

# Всплески гравитационного прибора



О.О.Фейгин

Слева — телескоп BICEP2

*Теория Эйнштейна предсказывает, что тела, движущиеся с переменным ускорением, будут излучать гравитационные волны. Гравитационные волны являются распространяющимися со скоростью света переменными полями приливных гравитационных сил. Такая волна, падая, например, на пробные частицы, расположенные перпендикулярно направлению ее распространения, вызывает периодические изменения расстояния между частицами. Однако даже в случае гигантских систем небесных тел излучение гравитационных волн и уносимая ими энергия ничтожны.*  
И.Д.Новиков. Черные дыры и Вселенная

## Антарктическая сенсация

В марте 2014 года астрофизики, возможно, обнаружили давно разыскиваемый след физического явления, которое более столетия ускользало от них, причем порой буквально из-под носа. Речь идет о гравитационных волнах, точнее, реликтовых волнах, оставшихся от начала Вселенной. Отпечаток едва различим, сам он находится на другом отпечатке — реликтовом излучении, запечатлевшем детали Большого взрыва. Открытие сделано в одной из самых необычных обсерваторий Земли, расположенной на антарктической станции «Амундсен — Скотт», в рамках Международной программы Гарвард-Смитсоновского центра астрофизики «Background Imaging of Cosmic Extragalactic Polarization» (BICEP). Крайне сухая холодная атмосфера способствует высокой точности приборных наблюдений — вот почему в антарктических льдах работает не один астрофизический детектор. Прибор BICEP предназначен для исследования реликтового излучения, чьи фотоны путешествуют по Вселенной с тех пор, как она стала прозрачной (см. «Химию и жизнь», 2006, № 11). Он измеряет поляризацию этих фотонов, которая, в частности, зависит от гравитационных волн, порожденных Вселенной в первые  $10^{-35}$  с после ее появления. До сих пор, глядя на эту поляризацию, получен-

ную другими методами, например с помощью орбитальной обсерватории «Планк», астрофизики только давали оценку верхней границы величины поляризационного эффекта от реликтовых гравитационных волн. Наблюдения же из Антарктиды дали точное значение, то есть непосредственно была измерена поляризация от гравитационных волн, что дало возможность физикам-теоретикам испытать настоящую творческую эйфорию: в квантовой космологии существует множество сценариев объясняющих различные вариации интенсивности реликтовой гравитации. Теперь начнется соревнование в получении экспериментальных результатов, подобных тем, что добыл коллектив BICEP. С другой стороны, сразу же после первых сообщений с антарктической астрофизической обсерватории стали возникать скептические комментарии. Чаще всего приводят примеры иных экзотических астрофизических процессов, способных объяснить эффект. Особенно бурно обсуждают новое космологическое открытие на просторах Интернета. Чего стоит один факт, что измеренное значение оказалось гораздо больше той верхней границы, что дала обсерватория «Планк». Наверное, авторы работы учтут эту критику при подготовке научной статьи о своем открытии — пока что о нем можно судить по пресс-релизам, комментариям и публикациям

в нецензурируемых источниках вроде arXiv.org, где появляется по несколько электронных статей в день. Разумеется, проверка, осмысление, компьютерное моделирование и использование данных BICEP потребуют определенного времени. Скорее всего, первые общепризнанные результаты и модели появятся не ранее чем через год-два, когда будут выполнены и другие измерения.

## Дрожь пространства-времени

Гравитационные волны, эти загадочные порождения поля всемирного тяготения, возникли столетие назад на использованном почтовом конверте. Так небрежно Эйнштейн записывал идеи, случайно пришедшие в голову. Когда создатель теории относительности обнаружил формулу для гравитационных волн, никто не сомневался, что вскоре экспериментаторы откроют новые удивительные свойства пространства-времени. Однако крепкий орешек «гравитационного прибора Вселенной» никак не поддавался усилиям ученых. Правда, изредка появлялись сенсационные заявления об очередном открытии. Увы, ни одно из них не нашло подтверждения, как и сообщения о многих других чудесах, связанных с гравитацией: различных проявлениях левитации, антигравитации и всяческих «гравитацах». Между тем количество попыток открыть «дрожь пространственно-временной матрицы» не уменьшается, скорее, наоборот. Возникло полуофициальное направление экспериментальной астрономии — гравитационно-волновая астрофизика, и эта новая область уверенно делает первые шаги, опираясь на многочисленные косвенные данные о гравитационном колебании Космоса.

