

Полярные глаза: VIGOR2 — телескоп, установленный на станции Амундсен — Скотт на Южном полюсе; с января 2010 г. по декабрь 2012 г. телескоп наблюдал один и тот же небольшой участок неба: его целью был поиск проявлений первичных гравитационных волн в самом старом свете Вселенной



Лоуренс Краусс

Большого взрыва

Дискуссии о возможном обнаружении идущих из ранней Вселенной гравитационных волн находятся под постоянным пристальным вниманием ученых. Будучи подтвержденным, это открытие позволит установить связь между гравитацией и квантовой теорией и, быть может, даже доказать существование других вселенных

ОБ АВТОРЕ

Лоуренс Краусс (Lawrence M. Krauss) — физик-теоретик и космолог из Университета штата Аризона.



В марте 2014 г. группа ученых, работающих на микроволновом телескопе на Южном полюсе, опубликовала сообщение, взволновавшее научное сообщество. В нем говорилось об обнаружении гравитационных волн, рожденных в первые мгновения после Большого взрыва.

Наблюдения, будучи подтвержденными, окажутся важнейшими за последние десятилетия. Ученые смогут с определенностью сказать, как зародился наш мир, в то время как пока им приходится только спекулировать на эту тему. Кроме того, окажется возможным связать в единое целое лучшие теории субатомного (квантового) мира с лучшими теориями гравитации, описывающими массивные тела в космосе, основанными на общей теории относительности Эйнштейна. И, наконец, можно будет предоставить убедительные (пусть даже пока и косвенные) доказательства существования иных миров.

! ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- В начале 2014 г. ученые сообщили о возможном открытии гравитационных волн, рожденных в первые моменты после Большого взрыва.
- Если открытие будет подтверждено, то ученые получат возможность исследовать уникальные физические процессы на стыке теории относительности и квантовой теории.
- Быть может, удастся получить косвенные свидетельства существования мультивселенной — бесконечного пространства с бесконечным набором отдельных вселенных.

Как только поступило сообщение об открытии гравитационных волн, многие ученые задались вопросом, насколько оно реально. Скептицизм послужил основанием для организации большого количества новых независимых наблюдений, результаты которых будут известны уже в следующем году, что позволит окончательно подтвердить или опровергнуть анонсируемое открытие. Нам не придется долго ждать: скоро станет известно, действительно ли перед нами маяк ранней Вселенной, ведущий к ее неразгаданым тайнам.

Дорога к теории инфляции

Как родилась эта теория? Все началось с двух кажущихся парадоксов ранней Вселенной (разрешению которых сможет помочь открытие гравитационных волн).

Первая загадка относилась к свойствам крупномасштабной геометрии Вселенной. Сформировавшись в результате Большого взрыва около 13,8 млрд лет назад, Вселенная на протяжении всей своей жизни расширяется. Однако даже после такого длительного периода расширения Вселенная остается практически плоской. Мы живем в трехмерной плоской Вселенной, в которой лучи света (в среднем) распространяются по прямым линиям.





Однородная Вселенная. На больших масштабах наша Вселенная выглядит однородной по всем направлениям. На снимке экстремально глубокого поля можно видеть, что в среднем плотность галактик одинакова. На площадке, по площади меньшей полной Луны, в результате многочасовых наблюдений Хаббловского космического телескопа были выявлены тысячи галактик. Однородность Вселенной на сверхбольших масштабах может быть объяснена экстремально быстрым расширением пространства сразу же после Большого взрыва.

Проблема в том, что такая плоскостность Вселенной маловероятна с точки зрения общей теории относительности. Если вещество или излучение — доминирующие формы энергии Вселенной, то небольшие отклонения от плоскостности с расширением будут только нарастать. Даже крошечное отклонение от плоскостности в ранней Вселенной привело бы к настоящему моменту к тому, что Вселенная была бы либо открытой (геометрия седловой поверхности), либо замкнутой (геометрия сферы). Для того чтобы Вселенная была плоской сегодня, необходимо, чтобы она была с огромной точностью идеально плоской в далеком прошлом.

Второй парадокс заключается в том, что Вселенная выглядит одинаково во всех направлениях: она изотропна. Это очень странно. Свет от поверхности последнего рассеяния успел добраться до нас, но не до областей «по другую сторону» от нас. Иначе говоря, области внутри нашей Вселенной (*превосходящие размерами три градуса*. — *Примеч. пер.*) никогда не сообщались друг с другом ни сейчас, ни в прошлом (они причинно не связаны). Но тогда каким же образом они стали такими похожими?

В 1980 г. молодой физик Алан Гут размышлял над этими двумя парадоксами и нашел решение: наша

Вселенная могла стремительно раздуться сразу же после Большого взрыва. Гут пришел к модели, которую назвал «инфляционной», размышляя о ключевом разделе физики элементарных частиц, а именно о спонтанном нарушении симметрии в стандартной модели и о последовательном обособлении физических взаимодействий при таких нарушениях.

Имеется доказательство, что спонтанное нарушение симметрии имело место во Вселенной по крайней мере один раз. Согласно теории электрослабого взаимодействия, два фундаментальных физических взаимодействия — электромагнитное и слабое — предстают перед нами различными из-за некоего «катаклизма» в ранней Вселенной. Когда-то давно эти взаимодействия были единым целым.

