

## I. КОСМОЛОГИЧЕСКОЕ ЗАМЕДЛЕНИЕ НЕОБРАТИМОГО ВРЕМЕНИ

Противоречивой истории создания специальной теории относительности (СТО), признания общего Принципа относительности и постулата о постоянстве скорости света посвящена обширная литература, в которой, несомненно, выделяется книга<sup>1</sup> известного математика и философа Эдмунда Уиттекера – свидетеля и участника многих событий этой истории. Термин «специальная» был использован применительно к теории относительности много позже ее создания, вероятно, по инициативе Виллема де Ситтера для того чтобы подчеркнуть применение в ней общего Принципа относительности только для специального случая равномерного относительного движения систем отсчета.

На протяжении почти всего 19 столетия большинство физиков полагало, что свет распространяется в форме поперечных волн в особой субстанции – «светоносном эфире», невидимо заполняющем все мировое пространство. Среди многочисленных моделей этой таинственной субстанции особой популярностью пользовалась модель эфира, предложенная Огюстеном Френелем, в которой эфир лишь частично увлекался движущимся материальным телом. Однако знаменитые эксперименты Майкельсона-Морли (1887) не обнаружили «эфирного ветра» при движении Земли по орбите.

В этом же 1887 году первое возможное объяснение отрицательного результата экспериментов Майкельсона-Морли предложил немецкий физик Вольдемар Фойгт. Он вывел преобразования координат, не менявшие волновое уравнение и обеспечивавшие постоянство скорости света для всех инерциальных систем отсчета<sup>2</sup>. В преобразования Фойгта уже входил «Лорентц-фактор»  $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$  и новое определение времени  $t' = t - vx/c^2$ , которое впоследствии в СТО стали называть «локальным временем». После умножения правых частей преобразований Фойгта на Лорентц-фактор они превращаются в «преобразования Лорентца» современной СТО. Однако величина замедления времени в движущейся системе отсчета у Фойгта больше, чем в СТО. К сожалению, пионерская работа Вольдемара Фойгта с первым наброском теории относительности не была замечена его современниками.

Фундамент теории относительности был заложен работами двух ирландских физиков – Джорджа Фицджеральда и сэра Джозефа Лармора. В 1889 году в своей статье<sup>3</sup> Фицджеральд предположил, что результаты опытов Майкельсона-Морли, не обнаружившие движения Земли относительно неподвижного эфира, могут объясняться сокращением длин всех объектов в направлении движения. А в 1897 году Джозеф Лармор опубликовал первую теорию<sup>4</sup> «преобразований Лорентца» – за два года до Хендрика Лорентца и за восемь лет до Альберта Эйнштейна.

Принцип относительности в форме утверждения об эквивалентности инерциальных систем отсчета был выдвинут Анри Пуанкаре в 1895 году в двух статьях<sup>5</sup>, посвященных обсуждению работ Лармора по электромагнетизму. В своей статье «Измерение времени»<sup>6</sup> (1898) Пуанкаре уже сформулировал постулат постоянства скорости света, который, по его мнению, должен был определить будущую релятивистскую идеологию. В 1899 году в своих лекциях в Сорбонне Пуанкаре доказывал принципиальную невозможность наблюдения в

<sup>1</sup> Уиттекер Э. *История теории эфира и электричества. Современные теории 1900—1926*. Пер с англ. Москва, Ижевск: ИКИ, 2004. ISBN 5-93972-304-7.

<sup>2</sup> Voigt, W. On the Principle of Doppler // *Göttinger Nachrichten* (1887), 7; 41–51. Theorie des Lichts für bewegte Medien // *Göttinger Nachrichten* (1887), 8: 177–238.

<sup>3</sup> Fitzgerald, G.F. The ether and the earth's atmosphere // *Science* (1889) 13;390.

<sup>4</sup> Larmor, J. On a Dynamical Theory of the Electric and Luminiferous Medium, Part 3, Relations with material media // *Phil. Trans. of the Royal Soc. of London* (1897) 190; 205–300.

<sup>5</sup> Poincare, H. // *L'Eclairage Electrique* (1895) t.5, p.5.

<sup>6</sup> Poincare, H. // *Revue de Metaphysique et de Morale* (1898) t.6, p.1.

оптических опытах абсолютного движения в силу строгого выполнения принципа относительности для оптических явлений. Эту идею Пуанкаре обсуждал затем и в своем докладе<sup>7</sup> на Международном физическом конгрессе в Париже в 1900 году.

В 1899 году Лорентц завершил работу по выводу своих известных преобразований, получивших по предложению Пуанкаре название «группы Лорентца»<sup>8</sup>. Подробный анализ преобразований Лорентца провел в своей книге<sup>9</sup> «Эфир и материя» Джозеф Лармор в 1900 году, впервые получив, в частности, релятивистскую формулу сложения скоростей, и рассмотрев эффект замедления электромагнитных процессов в движущейся через эфир материальной системе.

Свои преобразования Лорентц использовал для описания электромагнитных явлений в инерциальных системах отсчета, равномерно движущихся относительно неподвижного эфира. При этом он считал сокращение длин всех объектов в направлении движения вполне реальными и объяснял их особым электромагнитным взаимодействием движущихся объектов с неподвижным эфиром. Вслед за Лорентцом много влиятельных физиков, в частности, – Оливер Хевисайд, Оливер Лодж, Джордж Фицджеральд и Джозеф Лармор в начале 20 века объясняли отрицательный результат экспериментов Майкельсона-Морли вполне реальным сжатием материи в направлении ее движения. Только Анри Пуанкаре начал рассматривать релятивистские эффекты как единый системный эффект кинематики движения, определявшийся общим Принципом относительности.

Дальнейшее развитие идеи определения времени на основе постулата о постоянстве скорости света было дано Пуанкаре в статье 1900 года «Теория Лоренца и принцип реакции»<sup>10</sup>. В этой работе впервые была дана физическая интерпретация введенного Лорентцем «местного» времени как времени, соответствующего показаниям часов, синхронизованных световым сигналом в предположении постоянства скорости света. Пуанкаре, в частности, показал, что для вывода преобразований Лоренца необходимо предположение об их линейности и постулат о постоянстве скорости света в инерциальных системах отсчета. В своем выступлении на Конгрессе искусств и науки в Сент-Луисе (1904) Пуанкаре так определил роль постулата о постоянстве скорости света:

«На основе всех этих результатов должна появиться новая динамика, которая помимо всего прочего характеризовалась бы правилом, что ничто не может иметь скорость, превышающую скорость света».

В своих проницательных статьях 1904/1905 годов<sup>11</sup> Пуанкаре показал, что преобразования Лорентца образуют группу в многообразии четырех измерений и нашел инварианты этой группы. В этих статьях была показана также плодотворность использования принципа наименьшего действия в четырехмерной формулировке. При разработке первого релятивистского описания скалярного поля тяготения, **Пуанкаре впервые ввел мнимую координату времени**. Эти идеи стали основой псевдоевклидовой геометрии пространства-времени, которую через несколько лет подробно разработал в своих статьях<sup>12</sup> Герман Минковский.

<sup>7</sup> Poincare, H. // Rapports du Congres de Physique Paris (1900), t.1, p.22.

<sup>8</sup> Lorentz, H.A. // Zittingsverlag, Acad. Wet. (1899) v.7, s.507 Amsterdam Proc., 1898-1899, p.427.

<sup>9</sup> Larmor, J.J. *Aether and Matter*. Cambridge, 1900.

<sup>10</sup> Poincare, H. // Archives Neerland (1900) v.5, p.252.

<sup>11</sup> Poincare, H. // Bull. des. Sci. Math. (1904) ser.2 v.28 p.302; The Monist of January (1905) v.15, p.1. Перевод см, например: *Принцип относительности* – М, 1973; с.27.

<sup>12</sup> Minkowski, H. a) // Доклад Математическому обществу в Геттингене 5 ноября 1907 г. b) // Gott. Nachr. (1908) s.53 c) // Phys. Zs. (1909) v.10, s.104; d) // Math. Ann. (1910) v.68, p.472. e) // Annalen der Physik (1915) b.47, p. 927. Перевод см., например: *Принцип относительности* – М, 1973; с.167.

Известная статья Альберта Эйнштейна 1905 года<sup>13</sup>, посвященная теории относительности, хотя и не содержала никаких новых формул, но, зато демонстрировала, что в теории относительности можно отказаться от концепции неподвижного эфира и вместо этого рассматривать все инерциальные системы как равноправные (см. [41]). Эта статья впервые показала возможность аксиоматического построения теории относительности на основе двух исходных предположений уже рассмотренных ранее Пуанкаре – Принципа относительности и постулата о независимости скорости распространения света от движения его источника.

Принцип относительности в формулировке Эйнштейна был воспринят научным сообществом без возражений, поскольку имел многовековую предысторию. Еще в 14 столетии в своих трактатах Николай Орем рассматривал мысленный эксперимент с наблюдением движения в каюте идущего корабля, демонстрирующий относительность механического движения. Эта притча Николая Орема была широко известна и преподавалась во многих университетах Европы. Впоследствии кардинал Николай Кузанский (1401–1464) в своей книге «Об ученом невежестве» (*De docta ignorantia*) впервые рассмотрел также космологическую трактовку принципа относительности:

«Наша Земля в действительности движется, хоть мы этого не замечаем, воспринимая движение только в сопоставлении с чем-то неподвижным... Каждому, будь он на Земле, на Солнце или на другой звезде, всегда будет казаться, что он как бы в неподвижном центре, а все остальное движется».

После подробного обсуждения Галилеем в своем трактате «Диалоги о двух главнейших системах мира – птолемеевой и коперниковой» (1632) исторической притчи о наблюдении различных форм движения в каюте равномерно идущего корабля, принцип относительности стал основой разработки кинематики механического движения.

В отличие от Принципа относительности второй постулат Пуанкаре-Эйнштейна о независимости скорости света от скорости его источника вызвал возражения многих физиков и математиков. Большинство критиков этого постулата указывали, что его буквальное понимание соответствует утверждению:

$$\bar{c} + \bar{V} = \bar{c} \quad \text{при } \bar{V} \neq 0 \quad (1.1)$$

Такое утверждение, по мнению критиков СТО, не только противоречило «здравому смыслу», но и не соответствовало известным в то время аксиоматическим основаниям геометрии. Несколько влиятельных физиков (например, *W. Ritz* 1908, *R. Tolman* 1910, *D. Comstock* 1910) подняли вопрос о возможности, отказавшись от постулата о постоянстве скорости света и сохраняя только Принцип относительности, построить новую теорию, согласующуюся с известными наблюдениями.

Смысл постулата Пуанкаре-Эйнштейна несколько прояснили работы Минковского, посвященные геометрической интерпретации теории относительности. В своих работах Минковский не раз подчеркивал, что скорость света в теории относительности нигде не используется как вектор, а играет роль постоянного размерного параметра в преобразованиях Лоренца и в определении инвариантного интервала пространства-времени.

В сентябре 1910 года на общем заседании математического и физического отделения 82-го собрания немецких натуралистов и врачей в Кёнигсберге русский физик Владимир Игнатовский сделал доклад «Некоторые общие замечания к принципу относительности»<sup>14</sup>, в

<sup>13</sup> Einstein, A. // *Annalen der Physik* (1905) b.17, s. 891. Эйнштейн А. *Собрание научных трудов*. М., Наука, 1965, т. 1, с. 7.

<sup>14</sup> W. von Ignatowsky. Einige allgemeine Bemerkungen zum Relativitätsprinzip // *Verh. d. Deutsch. Phys. Ges.* (1910) 12: 788–796. (Перевод см. – <http://synset.com>).

котором продемонстрировал возможность аксиоматического построения теории относительности с использованием только следующих предположений:

1. Принципа относительности.

2. Предположения о линейности преобразований координат при переходе между инерциальными системами отсчета.

3. Предположения об изотропии пространства.

При таком подходе постулат Пуанкаре-Эйнштейна о независимости скорости света от движения его источника не использовался как исходное предположение, а релятивистское правило сложения скоростей становилось одним из результатов аксиоматической теории относительности. Утверждение о том, что объект, движущийся со скоростью света в одной системе отсчета, будет двигаться с такой же скоростью и в любой другой системе отсчета потеряло статус постулата, превратившись в доказанную теорему аксиоматической теории относительности Игнатовского.

Аксиоматический метод Игнатовского получил развитие в следующем 1911 году в статье Филиппа Франка и Германа Роте «О преобразовании пространственно-временных координат из неподвижных систем в движущиеся»<sup>15</sup>. В этой работе было показано, что наиболее общими преобразованиями координат при переходе между двумя инерциальными системами отсчета являются дробно-линейные функции, в которые может входить несколько параметров.

Принцип относительности вводит в функции преобразований два параметра с размерностью скорости – скорость относительного движения инерциальных систем отсчета и скорость распространения сигналов при согласовании значений координат рассматриваемых систем отсчета. Если принимается еще и аксиома изотропии пространства, то общие преобразования превращаются в преобразования Лорентца.

Для учета анизотропии пространства в общие преобразования необходимо ввести еще один безразмерный параметр. При использовании предположения об абсолютности времени и, соответственно, абсолютности понятия «одновременности» событий, преобразования Лорентца переходят в преобразования Галилея классической механики.

На протяжении 20 столетия метод аксиоматического построения теории относительности без использования постулата Пуанкаре-Эйнштейна о постоянстве скорости света, идеи которого впервые разработали в начале столетия Владимир Игнатовский, Филипп Франк и Герман Роте, неоднократно переоткрывался и обсуждался (например, Я.П. Терлецкий 1965; *N.D. A.R. Lee, T.M. Kalotas* 1975; *Mermin* 1986; *Achin Sen* 1994; *S. Nishikawa* 1997). Подробному обзору истории и современным проблемам аксиоматического построения теории относительности посвящены, например, статья А.К. Гуца<sup>16</sup> и книга С.С. Степанова<sup>17</sup>.

Преобразования Галилея и преобразования Лорентца являются частными видами группы проективных преобразований, при этом и количество и тип параметров, которые входят в эти преобразования, определяется дополнительными предположениями. Определяющим для аксиоматики СТО является Принцип относительности, утверждающий равноправие инерциальных систем отсчета. При этом параметр с размерностью скорости в преобразованиях Лорентца появляется как следствие того или иного определения эквивалентности инерциальных систем отсчета. Изначально этот параметр никак не связан с волнами электромагнитного излучения или потоками фотонов. Для того чтобы утверждать, что этот параметр определяется фундаментальной константой – скоростью света, необходимо использовать дополнительные предположения.

Развитие квантовой физики показало, что универсальное постоянство константы скорости света в микромире может рассматриваться как следствие квантовых уравнений Планка и де

<sup>15</sup> Philipp Frank und Hermann Rothe. Über die Transformation der Raumzeitkoordinaten von ruhenden auf bewegte Systeme // *Ann. der Physik* (1911) Ser. 4, Vol. 34, No. 5; 825–855. (Перевод – <http://synset.com>).

<sup>16</sup> Гуц А.К. Аксиоматическая теория относительности // *УМН* (1982) 37:2(224); 39—79.

<sup>17</sup> Степанов С.С. Релятивистский мир (2012) // <http://synset.com>

Бройля для фотонов. Квантовая идеология позволяет обосновать релятивистский Принцип постоянства скорости света в микромире и космологии наиболее последовательно и просто.

Ключевую роль в анализе играет предположение о том, что во вселенной с нестационарной метрикой пространства-времени, когда длина волны фотона изменяется:  $\lambda = \lambda_0 a(t)$ , импульс и энергия фотона в микромире определяются уравнениями де Бройля и Планка. В этом случае локальная скорость света в микромире не зависит от длины волны фотона при любом характере изменения масштабного фактора  $a(t)$ .

