DOI: 10.17117/na.2015.07.1087

Поступило в редакцию: 29.07.2015

<http://ucom.ru/doc/na.2015.07.1087.pdf>

Горшков В.К., Мансуров Г.Н. Космологическая инфляция

Gorshkov V.K., Mansurov G.N.
Cosmological inflation

Теория инфляции, определяющая процесс происхождения Вселенной, оказалась в центре внимания научной общественности. Для инфляции важно существование квантовых флуктуаций, энергия которых может быть разной, в связи с чем и вакуум вселенной будет разным. Возникновение пространства с другим вакуумом означает возникновение вселенной с другими законами физики. Хаотический характер квантовых флуктуаций определяет идею произвольных начальных условий и существование вечной хаотической инфляции

Ключевые слова: инфляция, квантовые флуктуации, вселенная, вакуум

Горшков Виктор Константинович
Кандидат физико-математических наук

Мансуров Герман Николаевич
Доктор химических наук, профессор, старший научный сотрудник
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 1

The theory of inflation, which determines the process of the origin of the Universe, was at the center of attention of the scientific community. For inflation it is important the existence of quantum fluctuations, the energy of which can be different, in this connection, and the vacuum of the universe will be different. The appearance of the space with another vacuum means that the origin of the universe with other laws of physics. The chaotic nature of quantum fluctuations defines the idea of arbitrary initial conditions and the existence of eternal chaotic inflation

Key words: inflation, quantum fluctuations, the universe, the vacuum

Gorshkov Viktor Konstantinovich
Candidate of Physico-Mathematical Sciences

Mansurov German Nikolaevich
Doctor of Chemical Sciences, Professor, Senior Researcher
National research university of electronic technology (MIET)
Moscow, Zelenograd, Shokin Square, 1

Вселенная – физический объект

Вселенная расширяется из бесконечно плотного состояния, либо сжимается в бесконечно плотное состояние. В первом случае наша Вселенная будет «замкнутой», во втором – «открытой». Промежуточный случай может быть определен как предельный случай с торможением, когда скорость стремится к нулю, Вселенная будет «плоская».

Поскольку Вселенная может рассматриваться как физический объект, то для него имеет смысл ввести как физические, так и геометрические характеристики. Плотность энергии в плоской Вселенной имеет критическое значение, которое согласно экспериментальным данным составляет 10-29 г/см³. Для «замкнутой» вселенной плотность выше, для «открытой» – ниже.

Измерить размер Вселенной невозможно, но можно измерить пространственную кривизну, зная размер объекта и угол, под которым виден объект на данном расстоянии. Другой способ дает измерение средней плотности всех видов энергии Вселенной и сравнение с критической плотностью.

Наблюдения процессов, происходящих во Вселенной, дали материал для пересмотра картины мира, определившейся к концу XIX века. Как для всякого физического объекта реальность предполагает, что Вселенная родилась, эволюционирует и перестанет существовать в нынешнем виде. Решающим фактом, определившим первую космологическую революцию, явился закон разбегания галактик, открытый Эдвином Хабблом (1929 г.) [11].

Теоретической основой революции стала общая теория относительности Эйнштейна [1] и решения уравнений Эйнштейна, полученные Фридманом.

Решения уравнений Эйнштейна для Вселенной как целого, полученные Фридманом, описывают нестационарную Вселенную. Стационарная Вселенная, которую настойчиво отстаивал Эйнштейн, была опровергнута. Закон пропорциональной зависимости красного смещения от расстояния открытый Хабблом заставил Эйнштейна признать нестационарность Вселенной и Большой взрыв. Кроме того, открытие Хабблом спиральных галактик утвердило существование внегалактической астрономии.

Концепция вечной, бесконечной и в среднем неизменной Вселенной была отброшена в результате достижений, которые составили первую космологическую революцию. Теория расширяющейся Вселенной включающая Большой взрыв, дает основания для ответа на целый ряд вопросов, возникающих, когда мы прослеживаем историю Вселенной. Теория Большого взрыва содержала неясность, связанную с начальными условиями. Они определили однородность в причинно не связанных областях, привели к гигантским размерам, плоской геометрии и громадному содержанию. Оказалось, что вопрос о начальных условиях решается той же силой природы, которая обеспечила Земле шарообразную форму – гравитацией, только не в тяготеющей ипостаси, а в отталкивающей. Это был прорыв, который дал начало второй космологической революции [8, 9].

