

АКАДЕМИЯ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

АСТРОФИЗИКА

ТОМ 10

МАЙ, 1974

ВЫПУСК 2

О СУЩНОСТИ КОСМОЛОГИЧЕСКОГО КРАСНОГО СМЕЩЕНИЯ*

А. Я. КИППЕР

Поступила 17 января 1974

Некоторые особенности красного смещения квазаров, а также несоответствие значения средней плотности материи Вселенной, вычисленной из значения постоянной Хаббла H и непосредственных оценок, показывают, что только 10% красного смещения имеет доплеровский характер, а остальные 90% возникают по другим причинам. Выдвигается гипотеза, согласно которой космологическое красное смещение, хотя бы частично, вызвано старением фотона, причем последнее означает медленное стекание энергии фотона в космологический вакуум. Статья реферирует соответствующие работы автора.

1. *Введение.* Результат проведенного Фридманом исследования, казавшийся поначалу скромным по своей значимости, не привлек бы внимания, если бы вскоре после опубликования работ Фридмана Хабблом не был открыт эффект красного смещения у внегалактических звездных систем. То обстоятельство, что теория предвосхитила наблюдения, заслуженно подняло ее авторитет, даже было затмило критику основ теории, на которых покоились вычисления. Похоже, что дальнейшее развитие космологии, неплохое согласие теории и наблюдений подтвердят правильность выбранного пути. У нас и сейчас нет осно-

* *От редакции.* Как известно, большинство астрономов, и в частности подавляющее большинство астрофизиков-теоретиков, считает доплеровский характер красного смещения в спектрах галактик установленным окончательно. Такого же мнения придерживаются и члены редколлегии настоящего журнала. Тем не менее, возникающие новые попытки объяснения красного смещения обсуждать не бесполезно. Исходя из этого, редакция сочла возможным напечатать эту статью авторитетного астрофизика профессора А. Я. Киппера.

ваний для серьезных сомнений. Можно с удовлетворением отметить превращение космологии в точную, покоящуюся на прочном фундаменте дисциплину.

Значительные успехи в космологии не уведат и не должны увести от раздумий над ее основными принципами и от попыток подойти к проблемам с разных точек зрения. Известно, что между теорией и данными наблюдений в космологии имеется лишь относительное согласие. Уравнения релятивистской космологии связывают между собой численные значения постоянной Хаббла H и среднюю плотность материи Вселенной ρ_0 , причем в эти уравнения входит параметр q — так называемый параметр „замедления“ (deceleration). Если теперь вычислить среднюю плотность материи Вселенной ρ_0 с помощью современного уточненного значения постоянной Хаббла H , взяв за основу более или менее вероятное значение параметра (например, $q = 1$), то значение ρ_0 получится почти в 100 раз большим, чем это следовало бы из непосредственных оценок [1]. Возможно, это обусловлено тем, что большая часть космологической материи находится в несветящемся состоянии, либо тем, что вещество рассеяно в межгалактическом пространстве. Для преодоления трудностей неоднократно предпринимались попытки пересмотреть значение постоянной Хаббла. Считалось также необходимым учитывать возможность изменения со временем способности свечения материи. Кроме того, упомянутый выше параметр q можно выбрать таким, чтобы привести в соответствие численные значения H и ρ_0 . Однако общепринятой гипотезы, устраняющей данное противоречие, еще нет.

Нельзя не упомянуть и другого довольно досадного несоответствия. Взяв за основу наилучшее современное определение постоянной Хаббла $H = 2.4 \cdot 10^{-18} \text{ сек}^{-1}$, получаем, что возраст Вселенной $T = 5.7 \cdot 10^9 \text{ лет}$. Это, несомненно, слишком заниженное значение, так как возраст некоторых галактических звездных скоплений значительно больше [1].

Было сделано несколько попыток устранить указанные противоречия. Наиболее известная из них так называемая гипотеза равновесного состояния (steady state) [2, 3]. Разработано несколько вариантов этой гипотезы. Однако вместо прежних противоречий возникли новые, не менее серьезные.

