

**И. В. Владленова**  
**(г. Харьков, Украина)**

## **Теория суперструн и космология**

Существует некоторая надежда на то, что теория суперструн может стать теорией, способной непротиворечивым способом объединить все известные фундаментальные взаимодействия в природе и выступить в роли «теории Всего». Струны возникли в адронной физике как динамическая основа модели Венециано и дуально-резонансных моделей. Как отмечает Нобелевский лауреат по физике С. Вайнберг, «в процессе работы стало ясно, что формула Венециано и её расширения и обобщения – не просто удачные догадки, а теория физических сущностей нового типа, получивших название релятивистских квантово-механических *струн*. Конечно, обычные струны состоят из частиц – протонов, нейтронов, электронов. Но новые струны совсем другие: предполагается, что протоны и нейтроны состоят *из них*. Дело обстоит не так, будто на кого-то сошло вдохновение, и он догадался, что материя построена из струн, а затем начал строить соответствующую теорию; на самом деле теория струн была построена *до того*, как кто-то понял, что это такое [3, с. 167]. Основу теории представляет фундаментальный релятивистский, протяжённый, нелокальный объект с характерным размером порядка планковской длины (таким образом, на расстояниях меньше  $10^{-33}$  см мы отказываемся от локальной теории поля, заменяя её нелокальной теорией). В рамках суперструнного подхода находят свое развитие идеи Калуцы-Клейна, «позволяющие закодировать всю структуру модели объединения (калибровочные симметрии, состав полей, константы связи) в геометрических и даже топологических свойствах некоторого многообразия (это известно как формализм «компактификации»)» [9, с. 88]. Таким образом, возродилась фантастическая идея Калуцы-Клейна о том, что пространство-время имеет больше, чем четыре измерения. Эти идеи получили новое толкование в работах Шерка, Шварца, Креммера в

связи со струнными дуальными моделями. Они предложили рассматривать дополнительные измерения как физические, равноправные с наблюдаемыми четырьмя измерениями. Очевидное различие между четырьмя наблюдаемыми и добавочными микроскопическими измерениями было предложено интерпретировать как спонтанное нарушение симметрии вакуума (как результат спонтанной компактификации дополнительных измерений) [1, с. 656].

При квантовании одна струна представляет собой бесконечную последовательность нормальных мод – последовательность массивных состояний в квантовой теории поля. При этом расщепление масс  $\Delta m^2$  пропорционально натяжению струны  $T$ . В теории суперструны  $T \approx (10^{19} \text{ ГэВ})^2$ , в отличие от адронной физики, где  $T \sim (1 \text{ ГэВ})^2$ . Струны бывают открытыми и замкнутыми. Открытые струны в качестве низших безмассовых состояний содержат частицы спина 1: поля Янга-Миллса, а замкнутые – частицы спина 2: гравитоны. На этом пути в теории струны возникает квантовая теория, объединяющая гравитацию и поля Янга-Миллса – переносчики всех взаимодействий. На расстояниях много больше планковской длины ( $10^{-33}$  см), или при энергиях много меньше массы Планка ( $10^{18}$  ГэВ), массивные состояния отщепляются, и возникает эффективная точечная теория поля (супергравитация и янг-миллсовская суперсимметричная теория) с фиксированными параметрами и составом частиц [5, с. 564].

Однако, несмотря на все свои преимущества и достоинства, теория суперструн остаётся лишь кандидатом на роль Теории всего. Дело в том, что в рамках теории суперструн тяжело сделать какое-либо физическое предсказание, существует также существенная проблема её экспериментального подтверждения. Не ясен также и физический принцип, лежащий в основе теории суперструн. Возможно, что существует обобщение принципа эквивалентности ОТО в пространстве всех струнных конфигураций, которое приводит к геометрическому описанию суперструн (с этим связано понимание того, как геометрические свойства определяют физику пространства-времени) [9].

В развитии теории струн было создано пять различных теорий: типа I, типа IIA и типа IIB, теории гетеротических струн с калибровочными группами  $SO(32)$  и  $E_8 \times E_8$ . В теории суперструн используются S-, T-, U-дуальности [3]. T-дуальность связывает две различные теории, компактифицированные на многообразия большого и малого размера соответственно. Она является непертурбативной по

струнному натяжению и пертурбативной в том смысле, что она верна в любом порядке по струнной константе связи. S-дуальность связывает теорию в режиме слабой связи и не может быть проверена по теории возмущений (она требует привлечения непертурбативных объектов). S-дуальность привела к эквивалентности теорий струн «чтобы получить какую-нибудь выгоду от S-дуальности, обычно на основании косвенных аргументов (анализ BPS-состояний, низкоэнергетическое описание) предполагают существование дуальности. Далее, исходя из этого предположения, уже получают все «точные» результаты. Но необходимо отметить, что S-дуальности остаются всего лишь предположением!» [3, с. 714]. U-дуальность образуется действием S- и T-дуальности, так как S- и T-дуальности не коммутируют друг с другом. Таким образом, даже замечательная идея дуальностей в теории суперструн является гипотезой.