Основу теории инфляции составляла модификация уравнений Эйнштейна, которая сказывается только при огромной кривизне пространства-времени, что вызывает деформацию нулевых колебаний вакуумных полей. При этом увеличивается энергия вакуума, причем очень сильно, это соответствует возникновению скалярного поля, которое вызывает гравитационное расталкивание пространства.

Сценарий инфляции, предложенный Гуттом, начинается с очень плотного и очень горячего зародыша Вселенной [12]. Возникновение этого зародыша может быть результатом редкой (очень большой) квантовой флуктуации. Важно, чтобы зародыш расширялся по закону Фридмана и чтобы все поля находились в термодинамическом равновесии. Характерное время первой стадии сценария – 10^{-37} или 10^{-36} с. За это время зародыш расширился и остыл до 10^{16} Гэв. Это важный момент. Поскольку при такой температуре плотность энергии поля становится сравнимой с плотностью энергии частиц, а у эффек-

тивного потенциала поля появляется новый минимум. Это момент фазового перехода. Происходит остывание поля, плотность энергии статического поля начинает перевешивать тепловую плотность энергии. В какой-то момент суммарное давление в зародыше вселенной меняет знак – становится отрицательным. Вселенная переходит в переохлажденное состояние, локальное поле застревает в локальном минимуме, в метастабильном состоянии. По мере охлаждения давление идет все дальше в минус и, наконец, пересекает критическую черту – $1/3 \epsilon$. С этого момента знак самотяготения вселенной меняется. До этого гравитация замедляла расширение пузырька-вселенной, теперь она начинает его раздувать. Размер вселенной начинает расти, кривизна уменьшается. Поле никуда не девается, оно по-прежнему занимает вес объем и становится более однородным.

Каждый промежуток времени порядка 10^{-37} с размер вселенной удваивается, а кривизна уменьшается в два раза. Это продолжается довольно долго, пока поле ϕ остается в минимуме, могут пройти многие десятки и сотни времен удвоения, размеров вселенной. За это время из микроскопического зародыша вселенная становится гигантской, а ее пространство совершенно «плоским» – евклидовым. При этом скорость удаления двух точек друг от друга становится выше скорости света. Это не противоречит теории относительности, т.к. точки попадают в причинно не связанные области пространства, никакая информация не может быть передана от одной точки к другой в принципе. Причинная связь теряется, но возможно не на всегда, при более медленном расширении вселенной она может восстановиться. На стадии экспоненциального раздувания любой объем быстро рассыпается на гигантское количество никак не связанных друг с другом областей. Однако важно то, что эти причинно не связанные области имеют общие условия происхождения, с которых они стартовали.

Наконец, скажем через 10^{-35} с, метастабильное поле «вскипает», выделяя свою энергию в частицы. Возможно, что поле туннелирует через потенциальный барьер в разных местах в основное состояние ϕ_0 . При этом образуются растущие пузырьки новой фазы – «истинного вакуума». Пузырьки сталкиваются, ложный вакуум «выгорает», передавая свою энергию частицам.

Вселенная снова разогревается, давление меняет знак, – становится положительным. Экспоненциальное расширение заканчивается. Дальше все происходит по сценарию Фридмана [10]. Вселенная имеет гигантские размеры и почти нулевую кривизну. Она продолжает расширяться теперь уже с замедлением. Можно предположить, что ей гарантировано практически вечное существование, а может быть и действительно вечное.

Однако выход из режима инфляции путем туннельного перехода в разных точках с образованием пузырьков новой фазы, которые потом растут и объединяются – это неверно. На самом деле пузырьки удаляются друг от друга продолжающейся инфляцией гораздо быстрее чем они растут, расстояние между ними увеличивается экспоненциально. Экспонента продолжает существовать.