Когда-то выдающийся французский математик и натурфилософ Пьер Симон Лаплас, отстаивая жесткую связь между всеми элементами мироздания, заметил, что даже взмах руки влияет на движение звезд. Современный физик мог бы сказать по-другому: «Взмахните рукой — и по всей Вселенной побегут гравитационные волны». Теоретически это так, но их регистрация составляет труднейшую техническую проблему, ведь энергия гравитационных «приливов» и «отливов» на 40 порядков уступают тем же электромагнитным волнам!

Какова природа волн гравитации? Вспомним, что, согласно общей теории относительности, тяготение возникает из-за искривления массивным телом пространства-времени. Если представить пространство в виде упругой резиновой пленки с ямками от массивных «шариков» звезд, то их колебания вызовут вибрацию всей пленки. Образно это можно назвать волновой рябью пространства-времени. Даже такая простейшая «резинопленочная» модель показывает, что нас неощутимо раскачивает «гравитационный

прибой». Правда, не всякое перемещение звезд может вызвать гравитационное излучение. Например, для испускания волн гравитации не годится вращение по симметричной орбите. В этом случае центростремительное ускорение также строго симметрично, и его гравитационное поле остается однородным, так что волны гравитации возникнуть никак не могут. А вот если взять коромысло с двумя очень большими массами и раскрутить в точке равновесия, то гравитационное поле такой бинарной (двойной) системы начнет изменяться пропорционально частоте вращения и от коромысла во все стороны побежит пространственно-временная рябь.

## Попытки наблюдения

Для наблюдателя гравитационная волна представляет возмущение приливных сил, то есть точно так же, как сила притяжения Луны или Солнца заставляет вслучиваться водную поверхность Земли, образуя периодические приливы и отливы. Проходя между двумя телами, она их еле уловимо сдвигает и раздвигает с определенной частотой. Простейшее приспособление, которое могло бы зафиксировать таинственную гравитационную рябь пространства-времени, — это обыкновенный груз на пружинном подвесе, свободно колеблющийся с некоторой собственной частотой. Если она совпадет с частотой гравитационной волны, возникнет резонанс. В качестве пробных грузов на пружинке чаще всего используют громадные многометровые алюминиевые цилиндры толщиной около метра. В другом варианте устанавливают массивные зеркала, колебания которых измеряют с помощью лазерных интерферометров.

Ажиотаж вокруг поиска гравитационных волн поднялся в конце шестидесятих годов прошлого века, когда американский физик Джозеф Вебер опубликовал сенсационные данные, свидетельствующие о существовании космических волн тяготения. Алюминиевые цилиндры использовал именно он. Вебер был авторитетом в своей области, поэтому научный мир воспринял его сообщение с полной серьезностью, а искомые волны стали называть его именем.

Волны Вебера пытались зарегистрировать многие, в том числе выдающийся российский физик, член-корреспондент РАН В.Б. Брагинский. Однако ни точное копирование оборудования Вебера, ни новые системы детекторов не принесли каких-либо значимых результатов. К тому же теоретические расчеты, проведенные Владимиром Борисовичем, показали, что амплитуда гравитационных колебаний, якобы зафиксированных Вебером, в миллионы раз превышала теоретическую величину, следующую из теории тяготения Эйнштейна.

