

УДК 530.1 (075.8) (575.2) (04)

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ КОСМОЛОГИИ И ИХ РЕШЕНИЯ, ОСНОВАННЫЕ НА БРАНОВЫХ МОДЕЛЯХ

Д.И. Яр-Мухамедов

Проведён обзор современных проблем космологии и рассмотрены пути их решения, основанные на применении моделей, базирующихся на концепции бран.

Ключевые слова: современные проблемы космологии; браны; модели Вселенной; космологические модели; проблема иерархии взаимодействий; циклические модели; эволюция Вселенной.

На современном этапе развития космологии актуальными являются космологические модели, допускающие возможность существования дополнительных измерений. Такое допущение стало возможным благодаря развитию физики элементарных частиц и попыткам создания теории, объединяющей все взаимодействия. В ряду многомерных моделей Вселенной существенное место занимают модели, опирающиеся на концепцию бран.

Брана – это обобщение понятия мембраны на произвольное количество измерений. Так, например, точка является 0-браной, прямая – 1-браной, мембрана – 2-браной и т.д. Многомерные космологические модели, использующие браны для моделирования Вселенной, обычно полагают следующее: видимая Вселенная находится на бране (например, на 4-й бране), которая, в свою очередь, располагается в дополнительном измерении (или дополнительных измерениях). Брана, со всеми находящимися на ней объектами, может перемещаться вдоль дополнительного измерения, взаимодействовать с другими бранами и т.п. Объекты видимой Вселенной, все элементарные частицы, за исключением, возможно, гравитонов, и все поля, за исключением гравитационного, остаются на бране и не покидают её. Это является причиной того, что дополнительные измерения не обнаруживают своего присутствия.

Модели, основывающиеся на перечисленных выше предположениях, позволяют разрешить различные современные космологические проблемы, в числе которых наиболее ярко выделяются следующие:

- проблема иерархии взаимодействий;
- космологическая сингулярность (бесконечные плотности энергии и массы в начальный момент существования Вселенной);
- Вселенная до Большого Взрыва;

- проблемы циклических моделей эволюции Вселенной;
- проблема тёмной материи и Λ -члена.

Для разрешения каждой из перечисленных проблем создаются различные модели. Рассмотрим основные проблемы современной космологии и модели, посредством которых они разрешаются.

Проблема иерархии взаимодействий. На сегодняшний день физической науке известны четыре типа фундаментальных взаимодействий: гравитационное, электромагнитное, слабое и сильное (см. таблицу).

Как можно видеть из данных таблицы, гравитационное взаимодействие является самым слабым из всех известных. Сильное и слабое взаимодействия отличаются по силе на 13 порядков, а сильное и гравитационное – на 38 порядков. Столь существенное отличие силы гравитационного взаимодействия от сил всех остальных взаимодействий, а также проблемы, возникающие при построении теорий фундаментальных взаимодействий, вытекающие из этой разницы, требуют создания моделей, объясняющих величину силы гравитационного взаимодействия. Эта проблема разрешается различными путями, как предполагающими наличие дополнительных пространственных измерений, так и ограничивающимися наблюдаемыми тремя пространственными и одним временным. Рассмотрим модели, опирающиеся на концепцию бран.

RS-модели были предложены Lisa Randall и Raman Sundrum в 1999 году для разрешения проблемы иерархии взаимодействий [1]. Существуют две популярные модели RS1 и RS2, имеющие общую основу и некоторые различия. Исследуем для начала модель RS1.

Рассмотрим ограниченное дополнительное измерение, содержащее на каждом конце по 4-й

Фундаментальные взаимодействия

Тип	Относительная сила	Дальность действия
Гравитационный	1	Неограниченная
Слабый	10^{25}	10^{-18} м
Электромагнитный	10^{36}	Неограниченная
Сильный	10^{38}	10^{-15} м