Изучая особенности красного смещения квазаров, главным образом неоднозначность величины красного смещения z , автор данной статьи выдвинул гипотезу, согласно которой эффект красного смещения у космологических объектов обусловлен, хотя бы частично, по-

глощением электромагнитного излучения в космологическом вакууме. Последнее, в свою очередь, вызвано одним из свойств космологического вакуума — электропроводностью. По этой гипотезе только 10% красного смещения возникает вследствие расширения, остальные 90% вызваны стоком энергии фотонов в космологический вакуум, причем уменьшение энергии фотонов происходит за счет уменьшения частоты колебаний.

Обсуждаемая гипотеза о красном смещении космологических объектов опубликована в работах [4, 5]. К выдвижению данной гипотезы побудило стремление объяснить наблюдаемую у квазаров неоднозначность красного смещения. Поскольку гипотеза затрагивает довольно обширную область космологических проблем, начиная от связи постоянной Хаббла H со средней плотностью материи Вселенной ρ_0 и кончая особенностями спектров поглощения квазаров, то она выходит за пределы частного вопроса о неоднозначности величины z . В цитированных выше работах теория красного смещения основывается на квантовой теории электромагнитных волн в электропроводящей среде. Однако суть явления можно также охарактеризовать как поглощение энергии фотона космологическим вакуумом, или как старение фотона, блуждающего в космологическом пространстве. Эти разные характеристики практически эквивалентны и являются выражением закономерности, присущей фотону. Создавая эту теорию, мы шли по пути, намеченному квантовой теорией, причем пришлось сделать дополнительные допущения, связанные с тем, что теория должна была охватить микропроцессы сверхвысокой продолжительности. В работах [1—5] мы стремились к законченности формально-математического представления. Однако суть гипотезы и вытекающие из нее следствия можно изложить проще. Это и делается в данной статье, причем для получения подробной информации ссылаемся на работы [4, 5].

2. Красное смещение как эффект старения фотонов. Выдвинутая в данной работе гипотеза о сущности космологического красного смещения покоится на двух предположениях. Первое из них основано на известном факте, что частота ν элементарной волны электромагнитного излучения уменьшается со временем t , если рассматривать явления в космологической шкале времени. Этому эффекту дается общеизвестное объяснение как следствие расширения Вселенной. В данной работе считается, что красное смещение является как бы свойством самого фотона, следствием взаимодействия фотона с космологическим вакуумом. Будем называть этот эффект также старением фотона.

Второе предположение, на которое опирается развиваемая в данной работе гипотеза красного смещения, основывается на известном результате квантовой теории о нулевой энергии электромагнитных колебаний. Из последнего предположения вытекает неоднозначность величины красного смещения z .

Известно, что элементарная волна электромагнитного колебания (в смысле разложения Фурье) обладает энергией

$$E = \hbar\omega \cdot \left(n + \frac{1}{2}\right), \quad (1)$$

где n — положительное целое число (связанное с элементарной волной число когерентных фотонов), а величина $\omega = 2\pi\nu$ — частота элементарной волны. Если $n = 0$, то волна не несет доступной измерению энергии и ее невозможно обнаружить непосредственно из эксперимента. Несмотря на это, согласно уравнению (1), энергия волны существует и она должна проявлять себя косвенно через другие явления. Волну с числом фотонов $n = 0$ называют волной нулевого состояния, а соответствующую энергию — нулевой энергией. Элементарную волну с числом когерентных фотонов $n \neq 0$ назовем возбужденной волной. Возбужденная волна наблюдается.

Каждая возбужденная волна, отдавая полностью свою доступную измерениям и связанную с фотонами энергию, переходит в нулевое состояние. И в свою очередь волна нулевого состояния, получив необходимую энергию от какой-нибудь микросистемы, например от атома, превращается в возбужденную элементарную волну. Отсюда вытекает представление, что вся Вселенная заполнена электромагнитными волнами нулевого состояния и возбужденными волнами. Последние возникли из волн, находившихся в нулевом состоянии и могут перейти вновь в нулевое состояние.

Возбужденная элементарная волна, как и все микросистемы, имеет тенденцию освобождаться от возбуждения, переходить в состояние с низкой энергией. Обычный способ избавиться от энергии — отдать приобретенный когда-то квант энергии $\hbar\omega_0$, при этом число фотонов n уменьшается на единицу. Однако для этого необходимо наличие какой-то физической системы, например атома, который был бы способен принять этот квант энергии. В вакууме энергия элементарной волны не может уменьшаться по квантам.