В квантовой теории поля существует понятие нулевых колебаний поля в вакууме. Вакуумное среднее значение электромагнитного поля равно нулю, нулевые колебания прямо не наблюдаются, они гасят друг друга благодаря интерференции. Но средний квадрат знакопеременного поля нулю не равен, оно содержит огромную энергию. Если частоты нулевых колебаний не ограничены сверху, то плотность энергии будет бесконечной. Эту энергию нельзя использовать, но существуют способы ее наблюдать.

Если вакуум рассматривать как «море» фермионов с отрицательной энергией, где все возможные состояния заполнены, то частицы с положительной энергией этого моря не почувствуют. Положительная плотность энергии нулевых колебаний бозонных полей компенсируется отрицательной плотностью энергии моря Дирака. На этом пути идет поиск решения проблемы вакуума. Поскольку поля существуют разные и частицы разные, между ними нет симметрии, которая обеспечивает огромную точность компенсации. Значит должна существовать фундаментальная симметрия, обеспечивающая нулевую энергию вакуума. Решение этой проблемы невозможно для вакуума, содержащего поле, которое не изотропно и не лоренц-инвариантно.

В основании нашего мира лежит несколько семейств элементарных частиц: фотоны, W-бозоны, лептоны, кварки, глюоны – все они подчиняются разным взаимодействиям: электромагнитным, сильным, слабым; разброс масс доходит до двух сот тысяч. Существование поля, получившее название поля Хиггса, объясняет возникшее различие частиц. В первые доли секунды существования мира вакуум заполнился ненулевым полем Хиггса. Исходно одинаковые частицы по-разному взаимодействуют с этим полем и в результате приобретают разные массы. Переносчики сильного взаимодействия – глюоны – попадали в одну группу симметрии с фотонами и переносчиками любого взаимодействия – W- и Z-бозонами. Появление ненулевого скалярного поля вызвало расщепление группы симметрии на отдельные подгруппы.

Мир был изначально проще, чем мы наблюдаем, но «кривой» вакуум сделал его более сложным и пригодным к жизни. Существует ряд физических постоянных, значения которых ниоткуда не следуют, но если какая-нибудь из них будет немного изменена, то жизнь в таком мире оказывается невозможной. Возникает вопрос: «Какова фундаментальная симметрия, определяющая столь тонкую подгонку фундаментальных констант?»

Возникновение жизни связано с существованием галактик, но для их образования должны существовать некоторые первичные неоднородности, которые невозможно представить без флуктуаций энергии и стационарного поля, характерных для существования вакуума [2].

Возникновение неоднородностей

Современная структура Вселенной включает скопления галактик, а также сами галактики, которые выросли из небольших флуктуаций плотности. Возникает вопрос: откуда взялись эти затравочные неоднородности? Дело в том, что согласно квантовой механике любое поле имеет нулевые (вакуумные) колебания, которые обычно не наблюдаемы, как и скалярное поле, и приводят

к возникновению инфляции. Но при разных видах воздействия вакуумные колебания могут стать реальными флуктуациями полей, каковыми могут быть волны и частицы – в зависимости от конкретной ситуации. Ускоренное расширение пространства может создать такие условия. Вакуумное колебание поля имеет шанс превратиться в реальную флуктуацию, если пространство за период колебания данной частоты существенно расширится. Именно это и происходит при космологической инфляции.

Ключевым в решении проблемы вакуума является понятие нулевых колебаний. Нулевые колебания не наблюдаются, из них нельзя извлечь энергию: они гасят друг друга благодаря интерференции. Но в них заключена огромная энергия. Если частоты нулевых колебаний не ограничены сверху, то плотность энергии вакуума бесконечна.

Однако существуют эффекты, в которых нулевые колебания наблюдаются – это эффект Казимира и расщепление уровней (лэмбовский сдвиг).

Современная структура Вселенной, включающая скопления галактик и сами галактики, выросла из квантовых флуктуаций плотности. Вопрос: откуда взялись затравочные однородности? Что породило эти флуктуации? Учтем, что в квантовой механике любое поле имеет нулевые (вакуумные) колебания, которые обычно не наблюдаемы. Скалярное поле, вызывающее инфляцию, – тоже. Но при разных видах воздействия вакуумные колебания могут становиться реальными флуктуациями полей – волнами, частицами в зависимости от условий.

