

Все, что не разрешено законами физики – не существует. Долгое время физическая наука исповедовала именно этот принцип, пока не появилась более оптимистичная формулировка – все, что не запрещено законами физики, разрешено. Новый подход позволил физикам открыть, казалось бы, совершенно невозможные вещи – например, нарушение СР-инвариантности, которое раньше считалось просто невозможным и разрушало красоту теории. Профессор Института Феррары (Италия) и Института теоретической и экспериментальной физики им. А. И. Алиханова (Москва), заведующий лабораторией космологии и элементарных частиц Новосибирского государственного университета, доктор физико-математических наук Александр Дмитриевич Долгов ответил на вопросы журнала «НАУКА из первых рук» о том, какой станет астрофизика после открытия гравитационных волн, и сможет ли человечество найти практическое приложение черным дырам

«... При БОЛЬШОЙ температуре для ВСЕЛЕННОЙ сшита ШУБА по ее кривой ФИГУРЕ»

Гравитационные волны,
черные дыры,
магнитные монополи
и другие «многие печали»
современных ученых

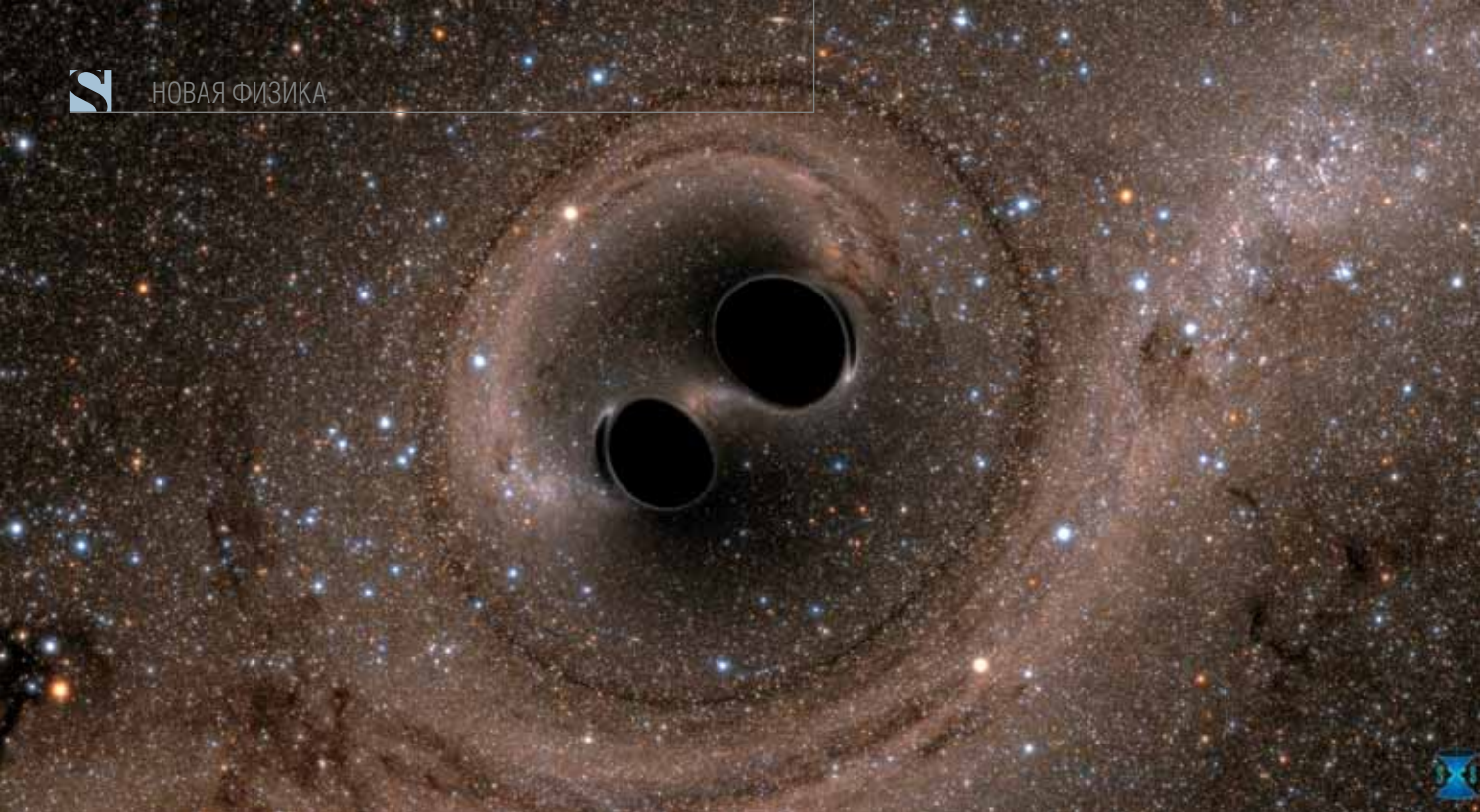


ДОЛГОВ Александр Дмитриевич – доктор физико-математических наук, профессор Университета Феррары (Италия), ведущий научный сотрудник Института теоретической и экспериментальной физики им. А. И. Алиханова (Москва), заведующий научной лабораторией космологии и элементарных частиц НГУ. Член Международного общества общей теории относительности и гравитации. Лауреат премии им. Б. М. Понтекорво (2009), премии им. А. А. Фридмана (2011). Область научных интересов: космология, астрофизика, физика элементарных частиц. Автор и соавтор более 300 научных работ

Ключевые слова: гравитационные волны, черные дыры, эксперимент LIGO, темная материя, суперсимметрия, Вселенная.

Key words: gravitational waves, black holes, LIGO experiment, dark matter, supersymmetry, Universe

Гравитационные волны, возникшие при слиянии двух черных дыр. Image credit: LIGO / T. Pyle



Как изменилась астрофизика после того, как ученым удалось «поймать» гравитационную волну – и что значит это событие? Куда теперь смотреть, что искать?

На данный момент ответ состоит в том, что мы убедились, что общая теория относительности справедлива при сильных гравитационных полях и черные дыры действительно существуют. «Пойманная» гравитационная волна возникла при слиянии черных дыр, и поведение зарегистрированного от нее сигнала полностью соответствует тому, что предсказывает общая теория относительности в такой ситуации. Можно сказать, что мы положили очень важный камень в фундамент нового направления наблюдательной астрофизики. Что будет дальше? Интерферометр LIGO, на котором была зарегистрирована гравитационная волна, может работать как прибор для поиска черных дыр: мы сможем узнать, как они распределены в нашей Вселенной, какие у них массы. Возможно, те две черные дыры, гравитационную волну от слияния которых поймали в эксперименте LIGO, это первичные черные дыры (Blinnikov *et al.*, 2016). Эти черные дыры возникли в период от одной ста тысячной секунды до нескольких минут после Большого взрыва, однако фундамент для их возникновения был заложен намного раньше – на заре создания мира, во время инфляции, поэтому они смогут многое рассказать о Вселенной, когда она была совсем молодой.