Для того чтобы это показать рассмотрим соотношение Максвелла для импульса фотона  $p = E/c$ , которое может быть преобразовано с помощью уравнения Планка  $E = h\omega$  и уравнения де Бройля  $p = hk = h/\lambda$  к виду:  $\omega = ck = c/\lambda$ . Это соотношение инвариантно относительно одновременного преобразования частоты и длины волны при изменении масштабного фактора:  $c = \omega\lambda = \omega_0/a \cdot \lambda_0 a$ . Поэтому **скорость света в микромире вследствие строгой пропорциональности периода и длины волны фотона неизменна и постоянна при любом характере зависимости космологического масштабного фактора от времени.**

Анализ аксиоматической СТО методами теории групп показывает, что определяющие теорию относительности преобразования Лорентца могут быть получены на основе сокращения набора аксиом классической механики. Это свидетельствует о логической непротиворечивости СТО, а возможность предельного перехода СТО и релятивистской механики при  $c \rightarrow \infty$  к менее общей классической механике является иллюстрацией общего методологического «Принципа соответствия».

Специальная теория относительности стала основой многих разделов современной физики. Особое значение она имеет в физике высоких энергий, ядерной физике, спектроскопии, астрофизике, электродинамике и других областях физики, изучающих процессы взаимопревращений и движения микрочастиц с околосветовыми скоростями.

Особенностью многих применений СТО является рассмотрение двух видов систем отсчета – неподвижных макроскопических приборов наблюдателя и движущихся с околосветовыми скоростями систем отсчета, связанных с квантовыми объектами – отдельными микрочастицами или потоками частиц. Разная физическая природа сравниваемых систем отсчета приводит к необходимости анализа некоторых новых логических и математических проблем в интерпретации общего Принципа относительности движения.

Во-первых, во всех методах вывода формул теории относительности, не исключая и аксиоматический, всегда делается предположение о том, что функции преобразования координат между инерциальными системами отсчета являются непрерывными, дифференцируемыми и однозначными. И если это предположение не вызывает сомнений при рассмотрении макроскопических систем отсчета, то оно заслуживает особого анализа при использовании систем отсчета, связанных с квантовыми объектами.

Во-вторых, при использовании кинематического Принципа относительности движения предполагается, что измерения, проведенные в различных системах отсчета можно сравнивать, для чего необходимо согласование единиц измерения и, соответственно, существование общих эталонов базовых единиц. В первую очередь это касается обеспечения соизмеримости длин, и возможности согласования процедур измерения интервалов времени. При обеспечении соизмеримости физических характеристик в сравниваемых макроскопических и квантовых системах отсчета возникает ряд новых явлений, которые не отражены в существующей специальной теории относительности.

В методологии естествознания кроме общего Принципа относительности большое значение имеет **Принцип относительности измерений**. Все физические характеристики являются относительными, поскольку их численные значения зависят от методологии измерения и использованных эталонов. Относительность физических величин подчеркивается их размерностями, в которых по особым правилам указываются использованные при

измерении базовые единицы той или иной системы размерностей, имеющие общепризнанные эталоны.

**Принцип относительности измерений соответствует утверждению о том, что существо законов природы не зависит от эталонов, применяемых при измерении физических характеристик, которые определяются этими законами.**

Размерная физическая величина, например некоторая длина, определяется ее числовым значением  $r$  и размерностью  $[L]$ , которые устанавливает соотношение:

$$r[L] = R/L_0 \quad (1.2)$$

Здесь  $R$  это абсолютная длина в выбранной системе отсчета, а  $L_0$  это эталон длины, использованный при измерении  $R$  в этой же системе отсчета.

Изменение эталона может быть представлено с помощью безразмерного масштабного фактора  $a_i$  так, что новый эталон определяется соотношением:

$$L_i = a_i L_0 \quad (1.3)$$

**Следствием Принципа относительности измерений является неизменность отношения двух абсолютных значений физических величин при изменении эталонов, используемых при измерениях.**

Например, для рассматриваемого частного случая измерения длины при введении масштабного фактора  $a$  мы будем иметь:

$$r_1[L] : r_2[L] = (R_1/L_0) : (R_2/L_0) = (R_1/aL_0) : (R_2/aL_0) = R_1 : R_2 = const \quad (1.4)$$

Принцип относительности измерений однозначно определяет функциональную структуру размерностей физических величин  $[\Phi]$  в форме **степенных одночленов** базовых, первичных размерностей, например, фундаментальной триады  $L, M, T$  – «пространство  $L$  – масса  $M$  – время  $T$ »:  $[\Phi] = L^a M^b T^c$ . С подробным выводом этой формулы размерностей можно познакомиться, например, на стр. 19–21 в книге<sup>18</sup>.

Следствием Принципа относительности измерений и соотношений (1.3, 1.4) является предполагаемая неизменность значений масштабных факторов  $a_i$  при изменении природы используемых эталонов базовых единиц. Например, в формулировках релятивистского принципа постоянства скорости света никак не ограничиваются способы измерения скорости света. Предполагается, в частности, что любая скорость (в том числе и скорость света) может быть измерена, как с помощью конечных макроскопических интервалов длины и времени:  $r, t$ , так и с помощью микроскопических, квантовых характеристик, например, с помощью стандартных длин волн и периодов фотонов  $\lambda, \delta\tau$ :

$$dr/dt = (P_1 \cdot r)/(N_1 \cdot t) = (P_2 \cdot \lambda)/(N_2 \cdot \delta\tau) \leq c \quad (1.5)$$

**Убеждение в независимости эталонных значений базовых единиц от природы используемых эталонов нашло воплощение в современной метрологии, оправдывая применение квантовых устройств в качестве эталонов макроскопических «метра» и «секунды».**

<sup>18</sup> Седов Л.И. *Методы подобия и размерностей в механике*. Изд. 10-е. М.: Наука, 1987.

При независимости значений базовых единиц от природы используемых эталонов для выбранных масштабов  $R_0, \lambda_0$  справедливо следующее соотношение для масштабного фактора:

$$a = r/R_0 = \lambda/\lambda_0 \quad (1.6)$$

Феномен космологического красного смещения, является связующим звеном между космологией и квантовой физикой микромира. Обработывая результаты своих наблюдений галактик в 1920-х годах, Вест Слайфер, Кнут Лундмарк, Эдвин Хаббл и Мильтон Хьюмасон применяли для расчета красных смещений ту же формулу, что и современные астрономы:

$$z = (\lambda_p - \lambda_0)/\lambda_0 \quad (1.7)$$

Здесь  $\lambda_0$  это длина волны лабораторного эталона, соответствующего наблюдаемой астрономами спектральной линии  $\lambda_p$ .

В 1929 году Эдвин Хаббл опубликовал свой анализ наблюдений спектров галактик, который свидетельствовал о линейной зависимости красных смещений  $z$  в спектрах от расстояний  $r$  до наблюдавшихся галактик:

$$cz = c(\lambda_p - \lambda_0)/\lambda_0 = Hr \quad (1.8)$$

Соотношение (1.8), которое называют «законом Хаббла», имеет необычную форму – в его левой части находится функция длин волн фотонов, то есть микроскопических квантовых характеристик, а в правой части находится макроскопическая космологическая характеристика – расстояние от земных наблюдателей до весьма далеких космических объектов. Разница в значениях параметров в левой и правой частях закона Хаббла достигает нескольких десятков порядков!

При содержательной интерпретации закона Хаббла возможны два подхода:

1. После преобразования левой части (1.8) с помощью макроскопических кинематических характеристик интерпретировать полученное соотношение как определяющее уравнение космологии.

2. Использовать квантовую кинематику для интерпретации и преобразования соотношения (1.8).

В первой трети 20 столетия, когда квантовая физика еще только начинала развиваться, теоретики избрали первый путь и вслед за Жоржем Леметром [52] стали рассматривать закон Хаббла как подтверждение предсказанного общей теорией относительности «расширения» пространства вселенной. Леметр пользовался в своем анализе не длинами волн фотонов, а их периодами  $\delta t$  и провел следующее преобразование формулы для красного смещения:

$$z = (\delta t_p - \delta t_r)/\delta t_r = [a(t_p) - a(t_r)]/a(t_r) \simeq da/a = \dot{a}/a dt \quad (1.9)$$

Здесь индекс  $r$  отмечает момент эмиссии излучения космическим объектом, а индекс  $p$  момент приема и анализа астрономами спектра излучения этого объекта. Для расширяющейся вселенной при  $t_p \geq t_r$  справедливо  $a(t_p) \geq a(t_r)$  и смещение в спектрах является «красным», то есть спектральные линии смещаются в сторону длинноволновой части спектра.

Соотношения (1.9) и приводят к линейной зависимости красного смещения от расстояния до излучающего объекта в предположении, что можно принять для относительно небольших расстояний  $dt \simeq r/c$ :

$$cz \simeq \dot{a}/a \cdot r = H(t) \cdot r \quad (1.10)$$

Из рассуждений Леметра видно, что (1.10) рассматривалось им как приближенное соотношение с коэффициентом («фактором Хаббла»), зависящим от времени. Сходство формулы (1.10) с соотношением для эффекта Допплера и дало в свое время Леметру повод называть эффект Хаббла «кажущимся эффектом Допплера», сравнивая красное смещение с характеристиками излучения движущихся объектов. Эта аналогия основана на том, что наблюдаемые проявления нестационарности метрики пространства-времени во вселенной формально могут наглядно иллюстрироваться формулой эффекта Допплера:  $z = (\omega_p - \omega)/\omega = V/c$ . Подстановка определенной этим соотношением кажущейся, «эффективной» скорости «расширения» пространства вселенной:  $V_{\text{exp}} = cz$  в (1.10) приводит к формуле:

$$V_{\text{exp}} = \dot{a}/a \cdot r = H(t) \cdot r \quad (1.11)$$

В соотношениях (1.10, 1.11) параметр Хаббла зависит от времени. Только предположение о том, что для небольших изменений масштабного фактора и, соответственно, небольших величин красных смещений, можно использовать современное значение фактора Хаббла:  $H_p = \dot{a}(t_p)/a(t_p)$  превращает (1.11) в приближенное соотношение:

$$cz = H_p r \quad \text{или} \quad z = H_p t \quad \text{при} \quad t = r/c \quad (1.12)$$

Рассмотрим теперь не использованную классической космологией квантовую интерпретацию закона Хаббла, применив Принцип относительности измерений. Масштабный фактор, определенный соотношением (1.6), позволяет получить для красного смещения  $z = \lambda/\lambda_0 - 1$  формулу, которую иногда называют «формулой Леметра» (см., например [10, 13, 56, 61]):

$$a = r/R_0 = \lambda/\lambda_0 = 1 + z \quad (1.13)$$

В этой формуле  $\lambda_0$  это длина волны фотона в момент излучения его космическим объектом в начале его долгого пути к приборам земных наблюдателей. В силу предполагаемой неизменности законов излучения во вселенной эта длина волны должна совпадать с длиной волны лабораторного эталона, которым пользуются земные наблюдатели.

При анализе феномена красного смещения следует принять во внимание, что разница между замедляющимся физическим временем и ньютоновским временем заметна только для больших космологических интервалов времени. В микромире, в силу соотношения неопределенностей разница между интервалами физического и ньютоновского времени пренебрежимо мала:  $\delta\tau \simeq \delta t$  даже для процессов с большими энергиями. Поэтому при оценке скорости движения фотона в микромире можно использовать как ньютоновское, так и физическое время:  $c = dr/d\tau \simeq dr/dt$ .

Из формулы (1.6) следует:  $r = R_0 \lambda / \lambda_0$ . Подставив это соотношение в уравнение движения фотона  $dr/d\tau \approx dr/dt = c$ , можно представить это уравнение в форме:

$$d\lambda/dt = \lambda_0 c / R_0 \quad (1.14)$$

Решением этого уравнения для начальных условий  $t = 0: \lambda = \lambda_0$  является соотношение:

$$\lambda = \lambda_0(1 + c/R_0 \cdot t) = \lambda_0(1 + Ht) \quad (1.15)$$

Параметры  $H, R_0$  в космологии обычно называют соответственно «постоянной» и «радиусом» Хаббла. Применив к соотношению (1.15) определение красного смещения  $z = \lambda/\lambda_0 - 1$  мы получим стандартную форму закона Хаббла:

$$z = Ht \quad (1.16)$$

Применив к соотношению (1.15) формулу Леметра (1.13), можно получить соотношение для масштабного фактора:

$$a(t) = 1 + Ht \quad (1.17)$$

Соотношения (1.15–1.17), соответствующие закону Хаббла для ньютоновского времени могут быть получены не только для фотонов, но и для микрочастиц с ненулевой массой. Анализ уравнений де Бройля и Планка, определяющих движение частиц с конечной массой, приводит вследствие Принципа относительности измерений к линейному дифференциальному уравнению первого порядка для масштабного фактора и красного смещения, имеющему решение вида (1.15–1.17) (Таганов 2008 [35, 70]).

**Таким образом, при использовании ньютоновского времени уравнение Хаббла в соответствии с Принципом относительности измерений является одной из форм макроскопического описания равномерного движения микрочастиц, для которых действителен принцип неопределенности Гейзенберга, а их квантовые характеристики определяются уравнениями Планка и де Бройля .**

В классической космологии применяется абсолютное время Ньютона, которое используется как непрерывно изменяющийся математический параметр с неизменной и равномерной шкалой. Для того чтобы ввести «физическое» время следует использовать реальный квантовый физический процесс, который применяется в космологии для определения расстояний – движение фотона.

В соответствии с (1.15) космологическое возрастание начальной длины волны фотона  $\lambda_0$  определяется соотношением:  $\lambda = \lambda_0(1 + Ht)$ , которое при использовании периода фотона  $\delta t_0 = \lambda_0/c$  имеет вид:  $\lambda = (1 + Ht) \cdot c \delta t_0$ . При измерении больших космологических расстояний в этом уравнении можно принять:  $\lambda \simeq dr; \delta t_0 \simeq dt$  и тогда  $dr = (1 + Ht) \cdot c dt$ . Для конечных расстояний, которые можно представить в форме:  $r = c\tau$  интегрирование этого уравнения

дает:  $r = c\tau = c \int_0^t (1 + Ht') dt'$  и, соответственно:

$$\tau = \int_0^t (1 + Ht') dt' = t + H/2 \cdot t^2 \quad (1.18)$$

Это соотношение определяет связь необратимого, замедляющего свой ход физического времени  $\tau$ , и обратимого ньютоновского времени  $t$  с равномерной и неизменной шкалой, когда для определения космологических интервалов времени и расстояний в соответствии с Принципом постоянства скорости света и Принципом относительности измерений используется движение квантовых частиц.

Подобно тому, как применение Принципа относительности движения вводит в кинематику фундаментальную константу скорости света, применение Принципа относительности измерений, который определяет группу преобразований подобия для эталонов систем отсчета, вводит в кинематику еще одну фундаментальную константу – постоянную Хаббла.

Феномен космологического замедления необратимого физического времени вполне соответствует общей кинематической концепции замедления времени. В СТО замедление времени определяется преобразованием Лорентца для двух инерциальных систем отсчета. В более общем случае относительного движения замедление времени определяется преобразованием, учитывающим также относительное ускорение систем отсчета. При использовании принципа эквивалентности инерционной и гравитирующей массы замедление времени определяется разностью гравитационных потенциалов в сравниваемых системах отсчета. **Феномен космологического замедления времени обнаруживается при сравнении систем отсчета разного масштаба – микроскопической с квантовой кинематикой и макроскопической, применяемой в космологии.**

Закон Хаббла (1.8):  $cz = c(\lambda_p - \lambda_0)/\lambda_0 = Hr$  можно рассматривать как преобразование пространственной координаты луча зрения  $r$  от микроскопической квантовой системы отсчета к макроскопической системе отсчета. При этом в полных преобразованиях систем координат помимо преобразования пространственных координат должно быть определено и соответствующее преобразование времени.