Вселенная с расширением охлаждалась. Когда Вселенной было от роду несколько миллионных долей от одной миллионной доли секунды, то произошел фазовый переход (сродни тому, как происходит образование кристалликов льда в охлаждаемой жидкости), который изменил природу пустого пространства-времени. Вселенная не была на самом деле пустой, она была заполнена особым фоновым полем (аналогией могло бы послужить

ОТ ИНФЛЯЦИИ К ГРАВИТАЦИОННЫМ ВОЛНАМ НА ПОЛЯРИЗОВАННОМ СВЕТЕ

Доказательство существования инфляционной стадии в ранней Вселенной, когда она стремительно растянулась сразу же после своего рождения, мы могли бы найти в самом первом свете, который мы можем наблюдать: космическом микроволновом фоновом излучении. Этот свет был испущен через 380 тыс. лет после Большого взрыва. Во время инфляции усиление квантовых флуктуаций гравитационного поля могли породить гравитационные волны, рябь на ткани пространства-времени. Эти первичные гравитационные волны могли привести к поляризации реликтового излучения. Эксперимент *WMAP* обнаружил соответствующую поляризацию.

1 Инфляция

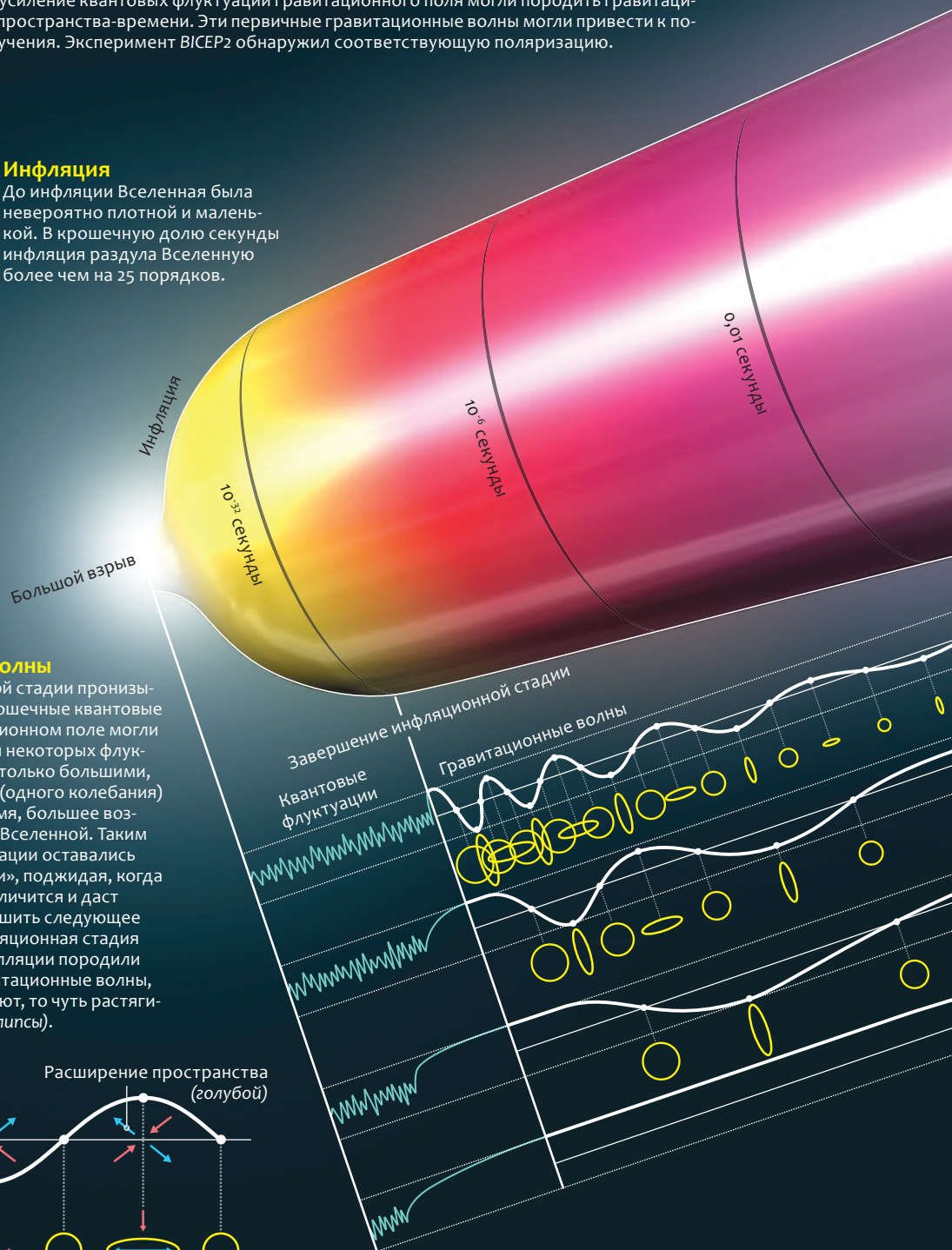
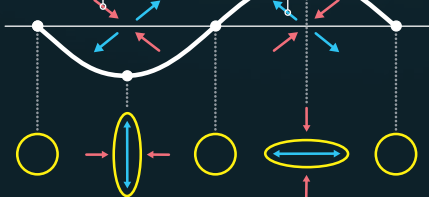
До инфляции Вселенная была невероятно плотной и маленькой. В крошечную долю секунды инфляция раздула Вселенную более чем на 25 порядков.