А. Ю. Морозов отмечает, что главным недостатком, унаследованным от любых «дострунных» подходов к объединению взаимодействий, является отсутствие селективности: «Струнных моделей объединения оказывается ничуть не меньше, чем обычных, – сохраняется практически неограниченный произвол в выборе калибровочной группы, состава (струнных) полей и т. д. С другой стороны, основным стимулом поиска Великого объединения является вера в существование истинно фундаментальной, единственно правильной „теории всего“, свободной от какого-то ни было произвола (хотя с этим могут не согласиться, например, приверженцы антропного принципа» [9, с. 88].

Чтобы обосновать необходимость суперструнного подхода, следует ответить на вопрос: «Так уж необходима квантовая теория гравитации»? Целью этой теории является квантовое описание гравитации. Таким образом, она пытается связать два фундаментальных раздела: квантовую физику и Общую теорию относительности, которые описывают микро- и макромир. В ОТО пространство-время является динамическим, а в квантовой физике выступает в качестве фона, потому что вследствие слабости гравитационного взаимодействия в микромире им можно пренебречь. Квантование пространства-времени приводит к различным парадоксам, а сама природа этого квантования остаётся не понятной. «Хотя никакого серьёзного оправдания стремлению совместить общую теорию относительности с квантовой механикой пока неизвестно, внимание к этой проблеме не ослабевает. Фактически в большинстве предпринимаемых попыток парадигма квантовой

механики считается более ценной, чем идея о геометрии пространства-времени» [9, с. 89].

Основным объектом исследования реальности, который требует построения квантовой теории гравитации, считается ранняя Вселенная. Однако действительно ли нужна квантовая теория гравитации при решении космологических проблем в ранней Вселенной? «Современная космология развивается и ставит перед физикой элементарных частиц множество вопросов, прежде всего не ясны следующие аспекты: проблема небарионной тёмной материи, вопрос о происхождении космических лучей сверхвысокой энергии, проблема генерации барионной асимметрии вселенной, вопрос о механизме раздувания, инфляции ранней вселенной и природе инфлатонного поля, проблема космологической постоянной» [11, с. 1304]. Благодаря открытию анизотропного реликтового излучения физики получили информацию о параметрах и процессах вселенной (ценно то, что реликтовое излучение несёт информацию о ранней вселенной) [11]. Нерешённых задач в космологии, а в особенности в космологии ранней Вселенной много, однако, можно ли решить их с помощью квантовой теории гравитации? Под термином «ранняя Вселенная» понимается заключительная стадия ускоренного расширения с последующим переходом к горячей фазе эволюции. Параметры Большого взрыва неизвестны, имеются только верхние ограничения, однако существует хорошо разработанная теория генерации космологических возмущений, в соответствии с которой можно рассчитать спектры начальных возмущений плотности вещества и первичных гравитационных волн в зависимости от космологических параметров [8, с. 1025]. Пока не существует общепринятой модели ранней Вселенной, потому что имеются неустойчивости предсказаний инфляционной парадигмы Большого взрыва: близости генерируемых спектров к плоскому виду, относительной малости амплитуды космологических гравитационных волн, трехмерной евклидовости видимой Вселенной и другие, которые могут быть получены в широком классе параметров моделей [8, с. 1025].

Среди особо значимых космологических проблем можно выделить проблему объяснения наблюдаемой однородности и изотропии вселенной (промежуточная инфляционная фаза расширения не может служить основным механизмом изотропизации, так как наличие подобной фазы нуждается в регулярных начальных условиях). К примеру, первичные неоднородности метрики должны быть сглажены по сравнению с

комптоновской длиной, а плотность энергии, запасённая в анизотропии пространства, малой по сравнению с энергией скалярного поля, ответственного за инфляцию. Таким образом, нужно объяснить изотропизацию неоднородной Вселенной. В случае регулярного расширения, когда размер горизонта растёт быстрее, чем характерный масштаб неоднородностей метрики, механизм квантовой генерации возмущений из вакуумных флуктуаций сильно зависит от выбора начального квантового состояния, а для вычисления подобных эффектов нужно привлекать квантовую гравитацию. Пока квантовая теория гравитации не построена, единственно, можно проводить математическое моделирование возможных квантовых эффектов [7].

