

Теорема о постоянстве скорости расширения Вселенной

Е.В. Бурлаченко

(Получена 10 марта 2011; изменена 28 марта 2011; опубликована 15 апреля 2011)

Сопоставляя описание расширения Вселенной в двух системах координат – в сопутствующей материи системе координат, относительно которой скопления галактик неподвижны, и в системе координат земного наблюдателя – приходим к выводу, что согласие между ними возможно только в случае расширения Вселенной с постоянной скоростью.

Согласно астрономическим данным, скопления галактик удаляются друг от друга по закону Хаббла:

$$v = Hr,$$

где v – скорость удаления скопления от начала системы отсчета, r – расстояние от начала системы отсчета до скопления, H – постоянная Хаббла. Стандартная интерпретация закона Хаббла заключается в том, что скопления галактик разлетаются по инерции с постоянными скоростями. В этом случае величина $1/H$ равна времени, прошедшему с момента Большого взрыва, т. е. возрасту Вселенной.

Подчеркнем, что закон Хаббла относится к настоящему моменту времени. Входящее в него расстояние r складывается из наблюдаемого расстояния r_n , – местоположения объекта в момент испускания света, – и расстояния, на которое объект успевает удалиться за время прохождения светом наблюдаемого расстояния:

$$r = r_n + r_n v/c,$$

где c – скорость света. Скорости удаления галактик определяются по увеличению длин волн испускаемого ими света. Расстояние до излучающего объекта прямо пропорционально затуханию блеска – величины, связывающей светимость объекта с расстоянием до него. Таким образом, чтобы знать расстояние до объекта, надо знать его светимость. Для измерения расстояний до скоплений галактик в качестве «стандартных свечей» используются самые яркие галактики скоплений – их светимости примерно одинаковы. На больших расстояниях самыми яркими объектами являются квазары и вспышки сверхновых, но их светимости варьируются в широких пределах. Единственное исключение – сверхновые типа Ia. Они венчают эволюцию звезд, параметры которых в точности совпадают, поэтому совпадают и параметры вспышек сверхновых. Было решено использовать их в качестве «стандартных свечей» для проверки закона Хаббла на больших расстояниях. Наблюдения показали, что затухание блеска сверхновых типа Ia в далеких галактиках происходит быстрее ожидаемого. Отсюда астрономы сделали вывод, что далекие галактики находятся от нас дальше, чем им положено быть по закону Хаббла. Ниже будет показана противоречивость этого вывода.

Часто можно услышать, что наблюдаемое нами разбегание галактик является следствием космологического расширения пространства Вселенной. Это так и не так. Космологическое расширение не является абсолютным, не зависящим от координат. В системе координат, связанной с земным наблюдателем, расширения пространства не происходит: скопления галактик разлетаются в разные стороны, двигаясь по геодезическим

линиям, присущим нашей системе отсчета. Пространство расширяется в одной-единственной, сопутствующей скоплениям системе координат. Относительно этой системы скопления галактик неподвижны, – их скорости равны нулю. Будучи, согласно ОТО, гравитационно-инерционными «зарядами», они создают определенное поле, или, что то же самое, – задают определенную пространственную метрику, которая в случае евклидова пространства (наиболее вероятный вариант геометрии Вселенной) имеет вид:

$$(\Delta s)^2 = R^2(t) \left((\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2 \right) - c^2 (\Delta t)^2,$$

где Δs – пространственно-временный интервал, x, y, z – пространственные координаты, ct – временная координата, $R(t)$ – масштабный фактор, – функция времени, изменением которой определяется темп расширения Вселенной.