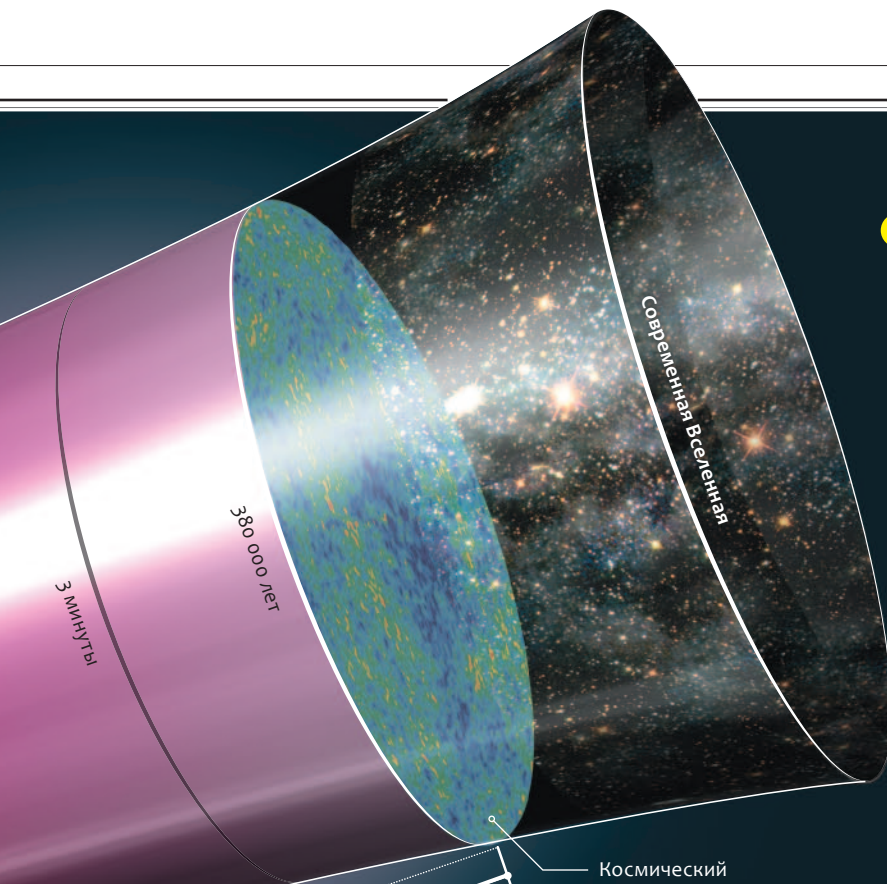
2 Гравитационные волны

Во время инфляционной стадии пронизывающие Вселенную крошечные квантовые флуктуации в гравитационном поле могли быть растянуты. Длины некоторых флуктуаций могли стать настолько большими, что для их осцилляции (одного колебания) потребовалось бы время, большее возраста тогдашней юной Вселенной. Таким образом, такие флуктуации оставались как бы «вмороженными», ожидая, когда возраст Вселенной увеличится и даст им возможность совершить следующее колебание. Когда инфляционная стадия завершилась, эти осцилляции породили длинноволновые гравитационные волны, которые то чуть сжимают, то чуть растягивают пространство (эллипсы).

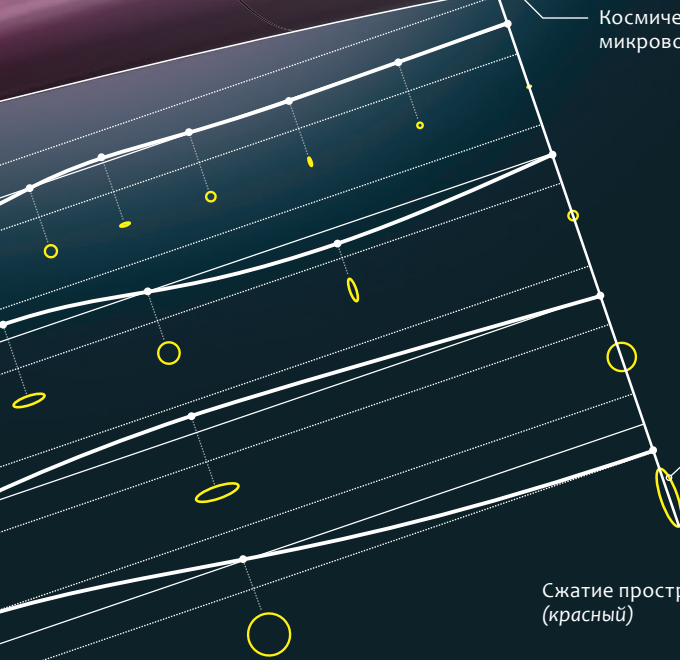
Сжатие пространства
(красный)

Расширение пространства
(голубой)





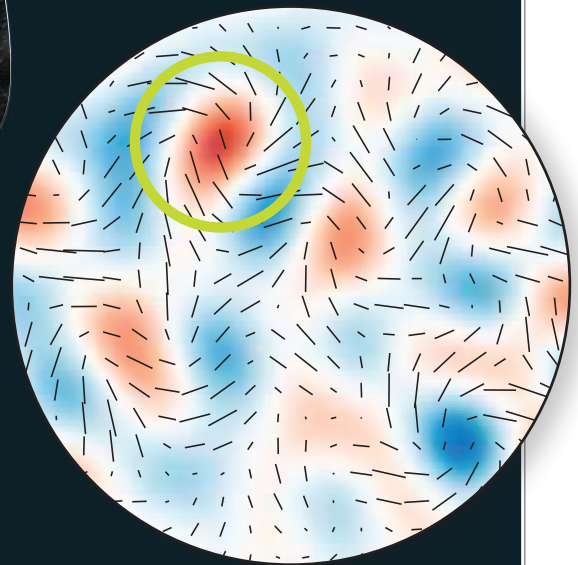
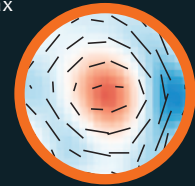
Космический микроволновой фон