Но сейчас не только от гравитационных волн можно ждать открытий – мы изучаем небо во всех длинах волн электромагнитного диапазона, смотрим и через другие «окна», которые открывают нам нейтрино

Две черные дыры сливаются в единое целое.
Image Credit: the Simulating eXtreme Spacetimes (SXS) project (<http://www.black-holes.org>)

и космические лучи разных энергий. Строятся новые телескопы, возникают новые международные коллаборации. Сейчас мы способны видеть Вселенную на больших красных смещениях, то есть в тот период, когда ей было всего полмиллиарда лет от роду. И мы видим, что при этом происходят удивительные вещи. Например, уже существуют сверхтяжелые черные дыры, а за такой короткий срок после Большого взрыва, казалось бы, невозможно их образование! Кроме того, оказалось, что Вселенная на красных смещениях очень запыленная. Пыль – это остатки от взрыва сверхновых, которые сначала должны родиться, а на это нужно значительное время.

Вселенная оказалась более развитой на ранних этапах ее эволюции, чем мы думали. 500 млн лет – это не тот возраст, при котором мы могли ожидать интенсивного звездообразования и появления сверхмассивных черных дыр; мы думали, что для этого нужно гораздо больше времени. Это еще одна загадка, над которой сегодня думают ученые. (Dolgov, 2016).

Каково это – быть Эйнштейном? Предсказать существование того, что будут доказывать последующие 100 лет? И что труднее и важнее: предсказывать или доказывать экспериментально?

Это сложный вопрос. Я теоретик и, конечно, мне кажется, что теоретические предсказания интереснее.

Но огромное значение имеют те экспериментаторы, которые нашли то, что не было предсказано и чего никто не ожидал. Таких открытий немного, и это поистине чудесно, когда они совершаются. Например, так было с открытием нарушения CP-инвариантности.

Надо сказать, что впервые о нарушении CP-симметрии Джеймс Кронин и Вал Логсден Фитч доложили на 12-ой Международной конференции по физике высоких энергий ICHEP в Дубне. И тем более обидно, что ребята из Объединенного института ядерных исследований в Дубне упустили шанс сделать это важное открытие: экспериментальная группа Э. О. Оконова двумя годами раньше искала CP-запрещенные распады каонов на два пи-мезона и установила верхний предел на такие распады. Если бы они еще чуть-чуть поработали, они бы набрали такой объем статистики, который позволил бы увидеть этот распад и доказать нарушение CP-симметрии. Но вера в CP-симметрию была такова, что эксперимент был признан безнадежным и закрыт по финансовым соображениям. Обидно, упустили Нобелевскую премию, но важнейшее открытие так или иначе состоялось. Заметим, что жизнь во Вселенной стала возможной именно благодаря CP-нарушению: в 1967 г. А. Д. Сахаров написал свою знаменитую работу о генерации барионной асимметрии Вселенной (Сахаров, 1967), где показал, что CP-нарушение есть одно из условий, при которых после Большого взрыва вещество и антивещество не полностью уничтожают друг друга, а остается маленький избыток вещества, из которого потом и сформировались звезды, галактики, и в конечном итоге – мы с вами. На экземпляре этой работы, который Сахаров подарил в 1967 г. Е. Л. Фейнбергу, он написал такой эпиграф:

*Из эффекта С. Окубо
При большой температуре
Для Вселенной сшита шуба
По ее кривой фигуре.*

Есть интересные теоретические работы, в которых предсказывались массы электрослабых W- и Z-бозонов, переносчиков слабых взаимодействий, но значение массы Хиггсовского бозона не было предсказано – теория позволяла получить только некоторые ограничения на эту массу сверху и снизу. Только очень сложный и дорогостоящий эксперимент позволил, наконец, открыть бозон Хиггса и измерить его массу.

Что касается открытия гравитационных волн, то этого открытия ждали все. Я имею ввиду научный мир. Но нельзя сказать, что это было легко, хоть и ожидаемо. Так как наблюдаемые эффекты от гравитационных волн очень и очень слабые, было неизвестно, как можно их надежно зарегистрировать. Эксперимент был трудный и от этого красивый.

Лев Борисович Окунь вспоминает, что Ландау в одно время считал, что нарушение P-четности невозможно, так как пространство зеркально симметрично. Он даже саркастически смеялся, когда, тогда еще молодой, но уже известный американский физик Гелл-Ман отметил на семинаре в Институте физических проблем в 1956 г., что Ричард Фейнман даже думает, что P-четность может не сохраняться. Но Ландау оказался не прав. Вскоре появилась знаменитая теоретическая статья Ли и Янга (Lee, Yang, 1956) и экспериментальная работа Ву с соавторами (Wu *et al.*, 1957), и стало очевидно, что в слабых взаимодействиях P-четность нарушается. Вера в одну симметрию была подорвана, но на смену ей пришла другая: Ландау осознал, что зеркальную симметрию можно спасти, если предположить, что одновременно с пространственной четностью нарушается также и зарядовая четность (C), причем таким образом, что сохраняется комбинированная четность (CP), отвечающая одновременному отражению пространства и замене частиц соответствующими античастицами. Но новые эксперименты вскоре неожиданно показали, что CP-симметрия тоже нарушается в распадах K-мезонов. История этого важного открытия описана в Нобелевских лекциях Ван Логсден Фитча

Мы уже знали, что гравитационные волны существуют благодаря открытию двойного пульсара (Уилл, 1994). Из-за излучения гравитационных волн двойной пульсар теряет энергию, расстояние между пульсарами уменьшается, частота обращения пульсаров вокруг центра масс увеличивается, а период снижается. Этот эффект очень слабый: скорость уменьшения 27 000-секундного орбитального периода была всего лишь несколько десятков микросекунд в год. Тем не менее, точность измерений позволила это увидеть и получить зависимость орбитального периода от времени. Все измеренные точки легли как раз на ту кривую, которую предсказывала теория. Но большое отличие нового результата состоит в том, что впервые общая теория относительности была проверена для сильных гравитационных полей. В двойном пульсаре гравитационное поле все еще слабое для того, чтобы нелинейные эффекты общей теории относительности стали заметны. А при слиянии черных дыр гравитационное поле очень сильное, и для описания этого процесса требуется весь арсенал общей теории относительности, а не только линейное приближение.

Гравитационные волны есть везде, даже если вы идете по улице и размахиваете руками, они появляются, но такие слабые, что просто невозможно их почувствовать – геометрия пространства вокруг нас практически плоская. Эксперимент LIGO (Advanced LIGO) поймал

Американский проект LIGO строили в течение всего последнего десятилетия XX века. Хотя первоначальный импульс проекту задали США, эта обсерватория является по-настоящему международным проектом. В него вложились, финансово и интеллектуально, 15 стран, и членами коллаборации числятся свыше тысячи человек. Важную роль в реализации проекта сыграли советские и российские физики.

