РАСШИРЕНИЕ ВСЕЛЕННОЙ В ПОСЛЕРЕКОМБИНАЦИОННУЮ ЭПОХУ

В. И. Проник

НИИ Крымская астрофизическая обсерватория, 98409 п. Научный, АР Крым
e-mail: vpronik@crao.crimea.ua

Опубликованная независимо тремя группами наблюдателей диаграмма Хаббла показывает примерно одно и то же уменьшение скорости расширения Вселенной со временем. При этом, данные наблюдений программы zCOSMOS, выполняемой в ESO, оказались не только внутренне наиболее точными, но и охватывают наибольший диапазон z – от 0 до $z = 2.4$. Согласно этим данным, при наблюдаемом сейчас значении $H_0 = 65$ км/(с·Мпк), значения параметров Ω_m и Ω_v таковы: $\Omega_m = 0.263$ и $\Omega_v = 0.737$. Наблюдаемая зависимость H_z от z свидетельствует, что ускорение в расширении Вселенной началось при $z = 1.5$. Позже (при $z = 0.75$) энергия вещества и энергия вакуума сравнялись, а еще позже (при $z < 0.75$) энергия вакуума стала доминировать. Поэтому в настоящее время Вселенная расширяется с ускорением, которое проявляется в том, что, по мере расширения, гравитационное торможение постоянно уменьшается. В будущем величина торможения уменьшится до нуля ($\Omega_m \to 0, \Omega_v \to 1$), а скорость расширения Вселенной выйдет на некую постоянную величину $H \approx 40$ км/(с·Мпк). Только тогда постоянная Хаббла станет мировой константой.

Несколько лет назад, почти одновременно, три группы наблюдателей (Astier et al., 2006 [1]; Riess et al., 2004 [2]; Lilly et al., 2005 [3]) опубликовали наблюдаемую диаграмму Хаббла. В первых двух работах диаграмма построена по сверхновым Ia типа в далеких галактиках и представляет зависимость модуля расстояния $(m - M)$ от z. Для того, чтобы диаграммы можно было сравнивать между собой, мы перевели модули в метрические расстояния d_m, а диаграммы представили в табличном виде (табл. 1, колонки 3 и 4).

В третьей работе [3], которая по существу есть глубокий обзор неба на площадке размером 1.7 кв. градуса, и которая получила название "программа ESO zCOSMOS", диаграмма Хаббла представлена в виде рисунка, на котором на разных z с интервалом Δz =0.1 отмечены метрические расстояния от наблюдателя до объекта в единицах расстояния до $z = 0.1$. Взяв последнее расстояние, выраженное в мегапарсеках (Мпк) из первых двух работ, мы перевели все относительные расстояния программы zCOSMOS в мегапарсеки (табл. 1, колонка 2).

Используя метрические расстояния d_m, которые получены по данным наблюдений в каждой из трех программ, мы вычислили скорости расширения Вселенной H_z для разных z с интервалом $\Delta z = 0.1$ (диапазон z, разный в разных программах). Вычисления H_z производились по формуле

$$H_z(z_i) = \frac{C}{\dfrac{d_m(z_i) - d_m(z_{i-1})}{z_i - z_{i-1}}}, \qquad \text{где } z_i - z_{i-1} = 0.1. \tag{1}$$

Для каждой из программ значения H_z приведены в таблице 2 и представлены на рис. 1.

Сравнивая зависимость H_z от z внутри каждой программы и разброс точек на диаграмме (рис. 1), мы пришли к выводу, что зависимость H_z от z для всех трех программ примерно одинакова, при этом, данные программы zCOSMOS [3] – наиболее точные: они показывают наиболее плавное изменение постоянной Хаббла H_z с увеличением z. Поэтому, не делая никаких осреднений, в качестве наблюдаемой зависимости H_z от z нами принята сглаженная зависимость, которую дает программа zCOSMOS в диапазоне z от 0 до 2.4 (рис. 2).

Представив наблюдаемую зависимость H_z от z теоретической формулой

$$H_z^2 = H_0^2[\Omega_m(1+z)^3 + \Omega_v], \tag{2}$$

мы получили следующие значения энергии, заключенной в веществе Ω_m и в вакууме Ω_v, при принятом значении $H_0 = 65$ км/(с·Мпк):

$$\Omega_m = 0.263 \qquad \text{и} \qquad \Omega_v = 0.737,$$

что полностью совпадает со значениями этих параметров, полученными группой Астье в диапазоне z от 0 до 1 [1]. Ошибки такого представления наблюдаемой зависимости H_z от z (формула (1)) теоретической формулой (2) составляют в среднем меньше 1% (колонки 2 и 5 в таблице 2). Это позволяет получать