Самые длинноволновые гравитационные волны с самыми большими амплитудами наиболее сильно сжимают и растягивают пространство

4 «Флюгеры»

Поляризация может быть различных типов. Обычная температура и флуктуации плотности в пространстве обладают круговой поляризацией (оранжевый кружок). Гравитационные волны создают направленную поляризацию (внизу). Красные пятна указывают области сжатого пространства, в таких потенциальных ямах скапливаются фотоны, отчего температура этих областей повышается. Голубым отмечены более холодные области.



3 Поляризация

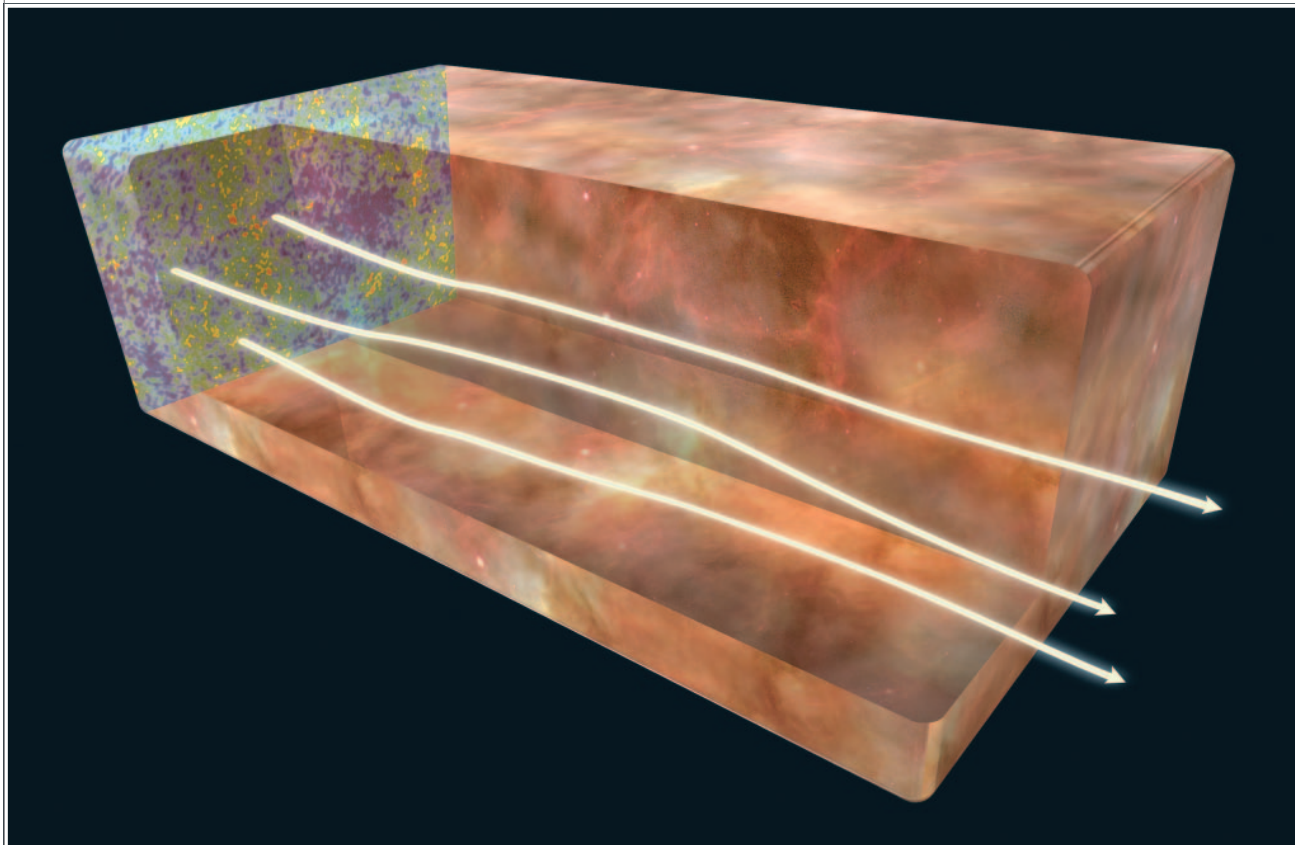
Сжатие и растяжение пространства, вызываемые гравитационными волнами, могут влиять на амплитуды рассеянного микроволнового реликтового излучения, которые чуть увеличиваются в одном направлении и чуть уменьшаются в другом, т.е. реликтовое излучение приобретает поляризацию.



Illustration by Don Foley (universe) and Jen Christensen (schematics) BICEP2 COLLABORATION (polarization insets)

ЭФФЕКТ ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Обнаружение поляризации космического фонового излучения (на илл. — *пестрая голубоватая поверхность*) еще не представляет собой доказательства существования гравитационных волн, потому что другие процессы могут давать вклад в эту поляризацию. Пути реликтовых фотонов (*искривленные линии*) могут, например, быть отклонены массивными галактическими скоплениями, чьи гравитационные поля искажают пространство-время вблизи себя (разновидность так называемого гравитационного линзирования). Этот эффект может приводить к поляризации реликтового излучения. Кроме того, частицы пыли нашего Млечного Пути излучают поляризованный свет, который трудно отличить от реликтового излучения. Недавняя обработка данных наблюдений космического радиотелескопа *Planck* показала большую вероятность указанного процесса.