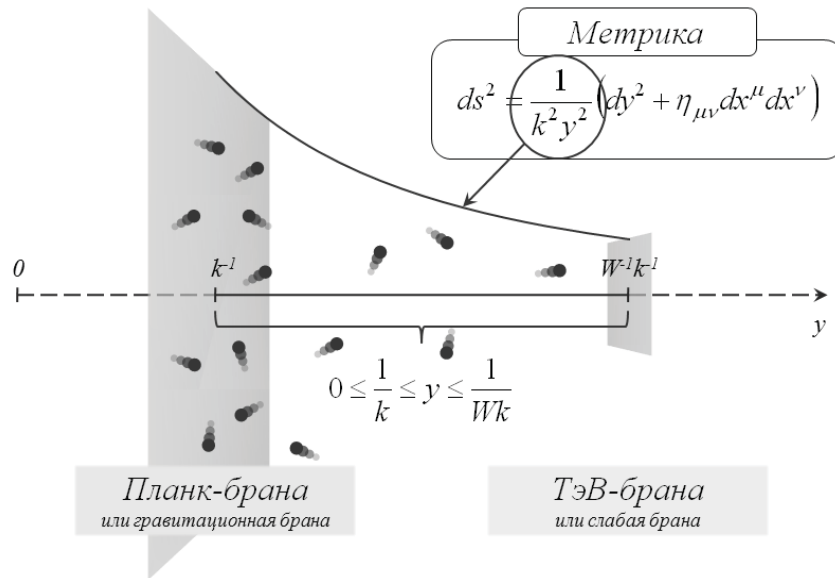


Рис. 1. Модель Randall-Sundrum.

бране (см. рис. 1). Пространство будет представлять собой пятимерное анти де Ситтерово пространство. Одну из бран назовём гравитационной, другую – слабой. Обозначим посредством x^μ три пространственных измерения и одно временное, посредством y – дополнительное измерение, а метрический тензор четырехмерного пространства-времени – $\eta_{\mu\nu}$.

Тогда метрика может быть определена следующим образом:

$$ds^2 = \frac{1}{k^2 y^2} (dy^2 + \eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu). \quad (1)$$

Как можно видеть из (1) пространство вдоль пятого измерения является сильно искривлённым. Расположим гравитационную брану (Планк-брану) в координате $y = \frac{1}{k}$, а слабую брану (ТэВ-брану) в $y = \frac{1}{Wk}$. Здесь W – коэффициент искривления. Пятая координата будет изменяться в пределах $0 \leq \frac{1}{k} \leq y \leq \frac{1}{Wk}$.

В данной модели все элементарные частицы, за исключением гравитонов, располагаются на слабой бране. Они не могут покидать брану и поэтому дополнительное измерение не обнаруживает своего присутствия. Гравитоны же располагаются в большинстве своём на планк-бране. Они могут перемещаться между бранами, а также находиться на ТэВ-бране, хотя вероятность их обнаружения по мере удаления от гравитационной браны экспоненциально падает. Таким образом, количество гравитонов на слабой бране мало, что приводит к существенному ослаблению гравитационных сил на ней по сравнению с гравитационной браной. Таким образом, разрешается проблема иерархии взаимодействий.

Модель RS2 имеет следующие отличительные особенности:

- ТэВ-брана размещена в бесконечности;
- все элементарные частицы за исключением гравитонов располагаются на гравитационной бране;
- гравитоны могут покидать гравитационную брану, тем самым ослабляя гравитационные силы на ней.

Модель RS2 обладает той же геометрией пространства-времени, что и RS1. Изначально RS2 привлекала к себе большой интерес, потому что является моделью, содержащей неограниченное дополнительное измерение, и обладает многими свойствами, присущими четырёхмерным моделям.

Проблемы описания процесса эволюции Вселенной. Самые первые космологические модели предполагали постоянство Вселенной. В них Вселенная существовала вечно, сохраняя свои размеры (или относительные расстояния между объектами). Такие модели имели массу парадоксов и с развитием астрономии и теоретической космологии перестали пользоваться популярностью.

На смену им пришли модели, описывающие постоянно развивающуюся Вселенную. В начале двадцатого века были разработаны модели, которые описывали процесс расширения Вселенной (инфляционные модели). Основной проблемой таких моделей является то, что при экстраполяции к начальному моменту времени они дают неадекватные в физическом смысле значения плотности материи и свойства пространства. Вселенная в соответствии с такими моделями в начальный момент времени представляет собой точку, а плотность материи является бесконечной. Такое состояние пространства-времени и материи Вселенной в начальный момент времени называется космологической сингулярностью. За космологической сингулярностью в положительном направлении по временной шкале следует Большой Взрыв, в результате которого пространство-время Вселенной начинает расширяться. Неадекватность модели применительно к первым моментам развития Вселенной не позволяет детально исследовать процесс её зарождения, а также заглянуть за момент её возникновения.

Исследование моделей в прямом направлении времени не даёт однозначных прогнозов относительно сценария развития Вселенной. В зависимости от величин различных параметров (в наиболее традиционной модели, предложенной Фридманом, таким параметром является плотность массы [2]), возникают различные сценарии развития: бесконечное расширение Вселенной; сжатие Вселенной, следующее за процессом её расширения; установление стационарной Вселенной после длительного периода расширения и так далее.

