

DOI: 10.22363/2224-7580-2022-2-30-39

РЕЛЯЦИОННОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЗАКОНА ХАББЛА

А.Б. Молчанов *

*Физический факультет Московского государственного университета
имени М.В. Ломоносова
Российская Федерация, 119991, Москва, Ленинские Горы, д. 1, стр. 2*

Аннотация. За последние годы в рамках реляционного подхода к описанию пространства-времени и физических взаимодействий был проведён ряд исследований по обоснованию космологических эффектов. Было показано, что космологическое красное смещение и космический микроволновый фон могут быть результатом вкладов испущенного, но не поглощённого излучения. Однако до настоящего момента в полной мере не был выведен закон Хаббла на основе только реляционных идей. В настоящей работе этот вывод приводится и вычисляется параметр Хаббла в современную эпоху. Для этого рассматриваются вклады импульсов испущенного, но не поглощённого излучения в импульс удалённого астрономического объекта (скопления галактик). Показывается, что учёт этих вкладов приводит к линейному закону Хаббла.

Ключевые слова: Реляционное обоснование, линейный закон Хаббла, испущенное излучение, импульс удаленного астрономического объекта

Введение

Современные исследования в теоретической физике ведутся в рамках трёх парадигм: теоретико-полевой, геометрической и реляционной. В основе первой – лежит идея об описании динамики квантованных полей материи и физических взаимодействий на фоне априорно заданного классического пространства-времени. В геометрической парадигме взаимодействия встраиваются в классическое пространство-время, которое приобретает новые свойства, становясь искривлённым, но продолжая быть самостоятельной независимой конструкцией; ядром этой парадигмы является общая теория относительности (ОТО). В реляционной парадигме описание пространства-времени и физических взаимодействий выстроено на основе трёх аспектов:

1) вторичность пространственно-временных понятий по отношению к закономерностям микромира;

2) применение концепции дальнего действия при описании взаимодействий;

3) принцип Маха в наиболее общей формулировке, выражающей непосредственную связь локальных свойств объектов и глобальных свойств окружающего мира [1].

* E-mail: alexeybm2009@gmail.com

Следует также отметить, что идеи из одной парадигмы могут находить применение в другой, однако, как показывает история развития фундаментальной физики, такие пути приводят к эклектичным результатам.

В настоящее время при решении накопившихся за последние десятилетия проблем фундаментальной физики всё больше физиков-теоретиков обращаются к её основаниям, выдвигая на первый план задачу вывода классических пространственно-временных представлений из более глубоких закономерностей микромира. Исходя из приведённых характеристик названных выше подходов, можно убедиться, что наиболее приемлемым для решения данной задачи является реляционный подход. Поэтому развитие реляционной концепции по всем направлениям, позволяющим взглянуть на фундаментальную физику с трёх сторон, соответствующих трём названным парадигмам, имеет высокий приоритет.

Первый и третий аспекты реляционной парадигмы наиболее ярко проявляются при исследовании основных наблюдаемых космологических эффектов: красного смещения далёких астрономических объектов и космического микроволнового фона. За последние годы был проведён ряд исследований, позволивших дать реляционную интерпретацию названных эффектов [2–4]. Эти исследования, в свою очередь, привели к постановке и разработке методов решения более фундаментальных задач, неразрывно связанных с основаниями физики. В данной работе основные полученные на этом пути результаты дополняются важным выводом о реляционном обосновании закона Хаббла – одного из центральных законов наблюдательной космологии.

На настоящий момент общепринятой для описания космологии является полученная в рамках геометрического подхода модель Λ CDM (Lambda Cold Dark Matter), которая основывается на одном из частных решений уравнений Эйнштейна, найденном А. Фридманом в 1922–1924 гг. В модель входит ненулевая космологическая постоянная Λ , которая связывается с гипотетической расталкивающей субстанцией – тёмной энергией, а также дополнительная ненаблюдаемая (тёмная) материя. Характерной особенностью данного решения является определённый вид зависимости масштабного фактора от космологического времени $a(\tau)$, показывающей, что Вселенная должна расширяться с переменным темпом, когда замедление расширения сменяется ускорением. Темп характеризуется величиной, выраженной отношением производной масштабного фактора по времениподобной координате к нему самому,

$$H = \frac{\dot{a}}{a},$$

которая называется параметром Хаббла. Его значение в современную эпоху обозначается H_0 и является постоянным в любой точке Вселенной.