Подавляющая часть Вселенной представляет собой вакуум и должна содержать множество когда-то возбужденных элементарных волн, которые еще не смогли избавиться от приобретенных фотонов. В течение длительного времени они стремятся избавиться от возбуждения.

Происходит, согласно выдвинутой гипотезе, непрерывное и медленное уменьшение энергии элементарной волны в виде красного смещения.

Хотя непрерывное убывание энергии элементарной волны с уменьшением частоты ω происходит медленно, все же наступит момент t_1 , когда вся энергия $\hbar\omega_0$, полученная волной в момент возбуждения t_0 , утратится, стечет в вакуум. Такое убывание энергии представляет собой явление старения. Если бы с волной был связан только один фотон $n = 1$, тогда, начиная с момента t_1 , в вакуум текло бы больше энергии, чем волна получала ее в момент возбуждения t_0 , и фотон продолжал бы существовать. Однако допустимо и то, что в момент t_1 фотон погибает и имеет место переход

$$n = 1 \rightarrow n = 0, \quad (2)$$

без необходимости передачи энергии какой-либо микросистеме. Происходит это потому, что полученная когда-то волной энергия $\hbar\omega_0$, необходимая для рождения фотона, полностью стекла в вакуум и возникли условия для потери фотона. Здесь нет необходимости в наличии какой-либо микросистемы, процесс может произойти и в вакууме. Назовем связанное с волной уменьшение числа фотонов на единицу без сопутствующего переноса энергии спонтанным переходом. Если число фотонов $n = 1$, то спонтанный переход означает переход в нулевое состояние или, другими словами, затухание элементарной волны, доступной измерению. Элементарная волна затухает, если вся энергия возбуждения затрачена на красное смещение.

Допустим, что при $n > 1$ спонтанные переходы в основном происходят при тех же условиях, что и при $n = 1$. В момент t_1 , когда энергия элементарной волны уменьшится точно на величину энергии кванта, которую волна получила при возбуждении в момент t_0 , возможен спонтанный переход

$$n \rightarrow n - 1. \quad (3)$$

После осуществления такого перехода энергия волны будет:

$$\hbar\omega_0 \cdot \left(n - \frac{1}{2} + 1\right) = \hbar\omega_0 \left(n - \frac{1}{2}\right). \quad (4)$$

Волна переходит еще не в нулевое состояние, а лишь в состояние с числом фотонов на единицу меньшим. При этом акт спонтанного перехода следует рассматривать как процесс вновь начинающегося старения волны. Поэтому и в формуле (4) в качестве частоты волны непосредственно после спонтанного перехода взята ω_0 , т.е. частота ω в предыдущий момент возбуждения t_0 .

Если $n = 1$, то в момент t_1 волна затухает, переходит в нулевое состояние. Как изложено выше, спонтанное уменьшение числа фотонов может иметь место и при $n > 2$. В отличие от случая $n = 1$, в момент t_1 при $n > 1$ спонтанного перехода может и не быть. У одних элементарных волн это имеет место, у других нет. Выбор конкретного пути данной волной регулируется определенными статистическими законами так же, как это свойственно многим законам квантовой физики.

Пусть уменьшение частоты волны происходит по закону

$$\omega = \omega_0 \cdot \exp[-4\pi\sigma(t - t_0)], \quad (5)$$

где ω_0 — частота в момент возбуждения t_0 и σ — универсальная постоянная порядка 10^{-17} сек $^{-1}$. Частота ω уменьшается по закону (5) в предположении, что космологический вакуум представляет собой электропроводящую среду с коэффициентом электропроводности σ [4, 5].

Момент $t_1 > t_0$ после момента возбуждения t_0 , когда истрачена энергия $\hbar\omega_0$, полученная при возбуждении и необходимая для увеличения числа фотонов на единицу, можно вычислить с помощью уравнения

$$\hbar\omega_0 \left(n + \frac{1}{2}\right) - \hbar\omega_0 \cdot \exp[-4\pi\sigma(t - t_0)] \cdot \left(n + \frac{1}{2}\right) = \hbar\omega_0, \quad (6)$$

которое дает

$$t_1 - t_0 = \frac{1}{4\pi\sigma} \ln \frac{2n + 1}{2n - 1}. \quad (7)$$

В момент t_1 тогда возможен переход $n \rightarrow n - 1$ в вакууме без сопутствующего изменения энергии. Вместе с тем t_1 является моментом нового возбуждения, когда восстанавливается первоначальная частота ω_0 элементарной волны. Вследствие последнего обстоятельства исчезает и красное смещение. Из формулы (7) следует также неоднозначность красного смещения z , так как n может принимать различные целочисленные значения и красное смещение может затухать в различные дискретные моменты t_1 после момента возбуждения t_0 .