При движении материального тела по геодезической линии в пространстве-времени с рассматриваемой метрикой (т. е. по прямой, расстояния между точками которой постоянно увеличиваются), его импульс изменяется по закону

$$|p_t| R(t) = const,$$

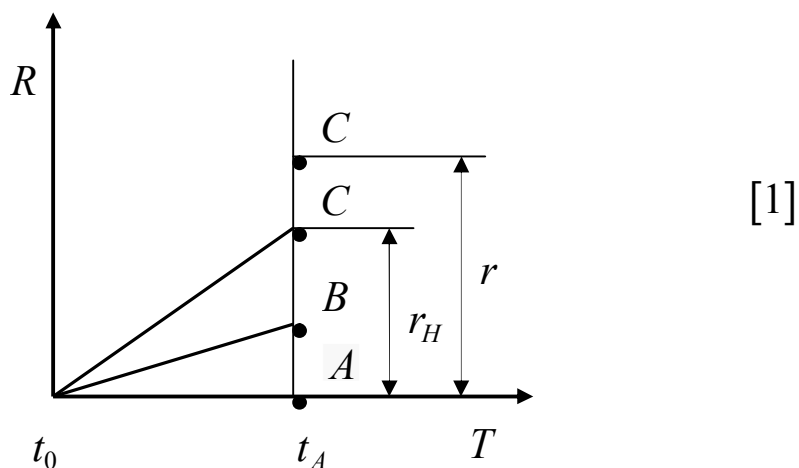
где $|p_t|$ – абсолютная величина импульса тела в момент t . В частности, для длины волны света λ имеем:

$$\frac{R(t)}{\lambda_t} = const.$$

Отсюда видно, что скорость изменения длины волны света на определенном промежутке времени пропорциональна скорости расширения Вселенной на этом же промежутке.

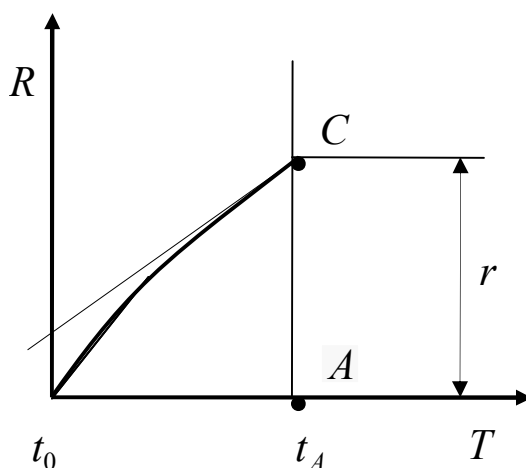
Сопутствующую скоплениям систему координат назовем космологической. Она является как бы коллективным свидетельством наблюдателей, каждый из которых прикреплен к своему скоплению галактик. Ясно, что описание любого события в космологической системе координат не должно противоречить описанию того же события в системе координат, связанной с земным наблюдателем.

Для наглядности не будем делать разницы между галактикой и материей, из которой она в свое время сформировалась. Тогда в системе координат, связанной с галактикой, ее возраст совпадет с возрастом Вселенной. В системе координат земного наблюдателя ситуация графически выглядит следующим образом:



где t_0 – начальный момент расширения Вселенной, $t_A = 1/H$ – настоящий момент, A – наша Галактика, B – относительно близкая галактика для которой выполняется закон Хаббла, C – далекая галактика, r_H – расстояние до галактики C , рассчитанное по закону Хаббла, r – расстояние до галактики C , вытекающее из показаний «стандартных свечей».

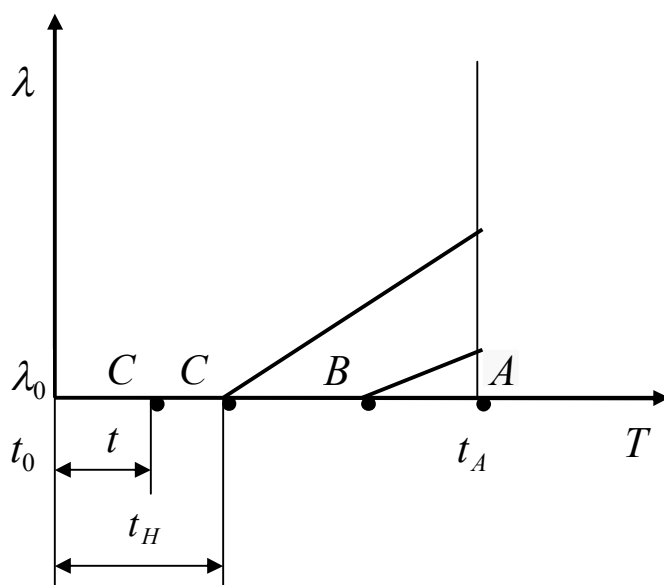
Скорость галактики в момент t_A равна угловому коэффициенту касательной к графику движения галактики в точке его пересечения с осью t_A . Скорость галактики C и точка пересечения графика ее движения с осью t_A нам известны. Проведем через эту точку прямую, параллельную графику движения галактики C , построенному по закону Хаббла, и построим новый график движения галактики C , соответствующий показаниям «стандартных свечей»:



