

Аннотация

Вселенная расширяется и однажды реликтовые фотоны станут невидимы, не смогут достичь Земли от горизонта Вселенной.

Два рода горизонтов видимости Вселенной

Реликтовое излучение испытывает такое же красное смещение, как и любое другое излучение. В наши дни мы фиксируем только реликтовое излучение в возрасте около 14 млрд. лет. Именно столько лет излучение шло до нас с момента образования Вселенной.

Вместе с излучением далёкого квазара, например, в возрасте 12 млрд. лет до нас доходит и реликтовое излучение, имевшееся рядом с ним на тот момент. Точно также свет от галактики в возрасте 1 млрд. лет доходит до нас вместе с таким же реликтовым излучением, оказавшимся рядом с ним на момент излучения. Почему же мы видим разницу в излучении квазара и галактики, но не видим такой же разницы в реликтовом излучении? Дело в том, что спектры галактики и квазара позволяет выделить в них характерные линии, по которым и определяется различное красное смещение, характеризующее удалённость объекта. Напротив, спектр реликтового излучения «чистый», он совпадает со спектром излучения абсолютно черного тела и не имеет таких же опознавательных «маркеров».

С каждой новой «порцией» излучения квазара или галактики мы получаем одно и то же соответствующее их скорости красное смещение. Напротив, реликтовое излучение для каждой новой порции излучения звёзд всегда новое, всё более древнее, поскольку точка расположения звезды удаляется медленнее, медленнее «старее», чем поток фотонов реликтового излучения. С каждой новой порцией излучения звезды из этой же точки пространства к нам движутся всё более и более «старые» фотоны реликтового излучения, из всё более удаленных точек пространства. Это похоже на то, как если бы некий источник испускал фотоны реликтового излучения, сам удаляясь при этом со строго световой скоростью.

Реликтовое излучение не имеет спектральных «маркеров», но оно имеет собственную характеристику. Это температура или длина волны. Поскольку к нам приходят фотоны реликтового излучения от всё более и более удалённых точек пространства, то, очевидно, каждая новая порция фотонов должна испытать всё большее и большее красное смещение. То есть, наблюдаемое реликтовое излучение должно постоянно и непрерывно снижать свою температуру или увеличивать длины волн.

Известно, что для астрономических наблюдений существует своеобразный горизонт, физическое расстояние, на котором возможно наблюдение объектов Вселенной. Это такое расстояние, на котором объекты удаляются со

сверхсветовой скоростью, поэтому свет от них не может достичь наблюдателя на Земле. Конечно, космологические объекты удаляются не в результате механического движения, это запрещает теория относительности. Они удаляются за счёт увеличения самого пространства, эквивалентного увеличению расстояния. Для удобства последующих расчетов примем значение постоянной Хаббла в световых единицах: $H=68 \times 10^{-12}$ (сг/год)/сг [1], а скорость света $c=1$ сг/год. Для нынешнего значения постоянной Хаббла расстояние до горизонта, на котором скорость объектов равна скорости света, очевидно, равно:

$$c = H \times r$$

откуда

$$r = \frac{c}{H} = \frac{1}{68 \times 10^{-12}} = 0,0147 \times 10^{12} = 14,7 \times 10^9 \text{ сг}$$

Эта величина численно поразительно близко совпадает с возрастом Вселенной – 13,7 млрд. лет. Считается, то радиус наблюдаемой части Вселенной также равен примерно 14 млрд. световых лет. Поэтому можно сделать вывод, что всего через 1 млрд. лет мы перестанем видеть реликтовое излучение. В самом деле, через 1 млрд. лет всё реликтовое излучение, существующее с момента «просветления» за это время должно достичь Земли. Источники света – квазары, галактики, реликтовое излучения, находящиеся за пределами этого радиуса не будут видны, свет от них будет удаляться от нас. Другими словами, зона «черноты» находится от нас на расстоянии ок. 15 млрд. световых лет.

Однако, это решение прямолинейное, «в лоб». На самом деле всё это время Земля будет удаляться от этого «края Вселенной». Из уравнений общей теории относительности известно соотношение для постоянной Хаббла H , которое является релятивистским выражением уравнения закона Хаббла:

$$H = \frac{\dot{a}}{a} \quad (1)$$

где a – масштабный фактор.