Масштабный фактор связывает между собой две основные системы отсчёта, с которыми ведётся работа при описании космологии в общей теории относительности (ОТО): *сопутствующую* (когда узлы её координатной сети связаны с материальными объектами) и *собственную* (где координаты определяются только наблюдателем). В частности, это означает, что в

собственных координатах удалённые астрономические объекты движутся относительно наблюдателя со скоростями, определяемыми изменением масштабного фактора, а в сопутствующих – такого движения нет. Любопытно, что в англоязычной литературе собственная система отсчёта называется *proper frame*, то есть буквально «правильная». Это можно трактовать как свидетельство априорности пространства-времени в геометрическом подходе, поскольку здесь «правильность» определяется только наблюдателем, а не всей рассматриваемой системой в целом. В этой связи следует указать на то, что, в соответствии с формализмом методов задания систем отсчёта, наиболее естественной в космологической задаче является сопутствующая система отсчёта, это демонстрируется с использованием метода кинематических инвариантов [5. С. 159]. Данный формализм является реализацией реляционных идей в геометрической парадигме.

В собственных координатах можно записать зависимость скорости удаления астрономического объекта от расстояния до него. В ведущем порядке эта зависимость является линейной:

$$v = H_0 r.$$

Для сравнительно малых расстояний (в несколько сотен Мпк) можно представить это выражение через красное смещение z астрономического объекта:

$$z = \frac{H_0 r}{c}.$$

Это два варианта записи известного закона, открытого американским астрономом Э. Хабблом в 1929 г. В течение всего XX в. значение параметра Хаббла многократно уточнялось, что к настоящему моменту привело к проблеме, известной как «хаббловская напряжённость». Измерения H_0 различными методами дают разные значения, отличие между которыми вплотную приближается к пяти стандартным отклонениям. Так, значение, измеренное по удалённым сверхновым типа Ia, составляет $H_0 = 74,03 \pm 1,42 \frac{\text{км/с}}{\text{Мпк}}$ [6], в то время как по реликтовому излучению $H_0 = 67,4 \pm 0,5 \frac{\text{км/с}}{\text{Мпк}}$ [7]. Известны методики, дающие промежуточные значения.

В 1998–1999 гг. было обнаружено, что при красных смещениях, превышающих примерно 0,1, проявляется нелинейность, так что для корректного описания наблюдений к записанному выражению следует добавить ещё одно слагаемое:

$$z = \frac{H_0 r}{c} + \left(1 + \frac{q_0}{2}\right) \frac{H_0^2 r^2}{c^2},$$

где q_0 – так называемый параметр замедления, который выражается через масштабный фактор и его производные следующим образом (знак минус был выбран, поскольку изначально считалось, что расширение Вселенной замедляется):

$$q_0 = -\frac{\ddot{a}a}{\dot{a}^2}.$$

Этот параметр оказался отрицательным, в результате чего как раз и был сделан выбор в пользу Λ CDM модели. Современное значение параметра замедления составляет $q_0 = -0,53_{-0,13}^{+0,17}$ [8]. С тех пор тёмная энергия и тёмная материя, присутствующие в Λ CDM, являются одними из центральных проблем фундаментальной физики, поскольку к настоящему моменту их существование не было подтверждено прямыми наблюдениями.

Электромагнитное излучение в реляционном подходе

При исследовании космологических эффектов ключевую роль играет регистрируемое наблюдателем электромагнитное излучение, ведь именно по его свойствам делается вывод о том, какая модель должна описывать Вселенную в целом. В реляционном подходе высказывается ещё более сильное утверждение: испущенное, но не поглощённое электромагнитное излучение формирует саму структуру пространства-времени. Для пояснения можно обратиться к вопросу, сформулированному на рубеже 20–30-х гг. XX в. во время диспутов, проводимых в Ленинградском политехническом институте имени А.Ф. Иоффе и посвящённых выбору одной из двух концепций: близкодействия или дальнодействия. Как известно, В.Ф. Миткевич, сторонник концепции близкодействия, задал вопрос Я.И. Френкелю, отстаивавшему дальнодействие, о том, где будет находиться энергия электромагнитного излучения после акта его испускания источником и до момента поглощения приёмником [9].