Таблица 1. Метрические расстояния в Мпк, соответствующие каждому z согласно данным наблюдений, полученным тремя группами наблюдателей

z	Lilly et. al d_m	Riess et. al d_m	Astier et. al d_m
0.0			
0.1	433	433	435
0.2	850	841	845
0.3	1247	1249	1253
0.4	1627	1638	1636
0.5	1985	1994	1995
0.6	2325	2322	2333
0.7	2649	2639	2640
0.8	2955	2956	2956
0.9	3243	3245	3245
1.0	3516	3539	3507
1.1	3777	3782	3782
1.2	4022	4032	
1.3	4257	4249	
1.4	4478	4485	
1.5	4685	4699	
1.6	4887	4909	
1.7	5075	5112	
1.8	5256	5282	
1.9	5428	5465	
2.0	5595	5583	
2.1	5752		
2.2	5903		
2.3	6048		
2.4	6188		

Таблица 2. Скорость расширения Вселенной H_z в км/(с·Мпк) на разных z по данным наблюдений, полученным тремя группами наблюдателей. Наиболее плавное увеличение скорости расширения Вселенной с ростом z показывают наблюдения, выполненные по программе zCOSMOS [3]

z	Lilly et. al (1)	Riess et. al	Astier et. al	Теория (2)
0.0	65	65	65	65
0.1	69	69	69	67.8
0.2	72	73	73	71.8
0.3	76	74	73.5	74.5
0.4	80	77	78	78.5
0.5	84	84	83.5	82.9
0.6	88	91	89	87.6
0.7	93	94	98	92.6
0.8	98	95	95	98.0
0.9	104	104	104	103.6
1.0	110	102	114.5	109.6
1.1	115	123	109	115.8
1.2	122	120		122.2
1.3	128	138		129.0
1.4	136	127		135.1
1.5	145	140		143.1
1.6	149	143		150.5
1.7	159	148		158.1
1.8	166	176		165.8
1.9	174	164		173.8
2.0	180	176		182.0
2.1	191			190.3
2.2	199			198.8
2.3	207			207.5
2.4	214			216.3

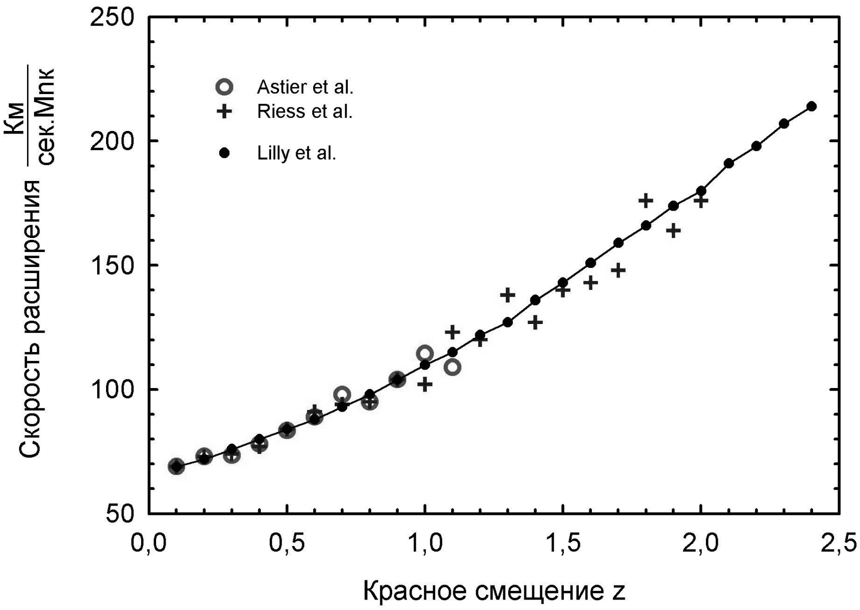

Рис. 1. Наблюдаемая зависимость скорости расширения Вселенной от красного смещения по данным наблюдений трех коллективов авторов