Таким образом, если довериться показаниям «стандартных свечей», то далекие галактики удаляются от нас с замедлением. Это понятно и без графиков: если галактика, имея определенную скорость, находится от нас дальше, чем ей положено быть по закону Хаббла, то весь путь она прошла с большей скоростью, которая к концу пути снизилась до наблюдаемой. Отметим, однако, что согласно специальной теории относительности, чем быстрее удаляется от нас галактика, тем медленнее, по нашим меркам, течет время в связанной с ней системе координат. Следовательно, чем дальше от нас галактика, тем она

моложе. Отсюда может показаться, что торможение далекой галактики C , которое мы наблюдаем в момент t_A , происходило с ней в далеком прошлом. Но нет, – в системе координат, связанной с галактикой C , торможение начинает наша Галактика во время, когда возраст галактики C становится равным t_A . Судить же о скорости любого объекта можно только опираясь на определенную систему координат. В системе координат земного наблюдателя расширение Вселенной замедляется.

Выполнив необходимые преобразования, график движения галактик [1] трансформируем в график изменения длины волны испущенного галактиками света в космологической системе координат:



где A – наша Галактика, B – относительно близкая галактика, для которой закон Хаббла выполняется, C – далекая галактика, t_H – момент испускания света галактикой C , рассчитанный по закону Хаббла, t – момент испускания света галактикой C , вытекающий из показаний «стандартных свечей».

Для того, чтобы построить график изменения длины волны испущенного галактикой света, соответствующий показаниям «стандартных свечей», необходимо поближе познакомиться с космологической системой координат. Систему координат земного наблюдателя и космологическую систему координат будем далее называть системой [1] и системой [2]. Временная ось системы [2] называется космическим временем. Каждый момент времени равен возрасту Вселенной, а значит и возрасту каждой галактики, так как галактики в этой системе координат неподвижны (их скорости относительно скопления галактик в расчет не берутся). Свет, испущенный в системе [2] в момент $t_{[2]}$ и зарегистрированный земным наблюдателем в настоящий момент t_A , двигаясь в расширяющемся пространстве с постоянной скоростью, за время $t_A - t_{[2]}$ проходит расстояние r_A , разделяющее нашу Галактику и источник излучения в настоящий момент в системе [2] (но не в системе [1]; не надо путать r_A с хаббловским расстоянием $r = vt_A$). Т. е. наблюдаемое расстояние, которое свет проходит от источника до наблюдателя в системе [1], в системе [2] растягивается до расстояния, на котором источник находится в

момент прихода света к наблюдателю. Постоянство скорости света обеспечивается метрикой пространства-времени: распространение света описывается уравнением

$$R^2(t) \left((\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2 \right) - c^2 (\Delta t)^2 = 0,$$

так что

$$c(t_2 - t_1) = R(t_2) r_0.$$

Если начало и конец пути света отметить источником и приемником излучения, то r_0 – это расстояние между источником и приемником в нулевой момент времени. Темп изменения функции $R(t)$ произволен, поэтому ситуация на первый взгляд может показаться парадоксальной, но она полностью контролируется приведенным уравнением.

