

Шкала космологических расстояний: парадоксы моделей красного смещения

С. Ф. ЛЕВИН

Московский институт экспертизы и испытаний, Москва, Россия,
e-mail: AntoninaEL@rostest.ru

Рассмотрены парадоксы, выявленные моделями красного смещения при построении шкалы космологических расстояний.

Ключевые слова: красное смещение, шкала космологических расстояний.

The paradoxes revealed by red shift models at construction of cosmological distances scale are considered.

Key words: red shift, cosmological distances scale.

Диаграмму Хаббла как основу шкалы космологических расстояний [1] с момента ее появления сопровождает ряд парадоксов. Первый парадокс связан с законом Хаббла для лучевой скорости галактик

$$cz = H_0 D, \quad (1)$$

где c — скорость света; z — красное смещение в спектре излучения; H_0 — постоянная Хаббла; D — расстояние до галактики.

На рис. 1 эллипсом и черным цветом выделены равноудаленные галактики. Согласно (1) расстояния до них имеют существенный разброс, но его оценки при определении расстояний только по красному смещению обычно не указывают, полагая, что на больших расстояниях доля пекулярной составляющей лучевой скорости уменьшается.

Второй парадокс возник в 1960-е годы при внесении квазаров в диаграмму Хаббла. Характеристики положения галактик и квазаров в логарифмическом масштабе параллельны с параметром наклона 0,2 и отличаются нуль-пунктами [1], что может быть связано с аномально большими абсолютными светимостями μ квазаров и K -эффектом [2] собственного красного смещения

$$z_0 = K \cdot 10^{-0,2\mu}, \quad (2)$$

где $K = 2,6 \cdot 10^{-6}$ — параметр наклона линии регрессии, построенной по данным о лучевой скорости различных звезд и взаимодействующих галактик [3].

В [4] для квазаров рассмотрена модель

$$z = (1 + z_g)(1 + z_k) - 1, \quad (3)$$

в которой красное смещение разделено на гравитационную составляющую

$$z_g = [1 - 2GM / (rc^2)]^{-1/2} - 1$$

и космологическую z_k , где G — гравитационная постоянная; M, r — масса и радиус объекта. Дж. Гринштейн и М. Шмидт предположили, что космологическая составляющая z_k вызвана «расширением Вселенной», но возможность гравита-

ционного красного смещения нельзя не учитывать, хотя им обычно пренебрегают. Так, на лимбе Солнца $z_{gC} = 2,17 \cdot 10^{-6}$ [1], что при $\mu_C = 4,79$ [1] расходится на порядок с указанным в [3] согласно (2) значением красного смещения Солнца: $z_{0C} = 2,6 \cdot 10^{-6-0,2 \cdot 4,79} = 2,864 \cdot 10^{-7}$.

Другой интерпретацией космологического красного смещения является эффект Доплера, связанный с движением объектов и газа в них:

$$z_D = [1 + (v/c) \cos \theta] [1 - (v/c)^2]^{-1/2},$$

где θ — угол между направлением вектора скорости v и линией визирования.

Физические величины M, r для квазаров не являются наблюдаемыми, но для $M \gg M_C$ их отношение можно выразить через светимость $L = 4\pi r^2 \sigma T_e^4$ и $L = L_C \cdot 10^{0,4(\mu_C - \mu)} \approx L_C M/M_C$, где σ — постоянная Стефана—Больцмана; L_C, M_C — светимость и масса Солнца; T_e — эффективная температура [1]. Тогда

$$z_g = [1 - 2K_g T_e^2 \cdot 10^{-0,2\mu}]^{-1/2} - 1,$$

где $K_g = GM_C c^{-2} \sqrt{4\pi\sigma / L_C} \cdot 10^{0,2\mu_C} = 5,76 \cdot 10^{-13}$.

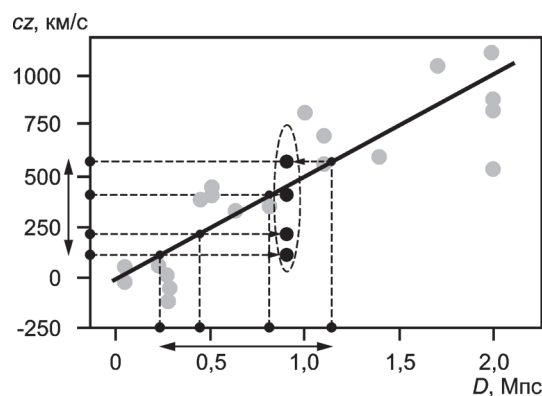


Рис. 1. Вид диаграммы Хаббла 1929 г.