электрическое поле, но тип данного поля был очень труден для обнаружения). Это фоновое поле, известное как поле Хиггса, было «выработано» всей Вселенной.

Поле Хиггса влияет на распространение частиц в пространстве. Те частицы, которые взаимодействуют с этим полем (например те, которые выступают переносчиками слабого взаимодействия), испытывают сопротивление и, следовательно, проявляют себя уже как массивные частицы. Другие частицы, которые не взаимодействуют с этим полем (например, фотон — переносчик электромагнитного поля), остаются безмассовыми. Таким образом, сила слабого взаимодействия и электромагнитная сила начинают обладать разными свойствами, нарушая симметрию, которая объединяла их. Эта удивительная модель была подтверждена на Большом адронном коллайдере (БАК) в CERN в 2012 г. с открытием бозона Хиггса.

Возможно, похожее нарушение симметрии могло случиться и в более ранней Вселенной. Силы электромагнитного, слабого и сильного взаимодействий были объединены в одну. Только гравитационные силы стояли

особняком. Действительно, существует множество косвенных подтверждений существованию такого объединения, когда Вселенной было 10^{-36} секунд от руда. С охлаждением Вселенной могли происходить процессы фазовых переходов, спонтанные нарушения симметрии, которые меняли природу пространства, вовлекая фоновое поле, которое заставило электрослабые взаимодействия вести себя иначе, чем сильные взаимодействия.

Так же как и в случае поля Хиггса, нарушающее симметрию гипотетическое поле должно порождать экзотические и очень массивные частицы, но вовлеченные в этот процесс массы должны быть гораздо больше, чем масса хиггсовской частицы. Фактически это означает, что для прямого поиска соответствующих экспериментальных подтверждений необходимо создать ускоритель в 10 млрд раз мощнее, чем БАК. Требуемая такой проверки теория носит название теории великого объединения, поскольку она дает единое описание трем типам физических взаимодействий, исключая только гравитационное.

Спонтанное нарушение симметрии в ранней Вселенной могло бы, по мнению Гута, решить все проблемы стандартной теории Большого взрыва, если бы только поле, отвечающее за такое нарушение симметрии, смогло хотя бы короткий промежуток времени побыть в метастабильном состоянии.

Вода переходит в метастабильное состояние, когда внешняя температура быстро падает ниже точки замерзания воды. При таких условиях вода не замерзает сразу. Когда же она все-таки наконец замерзнет (полностью завершится фазовый переход), то выделит тепло, называемое скрытой теплотой.

Схожим образом поле, вызывающее фазовые переходы в теории великого объединения, могло бы передать энергию в окружающее пространство. Во время краткого периода инфляции эта энергия могла создать

Несмотря на убедительность теории инфляции, ученые до сих пор не знают, как именно она происходила. Причина этого — большая неопределенность в наших знаниях об объединении взаимодействий и прежде всего о шкалах энергий, сопровождавших это объединение

гравитационное отталкивание, которое заставило Вселенную расширяться экспоненциально быстро. Благодаря этому расширению к сегодняшнему моменту Вселенная могла увеличить свой размер на 25 порядков за промежуток времени 10^{-36} с. Такое стремительное расширение может обеспечить наблюдаемую сегодня плоскостность и изотропию Вселенной, успешно разрешив два обсуждаемых выше парадокса.

Несмотря на убедительность теории инфляции, ученые до сих пор не знают, как именно она происходила. Причина этого — большая неопределенность в наших знаниях об объединении взаимодействий и прежде всего о шкалах энергий, сопровождавших это объединение. Простейшие варианты теории инфляции объясняют многое из того, что мы наблюдаем в современной Вселенной. Однако различные инфляционные модели могут порождать сильно отличающиеся друг от друга миры.

Для того чтобы доказать, была ли инфляция, необходимо отыскать способ непосредственного, прямого исследования ранней Вселенной. Другими словами, исследовать

физические процессы, характерные для тех далеких времен. Оказывается, гравитационные волны предоставляют ученым такую возможность.

Следы гравитационных волн

Альберт Эйнштейн, опубликовав в 1915 г. общую теорию относительности, понял, что она приводит с новым интереснейшим физическим феноменам. В общей теории относительности гравитационное поле — это рябь фоновое пространства-времени. Источник энергии, переменный во времени (например, планета, двигающаяся вокруг своей звезды, или двойная звездная система), должен генерировать искажения метрики, также переменные во времени, распространяющиеся от этого источника со скоростью света. Если в окрестности проходят гравитационные волны, то расстояние между объектами указанных систем будет немного меняться.

Поскольку гравитационное взаимодействие очень слабо в сравнении с электромагнитным, то гравитационные волны очень трудно зарегистрировать. Эйнштейн даже сомневался, можно ли их вообще будет когда-нибудь уловить. Спустя почти 100 лет после предсказания гравитационных волн ученые все еще не могут измерять их непосредственно. Самые хорошие кандидаты, чьей колоссальной мощности должно быть достаточно для регистрации гравитационных волн, — это системы двух сливающихся черных дыр. Но исследование таких катастрофических астрофизических феноменов пока к успеху не привели. К счастью, Вселенная может предложить более мощный источник гравитационных волн — флуктуирующие квантовые поля, рожденные в первые моменты после Большого взрыва.

