

Определение постоянной Хаббла по карликовым голубым галактикам

© Я.О. Ананьев,¹ О.А. Куричин,² А.В. Иванчик²

¹ Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет им. Ж.И. Алферова РАН, 194021 Санкт-Петербург, Россия

² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, 194021 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: yarik.ananbev@mail.ru

Поступило в Редакцию 3 мая 2024 г.

В окончательной редакции 11 июля 2024 г.

Принято к публикации 30 октября 2024 г.

В современной космологии существует проблема „хаббловского кризиса“ — рассогласование между независимыми оценками параметра Хаббла H_0 по реликтовому излучению и по локальным наблюдениям на уровне $\sim 4\sigma$. Накопление и уточнение наблюдательных данных может помочь решить эту проблему. Работа посвящена независимому определению H_0 из анализа шкалы расстояний голубых карликовых галактик. Для этого из каталога SDSS DR17 было отобрано 5605 объектов с красными смещениями $z < 0.3$. Из анализа выборки было получено значение $H_0 = 68.98 \pm 0.21$ km/s/Mpc, что хорошо согласуется с результатами других независимых исследований.

Ключевые слова: постоянная Хаббла, III-области, карликовые галактики, космология.

DOI: 10.61011/JTF.2024.12.59262.393-24

Введение

Стандартная Λ CDM-космологическая модель, описывающая динамику расширения Вселенной на всех стадиях ее эволюции, хорошо согласуется с большей частью наблюдательных данных, полученных для различных космологических эпох от Большого Взрыва до наших дней. Однако существует ряд проблем, где предсказания Λ CDM-модель расходится с наблюдательными данными. Одной из таких проблем является известная проблема „хаббловского кризиса“ („ H_0 -tension“). Она состоит в том, что прямые наблюдательные оценки значения параметра Хаббла H_0 , описывающего современную скорость расширения Вселенной, не согласуются с модельно-зависимыми оценками, полученных на основе анализа космологических наблюдений, на уровне $\sim 4\sigma$ [1]. Причина описанного рассогласования на данный момент не ясна и является одной из наиболее острых проблем современной космологии.

Непрямое предсказание H_0 основывается на измеренных значениях стандартных космологических параметров Λ CDM-модели [2]. Величины этих параметров вычисляются путем анализа анизотропии Реликтового Излучения (CMB), которая формируется через 380 тыс. лет после Большого Взрыва [3]. Эти измерения отлично согласуются с независимыми измерениями тех же параметров на основе наблюдательных данных из других космологических эпох (например, из измерений распространенностей первичных элементов) [4,5]. Актуальное значение постоянной Хаббла в рамках Λ CDM-модели имеет величину $H_0 = 67.5 \pm 0.5$ km/s/Mpc [3].

Прямые оценки H_0 получаются из анализа локальной шкалы расстояний, т.е. измерения расстояния до „стандартных свечей“ и измерения скорости их удале-

ния [1]. Под „стандартными свечами“ в астрофизике понимаются такие объекты, абсолютную светимость которых можно вычислить, основываясь на некоторых косвенных наблюдательных признаках [2]. Наиболее распространенными стандартными свечами, используемыми для определения локального значения параметра Хаббла, являются сверхновые типа Ia и цефеиды [6]. Актуальное значение постоянной Хаббла, измеренной по локальной шкале расстояний, имеет величину $H_0 = 73.2 \pm 1.3$ km/s/Mpc [6].

Настоящая работа посвящена определению H_0 из анализа шкалы расстояний, основанной на наблюдениях голубых карликовых галактик с красными смещениями $z < 0.3$. Для этого используется соотношение между полной светимостью в линии $H\beta L$ и дисперсией скоростей в галактике σ , впервые описанное в работе [7]. Для определения величины H_0 используется специально созданная для этой задачи выборка галактик, отобранных из открытого каталога SDSS DR17 [8].

1. Выборка объектов

В открытом каталоге SDSS DR17 [8] содержатся спектры 88 490 карликовых голубых галактик. Отбор объектов для исследования производился по критерию наличия измеряемых эмиссионных линий Бальмеровской серии ($H\alpha$, $H\beta$, $H\gamma$ и $H\delta$) и металлов ($[OIII]$ 4363 Å и 4959/5007 Å, $[SII]$ 6717/6731 Å, $[NII]$ 6548/6584 Å) в спектре на уровне отношения сигнал-шум ≥ 3.5 . Для этого в окрестности каждой линии производилось моделирование континуума, оценивалась величина шума, и сравнивалась с высотой пика эмиссионной линии. Для автоматического отбора спектров для данной задачи была написана программа на языке Python 3. С исполь-