Эффективные температуры звезд спектральных классов M8...O8 составляют 2 660—38 000 К [1]. Для Солнца $T_{\text{еС}} = 5784$ К, что дает $z_{\text{гС}} = 2,12 \cdot 10^{-6}$, т. е. при $GM/(rc^2) \ll 1$ К-эффект [3] отличается от гравитационного красного смещения эффективной температурой. Гравитационное красное смещение квазара можно выразить через эффективную температуру, фотометрическое расстояние $D_L = 10^{-5+0,2(m-\mu)}$ [1] и видимую звездную величину m :

$$z_g = \left[1 - 2K_g T_e^2 D_L 10^{5-0,2m} \right]^{1/2} - 1. \quad (4)$$

Для интерполяционной модели с разрывом 2-го рода [6]:

$$z_k = (H_0/c) D_L [1 - (H_0/c) D_L]^{-1} \quad (5)$$

уравнение шкалы космологических расстояний [7] примет вид

$$(1 - D_L/R_0) \sqrt{1 - 2K_g T_e^2 D_L 10^{5-0,2m}} = (1 + z)^{-1}, \quad (6)$$

где $R_0 = c/H_0$ — точка разрыва.

Решение системы уравнений (6) для выборки из 201 квазара [1] при «стандартной» эффективной температуре квазара $T_{\text{еQ}} = 30\,000$ К [4] дает шкалу космологических расстояний, на которой наиболее удаленный квазар из выборки находится на расстоянии $D_{L\text{max}} = 90$ Мпс. По данным [3] К-эффекту соответствует $T_{\text{еК}} = 2125$ К и $D_{L\text{max}} = 2810$ Мпс или 9,16 млрд. световых лет. При этом средние абсолютные отклонения погрешности неадекватности модели (5), как и для промежуточных значений эффективной температуры, находятся на уровне «машинного нуля»: $d_z \sim 10^{-16}$. Другими словами, «стандартная» эффективная температура квазаров не согласуется с их видимой звездной величиной.

На третий парадокс в 1970-е годы указал А. Сэндейдж: оценка постоянной Хаббла не зависит ни от направления на галактику, ни от интервала усреднения, т. е. как внутри, так и за пределами ячеек однородности структуры Вселенной, размеры которых имеют порядок 300 Мпс. Однако «однородный поток Хаббла» наблюдается уже с расстояний 1,5—2,0 Мпс [8], и при доплеровской интерпретации красного смещения в изотропных космологических моделях получается, что наблюдатель находится в центре Большого Взрыва.

Согласно [7] причиной анизотропии наблюдаемого красного смещения является собственная составляющая (2), (4), диполь которой аналогично реликтовому излучению близок к полярной галактической оси. При этом северному галактическому полюсу соответствует, как было установлено в 2011 г. по данным зонда Planck, направление на крупнейший структурный элемент известной части Вселенной — сверхскопление сверхскоплений галактик в созвездии Coma. В направлении Южного галактического полюса находится система гигантских пустот в созвездиях Eridanus и Aquarius. Их размеры находятся в пределах 11—150 Мпс, что в соответствии с моделью Большого Взрыва интерпретируется флуктуацией плотности барионного вещества под воздействием акустических волн на ранних стадиях развития Вселенной. Еще в 1988 г. в созвездии Canes Venatici на расстоянии 0,47 Гпс была обнаружена гигантская пустота (Giant Void)

диаметром 300—400 Мпс, а в 2004 г. в созвездиях Eridanus и Aries на расстоянии 2—4 Гпс еще и Great Void диаметром более 280 Мпс. Их размеры плохо вписываются в теорию барионных флуктуаций. Согласно А. Сэндейджу они превышают характерный размер ячеек однородности, причем Giant Void может быть центром Большого Взрыва.

Благодаря представлению гравитационного красного смещения в виде (4) сохраняются основные свойства полученной в [7] шкалы: изотропность космологической составляющей красного смещения квазаров для интерполяционных моделей $z_k = (H_0/c) D_L [1 + k(H_0/c) D_L]^k$ с параметром формы k [6] и для решения уравнения Маттига $z_k = q_0(H_0/c) D_L - (q_0 - 1) \left(\sqrt{1 + 2(H_0/c) D_L} - 1 \right)$, где q_0 — параметр замедления [5] на уровне «машинного нуля». И это — еще один парадокс.