Когда Вселенная была очень молода, до начала инфляционной стадии, она была упакована в объем, много меньший размеров атома. На таких крошечных масштабах доминировали законы квантовой физики. Однако, поскольку в таком объеме сосредоточена и гигантская энергия, то описание процессов с необходимостью требует релятивистской теории. Для понимания физических свойств ранней Вселенной необходимо использовать квантовую теорию, в то же время описывающую пространство и время. Согласно квантовой теории поля, на очень малых масштабах все квантово-механические поля флуктуируют. Если все другие квантовые поля ведут себя похожим образом, в то время как плотность инфляционной энергии управляет расширением Вселенной, то гравитационные поля могут также обладать флуктуациями.

Во время инфляционного экспоненциального расширения все начальные квантовые флуктуации с малыми длинами волн окажутся сильно растянутыми. Если длины волн становятся достаточно большими, то время, необходимое такой флуктуации для осцилляции, будет становиться больше, чем возраст Вселенной. Квантовые флуктуации будут как бы «вмороженными» до тех пор, пока Вселенная не станет достаточно старой, чтобы наступило время для следующей осцилляции. Во время инфляционной стадии вмороженные осцилляции будут

расти: процесс, которые усиливает начальные квантовые осцилляции в классические гравитационные волны.

В то время, когда Гут предложил свою инфляционную модель, советские физики А.А. Старобинский, В.А. Рубаков, М.В. Сажин и их коллеги независимо отметили, что во время инфляции всегда образуется гравитационно-волновой фон, а интенсивность гравитационных волн определяется энергией, заключенной в инфляционном поле. Другими словами, если мы сможем обнаружить гравитационные волны, идущие от инфляционной стадии, то мы не только получим подтверждение того факта, что инфляция действительно была, но также сможем глубже понять квантовые процессы, которые породили инфляцию.

Дым после выстрела

Однозначное указание на инфляцию имеет смысл только в том случае, если это указание будет наблюдаемо. Масштабы инфляции ожидаются сравнимыми с расстояниями, на которых гравитационно-квантовые «узелки» должны быть большими. Однако из-за слабости гравитационных сил самих по себе задача поиска гравитационных волн, порождаемых инфляционным полем, в лучшем случае очень сложна.

Сложна, но не невозможна. Решению может помочь космическое микроволновое фоновое излучение. Это реликтовое излучение образовалось в ранней Вселенной, когда та остыла настолько, что протоны захватили электроны, сформировав нейтральные атомы, а фотоны смогли распространяться свободно. Вселенная стала прозрачной для излучения, и это первое, самое старое реликтовое излучение сейчас доступно наблюдениям. Если гравитационные волны существовали в больших масштабах в то время, когда родилось реликтовое излучение (Вселенной тогда было 380 тыс. лет), то его следы могут «отпечататься» на этом излучении. Температура реликтового излучения была бы чуть выше по одним направлениям и чуть ниже по другим — за счет того, что крупномасштабные гравитационные волны немного растягивали пространство в одном направлении и немного сжимали в другом. Если эффект достаточно большой, то должна наблюдаться характерная анизотропия реликтового излучения, которая может быть обнаружена. Кроме того, гравитационные волны могут порождать и более тонкий эффект. Чуть искажая метрику пространства, гравитационные волны служат причиной рассеяния фотонов реликтового излучения на электронах, в результате чего реликтовое излучение становится поляризованным.

Само по себе наличие поляризации в реликтовом излучении еще не доказывает существования гравитационных волн. Существует много других возможностей объяснить наличие поляризации — например, она может быть вызвана температурными флуктуациями в реликтовом излучении или излучением возможных фоновых источников, например поляризованной пыли во нашей Галактике. Можно попробовать отделить возможный вклад гравитационных волн от других источников, исследуя пространственные структуры поляризации на картах неба.

Так, круговое направление поляризации может характеризовать гравитационные волны. Большинство других источников не дают такой структуры. Дело в том, что поляризация представляется в виде так называемых E - и B -мод. B -мода, имеющая закрученный вид, ассоциируется с гравитационными волнами. E -моду могут порождать другие источники.

Понимание того, что гравитационные волны могут влиять на поляризацию реликтового излучения, сильно воодушевило научное сообщество, поскольку такой метод может дать дополнительный шанс распознать гравитационные волны, влияние которых непосредственно на анизотропию температуры реликтового излучения очень мало. За прошедшее десятилетие было разработано много экспериментов, как наземных, так и космических, предназначенных для поиска гравитационных волн, этого «святого Грааля» инфляции.

Поскольку наблюдатели уже измерили температурные флуктуации космического микроволнового излучения, исследователи представляют свои результаты в терминах отношения сигнала возможной поляризации от гравитационных волн к величине измеренного сигнала температурных флуктуаций. В литературе это отношение обозначается буквой g .