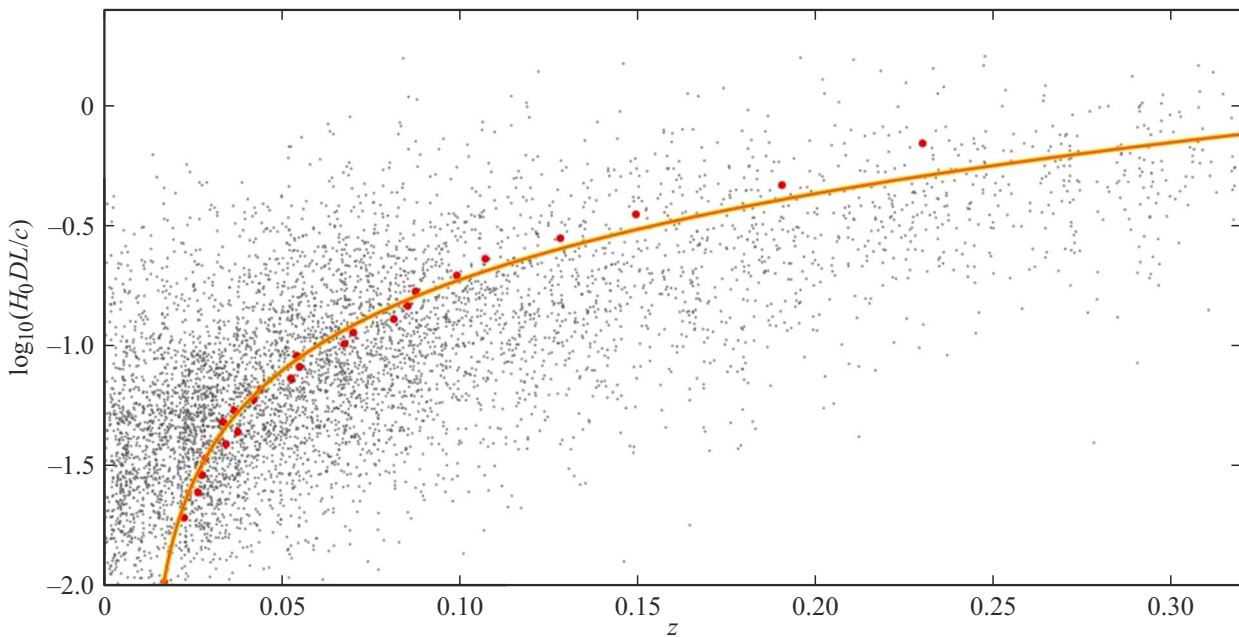


Диаграмма „ D_L – z “ для 5605 объектов, отобранных из каталога SDSS DR17. Серые точки — данные по каждому из объектов, красные точки — взвешенные средние значения, желтая линия — модельная функция $D_L(z)$.

зованием этой программы из всех спектров карликовых галактик из каталога SDSS DR17 было отобрано 5605 объектов для дальнейшего анализа. Полученная выборка является одной из самых больших в мире среди всех, которые применялись для определения H_0 .

2. Анализ данных

Для определения постоянной Хаббла по III областям карликовых малометаллических галактик необходимо измерить их красное смещение и расстояние до них. Красное смещение таких объектов определяется с очень высокой точностью, поскольку спектры этих объектов обладают мощными эмиссионными линиями водорода, лабораторные длины волн которых известны. Для определения расстояния используется соотношение $F_0 = L/4\pi D_L^2$, где F — наблюдаемый поток в линии, L — исходная светимость линии, D_L — фотометрическое расстояние до галактики. Для определения исходной светимости объекта в линии используется соотношение L – σ из работы [9]:

$$\log L = (33.71 \pm 0.21) + (4.65 \pm 0.14) \times \log \sigma.$$

Оно позволяет определить полную светимость галактики в линии $H\beta$, основываясь на измеряемом значении дисперсии скоростей галактики σ . Наблюдаемая линия $H\beta$ дополнительно уширена за счет аппаратной функции спектрографа и за счет теплового уширения. Таким образом, требуемое значение величины σ вычисляется с использованием соотношения:

$$\sigma^2 = \sigma_0^2 - \sigma_a^2 - \sigma_t^2,$$

где σ_0 — наблюдаемая дисперсия скоростей, $\sigma_t = \sqrt{kT/m}$ — тепловая дисперсия скоростей (T — температура III-области), $\sigma_a = 69$ km/s — ширина аппаратной функции телескопа SDSS [8].

Также при вычислении расстояния необходимо учитывать межзвездное покраснение — ослабление измеряемых потоков линии из-за рассеяния на межзвездной пыли — что осуществляется с помощью формулы

$$F_0 = F_{obs} \cdot 10^{3.1C(H\beta)/f(H\beta)},$$

где $C(H\beta)$ — логарифмический коэффициент покраснения, определяемый по бальмеровскому декременту, $f(\lambda)$ — функция покраснения из [10].