Ускоренное расширение пространства – один из видов такого воздействия. Вакуумное колебание поля может превратиться в реальную флуктуацию, если пространство существенно расширится за время, характерное для флуктуации. Именно это и происходит при космологической инфляции.

Основные флуктуации инфлатона происходят на масштабе 10-27 см. Их амплитуда имеет относительную величину порядка $H \sim 10^{-6}$. Самые сильные квантовые возмущения скалярного поля, раздувающего вселенную имеют размер около 10-27 см. Через каждые 10-37 с их размер удваивается. Через 10-35 с увеличивается в тысячу раз. А всё это время возникают новые флуктуации исходного размера. Пока продолжается инфляция возникают и растягиваются новые флуктуации. Их амплитуда не меняется, как не меняется и само поле. Если инфляция продолжается 10-35 с, то за это время происходит сотня удвоений размера первых флуктуаций. Это рост на 30 порядков. Самые первые флуктуации растягиваются до размера 10 м. Если инфляция идет с постоянным темпом, то к её завершению спектр возмущений поля с одинаковой амплитудой будет от 10-27 см до макроскопических величин.

Инфляция заканчивается «скатыванием» инфлатонного поля к нулю, причем это скатывание происходит с ускорением. В конце инфляции все флуктуации усиливаются в результате переходного процесса до относительных амплитуд плотности $5 \cdot 10^{-5}$. С таких значений дальше идет их эволюция.

По завершению инфляции Вселенная перешла на обычный режим расширения по инерции – по сценарию Фридмана. Температура её порядка 10^{16} Гэв или 1029 К. С тех пор она расширилась почти на 29 порядков. Положитель-

ные флуктуации плотности, имевшие размер в десяток микрон на конец инфляции, превратились в гигантские скопления галактик, содержащие сотни триллионов звезд. А еще раньше десятимикронная флуктуация появилась как квантовый эффект на масштабе 10-27 см.

Таким образом, любые скопления галактик, любая галактика – прямой потомок микроскопической квантовой флуктуации, растянутой до микронных размеров за время инфляции и ещё на 29 порядков – по инерции после её окончания.

Теория инфляции предполагает объединение двух идей – первая это существование первичной стадии с плоским пространством де Ситтера, вторая – о том, что все наблюдаемые неоднородности происходят из квантово-гравитационных вакуумных флуктуаций в далеком прошлом.

Идея Андрея Линде (1983 г.) – хаотическая инфляция, в которой стала лишней стадия сжатия, предложены произвольные начальные условия для старта инфляции [5]. В результате время на расширение вселенной стало больше.

Была высказана идея, что все время пока инфляция продолжается, возникают новые вселенные с разными свойствами. Это может происходить в разные моменты на разных участках потенциальной кривой, по которой скачивается поле. Даже если поле сползло с центрального бугра, то квантовые флуктуации могут забросить его назад, и инфляция продолжится. То же самое может происходить и в любом месте на склоне потенциала, что определяет условия существования хаотической инфляции. Поле инфлатона за счет квантовых флуктуаций в разных местах склона потенциала способно скакать вверх вплоть до планковских значений плотности энергии. Квантовые флуктуации обеспечивают практически бесконечные возможности для вечной хаотической инфляции!

Ранняя Вселенная, описанная в модели де Ситтера была не сингулярной, её история может быть продолжена назад до времени, минуя состояние с бесконечной плотностью. Мир де Ситтера оказывался нестабильным, что делало такое предположение невозможным. Кроме того, изначальный сценарий исключал состояние хаоса, что противоречило основной идее инфляционной космологии.

Хаотическая инфляция

Идея хаоса утвердилась как исходная в теории вечной хаотической инфляции. Оказалось, что если поле инфлатона находится где-то на склоне потенциала, то чтобы оно успело термализоваться, путь вниз должен быть достаточно пологий и обеспечивать достаточное время, чтобы раздуть Вселенную.

Все время пока инфляция продолжается возникают новые вселенные с разными свойствами, квантовые флуктуации могут осуществлять заброс поля и на склоне потенциала – инфляция продолжится.