В рамках реляционного подхода ввиду отсутствия на фундаментальном уровне пространства-времени не существует понятия «где», поэтому ответ может быть дан лишь формально: энергия испущенного, но не поглощённого излучения распределяется по отношениям между излучателем и всеми возможными поглотителями. Поскольку в окружающем мире имеется большое число излучателей и поглотителей и происходит большое число актов испускания и поглощения электромагнитного излучения, при переходе на классический уровень необходимо учитывать всю их суперпозицию. Эта особенность позволила выдвинуть идею о том, что классические пространственно-временные понятия формируются за счёт вкладов испущенного, но не поглощённого электромагнитного излучения.

Также на этой основе стало возможным дать реляционную интерпретацию эффекта космологического красного смещения. При распределении энергии «моря» испущенного, но не поглощённого излучения по отношениям между излучателем и всеми возможными поглотителями наблюдатель будет воспринимать окружающие объекты обладающими этой дополнительной энергией. Её естественно связывать с энергией наблюдаемого космологического расширения. Здесь проявляется существенное различие между геометрическим и реляционным подходами. В геометрическом подходе энергия испущенного излучения распределяется по всему пространству, её плотность

снижается с ростом масштабного фактора (в Λ CDM в современную эпоху её плотность по сравнению с вкладами материи и тёмной энергии пренебрежимо мала). В реляционном подходе энергию испущенного излучения следует считать распределённой по всем возможным поглотителям, поэтому действие излучения на поглощающую материю не должно ослабевать с ростом масштабного фактора.

В одной из предыдущих работ [2] было показано, что плотности энергии испущенного излучения и энергии наблюдаемого расширения оказываются очень близки в области линейности закона Хаббла. Было сделано заключение о том, что линейная часть закона Хаббла может быть обусловлена вкладами испущенного излучения. Это исследование, однако, обладало несколькими недостатками. Во-первых, подобное сравнение, когда кинетическая энергия вычисляется в собственной системе отсчёта, а энергия излучения берётся в сопутствующей системе, справедливо только в ограниченной области пространства. Из-за этого в выражение для плотности кинетической энергии явным образом входила величина, ограничивающая эту область. Во-вторых, обратное рассуждение о совпадении названных плотностей энергий не позволяло вывести сам закон Хаббла. Получить его можно, рассматривая в собственной системе отсчёта вклады импульсов испущенного излучения. В-третьих, в работе [4] вклад космического микроволнового фонового излучения фактически был отождествлён со вкладом излучения всех звёзд. Следовательно, в работе [2] одна и та же энергия была учтена дважды. Исправим описанные недостатки, получив закон Хаббла на основе приведённых выше реляционных идей.

Реляционное обоснование закона Хаббла

Без ограничения общности будем считать, что при поглощении вся энергия переходит в кинетическую и что испускается и поглощается в среднем одинаковое количество излучения. В соответствии с иллюстрацией на рис. 1 рассмотрим астрономический объект, находящийся в точке A на расстоянии r от наблюдателя в начале координат O .

Импульс, обусловленный вкладами испущенного, но не поглощённого излучения, будет определяться только объектами, находящимися внутри сферы радиуса r с центром в точке наблюдения, поскольку для любого излучателя за пределами этой сферы найдётся другой излучатель, компенсирующий его вклад. Рассмотрим излучатель, находящийся в точке B внутри сферы и имеющий сферические координаты (r', θ, φ) . Вклад этого источника в импульс поглотителя $d\vec{p}$ будет направлен по вектору \overrightarrow{BA} , однако, в силу симметрии относительно прямой OA , соединяющей наблюдателя и наблюдаемый объект, после суммирования по всем источникам компоненты импульса, ортогональные данной прямой, будут скомпенсированы. Поэтому достаточно рассматривать только радиальную компоненту dp_r , которая будет вычисляться как $dp \cos \psi$, где ψ – угол между направлениями на источник и на наблюдателя. Определение суммарного вклада всех источников внутри сферы сводится к вычислению интеграла