В 1930-х годах физики-теоретики, в числе которых был Альберт Эйнштейн, внёсший существенный вклад в развитие идеи, исследовали возможность создания циклической модели Все-

ленной как альтернативы Большому Взрыву. Тем не менее, как показал Ричард Толмал, ранние модели были неудачными по причине постоянного возрастания энтропии [3]. В результате развития Вселенной в таких моделях циклы становились длиннее, а амплитуда расширения больше. При экстраполяции результатов в прошлое циклы укорачивались, а амплитуда масштабного фактора падала, и начало развития Вселенной снова сводилось к Большому Взрыву (см. рис. 2).

Хотя ранние циклические модели обладают определённой привлекательностью, тем не менее, из-за постоянного роста энтропии они не в состоянии устранить начальный момент развития Вселенной, а, следовательно, вопрос о процессах, протекавших до этого начального момента, остаётся открытым.

На сегодняшний день существует несколько подходов к разрешению проблемы циклических моделей. Одним из таких подходов является использование бран для моделирования процессов эволюции Вселенной.

Модель Вселенной, рождённой “из огня”, была предложена Neil Turok и Paul Steinhardt в 2001 г. [4] Она является частным случаем циклических моделей вселенной. Циклические модели описывают Вселенную, не имеющую ни времени зарождения, ни времени смерти, то есть живущую вечно. Большой Взрыв в таких моделях является лишь началом очередного цикла жизни Вселенной. В каждом цикле вначале Вселенная расширяется, затем, в зависимости от модели, проходит другие стадии эволюции, за которыми следует очередной Большой Взрыв и всё происходит вновь.

Пусть существуют две браны, на одной из которых находится видимая нами Вселенная. Эти браны, вследствие взаимного притяжения, будут периодически сталкиваться [5] (см. рис. 3).

В результате каждого отдельного столкновения на бране будет происходить огромный всплеск энергии, по характеристикам идентичный всплеску энергии во время Большого Взрыва. Существенным отличием процесса столкновения бран от Большого Взрыва является то, что при столкновении отсутствует космологическая сингулярность. За столкновением бран следует процесс постепенного расширения. Браны удаляются друг от друга, а плотность материи на них падает. Вследствие длительного расширения неоднородности на бранах сводятся к минимуму, а пространство становится практически плоским и пустым. Тогда имеет место следующее столкновение бран и начинается новый цикл [6, 7].

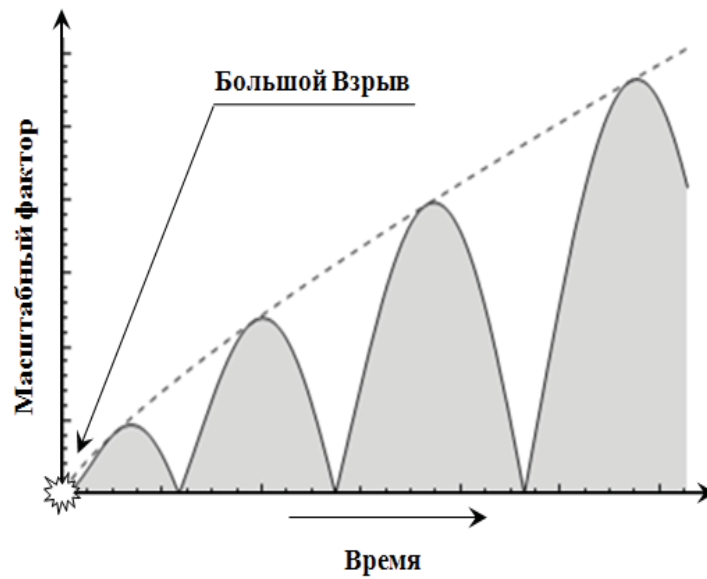


Рис. 2. Циклическое развитие Вселенной в соответствии с ранними циклическими моделями.