Вебер утверждал, что гравитационные волны пришли из закрытого пылевыми облаками ядра Млечного Пути, о котором

тогда было мало что известно. Сегодня мы знаем, что там действительно скрываются гигантские черные дыры — кандидаты в гравитационные коллапсары. Были предположения, что они поглощают сотни, а то и тысячи близлежащих звезд, выбрасывая при этом часть энергии в виде гравитационного излучения. Однако самые последние астрономические данные отрицают подобный космический каннибализм, хотя черная дыра там, похоже, есть. Таким образом, даже точная настройка на центр нашей Галактики ничего не дала, хотя отдельные астрофизики до сих пор продолжают эксперименты на детекторах «веберовского» типа.

Надо отметить, что сам профессор Вебер, сознавая трагизм ситуации (предложенная им программа продолжалась более десяти лет, причем один детектор был отправлен на Луну), даже под огнем критики — а его обвиняли и в методических ошибках, и в теоретических нестыковках — никогда не выражал сомнения в полученных им результатах. Научное же сообщество с ним не согласилось. Как бы то ни было, именно Вебера считают отцом-основателем современной гравитационно-волновой астрономии.

## Миссия LISA и другие

Сегодня многие коллективы инженеров и физиков в США, Италии, Швейцарии, Германии и других странах успешно проектируют и строят системы датчиков гравитации, например, на основе лазерных интерферометров. В России такую антенну проектируют в НЦ «Дулкын» при АН Республики Татарстан. Принцип действия лазерных интерферометров аналогичен тому, что использовали Майкельсон и Морли в опытах по поиску эфирного ветра: два перекрещивающихся луча света. При пересечении лазерных лучей возникает интерференционная картинка, которая зависит от длины пути, пройденного этими лучами. Если на такую систему накатит гравитационная волна, то под ее воздействием начнет меняться длина пути луча. Сначала она станет короче в одном направлении и длиннее в другом, затем возникнет противоположная ситуация: картинка изменится. Частота ее изменения будет соответствовать частоте волны. Лазерные интерферометры обладают феноменальной чувствительностью и могут регистрировать волны в широком частотном диапазоне. В этом и их слабость — необходимо тщательно калибровать прибор, чтобы отместить все остальные колебания, вызванные, скажем, проезжающим мимо транспортом или изменениями температуры. Поскольку база интерферометра измеряется километрами, выполнить условия снижения помех нелегко.

Но ученые не собираются останавливаться на достигнутом и планируют создать уникальную космическую флотилию из нескольких автоматических зондов, оснащенных гравидетекторами на ос-

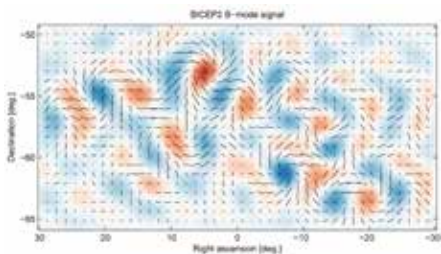


нове лазерных интерферометров. Речь идет о международном проекте НАСА и ЕКА, получившем название LISA (Laser Interferometer Space Antenna). Он предполагает в 2020 году запуск трех спутников, которые создадут интерферометр с плечом пять миллионов километров. Так могут быть не только детально проверены современные данные миссии BICEP по космологическим гравитационным волнам, возникшим при рождении нашего мира, но и выявлено много интересного, происходившего 14,82 миллиарда лет назад (самая последняя оценка) в эпицентре Большого взрыва.

Впрочем, надежды гравитационно-волновой астрономии не связаны исключительно с космосом. В различных лабораториях строят криогенные детекторы, например в виде металлических сфер метрового диаметра, охлаждаемые практически до температуры абсолютного нуля. Предполагается, что на высоких частотах такие детекторы могут превзойти по чувствительности самые совершенные лазерные установки.