Масштабный фактор как раз и отражает факт расширения пространства Вселенной, указывает, что при этом собственного движения звёзд и галактик нет. Расширяется само пространство, поэтому их пространственные координаты остаются неизменными (возможные случайные скорости мы не рассматриваем), а изменяется масштаб этих координат. Из соотношения (1) следует, что уравнение для масштабного фактора имеет вид:

$$a = a_0 e^{Ht} \quad (2)$$

Действительно, лишь в этом случае:

$$\frac{\dot{a}}{a} = \frac{H a_0 e^{Ht}}{a_0 e^{Ht}} = H$$

Подставим в уравнение (2) известные значения величин:

$$a = a_0 e^{Ht} \Rightarrow 14,7 \times 10^9 = a_0 e^{68 \times 10^{-12} \times 13,8 \times 10^9} \quad (3)$$

и вычислим:

$$14,7 \times 10^9 = a_0 e^{68 \times 10^{-12} \times 13,8 \times 10^9} = a_0 e^{0,68 \times 1,38} \approx a_0 e = 2,72 a_0$$

откуда находим:

$$a_0 \approx 5,40 \times 10^9$$

и подставляем в уравнение (3):

$$a = 5,4 \times 10^9 e^{68 \times 10^{-12} t} \quad (4)$$

Это уравнение соответствует случаю хаббловского движения сверхсветового «края» Вселенной от Большого Взрыва до наших дней и его положению в наши дни на расстоянии 14,7 млрд. световых лет от Земли. Действительно, подставив в уравнение (4) возраст Вселенной, получим:

$$a = 5,4 \times 10^9 e^{68 \times 10^{-12} \times 13,7 \times 10^9} \approx 14,7 \times 10^9$$

Теперь мы можем написать уравнение движения «края», начиная с этого момента:

$$r = 5,4 \times 10^9 e^{68 \times 10^{-12} (13,7 \times 10^9 + t)} = 14,7 \times 10^9 e^{68 \times 10^{-12} t}$$

Легко убедиться, что это верное уравнение. В начальный момент времени $t=0$, то есть, начиная от наших дней, край находится на расстоянии:

$$r_0 = 14,7 \times 10^9 e^{68 \times 10^{-12} \times 0} = 14,7 \times 10^9$$

Движение его происходит по закону Хаббла:

$$\frac{\dot{a}}{a} = \frac{H \times 14,7 \times 10^9 e^{Ht}}{14,7 \times 10^9 e^{Ht}} = H$$

За некоторое время t_1 свет, испущенный галактикой на краю Вселенной, или фотоны реликтового излучения из этой области достигнут Земли. При этом они пройдут путь:

$$r_1 = ct_1$$

Очевидно, что за это же время Земля по отношению к краю движется по такому же закону Хаббла и удалится от края за это время на это расстояние

$$r_1 = 14,7 \times 10^9 e^{68 \times 10^{-12} t_1}$$

Следовательно:

$$ct_1 = 14,7 \times 10^9 e^{68 \times 10^{-12} t_1}$$

Поскольку $c=1$ в принятой системе единиц (индекс у времени отбрасываем):

$$t = 14,7 \times 10^9 e^{68 \times 10^{-12} t}$$

Можно сказать, что это уравнение общего вида, описывающее движение области Вселенной, удалённой в настоящее время от Земли на расстояние 14,7 млрд. световых лет. В общем виде подобные уравнения, очевидно, имеют вид:

$$r = r_0 e^{68 \times 10^{-12} t}$$

Здесь r_0 – это расстояние до рассматриваемой области в наши дни. Анализ уравнения для $r_0=14,7 \times 10^9$ показал, что оно не имеет решения. От «края» на таком удалении свет до Земли не дойдёт никогда. Решение может быть получено только для уравнения «края», в котором максимальное значение $r_0 < 5,41 \times 10^9$.