Квантовая кинематика, применяя ньютоновское время, на основе уравнений Планка и де Бройля устанавливает пропорциональность длины волны  $\lambda$  и соответствующего периода  $\delta t$  фотона:  $\lambda = c\delta t$ . Сравнение систем отсчета с масштабами, отличающимися на десятки порядков, позволяет использовать соотношения:  $\lambda \simeq dr$ ;  $\delta t \simeq dt$ . При этих условиях для микроскопической системы отсчета пропорциональность длины волны и периода:  $dr = cdt$  приводит к соотношению:  $r = ct$ .

Рассмотренные соотношения квантовой кинематики в микроскопической системе отсчета позволяют представить закон Хаббла в форме уравнения:

$$dr/dt = c(1 + Ht) \quad (1.19)$$

Для устранения противоречия (1.19) с Принципом постоянства скорости света в макроскопических системах отсчета:  $dr/d\tau = c$  следует подставить это условие в (1.19), что преобразует его в уравнение:

$$d\tau/dt = 1 + Ht \quad (1.20)$$

Интегрирование этого уравнения при начальном условии  $t=0: \tau=0$  вновь приводит к (1.18):  $\tau = t + H/2 \cdot t^2$ . Это соотношение дополняет закон Хаббла, определяя соответствующее этому закону преобразование времени, при сравнении микроскопических квантовых систем отсчета с макроскопическими.

## 1.1 Космология с замедляющимся временем (КЗВ)

Математические формулировки космологических моделей можно получить разными способами. Но все они должны быть основаны на согласовании методологии описания крупномасштабной структуры вселенной и квантовой физики фотонов, которая определяет законы электромагнитного излучения, доставляющего наблюдателям информацию о космических объектах. Большинство же предложенных до сих пор космологических моделей никак не используют квантовую физику, а также хотя и декларируют постоянство скорости света, но в действительности не имеют никакой четкой формулировки этого релятивистского принципа в составе своих определяющих соотношений.

В качестве методологической основы согласования способов описания крупномасштабной структуры вселенной и квантовой физики фотонов, в космологии с замедляющимся необратимым временем используются следствия квантовых уравнений Планка и де Бройля, а также релятивистский Принцип постоянства скорости света, включенные в явной форме в космологическую модель. **Такой подход оправдывает возможность рассматривать космологию с замедляющимся необратимым временем как основу релятивистской квантовой космологии** (Таганов 2008 [35, 70]).

Эмпирический закон Хаббла, часто трактуемый в космологии как подтверждение того, что пространство вселенной «расширяется» и что наблюдаемые скорости «разбегающихся» галактик увеличиваются по мере их удаления от наблюдателя, может и не быть свидетельством существования таинственной «сингулярности» при  $t=0$ , когда вся материя вселенной, заключенная в этой особой области с чудовищной плотностью, внезапно получила свободу в процессе Большого Взрыва.

В теоретической физике и, в частности, в космологии без каких-либо обсуждений предполагается полная эквивалентность абсолютного пространства  $r$  с идеализированным ньютоновским временем  $t$  и «физических» пространства  $l$  и времени  $\tau$ , о свойствах которых мы судим, анализируя наши наблюдения природы. Но в этом можно усомниться, в частности, потому, что и в квантовой физике микромира и в космологии применяется абсолютное ньютоновское время, которое является обратимым, что противоречит всему опыту естествознания.

Достаточно общая математическая модель необратимого «физического» времени  $\tau$ , которое характеризуется условием:  $\tau(-t) \neq \tau(+t)$  может быть представлена в виде:

$$\tau = a(\tau) \cdot t \quad \lim_{\tau \rightarrow 0} a(\tau) = 1 \quad a(+\tau) \neq a(-\tau) \quad (1.21)$$

Это соотношение при условии постоянства скорости света определяет метрическую неоднородность физического пространства-времени. Применяя соотношения:  $l = c\tau; r = ct$ , после деления обеих частей (1.21) на скорость света мы получим:

$$l = a(\tau) \cdot r = a(l/c) \cdot r \quad \lim_{l \rightarrow 0} a(l/c) = 1 \quad (1.22)$$

Как следует из этого соотношения, в метрически неоднородном пространстве длина отрезка зависит не только от координат его начала и конца, но и от размера самого отрезка. Один из вариантов такого метрически неоднородного пространства<sup>19</sup> использовал Герман Вейль, а Владимир Фок в 1950-е годы применял для анализа космологической модели Фридмана геометрию особого «пространства Фридмана-Лобачевского» с изменяющимся масштабом интервала [38]:  $ds^2 = H^2(S) \cdot (c^2 dt^2 - dr^2); S = \sqrt{c^2 t^2 - r^2}$ .

<sup>19</sup> Weil, H. // Sitzungsber. d. Berl. Acad. (1918) s. 465.

Используя дифференциал соотношения (1.22):  $dl = a(\tau) \cdot dr$  для формирования интервала:  $ds^2 = c^2 d\tau^2 - dl^2$  в метрически неоднородном пространстве-времени, мы получим соотношение, формально полностью совпадающее с интервалом, применяемым в космологии для сферически симметричной пространственно-плоской «расширяющейся» вселенной (см., например, [10, 13, 56, 61]), но с другим – необратимым физическим временем:

$$ds^2 = c^2 d\tau^2 - a^2(\tau) \cdot dr^2 \quad (1.23)$$

Таким образом, анализ модели метрически неоднородного физического пространства-времени с необратимым временем приводит к соотношению (1.23), совпадающему с метрическим формализмом классической космологии «расширяющейся» вселенной. Но это уже не кинематическое расширение, а своеобразное «расширение без движения», отражающее особенности необратимого времени и метрически неоднородного физического пространства.

В таком «неподвижном», но неоднородном пространстве-времени, нет особых выделенных точек и «начальных» моментов времени, а тем самым и нет никаких оснований для гипотезы о Большом Взрыве. Что же касается выражения «расширение пространства вселенной», то его следует воспринимать как метафору, возникшую при исторически первой трактовке космологического красного смещения как «кажущегося эффекта Доплера».

Как было замечено уже в 1930-е годы (см., например, [17, 36]), нестационарная метрика с интервалом вида (1.23) не обеспечивает постоянства скорости света – для траектории фотона ( $ds = 0$ ) из (1.23) следует его переменная скорость:  $dr/d\tau = c/a(\tau) \neq const$ . Применение нестационарных метрик с интервалом вида (1.23) в космологических моделях приводит к противоречию с релятивистской физикой фотонов, утверждающей универсальное постоянство величины скорости света в пустоте. Поэтому необходимо сразу ввести в космологическую модель Принцип постоянства скорости света в явном виде.

Уравнение для скорости фотона:  $dr/d\tau = c/a(\tau) \neq const$ , которое следует из (1.23), можно преобразовать с помощью определения масштабного фактора (1.6):  $a(\tau) = r(\tau)/R_0$  к виду:  $dr/d\tau = cR_0/r$ . При этом условие постоянства скорости фотона имеет вид:  $r \cdot dr/d\tau = cR_0 = const$ . Интегрирование этого уравнения приводит к соотношению:

$$r^2 = 2R_0 c \tau + B (= const) \quad (1.24)$$

Решение (1.24) для начальных условий  $\tau = 0: r = 0$  соответствует  $B = 0$  и имеет вид:

$$r^2 \propto \tau \quad (1.25)$$

С помощью определения масштабного фактора  $a(\tau) = r(\tau)/R_0$  из (1.24) можно получить следующее соотношение:

$$a(\tau) = r(\tau)/R_0 = (2c/R_0 \cdot \tau + B/R_0^2)^{1/2} \quad (1.26)$$

Нестационарная метрика с интервалом (1.23) может рассматриваться как конформное преобразование метрики Минковского, обеспечивающей постоянство скорости света при использовании ньютоновского времени, с интервалом (см., например, [25, 38]):

$$ds^2 = c^2 dt^2 - dr^2 \quad (1.27)$$

При этом интервал (1.23) может быть представлен в виде:

$$ds^2 = a^2(c^2 dt^2 - dr^2). \quad (1.28)$$

Условием такого конформного преобразования является соотношение:  $d\tau^2 = a^2 dt^2$ , которое определяет дифференциальное уравнение связи физического и ньютоновского времени:

$$d\tau/dt = a \quad (1.29)$$

Подставив в это уравнение соотношение (1.26), мы получим:

$$d\tau/dt = (2c/R_0 \cdot \tau + B/R_0^2)^{1/2} \quad (1.30)$$

Решение этого уравнения при начальных условиях  $t = 0 : \tau = 0$  имеет вид:

$$\tau = t + c/R_0 \cdot t^2/2 \quad (1.31)$$

Для того чтобы определить константу  $R_0$  вычислим масштабный фактор  $a(t)$  из уравнения (1.29), подставив в него решение (1.31):

$$a(t) = 1 + c/R_0 \cdot t \quad (1.32)$$

Из сравнения этого соотношения с формулой Леметра (1.13) и законом Хаббла:  $z = Ht$  следует:  $c/R_0 = H$ . Таким образом, алгебраические уравнения связи физического и ньютоновского времени в соответствии с (1.31) совпадают с (17, 18):

$$\tau = t + Ht^2/2 \quad (1.33)$$

$$t = H^{-1}[(1 + 2H\tau)^{1/2} - 1] \quad (1.34)$$

**В космологии с замедляющимся временем параметр Хаббла используется не как переменный, зависящий от времени фактор классической космологии, а как фундаментальная константа, отражающая степень метрической неоднородности и нестационарности пространства-времени.**

Уравнение (1.33) с помощью закона Хаббла:  $z = Ht$  можно преобразовать к виду:

$$(\tau - t)/t = Ht/2 = z/2 \quad (1.35)$$

Это соотношение показывает, что одной из интерпретаций космологического красного смещения является **удвоенная относительная разность физического и ньютоновского возраста фотона**. Эта характеристика отдельных, индивидуальных фотонов никак не зависит от распределения материи в пространстве вселенной. Поэтому закон Хаббла с одинаковой точностью регистрируется астрофизиками и в ближайших окрестностях Млечного Пути с очень неоднородным распределением галактик и в дальнем космосе, где распределение материи может считаться более однородным.

Если подставить (1.34) в закон Хаббла в форме:  $z = Ht$ , то мы получим закон Хаббла для физического времени:

$$z = (1 + 2H\tau)^{1/2} - 1 \quad (1.36)$$

При  $r = c\tau$  из этого соотношения следует определение метрического расстояния в КЗВ:

$$r = c/2H \cdot [(1 + z)^2 - 1] \quad (1.37)$$

Сравнение соотношения (1.36) с формулой Леметра (1.13) приводит к уравнению космологической модели КЗВ в алгебраической форме:

$$a(\tau) = 1 + z = (1 + 2H\tau)^{1/2} \quad (1.38)$$

Уравнения (1.29, 1.30, 1.33) демонстрируют прогрессивное увеличение интервалов необратимого физического времени  $\tau$  по сравнению с постоянными интервалами неизменной шкалы обратимого ньютоновского времени  $t$ , то есть своеобразное «расширение» физического времени. Термин «расширение пространства» в наше время часто используется в космологии. Однако вместо несколько косноязычного словосочетания «расширение времени» представляется целесообразным пользоваться более точным термином «замедление хода времени».

Замедляющее ход, «расширяющееся» необратимое время принципиально отличается от ньютоновского времени, которое всегда используется в естествознании как неизменный и однородный континуум. Необратимое время, которое обнаруживает космологическое замедление хода, в этой книге называется «физическим». Применение термина «физическое время» может быть оправдано аналогией с термином «физический вакуум», который в квантовой физике заменил классическое представление о пустоте, как об абстрактном трехмерном математическом пространстве.

Принципиальное значение имеет вопрос: является ли космологическое замедление времени свойством движущихся тел или физическое время замедляет ход и для покоящихся объектов? Для того чтобы убедиться в том, что физическое время неподвижных тел также замедляется, достаточно приравнять интервал (1.23):  $ds^2 = c^2 d\tau^2 - a^2(\tau) \cdot dr^2$  и его конформное представление (1.28):  $ds^2 = a^2(c^2 dt^2 - dr^2)$  для неподвижного тела ( $dr = 0$ ), что вновь приводит к уравнению замедляющегося физического времени (1.29), в которое не входят пространственные координаты.

Ньютоновское и физическое время связаны обратимым конформным преобразованием и формально допустимы замены  $\tau \leftrightarrow t$ . Такое обратное преобразование, соответствует предположению, что физическое время является «собственным» временем приборов, применяемых для наблюдений в нестационарной метрически неоднородной вселенной, время в которой, наоборот, считается ньютоновским (Таганов 2003 [32, 33]):

$$ds^2 = c^2 dt^2 - a(t)^2 dr^2 = c^2 d\tau^2 - dr^2 \quad (1.39)$$

Эти равенства приводят к обратному по отношению к (1.29) уравнению связи физического и ньютоновского времени:  $d\tau/dt = a^{-1}$ . Интерпретация большинства (но не всех!) наблюдаемых свидетельств замедления хода необратимого времени может быть успешно проведена и при таком понимании физического времени, хотя математические преобразования в обратных функциях оказываются более громоздкими.

Степень асимметрии пространства-времени можно определить суммой значений координаты до и после инверсии:  $(t \rightarrow -t; r \rightarrow -r)$ . Например, асимметрию однородного пространства-времени Минковского с интервалом (1.27) можно определить соотношениями:  $A_t = t + (-t) = 0; A_r = r(t) + r(-t) = 0$ . Так что асимметрия однородного пространства-времени равна нулю. Такая же оценка асимметрии метрически неоднородного пространства-времени с замедляющимся необратимым временем с помощью соотношения (1.33) при  $r = c\tau(t)$  приводит к соотношениям:

$$A_t = \tau(t) + \tau(-t) = Ht^2 > 0 \quad (1.40)$$

$$A_r = c\tau(t) + c\tau(-t) = cHt^2 > 0 \quad (1.41)$$

Таким образом, **характерной особенностью пространства-времени с замедляющимся временем является его асимметрия**, связанная с необратимостью физического времени. В асимметричном пространстве-времени нельзя достичь инверсии физического времени только инверсией ньютоновского времени:  $\tau(-t) \neq -\tau(t)$ , и эта асимметрия пространства-времени обуславливает ряд новых физических явлений.

## 1.2 Особенности описания движения при необратимости времени

При выводе формул, описывающих движение в асимметричном пространстве-времени с необратимым физическим временем можно пользоваться Принципом наименьшего действия, но я ради наглядности буду использовать соотношения (1.29, 1.33), определяющие космологическое замедление хода физического времени:

$$d\tau/dt = a = 1 + Ht = (1 + 2H\tau)^{1/2} \quad (1.42)$$

$$\text{При } t = 0: \tau = 0 \quad \tau = t + Ht^2/2$$

Начнем с определения скоростей:  $u_t = dr/dt$  и  $u_\tau = dr/d\tau$ , для которых с помощью этих соотношений можно получить следующие формулы:

$$u_t = dr/d\tau \cdot d\tau/dt = u_\tau a = u_\tau (1 + Ht) = u_\tau (1 + 2H\tau)^{1/2} \quad (1.43)$$

$$u_\tau = dr/dt \cdot dt/d\tau = u_t/a = u_t/(1 + Ht) = u_t/(1 + 2H\tau)^{1/2} \quad (1.44)$$

Таким образом, в асимметричном пространстве-времени значения ньютоновских и физических скоростей тел изменяются так, что в каждый момент времени справедливо соотношение:

$$u_t/u_\tau = a = 1 + Ht = (1 + 2H\tau)^{1/2} \quad (1.45)$$

Соотношения (1.43, 1.44) позволяют определить кинетические энергии:  $E_t = mu_t^2/2; E_\tau = mu_\tau^2/2$ , а уравнения движения в асимметричном пространстве-времени могут быть определены с помощью функций Лагранжа, которые для консервативных систем имеют вид:  $L_{t;\tau} = E_{t;\tau} - U$ .