Таким образом, критерием идентификации моделей космологического красного смещения становится не столько минимум погрешности неадекватности, сколько набор свойств без введения дополнительных параметров. Такими свойствами, которых нет у модели Маттига, дающей при $q = 1$ закон Хаббла, обладает интерполяционная модель (5) с точкой разрыва 2-го рода [6].

В модели (5) точка разрыва 2-го рода $c/H_0 = 13,16^{+0,67}_{-0,61}$ млрд. световых лет или $R_0 = 4040^{+206}_{-187}$ Мпс при $H_0 = (74,2 \pm 3,6) \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Мпс}^{-1}$ соответствует «возрасту Вселенной» $T = (13,77 \pm 0,13)$ млрд. лет [9]. Поскольку в законе Хаббла функциональный смысл параметра H_0/c — лишь параметр наклона, структурные ограничения на рост лучевой скорости cz отсутствуют.

Шкала космологических расстояний на основе (5) уменьшает оценки абсолютных светимостей и расстояний до объектов. Это ослабляет ограничение на красные смещения для Λ CDM-модели из-за несоответствия «космологического возраста» времени, необходимому для формирования галактик и квазаров согласно существующей теории. Однако, по мнению И. Масанори (Японская национальная астрономическая обсерватория), обнаружение объектов с $cz = 15...20$ будет «полномасштабным кризисом Λ CDM-модели» [10].

При доплеровской интерпретации космологического красного смещения (5) эквивалентные скорость и ускорение расширения Вселенной выражаются как

$$v(D_L) = c \frac{D_L/R_0 - 0,5D_L^2/R_0^2}{1 - D_L/R_0 + 0,5D_L^2/R_0^2};$$

$$w(D_L) = \frac{dv}{dD_L} = c \frac{(c/R_0)(1 - D_L/R_0)}{\left[1 - D_L/R_0 + 0,5D_L^2/R_0^2 \right]^2},$$

причем эквивалентное эффекту Доплера указанное ускорение нарастает от $w(0) = cH_0 = 7,21 \cdot 10^{-10} \text{ м/с}^2$ до максимума $w_{\text{max}} = 9,59 \cdot 10^{-10} \text{ м/с}^2$ при $D_L = 1667,2$ Мпс и спадает до нуля при $D_L = R_0$ (рис. 2). Точка максимума ускорения при $z_k = 0,732$ соответствует оценке [11], согласно которой переход между замедлением и ускорением расширения Вселенной произошел при $z \approx 0,73$.

Следует отметить, что данные [11] не обеспечивают покрытия небесной сферы для выявления анизотропии диаграммы Хаббла вне Местного сверхскопления и ускоренного расширения [12]. «Существование космического ускорения при $z < 0,5$ хорошо установлено независимыми наборами данных, включая расстояния по яркости сверхновых типа SN Ia, дипольную анизотропию, поляризацию реликтового излучения и барионные акустические осцилляции в спектрах галактик» [13], но при этом оценки космологических параметров, полученные разными методами, могут значительно отличаться от «стандартных» [14, 15].

Переменному ускорению расширения Вселенной соответствует и оценка аномального ускорения космических аппаратов Pioneer ($8,74 \pm 1,33 \cdot 10^{-10}$ м/с², обработка данных о котором велась на основе гипотезы о его постоянстве. Но более поздний анализ данных об эффекте Доплера для этих аппаратов за вдвое больший промежуток времени [16] показал, что на 10 % более точный результат дает гипотеза об изменении ускорения — линейном или экспоненциальном. За счет этого уточнения аномальная составляющая ускорения аппарата Pioneer-10 на 23-м году после запуска снизилась до указанного ранее в модели (5) начального значения $w(0) = cH_0 = 7,21 \cdot 10^{-10}$ м/с² [7] с тенденцией к дальнейшему росту.

Сопоставление данных [16] об аномальных ускорениях Pioneer-10 и Pioneer-11 указывает, вероятнее всего, на случайное совпадение, если, конечно, различие этих оценок не связано с анизотропией [17] в силу противоположности направлений их полета.

Интерполяционная модель (5) и закон Хаббла являются однопараметрическими, тогда как модель Маттига содержит два параметра.