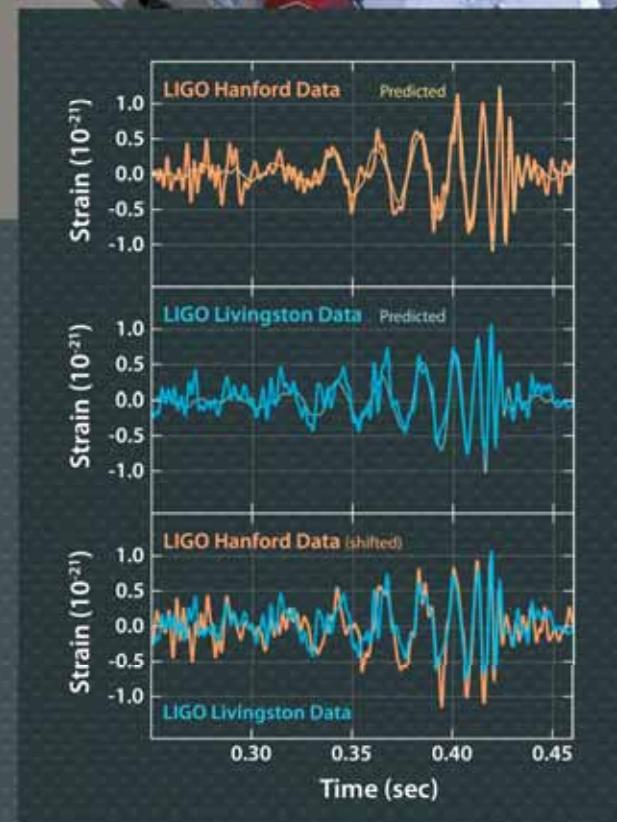
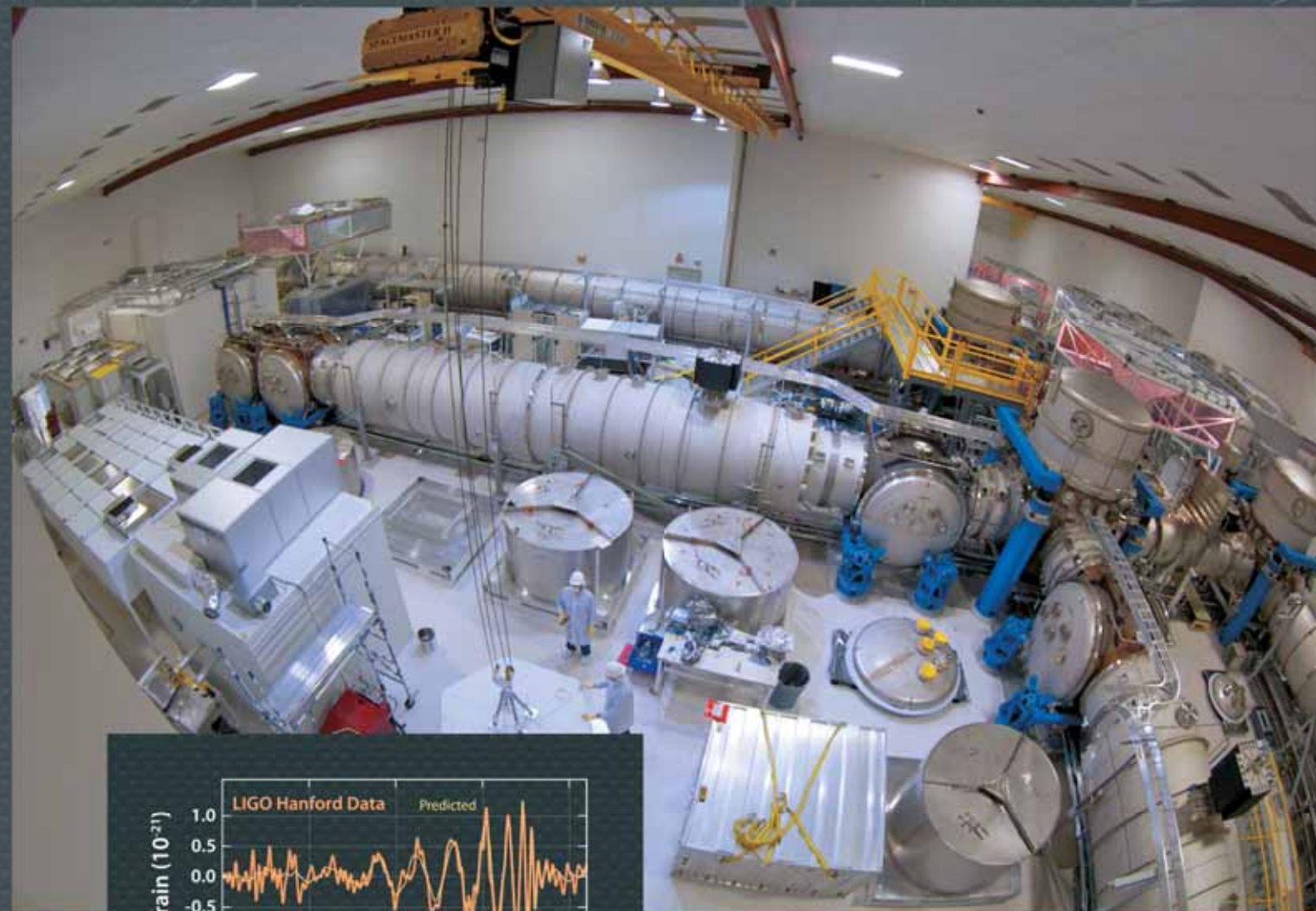
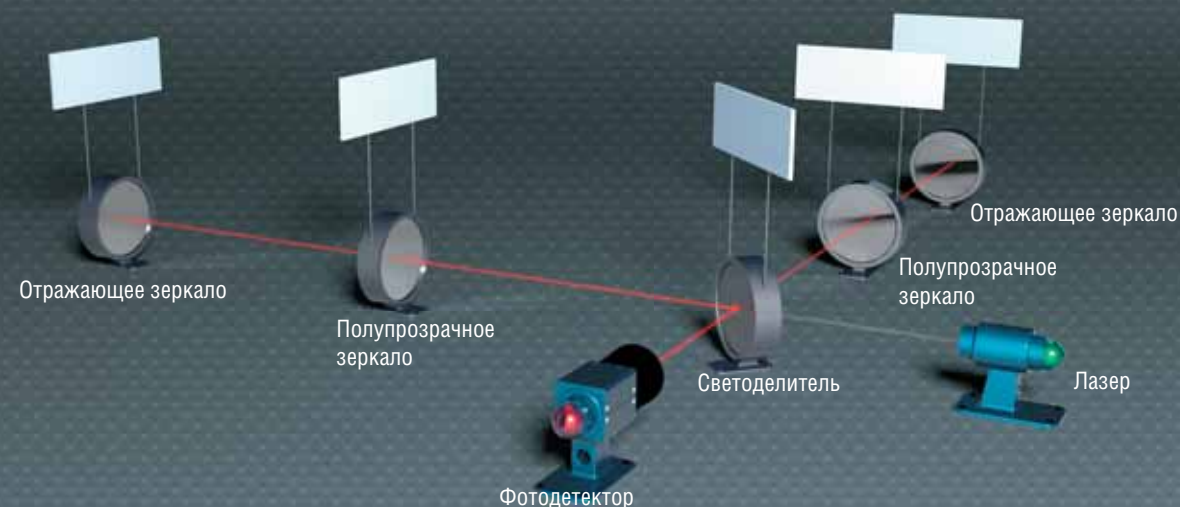
В двух длинных – в несколько километров, перпендикулярных друг другу вакуумных камерах подвешиваются зеркала. На входе в установку лазерный луч расщепляется, идет по обеим камерам, отражается от зеркал, возвращается обратно и вновь соединяется в полупрозрачном зеркале. Добротность оптической системы исключительно высока, поэтому лазерный луч не просто проходит один раз туда-обратно, а задерживается в этом оптическом резонаторе надолго. В «спокойном» состоянии длины подобраны так, чтобы два луча после воссоединения гасили друг друга в направлении датчика, и тогда фотодетектор оказывается в полной тени. Но стоит лишь зеркалам под действием гравитационных волн сместиться на микроскопическое расстояние, как компенсация двух лучей станет неполной, и фотодетектор уловит свет. И чем сильнее смещение, тем более яркий свет увидит фотодатчик. Слова «микроскопическое смещение» даже близко не передают всей тонкости эффекта. Смещение зеркал на длину волны света, то есть микрон, заметить проще простого даже без каких-либо ухищрений. Но при длине плеча 4 км это отвечает колебаниям пространства-времени с амплитудой 10^{-10} . Заметить смещение зеркал на диаметр атома тоже не представляет проблем – достаточно запустить лазерный луч, который пробежит туда-сюда тысячи раз и получит нужный набег фазы. Но и это дает от силы 10^{-14} . А нам нужно спуститься по шкале смещений еще в миллионы раз, то есть научиться регистрировать сдвиг зеркала даже не на один атом, а на тысячные доли атомного ядра!