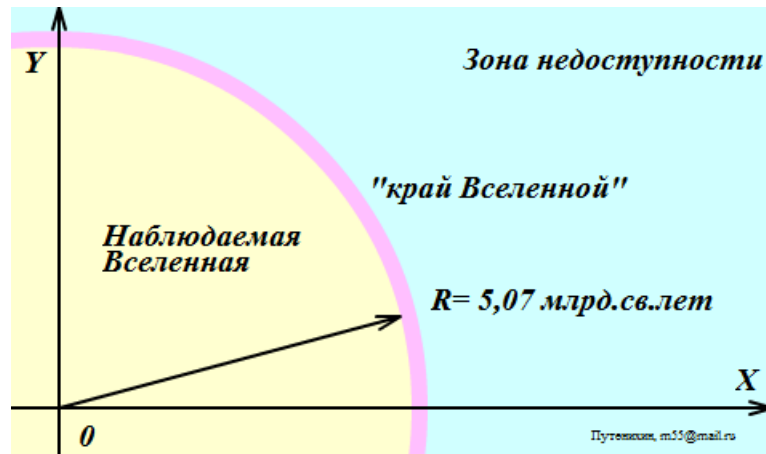


Рис.1 Максимально доступное для наблюдения расстояние во Вселенной

Предельное уравнение движения «края Вселенной» может иметь вид:

$$r = 5,41001112176163 \times 10^9 e^{68 \times 10^{-12} t}$$

Это максимально удалённый «край» Вселенной, фотоны с которого смогут достичь Земли. За время жизни Вселенной фотоны из этой области достигнут Земли, пройдя расстояние:

$$r = 5,41001112176163 \times 10^9 e^{68 \times 10^{-12} \times 13,7 \times 10^9} = 14,7058255862431 \times 10^9 \text{ св. лет}$$

Уравнение приведено с такими чрезмерно точными параметрами исключительно для наглядности из условного предположения, что и использованные постоянная Хаббла и возраст Вселенной имеют такую же точность.

Итак, полученный результат означает, что с принятым хаббловским законом расширения Вселенной за время её существования до Земли могли дойти только фотоны из областей, расположенных не далее $r_0 = 5,4 \times 10^9$ млрд. световых лет. Все более удалённые фотоны в процессе расширения Вселенной неизбежно оказываются «за краем» принципиально доступной для наблюдения области. Напротив, все области, описываемые уравнением с $r_0 < 5,4$ – доступны для наблюдения. Например, для области с уравнением:

$$r = 3,0 \times 10^9 e^{68 \times 10^{-12} t}$$

итерационное решение сходится уже через 30 шагов, поэтому можно привести его полностью:

t_x	$r = 3,0 \times 10^9 e^{68 \times 10^{-12} t}$	t_x	$r = 3,0 \times 10^9 e^{68 \times 10^{-12} t}$
0,00000	3 000 000 000,00000	продолжение таблицы	
3 000 000 000,00000	3 678 894 460,36863	3 915 090 477,56427	3 915 090 483,34999
3 678 894 460,36863	3 852 711 214,32915	3 915 090 483,34999	3 915 090 484,89030
3 852 711 214,32915	3 898 518 664,01586	3 915 090 484,89030	3 915 090 485,30037
3 898 518 664,01586	3 910 681 118,06966	3 915 090 485,30037	3 915 090 485,40954
3 910 681 118,06966	3 913 916 772,50456	3 915 090 485,40954	3 915 090 485,43860
3 913 916 772,50456	3 914 778 024,83647	3 915 090 485,43860	3 915 090 485,44634
3 914 778 024,83647	3 915 007 301,14599	3 915 090 485,44634	3 915 090 485,44840
3 915 007 301,14599	3 915 068 339,67476	3 915 090 485,44840	3 915 090 485,44895
3 915 068 339,67476	3 915 084 589,66927	3 915 090 485,44895	3 915 090 485,44909
3 915 084 589,66927	3 915 088 915,83867	3 915 090 485,44909	3 915 090 485,44913
3 915 088 915,83867	3 915 090 067,57781	3 915 090 485,44913	3 915 090 485,44914
3 915 090 067,57781	3 915 090 374,20087	3 915 090 485,44914	3 915 090 485,44915
3 915 090 374,20087	3 915 090 455,83195	3 915 090 485,44915	3 915 090 485,44915
3 915 090 455,83195	3 915 090 477,56427	3 915 090 485,44915	3 915 090 485,44915

Решение означает, что если в момент излучения звезда находилась на расстоянии 3,0 млрд. световых лет от Земли, то излучение пройдёт путь в 3,915 млрд. световых лет за 3,915 млрд. лет и достигнет Земли. Все уравнения с $r_0 > 5,4$

млрд. световых лет – не сходятся. Это значит, что свет от любого источника – звезды или реликтовое излучение из близлежащей к ней области никогда не достигнут Земли. В связи с этим, видимо, следует ввести два рода горизонтов видимости. Первый – это область, удаляющаяся от наблюдателя со сверхсветовой скоростью. При нынешних значениях постоянной Хаббла – это 14,7 млрд. световых лет. Горизонт видимости второго рода – это расстояние до областей, из которых свет никогда не достигнет наблюдателя вследствие простого хаббловского расширения Вселенной. В наши дни – это примерно 5,41 млрд. световых лет.