$$p_r = \frac{4\rho_{rad}}{c} \int_0^\pi \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^r \frac{r'^2 \sin \theta (r - r' \sin \theta \cos \varphi)}{\sqrt{r^2 - 2rr' \sin \theta \cos \varphi + r'^2}} dr' d\theta d\varphi,$$

где ρ_{rad} – плотность энергии испущенного излучения. К настоящему моменту этот интеграл не был взят аналитически, однако для дальнейших рассуждений его будет достаточно рассчитать численно. Кроме того, размерный анализ показывает, что компонента p_r после интегрирования по всем источникам в объёме сферы будет пропорциональна r^3 , в то время как вероятность поглощения одним рассматриваемым объектом является обратно пропорциональной площади сферы (которая определяет число поглотителей на том же расстоянии), то есть r^2 . Таким образом, итоговый импульс, приписываемый астрономическому объекту, будет пропорционален первой степени r , что и означает выполнение закона Хаббла. Выразим это следующим образом.

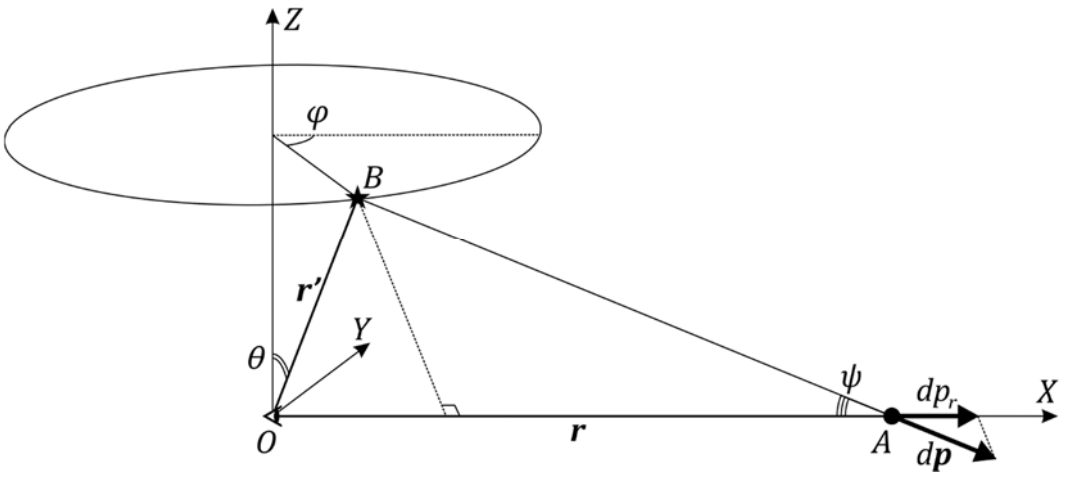


Рис. 1. Вклад излучателя в точке B в импульс поглотителя в точке A

Обозначим за $I(r)$ результат интегрирования с учётом коэффициента 4, так что $p_r = \frac{\rho_{rad}}{c} I(r)$. Пусть в приповерхностном слое малой в сравнении с r толщины Δr находится N поглотителей. Будем считать, что в телесном угле $\Delta\Omega$ в среднем находится один поглотитель, тогда $N = 4\pi/\Delta\Omega$. Массу одного поглотителя m можно выразить через плотность поглощающей материи ρ следующим образом:

$$m = \rho\Delta V = \rho\Delta\Omega r^2 \Delta r,$$

тогда скорость, приписываемая наблюдаемому объекту, будет определяться как

$$v(r) = \frac{p_r}{m} = \frac{\rho_{rad}}{4\pi c \rho \Delta r} \frac{I(r)}{r^2}.$$

С учётом известной плотности поглощающей материи становится возможным получить выражение для H_0 . В этом выражении Δr остаётся неизвестным, однако по своему физическому смыслу данная величина