LIGO включает в себя два одинаковых детектора, расположенных в Ханфорде (штат Вашингтон) и в Ливингстоне (штат Луизиана) и разнесенных друг от друга на 3000 км. Наличие двух установок важно сразу по двум причинам. Во-первых, сигнал будет считаться зарегистрированным, только если его увидят оба детектора одновременно. А во-вторых, по разности прихода гравитационно-волнового всплеска на две установки – а она может достигать 10 миллисекунд – можно примерно определить, из какой части неба этот сигнал пришел.

Идея интерферометрического детектирования гравитационных волн была предложена советскими физиками М. Е. Герценштейном и В. И. Пустовойтом в далеком 1962 году. Тогда только-только был придуман лазер, а Вебер приступал к созданию своих резонансных детекторов гравитационных волн. Однако эта статья не была замечена на западе и, говоря по правде, не повлияла на развитие реальных проектов.

По: *elementy.ru*

Лаборатория LIGO содержит две детекторных системы, одна на востоке штата Вашингтон, другая (на фото) в Луизиане.
Image Credit: Caltech/MIT/LIGO Lab



Участок лазерного и вакуумного оборудования (LVEA) Ханфордского детектора лаборатории LIGO, на котором располагается стабилизированный лазер, расщепитель луча (светодетектор), полупрозрачные зеркала и обслуживающие приборы.
Image Credit: Caltech/MIT/LIGO Lab

Зарегистрированные практически одновременно обоими детекторами LIGO сигналы обусловлены гравитационными волнами, существование которых было предсказано Эйнштейном.
Image Credit: Caltech /MIT /LIGO Lab

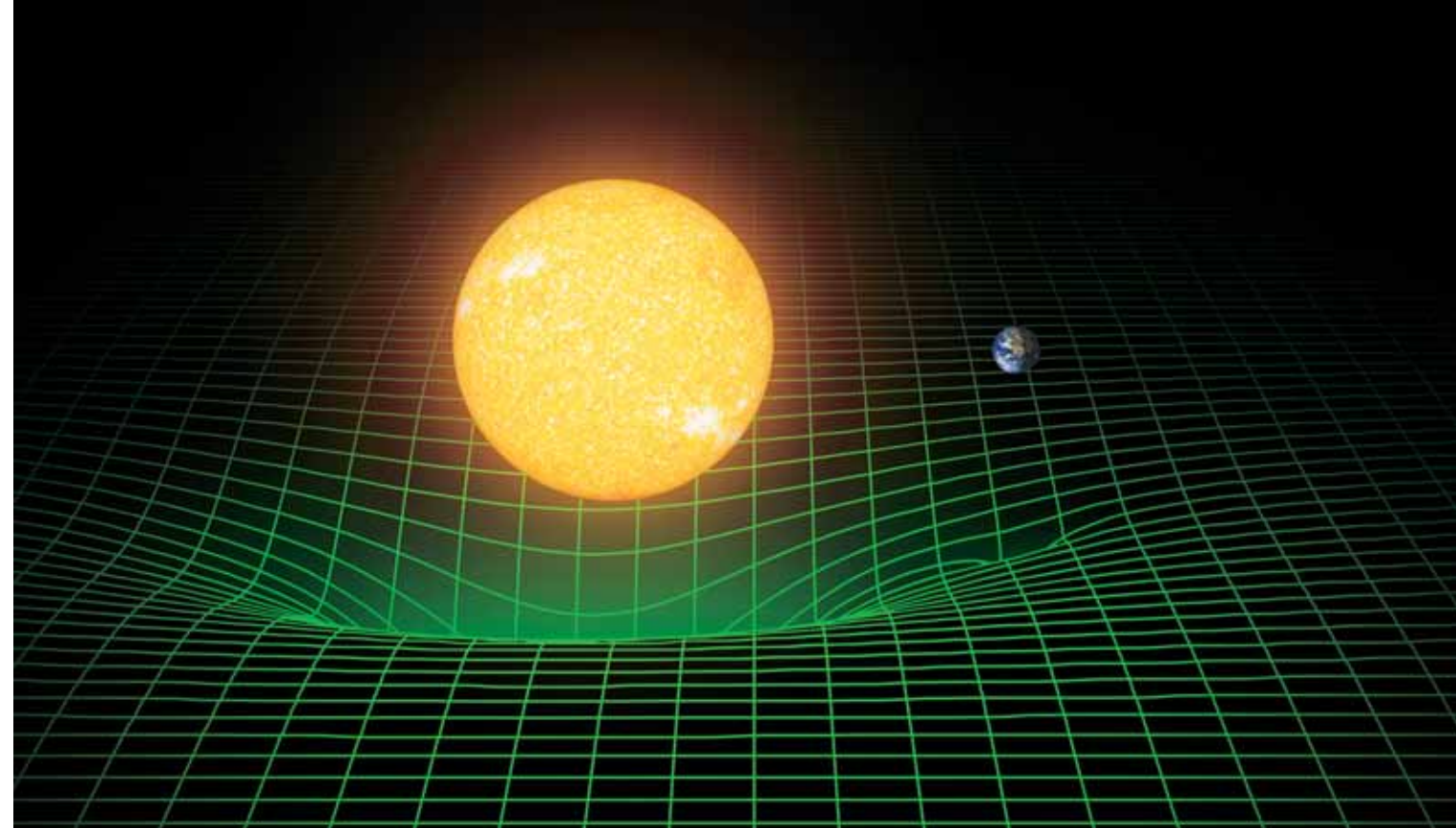
гравитационную волну из той области пространства, которая была настолько кривая, что и не описать словами и даже страшно представить. В ту секунду, когда слились две черные дыры, от которых и пошла гравитационная волна, «пойманная» интерферометром, мощность излучения гравитационных волн была больше, чем суммарное излучение всех форм энергий от всей Вселенной. На Землю гравитационное излучение пришло уже сильно ослабленным.