Следующий парадокс возникает при учете собственного красного смещения для кинематической модели Большого Взрыва, предполагающей разлет фрагментов с произвольными постоянными скоростями и упорядочивание скоростей по расстоянию, т. е. для линейного расширения Вселенной. В этих моделях учет запаздывания дает

$$v = \frac{D_L}{T - D_L/c} = \frac{D_L}{1/H_0 - D_L/c} = \frac{H_0 D_L}{1 - D_L/R_0}, \quad (7)$$

что формально для лучевой скорости $v = cz$ приводит к соотношению (4).

Для доплеровского же красного смещения выражение (7) дает

$$z_v = \sqrt{(c+v)/(c-v)} - 1 = (1 - 2D_L/R_0)^{-1/2} - 1, \quad (8)$$

и при $(H_0/c)D_L \ll 0,5$ модель (8) также сходится к модели (4). Теперь (3) примет вид

$$\sqrt{[1 - 2D_L/R_0][1 - 2K_g \cdot 10^{5-0,2m} D_L]} = (1+z)^{-1},$$

а его решение $D_L = R_0 \left[1 + \rho + \sqrt{(1-\rho)^2 + 4\rho/(1+z)^2} \right] / (4\rho)$, где

$\rho = K_g R_0 \cdot 10^{5-0,2m}$, по рассматриваемой выборке квазаров [1] для модели (6) дает $d_z = 2,48 \cdot 10^{-12}$. Это сокращает грани-

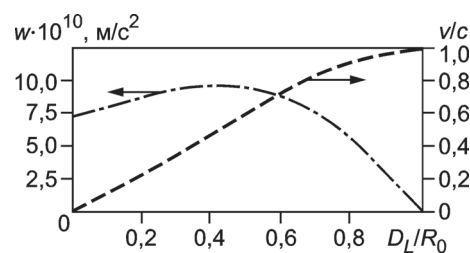


Рис. 2. Зависимости ускорения w и скорости v/c от расстояния при доплеровской интерпретации (обратное время)

цы Вселенной в два раза, а дальнюю границу распределения квазаров в выборке приближает с 9,16 до 6,14 млрд. световых лет.

Такое несоответствие положений квазаров для близких моделей, как и в парадоксе со «стандартной» эффективной температурой квазаров, должно было бы показывать, что либо гипотеза Х. Арпа о несущественности космологического красного смещения квазаров верна и собранная им статистика «взаимодействующих галактик и квазаров» получает подтверждение, либо задача идентификации космологических моделей по данным астрофизических измерений при доплеровской интерпретации становится некорректной по Адамару.

Эта ситуация напоминает обоснование стандартной Λ CDM-модели по данным WMAP, когда был отклонен ряд альтернативных моделей одного уровня точности, в рамках которых оценки постоянной Хаббла не согласовывались с ее оценками в этом эксперименте [18, 19]. В итоге, главными результатами эксперимента WMAP стали глобальная евклидовость и ускоренное расширение Вселенной, что не противоречит подтвержденной с высокой точностью изотропией космологической составляющей красного смещения [7].

В [20] показано, что в кинематической модели для продольного эффекта Доплера линейность закона Хаббла при переходе от одной точки наблюдения к другой сохраняется, а для полного эффекта возникает квадратичная добавка, обладающая анизотропией. При этом для нелинейного закона Хаббла и при разложении решения уравнения Маттига для параметра замедления $q_0 \neq 1$ первые два члена совпадают с (5)—(8) [5].

Еще П. Дирак высказывал гипотезы об изменении гравитационной постоянной и о «старении» фотонов как следствии потери энергии на преодоление сопротивления среды, а известные исследователи квазаров Дж. и М. Бербиджи рассматривали красное смещение как эффект Доплера и гравитационный эффект [4]. Причинами красного смещения указывались вязкость эфира, спонтанная радиолюминесценция атомов водорода, флуктуации вакуума и эффект потери кинетической энергии, переходящей в энергию флуктуаций вакуума.

Таким образом, удалось построить шкалу космологических расстояний, в которой учет наблюдаемых звездных величин и поправка на гравитационное красное смещение в спектрах внегалактических источников позволили принципиально уменьшить рассеяние оценок и объединить внегалактические объекты различных морфологических типов в общую зависимость.

Однако эта математическая, чисто метрологическая интерпретация данных измерений находится на грани «машинного нуля» и переносит критерии выбора моделей красного смещения в область описания эффектов без некорректной параметризации и прямой подгонки под данные измерений. Физическая же природа космологического красного смещения однозначной интерпретации пока не имеет.