представляет собой характерный размер одного поглотителя. В космологических масштабах таким поглотителем следует считать не отдельный атом, а гравитационно-связанную систему – скопление галактик, поскольку импульс, поглощаемый одной частицей, находящейся в такой системе, будет в итоге распределён по всем остальным частицам системы. Поэтому численные расчёты были проведены сначала в предположении $\Delta r = 1$ Мпк для нескольких расстояний r от 100 до 1000 Мпк. Плотность энергии излучения, а также плотность поглощающей материи были взяты из данных телескопа «Планк» [7]: $\rho_{rad} = 4,644 \times 10^{-34} \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$, $\rho = 4,694 \times 10^{-31} \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$. Расчёты показали, что закон действительно получается линейным (рис. 2).

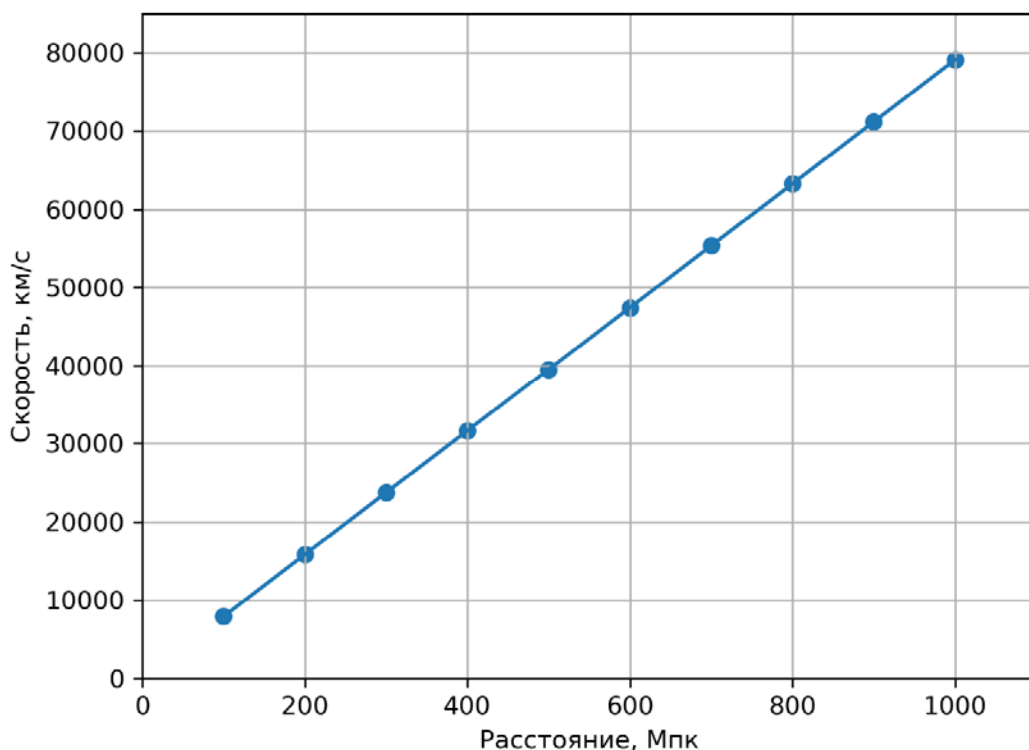


Рис. 2. Диаграмма Хаббла при $\Delta r = 1$ Мпк

Из данной диаграммы сразу видно, что при выбранном Δr постоянная Хаббла H_0 сопоставима с наблюдаемым значением. Поэтому далее значение Δr было подобрано так, чтобы получалась измеренная по удалённым сверхновым типа Ia величина $H_0 = 74,03 \pm 1,42 \frac{\text{км/с}}{\text{Мпк}}$ [5]. Значение Δr оказалось равным $1,07 \pm 0,02$ Мпк, что также сопоставимо с характерными размерами галактических скоплений.