Теперь сомнений в существовании гравитационных волн почти нет, но нельзя отрицать и того факта, что кто-то в этом все равно сомневается. Придает уверенности то, что работали два интерферометра, которые находятся на приличном расстоянии друг от друга, и они оба зарегистрировали эту гравитационную волну (ее название GW150914) со сдвигом по времени в несколько миллисекунд. Эта разница во времени присутствует, потому что волна падает не плашмя, а под углом. Теперь можно определить угол падения волны и примерно место, откуда она прилетела. Но мы еще не знаем в какой конкретно точке неба столкнулись две черные дыры. В будущем мы узнаем и это.

Чем больше будет интерферометров, а скоро заработает установка в Италии и, по-видимому, в Японии, тем больше будет охват неба – тогда мы сможем определить точное место, откуда придет гравитационная волна, направить туда телескопы и увидеть, что происходит после столкновения двух черных дыр. Современные

теории говорят, что ничего, кроме гравитационных волн, не должно излучаться в процессе слияния черных дыр. Но у нашей лаборатории есть иные, еще не опубликованные предположения, над которыми мы пока работаем. В любом случае подобные наблюдения надо проводить в будущем. Обычный электромагнитный телескоп, направленный в нужную точку, может показать, что происходит там сразу после слияния черных дыр. Регистрация даже слабого электромагнитного сигнала, сопровождающего гравитационную волну, будет иметь важные последствия для теоретического описания этого явления. Только представьте, мы увидим глазом, что происходит на месте, где около миллиарда лет назад слились две черные дыры! Как сказал Кип Торн на пресс-конференции, посвященной открытию гравитационных волн, коллаборация LIGO вскоре увеличит чувствительность интерферометра в три раза, и тогда они смогут «прослушивать» в 27 раз больший объем Вселенной в гравитационных волнах. Так как мы знаем,

Усовершенствованная, более чувствительная, версия детектора LIGO – Advanced. LIGO – в первые четыре месяца своей работы зарегистрировала две гравитационные волны (GW150914, 14.09.15; LVT151012, 12.10.15) и один сигнал, который слишком слаб для однозначной интерпретации (GW151226, 26.12.15). *Image credit: LIGO*



что количество событий слияния черных дыр в доступной для наблюдения части Вселенной пропорционально ее объему, значит, на Земле мы будем вскоре регистрировать больше гравитационных волн.

Гравитационная волна, которую зарегистрировал интерферометр LIGO, возникла при слиянии черных дыр с массами 36 и 29 солнечных масс. Как такие черные дыры возникают, и тем более, как они формируют двойные системы – большая загадка.

В нашей галактике много двойных звездных систем (их даже больше, чем одинарных). Образуются они довольно «просто»: в неоднородном облаке межзвездного газа образуются два центра конденсации, два сгустка, в каждом из которых появляется звезда – вот вам двойная звездная система. Одна черная дыра тоже образуется стандартно – после гравитационного коллапса массивной звезды. Но две? Когда небесное тело «схлопывается», оно приобретает большую скорость, и звезду выбрасывает из системы. Мы знаем это благодаря нейтронным звездам – пульсарам. Скорость пульсара в галактике – около 1000 км/сек, а скорость обычных звезд – 250 км/сек. По идее, то же самое должно происходить и с черной дырой. А если этого не случилось, значит эти две черные дыры, от которых мы поймали гравитационную волну, образовались не в процессе звездного коллапса, а за счет каких-то других процессов. Кроме того черные дыры, которые образуются при коллапсе массивной звезды, обычно имеет массу не более 10 солнечных масс, а здесь мы имели черные дыры с массами 36 и 29 солнечных масс. Есть еще одна особенность: у этих черных дыр практически отсутствовал