Поле инфлатона под действием квантовых флуктуаций может приобретать разные значения. Когда оно достигает значений близких к планковскому

могут возбуждаться флуктуации всех остальных полей. Значит возможно образование другого вакуума и поле покатится вниз, раздувая пространство уже с другим вакуумом.

Возможно возникновение вселенной с другими законами физики. Важно то, что в теории инфляции Вселенная может проходить через разные стадии перед тем, как раздуться. Это может быть стадия сжатия вселенной, а может быть обычная космологическая сингулярность, когда вселенная начинает инфляцию из состояния, близкого к планковскому.

Возможно существование разных вселенных с разными законами природы, но мы можем жить там, где законы природы нам это позволяют. Возникает проблема – как образуются разные вселенные с разной физикой, и в какой-то из них можем жить мы?

Вход в стадию инфляции всегда возможен, если поле не успело термализоваться и, если потенциал достаточно пологий, а путь вниз достаточно длинный. Природа будет пробовать разные варианты в том числе и те, для которых простые уравнения с учетом торможения позволяют вход в режим инфляции. Поле – инфлатон за счет квантовых флуктуаций будет скакать по склону потенциала и может достигать планковских плотностей энергии. Даже если поле сползло с бугра, то квантовые флуктуации могут забросить его обратно, и инфляция продолжится. Когда потенциал окажется вблизи планковских значений – возможно возбуждение флуктуаций других полей. Это значит, что вакуум может перестроиться и поле покатится вниз, раздувая пространство уже с другим вакуумом, с другими законами физики. Возникает проблема – при каких условиях происходит возникновение новой Вселенной? В теории инфляции не важно через что проходит Вселенная перед тем как раздуться. Важно то, что инфляция стартует от состояния близкого к планковскому, независимо от того как оно возникло. Для инфляции основные проблемы начинаются при приближении к планковским масштабам. Главной из них является – как сшить квантовую механику с гравитацией? В условиях квантовой гравитации понятия классических масштабов оказываются неприменимы, линейки и часы в квантовых условиях просто ломаются.

Квантовые флуктуации обеспечивают заброс поля вверх практически в любом месте потенциальной кривой. Механизм квантовых флуктуаций обеспечивает условия хаотической вечной инфляции. Возникающий спектр возмущений вызывает «выгорание» вакуума и переход его в частицы. При этом решается вопрос как выйти в фазу Большого взрыва – горячей фридмановской вселенной.

Модель хаотической инфляции выражается в идее произвольных начальных условий. Это дополнение к уравнениям движения с учетом трения и эффекту медленного скатывания обеспечивает время, достаточное для расширения. Из теории инфляции следует, что вселенные появляются в бесконечном количестве, причем возникают группы похожих вселенных, в которых законы физики и физические константы тождественны нашим. Вечная инфляция дает пучки родственных вселенных.

Вечная инфляция

Вечная инфляция состоит из разных этапов существования Вселенной. Начало Вселенной определяется раздуванием пространства, при котором отдельные участки разлетаются со сверхсветовыми скоростями. Особенность инфляции определяется квантовыми флуктуациями, величина которых определяет плотность энергии поля. В качестве инфлатона могут выступать разные поля. При расширении пространства квантовые колебания поля в частности, инфлатона переходят в реальные неоднородности – флуктуации плотности. В процессе инфляции происходит «выгорание» поля инфлатона, поле диссипирует в частицы, создаются условия для перехода к горячей Вселенной, расширяющейся по закону Фридмана. Этот момент и называют «Большим взрывом».

Нулевая энергия вакуума была и остается болевой точкой современной физики.

Необходимое условие возникновения инфляции определяется существованием участков с планковской плотностью.

Вакуумное колебание поля может превратиться в реальную флуктуацию, поскольку само пространство за период колебания данной частоты, характерной для вакуумного колебания, заметно расширится. В этом и состоит космологическая инфляция. Флуктуации рождаются все время, пока продолжается инфляция, они возникают и растягиваются в результате раздувания пространства. За это время происходит скатывание поля по потенциальной кривой и инфляция заканчивается.