Наличие неустойчивости в квантовой области приводит к отсутствию фонового пространства на начальном этапе эволюции Вселенной (а это значит, что невозможно применять квазиклассические методы в этой области). Под отсутствием фона понимается следующее положение: интенсивность флуктуации метрики и кривизны пространства превышает средние значения (вот почему возникает необходимость моделирования квантовой динамики неоднородных гравитационных полей; формирование начальных условий для последующей квазиклассической эволюции, развитие непertурбативных методов исследования) [7].

Сам момент Большого взрыва требует объяснения процессов, которые его сопровождали (в том числе и рождение пространства-времени). «Большой взрыв представлял собой катастрофический процесс быстрого расширения, сопровождаемый интенсивным быстропеременным гравитационным полем. В ходе космологического расширения возмущения метрики спонтанно рождалась параметрическим образом из вакуумных флуктуаций, как рождаются любые безмассовые степени свободы под действием внешнего переменного поля. Анализ наблюдательных данных свидетельствует о квантово-гравитационном механизме рождения затравочных возмущений [11, с. 1025].

Таким образом, пусть и косвенно, теоретически, существует область реальности, требующая согласованной квантовой теории гравитации – это космология ранней Вселенной. Теория суперструн на сегодняшний день считается перспективной теорией, пытающейся построить квантовую гравитацию. В таком случае, решает ли теория суперструн основные космологические проблемы?

Согласно теории суперструн, существуют дополнительные измерения, кроме наблюдаемых, а сама четырёхмерная Вселенная является бранной, погружённой в пространство-время большей

размерности. Попытки включить современную космологию в фундаментальную физическую теорию высоких энергий приводят к идее многомерного пространства-времени. Детали погружения и взаимодействия браны с возможными другими бранными мирами определяет эволюцию нашей Вселенной [2]. Считается, что, мотивацией к введению дополнительных измерений является проблема иерархии в физике высоких энергий и космологии. Эта проблема состоит в наличии огромной «энергетической пустыни» между масштабом электрослабого взаимодействия порядка 1 ТэВ и планковским масштабом квантовой гравитации  $10^{19}$  ГэВ. А. О. Барвинский отмечает, что эта проблема в космологическом контексте приобретает острый характер, так как отражает колоссальный разрыв в 120 порядков величины между квантово-гравитационным масштабом и масштабом величины наблюдаемой космологической постоянной [2, с. 570].

Однако следует отметить, что многомерность мира возникает не только в рамках теории суперструн, – к примеру, и в космологической модели хаотической инфляции, которая предполагает существование бесконечного числа вселенных, которые возникают в скалярном поле в разных областях. Существует также интересная гипотеза о том, что имеются пространственно-временные туннели – кротовые дыры, которые сохраняются после инфляции, «связывая различные области нашей и других вселенных, что открывает уникальную возможность исследования многоэлементной Вселенной и обнаружения нового типа объектов – входов в тоннели» [10, с. 1017]. «Кротовая нора – это гипотетический объект, описываемый несингулярным решением уравнения Эйнштейна с двумя большими (или бесконечными) областями пространства-времени, связанными горловиной. Рассматриваемые две большие области пространства-времени могут лежать в одной и той же Вселенной или даже принадлежать разным вселенным в модели мультивселенной [6, с. 481].

Однако кротовые норы остаются не подтверждённой гипотезой. Дело в том, что для существования кротовых нор необходима материя с необычным уравнением состояния. Уравнение состояния должно быть анизотропным, а величина  $w_{\parallel} = p_{\parallel} / \epsilon$  должна быть меньше -1 (как у фантомной материи). Здесь  $p_{\parallel}$  – суммарное давление вдоль тоннеля,  $\epsilon$  – суммарная плотность энергии всех компонент материи в туннеле [6, с. 1017]. Так плодятся «фантомные теории», которые манипулируют «фантомными» объектами. Статья В. Н. Лукаш, Е. В. Михеева «Тёмная материя: от начальных условий до образования структуры Вселенной» начинается словами: «Принеси то, не знаю

что» [8, с. 1023]. Астрономы наблюдают структуры, состоящие из неизвестного физикам вещества [8, с. 1023]. Авторы статьи полагают, что требуется расширение Стандартной модели, для чего имеются веские доказательства, однако в каком направлении двигаться – не понятно... Однако кое-что о свойствах тёмной материи известно: она взаимодействует с барионами гравитационным способом, представляет собой холодную среду с космологической плотностью, в несколько раз превышающую плотность барионов. Природа структуры, из которой развилась тёмная материя, неизвестна. «Следует подчеркнуть, что этот процесс гравитационной неустойчивости мог быть запущен во фридмановской вселенной только при наличии затравочных возмущений плотности, само существование которых никак не связано с тёмной материей, а обусловлено физикой Большого взрыва. Поэтому встает вопрос о возникновении затравочных возмущений, из которых развилась структура темной материи [8, с. 1024].