Обсуждение и выводы

Из представленного вывода линейной части закона Хаббла следует, что величина H_0 не является постоянной в каждой точке Вселенной. Напротив, её значение является чувствительным к локальным неоднородностям

распределения поглощающей материи – к характерным размерам галактических скоплений. Это может оказаться одной из причин возникновения хаббловской напряжённости, поскольку разные методы определения H_0 опираются на данные о структурах различного масштаба, в которые входят разные числа скоплений разных размеров. Так, измерения, проведённые по сверхновым типа Ia, охватывают локальные области пространства в пределах нескольких тысяч Мпк, при том что измерения по космическому микроволновому фону могут быть представлены как результат усреднения по большому числу скоплений, выходящему за пределы наблюдаемых в современную эпоху. Если подбирать Δr так, чтобы значение H_0 соответствовало измеренному по микроволновому фону: $H_0 = 67,4 \pm 0,5 \frac{\text{км/с}}{\text{Мпк}}$ [7], то данный параметр окажется $\Delta r = 1,17 \pm 0,02$ Мпк.

Подчеркнём также, что в настоящей работе рассматривалась только линейная часть закона Хаббла. Реляционное обоснование нелинейности было предложено в работе [3]. Основная идея созвучна мысли, высказанной известным математиком П.К. Рашевским о том, что пересчёт больших расстояний в физике не обязан подчиняться существующим аксиомам натурального ряда [10]. Эту идею в своих работах развивал другой советский математик В.Л. Рвачёв, который предложил заменить аксиому Архимеда утверждением о существовании максимального числа и применил полученное «неархимедово» исчисление для описания космологических расстояний. В результате был получен эффект красного смещения, квадратичный по расстоянию в главной асимптотике. В работе [3] было показано, что при такой интерпретации получается правильное значение параметра замедления, если предельное расстояние представляет собой гравитационный радиус наблюдаемой Вселенной.

В упомянутом исследовании, однако, не была указана связь неархимедовости расстояний с описанием испущенного, но не поглощённого излучения в реляционном подходе. На данном этапе ребром встаёт вопрос получения классических пространственно-временных понятий из более глубоких закономерностей микромира. Этот вопрос является главной задачей реляционного подхода. К таким закономерностям следует отнести суперпозицию элементарных вкладов испущенного, но не поглощённого электромагнитного излучения. В последних исследованиях (см., например, [11]) было показано, что задача получения классических расстояний в системе конечного числа атомов водорода представляется как обратная задача суперпозиции вкладов испускаемого и поглощаемого излучения. В прямой задаче по известному взаимному расположению излучателей и поглотителя требуется найти результирующую амплитуду поглощаемого излучения. Для решения этой задачи вычисляются фазовые вклады всех источников (иначе говоря, фазовые отношения между всеми излучателями и поглотителем) и затем суммируются по всем энергиям спектра. Обратная задача состоит в том, чтобы по известным фазовым отношениям, дающим требуемую амплитуду поглощаемого излучения, найти взаимное расположение (конфигурацию) излучателей и поглотителя.

Ясно, что решение такой обратной задачи является неоднозначным. Однако в работе [11] было показано, что при увеличении количества излучателей и поглотителей в рассматриваемой системе однозначность определения расстояний для каждой пары возрастает. Было получено выражение, позволяющее определить классическое расстояние на основе статистики по фазовым вкладам излучения для всех энергий в спектре. Таким образом, стало возможным строить распределение конфигураций по интервалам парных расстояний и на этой основе получать шкалу классических расстояний, которая в общем случае не будет архимедовой. Это и есть обоснование применения гипотезы Рашевского–Рвачёва в реляционном подходе к космологии. Однако конкретный вид шкалы, соответствующий предложенному Рвачёвым, ещё только предстоит получить. Эта задача выходит за рамки настоящей работы.