Особый интерес представляет соотношение для ускорения:

$$u_{\tau\tau} = du_{\tau}/d\tau \quad (1.46)$$

При постоянном начальном значении скорости  $u_{\tau} = u_{\tau 0} = const$  дифференцирование (1.44) приводит к формуле:

$$u_{\tau\tau} = -u_{\tau 0} \cdot H(1 + 2H\tau)^{-3/2} \quad (1.47)$$

Из этого соотношения следует, что равномерное движение пробного тела с постоянной скоростью  $u_{\tau} = u_{\tau 0} = const$  без действия каких либо внешних сил через некоторое время начнет замедляться с отрицательным ускорением  $u_{\tau\tau}$ .

Если использовать для интерпретации соотношения (1.47) второй закон Ньютона:  $mu_{\tau\tau} = F$ , то оказывается, что в асимметричном пространстве-времени на единицу массы движущегося пробного тела постоянно действует тормозящая движение сила  $f_{\tau}$ , связанная с замедлением хода физического времени:

$$f_{\tau} = F/m = u_{\tau\tau} = -u_{\tau 0} \cdot H(1 + 2H\tau)^{-3/2} \quad (1.48)$$

Для небольших по сравнению с космологическими масштабами продолжительностей наблюдения можно считать:  $1 + 2H\tau = 1$  и тогда соотношение (1.48) упрощается:

$$f_{\tau} = -u_{\tau 0}H \quad (1.49)$$

Сила  $f_{\tau}$  в (1.48, 1.49) похожа на силу вязкого сопротивления при движении тела в сплошной среде – она пропорциональна скорости и направлена противоположно направлению движения тела. При этом постоянная Хаббла играет роль «космологической вязкости» асимметричного пространства-времени.

Если вместо пробного тела рассматривается движение фотона при  $u_{\tau 0} = c$  то это соотношение принимает вид (для теоретического значения  $H$  (1.78):

$$f_{\tau} = u_{\tau\tau} = -cH = -5.9 \cdot 10^{-8} \text{ см} \cdot \text{с}^{-2} \quad (1.50)$$

Вероятно, впервые на спонтанные ускорения тел в метрически неоднородном пространстве-времени обратил внимание Виллем де Ситтер (*De Sitter* 1933<sup>20</sup>). Йохан Масрелиз (*Masreliez* 1999 [54, 55]) назвал виртуальную силу, возникающую в метрически неоднородном пространстве-времени «космическим трением» (*cosmic drag*). В предложенной им космологической модели (*SEC*) с экспоненциально возрастающим масштабным фактором  $a = \exp(t/T); T = const$  сила космического сопротивления (1.48) определяется соотношением:  $f_{\tau} = -u_{\tau 0}T(\tau/T + 1)^{-2}$ .

В асимметричном пространстве-времени скорость света постоянна только в замедляющемся физическом времени:  $c_{\tau} = c = const$ , и уравнение траектории фотона имеет вид:  $r = c_{\tau}\tau$ . Если движение фотона описывается с использованием ньютоновского времени, то скорость света, в соответствии с (1.43) оказывается переменной:

<sup>20</sup> De Sitter, W. *Astronomical Aspect of the Theory of Relativity*. University of California Pub. in Mathematics (Berkeley: Univ. Calif. Press), 1933, 2, No. 8.

$$c_t = dr/dt = d/dt \cdot (c_\tau r) = c_\tau \cdot d\tau/dt = c \cdot (1 + Ht) \quad (1.51)$$

Рассмотрим далее кажущуюся скорость «расширения» пространства  $V_t$ , отражающую нестационарность метрики пространства-времени. В соответствии с законом Хаббла для ньютоновского времени при определении этой скорости следует использовать соотношение:  $V_t = c_\tau z = cHt$ . Обобщение этого соотношения можно получить дифференцированием его по времени:

$$du_t/dt = cH \quad (1.52)$$

Если интерпретировать это соотношение с помощью второго закона Ньютона с использованием ньютоновского времени, то можно сказать, что скорость пробного тела в нестационарном пространстве-времени изменяется так, как будто на единицу его массы действует дополнительная сила  $f_c = cH$ . Интегрируя уравнение (1.52) при начальных условиях  $t = 0: u_t = u_{t_0}$  можно получить:

$$u_t = u_{t_0} + cHt \quad (1.53)$$

Это соотношение определяет влияние нестационарности метрики пространства-времени на скорость движения пробного тела, которая предстает суперпозицией скорости кажущегося «расширения» пространства и первоначальной, независимой от этого «расширения» скорости тела  $u_{t_0}$ .

### 1.3 Иллюзия «ускоряющегося расширения» вселенной

Недавно научное сообщество оживленно обсуждало свидетельства возможного «ускоренного расширения» вселенной, обнаруженные независимо двумя коллективами исследователей (*Saul Perlmutter, Adam Riess et al* [57, 59, 60]). Для того чтобы обнаружить это явление использовались оценки космологических параметров  $\Omega_M, \Omega_\Lambda$  стандартной модели классической космологии, полученные обработкой результатов исследования взрывов сверхновых звезд класса *SNe Ia*. В этих исследовательских проектах были получены оценки космологических параметров:  $\Omega_{Me} = 0.28^{+0.09}_{-0.08}$  [57] и  $\Omega_{Me} = 0.29^{+0.05}_{-0.03}$  [59]. Соотношение  $\Omega_M + \Omega_\Lambda \simeq 1$  позволяет для стандартной «плоской» космологической модели оценить значение  $\Omega_\Lambda$ , а затем рассчитать по формуле:  $q_t = 1/2\Omega_M - \Omega_\Lambda$  оценку параметра замедления для ньютоновского времени:

$$q_{te} = -0.56 \pm 0.11 \quad (1.54)$$

Это отрицательное значение параметра замедления позволило утверждать, что в нашу эпоху вселенная расширяется с ускорением.

Необычный образ «ускоренно расширяющейся» вселенной постепенно стал привычным, и в 2011 году Нобелевский комитет присудил Нобелевскую премию по физике астрофизикам Саулу Перлмуттеру (*Saul Perlmutter*), Брайану Шмидту (*Brian Schmidt*) и Адаму Риссу (*Adam Riess*) с формулировкой: «За открытие ускоренного расширения Вселенной с помощью наблюдения далеких сверхновых». Несомненно, что огромный объем тщательных

наблюдений сверхновых звезд, выполнявшийся несколькими десятками астрономов на протяжении почти 20 лет, заслуживает самой высокой оценки. Но этот труд отнюдь не привел к открытию «ускоренного расширения» вселенной, а служит **впечатляющим подтверждением феномена космологического замедления хода физического времени.**

В концепции замедляющегося необратимого физического времени свидетельства кажущегося «ускоренного расширения» вселенной имеют естественное объяснение (Таганов 2005 [34, 35, 68, 70, 72]). С помощью правил дифференцирования можно получить соотношение между космологическим параметром замедления в физическом времени  $q_\tau = -aa''/a'^2$  и параметром замедления  $q_t = -a\ddot{a}/\dot{a}^2$  в ньютоновском времени:

$$q_t = q_\tau - 1 \quad (1.55)$$

При выводе этого соотношения используются следующие преобразования – из (1.29):  $d\tau/dt = a$  следует:  $\dot{a} = da/dt = da/d\tau \cdot d\tau/dt = a' \cdot a$  (I) и  $d/dt(da/d\tau) = d^2a/d\tau^2 \cdot d\tau/dt = a'' \cdot a$  (II). Поэтому  $\ddot{a} = a^2a'' + aa'^2$  и далее:  $q_t = -a\ddot{a}/\dot{a}^2 = -(a^3a'' + a^2a'^2)/(a^2a'^2) = q_\tau - 1$ .

**Из (1.55) следует, что умеренное ( $q_\tau < +1$ ) замедление расширения вселенной в физическом времени кажется ускоряющимся расширением ( $q_t < 0$ ) в ньютоновском времени.** Равномерному расширению в ньютоновском времени ( $q_t = 0$ ) соответствует замедляющееся расширение вселенной в физическом времени ( $q_\tau = +1$ ). Эти координатные эффекты подобны изменениям кинематики при переходах между инерциальными и неинерциальными системами отсчета.

Применив соотношения (1.54, 1.55) можно получить оценку параметра замедления в физическом времени по наблюдениям сверхновых звезд класса *SNe Ia*:

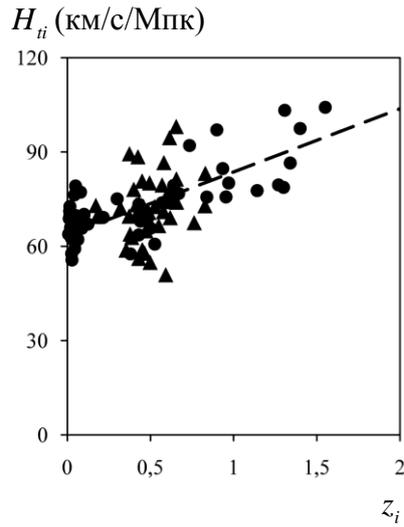
$$q_{\tau_e} = q_{t_e} + 1 = (-0.56 \pm 0.11) + 1 = +0.44 \pm 0.11 \quad (1.56)$$

Таким образом, в физическом времени, в котором в действительности и проводятся астрофизические наблюдения, расширение вселенной не ускоряется, а наоборот замедляется.

В статьях [57; табл. 1], [59, табл. 5, 6, 10], [60, табл. 3, рис. 4] приводятся значения красного смещения  $z_i$  и рассчитанные с учетом необходимых поправок модули расстояний  $\mu_i$  (или  $m_B^{eff}$  при  $M_B = -19.5 \pm 0.3$  в [57]) для наблюдавшихся сверхновых звезд. Эти два параметра позволяют, используя формулу:  $\mu = 5 \lg r_L + 25$ , оценить соответствующие фотометрические расстояния  $r_{Li}$  (в Мпк). После этого, применив соотношение:  $r_L = (1+z) \cdot r$  можно определить соответствующие метрические расстояния  $r_i$ , а затем, по классическому закону Хаббла  $cz = H_i r$  рассчитать оценки  $H_{ii}$  постоянной Хаббла для ньютоновского времени при всех значениях  $z_i$  красного смещения наблюдавшихся сверхновых.

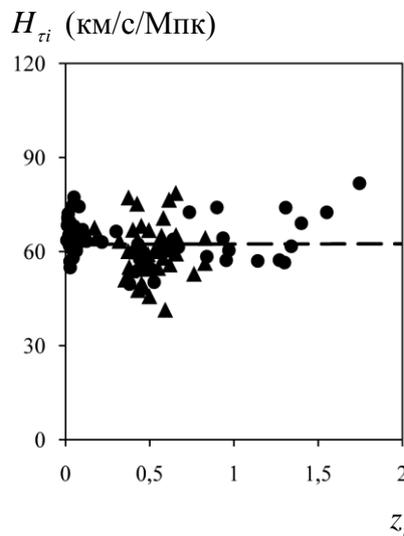
На рис. 1.1 представлена зависимость таких оценок постоянной Хаббла от красного смещения. Рисунок показывает, что чем больше значение красного смещения, то есть чем дальше в прошлое мы заглядываем, тем больше величина оценки постоянной Хаббла, которая отражает темп расширения вселенной в нашу эпоху. При этом среднее значение постоянной Хаббла имеет, конечно, значительную неопределенность:

$$\langle H_{te} \rangle = (72.9 \pm 11.8) \text{ км/с/Мпк} \quad (1.57)$$



**Рис. 1.1** Зависимость рассчитанных значений постоянной Хаббла для ньютоновского времени от красного смещения по наблюдениям сверхновых звезд класса *SNe Ia*. Треугольники отмечают расчеты по данным [57], а кружки по данным [59, 60].

Для того чтобы прояснить механизм возникновения иллюзии ускоренного расширения вселенной следует принять во внимание, что закон Хаббла в форме  $z = Ht$  является точным только для ньютоновского времени. При определении же постоянной Хаббла по наблюдениям астрофизических процессов, развивающихся в физическом времени, следует применять соотношение (1.36):  $z = (1 + 2H\tau)^{1/2} - 1$ . Это соотношение при  $\tau_i = r_{Li}/c$  позволяет по данным статей [57, 59, 60] оценить значения постоянной Хаббла  $H_{\tau_i} = \{c[(1 + z)^2 - 1]\}/2r_{Li}$  уже с учетом замедления физического времени.



**Рис. 1.2** Зависимость рассчитанных значений постоянной Хаббла для физического времени от красного смещения по наблюдениям сверхновых звезд класса *SNe Ia*. Треугольники отмечают расчеты по данным [57], а кружки по данным [59, 60].

Как показывает рис. 1.2 оценки постоянной Хаббла для физического времени не обнаруживают никакой значимой зависимости от красных смещений и группируются вблизи

среднего значения, которое имеет заметно меньшую неопределенность по сравнению с (1.57) и хорошо соответствует теоретическому значению постоянной Хаббла (1.78):

$$\langle H_{te} \rangle = (62.3 \pm 7.8) \text{ км/с/Мпк} \quad (1.58)$$

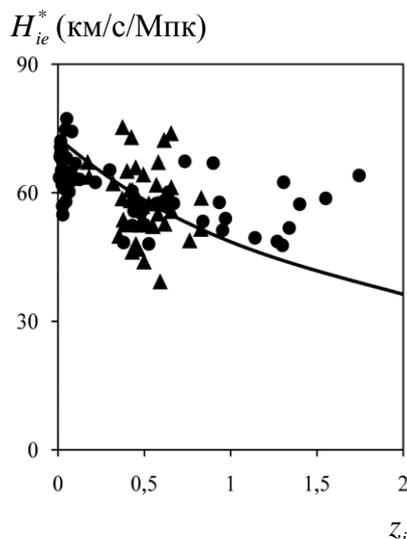
При анализе наблюдений сверхновых звезд никак не учитывалось замедление физического времени, и поэтому проявившаяся зависимость рассчитанных по наблюдениям значений постоянной Хаббла от красного смещения заставила исследователей пользоваться особыми «свободными от постоянной Хаббла» (например, “*Hubble-constant-free method*”, *Perlmutter et al 1997*<sup>21</sup>) методами анализа наблюдений. Но эта скрытая зависимость постоянной Хаббла от красного смещения и создала иллюзию ускоренного расширения вселенной.

Проводя анализ наблюдений без учета замедления физического времени, исследователи неявно предполагают соотношение  $z = Ht \simeq H^* \tau$ . С помощью формулы (1.33) параметр  $H^*$  можно оценить из соотношений:  $z = Ht \simeq H^* \tau = H^* (t + Ht^2/2)$ , которые при использовании закона Хаббла в форме  $t = z/H$  приводят к формуле:

$$H^* = \langle H \rangle / (1 + z/2) \quad (1.59)$$

Параметр  $H^*$  имеет обратную по сравнению с постоянной Хаббла зависимость от красного смещения – его значение уменьшается с ростом красного смещения, что и создает иллюзию ускоряющегося расширения вселенной.