Между тем Метагалактику не зря в шутку называют «лабораторией для бедных». Космос порой предоставляет ученым уникальные возможности для исследования процессов, недоступных ни в каких лабораториях. Примером могут служить радиопульсары нейтронных звезд. Характерные размеры нейтронной звезды составляют десятки километров, а средняя плотность приближается к плотности атомных ядер, при этом кубический сантиметр весит тысячи тонн. Массы всех известных нейтронных звезд близки к массе Солнца. При такой плотности нейтронные звезды обладают чудовищной напряженностью поля тяготения. Поэтому если подобные радиопульсары будут вращаться со скоростью в тысячи оборотов за секунду, то потеряют осевую симметрию, и возникшее несимметричное тело будет излучать волны гравитации. Еще более мощным источником гравитационных колебаний должна быть двойная система нейтронных звезд. Астрономам встречаются такие феномены, делающие сотни оборотов в секунду при скорости движения, близкой к трети световой!

Из-за крошечного размера нейтронные звезды очень плохо видны, даже в большие телескопы, но во многих случаях наблюдаются как источники рентге-



**Карта поляризации реликтового излучения, построенная телескопом BICEP2.**

*При отсутствии реликтовых гравитационных волн картина была бы гораздо менее яркой*

новского излучения в тесных системах двойных звезд или пульсирующие радиосточники (пульсары). По современным представлениям, большинство нейтронных звезд образуется при взрывах сверхновых. Наряду с черными дырами нейтронные звезды являются конечной стадией эволюции звезд большой массы. Чаще всего гравитационные волны испускают двойные звездные системы, которых много в Метagalактике. С помощью космических гравитационных телескопов—интерферометров ученые надеются зарегистрировать волны тяготения, возникшие при поглощении черными дырами обыкновенных звезд.

Однако рекордсменами в испускании гравитационных волн должны быть системы из черных дыр. Массы таких систем могут превышать массы тех же нейтронных звезд в миллиарды раз. Особенно интересные эффекты возникают в случае быстровращающихся черных дыр.

Мощнейшим источником колебаний пространства-времени могли бы стать множественные системы из сверхмассивных черных дыр, скапливающихся в ядрах сильно взаимодействующих галактик. Например, когда-нибудь наш Млечный Путь столкнется с соседней Туманностью Андромеды, центральные черные дыры образуют единую систему и начнут сближаться, расходуя энергию на гравитационное излучение.

Может быть, со временем астрофизики найдут и способы фиксации коротких, очень мощных всплесков гравитационных волн, возникающих при вспышках сверхновых звезд.

### **Волны новорожденной Вселенной**

Среди самых интересных источников гравитационного излучения выделяется космологический фон реликтовых волн тяготения. Интерес к ним связан с тем, что в 80-х годах XX века в космологии случилась революция: был пересмотрен сценарий начальных этапов развития Вселенной. После Большого взрыва Вселенная начала расширяться. Это давно признано всеми физиками, однако детали весьма значимые и обсуждаются до сих пор. В 1947 году Г.А.Гамов предложил модель горячей Вселенной, которая расширяется по адиабатическому закону: когда все изменение внутренней энергии идет на совершение работы, а