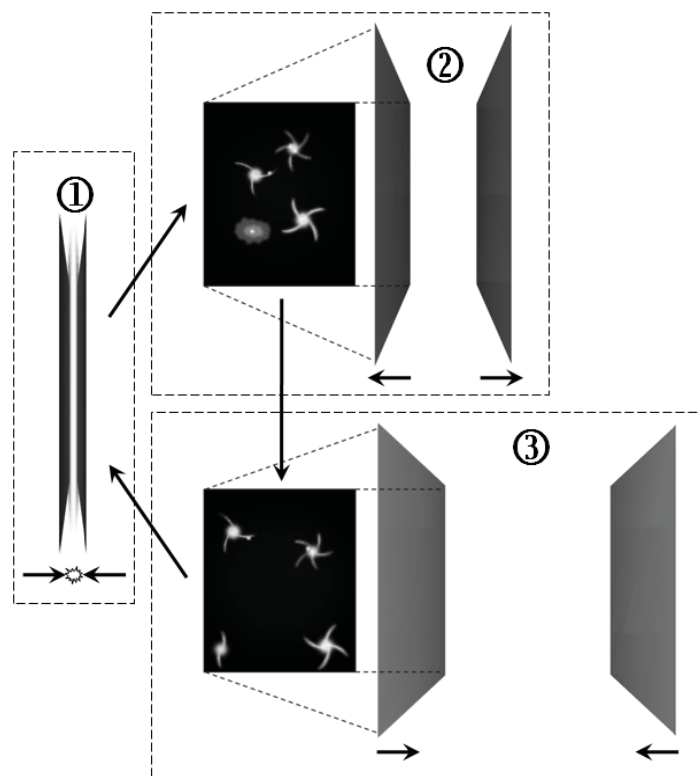


Рис. 3. Периодически сталкивающиеся браны:
1 – столкновение бран; 2 – удаление бран друг от друга;
3 – сближение бран, предворяющее новое столкновение.

Так как процесс расширения не сопровождается последующим процессом сжатия, то проблема энтропии устраняется автоматически.

Эта модель также хороша тем, что объясняет природу тёмной материи и темной энергии, которым соответствуют силы взаимодействия бран между собой. Объяснение находят скорость и ускорение расширения Вселенной.

Существуют похожие модели, в числе которых:

↳ более поздняя модель Steinhardt-Turok отличающаяся тем, что перед очередным столкновением бран происходит сжатие материи на бране;

↳ модель Baum-Frampton, которая опирается на возможность существования фантомной энергии, позволяющей устранить проблему постоянного нарастания энтропии [8, 9].

Таким образом, модель Вселенной, рождённой “из огня”, позволяет разрешить множество космологических проблем, касающихся процесса эволюции Вселенной, устранить необходимость существования “начала” процесса развития, объяснить характер расширения, наблюдаемый на сегодняшний день, и открыть завесу над мистическими тёмной энергией и темной материей.

Современная теоретическая космология включена в область физической науки, представлена различными теориями и моделями. Созданные для разрешения отдельных проблем теории и модели не способны охватить весь широкий круг космологических проблем. Тем не менее, наблюдаются тенденции синтеза идей различных теорий и моделей, дающие более или менее вдохновляющие результаты.

Большие надежды возлагаются на бран-модели Вселенной в связи с попытками найти

косвенные доказательства струнной теории. В случае подтверждения справедливости космологических моделей, базирующихся на концепции бран, станет очевидным наличие дополнительных пространственных измерений, на что в большой степени опирается струнная теория.

Литература

1. *Randall Lisa; Sundrum Raman.* Large Mass Hierarchy from a Small Extra Dimension. *Physical Review Letters* 83 (17). 1999. P. 3370–3373. doi:10.1103/PhysRevLett.83.3370.
2. *Friedman Alexander.* Über die Krümmung des Raumes, *Zeitschrift für Physik A* 10: 377–386, doi:10.1007/BF01332580, 1922.
3. *Tolman R.C.* [1934]. *Relativity, Thermodynamics, and Cosmology.* New York: Dover. LCCN 34032023-3. 1987.
4. *Khoury, Justin; Burt A. Ovrut, Paul J. Steinhardt, Neil Turok.* Ekpyrotic universe: Colliding branes and the origin of the hot big bang // *Phys. Rev. D (American Physical Society)* 64 (12). 28 Nov. 2001. P. 123522.
5. *Steinhardt P.J., Turok N.* The Cyclic Model Simplified // arXiv:astro-ph/0404480 [astro-ph]. 2004.
6. *Steinhardt P.J., Turok N.* Cosmic Evolution in a Cyclic Universe // arXiv:hep-th/0111098 [hep-th]. 2001.
7. *Steinhardt P.J., Turok N.* A Cyclic Model of the Universe // arXiv:hep-th/0111030 [hep-th]. 2001.
8. *Baum L., Frampton P.H.* Entropy of Contracting Universe in Cyclic Cosmology // arXiv:hep-th/0703162 [hep-th]. 2007.
9. *Baum L. and Frampton P.H.* Turnaround in Cyclic Cosmology. *Physical Review Letters* 98: 071301. doi:10.1103/PhysRevLett.98.071301 // arXiv:hep-th/0610213. 2007.