Рассчитанные по формуле (1.59) с использованием оценки (1.57):  $\langle H \rangle = \langle H_{te} \rangle = (72.9 \pm 11.8) \text{ км/с/Мпк}$  и данным статей [57, 59, 60] значения  $H_i^*$  представлены на рис. 1.3. Рисунок показывает, что чем больше значение красного смещения, то есть чем дальше в прошлое мы заглядываем, тем меньше величина оценки параметра  $H^*$ , который заменяет постоянную Хаббла, если не учитывается космологическое замедление времени. Так что рис. 1.3 наглядно демонстрирует происхождение иллюзии «ускоренного расширения» вселенной.



<sup>21</sup> Perlmutter, S et al. // *ApJ* (1997) 483;565.

**Рис. 1.3** Оценки  $H_{ie}^*$ , рассчитанные по формуле (1.59). Пунктирная кривая соответствует (1.59) при  $\langle H \rangle = \langle H_{ie} \rangle = (72.9 \pm 11.8)$  км/с/Мпк; треугольники отмечают расчеты по данным [57], а кружки по данным [59, 60].

Следует отметить, что результаты других исследовательских проектов, в которых не учитывалось космологическое замедление времени, также демонстрируют уменьшение значения постоянной Хаббла с ростом красного смещения наблюдавшихся объектов. Так программа *HKP (Hubble Key Program)* исследования Цефеид в галактиках на расстояниях до 20 Мпк ( $z < 0,1$ ) дала оценку<sup>22</sup> значения параметра Хаббла:  $72 \pm 8$  км/с/Мпк (2001). А одним из результатов проекта по исследованию сверхновых звезд класса *SNe Ia* с большими красными смещениями ( $z = 0,1 \div 1$ ) явилась оценка заметно меньшего значения параметра Хаббла:  $65 \pm 7$  км/с/Мпк [59].

В работе [60] проводился анализ предполагаемой кинематики эволюции вселенной для прошлых эпох на основе анализа статистики красных смещений в спектрах сверхновых звезд *SNe Ia* (при  $z$  до 1.55). Для анализа использовалось уравнение эволюции в форме разложения в ряд Тейлора и двухпараметрическое представление зависимости параметра замедления от красного смещения. Оценки кинематических параметров, полученные в этой статье, в пределах неопределенности данных наблюдений совпадают с оценками кажущегося ускорения расширения вселенной на основе формулы (1.33), определяющей замедление физического времени (подробнее см. Таганов 2008 [35, 69, 70]).

**Таким образом, иллюзия «ускоренного расширения» вселенной возникла из-за того что для интерпретации наблюдений астрофизических процессов, развивающихся в замедляющемся физическом времени, использовалась космологическая модель с постоянной шкалой ньютоновского времени.**

Причину обнаруженного «ускоренного расширения» вселенной многие теоретики связывают с ненулевым значением космологической постоянной Эйнштейна, которую, в свою очередь, объясняют предположением о существовании таинственной «темной энергии». Темная энергия предстает гипотетической формой энергии, которая невидимо заполняет пространство и ответственна за ускоренное расширение нашего мира. В стандартной  $\Lambda$ CDM - модели классической космологии эта загадочная темная энергия составляет почти три четверти массы-энергии вселенной!

Поскольку темная энергия включена в стандартную модель классической космологии только для объяснения ускоренного расширения вселенной, то этот призрак не замедлит исчезнуть, как только будет осознана иллюзорность самого «ускоренного расширения» вселенной.

## 1.4 Физическое подобие микромира и мегамира

Для успеха системного анализа в космологии определяющее значение имеет выбор системо-образующих отношений, отражающих специфику рассматриваемой сложной системы. Из-за конечности скорости света мы оцениваем характеристики космических объектов в разные моменты времени и на разных стадиях их эволюции. Но продолжительность наших наблюдений ничтожно мала по сравнению с интервалами времени, которые приводят к заметным эволюционным изменениям космических объектов. Поэтому мы можем полагать, что наблюдаем вселенную в состоянии «квази-стационарного» равновесия, и тогда в качестве системо-образующего отношения целесообразно использовать общее условие динамического равновесия, пригодное для различных структур.

<sup>22</sup> Freedman W. et al // ApJ. (2001) 553; 47.

Динамическое равновесие в соответствии с Принципом наименьшего действия определяется следующим общим условием для действия  $S$  рассматриваемой системы:  $dS/d\tau = 0$ . Решение этого уравнения  $S = const$  и определяет динамическое равновесие:  $S = E\tau = const$ . Этому условию для постоянного конечного объема  $V = const$  и плотности действия  $\rho_E = E/V$  соответствует уравнение состояния:

$$\rho_E \tau = const \quad (1.60)$$

Уравнение (1.60) можно уточнить, проведя анализ термодинамики релятивистской материи в конечном объеме (Таганов 2008 [35, 69, 70]). Одной из самых общих форм уравнения состояния является релятивистское неравенство (см., например, стр. 108–110 в [16]):  $PV < E/3$ . Кроме того, гравитационная энергия конечного объема может быть представлена в форме интеграла от давления по объему (см., например, стр. 397–400 в [15]):  $E_G = -3 \int PdV$ . При постоянном давлении в рассматриваемом объеме  $PV \propto -E_G$  и тогда рассмотренные соотношения приводят к уравнению состояния в форме обобщенной теоремы вириала:

$$E \propto -E_G \propto Gm^2/r \quad (1.61)$$

Для зависимости химического потенциала вещества  $\mu$  от плотности вида:  $\mu \propto \rho^n$  связь давления и плотности определяется соотношением:  $P \propto \rho^{n+1}$  (см., например, стр. 397–400 в [15]). При этом полная энергия:  $E = (3n - 1/5n - 1) \cdot Gm^2/r$ , а гравитационная потенциальная энергия:  $E_G = -(3n/5n - 1) \cdot Gm^2/r$ . Для релятивистской материи  $n = 1/3$  и полная энергия равна нулю:  $E = 0$ , а гравитационная энергия:  $E_G = -3Gm^2/2r$ . Полная энергия конечного объема с учетом этих соотношений и энергетического эквивалента массы материи  $m$  определяется соотношением:

$$E = mc^2 + E_U - (3Gm^2/2r) = 0 \quad (1.62)$$

В этом соотношении  $E_U$  это внутренняя энергия нерелятивистских структур объекта, которая в соответствии с нерелятивистской теоремой вириала:  $E_U = -U_G/2 = 3Gm^2/4r$  и тогда соотношение (1.62) принимает вид:

$$mc^2 - (3Gm^2/4r) = 0 \quad (1.63)$$

Из этого энергетического баланса можно получить соотношение для плотности массы:  $\rho_m = m/V = 3m/4\pi r^3$ , определенной как **экстенсивный параметр для конечных объемов и масс, и поэтому оценивающий среднюю плотность массы**:

$$\rho_m = (c^2/\pi G) \cdot r^{-2} \quad (1.64)$$

В релятивистской идеологии закон сохранения энергии обобщает закон сохранения массы, например, учитывая возможные трансформации массы и энергии при изменениях дефекта массы в структурах взаимодействующих элементов. Применяемый в космологии переход от

плотности массы к плотности энергии  $\rho_E$  с помощью определения энергетического эквивалента массы:  $\rho_E = \rho_m c^2$  приводит соотношение (1.64) к виду:

$$\rho_E = const \cdot r^{-2} \quad (1.65)$$

Сравнивая уравнения состояния (1.65) и (1.60) можно придти к выводу, что они совпадают при условии:

$$r^2 = const \cdot \tau \quad (1.66)$$

Можно показать, что уравнения состояния (1.60, 1.65) соответствуют космологической модели (1.38). Для этого нужно преобразовать (1.66) с помощью определения масштабного фактора (1.6)  $a = r/R_0$  к виду:  $a^2 = const \cdot \tau$ . Дифференцирование этого соотношения приводит к уравнению:  $aa' = const$ , а повторное дифференцирование дает уравнение:  $a''a + a'^2 = 0$ , которое эквивалентно уравнению:

$$q_\tau = -aa''/a'^2 = +1. \quad (1.67)$$

Общее решение этого уравнения при начальном условии  $\tau = 0: a = a_0, a' = a'_0$  имеет вид (см., например<sup>23</sup> п. 6.125, с. 600):

$$a = (a_0^2 + 2a_0 a'_0 \tau)^{1/2} \quad (1.68)$$

Для начальных условий:  $\tau = 0: a_0 = 1, a'_0 = H$  решение (1.68):  $a = (1 + 2H\tau)^{1/2}$  совпадает с (1.38).

В уравнения состояния (1.60, 1.64) входят плотности энергии и массы, определенные как экстенсивные термодинамические характеристики объектов с конечными объемами, и поэтому они могут использоваться для описания неоднородного распределения массы-энергии во вселенной.

С точки зрения метрологии не имеет смысла говорить о постоянстве или изменчивости любого измеряемого параметра или «константы». Результат измерения всякой размерной величины в соответствии с Принципом относительности измерений всегда представлен в форме отношения измеренного численного значения величины к использованному эталонному масштабу размерности этой величины. Например, фактор Хаббла с размерностью частоты в действительности является безразмерным числом, поскольку он определяется отношением  $H = H_{obs}/[\nu]$  его измеренного значения  $H_{obs}$  и некоторого эталона частоты  $[\nu]$ . Если фактор Хаббла не является постоянным, что, например, определяет модели классической космологии, то это можно интерпретировать как изменение любой из двух или обеих частей отношения, определяющего его значение.

Любая космологическая модель обязательно должна использовать некоторые размерные физические характеристики. При этом часто оказывается, что решение о том, какие части отношений, определяющих изменяющиеся наблюдаемые характеристики, считать переменными, а какие постоянными, является результатом априорного выбора, традиций или

<sup>23</sup> Камке Э. *Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям*. Изд. 2-е. М.: ГИ ФМЛ, 1961.

удобства. Что касается соответствия наблюдениям, то существует своего рода эквивалентность между моделями, основанными на любом из вариантов выбора, например:  $\{H_{obs} = \text{var}\}$ ;  $\{[V] = \text{var}\}$ ;  $\{H_{obs} = \text{var}, [V] = \text{var}\}$ . Тем не менее, математические формулировки этих трех моделей, которые одинаково хорошо соответствуют наблюдениям, в общем случае будут различными, и вновь простота и «красота» модели будет важным фактором при окончательном выборе одной из моделей.

Для того чтобы избежать рассмотренной неопределенности в интерпретации наблюдений нестационарной вселенной с изменяющимися масштабами базовых единиц измерения **необходимо использовать «истинно» безразмерные критерии, в которые не входят базовые единицы измерений.** Общая Теория Систем дает возможность создать безразмерную космологическую модель, утверждая целостность вселенной, как взаимосвязанной системы, состоящей из двух главных подсистем – микромира и мегамира. Взаимозависимость этих двух основных подсистем определяет безразмерный критерий, который определяет отношения базовых размерных характеристик рассматриваемых подсистем (1.83). Этот критерий физического подобия микромира и мегамира позволяет представить все ключевые космологические характеристики, как простые функции фундаментальных констант.

Особенностью методологии естествознания, неразрывно связанной с теорией размерностей, является определение и использование характеристических масштабов объектов и физических процессов. Например, для электрона характеристическими масштабами могут служить его масса, «классический» радиус и период колебаний, соответствующий его комптоновской длине волны. В космологии также целесообразно использовать характеристики, определяющие масштабы метрической и термодинамической неоднородности космических структур и самого пространства-времени.

В терминах классической физики трудно описывать и, особенно, наглядно интерпретировать нестационарное состояние асимметричного пространства-времени. Поэтому, для того чтобы создать наглядный образ единого пространства-времени, в физике традиционно используется «расщепление» этого 4-мерного континуума на отдельные 3-мерное пространство и 1-мерное время. При этом неоднородность и нестационарность пространства-времени предстают в форме «расширения пространства вселенной» и «замедления времени». Эти термины следует рассматривать как полезные и образные аллегории, не претендующие, однако, на исчерпывающую полноту описания особенностей нестационарного состояния метрически неоднородного пространства-времени.

К традиционным для классической космологии терминам «радиус вселенной» и «возраст вселенной» следует относиться как к метафорам и вместо них предпочтительнее пользоваться термином «космологический масштаб» метрической и термодинамической неоднородности.

Оценки космологических масштабов времени («возраста вселенной») и расстояний («радиуса вселенной») можно найти, используя соотношение (1.33). Значение ньютоновского возраста вселенной можно определить из условия:  $\tau = 0$ , для которого уравнение (1.33) имеет вид:  $\tau = 0 = -t + H/2 \cdot t^2$ . Отсюда следует:  $-1 + H/2 \cdot t = 0$  и соответственно:

$$t_p = 2/H = 32,15 \text{ млрд. лет.} \quad (1.69)$$

Кажущаяся скорость расширения вселенной  $V = cz$  достигает предельной величины скорости света при  $z=1$ . Для этого значения соотношение (1.37) имеет вид:  $r = c\tau = c/2H \cdot [(1+z)^2 - 1]$ , откуда для  $z=1$  следует:  $\tau = 1/2H \cdot [(1+1)^2 - 1]$ , то есть:

$$\tau = T_H = 3/2H = 7,618 \cdot 10^{17} \text{ с (24,15 млрд. лет)} \quad (1.70)$$

Здесь и в дальнейшем при расчете численных значения космологических масштабов используется теоретическое значение константы Хаббла (1.78), вывод которого последует через страницу.

Соотношение  $R_H = cT_H$  при условии (1.70) дает оценку космологического масштаба расстояний («радиуса вселенной»):

$$R_H = cT_H = 3c/2H = 2.283 \cdot 10^{28} \text{ см} \quad (1.71)$$

Космологический масштаб массы может быть получен из соотношения для полной энергии релятивистской материи (1.63):  $mc^2 - (3Gm^2/4r) = 0$ . Из этого энергетического баланса можно получить соотношения для массы и плотности массы:  $\rho_m = m/V = 3m/4\pi r^3$ , определенной как **экстенсивный** параметр для конечных объемов и масс релятивистской материи:

$$m = 4c^2 r / 3G \quad (1.72)$$

$$\rho_m = (c^2 / \pi G) \cdot r^{-2} \quad (1.73)$$

Соотношение (1.72) позволяет оценить космологический масштаб массы при  $r = R_H$ :

$$M_H = 4c^2 R_H / 3G = 2c^3 / GH = 4.099 \cdot 10^{56} \text{ г} \quad (1.74)$$

Для космологических масштабов (1.70, 1.71, 1.74) с помощью (1.73) можно оценить средние плотности массы, энергии и действия:

$$\rho_m = (c^2 / \pi G) \cdot R_H^{-2} = 4H^2 / 9\pi G = 8.227 \cdot 10^{-30} \text{ г см}^{-3} \quad (1.75)$$

$$\rho_E = \rho_m c^2 = 4c^2 H^2 / 9\pi G = 7.394 \cdot 10^{-9} \text{ эрг см}^{-3} \quad (1.76)$$

$$\rho_S = \rho_E T_H = 2c^2 H / 3\pi G = 5.627 \cdot 10^9 \text{ эрг с см}^{-3} \quad (1.77)$$

Следует отметить, что полученная оценка средней плотности материи во вселенной (1.75) несколько больше оценки «критической плотности» в классической космологии при одном и том же значении постоянной Хаббла:  $\rho_{mc} = 3H^2 / 8\pi G = 6.941 \cdot 10^{-30} \text{ г см}^{-3}$ .

Физический смысл соотношения (1.77) становится яснее при сравнении его с уравнением Планка. Уравнение Планка можно представить как определение константы Планка для минимального действия, соответствующего собственному механическому моменту электрона:  $E\delta t = \hbar/2 = const$  (Дж с), где  $\delta t = 2\pi/\omega$  период колебаний, ассоциированных с микрочастицей. Таким образом, постулат Планка утверждает дискретность и постоянство минимального действия в микромире.