теплообмена с окружающей средой нет. Эта теория предсказала реликтовое излучение, но не смогла описать некоторые особенности строения Вселенной и, в частности, анизотропию этого излучения. Кроме того, в ней оказалась ловушка: при предсказанной скорости расширения Вселенная должна раздробиться на множество (порядка  $10^{90}$ ) причинно не связанных друг с другом фрагментов. То есть, на множество Вселенных, каждая со своими законами. В попытке избежать этого в 1979 году А.А.Старобинский (ныне академик РАН, а тогда – научный сотрудник Института теоретической физики АН СССР им. Л.Д.Ландау) предложил теорию инфляции, согласно которой Вселенная на начальном этапе, еще до появления вещества и излучения, расширится быстрее, чем в модели Гамова. Вскоре свою модель инфляции предложил и Алан Гут, работавший тогда в Массачусетском технологическом институте. Такой подход позволил решить некоторые проблемы, в частности открыл путь к тому, чтобы наблюдаемая Вселенная была однородной, то есть чтобы везде в ней действовали одни и те же законы. Окончательную форму теория инфляции приобрела благодаря работам А.Д.Линде (который тогда работал в Физическом институте АН СССР им. П.Н.Лебедева, а ныне — в Стенфордском университете). Он же в 1986 году предложил теорию хаотической инфляции. В ней, в частности, разные вселенные все-таки возникают, но каждая из них больше, чем радиусу наблюдаемой Вселенной. Инфляция в этой теории идет очень быстро: за  $10^{-35}$  секунды Вселенная из практически точки достигает огромного размера. Старобинский же, помимо всего прочего, рассчитал спектр реликтовых гравитационных волн, который получается при инфляции. Следы этих самых реликтовых волн и увидели исследователи в обсерватории на Южном полюсе. Если бы удалось из полученных данных извлечь информацию о спектре реликтовых гравитационных волн, появилась бы возможность подобрать параметры теории Старобинского — Гута — Линде и выбрать соответствующую модель. О том, какое значение имеет сама модель инфляции, и в чем суть случившейся в 80-х годах революции в космологии можно судить по фрагменту из книги А.Д.Линде «Particle Physics And Inflationary Cosmology», изданной в 1990 году в Швейцарии:

«Инфляционная космология продолжает быстро развиваться. Мы видим существенные изменения наших самых общих концепций, касающихся эволюции Вселенной. Всего несколько лет назад большинство авторитетов не испытывало никаких сомнений, что Вселенная родилась в одном-единственном Большом взрыве 10—15 млрд. лет тому назад. Казалось очевидным, что пространство-время было четырехмерным с самого начала и что оно таково по всей Вселенной. Считалось, что

если Вселенная замкнута, то ее размер не может превышать обозримую часть ( $10^{28}$  см), и не позднее чем через  $10^{11}$  лет эта Вселенная сожмется и исчезнет. Если, с другой стороны, Вселенная открытая или плоская, то она бесконечна, и по общему мнению, ее свойства в любой точке те же, что и в видимой части. Такая Вселенная будет существовать вечно, но после распада протонов, как предсказано объединенной теорией слабого, сильного и электромагнитного взаимодействий, в ней не будет барийной материи, способной поддерживать жизнь. В общем, предполагалось два сценария: «горячий конец» с гибелью мира при сжатии и «холодный конец» в виде бесконечного пузыря пространства.

Теперь же представляется, что Вселенная существует вечно и бесконечное число раз порождает все новые и новые огромные области, в которых низкоэнергетические законы, управляющие поведением элементарных частиц, и даже размерность пространства-времени могут различаться. Мы не можем сказать, будет ли жизнь существовать вечно в каждой такой области, но мы точно знаем, что жизнь будет появляться вновь и вновь в разных областях Вселенной, принимая все возможные формы. Такое изменение в наших представлениях о глобальной структуре Вселенной и о нашем месте в ней оказывается главным следствием, вытекающим из инфляционной космологии».

Что же касается не древних, а современных гравитационных волн, то вопрос об их существовании остается. Нет прямых доказательств существования «гравитационного прибора Вселенной», то есть непосредственной экспериментальной регистрации гравитационных волн, даже после успешной работы BICEP. Надо честно признать, что если в итоге гравитационные волны не будут обнаружены прямыми методами, подобными тем, что пытался использовать Вебер, это станет тяжелым ударом для всей современной физики. Под угрозой окажется не только фундамент общепринятой гравитационной парадигмы, воплощенной в общей теории относительности, но и многочисленные «альтернативные» теории тяготения. Ведь все они так или иначе предсказывают существование волн тяготения при распространении гравитации со скоростью света.

Несмотря ни на что, результаты, полученные BICEP, укрепили уверенность в существовании волн тяготения как одного из главных следствий эйнштейновской теории гравитации. Тем не менее консервативно настроенные физики считают, что никакие, даже самые весомые косвенные аргументы не заменят «прямых» проверочных миссий, подобных проекту LISA. А это значит, что Нобелевской премии придется ждать еще не менее двух десятилетий...