Неоднозначность величины красного смещения представляет собой тот эффект, который позволяет с помощью наблюдательных данных контролировать обоснованность изложенной в данной работе гипотезы. Соответствующие формулы выведены автором в работе [6].

Пусть λ_{lab} — длина волны спектральной линии какого-то элемента по лабораторным измерениям и $\lambda_{обк}$ — длина волны той же линии того же элемента в спектре поглощения космологического объекта. Вследствие неоднозначности величины красного смещения z одной λ_{lab} соответствует несколько $\lambda_{обк}$. Выведена формула

$$\lg \lambda_{obs} = \lg \lambda_{lab} + \lg(1 + z_{em}) - \lg \frac{2n + 1}{2(n - k) + 1}, \quad (8)$$

где n и k — целые числа, n — число фотонов, а z_{em} — полученная по эмиссионным линиям величина красного смещения космологического объекта. Если $k = 0$, то получим

$$\lg \lambda_{obs} = \lg \lambda_{lab} + \lg(1 + z_{em}), \quad (9)$$

что указывает на наличие в спектре космологического объекта линий поглощения, которые приводят к z_{abs} , равным полученным по эмиссионным линиям z_{em} , причем z_{abs} есть величина красного смещения, полученная измерением абсорбционных линий. Если $k = 1$, то формула (8) дает

$$\lg \lambda_{obs} = \lg \lambda_{lab} + \lg(1 + z_{em}) - \lg \frac{2n + 1}{2n - 1}, \quad (\text{серия I}) \quad (10)$$

если $k = 2$, тогда

$$\lg \lambda_{obs} = \lg \lambda_{lab} + \lg(1 + z_{em}) - \lg \frac{2n + 1}{2n - 3}. \quad (\text{серия II}) \quad (11)$$

В соответствии с приведенными формулами определенная спектральная линия некоторого элемента выступает в спектре поглощения космологического объекта как ряд линий. Формула (9) прежде всего показывает, что в спектре поглощения имеются линии, которые совпадают с эмиссионными линиями и на фоне последних могут быть видны при благоприятных условиях наблюдения. Формулы же (10) и (11) показывают, что при различных значениях целого числа n линия поглощения вследствие неоднозначности красного смещения превращается в целое множество спектральных линий с различной длиной волны, так что можно применить название „серия“.

Формулами (8), (9) и (10) удобно пользоваться при проверке гипотезы по результатам наблюдений. Это сделано для квазаров 4C 05.34, PKS 0237—23, TON 1530 и 3C 191 [6]. Как можно было ожидать, наилучшее согласие с данными наблюдений отмечается у линии L_{α} водорода. Другие линии также приводят к удовлетворительным результатам. Проявляется закономерность, по которой количество линий в спектре поглощения заметно возрастает при $z \geq 2$. Согласие между λ_{obs} и вычисленной $\lambda_{теор}$ находится в пределах $\pm 0.1\%$.

3. Замечания к гипотезам, объясняющим неоднозначность величины красного смещения. Неоднозначность величины красного смещения линии поглощения z_{abs} далеких космологических объектов явля-

ется эффектом, который, согласно выдвинутой в данной статье гипотезе, обусловлен природой самого фотона. Однако имеются другие мнения относительно причины упомянутой неоднозначности. Утверждается, например, что несколько z_{ab} у одного и того же объекта вызваны движением нескольких газовых облаков, выброшенных с различной скоростью из квазаров. Предполагается также, что между квазаром и наблюдателем находятся несколько космологических газовых облаков. Спектры поглощения отдельных облаков, находящихся на различных расстояниях от наблюдателя, по-разному смещены в красную сторону спектра.