Такой же анализ позволяет прийти к заключению, что соотношение (1.77) оценивает **объемную плотность действия (Дж с см<sup>-3</sup>) в мегамире**.

Уравнению Планка можно придать форму соотношения (1.77), если предположить существование ограниченного объема  $0 < V_{pl} < \infty$ , в котором определяется квант действия:

$\rho_{Epl} \delta t = E\delta t / V_{pl} = \hbar / 2V_{pl} = const$ . Можно полагать также, что квант действия определен в том

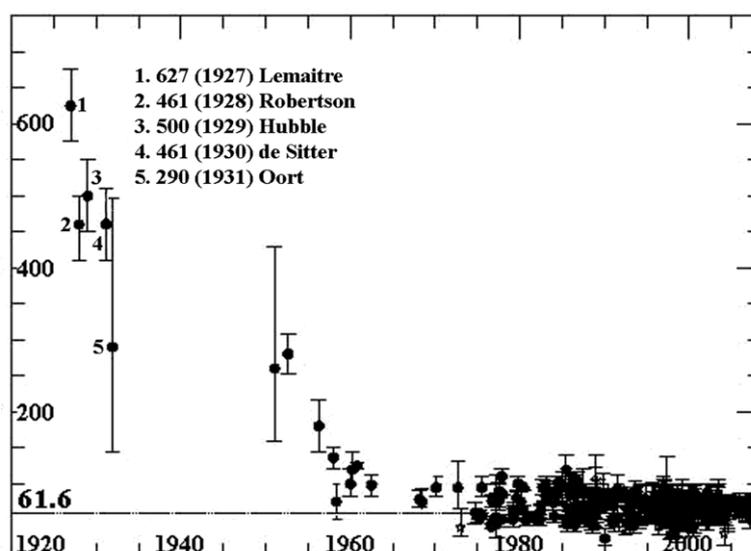
же объеме, что и элементарный заряд, то есть в сфере с радиусом электрона:  $V_{pl} = 4\pi r_e^3/3$  (здесь  $r_e = e^2/m_e c^2 = 2.818 \cdot 10^{-13}$  см. это классический радиус электрона).

Равенство квантовой плотности действия для электрона  $\hbar/2V_{pl}$ , и плотности действия (1.77):  $\hbar/2V_{pl} = 2c^2 H/3\pi G$  позволяет определить постоянную Хаббла, используя только фундаментальные константы (Таганов 2008 [35, 69, 70]):

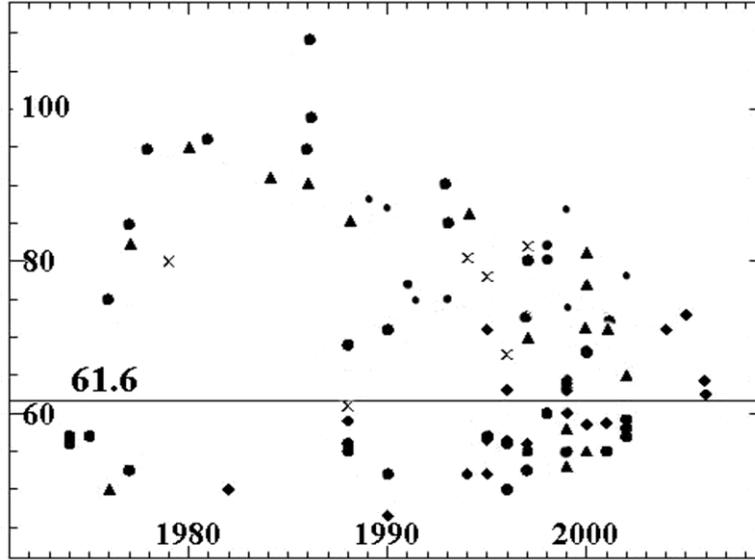
$$H = 9G\hbar/16c^2 r_e^3 = (9G\hbar c^4/16e^6) \cdot m_e^3 = 1.969 \cdot 10^{-18} \text{ с}^{-1} \text{ (61.6 км/с/Мпк)} \quad (1.78)$$

Это теоретическое значение константы Хаббла вполне соответствует оценкам этого параметра по наблюдениям. Жорж Леметр на основании всего нескольких десятков наблюдений близких галактик оценил параметр Хаббла в 1927 году как 627 км/с/Мпк. Сам Эдвин Хаббл оценивал величину этого параметра в 1930-е годы как 500 км/с/Мпк. В 1940-е годы астрофизики чаще пользовались значением 200 км/с/Мпк.

Рост точности и надежности астрономических наблюдений постепенно снижал статистические и систематические погрешности оценок значения константы Хаббла. В 1970–1990 годах обобщение всех опубликованных к тому времени данных по красным смещениям привело к оценке значения константы Хаббла в диапазоне: 50–80 км/с/Мпк.



**Рис. 1.4** Оценки значения константы Хаббла (ординаты в км/с/Мпк) полученные в 1927–2010 годы (Huchra, J. <https://www.cfa.harvard.edu/>).



**Рис. 1.5** Оценки значения константы Хаббла (ординаты в км/с/Мпс), полученные разными методами в последние три десятилетия: ромбы – оценки по наблюдениям сверхновых звезд класса *SNeIa*; треугольники – оценки по корреляции Талли-Фишера; косые крестики – это расчеты по наблюдениям шаровых скоплений звезд; малые кружки – это оценки по флуктуациям поверхностной яркости; большие кружки отмечают оценки всеми другими методами (*Huchra, J.* <https://www.cfa.harvard.edu/>).

Результаты программы *HKP* (*Hubble Key Program*) исследования Цефеид в галактиках на расстояниях до 20 Мпк ( $z < 0,1$ ) дали оценки<sup>24</sup> значения параметра Хаббла:  $68 \pm 6$  км/с/Мпк (2000) и  $72 \pm 8$  км/с/Мпк (2001). Одним из результатов недавнего международного проекта по исследованию сверхновых звезд класса *SNe Ia* с большими красными смещениями ( $z = 0,1 \div 1$ ) явилась оценка значения параметра Хаббла:  $65 \pm 7$  км/с/Мпк [59]. И, наконец, признанные эксперты по космологическим константам *A. Sandage* и *G. Tammann* опубликовали недавно следующие оценки константы Хаббла:  $63.2 \pm 1.3$  км/с/Мпк (*Tammann, 2006*<sup>25</sup>) и  $62.3 \pm 1.3$  км/с/Мпк (*Sandage, 2006*<sup>26</sup>).

На рис. 1.5 хорошо видна сложившаяся в последние два десятилетия тенденция сближения оценок константы Хаббла по астрономическим наблюдениям и полученного теоретического значения (1.78) – 61.6 км/с/Мпс.

Соотношение (1.60) в силу неизменности уравнения состояния релятивистской материи (1.63) должно быть справедливым для любого момента времени  $\tau$  и, в том числе, для космологического масштаба физического времени (1.70):  $\tau = T_H = 3/2H$ . С помощью этого соотношения и теоретической формулы (1.78) для константы Хаббла в уравнении (1.60) можно определить константу и представить его в форме:

$$\rho_E \tau = k_T \quad k_T = 2c^2 H / 3\pi G = 3\hbar / 8\pi r_e^3 = (3\hbar c^6 / 8\pi e^6) \cdot m_e^3 = 5.629 \cdot 10^9 \text{ эрг с см}^{-3} \quad (1.79)$$

Уравнение Планка, определяя нижний предел действия  $h/2$ , является по существу лаконичной формулировкой Принципа наименьшего действия в микромире. Уравнение (1.79),

<sup>24</sup> Freedman, W. et al // *ApJ.* (2001) 553; 47.

<sup>25</sup> Tammann, G.A. The Ups and Downs of the Hubble Constant // *Rev. Mod. Astron.* (2006) 19;1 (arXiv:astro-ph/0512584v1 23 Dec 2005)

<sup>26</sup> Sandage, A. et al. The Hubble Constant: A Summary of the Hubble Space Telescope Program for the Luminosity Calibration of Type Ia Supernovae by Means of Cepheids // *ApJ.* (2006) 653; 843-860.

обладающее органичной методологической общностью с уравнением Планка, может рассматриваться как **закон постоянства объемной плотности действия в мегамире**.

Для того чтобы представить себе формирование безразмерных чисел в космологии, следует рассмотреть методологию введения масштабов на основе фундаментальных констант. Например, для набора констант  $\{c, G, e^2, m_e, m_p\}$  в качестве масштабов для масс можно использовать: массы электрона  $m_e$  и протона  $m_p$ , масштаб  $m_G = (e^2/G)^{1/2}$  и масштабы вида  $m_{Gi} \propto e^2/Gm_i$ .

Особое значение имеет масштаб, оценивающий соотношение интенсивностей гравитационного и электромагнитного взаимодействий. В качестве такого масштаба, в частности, можно ввести массовый эквивалент  $m_{Ge}$ , соответствующий электромагнитной энергии электрона  $E_e = e^2/r_e$ , которая рассматривается как его внутренняя энергия. При этом соотношение для этого массового эквивалента можно получить с помощью общего уравнения состояния релятивистской материи (1.63) в форме (1.72):

$$m_{Ge} = 4c^2 r_e / 3G = 4e^2 / 3Gm_e = 5.060 \cdot 10^{15} \text{ г} \quad (1.80)$$

Различные масштабы для массы позволяют ввести соответствующие масштабы длин с помощью формул:  $l_i \propto e^2/m_i c^2$  и  $l_j \propto Gm_j/c^2$ . В этот набор масштабов входит и классический радиус электрона:

$$r_e = e^2/m_e c^2 = 2,818 \cdot 10^{-13} \text{ см} \quad (1.81)$$

Масштабы для интервалов времени можно получить из масштабов длин по формуле  $\tau_i \propto l_i/c$ , например:

$$\tau_e = e^2/m_e c^3 = 9,400 \cdot 10^{-24} \text{ с} \quad (1.82)$$

Этот масштаб соответствует времени, за которое свет проходит расстояние, равное классическому радиусу электрона (1.81).

С помощью рассмотренных масштабов можно образовать множество безразмерных отношений. Некоторые из этих безразмерных отношений оказываются «большими» числами, например, те, в знаменатель которых входят гравитационные радиусы. К таким числам относится, например, число порядка  $10^{40}$ , которое является отношением классического радиуса электрона к гравитационному радиусу протона. «Большие» космологические числа получаются также как безразмерные комплексы констант при расчете отношений вида:  $M_H/m_i; R_H/l_i; T_H/t_i$ , в которые входят космологические масштабы.

Анализ больших групп фундаментальных констант, например, набора  $\{c, G, \hbar, e, m_e, m_p\}$  позволяет ввести десятки масштабов для фундаментальной триады «масса – пространство – время», которые, в свою очередь, позволяют сформировать сотни безразмерных чисел. Включение в состав исследуемого набора констант еще и космологических масштабов  $\{T_H, R_H, M_H\}$  (1.70, 1.71, 1.74) увеличивает количество безразмерных комплексов во много раз.

Из сотен безразмерных комплексов, образованных из различных масштабов, можно сформировать десятки троек «больших» чисел, в которых безразмерные числа совпадают по

значениям с различной степенью точности. Однако особое значение имеет уникальная триада безразмерных отношений масштабов в системе  $\{c, e, m_e, G, H\}$ , в которой отношения масштабов совпадают не приближенно, а точно:

$$K_T = M_H / m_{Ge} = R_H / r_e = T_H / \tau_e = 3c / 2r_e H = (8e^4 / 3c\hbar G) \cdot m_e^{-2} = 8.105 \cdot 10^{40} \quad (1.83)$$

Индекс «Т» у константы  $K_T$  подчеркивает органическую связь использованных в (1.83) космологических масштабов с концепцией замедляющегося необратимого времени.

Может возникнуть вопрос: почему в формулах (1.78–1.83) используется масса электрона, а не протона? Применив отношение масс протона и электрона  $\mu = m_p / m_e = 1.837 \cdot 10^3$ , которое является фундаментальной константой, можно там, где это необходимо, заменять массу электрона на массу протона.

Соотношения (1.83) вводят безразмерный критерий подобия  $K_T$ , значение которого определяется фундаментальными константами, и который не меняется при любом изменении масштабного фактора. **Вселенная как система всегда сохраняет внутреннее физическое подобие, которое определяется постоянством отношений характерных масштабов мегамира и микромира (1.83).**

Внимание астрофизиков к теории размерностей в космологии в 1930-е годы привлекло использование Эдвардом Милном и Полем Дираком «больших магических чисел» для обоснования новой космологической модели. К тому времени Герман Вейль и Артур Эддингтон уже обратили внимание на то, что безразмерное отношение сил электромагнитного и гравитационного взаимодействия между протоном и электроном:

$$B_1 = e^2 / Gm_e m_p \simeq 2.3 \cdot 10^{39} \quad (1.84)$$

близко по значению к отношению оценки «радиуса вселенной»  $R \simeq 10^{28}$  см к классическому радиусу электрона  $r_e$ :

$$B_2 = R / r_e \simeq 3,6 \cdot 10^{40} \quad (1.85)$$

Было замечено также, что корень квадратный из отношения оценки «массы вселенной»  $M \simeq 10^{56}$  г. к массе протона  $m_p$ , имеет близкую величину:

$$B_3 = (M / m_p)^{1/2} \simeq 7,7 \cdot 10^{39} \quad (1.86)$$

Милн<sup>27</sup> и Дирак<sup>28</sup> использовали эти «большие магические числа» для того чтобы сформулировать новую космологическую гипотезу. Они пришли к заключению, что для того чтобы приближенные равенства:

$$B_1 \sim B_2 \sim B_3 \sim 10^{40} \quad (1.87)$$

сохранялись в «расширяющейся» вселенной при  $R \propto t$ , должно быть:  $G \propto t^{-1}$  и  $M \propto t^2$ . То есть должно происходить ослабление гравитационных связей и появление нового вещества во

<sup>27</sup> Milne, E.A. *Relativity, Gravitation and World Structure*. Clarendon, Oxford, 1935.

<sup>28</sup> Dirac, P.A.M. Cosmological constants // *Nature* (1937) 139, 323. Dirac, P.A.M. A new basis for cosmology // *Proc. Roy. Soc. A.* (1938) 165, N 921.

вселенной. Однако дальнейшие исследования показали высокую стабильность значения гравитационной постоянной.

В 1967 году Георгий Гамов предположил, что изменяется не гравитационная постоянная, а величина элементарного заряда<sup>29</sup>:  $e^2 \propto t^{-1} (G = const)$ , но в дальнейшем анализ спектров далеких космических объектов показал неизменность постоянной тонкой структуры  $e^2/hc$ . Были рассмотрены также возможности объяснения «загадки совпадения больших чисел» изменением в процессе эволюции вселенной значения скорости света<sup>30</sup> и постоянной Планка<sup>31</sup>. Гипотезы Милна, Дирака и Гамова стали достоянием истории космологии, но сам факт близкого совпадения «больших магических чисел» (1.87) до сих пор не находил объяснения.

В нескольких статьях (Барышев и др. 1988–1996 [45]) «проблема совпадения больших чисел» рассматривалась не как результат специфического изменения фундаментальных констант в «расширяющейся» вселенной, а как следствие термодинамического равновесия «Хабблоида» – космической супер-структуры с характеристиками близкими к рассмотренным космологическим масштабам (1.70, 1.71, 1.74). При использовании масштабов Планка (см. Глава IV; 4.42–4.44) характеристики Хабблоида могут быть представлены в форме соотношений:  $R_H \sim 10^{60} l_{Pl}; M_H \sim 10^{60} m_{Pl}; t_H \sim 10^{60} t_{Pl}$ , которые являются еще одной формулировкой «проблемы совпадения больших чисел».