Равенство

$$\frac{R(t)}{\lambda_t} = const$$

означает, что свет, испущенный в момент $t_{[2]}$ с длиной волны λ_0 и этот же свет, зарегистрированный в момент t_A с длиной волны λ , связаны равенством

$$\frac{R(t_{[2]})}{\lambda_0} = \frac{R(t_A)}{\lambda}, \text{ или } \lambda = \lambda_0 \frac{R(t_A)}{R(t_{[2]})}.$$

Расстояние r_A , разделяющее нашу Галактику и источник света в настоящий момент в системе [2], и расстояние $r_{[2]}$, разделяющее их в момент $t_{[2]}$, связаны аналогичным равенством

$$\frac{r_A}{R(t_A)} = \frac{r_{[2]}}{R(t_{[2]})}, \text{ или } r_A = r_{[2]} \frac{R(t_A)}{R(t_{[2]})}.$$

И в космологической системе координат, и в системе координат земного наблюдателя используется один и тот же настоящий момент времени t_A . Отсюда может возникнуть соблазн рассматривать нашу систему координат как местную часть космологической системы. Но это иллюзия. Момент t_A – единственная точка пространства-времени, координаты которой в системах [1] и [2] совпадают. Физически мы не в состоянии проникнуть в систему [2], можем только мысленно присутствовать в ней в качестве метанаблюдателя. Как только мы «физически» свяжем себя с одним из скоплений галактик, т. е. перейдем в связанную с ним систему координат, остальные скопления тут же начнут разлетаться от нас в разные стороны с различными скоростями. Согласно ОТО, в системе координат, связанной с определенным физическим объектом, материя движется так, как велит ей пространственная метрика этой системы. Метрика системы [2] заставляет скопления галактик оставаться в покое, метрика системы [1] заставляет их двигаться. При

этом метрики обеих систем должны быть связанными определенным преобразованием координат.

Оказывается, что закон Хаббла идеально приспособлен для связи между системами [1] и [2]. Наблюдаемое расстояние r_h , на котором находится источник излучения в момент испускания света в системе [1], связано с законом Хаббла $v = r/t_A$ равенством

$$r_h = r - r_h v/c = \frac{vt_A}{1 + v/c}.$$

Следовательно, момент испускания света в системе [1] равен

$$t_{[1]} = t_A - r_h/c = t_A - \frac{vt_A}{(1 + v/c)c} = \frac{t_A}{1 + v/c}.$$

Момент этого же события в системе [2], т. е. возраст галактики в момент испускания света, связан с $t_{[1]}$ релятивистским множителем:

$$t_{[2]} = t_{[1]} \sqrt{1 - v^2/c^2} = t_A \frac{\sqrt{1 - v/c}}{\sqrt{1 + v/c}}.$$

Длины волн испущенного источником и регистрируемого наблюдателем света связаны формулой эффекта Доплера (учитываем, что в законе Хаббла $v > 0$):

$$\lambda = \lambda_0 \frac{\sqrt{1 + v/c}}{\sqrt{1 - v/c}}.$$

Отсюда находим:

$$\lambda = \lambda_0 \frac{\sqrt{1 + v/c}}{\sqrt{1 - v/c}} = \lambda_0 \frac{R(t_A)}{R(t_{[2]})} = \lambda_0 \frac{t_A}{t_{[2]}},$$

$$r_A = r_{[2]} \frac{\sqrt{1 + v/c}}{\sqrt{1 - v/c}} = r_{[2]} \frac{R(t_A)}{R(t_{[2]})} = r_{[2]} \frac{t_A}{t_{[2]}},$$

$$R(t) = at,$$

где a – постоянная.

Из графика [2] видно, что по закону Хаббла скорость изменения длины волны света в системе [2] равна

$$v_\lambda = \frac{\lambda - \lambda_0}{t_A - t_{[2]}} = \frac{\lambda_0 (t_A/t_{[2]} - 1)}{t_A - t_{[2]}} = \frac{\lambda_0}{t_{[2]}} = \frac{\lambda}{t_A}.$$

Длина волны света, в настоящий момент равная ct_A , увеличивается со скоростью света и в любой момент времени равна ct . Можно приравнять к ней масштабный фактор:

$$R(t) = ct.$$

Тогда расстояние между нашей Галактикой и галактикой, удаляющейся от нас со скоростью v , в системе [2] в любой момент времени будет равно

$$r_t = ct \left(1 - \frac{\sqrt{1 - v/c}}{\sqrt{1 + v/c}} \right),$$

так как

$$r_t = R(t)r_0, \quad R(t_A)r_0 = c(t_A - t_{[2]}).$$

Из приведенных равенств видно, что обе системы координат находятся в полной гармонии с законом Хаббла. Эта гармония – весомый аргумент в пользу гипотезы расширения Вселенной с постоянной скоростью, но еще не доказательство. Доказательством являлось бы неустранимое противоречие между системами координат в случае отклонения расширения от закона Хаббла. Покажем, что такое противоречие существует.