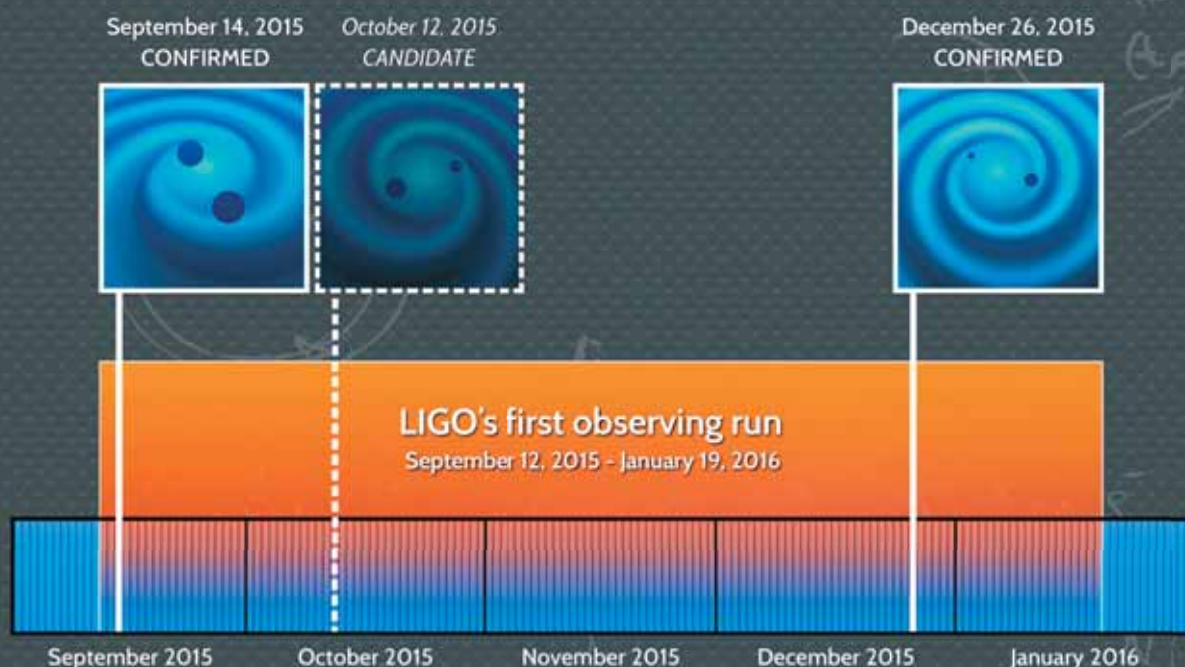
Альберт Эйнштейн продемонстрировал в своей общей теории относительности, что гравитация массивных тел искривляет ткань пространства и времени, и что эти тела движутся по путям, определяемым этой геометрией. На рисунке представлена модель того, как наше солнце и Земля искривляют пространство и время, или, одним словом, пространство-время. *Image Credit: T. Pyle/ Caltech/MIT/LIGO Lab*

спин. Большие массы и маленький эффективный спин этих черных дыр, по нашему мнению, указывают на то, что они образовались не за счет эволюции двойной звездной системы, а были первичными черными дырами (Blinnikov *et al.*, 2016)

Развитие идеи существования очень тяжелых первичных черных дыр, как мне кажется, началось с нашей работы с Джозефом Силком, которую мы опубликовали в 1993 г. (Dolgov, Silk, 1993)

Что будет дальше? Построят новые детекторы, которые смогут охватить все небо, появятся продвинутые космические инструменты (телескоп LSSC, интерферометр LISA, *Big Bang Observer*) – все их можно считать телескопами гравитационных волн.

В будущем, после регистрации гравитационных волн мы сможем определять ту точку на небе, где произошло слияние двух черных дыр, и быстро перенастроить на эту точку наши оптические, рентгеновские и гамма телескопы. Таким образом, мы сможем узнать, какими процессами сопровождается слияние двух черных дыр. Начнется большое продвижение в таких областях,



как динамика коллапса, поведение плазмы в сильных гравитационных полях. Это будет очень интересно.

Мы будем видеть в гравитационных волнах больше неба, как по охвату, так и по глубине – можно будет посмотреть даже на рождение Вселенной своими глазами и увидеть много чего другого, о чем сейчас мы можем даже не подозревать. Знать бы, куда смотреть. Гравитационные волны – это новое окошко. Раньше у нас было инфракрасное окно, а также синее окно, зеленое, красное – все это видимый свет. Потом смотрели на Вселенную и через окно рентгеновских и гамма-лучей, через нейтрино, а теперь мы Вселенную услышим.

Мы говорим, «услышим», потому что частота гравитационных волн, которые регистрирует LIGO и подобные интерферометры, соответствует как раз частоте звуковых волн. У нас как бы появился новый орган чувств – отныне мы можем чувствовать гравитационные волны. Я ожидаю, что будет много открытий.

Сам Эйнштейн сомневался в существовании гравитационных волн. Он даже пытался опубликовать статью, их опровергающую. Он сомневался и в том, что Вселенная расширяется. Когда А. Фридман заявил: «Хорошо, я понимаю и признаю уравнения Эйнштейна, но, исходя из них, я предсказываю, что Вселенная возникла из исходной точки и с тех пор расширяется», Эйнштейн ответил: «Быть тако-го не может!». Что тогда мешало Эйнштейну поверить, мы не знаем. Мешают ли сегодня философские, религиозные, научные убеждения ученым принять некоторые вещи, если они кажутся невероятными? Или мы стали внутренне более свободными?

Да, это была его ошибка, и хорошо, что он ее исправил.

Недавно я читал доклад для неспециалистов и начал его со слов: «Вселенная же была безвидна и пуста, и тьма над бездною...». Это перифраз Библии, где говорится: «Земля же была безвидна и пуста...», а потом «Да будет свет». *Big Bang*, в этом смысле, и есть «свет». Все это очень похоже на библейское сотворение мира. Сегодня, конечно, можно не верить и отрицать научный подход рождения Вселенной, планеты Земля, человека – но это не относится к ученым. Ученый должен верить числам, математике, научным фактам.