Концепция вселенной как сложной системы, сохраняющей физическое подобие микромира и мегамира, позволяет найти **не приближенные, а точно совпадающие по значению отношения характерных масштабов (1.83)**, которые определяют это подобие. Такое решение «проблемы совпадения больших чисел» обуславливается учетом феномена космологического замедления необратимого времени (1.33), а также использованием универсального релятивистского уравнения состояния для микромира и мегамира (1.63).

## 1.5 Фрактальная размерность крупномасштабной структуры вселенной

Применение орбитальных средств астрономических наблюдений с высоким разрешением и развитие компьютерных технологий привели в 1980-е годы к созданию новых статистических методов исследования «трехмерного» распределения материи в дальнем космосе. Переход от двумерной проекции крупномасштабной структуры вселенной на небесную сферу к «трехмерной» картине в этих методах проводится с применением оценок красного смещения галактик с последующим расчетом по закону Хаббла:  $r = cz/H$  их удаленности – «третьей» координаты «трехмерного» распределения галактик.

В 1980-е годы было определено не более тысячи красных смещений галактик, в середине 1990-х уже более ста тысяч, а в наше время количество известных красных смещений галактик намного превышает миллион. Однако следует иметь в виду, что формируемая с помощью закона Хаббла «трехмерная» картина распределения галактик не является истинным трехмерным сечением 4-мерного пространства-времени наблюдаемой вселенной в какой то определенный момент времени.

Закон Хаббла дает возможность оценить удаленность галактик по лучу зрения только **со смещением по времени в прошлое**. Например, из-за конечности скорости света распределение галактик, удаленных на 300 Мпк, наблюдается нами таким, какое оно было почти миллиард лет тому назад. Поэтому «трехмерное» распределение галактик, исследуемое

<sup>29</sup> Gamow, G. Variability of elementary charge and quasistellar objects // Phys. Rev. Lett. (1967) 19, 913.

<sup>30</sup> Albrecht, A., Magueijo, J. A time varying speed of light as a solution to cosmic puzzles // arXiv:astro-ph/9811018v2(5Jan1999).

<sup>31</sup> Seshavatharam, U.V.S., Lakshminarayana, S. Is Planck's Constant – A Cosmological Variable? // Int. Journ. of Astron. (2013) 2(1); 11–15.

современными статистическими методами, представляет собой набор сферических слоев трехмерного распределения галактик, **наблюдаемых в разные последовательные моменты времени истории вселенной.**

Применение закона Хаббла для расчета «третьей» координаты при статистическом анализе распределения галактик, предполагает использование соотношения:  $r = c\tau$ . Если определить характеристическое время в уравнении (1.79), применив соотношение:  $\tau = r/c$  и приняв во внимание что  $\rho_E = \rho_m c^2$ , то оно примет вид (Таганов 2008 [35, 69, 70]):

$$\rho_m = (2cH/3\pi G) \cdot r^{-1} = (k_T/c) \cdot r^{-1} = 1.878 \cdot 10^{-1} \cdot r^{-1} \text{ г см}^{-3} \quad (1.88)$$

Для фракталов с помощью соотношения  $m \propto r^D$  может быть введена фрактальная размерность Хаусдорфа  $D$ , которая связана с плотностью массы соотношением (см., например, [18]):  $\rho_m \propto r^{-(3-D)}$ . Сравнивая эту формулу с (1.88) можно прийти к заключению, что соотношение (1.88) должно соответствовать распределению материи в крупномасштабной структуре вселенной с фрактальной размерностью (Таганов 2008 [35, 69, 70]):

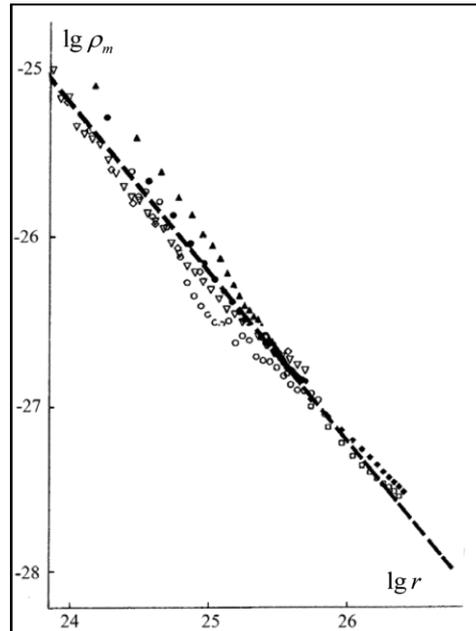
$$D = 2 \quad (1.89)$$

Таким образом, статистические методы анализа распределений галактик, использующие для определения одной из координат галактики закон Хаббла, **должны в соответствии с уравнением (1.88) обнаруживать фрактальную размерность крупномасштабной структуры вселенной порядка  $D = 2$ .** И действительно в 1987 году Лучано Петронеро опубликовал результаты статистического исследования каталогов галактик<sup>32</sup>, которые свидетельствовали, что фрактальная размерность наблюдаемой крупномасштабной структуры вселенной:  $D = 2 \pm 0.2$ .

Одним из преимуществ фрактальных статистических методов исследования крупномасштабной структуры вселенной является возможность оценки средней массовой плотности космических структур разных масштабов без определения масс всех галактик в исследуемом объеме. Это обеспечивает возможность непосредственного сравнения уравнения (1.88) с астрономическими наблюдениями.

---

<sup>32</sup> Pietronero L. The fractal structure of the Universe: correlations of galaxies and clusters and the average mass density // Physica A. (1987)144; 257.



**Рис. 1.6** Сравнение теоретической формулы (1.88; пунктирная прямая) с расчетами по данным нескольких каталогов галактик [51].

На рис. 1.6 приведено сравнение формулы (1.88) со статистическими расчетами распределений галактик [51]. Различные обозначения маркеров соответствуют расчетам с использованием разных каталогов галактик. Как видно из рисунка теоретическая формула (1.88; пунктирная прямая) удовлетворительно соответствует статистическим оценкам до масштаба наблюдений порядка 300 Мпк.

Петронеро и его последователи обнаружили, что значение фрактальной размерности  $D \sim 2$  не зависит от пространственного масштаба статистического анализа. Оказалось, что эта фрактальная размерность характеризует не только распределение отдельных галактик, но действительна также для распределения скоплений галактик, распределения радио-галактик, источников рентгеновского излучения и квазаров, сохраняясь, по крайней мере, до масштабов порядка 1000 Мпк [58]. Так что современные исследования крупномасштабной структуры наблюдаемой части вселенной вполне подтверждают уравнения (1.79, 1.88).

## 1.6 Определение температуры космического микроволнового фона

Наряду с наблюдением далеких космических объектов исследование космического микроволнового фона (в дальнейшем КМФ – *CMB*, *cosmic microwave background*) стало в последние два десятилетия весьма эффективным инструментом проверки и совершенствования космологических моделей. После открытия этого излучения были изучены многие его свойства: неоднократно и с возрастающей точностью измерялись – его температура ( $T_{CMB} = 2.73 \pm 0.005$  К); спектр КМФ, который оказался чрезвычайно близким к спектру излучения абсолютно черного тела; угловая анизотропия спектра мощности КМФ, поляризация КМФ и, вероятно, этот перечень нельзя считать завершенным.

Во многих книгах по космологии можно прочитать, что первые теоретические оценки температуры КМФ были рассчитаны Георгием Гамовым, Ральфом Альфером и Робертом Херманом еще до открытия КМФ, а экспериментально КМФ был обнаружен в 1964 году американскими радиоинженерами Арно Пензиасом и Робертом Вильсоном.

В действительности исследование температуры космического пространства было начато еще в 19 столетии, и первая оценка этой температуры:  $T = (5 \div 6)K$  была опубликована в 1896

году (Guillaume, 1896)<sup>33</sup> задолго до начала разработки гипотезы Большого Взрыва. Далеко не полная хроника оценок температуры космического межгалактического пространства имеет следующий вид<sup>34</sup>: (Eddington, 1926:  $T = 3.18K$ ), (Regener, 1933:  $T = 2.8K$ ), (Nernst, 1938:  $T = 0.75K$ ), (Herzberg, McKellar, 1941:  $T = 2.3K$ ), (Finlay-Freundlich, 1953/1954:  $T = 1.9 \div 6K$ ), то есть в среднем:  $T = (3.5 \pm 2)K$ . Все эти оценки рассчитывались по астрофизическим наблюдениям на основе предположения о термодинамическом равновесии межгалактической среды.

Только после статьи Гамова<sup>35</sup> 1948 года, в которой был проведен анализ гипотезы Большого Взрыва с использованием физики элементарных частиц и ядерных реакций, Гамовым и его последователями было предпринято несколько гораздо менее удачных попыток оценить температуру КМФ: (Alpher & Herman, 1948/1949:  $T = 5K$ ), (Alpher & Herman, 1950:  $T = 28K$ ) (Gamow, 1953:  $T = 7K$ ), (Dicke, 1960:  $T = 40K$ ), (Gamow, 1961:  $T = 50K$ ), то есть в среднем:  $T = (26 \pm 20)K$ .

Следует отметить, что в 1950–1960 годах гипотеза Большого Взрыва отнюдь не была столь популярна как в наши дни. Большинство астрономов и астрофизиков рассматривали межгалактическое пространство как термодинамически равновесную разреженную плазму, излучение которой имеет вполне определенную среднюю температуру. Поэтому открытие в 1955 году молодым радиоастрономом Тиграном Шмаоновым в Пулковской обсерватории под Ленинградом космического фонового излучения с температурой  $T = 4 \pm 3K$  не вызвало особого ажиотажа. Это открытие обсуждалось на научных семинарах обсерватории, и было опубликовано<sup>36</sup> после успешной защиты Шмаоновым своей диссертации.

По прошествии почти 10 лет, в 1964 году излучение, открытое Шмаоновым, было случайно замечено также Арно Пензиасом и Робертом Вильсоном, инженерами американской компании *Bell Laboratory*, занимавшихся настройкой антенны для связи со спутником «Эхо». На этот раз стабильный радиосум с температурой  $T = 3.5 \pm 1K$  оказался весьма кстати, и вскоре был объявлен несколькими влиятельными астрофизиками «реликтовым» излучением последней стадии Большого Взрыва<sup>37</sup>. Все было сделано для того, чтобы открытие этого «реликтового» излучения укрепило позиции гипотезы Большого Взрыва.

Исторически сложилось два разных представления о природе и происхождении КМФ. В классической космологии это космическое излучение рассматривается как фотоны, сохранившиеся от последней стадии радиационной эпохи развития вселенной, завершившейся примерно через 400 тысяч лет после Большого Взрыва. К этому времени температура первичной плазмы снизилась до 4000–3000 K, что позволило свободным электронам и протонам начать формировать атомы водорода. Началась эпоха рекомбинации первичной плазмы и постепенно убывающее количество свободных заряженных микрочастиц сделало плазму прозрачной для покидающего ее электромагнитного излучения. Впоследствии, при расширении пространства вселенной температура этого «реликтового» излучения снизилась примерно в 1100 раз, достигнув 2.7 K в нашу эпоху.

Одним из недостатков этой модели происхождения КМФ является ее неспособность дать теоретическую количественную оценку современной температуры КМФ. Предполагается, что снижение температуры КМФ сопровождало «расширение» пространства вселенной в соответствии с уравнением состояния фотонного газа:  $VT_r^3 = const$ , из которого следует:

<sup>33</sup> Guillaume, C.-E. La Nature (1896) 24, series 2; 234.

<sup>34</sup> Assis, A & Neves, M. History of 2.7 K Temperature Prior to Penzias and Wilson // APEIRON, (1995) 2 Nr. 3 July; 79–84.

<sup>35</sup> Alpher, R.A., Bethe, H.A. Gamow, G. // Phys. Rev. (1948) 73(4); 803.

<sup>36</sup> Шмаонов Т.А. Методика абсолютных измерений эффективной температуры радиоизлучения с низкой эквивалентной температурой // Приборы и техника эксперимента (1957) №1; 83-87.

<sup>37</sup> Dicke, R.H., Peebles, P.J.E., Roll, P.G. and Wilkinson, D.T. // ApJ. (1965) 142; 414-419.

$T_r \propto 1/R(t_r) \propto (1+z^*)$  (см., например [10, 11, 56, 83]). Поскольку при  $z^* = 0$  это соотношение<sup>38</sup> должно соответствовать современной температуре КМФ  $T_{CMB}$ , то его используют в форме:  $T_{CMB} = T_{r0}/(1+z^*)$ . Например, если считать что рекомбинация первичной плазмы завершилась при температуре  $T_{r0} = 3000 \text{ K}$  и возрасту вселенной в ту эпоху соответствует красное смещение порядка  $1+z^* = 1/R(t_r) = 1100$ , то в нашу эпоху температура микроволнового фона как раз и соответствует наблюдаемому значению  $T_{CMB} \simeq 2.7 \text{ K}$ . Применение таких рассуждений сводится просто к подбору значений параметров  $T_{r0}$  и  $z^*$ , обеспечивающих наблюдаемую температуру КМФ. Поэтому у разных авторов можно встретить различные значения этих параметров.

Другой подход к проблеме происхождения КМФ использует идеологию, развитую в работах Вальтера Нернста, Макса Борна и Луи де Бройля, которые первыми начали изучать термодинамику равновесного состояния межгалактической среды. В космологии с необратимым замедляющимся временем КМФ рассматривается вслед за Нернстом, Борном и де Бройлем, как излучение межгалактической среды, находящейся в состоянии динамического термодинамического равновесия (Таганов 2008 [35, 69, 70, 71]). Привлекательной чертой такого подхода, в частности, является то, что спектр излучения систем в состоянии термодинамического равновесия всегда соответствует спектру излучения абсолютно черного тела. В других моделях КМФ и, в частности, в гипотезе Большого Взрыва объяснение черно-тельного спектра КМФ вызывает затруднения.

Одним из примеров применения такой идеологии является предложение Фреда Хойла рассматривать КМФ как электромагнитное излучение, порожденное эволюцией звезд<sup>39</sup>. Оценки показывают, что плотность энергии КМФ примерно соответствует равномерному распределению по пространству вселенной энергии термоядерных реакций в звездах всех поколений. Эта эманация звезд могла постепенно приобрести характерный для КМФ спектр излучения абсолютно черного тела за счет многократных взаимодействий фотонов с ионизированной плазмой межгалактической среды.

Несмотря на различия существующих моделей происхождения КМФ, все они используют один общий элемент – космическую плазму, которая играет роль среды, преобразующей излучение. Помимо доминирующего водородно-гелиевого запыленного фона в межгалактической среде присутствуют сотни видов неорганических и органических молекул, в состав которых могут входить десятки атомов [5]. Но массовая доля элементов тяжелее гелия в космической плазме не превышает 0.15 %. Термодинамические характеристики межгалактической среды определяет молекулярный, атомный и ионизированный водород и гелий, составляющие более 98 % всей массы вселенной.

Астрофизические наблюдения показывают, что все наблюдаемые формы активности межгалактической среды – фоновое электромагнитное излучение, эманация звезд, движение межгалактической среды и космическое магнитное поле имеют сравнимые по величине объемные плотности энергии. Это может рассматриваться как одно из важных свидетельств равновесного состояния межгалактической среды, для которого характерно равномерное распределение внутренней энергии по различным ее компонентам.