Если в системе [1] скорость удаляющейся галактики в момент испускания света равна v , то и в системе [1], и в системе [2] ей соответствует определенная длина световой волны, регистрируемой в настоящий момент t_A :

$$(t_{[1]}, v)_{[1]} \rightarrow (t_A, \lambda)_{[1],[2]},$$

$$\lambda = \lambda_0 \frac{\sqrt{1 + v/c}}{\sqrt{1 - v/c}},$$

где λ_0 – эталонная длина волны. Данное соответствие является основополагающим для согласования систем [1] и [2]. Наблюдаемому расстоянию, на котором от нас находится галактика в момент испускания света в системе [1], в системе [2] соответствует расстояние, на котором от нас находится галактика в настоящий момент t_A . Следовательно, скорости удаления галактики в момент испускания света в системе [1] в системе [2] соответствует скорость увеличения расстояния между нашими галактиками в настоящий момент t_A :

$$(t_{[1]}, v)_{[1]} \rightarrow (t_A, \dot{r}_t)_{[2]},$$

где точка означает производную, т.е. скорость изменения функции. Таким образом, определенной скорости увеличения расстояния между галактиками в момент t_A соответствует определенная длина регистрируемой волны, и, следовательно, определенной длине регистрируемой волны соответствует определенная скорость увеличения длины волны:

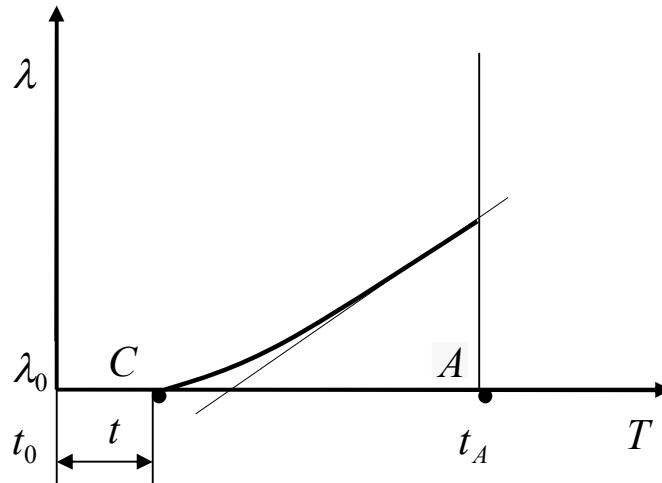
$$(t_A, \dot{r}_t)_{[2]} \rightarrow (t_A, \lambda)_{[2]},$$

$$(t_A, \lambda)_{[2]} \rightarrow (t_A, \dot{\lambda}_t)_{[2]}.$$

Независимо от вида функции $R(t)$, значения \dot{r}_t и $\dot{\lambda}_t$ в момент t_A однозначно определяются величиной \mathcal{V} , и, следовательно, скорость увеличения длины волны в момент t_A равна хаббловской скорости:

$$\dot{\lambda}_A = \frac{\lambda}{t_A}.$$

Теперь, выяснив все детали, мы можем построить график изменения длины волны испущенного галактикой света, соответствующий показаниям «стандартных свечей»:



Угловой коэффициент касательной к графику в точке его пересечения с осью t_A равен λ/t_A , т. е. касательная совпадает с графиком изменения длины волны по закону Хаббла. Видно, что в системе [2] расширение Вселенной ускоряется. Но если бы в системе [2] расширение Вселенной замедлялось (в этом случае далекие галактики оказались бы к нам ближе, чем им положено быть по закону Хаббла), в системе [1] показания опять были бы противоположными. Согласие между космологической системой координат и земным наблюдателем наступает только в случае расширения Вселенной с постоянной скоростью.

Таким образом, теорема о постоянстве скорости расширения Вселенной доказана.