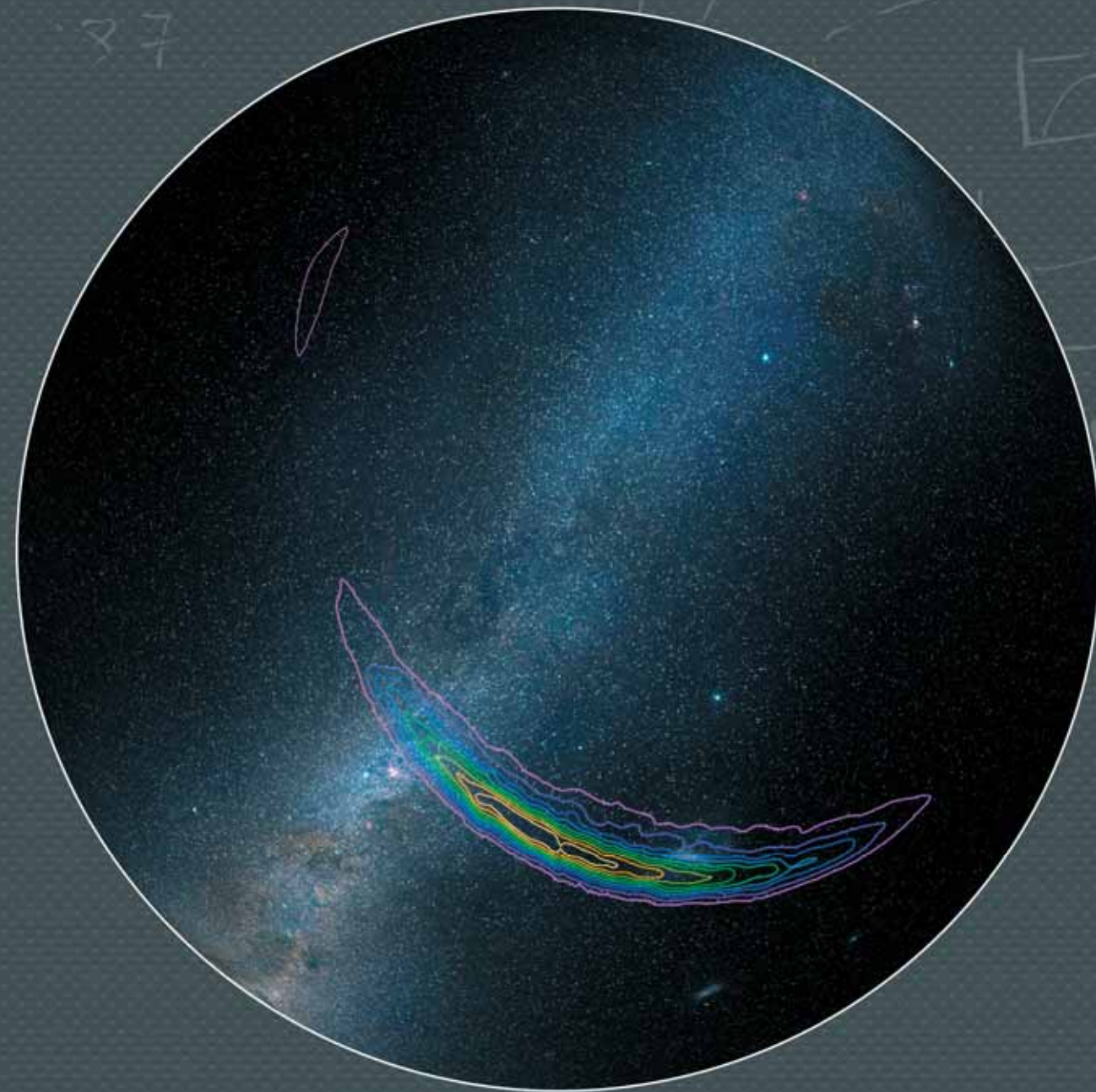
Вещество во Вселенной после Большого взрыва было распределено неравномерно – в плотности вещества были небольшие возмущения, флуктуации. И это наше счастье. Если бы Вселенная была однородной, не образовались бы галактики, звезды, планеты, не появились бы мы. Когда есть небольшая флуктуация, то, как говорится, богатый становится богаче – флуктуация растет, так как запускается процесс гравитационной неустойчивости, и в этой точке происходит конденсация материи, появляются первые звезды. Мы можем

Возможно, электромагнитный партнер гравитационной волны уже зарегистрирован. Гамма-телескоп FERMI зарегистрировал слабый всплеск гамма излучения через 0,4 секунды после регистрации интерферометром LIGO гравитационной волны:

Другое объяснение предложил Абрахам Лоеб из Гарвард-Смитсоновского астрофизического центра в Кембридже (США): Если FERMI действительно зарегистрировал всплеск гамма излучения, связанный с гравитационной волной GW150914, то это удивительно, так как согласно принятой теории, процесс слияния черных дыр звездной массы не должен порождать вспышки в гамма-диапазоне. Лоеб предложил, что прародителем GW150914 была очень массивная звезда, с массой более 100 солнечных масс, которая быстро вращалась. Из-за вращения коллапс ядра этой суперзвезды был не сферически симметричным, а породил нечто, подобное «гантельке», из которой в последние моменты коллапса образовались две черные дыры-близняшки, которые быстро слились и породили гравитационную волну. При этом около этих черных дыр было много остаточного материала умирающей звезды, аккреция которой на конечную черную дыру и породила, по мнению Лоеба, зарегистрированный FERMI всплеск гамма излучения.

предсказать первичный спектр возмущений плотности сразу после инфляции, так как на стадии инфляции эти возмущения рождаются из квантовых флуктуаций скалярного поля – так называемого инфлатона. Этот спектр возмущений плотности, так называемый спектр Харрисона–Зельдовича, масштабно-инвариантен, и это означает, что величина возмущения будет расти пропорционально росту линейных размеров расширяющейся Вселенной. И вот такие предсказания теории полностью согласуются с данными наблюдений, а вот Библия в этом не поможет.

Впрочем, я хочу привести такой пример. Жил в 354–430 гг. н.э. христианский богослов, влиятельнейший проповедник, один из Отцов христианской церкви – Святой Августин. При помощи размышлений он пришел к выводу, что время существует только потому, что о нем помнят. Значит, для его существования необходимы вещи, а до сотворения мира, когда ничего не было, не было и времени. Начало творения мира вместе с тем и есть начало времени. А ведь это буквально то, что утверждает современная наука – что до Большого взрыва ни времени, ни пространства в человеческом понимании не существовало. Мы даже не уверены, что привычное нам пространство-время сохраняет смысл в первые мгновения после Большого взрыва, когда плотности энергии достигали Планковских значений и должны были проявляться эффекты квантовой гравитации.



Есть картина мира, которую мы хотели бы иметь согласно нашим теориям, а есть числа, данные наблюдений и экспериментов, которые или подтверждают нашу картину мира, или опровергают ее. Если данные наблюдений не подтверждают теорию, надо от нее отказаться и придумать лучшую. Мы обязаны постоянно проверять наши теории экспериментально. Например, есть разные объяснения существования темной материи, но в некоторых из них концы с концами не сходятся.

Один из аргументов в пользу существования темной материи – это плоские кривые вращения вещества

На небесной карте южного полушария изображено примерное положение двух источников гравитационных волн, зарегистрированных детектором LIGO. Цветные линии с разной степенью вероятности очерчивают область, в которой находился источник сигнала. Внешняя пурпурная линия ограничивает область источника сигнала с вероятностью 90%. Внутренняя желтая линия – с вероятностью 10%.

Image credit: LIGO/Axel Mellinger

вне галактик. Скорости частиц газа вне галактики или маленьких галактик-спутников должны уменьшаться при увеличении расстояния до центральной галактики, если вне светящегося центра нет никакого невидимого нам вещества. В Солнечной системе скорости планет зависят от расстояния до Солнца, и теория Ньютона предсказывает, что скорость падает как корень из расстояния.

И все планеты нашей системы очень аккуратно следуют этому закону. Но когда мы смотрим на спутники нашей галактики – Млечного пути, например, на Магеллановы облака или на частицы межзвездного газа, которые, по идее, также должны иметь скорости, спадающие как квадратный корень от расстояния, там ничего подобного не происходит. Скорости частиц газа, которые измеряются по смещению их спектральных линий из-за эффекта Доплера, выходят на плоскую кривую. Это может значить, что в галактике присутствует скрытая, невидимая материя, распределенная так, что общая масса галактики растет линейно с радиусом – эта невидимая материя и называется темной материей.

Проблема вращения галактик – это несоответствие между наблюдаемыми скоростями вращения материи в спиральных галактиках и предсказаниями кеплеровской динамики, учитывающими только видимую массу. В настоящий момент считается, что это несоответствие выдает присутствие темной материи, которая пронизывает галактику и простирается далеко за пределами видимого диска – образует сферическое гало вокруг видимой части галактики.