Для теории инфляции не важно через что проходит Вселенная перед тем как раздуться. Инфляция стартует от состояния близкого к планковскому, независимо от того, откуда последнее взялось. Для инфляции важно существование квантовых флуктуаций, которые обеспечивают подброс вверх по склону потенциала, вплоть до планковских значений. При этом возможно возбуждение больших флуктуаций разных полей. Происходит перестройка вакуума и возникает раздувание пространства с другим вакуумом, с другими законами физики.

Инфляция, раз начавшись, не может закончиться. Источником инфляции является скалярное поле (инфлатон). Скорость инфляции определяется плотностью энергии, которая пропорциональна величине поля. Если пренебречь квантовыми эффектами, то величина поля снижается, соответственно плотность энергии тоже. Чем ниже плотность энергии, тем быстрее ослабляется поле, все заканчивается его диссипацией, превращением в частицы и переходом на фридмановскую стадию расширения. Возникает вопрос: когда происходит Большой взрыв? Это вовсе не начало расширения пространства. Начало расширения пространства определяется квантовыми эффектами – образованием участков поля планковской плотности энергии и взаимодействием с квантовыми флуктуациями поля. Свойства их остаются невыясненными, но эффект – чудовищное расширение пространства. За кратчайшее время ($\sim 10^{-37}$ с) происходит старт новой вселенной. Этот момент связан с окончанием инфляции, поскольку происходит выгорание поля инфлатона с образованием ча-

стиц. Это создает условия для перехода к горячей Вселенной, расширяющейся по закону Фридмана. Именно этот момент определяет рождение новой вселенной с ее огромной энтропией и большим будущим. Если пренебречь квантовыми эффектами, то инфляция идет везде одинаково, в результате происходит Большой взрыв с возникновением гигантской однородной вселенной [7]. Когда мы экстраполируем историю Вселенной вспять до точки Большого взрыва, возникает понятие космологической сингулярности. Однако теория струн исключает представление о сингулярности как понятие о точке [4]. Учет квантовых эффектов объясняет возникновение реальных неоднородностей – флуктуаций плотности поля. Вполне возможно, что флуктуация по амплитуде больше, чем изменение поля за время ее появления. Если эта флуктуация положительная, то она увеличит значение поля, если отрицательная – то поле уменьшится быстрее, чем обычно. При возрастании поля увеличилась его плотность, а значит и темп расширения пространства в данной области. В результате положительная флуктуация вызвала увеличение пространства на больший объем, чем при отрицательной. Потом на эту положительную флуктуацию садятся новые, в том числе и положительные, тогда объем растет еще быстрее. Получается, что за счет квантовых флуктуаций местами поле лезет вверх, вместо того чтобы падать. Условно говоря, каждые 10^{-35} – 10^{-34} с происходит новое поколение больших взрывов, дающих начало новым вселенным, в каждом поколении их число экспоненциально увеличивается. И так миллиарды лет – инфляция никогда не может закончиться, поскольку всегда где-то есть область более сильного поля, раздувающегося быстрее других. Существующие в вакууме квантовые флуктуации поля составляют основу хаотической вечной инфляции. Раздувание пространства со скоростью, превышающей скорость света, разносит рождающиеся пузырьки-вселенные и они теряют причинную связь. Картина вечной инфляции предстает в виде растущих и множущихся пузырей разных размеров [6].

На раздувающихся пузырях образуются области сильного поля, выдувающиеся в новые пузыри, расширяющиеся с большей скоростью. Каждый пузырь превратится во вселенную, пройдя через стадию большого взрыва, но до этого от него ответвятся новые пузыри с сильным полем. Новые вселенные продолжают образовываться, здесь и там. Они разносятся в стороны, порождают новые и т.д. В широком поле зрения можно видеть мириады вселенных. Инфляция продолжается вечно.

Механизм квантовых флуктуаций объясняет возможность заброса энергии вверх в процессе скатывания по потенциальной кривой. Хаотический характер квантовых флуктуаций определяет хаотический характер прохождения инфляции и оправдывает идею произвольных начальных условий, которые приводят к хаотической вечной инфляции. Возникает бесконечное количество вселенных, где законы физики и физические константы тождественны нашим. Так происходит, если возникающая вселенная с одним и тем же вакуумом успевает расшириться.

