (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.
- Jackson, N. (2015). The Hubble Constant. *Living Reviews in Relativity* 18 (1), 1-51.
- Jang, I. S. & Lee, M. G. (2017). The Tip of the Red Giant Branch Distances to TypaIa 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. et al. (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. et al. (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. et al. (1993). The Tip of the Red Giant Branch as a Distance Indicator for Resolved Galaxies. *The Astrophysical Journal* 417, 553-559.
- Leibundgut, B. (2017), History of Supernovae as Distance Indicators. *Handbook of Supernovae*, 1-17. Springer.
- 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 extra-galactiques, 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.
- Perlmutter, S. (2000). Supernovae, Dark Energy, and the Accelerating Universe: The Status of the Cosmological Parameters. *International Journal of Modern Physics A*, 15, 715-739.
- Planck Collaboration. (2020). Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters. *Astronomy & Astrophysics*, 641, A6.
- Poulin, V., et al. (2019). Early Dark Energy can Resolve the Hubble Tension. *Physical Review Letters*, 122 (22), 221301.
- Reese, E. D. et al. (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. et al. (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. et al. (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. et al. (1998). Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant. *The Astronomical Journal*, 116, 3, 1009-1038.
- Riess, A. G. et al. (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., et al. (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, C. E. et al. (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, et al. (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. et al. (2013). CALIBRATION OF THE MID-INFRARED TULLY–FISHER RELATION. *The Astrophysical Journal* 765 (2), 94, 1-11.
- Sunyaev, R. A. & Zeldovich, Y. B. (1972). The Observations of Relic Radiation as a Test of the Nature of X-Ray Radiation from the Clusters of Galaxies. *Comments on Astrophysics and Space Physics* 4, 173-178.
- Suyu, S. H. et al. (2017). H0LiCOW – I. H0 Lenses in COSMOSGRAB's Wellspring: program overview. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 468 (3), 2590-2604.
- Tammann, G. A. (2006). The Ups and Downs of the Hubble Constant. *The Reviews in Modern Astronomy* 19. *The Many Facets of the Universe - Revelations by New Instruments*. Wiley-VCH. 1-30.
- Tammann, G. A. Sandage, A. & Reindl, B. (2008). The expansion field: the value of H_0 . *The Astronomy and Astrophysics Review* 15 (4) 289-331.
- Tammann, G. A. & Reindl, B. (2012). Advancing the Physics of Cosmic Distances. *Proceedings of the International Astronomical Union* 8 (S289), 13-25.

- Tammann, G. A. & Reindl, B. (2013). The luminosity of supernovae of type Ia from tip of the red-giant branch distances and the value of H_0 . *Astronomy and Astrophysics* 549, A136, 1-9.
- Tonry, J. & Schneider, D. P. (1988). A New Technique for Measuring Extragalactic Distances. *The Astronomical Journal* 96, 807-815.
- Tonry, J. L. et al. (2000). The SBF Survey of Galaxy Distances. II. Local and Large-Scale Flows. *Astrophys. J.* 530:625-651.
- Tonry, J. L. et al. (2002).
- Tully, R. B. & Fisher, J. R. (1977). A new method of determining distances to galaxies. *Astronomy and Astrophysics* 54, 661-673.
- Verde, L., et al. (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. et al. (2018). The Megamaser Cosmology Project. X. High-resolution Maps and Mass Constraints for SMBHs. *The Astrophysical Journal* 854 (2), 124, 1-12.