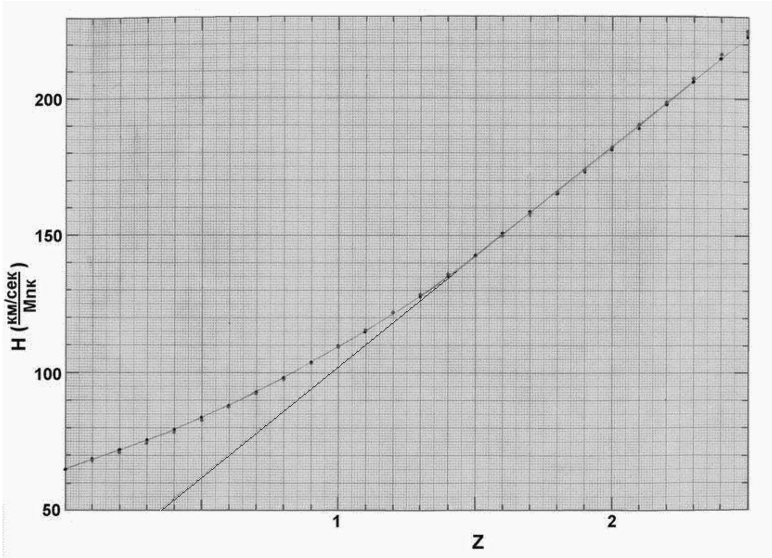

Рис. 2. Сглаженная наблюдаемая по программе zCOSMOS и теоретическая (при $H_0 = 65$ км/(с·Мпк), $\Omega_m = 0.263$ и $\Omega_v = 0.737$) зависимости скорости расширения Вселенной от красного смещения z. Расхождение теории с наблюдениями не более 1%

надежную оценку расстояния до объектов с $z > 2.4$. Например, до первых звезд (вероятно сверхновых) $z \sim 20$, $d_m = 12\,000$ Мпк, или до первых галактик $z \sim 8 \div 9$, $d_m \sim 10\,000$ Мпк. Однако для окончательного доказательства того, что Вселенная плоская, необходимо иметь подтверждение того, что теоретическая зависимость H_z от z (2) совпадает с наблюдаемой (1) также и в диапазоне $z > 2.5$. Если кривизна пространства все же имеется, то ее влияние на H_z может быть заметным при больших z (появится расхождение наблюдаемой кривой H_z от z с вычисленной).

Сравнивая теоретическую зависимость величины потока от сверхновой с величиной z, когда преобладает вещество, и такую же теоретическую зависимость, когда преобладает вакуум, с наблюдаемой зависимостью "поток – красное смещение", мы получили, что при $z > 1.4$ Вселенная расширялась с гораздо большим торможением чем при $z < 0.5$, когда уже стало сильно заметным ускорение, связанное с преобладанием вакуума. Доминирование энергии вакуума над энергией вещества началось при $z = 0.75$ (пересечение теоретических кривых на рис. 3).

Согласно теории, это произошло при

$$z = [2\Omega_v/\Omega_m]^{1/3} - 1 = 0.775,$$

что неплохо согласуется с наблюдениями.

Однако наиболее наглядное представление о том, как уменьшалась скорость расширения Вселенной с её возрастом (с уменьшением z) и как уменьшалась величина торможения, дает рис. 2. Из рисунка следует, что нынешняя скорость торможения – уменьшение скорости расширения на 4 км/(с·Мпк) при убывании z на каждые $\Delta z = 0.1$ – в два раза меньше той, что была при $z = 1.5$ – тогда она равнялась 8 км/(с·Мпк) при таком же уменьшении z. Начавшееся при $z = 1.4$ ускорение в расширении Вселенной постоянно уменьшает величину торможения. В будущем торможение будет уменьшаться до нуля, тогда скорость расширения достигнет постоянной величины при минимальном её значении. Это следует из уравнения (2), в котором Ω_m будет стремиться к нулю, а Ω_v – к единице. Из рисунка 2 видно также, что в будущем величина скорости расширения Вселенной будет постоянной и иметь значение около 40 км/(с·Мпк). Следует заметить что, согласно М. Г. Ларионову, теоретическое значение постоянной Хаббла в случае плоской Вселенной, вычисленное через физические константы,

$$H_0 = \hbar G m_e^3 c^4/(2\sqrt{2}e^6)$$

будет иметь значение 38.18 км/(с·Мпк). По видимому, это значение скорости расширения Вселенной и есть мировая константа Хаббла. Близкое значение этой константы, предсказываемое из наблюдений и вычисленное теоретически через физические константы, для случая плоской Вселенной, может рассматриваться как доказательство того, что Вселенная плоская.