В теории новой инфляции предполагалось, что поле должно прийти в термическое равновесие, чтобы оказаться в нуле на вершине холма, но време-

ни на это оказалось мало. Поле не успевало термолизироваться и оказалось где-нибудь на склоне потенциала. Однако, из уравнения с учетом трения следует, что этого времени вполне достаточно, чтобы поле успело раздуть вселенную, если потенциал пологий и склон достаточно длинный. Оказалось, что можно обойтись без термолизации. Дело в том, что природа пробует всякие варианты, а значит и те, для которых простые уравнения показывают вход в режим инфляции [3,7].

Все время, пока инфляция продолжается, квантовые флуктуации вызывают случайные скачки потенциала, плотность энергии которых может быть достаточно большой, чтобы вызвать заброс назад и обеспечить продолжение инфляции. Поле инфлатона за счет квантовых флуктуаций способно скакать вверх по склону потенциала вплоть до планковских значений плотности энергии. Вблизи значений, близких к планковским, возможно изменение свойства вакуума. Происходит возбуждение больших флуктуаций разных полей, что приводит к образованию нового вакуума, поле снова скатывается вниз и раздувает пространство уже другой вселенной с другими законами физики. Возникает задача как объяснить образование вселенных с разными законами физики и те условия, при которых могли бы жить мы или кто-то еще. Вопрос, который стоит в центре внимания антропного принципа [2, 5].

Хаотическая вечная инфляция создает условия возникновения вселенных с разной физикой. В основе механизма инфляции лежала модификация уравнений Эйнштейна, которая проявляется при огромной кривизне пространства-времени. В уравнения был добавлен член пропорциональный квадрату кривизны. Нулевые колебания вакуумных полей «деформируются» большой кривизной четырехмерного пространства-времени. При этом энергия вакуума не уменьшается, как в эффекте Казимира, а увеличивается и очень сильно. Это соответствует возникновению скалярного поля, которое вызывает гравитационное расталкивание пространства. Эта модель эквивалентна модели инфляции с сильным полем (модель медленного скатывания). Начало разработки теории сильного скалярного поля, которое создает расталкивание пространства, положено в работе А. Старобинского [9]. Это модель более поздней инфляции при условии медленного скатывания, соответствующего сильному скалярному полю.

Учет множества разных начальных условий составляет смысл хаотической инфляции, что является общепринятой концепцией зарождения Вселенной. Все время, пока инфляция продолжается, возникают новые вселенные с разными свойствами. Даже если поле где-то сползло с центрального бугра, квантовые флуктуации могут забросить его назад и инфляция продолжится.

Существует множество начальных условий, с которых может начаться инфляция. Не важно, через что проходит Вселенная перед тем, как войти в стадию раздувания. Основные проблемы возникают при приближении к планковским масштабам. Инфляция возникает независимо от того, какова причина возникновения планковского состояния.

В марте 2014 года появилось сообщение об открытии реликтовых гравитационных волн, это вызвало сенсацию. Обнаружение гравитационных волн –

неоспоримое доказательство справедливости теории инфляции. Источником гравитационных волн может быть резкое изменение состояния инфлатона, плотность энергии которого близка к планковской.

В связи с ошибками, допущенными ранее при обработке экспериментальных результатов по наблюдению гравитационных волн, научная общественность требует их повторного рассмотрения. Существование гравитационных волн дает неоспоримое доказательство теории инфляции. Согласно полученным результатам, амплитуда гравитационных волн может быть очень близка к тем значениям, к которым приводят простейшие варианты хаотической инфляции. А это уже сопоставимо с открытием бозона Хиггса.

Почему именно гравитационные волны так важны? Дело в том, что генерация гравитационных волн возможна только при плотности энергии близкой к планковской. Аналогично и возникновение инфляции требует существования энергии планковской плотности. Оба эти явления объединяет одно общее понятие – планковская плотность энергии.