Новые результаты

До 2014 г. исследователями, обрабатывающими наблюдательные данные, сообщалось только о верхних пределах на величину поляризации реликтового излучения. Другими словами, поляризация не должна превышать некоторого уровня (иначе она была бы уже наблюдаема). Европейское космическое агентство миссии *Planck* объявило, что, согласно их измерениям, допустимый интервал для величины g меняется от нуля (что соответствует отсутствию гравитационных волн) до 0,13. Весь научный мир был взбудоражен сенсацией в марте 2014 г., когда команда расположенного на Южном полюсе эксперимента по изучению космической внегалактической поляризации (*Background Imaging of Cosmic Extragalactic Polarization 2, BICEP2*) объявила об обнаружении g порядка 0,2, повысив предел, полученный *Planck*. Это означало, что гравитационные волны существуют. Было также заявлено, что вероятность того, что обнаруженный поляризационный сигнал вызван другими фоновыми процессами, меньше одной миллионной. Свойства сигнала характеризуют его именно как сигнал, ожидаемый от инфляционного периода.

К сожалению, на момент написания этой статьи ситуация оставалась до конца не проясненной. Дело в том, что наблюдения поляризации реликтового излучения очень сложны, и, несмотря на то что обнаруженный сигнал статистически значим, существуют и другие астрофизические процессы, которые могут генерировать схожий сигнал.

Команда эксперимента *BICEP2* исследует все возможные альтернативные источники поляризованного сигнала. Самый значимый из них — излучение поляризованной пыли нашей Галактики, которое, по результатам

команды *BICEP*, все-таки не может объяснить полученный сигнал. Однако в последние месяцы были обработаны новые данные *Planck*, которые показали, что в нашей Галактике может находиться больше пыли, следовательно, ее вклад может оказаться более существенным, чем это предполагалось. Несколько научных групп независимо анализировали данные *BICEP2* с учетом последних данных миссии *Planck*, добавляя разнообразные модели галактической пыли, проверенные ранее в других экспериментах. Заключение оказалось таковым: пыль способна воспроизвести весь (или практически весь) обнаруженный поляризационный сигнал. Несмотря на то что проделанные исследования поколебали уверенность некоторых ученых, команда *BICEP2* продолжает настаивать на правильности обработки своих данных и значимости полученного сигнала, хотя признает, что не может полностью исключить альтернативное объяснение сигнала как следствие наличия галактической пыли.

Если результаты эксперимента *BICEP2* подтверждаются и если действительно существуют гравитационные волны от инфляционной стадии Вселенной, то гравитация должна быть описана в рамках квантовой теории

Ученые также отмечают, что профиль наблюдаемого спектра сигнала совпадает с предсказанным инфляцией лучше, чем это можно было бы сделать с помощью пыли.

Важно отметить, что производятся все новые эксперименты по исследованию излучения пыли, которые могут определять ее поляризацию в разных направлениях и на разных масштабах. Если и будет получено опровержение результатов *BICEP2*, то это будет сделано в ближайший год.

Что скрывают гравитационные волны?

Если сигнал *BICEP2* будет подтвержден, то замочная скважина нашего эмпирического опыта о процессах в ранней Вселенной превратится в широкое окно. Гравитационные волны настолько слабо взаимодействуют с веществом, что они могут путешествовать почти свободно от начала времен. Открытие гравитационных волн могло бы не только наблюдательно подтвердить одно из фундаментальных положений общей теории относительности, но и непосредственно донести до нас

сигнал из тех областей пространства, когда Вселенной было 10^{-36} секунд от рода — на 49 порядков раньше, чем образовалось реликтовое излучение. Последнее на сегодняшний момент выступает единственным источником информации о ранней Вселенной.

Если обнаруженный сигнал — действительно след от инфляционной стадии, то наши знания об устройстве Вселенной существенно расширятся. Во-первых, предполагаемая (из наблюдений) мощность гравитационно-волнового сигнала будет означать, что инфляция произошла в том месте энергетической шкалы, которое близко к моменту объединения трех негравитационных сил фундаментальных взаимодействий. А это верно, только если верны наши предположения о так называемой суперсимметрии в природе. Существование суперсимметрии, в свою очередь, может быть обосновано наличием множества новых частиц с массами в диапазоне, который доступен на БАК (когда он снова включится в 2015 г.). Таким образом, если данные *BICEP2* верны, то следующий год окажется знаковым для физики элементарных частиц.

Существует и другое, менее спекулятивное приложение к открытию инфляционных гравитационных волн. Как было сказано выше, такие волны должны генерироваться, когда первичные квантовые флуктуации в гравитационном поле усиливаются во время инфляции. Но если это так, то гравитация должна найти описание в рамках квантовой теории. Это утверждение очень важно, потому что в настоящий момент у нас есть не слишком хорошая (плохо определенная и довольно противоречивая) квантовая гравитация, т.е. мы не обладаем теорией, способной описывать гравитацию с помощью правил, применимых для описания вещества и энергии на очень малых масштабах. Теория струн — возможно, один из лучших кандидатов на роль такой теории, однако до сих пор нет свидетельств в пользу того, что эта теория верна. Кроме того, как отметил Фримен Дайсон (Freeman Dyson) из Принстонского института перспективных исследований в Нью-Джерси, не существует прибора, способного регистрировать отдельные гравитоны (гипотетические частицы — переносчики гравитационного взаимодействия), потому что такой прибор должен быть настолько большим и массивным, что он коллапсирует в черную дыру прежде, чем сможет завершить наблюдение. Таким образом, мы никогда не сможем экспериментально убедиться в том, что гравитация обладает квантовой природой. Если гравитационные волны от инфляции действительно удалось обнаружить, то это, казалось бы, будет сделано в обход аргументов Дайсона. Однако если обнаруженные гравитационные волны будут классическими (неквантовыми) объектами, то мы должны путем квантово-механических вычислений определить источник этих волн. Просто наблюдая полет мяча (классического макрообъекта), мы не можем доказать, что его движение определяется квантовой механикой: он бы летел точно так же, если бы квантовой механики не было вовсе. Что нам нужно доказать в случае «классических»

гравитационных волн — так это то, что они в отличие от движущегося мячика были инициированы именно квантовыми процессами.