Для оценки достоверности упомянутых гипотез следует обратиться к фактам, вытекающим из наблюдений.

При значениях z_{em} менее 1.9 линии поглощения либо отсутствуют, либо их немного. При величине z_{em} , равной 1.9 или превышающей это значение, число линий поглощения быстро растет, достигая, например, при $z_{em} = 2.88$ уже значения порядка сотни. Однако следует отметить, что число квазаров с $z > 2$ мало и не увеличивается так, как в случае, если z служило бы мерой расстояния до квазаров. Поэтому квазаров, богатых абсорбционными линиями, сравнительно мало.

Линии поглощения квазаров большей частью резкие, напоминают линии поглощения обычных звезд. Поэтому их длины волн легко измеряемы, что позволяет определить z_{ab} с точностью до нескольких значащих цифр, намного превышающей точность определения z_{em} . Среди линий поглощения встречаются сильные линии, у которых остаточная интенсивность мала.

В свете вышеизложенных фактов гипотеза, объясняющая неоднозначность z_{ab} у квазаров наличием нескольких газовых облаков между наблюдателем и объектом, не оправдывается. Следует отметить, что такие газовые облака должны иметь и космологические размеры. В противном случае их попадание на луч зрения квазара имело бы слишком малую вероятность. Однако газовое облако космологических размеров не может вызывать резких линий поглощения в силу дифференциального красного смещения. Спектральные линии, которые возникают на более удаленном крае туманности, обладают большим красным смещением, чем возникающие на ближнем крае. Дифференциальное красное смещение приводит к размытым спектральным линиям в спектрах туманностей с космологическими размерами.

Примечательно, что неоднозначность z_{ab} резко возрастает с ростом z_{em} , если $z_{em} \geq 1.95$, и этот рост значительно круче, чем можно было ожидать в случае, если бы спектры поглощения вызывались более или менее однородно распределенными в пространстве газовыми

облаками. Остается также непонятным почти полное отсутствие квазаров с абсорбционными спектрами при $z_{\text{em}} < 1.8$, хотя есть квазары с неоднозначным значением z_{ab} , имеющие $z_{\text{ab}} < 1.8$.

Кажется также, что гипотеза, по которой неоднозначность z_{ab} вызвана выбросом из квазаров газовых потоков с различными скоростями, не согласуется с резкостью спектральных линий поглощения. Скорости выброса должны быть большими, сравнимыми со скоростью света. Расширение спектральных линий при этом неминуемо ввиду неизбежных турбулентных движений.

Гипотеза о причине неоднозначности z , представленная в данной статье, свободна от вышеуказанных трудностей, за исключением тех, которые возникают в связи с малой остаточной интенсивностью некоторых спектральных линий у наблюдаемых квазаров. Ведь по гипотезе, изложенной в данной работе, наблюдаемый спектр квазаров образуется как результат наложения одиночных спектров, смещенных как целое относительно друг друга. При этом остаточные интенсивности спектральных линий не могут быть малыми, за исключением случая, когда взаимное смещение спектров значительно. Однако это противоречие не столь серьезное, чтобы опровергнуть гипотезу. Квазары с большим z , у которых z_{ab} многозначно, имеют в спектре поглощения главным образом линию L_{α} водорода. Но эта линия настолько интенсивна, что и при вышеупомянутом относительном смещении спектров она выступает еще достаточно отчетливо.

Малое значение остаточной интенсивности спектральных линий квазаров частично не противоречит гипотезам, по которым неоднозначность z_{ab} вызвана либо несколькими газовыми потоками, выброшенными из объекта и движущимися с различными скоростями, либо газовыми облаками, находящимися на различных расстояниях между объектом и наблюдателем. Однако в этих случаях следовало бы ожидать для L_{α} гораздо больших интенсивностей, чем наблюдается в действительности. Следует отметить, что в эмиссионном спектре квазаров L_{α} особенно сильная, что подчеркивает значение водорода в формировании также спектра поглощения.

Неоднозначность z проявляется при $z > 2.5$, когда линия L_{α} водорода находится в видимой части спектра. Не исключена возможность, что в этом случае большинство линий поглощения спектров квазаров принадлежат именно L_{α} в различных сериях. Приводимая таблица 1 составлена для I серии линии L_{α} и показывает соответствие между теорией и наблюдениями. В спектрах упомянутых квазаров имеются и другие серии линии L_{α} , а также линии других элементов. Соответствующие вычисления таблицы даны в работе автора [6].