Теория инфляции хорошо объясняет огромный размер Вселенной, ее однородность, её структуру, включающую галактики, скопления галактик, их происхождение как результат инфляции микроскопических квантовых флуктуаций. На основании результатов наблюдений хорошо поняты свойства темной материи и темной энергии. Но мы не знаем, как они связаны с известными частицами и полями. Мы не знаем, что такое инфлатон, вызывающий раздувание пространства. Существует модель инфляции, в которой не нужно никакого инфлатона [9]. В ней инфляция возникает за счет кривизны пространства, которая должна быть достаточно большой и однородной. Однако физическая основа инфляции остается тёмным местом в нашей картине мира.

Современное ускоренное расширение Вселенной показывает, что механизм инфляции работает, и мы его непосредственно наблюдаем. Теория инфляции дает механизм генерации возмущений, определяющий усиление вакуумных квантовых флуктуаций скалярного поля. Галактики и их скопления есть результат квантовых флуктуаций, которые были растянуты инфляцией и затем усилены за счет гравитационной неустойчивости до макроскопических размеров. Разработка механизма образования галактик, с одной стороны, и объяснение однородности и плоского пространства Вселенной, с другой стороны, – это блестящие достижения теории инфляции.

Существенно, что положительные флуктуации имеют преимущество. Действительно, если поле возросло, увеличилась и плотность его энергии, а значит и темп расширения пространства в данной области. В результате положительная флуктуация растянулась вместе с пространством на больший объем, чем отрицательная. Таким образом, поле за счет квантовых флуктуаций местами лезет вверх вместо того, чтобы падать. Если бы не флуктуация, то инфляция могла бы закончиться через 10^{-35} – 10^{-34} с после начала. Так и происходит где-то в раздувающемся пространстве: поле падает, диссипирует в частицы, происходит новый большой взрыв, знаменующий рождение новой вселенной. Но в других областях поле держится, а через 10^{-34} с даже усиливается – инфляция продолжается. Пространство продолжает раздуваться, увеличива-

ется вдвое каждые 10-37 с. Условно говоря, каждые 10-35–10-34 с возникает новое поколение больших взрывов, дающих начало новым вселенным, – в каждом поколении их число экспоненциально увеличивается. И так миллиарды лет – инфляция никогда не может закончиться, поскольку всегда где-то есть область сильного поля, раздувающегося быстрее других областей с более низким полем. Происходит бесконечный фейерверк больших взрывов.

Постоянно возникает вопрос: «Что было до Большого взрыва?» Правильный ответ – была космологическая инфляция!

Список литературы:

1. Альберт Эйнштейн и теория гравитации. М.: Мир, 1979. С. 146–196.
2. Вайнберг С. Проблема космологической постоянной (Лекции имени Мориса Леба по физике в Гарвардском университете 2, 3, 5 и 10 мая 1988 года) // Успехи физических наук. 1989. Т. 158. Вып. 4. С. 639–678.
3. Грин Б. Скрытая реальность. Параллельные миры и глубинные законы космоса. М.: Либроком, 2012. 400 с.
4. Гросс Д. Грядущие революции в фундаментальной физике. Институт теоретической физики. Кавли, Санта-Барбара, калифорния, США. 10.07.2009.
5. Линде А. Инфляция, квантовая космология и антропный принцип.
URL: <http://www.astronet.ru/db/msg/1181211>
6. Линде А. Многоликая Вселенная. Всероссийский проект «Открытые публичные лекции». ФИАН. 10.06.2007. URL: <http://elementy.ru>
7. Штерн Б. Прорыв за край мира. О космологии землян и европеан. М.: Троицкий вариант, 2014. С. 227, 243, 278, 291.
8. Эйнштейн А. Собрание научных трудов. Т. 3. М.: Наука, 1966. 623 с.
9. Starobinsky A.A. Lectures on modern problems of cosmology // Труды международной школы по гравитации и космологии "GRACOS-2014". 30.06 – 5.07. 2014, Казань.
10. Фридман А.А. Мир как пространство и время. М.: Наука, 1965.
11. Hubble Edwin. The observational approach to cosmology. Of the Mount Wilson Observatory, Carnegie Institution of Washington, Oxford, At the Clarendon Press, 1937.
12. A. Guth. Phys. Rev. D 23, 347 (1981).