

**Анатомия одного заблуждения,
или “извилистый и неровный путь” современной космологии**

(23.04.2011. Обновлено 21.08.2012)

Amicus Plato, sed magis arnica veritas¹
(Платон мне друг, но истина дороже)

В литературе по космологии существует противоречивое представление о так называемой космологической константе Λ . Ее связывают с силами *отталкивания*, хотя сам Эйнштейн ясно говорил о том, что эта константа должна отвечать за *притяжение*, которое, с его точки зрения, могло бы уравновешивать силы отталкивания между двумя одноименными зарядами. Указанное представление широко распространено в научной и популярной литературе, и кочует (часто в виде буквальных заимствований) из одной работы в другую. Ниже я предлагаю альтернативную точку зрения, проясняющую физический смысл отрицательного давления материи.

Модель стационарной Вселенной Эйнштейна

Во втором десятилетии 20-го века Альберт Эйнштейн предложил для Вселенной космологическую модель в виде замкнутой на себя 3-мерной гиперсферической оболочки. Первоначальная модель Эйнштейна была *стационарной*, т.е. радиус оболочки R предполагался постоянным, не зависящим от времени. Из космологических уравнений Эйнштейна следует уравнение

$$d^2R/dt^2 = - (4\pi GR/3)(\rho + 3P/c^2) \quad (1)$$

где ρ – средняя плотность материи, P – давление материи, G – гравитационная постоянная Ньютона, c – скорость света. Если радиус оболочки не меняется во времени², то левая часть равна нулю, значит, и правая часть должна обращаться в нуль. При положительной плотности материи ρ это означает, что давление P должно быть отрицательным.

Такое решение Эйнштейн (а вслед за ним – все научное сообщество) счел неуместным. В главе IV своей книги [Эйнштейн, 1953] он писал:

“Возражением против такого решения является то, что приходится вводить отрицательное давление, для чего нет никаких физических оснований”.

Вместо этого он ввел (формально допустимое) *дополнительное слагаемое*³, так что уравнение приобрело вид

$$d^2R/dt^2 = - (4\pi GR/3)(\rho + 3P/c^2) + R\Lambda c^2/3 \quad (2)$$

¹ Формулировка принадлежит Сервантесу, хотя исходная максима высказана самим Платоном и в сочинении “Федон” приписывается им Сократу.

² Или меняется по линейному закону.

³ Часто ошибочно утверждают, что без этого слагаемого полученное Эйнштейном решение *существует, но неустойчиво*. Как указывал, ссылаясь на Лемэтра и Фридмана, сам Эйнштейн [Эйнштейн, 1933], неустойчивость присуща как раз решению с дополнительным слагаемым. См. подробный анализ в [Eddington, 1930].

где Λ – так называемая космологическая постоянная. Одновременно Эйнштейн предложил пренебречь давлением материи P , т.е. считать его нулевым.

Очевидно, что введенная таким образом величина Λ фактически все равно должна быть связана с каким-то физическим фактором, создающим отрицательное давление. Эйнштейн вполне осознавал, что это загадочное давление, будучи отрицательным, создает эффект *притяжения*. Он писал в **Приложении 1 “Вопросы космологии”** к вышеупомянутой книге:

“Вещество состоит из электрически заряженных частиц. В рамках теории Максвелла они не могут быть поняты как свободные от особенностей электромагнитные поля. Чтобы не противоречить фактам, в выражение для энергии необходимо ввести дополнительные члены, не содержащиеся в теории Максвелла, которые обеспечили бы устойчивость электрически заряженных частиц, несмотря на взаимное отталкивание составляющих их одноименно заряженных частей. Именно в связи с этим Пуанкаре предположил, что внутри этих частиц имеется давление, которое и компенсирует электростатическое отталкивание. Нельзя, однако, определенно утверждать, что это давление исчезает вне частиц. Мы приходим к согласию с этими представлениями, если в нашем феноменологическом рассмотрении добавим член, описывающий давление. Это давление, однако, не следует смешивать с гидродинамическим давлением, поскольку оно служит лишь энергетическим выражением динамических связей внутри вещества.”

Итак, Эйнштейн здесь совершенно *ясно* говорит о том, что “эффективное” давление, связанное с постоянной Λ , должно быть *отрицательным* и *компенсировать* “взаимное отталкивание частей”, то есть способствовать их взаимному *притяжению*.

Что утверждает современная космология

Практически все известные космологи приписывают Эйнштейну прямо *противоположное* утверждение о том, что якобы параметр Λ связан с силами *отталкивания*, которые он ввел в свою теорию в 1917 году для уравнивания сил тяготения. В частности, один из авторов пишет: поскольку “действие этих сил столь же универсально, как и сил всемирного тяготения, то логично назвать это действие гравитацией вакуума, хотя обычно под гравитацией понимают притяжение, а здесь мы имеем отталкивание”.