Таблица 1

ЛИНИЯ L_{α} , СЕРИЯ I В СПЕКТРЕ КВАЗАРОВ 4C 05.34,
PKS 0237-23 И TON 1530

n	Наблюдаемое $\lg \lambda_{\text{obs}} - R$				$\lg \lambda_{\text{obs}} - \lg \frac{2n+1}{2n-1}$	$\Delta \cdot 10^4$
	4C 05.34 $R=0.5885$	PKS 0237-23 $R=0.5068$	TON 1530 $R=0.4838$	среднее		
4	2.9760(2)			2.9760	2.9757	+3
5	2.9963(1)			2.9963	2.9977	-14
6	3.0120(2)			3.0120	2.0123	-3
7	3.0226(1)			3.0226	3.0227	-1
8	3.0309(1)	3.0304(3)	3.0300(2)	3.0305	3.0305	0
9	3.0363(2)	3.0374(5)	3.0359(1)	3.0365	3.0365	0
10	3.0406(2)	3.0404(5)	3.0416(2)	3.0409	3.0411	-2
11	3.0454(1)	3.0456(4)		3.0455	3.0453	+2
12	3.0480(3)	3.0486(3)		3.0483	3.0486	-3
13	3.0516(5)	3.0506(3)		3.0511	3.0514	-3
14	3.0531(2)			3.0531	3.0538	-7
15	3.0541(1)	3.0567(3)		3.0554	3.0559	-5
16	3.0572(4)	3.0578(3)		3.0575	3.0572	+3
17	3.0587(3)	3.0597(1)	3.0586(3)	3.0590	3.0593	-3
18	3.0600(0)	3.0608(3)		3.0604	3.0607	-3
19	3.0613(4)	3.0618(2)	3.0614(2)	3.0615	3.0620	-5
20	3.0626(2)	3.0634(2)		3.0630	3.0631	-1
21		3.0642(4)		3.0642	3.0641	+1
22	3.0650(3)			3.0650	3.0651	-1
23	3.0650(3)			3.0650	3.0659	-9
24	3.0666(1)	3.0670(1)		3.0668	3.0667	+1
∞	3.0846(5)	3.0848(1)		3.0847	3.0848	-1

Примечания к таблице

Таблица составлена для проверки формулы (10). В 1 столбце дается число n в этой формуле. Во 2-4 столбцах дается $\lg \lambda_{\text{obs}} - R$ для трех квазаров, причем

$$R = \lg(1 + z_{\text{em}}).$$

В следующем столбце дано среднее значение этих чисел. По формуле (10) оно должно равняться

$$\lg \lambda_{\text{lab}} - \lg \frac{2n+1}{2n-1}.$$

Это значение дается в столбце 6. В последнем столбце приводится разность между числами 3 и 4 столбцов.

Институт астрофизики и физики атмосферы
АН ЭССР

ON THE ESSENCE OF COSMOLOGICAL REDSHIFT

A. Ya. KIPPER

Some peculiarities of the redshift of quasars as well as the difference between the values of the mean density of matter of the Universe ρ_0 obtained immediately and calculated from the Hubble constant H show that only 10 per cent of the redshift may be considered as a result of the Doppler effect, the remaining 90 per cent arise due to other reasons. A hypothesis has been developed according to which the cosmological redshift can be treated, at least partially, as a result of the light quantum „fatigue“, i. e. the continuous dissipation of the energy in the cosmological vacuum.

The article gives a review of the corresponding papers of the author.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. W. A. Baum, A. J., 62, 6; 1957; Observatory, 81, 114, 1961.
2. H. Bondy, T. Gold, M. N., 108, 252, 1948.
3. W. Davidson, J. V. Narlikar, Cosmological models and their observational validation, Progress in Physics, Astrophysics, New York—Amsterdam, 1959, p. 571.
4. А. Я. Киппер, Публ. Тартуской обс., 40, 12, 1972.
5. А. Я. Киппер, Публ. Тартуской обс., 40, 74, 1972.
6. А. Я. Киппер, Публ. Тартуской обс., 41, 1973.