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.ananev@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 ~ 4 σ . 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/Мрс, что хорошо согласуется с результатами других независимых исследований.

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

DOI: 10.61011/JTF.2024.12.59262.393-24

Введение

Стандартная ЛСDМ-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 **АСDM-модель** расходится с наблюдательными данными. Одной из таких проблем является известная проблема "хаббловского кризиса" ("H₀-tension"). Она состоит в том, что прямые наблюдательные оценки значения параметра Хаббла H_0 , описывающего современную скорость расширения Вселенной, не согласуются с модельнозависимыми 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 АСDM-модели [2]. Величины этих параметров вычисляются путем анализа анизотропии Реликтового Излучения (СМВ), 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 удаления [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, использующимися для определения локального значения параметра Хаббла, являются сверхновые типа Іа 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 Н βL 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 (Н α , Н β , Н γ и Н δ) и металлов ([OIII] 4363 Å и 4959/5007 Å, [SII] 6717/6731 Å, [NII] 6548/6584 Å) в спектре на уровне отношения сигнал-шум \geq 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 HII областям карликовых малометалличных 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 $L-\sigma$ 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:

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

20* Журнал технической физики, 2024, том 94, вып. 12

где σ_0 — наблюдаемая дисперсия скоростей, $\sigma_t = \sqrt{kT/m}$ — тепловая дисперсия скоростей (T температура HII-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

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

где С(Н β) — 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 подлиниевого 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: $H_0 = 68.98 \pm 0.21$ km/s/Mpc, $q_0 = -0.65 \pm 0.05$.

Полученная оценка находится между оценками, полученными на основе анализа анизотропии СМВ $(H_0 = 67.5 \pm 0.5 \text{ km/s/Mpc})$ и на основе "поздних" наблюдений $(H_0 = 73.2 \pm 1.3 \text{ km/s/Mpc})$, и при этом обладает заметно более высокой точностью. Дальнейшее увеличение выборки, а также улучшение фотоионизационной модели НІІ-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: $H_0 = 68.98 \pm 0.21 \text{ km/s/Mpc}, q_0 = -0.65 \pm 0.05.$ 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

- 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

- 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