Состояние динамического равновесия в КЗВ определяется соотношением (1.60):  $\rho_E \cdot \tau = const$ . Для того чтобы обеспечить выполнение Принципа наименьшего действия ( $\rho_{Ei} \cdot \tau_j = \min$ ) при распределении внутренней энергии системы по нескольким

<sup>38</sup> Здесь  $z^* = 1/a$  это специфическое красное смещение в гипотезе Большого Взрыва, значение которого изменяется в диапазоне  $z^* = \infty \div 0$  (см., например [11, 13, 56]).

<sup>39</sup> Hoyle, F. The Universe: past and present reflections // Ann. Rev. Astron. Astrophys. (1982) 20; 1.

энергетическим компонентам необходимо, чтобы в этом соотношении наибольшей плотности энергии соответствовал бы наименьший масштаб времени:

$$\rho_{Ei} \cdot \tau_j = \rho_{Ej} \cdot \tau_i \quad (1.90)$$

Для разреженной плазмы межгалактического пространства, состоящей преимущественно из электронов, протонов и легких нуклон-электронных структур, при использовании фундаментальных констант  $\{m_p, m_e, e, \hbar\}$  можно получить следующие характеристические масштабы:

1. Радиус первой электронной орбиты Бора:  $a_B = \hbar^2 / m_e e^2 = 5.295 \cdot 10^{-9}$  см и масштаб времени  $\tau_{ep} = a_B \hbar / e^2 = \hbar^3 / m_e e^4 = 2.421 \cdot 10^{-17}$  с.

2. Комптоновскую длину волны электрона  $\lambda_{ce} = \hbar / m_e c$  и соответствующий масштаб времени:  $\tau_e = \lambda_{ce} / c = \hbar / m_e c^2 = 1.288 \cdot 10^{-21}$  с.

3. Комптоновскую длину волны протона:  $\lambda_{cp} = \hbar / m_p c$  и соответствующий масштаб времени:  $\tau_p = \lambda_{cp} / c = \hbar / m_p c^2 = 7.016 \cdot 10^{-25}$  с.

Средняя массовая плотность оценивается в КЗВ соотношением (1.75), которое хорошо совпадает с наблюдениями:  $\rho_{me} = (5-10) \cdot 10^{-30}$  г см<sup>-3</sup> (см., например [46]), и соответствует средней плотности энергии (1.76):  $\rho_E = 7.394 \cdot 10^{-9}$  эрг см<sup>-3</sup>. Если принять в (1.90):  $\rho_{Ej} = \rho_E$ ;  $\tau_j = \tau_{ep} = \hbar^3 / m_e e^4$  и  $\tau_i = \tau_e = \hbar / m_e c^2$ , то после подстановки этих соотношений в (1.90) мы получим:

$$\rho_{HMB} = \rho_{Ej} \cdot \tau_i / \tau_j = \rho_E \cdot \tau_e / \tau_{ep} = \rho_E \cdot e^4 / c^2 \hbar^2 \quad (1.91)$$

Использование формул (1.76, 1.78) для  $\rho_E$  приводит соотношение (1.91) к форме:

$$\rho_{HMB} = 9e^4 G / 64\pi c^4 r_e^6 = 3.929 \cdot 10^{-13} \text{ эрг см}^{-3} \quad (1.92)$$

Эта формула оценивает **высокочастотную составляющую КМФ (HMB – High-frequency Microwave Background)**. Температуру этой составляющей КМФ можно рассчитать с помощью постоянной Стефана-Больцмана ( $\sigma^* = 4\sigma/c = 7.566 \cdot 10^{-15}$  эрг см<sup>-3</sup> К<sup>-4</sup>;  $\sigma = 5.670 \cdot 10^{-8}$  Вт м<sup>-2</sup> К<sup>-4</sup>):

$$T_{HMB} = (c\rho_{HMB}/4\sigma)^{1/4} = (\rho_{HMB}/\sigma^*)^{1/4} = 2.684 \text{ K} \quad (1.93)$$

Использование в (1.90) других соотношений:  $\rho_{Ej} = \rho_E$ ;  $\tau_j = \tau_{ep} = \hbar^3 / m_e e^4$  и  $\tau_i = \tau_p = \hbar / m_p c^2$  позволяет определить плотность энергии **низкочастотной оставляющей КМФ (LMB – Low-frequency Microwave Background)**:

$$\rho_{LMB} = \rho_E \cdot \tau_p / \tau_{ep} = \rho_{HMB} \cdot m_e / m_p = 2.139 \cdot 10^{-16} \text{ эрг см}^{-3} \quad (1.94)$$

Температура низкочастотной оставляющей КМФ рассчитывается, как и (1.93), с помощью постоянной Стефана-Больцмана:

$$T_{LMB} = (\rho_{LMB} / \sigma^*)^{1/4} = 0.41 \text{ K} \quad (1.95)$$

Суммарная плотность энергии КМФ и соответствующая температура КМФ могут быть рассчитаны по формулам:

$$\rho_{CMB} = \rho_{HMB} + \rho_{LMB} = \rho_E \cdot e^4 / c^2 \hbar^2 \cdot (1 + m_e / m_p) = 3.931 \cdot 10^{-13} \text{ эрг см}^{-3} \quad (1.96)$$

$$T_{CMB} = (\rho_{CMB} / \sigma^*)^{1/4} = 2.685 \text{ K} \quad (1.97)$$

Теоретическая оценка температуры КМФ (1.97) хорошо соответствует наблюдениям, например, отличаясь менее чем на 2% от температуры:  $T_{CMB} = 2.728 \pm 0.004 \text{ K}$ , измеренной в проекте *COBE* (*NASA Cosmic Background Explorer satellite, 1989–1996*)<sup>40</sup>.

Предсказание существования не одной, а **двух составляющих космического микроволнового излучения с разными температурами** (1.93): 2.684K и (1.95):0.41K незначительно меняет оценку средней температуры КМФ, но позволяет предвидеть новое физическое явление. **Сложение двух черно-тельных спектров излучений с разными средними температурами должно обуславливать спектральную и тепловую асимметрию КМФ** (Таганов 2008 [69–71]).

## 1.7 Тепловая асимметрия космического микроволнового фона

Сравнивая высокочастотную (*HMB*) составляющую КМФ с низкочастотной (*LMB*) можно отметить, что если максимальная интенсивность *HMB* соответствует частоте  $\nu_{HMB}^{\max} = 159 \text{ ГГц}$  и длине волны  $\lambda_{HMB}^{\max} = 0.189 \text{ см.}$ , то соответствующие значения для *LMB*:  $\nu_{LMB}^{\max} = 24.1 \text{ ГГц}$  и  $\lambda_{LMB}^{\max} = 1.243 \text{ см.}$  Отношение максимальных интенсивностей *LMB* и *HMB* в спектре КМФ:  $I_{LMB}^{\max} / I_{HMB}^{\max} = (T_{LMB} / T_{HMB})^3 = 3.5 \cdot 10^{-3}$ . Средняя температура КМФ несколько выше температуры (1.93) доминирующего высокочастотного излучения:  $T_{CMB} - T_{HMB} = 0.35 \text{ мК.}$  В КМФ излучения *HMB* и *LMB* суммируются и на длине волны максимальной интенсивности *LMB* ( $\lambda_{SMB}^{\max} = 1.243 \text{ см.}$ ) в спектре КМФ должен формироваться небольшой «горб».

Существование двух излучений с различными температурами, формирующих КМФ, обуславливает **асимметрию спектральной температуры** КМФ. Разница спектров КМФ и доминирующего высокочастотного излучения определяется спектром низкочастотного *LMB*-излучения:

$$I_{LMB}(\nu; T_{LMB}) = 2h\nu^3 / c^2 \cdot [\exp(h\nu / k_B T_{LMB}) - 1]^{-1} \quad (1.98)$$

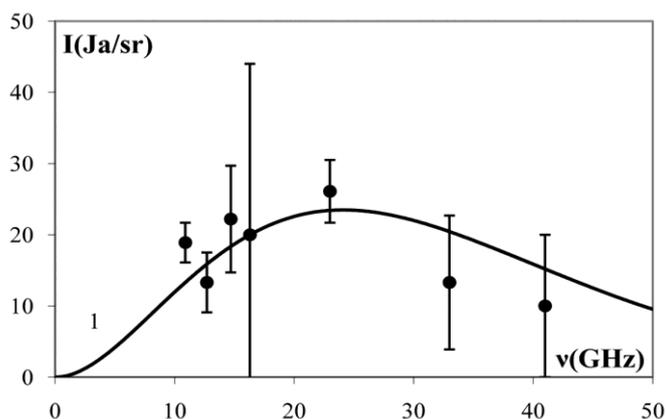
С помощью формул (1.92–1.95) можно получить лаконичную оценку температурной асимметрии или «низкочастотного перегрева» КМФ:

$$A_{CMB} = T_{LMB} / T_{HMB} = 0.41 / 2.684 = (m_e / m_p)^{1/4} = 0.153 \quad (1.99)$$

<sup>40</sup> Fixsen, D.J., Cheng, E.S., Gales, J.M., Mather, J.C., Shafer, R.A. and Wright, E.L. The cosmic microwave background spectrum from the full COBE FIRAS data set // *ApJ* (1996), 473; 576 - 587.

Превышение интенсивности КМФ по сравнению с интенсивностью доминирующего *HMB* излучения существенно только в низкочастотном диапазоне – оно возрастает с уменьшением частоты от 1% для 25 ГГц до 10% для 5 ГГц.

Температурная асимметрия КМФ или низкочастотный перегрев КМФ не противоречит точным измерениям *FIRAS (the Far-Infrared Absolute Spectrophotometer)* на борту спутника *COBE*, которые позволили оценить отклонение формы спектра КМФ от спектра излучения черного тела – не более  $5 \cdot 10^{-5}$ . Но эти измерения производились только в высокочастотном диапазоне 60–600 ГГц, в котором относительная интенсивность низкочастотного излучения (1.98) менее  $10^{-5}$ .



**Рис. 1.7** Оценки плотности потока (Янсий/стерад.) низкочастотной составляющей КМФ с использованием данных *COSMOSOMAS*, *WMAP* и *DIRBE08* для  $|b| > 30^\circ$  (рис. 17 в [49]). Сплошная кривая 1 это теоретическая оценка по (1.98).

Предсказанный в КЗВ теоретически низкочастотный перегрев КМФ уже был зарегистрирован в эксперименте *COSMOSOMAS (COSMOlogical Structures On Medium Angular Scales; Teide Observatory, Tenerife, Spain)* [49]. В этих исследованиях было обнаружено стабильное излучение в диапазоне частот 11–33 ГГц с интенсивностью 3–6  $\mu K$  при 11 ГГц. При этом КМФ с предполагаемой температурой 2.728 К регистрировался в этом диапазоне частот с интенсивностью  $27 \pm 2 \mu K$ . Это дополнительное низкочастотное излучение как раз соответствует теоретической оценке (1.99) низкочастотного перегрева КМФ в исследованном диапазоне частот.

Участники эксперимента *COSMOSOMAS* сообщили, что спектр зарегистрированного ими низкочастотного излучения достаточно хорошо описывается нормальным распределением с максимумом при  $21.7_{-3.7}^{+3.8}$  ГГц и дисперсией  $\sigma = 15.8_{-3.4}^{+4}$  ГГц [49]. Это приближение вполне соответствует предсказанному максимуму *LMB* при 24.1 ГГц. Причем даже лучше, чем нормальным распределением, спектр этого низкочастотного излучения описывается соотношением (1.98) для *LMB*-излучения (кривая 1 на рис. 1.7).

Определяющей чертой космологии с замедляющимся временем, которая рассматривалась в этой главе, является использование асимметричного метрически неоднородного пространства-времени с необратимым физическим временем, наглядным образом которого может служить «расширение» 4-мерного пространства-времени, в отличие от классической космологии, в которой только 3-мерное пространство «расширяется» относительно ньютоновского времени с равномерной и неизменной шкалой.

Космологическая модель с необратимым временем основана на релятивистском постулате универсального постоянства скорости света, который, в свою очередь, является одним из

фундаментальных следствий общего Принципа относительности и квантовой физики фотонов. Соотношение между равномерным ньютоновским и замедляющимся физическим временем было получено с использованием квантовых уравнений Планка и де Бройля с учетом общего Принципа относительности. Поэтому, если феномен «расширения» пространства вселенной считать характерной особенностью классической космологии, то замедление хода физического времени можно рассматривать как специфический релятивистский квантовый феномен в космологии.

Космология с замедляющимся необратимым временем в отличие от других космологических моделей позволяет определить все ключевые космологические параметры как простые функции нескольких фундаментальных констант (табл. 1.1)

**Таблица 1.1** Теоретические оценки ключевых космологических параметров.

Ключевые космологические параметры	Наблюдения	Теоретические оценки КЗВ (Таганов 2008 [35, 69, 70])
Постоянная Хаббла ( $c^{-1}$ ; км/с/Мпк)	(Tammann et al, 2006) $H = 63.2 \pm 1.3$ (Sandage et al, 2006) $H = 62.3 \pm 1.3$	$H = 9G\hbar/16c^2r_e^3 = 1.970 \cdot 10^{-18} c^{-1}$ (61.6 км/с/Мпк) (1.78)
Средняя плотность массы ( $г см^{-3}$ )	$\rho_m = (5 \div 10) \cdot 10^{-30}$	$\rho_m = 9\hbar^2G/64\pi c^4r_e^6 = 8.217 \cdot 10^{-30}$ (1.75, 1.78)
Плотность энергии ( $эрг см^{-3}$ ) и температура (К) космического микроволнового фона	$\rho_{CMB} = 4.19 \cdot 10^{-13}$ эрг $см^{-3}$ $T_{CMB} = 2.73K$	$\rho_{CMB} = \rho_m \cdot e^4/\hbar^2 \cdot (1 + m_e/m_p) = 3.931 \cdot 10^{-13}$ эрг $см^{-3}$ (1.96) $T_{CMB} = (\rho_{CMB}/\sigma)^{1/4} = 2.685K$ (1.97)
Фрактальная размерность крупномасштабной структуры вселенной	$\rho_m \propto r^{-1}$ $D = 2 \pm 0.2$	$\rho_m = (3\hbar/8\pi cr_e^3) \cdot r^{-1} = 1.878 \cdot 10^{-1} \cdot r^{-1}$ г $см^{-3}$ (1.88) $D = 2$ (1.89)

В этих формулах: гравитационная постоянная  $G = 6.674 \cdot 10^{-8} см^3 г^{-1} с^{-2}$ ; постоянная Планка  $\hbar = h/2\pi = 1.055 \cdot 10^{-27}$  эрг с; скорость света в вакууме  $c = 2.998 \cdot 10^{10}$  см  $с^{-1}$ ; элементарный электрический заряд  $e$  ( $e^2 = 2.307 \cdot 10^{-19}$  г  $см^3 с^{-2}$ ); классический радиус электрона  $r_e = e^2/m_e c^2 = 2.818 \cdot 10^{-13}$  см; масса электрона  $m_e = 9.110 \cdot 10^{-28}$  г; масса протона  $m_p = 1.673 \cdot 10^{-24}$  г; константа Стефана-Больцмана  $\sigma = 7.566 \cdot 10^{-15}$  эрг  $см^{-3} К^{-4}$ .

Теоретические оценки релятивистской квантовой космологии решают проблему совпадения «больших» космологических чисел, определяя безразмерный критерий подобия (1.83):  $K_T = 3c/2r_e H = (8e^4/3c\hbar G) \cdot m_e^{-2} = 8.105 \cdot 10^{40}$ , значение которого постоянно во все эпохи. **Вселенная всегда сохраняет физическое подобие микромира и мегамира, которое определяется постоянством отношений соответствующих характеристических масштабов.**

**КОНЕЦ**