Главным вопросом, остающимся после приведённых здесь результатов исследований, является вопрос о том, действительно ли расширяется наша Вселенная или факт её расширения следует считать кажущимся наблюдателю. Иначе говоря, если мысленно соединить два удалённых друг от друга скопления галактик нитью, должна ли эта нить порваться? Вычисления, приведённые в настоящей работе, выполнены в предположении, что эффект от испущенного, но не поглощённого излучения проявляется так, как если бы оно было поглощено. Но на самом деле реального поглощения не происходит, иначе это означало бы мгновенную передачу энергии. Вместо этого пространственно-временные отношения между всей совокупностью излучателей и поглотителей оказываются такими, что наблюдатель воспринимает окружающие объекты обладающими доплеровским сдвигом частот своих спектров. Таким образом, до момента реального поглощения нить, соединяющая скопления, не порвётся, но красное смещение всё равно будет наблюдаться.

В итоге, на основе реляционного подхода удаётся не только дать интерпретацию космологического красного смещения, но и получить правильный закон, описывающий этот эффект. При решении данной задачи возникает ряд фундаментальных вопросов о природе макроскопических пространственно-временных понятий и их взаимосвязи с реально наблюдаемыми величинами. Исходя из точки зрения, согласно которой структура классического пространства-времени определяется фазовыми отношениями испущенного, но не поглощённого излучения, становится возможным сформулировать и решить статистическую задачу вывода шкалы космологических расстояний без использования ненаблюдаемых видов материи.

Литература

1. *Владимиров Ю. С.* Реляционная картина мира. Кн. 1: Реляционная концепция геометрии и классической физики. М.: ЛЕНАНД, 2021. 224 с.
2. *Vladimirov Yu. S., Molchanov A. B.* Relational justification of the cosmological redshift // *Gravitation and Cosmology*. 2015. Vol. 21, no. 4. P. 279–282.
3. *Владимиров Ю. С., Молчанов А. Б.* Обобщенный закон Хаббла в реляционном подходе // *Пространство, время и фундаментальные взаимодействия*. 2017. № 2. С. 24–35.
4. *Molchanov A. B.* Temperature of interstellar space revisited in relational approach // *Gravitation and Cosmology*. 2020. Vol. 26, no. 1. P. 70–74.

5. *Владимиров Ю. С.* Классическая теория гравитации: учебное пособие. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. 264 с.
6. *Riess A. et al.* Large Magellanic Cloud Cepheid Standards Provide a 1% Foundation for the Determination of the Hubble Constant and Stronger Evidence for Physics Beyond Lambda CDM. URL: arXiv:1903.07603v2 [astro-ph.CO].
7. Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters / N. Aghanim et. al. (Planck Collaboration). URL: arXiv:1807.06209 [astro-ph.CO].
8. From cosmic deceleration to acceleration: new constraints from SN Ia and BAO/CMB / R. Giotri, M. Vargas dos Santos, I. Waga et al. URL: arXiv:1203.3213 [astro-ph.CO].
9. Природа электрического тока (Беседы и диспут в Ленинградском политехническом институте). М.-Л.: Изд-во Всесоюзного электротехнического объединения, 1930.
10. *Рашиевский П. К.* О догмате натурального ряда // Успехи математических наук. 1973. Т. XXVIII, вып. 4 (172). С. 243–246.
11. *Молчанов А. Б.* Принцип Маха и понятие длины в реляционном подходе // Основания фундаментальной физики и математики: материалы IV Российской конференции (ОФФМ-2020) / под ред. Ю. С. Владимирова, В. А. Панчелюги. М.: РУДН, 2020. С. 38–42.

RELATIONAL SUBSTANTIATION OF THE HUBBLE LAW

A.B. Molchanov*

*Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University
2 build., 1 Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russian Federation*

Abstract. In recent years, within the framework of the relational approach to the description of space-time and physical interactions, a number of studies have been carried out to substantiate cosmological effects. It has been shown that the cosmological redshift and the cosmic microwave background may be the result of contributions from emitted but not absorbed radiation. However, until now, Hubble's law has not been fully derived on the basis of only relational ideas. In this paper, this conclusion is presented and the Hubble parameter is calculated in the modern era. For this, the contributions of the pulses of the emitted but not absorbed radiation to the pulse of a distant astronomical object (cluster of galaxies) are considered. It is shown that taking these contributions into account leads to the linear Hubble law.

Keywords: Relational justification, Hubble's linear law, emitted radiation, Momentum of a distant astronomical object

* E-mail: alexeybm2009@gmail.com