Для анализа объектов на языке Python 3 были написаны две программы:

1) программа для измерения потоков эмиссионных линий водорода, кислорода и серы путем моделирования континуума и вписания гауссового профиля в наблюдаемый профиль линии. Оптимальные параметры профиля определяются с помощью метода Монте-Карло, оценка достоверности фитирования осуществляется по критерию χ^2 ;

2) программа для определения физических условий в галактике (температуры и концентрации электронов), а также учета поправок на систематические эффекты подлинного поглощения [11] и межзвездного покраснения. Физические условия определяются также с помощью метода Монте-Карло.

С помощью этих программ для каждого из 5605 объектов были определены физические условия, а также вычислено их красное смещение и расстояние до них. Результаты расчетов представлены на рисунке.

Для определения параметра Хаббла методом Монте-Карло было проведено фитирование измеренных данных по расстояниям и красным смещениям с помощью соотношения из [2]:

$$D_L(z) = \frac{z}{H_0} \left(1 - \frac{z}{2} q_0\right),$$

где H_0 — параметр Хаббла, q_0 — параметр деселерации, определяющий ускорение расширения Вселенной. Были получены следующие оценки на эти параметры: $H_0 = 68.98 \pm 0.21$ км/с/Мпс, $q_0 = -0.65 \pm 0.05$.

Полученная оценка находится между оценками, полученными на основе анализа анизотропии СМВ ($H_0 = 67.5 \pm 0.5$ км/с/Мпс) и на основе „поздних“ наблюдений ($H_0 = 73.2 \pm 1.3$ км/с/Мпс), и при этом обладает заметно более высокой точностью. Дальнейшее увеличение выборки, а также улучшение фотоионизационной модели III-областей, позволит уточнить получаемую оценку H_0 , и, возможно, поможет решить проблему H_0 -tension.

Заключение

В работе проводился анализ спектров карликовых голубых галактик, отобранных из каталога SDSS DDR17 с целью измерения современного значения постоянной Хаббла. В рамках работы было отобрано 5605 объектов, на основе анализа которых были получены следующие оценки на величину параметра Хаббла и ускорения расширения Вселенной: $H_0 = 68.98 \pm 0.21$ км/с/Мпс, $q_0 = -0.65 \pm 0.05$. Полученные результаты хорошо согласуются с другими независимыми оценками параметра Хаббла [1], и при этом обладают заметно более высокой точностью. В будущем планируется расширить выборку объектов и оценить величину систематической ошибки этого метода, а также учесть следующие члены разложения $D_L(z)$, что позволит заметно улучшить точность определения параметра Хаббла и других космологических параметров.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] E. Di Valentino, O. Mena, S. Pan, L. Visinelli, W. Yang, A. Melchiorri, D.F. Mota, A.G. Riess, J. Silk. *Class. Quantum Gravity*, **38** 15, id. 153001, 110 (2021). DOI: 10.1088/1361-6382/ac086d.
- [2] Д.С. Горбунов, В.А. Рубаков. *Введение в теорию ранней Вселенной. Теория горячего Большого взрыва* (Из-во ЛКИ, 2008), 552 с.
- [3] Planck Collaboration, *Astron. Astrophys.*, **641** id. A6, 67 (2020). DOI: 10.1051/0004-6361/201833910
- [4] B.D. Fields, K.A. Olive, T. Yeh, C. Young. *J. Cosmol. Astropart. Phys.*, **03** id. 010 (2020). DOI: 10.1088/1475-7516/2020/03/010
- [5] Particle Data Group, *Prog. Theor. Exp. Phys.*, **8** id. 083C01, 2270 (2022). DOI: 10.1093/ptep/ptac097
- [6] A. Riess, W. Yuan, L.M. Macri, D. Scolnic, D. Brout, S. Casertano, D.O. Jones, Y. Murakami, G.S. Anand, L. Breuval, T.G. Brink. *Astrophys. J. Lett.*, **934** 1 L7, 52 (2022). DOI: 10.3847/2041-8213/ac5c5b
- [7] J. Melnick. *Astrophys. J.*, **228**, 112 (1979). DOI: 10.1086/156827
- [8] M.R. Blanton. *Astron. J.*, **154** 1 id. 28 (2017). DOI: 10.3847/1538-3881/aa7567
- [9] D. Fernandez-Arenas, R. Chavez. (2023), eprint arXiv:2309.15248.
- [10] J.A. Cardelli, C.C. Geoffrey, S. John Mathis. *Astrophys. J.*, **345**, 245 (1989). DOI: 10.1086/167900
- [11] E. Aver, D.A. Berg, K.A. Olive, R.W. Pogge, J.J. Salzer, E.D. Skillman. *J. Cosmol. Astropart. Phys.*, **03** id. 027, 35 (2021). DOI: 10.1088/1475-7516/2021/03/027