Таким образом, следует с осторожностью принимать утверждения, что, например, «свет прибыл из глубин космоса в 12 млрд. световых лет». Однако, бесспорным в этом случае остаётся утверждение, что указанный свет провёл в пути 12 млрд. лет.

Вычислим для примера, каково должно быть удаление источника, чтобы мы могли получить от него излучение, скажем, через 20 млрд. световых лет? В соответствии с общей формой, уравнение движения для такого источника будет иметь вид:

$$r = r_{20} e^{Ht}$$

По условиям примера после Большого Взрыва должно пройти 20 млрд. лет, поэтому:

$$r = r_{20} e^{68 \times 10^{-12} \times 2 \times 10^{10}}$$

Также по заданному условию свет достигнет Земли, следовательно, уравнение итерации должно сойтись и дать решение:

$$2 \times 10^{10} = r_{20} e^{68 \times 10^{-12} \times 2 \times 10^{10}}$$

Откуда находим удалённость источника от Земли в момент излучения:

$$r_{20} = \frac{2 \times 10^{10}}{e^{68 \times 10^{-12} \times 2 \times 10^{10}}} = \frac{2 \times 10^{10}}{e^{1.36}} = 5,13 \times 10^9 \text{ св.лет}$$

Полученное решение означает, что если звезда в момент излучения или фотоны реликтового излучения, пролетавшие мимо звезды, находились от Земли на расстоянии в 5,13 млрд. световых лет, то свет от звезды или фотоны достигнут Земли только через 20 млрд. лет.

Остывание реликтового излучения

В процессе движения к наблюдателю реликтовое излучение, как и свет от звёзд и галактик, испытывает красное смещение. Это смещение, с одной стороны, означает увеличение длины волны света, а с другой – его охлаждение. Известно, что температура наблюдаемого ныне реликтового излучения равна примерно 2,725° по Кельвину.

Очевидно, из логических соображений, что каждая новая «порция» реликтового излучения поступает к нам из всё более и более удалённых областей Вселенной. Следовательно, его красное смещение также должно возрастать. Это расстояние не может быть больше, чем 5,41 млрд. световых лет. Это предельное расстояние. За время, равное возрасту Вселенной, до Земли дошли все без

исключения фотоны реликтового излучения, находящиеся ближе некоторого расстояния r_{\max} . Уравнение движения этой области излучения имеет вид:

$$r_{14} = r_{\max} e^{Ht}$$

Здесь r_{14} – расстояние, которое должен пройти свет за время жизни Вселенной. Это расстояние, очевидно равно:

$$r_{14} = r_{\max} e^{68 \times 10^{-12} \times 13,7 \times 10^9}$$

Этот путь до Земли за это время фотоны прошли со скоростью света $c=1$, следовательно:

$$13,7 \times 10^9 \times c = r_{\max} e^{68 \times 10^{-12} \times 13,7 \times 10^9}$$

Отсюда находим $r_{\max} = 5,07 \times 10^9$ млрд. световых лет и получаем ожидаемый и очевидный результат для уравнения движения:

$$r_{14} = 5,07 \times 10^9 e^{68 \times 10^{-12} t}$$

Вследствие расширения Вселенной температура реликтового излучения снижается. Вычислим, какой она будет, скажем, через 500 млн. лет. Уравнение движения соответствующей области – источника реликтового излучения, из которой оно придёт через это время, принимает вид:

$$13,7 \times 10^9 + 0,5 \times 10^9 = r_0 e^{68 \times 10^{-12} \times (13,7 \times 10^9 + 0,5 \times 10^9)}$$

Вычисляем коэффициент r_0 :

$$r_0 = \frac{14,2 \times 10^9}{e^{68 \times 10^{-12} \times 14,2 \times 10^9}} = \frac{14,2 \times 10^9}{e^{0,966}} = 5,407 \times 10^9 \text{ св.лет}$$