Нельзя не обратить внимание на то, что, при использовании параметра z, здесь не говорится о времени, например, о нынешнем возрасте Вселенной, или о возрасте, когда энергия вакуума сравнялась с энергией массы. Парадокс заключается в том, что хаббловский возраст Вселенной H_0^{-1}, при наблюдаемом значении

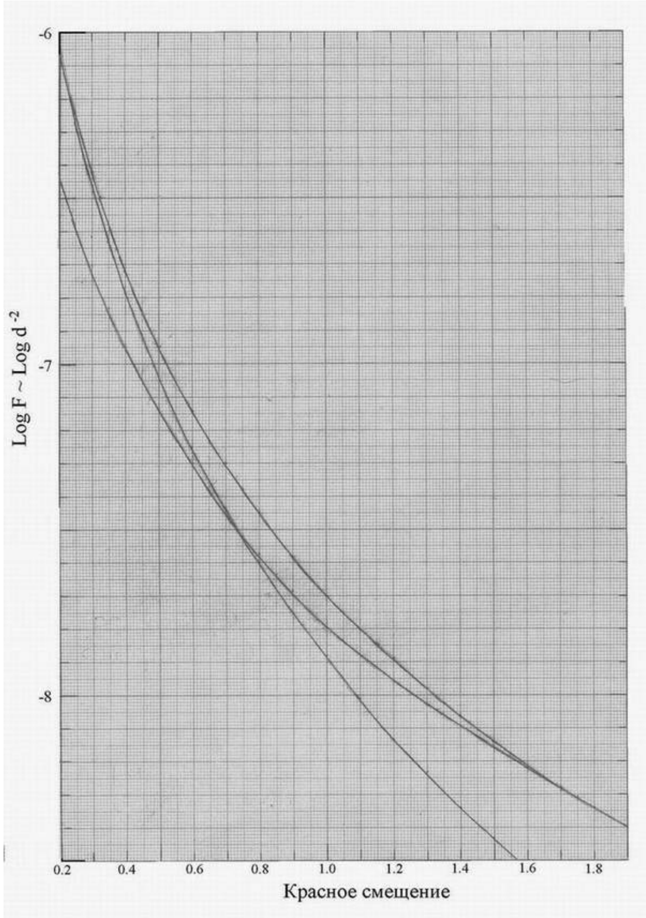

Рис. 3. Сопоставление наблюдаемой скорости падения потока от сверхновых с увеличением красного смещения (правая кривая) с двумя аналогичными теоретическими зависимостями, одна из которых вычислена для случая преобладания вещества (она совпадает с наблюдаемой кривой при больших z), другая – вычислена для случая преобладания вакуума (она совпадает с наблюдаемой кривой при малых z). Рисунок является косвенным доказательством того, что при больших красных смещениях Вселенная расширялась с торможением, а при малых – с ускорением. Точка пересечения теоретических кривых соответствует моменту $z = 0.75$, когда $\Omega_m = \Omega_v$

$H_0 = 65$ км/(с·Мпк), составляет 15 млрд лет, тогда как фотон испущенный галактикой, находящейся на расстоянии 10 000 Мпк ($z \sim 8$) – такие объекты уже наблюдаются – добирается к нам 30 млрд лет. Отсюда и хаббловский радиус $cH_0^{-1} = 4700$ Мпк в два раза меньше расстояния до первых галактик – 10 000 Мпк ($z \sim 8$). Очевидно, хаббловский возраст и хаббловский радиус не являются возрастом и горизонтом Вселенной, значения которых, по крайней мере, в три раза больше хаббловских. Если размер Вселенной характеризовать радиусом кривизны пространства R_c, который при малой кривизне должен составлять несколько хаббловских радиусов $R_c \geq (2-3)\cdot 10^{28}$ см (см. А. В. Засов, К. А. Постнов “Общая астрофизика”, 2006, стр. 429), то разногласие между малым хаббловским радиусом и большими расстояниями исчезнет. Однако возраст Вселенной 15.4 млрд лет, вытекающий из наблюдаемого значения $H_0 = 65$ км/(с·Мпк) или принимаемый сейчас возраст 13.7 млрд лет, вытекающий из значения $H_0 = 73$ км/(с·Мпк), не может быть меньше 40 млрд лет – столько времени находится в пути фотон, испущенный первыми звездами, возможно сверхновыми, находящимися на расстоянии $z \sim 20$ или на метрическом расстоянии $\mathrm{d}_m \approx 12\,000$ Мпк.

[1] *Astier P. A., Guy J., Regnault N., et al.* The Supernova Legasy Survey: measurement of Ω_m, Ω_v and w from the first year data set // Astron. and Astrophys. – 2006. – **447**. – P. 31–48.

[2] *Riess A. G., Strolger L., Tonry J., et al.* Type Ia Supernova Discoveries at $z > 1$ from the Hubble Space Telescope: Evidence for past deceleration and constraints on darc energy evolution // Astrophys. J. – 2004. – **607**. – P. 665–687.

[3] *Lilly S. and the zCOSMOS team* The zCOSMOS Readshift Survey // Messenger N 121, September 2005. – P. 42–45.