Другой автор, говоря о том же, даже упоминает слова Эйнштейна о “неровном и извилистом пути”, которые привели последнего к этой идее. Однако стоит заглянуть в первоисточник [**Эйнштейн, 1917**], чтобы узнать (см. §2), что эти слова относятся к совсем другой (действительно гениальной) идее – переходе от плоского мира с неясными и даже противоречивыми граничными условиями к замкнутому на себя миру, где вопрос о граничных условиях “вообще отпадает”. Что же касается космологической постоянной, то Эйнштейн заводит речь о ней только в §4, где, как и в заключительном §5 этой статьи, *нет ни одного слова* по поводу сил отталкивания. Свои (прямо противоположные) взгляды по этому вопросу Эйнштейн изложил позже (см. вышеприведенные его цитаты).

Третий автор, пытаясь разъяснить ситуацию читателям популярного журнала, пишет, что “темная энергия (синоним вакуума) – это среда, давление которой равно плотности энергии по величине, но противоположно по знаку...

такая среда гравитационно отталкивается от самой себя и, как следствие, ускоренно расширяется... Дело в том, что согласно общей теории относительности гравитация зависит не только от массы (точнее плотности энергии), но также и от давления. Чем больше давление, тем сильнее гравитация... отрицательное давление темной энергии, наоборот, столь велико, что пересиливает притяжение и ее собственной массы, и массы всего остального вещества. Получается, что массивная субстанция с очень сильным отрицательным давлением парадоксальным образом не сжимается, а наоборот, распухает под действием собственной гравитации.”

Предлагаемое решение парадокса

Итак, мы имеем ясно выявившееся *противоречие*. С одной стороны, у Эйнштейна в уравнении (1) фигурирует *отрицательное* давление, которое означает отрицательную объемную плотность энергии и которое он сам ассоциировал со *сжатием*. С другой стороны, *если уравнение (2) рассматривать как уравнение движения*, то слагаемое с Λ (как и отрицательное давление P) действительно должно приводить именно к эффекту *отталкивания*. Это кажется парадоксальным, хотя, вообще говоря, отрицательная объемная плотность энергии тела *не всегда* приводит к эффекту сжатия (только если объемная плотность окружающей среды *больше*, хотя, возможно, тоже отрицательна).

Но можно ли считать (1) уравнением движения? С моей точки зрения, причина парадокса связана как раз с неверной интерпретацией этого уравнения. Она трактует космологическую эволюцию как процесс достижения баланса между энергией сжатия и отталкивания. При этом за сжатие отвечает плотность материи ρ , а за отталкивание – давление P или космологическая постоянная Λ . Иными словами, в нестационарной модели кинетическая энергия Большого Взрыва и противостоящая ей потенциальная энергия тяготения будто бы динамически конкурируют, а в исходной стационарной модели Эйнштейна между ними должно иметь место равновесие⁴. Заметим, что в нерелятивистской версии уравнения (1), предложенной Э. Милном, вместо скобки $(\rho + 3P/c^2)$ стоит одна лишь плотность материи ρ . Это дает повод большому числу авторов высказать реплику типа “давление весит в ОТО!”, означающую, что, по мнению автора реплики, переход от физики Ньютона к физике Эйнштейна должен в ряде случаев предусматривать замену отдельно взятой плотности материи на сумму, в которую входит и утроенное давление⁵.

Я полагаю, что дело обстоит совершенно иным образом – вовсе *не внутренние* факторы определяют собой эволюцию или статическое состояние Вселенной. Действительно, гипотеза Э. Милна о том, что ньютонова Вселенная может рассматриваться как *евклидова и бесконечная*, внутренне *противоречива*: при заданной средней плотности вещества ρ радиус R мысленной сферы с массой M увеличивается пропорционально корню кубическому из M , а гравитационный радиус R_G – пропорционально M ; поэтому рано или поздно гравитационный радиус R_G станет больше геометрического радиуса R , и вся эта масса сколлапсирует. Таким образом, наша Вселенная *не может не быть черной*

⁴ Этот подход фактически сформулировал Милн в статье [Милн, 1934], непосредственно за которой появилось ее продолжение – совместная статья [МакКри и Милн, 1934].

⁵ Такого рода реплика, как правило, сопровождается ссылкой на монографию Толмена, причем подробности не приводятся. Должен сказать, что я внимательнейшим образом несколько раз просмотрел монографию [Толмен, 1934]. Я нашел там упоминания *доказательства* подобного факта в §65, где речь идет *исключительно о давлении электромагнитного излучения* (плотность энергии излучения равна aT^4 , тогда как давление равно $aT^4/3$, где a - константа).

дырой в некотором внешнем мире, также заполненном материей (см. более подробную аргументацию в [Шульман, 2011б]).

Но черная дыра, как известно, необратимо растет, поглощая материю и энергию извне. Именно данный *внешний* фактор определяет эволюцию нашей Вселенной. Следовательно, эта эволюция никак не зависит от ее внутреннего состояния. Напротив, именно текущие значения массы и радиуса черной дыры однозначно определяют такие параметры, как средняя плотность ρ и давление материи P в ней⁶. При этом оказывается, что давление действительно имеет *отрицательный* знак и отвечает отрицательной плотности объемной энергии (см., например, [Шульман, 2011а]). И это полностью соответствует тому, что мы наблюдаем в действительности – феномену взаимного *притяжения* материи, как и должно быть.