И ставим его в уравнение движения для искомой области:

$$r_{500} = 5,407 \times 10^9 e^{68 \times 10^{-12} t}$$

Уравнение движения отражает изменение масштабного фактора в общей теории относительности. То есть, параметра, соответствующего изменению масштабов во Вселенной в процессе её расширения. А конкретнее, насколько изменились размеры пространства за время расширения. Поэтому уравнение позволяет вычислить, во сколько раз увеличится пространство Вселенной за 500 млн. лет:

$$M_{500} = \frac{r_{500}}{r_{14}} = \frac{5,407 \times 10^9 e^{68 \times 10^{-12} (t+0,5 \times 10^9)}}{5,107 \times 10^9 e^{68 \times 10^{-12} t}} = \frac{5,407 e^{68 \times 10^{-12} \times 0,5 \times 10^9}}{5,107} = 1,095$$

Очевидно, во столько же раз растянутся световые волны или увеличатся их длины. Период 500 млн. лет – достаточно длительный период. Но из него можно определить, как будут увеличиваться длины волн, например, каждые 100 лет. Максимум спектра реликтового излучения приходится на длину волны 1,9 мм. Через 500 млн. лет эта волна будет иметь длину:

$$\lambda_{\max} = 1,9 \times 1,095 = 2,08$$

Следовательно, каждые 100 лет она удлинится на:

$$\Delta\lambda = \frac{2,08 - 1,9}{0,5 \times 10^7} = \frac{0,18}{0,5 \times 10^7} = 3,6 \times 10^{-8} \text{ мм}$$

Соответственно, уменьшается и температура излучения. Столь малая величина означает, видимо, что современными средствами зафиксировать

уменьшение температуры реликтового излучения вследствие расширения Вселенной вряд ли возможно.

Когда прекратится реликтовое излучение

Вычисления, произведённые в данной работе, показали, при неизменности ныне известной величины постоянной Хаббла или, по крайней мере, не увеличении её, доступной областью для наблюдения являются объекты, удалённые не более, чем на 5,41 млрд. световых лет. В наши дни мы наблюдаем реликтовое излучение и свет от удалённых галактик, которые находились от нас в момент излучения на расстоянии не более 5,07 млрд. световых лет. Получается, что пока мы не можем наблюдать лишь тонкий слой сферы в 0,34 млрд. световых лет на момент излучения. Только из этого слоя до Земли пока ещё не дошел ни один фотон.

Можно признать, что при всей громадности этого слоя, количество вещества в нём и число фотонов реликтового излучения ограничено. Поэтому по мере расширения Вселенной интенсивность реликтового излучения будет непрерывно снижаться. Ясно, что «последний фотон» реликтового излучения прилетит на Землю через бесконечно большое время. Но задолго до этого их поток будет заметно снижен. При этом можно с уверенностью предположить, что этот последний, пока не видимый с Земли сферический слой Вселенной уже давно не содержит реликтовых фотонов, движущихся в нашу сторону. Те, что там находятся – удаляются от нас.

Парадокс видимости реликтового излучения

Итак, однажды реликтовое излучение неизбежно окажется за границей наблюдаемости. Всё, что находится дальше этой границы Вселенной, будет в принципе недоступно наблюдению, причём за эту границу будут постоянно уходить всё новые и новые самые удалённые от Земли объекты. Со временем за этой границей окажутся и все области, из которых к Земле приходят фотоны реликтового излучения.

И здесь возникает довольно любопытное обстоятельство. Допустим, что на Земле больше не будет наблюдаться реликтовое излучение. Но Земля – это не уникальное, не особое место во Вселенной. Если реликтовое излучение не наблюдается на Земле, то, вследствие равноправия всех областей Вселенной, реликтовое излучение не должно наблюдаться нигде.

Возникает парадокс, ведь само излучение при этом никуда не исчезло. Оно, конечно, испытает значительное красное смещение и вызванное этим охлаждение. Но фотоны будут по-прежнему летать по Вселенной. Почему же они будут не наблюдаемыми?

Литература

1. Путенихин П.В., Радиус видимой Вселенной, 2015, [на основе общепринятых данных приводится прямое, численное определение видимого радиуса Вселенной,

который отличается от общепризнанного], URL:

http://samlib.ru/editors/p/putenihin_p_w/rw99.shtml

2. Путенихин П.В., Реликтовое излучение – день, когда оно погаснет, 2015, [Вселенная расширяется и однажды реликтовые фотоны станут невидимы, не смогут достичь Земли от горизонта Вселенной], URL:

http://samlib.ru/editors/p/putenihin_p_w/relict.shtml