Согласно теории суперструн, при высоких температурах спонтанно нарушенная симметрия восстанавливается. Поэтому, исходя из идеи о спонтанной компактификации в экстремальных условиях раннего этапа развития Вселенной пространство-время имеет свои истинные 10 (или 11) измерений. Затем происходит компактификация во все возможные вакуумные решения. В результате могут образовываться «острова», в которых пространство-время может иметь разную топологию, разную размерность и разную сигнатуру. Не исключены туннельные переходы и образование пузырьков одного вакуума в другом вакууме [1, с. 664].

Существуют различные подходы к решению сложной задачи объединения фундаментальных взаимодействий. Известно, что Общая теория относительности является несовместимой с принципами квантовой теории, и потому не может дать надлежащего описания физических процессов, происходящих при очень малых масштабах расстояний или в течение очень коротких промежутков времени, а потому, чтобы описать такие процессы, требуется теория квантовой гравитации. Теория квантовой гравитации – это направление исследований в теоретической физике, целью которого является квантовое описание гравитационного взаимодействия. Эта теория не построена. Основная трудность в её построении, кроме всего прочего, заключается в том, что квантовая механика и Общая теория относительности опираются на разные наборы принципов, исходных идей, разные области применения. Одно из основных направлений, пытающееся воплотить идеи квантовой теории гравитации – это

теория струн, которая также находится в стадии разработки. В рамках теории суперструн не нашли решение фундаментальные космологические проблемы, не построена вторично квантованная полевая теория суперструн, позволяющая проводить конкретные вычисления и т. д. Стратегия универсального формализма, которой придерживаются струнные теоретики, оказывается не плодотворна в плане решения космологических проблем.

## Литература

1. *Арефьева И. Я.* Суперсимметрия: теория Калуцы-Клейна, аномалии, суперструны / И. Я. Арефьева, И. В. Волович // *Успехи физических наук.* – 1985. – Т. 146. – Вып. 4. – С. 656–681.
2. *Барвинский А. О.* Космологические браны и макроскопические дополнительные измерения / А. О. Барвинский // *Успехи физических наук.* – 2005. – Т. 175. – № 6. – С. 570–601.
3. *Вайнберг С.* Мечты об окончательной теории: Физика в поисках самых фундаментальных законов природы / Вайнберг Стивен ; [пер. с англ. А. В. Беркова]. – М.: Едиториал УРСС, 2004. – 256 с.
4. *Гуков С. Г.* Введение в струнные дуальности / С. Г. Гуков // *Успехи физических наук.* – 1998. – Т. 168. – № 7. – С. 705–717.
5. *Казаков Д. И.* Суперструны или за пределами стандартных представлений / Д. И. Казаков // *Успехи физических наук,* декабрь. – 1986. – Т. 150. – Вып. 4. – С. 561–575.
6. *Кардашев Н. С.* Динамическая модель кротовой норы и модель Мультивселенной / А. А. Шацкий, И. Д. Новиков, Н. С. Кардашев // *Успехи физических наук.* – 2008. – Т. 178. – № 5. – С. 481–488.
7. *Кириллов А. А.* Неоднородные модели ранней вселенной / Кириллов Александр Альбертович: автореф. на соискание док. физ-мат наук, спец. 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ. – Ульяновск, 2006. – 25 с.
8. *Лукаш В. Н.* Темная материя: от начальных условий до образования структуры Вселенной / В. Н. Лукаш, Е. В. Михеева // *Успехи физических наук.* – 2007. – Т. 177. – № 9. – С. 1023–1028.
9. *Морозов А. Ю.* Теория струн – что это такое? / А. Ю. Морозов // *Успехи физических наук.* – 1992. – Т. 162. – № 8. – С. 84–175.
10. *Новиков И. Д.* Многокомпонентная вселенная и астрофизика кротовых нор / И. Д. Новиков, Н. С. Кардашев, А. А. Шацкий // *Успехи физических наук.* – 2007. – Т. 177. – № 9. – С. 1017–1023.
11. *Рубаков В. А.* Физика частиц и космология: состояние и надежды / В. А. Рубаков // *Успехи физических наук.* – 1999. – Т. 169. – № 12. – С. 1299–1309.