Отсутствие парадокса в такой модели связано с тем, что уравнение (1) *не является* уравнением движения, т.к. движение (и тяготение материи) определено *внутри* гиперсферической оболочки, а расширение Вселенной (эволюция ее радиуса кривизны) происходит по нормали к оболочке, т.е. вне ее трехмерного пространства. “Центр” трехмерной оболочки не может являться источником гравитации по отношению к материальным телам, принадлежащим самой оболочке, поэтому аналогию Милна между разлетом облака частиц и расширением Вселенной я считаю физически бессодержательной.

Таким образом, закон тяготения, который Ньютон ввел в классическую физику “руками”, возникает как *естественное* следствие принятой нами гипотезы. И что самое важное, отпадает всякая необходимость использования космологической константы. Заметим, что Ньютон ввел закон тяготения в *дополнение* к своему же второму закону (связывающему инертную массу и ускорение). Применительно к “обычным” телам “давление тяготения” P_g обычно игнорируется, будучи чрезвычайно малым, хотя теоретически оно *стремится сжать даже самую малую капельку материи*. Однако для больших астрофизических объектов им пренебрегать уже нельзя, недаром физики используют для этого феномена специальный термин “гравитационное самодействие (self-gravitation)”. В уравнении (1) под величиной P следует понимать сумму P_g и всех остальных видов давления (например, динамического давления движущихся частиц), и в космологических задачах обычно доминирует именно P_g .

Само собой разумеется, что отказ от представлений сложившейся стандартной космологической модели неизбежно влечет за собой необходимость показать, что возможна новая космологическая модель, которая не хуже старой объясняет всю массу известных космологических наблюдений. Результаты моих исследований, выполненных с 1993 года, твердо убеждают меня в том, что эта задача в них эффективно решается (см. мои публикации на сайте www.timeorigin21.narod.ru, раздел “Время и Космология”).

Напоследок позволю себе сделать пессимистическое замечание. Многие годы я пытаюсь привлечь к излагаемой проблеме внимание профессиональных космологов. В данной публикации я постарался сделать это с максимальной полнотой и ясностью. Однако меня не оставляет предчувствие, что и эта попытка завершится так, как описано в песне Андрея Макаревича:

И каждый пошел своею дорогой,
А поезд пошел своей...

⁶ Т.е. фиксированный баланс между “кинетической” и “потенциальной” (гравитационной) энергией любой частицы в системе отсчета произвольного наблюдателя. Заметим, что чем больше радиус Вселенной, тем меньше абсолютные величины средней плотности и давления материи.

Ссылки

[МакКри и Милн, 1934] W. H. McCrea and E. A. Milne. Newtonian universes and the curvature of space. Q. J. Math. Oxford **5**, 73–80 (1934), reprinted in Gen. Relativ. Gravit. **32** (9), 1949–1958 (2000).

[Милн, 1934] E. A. Milne. A Newtonian expanding universe. Q. J. Math. Oxford **5**, 64–72 (1934), reprinted in Gen. Relativ. Gravit. **32** (9), 1939–1948 (2000).

[Толмен, 1934] Richard C. Tolman. Relativity, Thermodynamics And Cosmology. Oxford, Clarendon Press, 1969. Русский перевод: Толмен Р. *Относительность, термодинамика и космология*. Москва, Наука, 1974.

[Шульман, 2011а] Шульман М.Х. Природа времени и равномерное расширение Вселенной. См. http://timeorigin21.narod.ru/rus_time/Universe_expansion_rus.pdf

[Шульман, 2011б] Шульман М.Х. Может ли Вселенная не быть черной дырой? См. http://www.timeorigin21.narod.ru/rus_time/Universe_must_be_bh_rus.pdf

[Эддингтон, 1930] Eddington A.S. On the Instability of Einstein's Spherical World. MNRAS, May 1930, p. 668-688. Royal Astronomical Society (Provided by the NASA Astrophysics Data System).

[Эйнштейн, 1917] Einstein A. Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie. Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss., 1917, **1**, 142-152.

Русский перевод: Эйнштейн А. Вопросы космологии и общая теории относительности. Собрание научных трудов в 4-х томах, Наука, М., 1965, том 1, с. 601–612.

[Эйнштейн, 1933] Einstein A. Sur la Structure cosmologique de l'Espace. Hermann et Cie Editeurs, 1933, p. 99—109. Русский перевод: О космологической структуре пространства. Альберт Эйнштейн. Собрание научных трудов в четырех томах. Издательство «Наука» Москва 1966 том 2 с. 407 - 415

[Эйнштейн, 1953] Einstein A. The Meaning of Relativity, Princeton, 1953.

Русский перевод: Эйнштейн А. Сущность теории относительности. М., ИЛ, 1955.