Недавно Фрэнк Вилчек (Frank Wilczek) из Массачусетского технологического института совместно с автором этой статьи смогли разобраться в этом вопросе. Так, используя элементарную базовую технику физических расчетов, а именно анализ размерностей, они смогли показать, что энергия гравитационно-волнового фона, порожденного только инфляцией, падала бы с уменьшением постоянной Планка. Таким образом, они полагают, что этим доказали квантовую природу инфляционных гравитационных волн.

Последствия для мультивселенной

Понимание истоков нашего мира и корректная постановка вопроса, откуда вообще взялась наша Вселенная, — вот цели исследования инфляционного расширения ранней Вселенной при помощи гравитационных волн. Эти глубокие проблемы балансируют на грани метафизики, однако могут быть переведены на язык строгой физики.

Напомним, что инфляция создается неким полем, которое хранит и во время фазового перехода высвобождает огромное количество энергии. Оказывается, характерным свойством инфляции выступает то, что, однажды начавшись, она никогда не должна закончиться и будет раздувать и раздувать Вселенную до бесконечности. При этом никогда не сформируется наблюдаемая нами картина — материя и излучение, не успев толком сформироваться, будут стремительно разлетаться, размываться. Не будет ни галактик, ни звезд, ни планет, а только стремительно расширяющееся пустое пространство. Другими словами, такой инфляционный сценарий абсолютно не удовлетворяет наблюдательным данным.

Профессор Стэнфордского университета Андрей Линде нашел способ избежать этой проблемы. Он показал, что, как только в какой-нибудь небольшой области пространства после экспоненциального расширения завершится фазовый переход, эта область окажется в состоянии вместить всю наблюдаемую нами сегодня Вселенную. В оставшемся пространстве инфляция может продолжаться вечно. Кое-где будут образовываться небольшие области, где фазовый переход завершился. В каждой такой области, абсолютно и навсегда изолированной от всех других стремительным инфляционным расширением, может происходить свой Большой взрыв с последующим формированием вселенной, в чем-то аналогичной нашей. Это так называемая модель «вечной инфляции». В ней наша Вселенная — часть гораздо большей структуры, которая может быть бесконечной по объему и может содержать любое сколь угодно большое количество не связанных друг с другом вселенных, уже сформированных, формирующихся или тех, которые только будут формироваться. Более того, физические законы в каждом из этого множества миров могут быть очень разными, поскольку фазовые переходы могут происходить разными путями.

Такая гипотеза носит название гипотезы мультивселенной, в которой нашей Вселенной отводится равноправное место в бесконечном наборе других миров. Эта гипотеза может легко объяснить, почему параметры нашей Вселенной именно такие, а не другие, — в противном случае не было бы нас, чтобы задать такой вопрос. Рассуждения такого рода принадлежат разновидности так называемого антропного принципа. Многие ученые относятся к антропному принципу с большим скептицизмом, сетуя, как иногда сильно может приблизиться к метафизике строгая наука, традиционно базирующаяся на математических расчетах и эмпирическом познании мира.

Однако если эксперимент *BICEP2* (а также БАК и другие эксперименты) позволят исследовать феномены инфляции и великого объединения, то окажется возможным однозначно определить фундаментальные физические законы, управляющие ранней Вселенной при сверхвысоких энергиях и в сверхмалых масштабах. Быть может, будет подтвержден предложенный Линде механизм вечной инфляции. В этом случае мы, хотя никогда не сможем увидеть другие миры, будем знать наверняка, что они все-таки существуют, — подобно тому как наши предшественники в начале XX в. знали о существовании атома, хотя и не видели его.

Наблюдения и эксперименты по исследованию поляризации реликтового излучения и интерпретация данных продолжают — и мы не знаем, чем это закончится. Но разве не в такой азартной погоне за тайнами мироздания заключалась и заключается привлекательность науки? ■

Перевод: О.С. Сажина

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Ликкен Д., Спиropулу М. Суперсимметрия и кризис в физике // ВМН, № 7–8, 2014.
- Grand Unification, Gravitational Waves, and the Cosmic Microwave Background Anisotropy. Lawrence M. Krauss and Martin White in Physical Review Letters, Vol. 69, No. 6, pages 869–872; August 10, 1992.
- Signature of Gravity Waves in the Polarization of the Microwave Background. Uro Seljak and Matias Zaldarriain in Physical Review Letters, Vol. 78, No. 11, pages 2054–2057; March 17, 1997.
- Statistics of Cosmic Microwave Background Polarization. Marc Kamionkowski, Arthur Kosowsky and Albert Stebbins in Physical Review D, Vol. 55, No. 12, pages 7368–7388; June 15, 1997.
- Primordial Gravitational Waves and Cosmology. Lawrence M. Krauss et al. in Science, Vol. 328, pages 989–992; May 21, 2010.
- A Universe from Nothing: Why There Is Something Rather than Nothing. Lawrence M. Krauss. Free Press, 2012.
- Detection of B-Mode Polarization at Degree Angular Scales by BICEP2. P.A.R. Ade et al. (BICEP2 Collaboration) in Physical Review Letters, Vol. 112, No. 24, Article No. 241101; June 19, 2014.