Литература

1. **Ленг К.** Астрофизические формулы. Ч. 2. М.: Мир, 1978.
2. **Arp H. C.** Red shifts of high-luminosity stars — the K-effect, the Trumpler effect and mass-loss correction // *Month. Notices Roy. Astron. Soc.* 1992. V. 258. P. 800—810.
3. **Хайдаров К. А.** Температура эфира и красные смещения [Электрон. ресурс]. <http://www.inauka/blogs/article78500.html> (дата обращения 09.04.2009 г.).
4. **Бербидж Дж., Бербидж М.** Квазары. М.: Мир, 1969.
5. **Левин С. Ф.** Измерительные задачи статистической идентификации шкалы космологических расстояний // *Измерительная техника.* 2011. № 12. С. 17—22; **Levin S. F.** Measurement problems in the statistical identification of the scale of cosmological distances // *Measurement Techniques.* 2011. V. 54. N 12. P. 1334—1341.
6. **Левин С. Ф.** Оптимальная интерполяционная фильтрация статистических характеристик случайных функций в детерминированной версии метода Монте-Карло и закон красного смещения. М.: Науч. совет по кибернетике при АН СССР, 1980.
7. **Левин С. Ф.** Шкала космологических расстояний на основе интерполяционной модели красного смещения // *Измерительная техника.* 2012. № 6. С. 12—14; **Levin S. F.** Cosmological distances scale based on a red shift interpolation model // *Measurement Techniques.* 2012. V. 55. N 6. P. 609—612.
8. **Макаров Д. И.** Движения галактик на малых и больших масштабах. Нижний Архыз: CAO РАН, 2000 [Электрон. ресурс]. <http://w0.sao.ru/hq/dim/PhD/full/phd.html> (дата обращения: 15.05.2009 г.).
9. **Larson D. e. a.** Seven-year WMAP observation: Power spectra and WMAP-derived parameters // *Preprint WMAP* 26.01.2010.
10. **Почва** для сомнений [Электрон. ресурс]. <http://www.vokrugsveta.ru/vs/article/6797/html> (дата обращения: 07.02.2012 г.).
11. **Perlmutter S. e. a.** Measurements of Ω and Λ from 42 high-red shift supernovae // *Astrophys. J.* 1999. V. 517. P. 565—586.
12. **Schwarz D. J., Weinhorst B.** (An)isotropy of the Hubble diagram: comparing hemispheres // *Astronomy & Astrophys.* 2007. V. 474. P. 717—729.
13. **Shafieloo A., Sahnib V., Starobinsky A. A.** Is cosmic acceleration slowing down? [Электрон. ресурс]. <http://arXiv:0903.5141v4> [astro-ph.CO] 8 Oct 2009 (дата обращения: 20.01.2012 г.).
14. **Набоков Н. В., Барышев Ю. В.** Классические космологические тесты для галактик сверхглубокого хаббловского поля // *Астрофизический бюллетень.* 2008. Т. 63. № 3. С. 260—275.
15. **Sollerman J. e. a.** First-year Sloan digital sky Survey-II supernova results: constraints on non-standard cosmological models [Электрон. ресурс]. <http://arXiv:0908.4276v2> [astro-ph.CO] (дата обращения: 01.09.2009 г.).
16. **Turyshchev S.** Support for temporally varying behavior of the Pioneer anomaly from the extended Pioneer 10 and 11 Doppler data sets. [Электрон. ресурс]. <http://arXiv:1107.2886v1> [gr-qc] 14 Jul 2011 (дата обращения: 04.04.2012 г.).
17. **Rong-Gen Cai, Zhong-Liang Tuo.** Direction Dependence of the Deceleration Parameter [Электрон. ресурс]. <http://arXiv:1109.0941v5> [astro-ph.CO] 11 Jan 2012 (дата обращения: 12.01.2012 г.).
18. **Сажин М. В.** Анизотропия и поляризация реликтового излучения. Последние данные // *УФН.* 2004. Т. 174. № 2. С. 197—205.
19. **Freedman W. L., Kennicutt R. C., Mould J. R.** Measuring the Hubble constant with the Hubble space telescope [Электрон. ресурс]. <http://arXiv:0910.5775v1> [astro-ph.CO] 30 Oct 2009 (дата обращения: 27.11.2009 г.).
20. **Каравашкин С. Б., Каравашкина О. Н.** О природе метagalактического красного смещения [Электрон. ресурс]. http://selftrans.narod.ru/v3_1/hubblerus32/hubblerus32.html (дата обращения: 17.03.2009 г.).

Дата принятия 11.09.2012 г.