Считается, что темная материя состоит из пока неизвестных частиц. Наиболее популярный кандидат – это WIMP (*Weakly Interacting Massive Particle*). Такие частицы слабо взаимодействуют с обычной материей и с друг другом. Часть темной материи проявляет себя в виде загадочных объектов, так называемых MACHO (*Massive Compact Halo Objects*), которые были обнаружены благодаря гравитационному микролинзированию. У этих объектов массы порядка половины массы Солнца.

Есть альтернатива темной материи – теория MoND (модифицированная ньютоновская динамика). Она объясняет многие наблюдательные факты в масштабе галактики, но не может объяснить крупномасштабную структуру Вселенной и флуктуации температуры реликтового фона.

Философская картина мира важна, но благодаря математике мы становимся в какой-то мере менее ограниченными, мы можем поверить во все, что угодно, но только если это будет доказано экспериментальными данными.

Поиск темной материи сегодня занимает умы многих ученых, в том числе новосибирских. В Новосибирском государственном университете создают

детектор для регистрации частиц темной материи, и университет принимает участие в проекте Dark Side Национальной лаборатории Гран-Сассо. Кто и какими способами еще ищет эту загадочную субстанцию?

Проектов, аналогичных проекту *Dark Side* Национальной лаборатории Гран-Сассо, в мире несколько. Все они пытаются поймать так называемую холодную темную материю. Для этой цели глубоко под землей установлены детекторы темной материи в США, Финляндии и Испании.

К настоящему времени придуманы детекторы темной материи, базирующиеся на разных физических принципах. Исследователи, основываясь на своих предположениях о свойствах этой материи, используют разные подходы, чтобы сделать детектор более чувствительным и избирательным. Большинство физиков сегодня полагают, что частицы темной материи должны быть весьма массивными (порядка сотен масс протона), поэтому их лучше регистрировать с помощью тяжелых ядер отдачи. Для поиска таких частиц более всего подходят детекторы, где в качестве рабочего тела используется сжиженный ксенон: в мире уже работает несколько гигантских установок, каждая из которых содержит сотни килограммов этого инертного вещества.

Мы же исходили из другой гипотезы, согласно которой частицы темной материи лишь в 2–10 раз массивнее протона. В этом случае использование тяжелых ядер отдачи не очень эффективно – требуются более легкие ядра благородных газов, таких как аргон или, еще лучше, неон. Сейчас предпочтение отдают аргону, как более дешевому и доступному веществу: его использование открывает перспективы создания детекторов большего объема, что повысит шансы обнаружения искомых частиц.

Сейчас в Новосибирском государственном университете мы работаем над установкой, содержащей сто литров жидкого аргона, и ищем наиболее оптимальные инженерные решения, чтобы максимально улучшить чувствительность и надежность детектора. Задача, которая стоит перед командой лаборатории космологии и элементарных частиц НГУ и перед ее старшим научным сотрудником, д.ф.-м.н. Алексеем Федоровичем Бузулуцковым – максимально снизить порог чувствительности установки, чтобы она могла детектировать частицы с минимальной энергией отдачи.

Второй вариант поиска темной материи – это поиск аксиона – элементарной частицы, по массе в несколько миллиардов раз легче электрона. Аксион также рассматривается как кандидат на роль частиц, из которых состоит темная материя.

Поиск аксиона – более популярный сегодня способ изучения темной материи. Частица стала «модной»

Модифицированная ньютоновская динамика (MOND) — физическая гипотеза, альтернативная теории гравитации, предлагающая изменение в законе тяготения Ньютона, объясняющем вращение галактик без привлечения темной материи. Когда постоянная скорость вращения внешних частей галактик была впервые обнаружена, это было неожиданно, так как ньютоновская теория гравитации предсказывает, что чем дальше объект от центра, тем меньше его скорость. Например, для орбит планет солнечной системы скорость убывает с увеличением расстояния до Солнца.

MOND была предложена Мордехаем Милгромом в 1983 г. для того, чтобы смоделировать наблюдаемые постоянные скорости вращения. Милгром заметил, что ньютоновская сила гравитации подтверждена только для относительно больших ускорений, и предположил, что для малых ускорений закон всемирного тяготения Ньютона может не работать. MOND устанавливает, что ускорение зависит нелинейно от создающей его массы для малых ускорений.

Эта гипотеза стоит особняком от широко распространенных и практически общепринятых теорий темной материи (которые предполагают наличие в каждой галактике еще не определенного типа материи, что обеспечивает распределение массы, отличное от наблюдаемого для обычного вещества; эта «темная материя» концентрируется в так называемые гало, намного большие, чем видимые части галактик, и своим гравитационным притяжением обеспечивает почти постоянную скорость вращения внешних видимых частей галактик). В настоящее время (2013 г.) эта гипотеза не имеет существенной поддержки среди астрономов и астрофизиков. По: Википедия



На расстоянии в почти 200 000 световых лет от Земли плывет в долгом и медленном танце спутник Млечного Пути – Большое Магелланово Облако. Громадные облака газа внутри него медленно сжимаются, образуя новые звезды. Этот процесс «раскрашивает» облака газа во множество цветов, именно это мы видим на снимке.

Image Credit: ESA/NASA/Hubble

после того, как не удалось обнаружить суперсимметричные частицы на Большом адронном коллайдере. А эту очень легкую элементарную частицу ищут совсем по-другому.

Как я уже говорил, ищут стабильные массивные темные объекты астрофизического масштаба MACHO на небе и ищут WIMP-ы на Земле. Пока из всех вариантов, которые могут «показать» нам проявления темной материи, ничего не исключено, кроме, возможно, относительно легких суперсимметричных частиц. Также ученые ищут теплую темную материю – гипотетическую нейтриноподобную частицу. Ее, возможно, удастся найти, увидев результаты процесса ее распада на небе – например, зарегистрировав монохроматическую рентгеновскую линию, которая возникла или из-за аннигиляции двух частиц теплой темной материи в два фотона, или из-за распада частицы теплой темной материи на нейтрино и фотон.

В большинстве своем люди ведь не хотят разбираться в тонкостях последствий открытия тех же гравитационных волн. Насколько вообще это необходимо широкой публике, кому больше нужен контакт ученого и обычного человека?

Контакт нужен и тем, и другим. Доносить до обычных людей, популяризировать научные результаты необходимо. Другой вопрос, что есть разделы науки, которые трудно поддаются популяризации. Но знать основные научные достижения в изучении Вселенной, думаю, стоит каждому жителю планеты Земля.

Человеку проще объяснить значение научного открытия, рассказав о его приложениях в обычной жизни. И действительно, человечество всегда пыта-

Какое практическое приложение будет у гравитационных волн, у черных дыр – я не знаю. Некоторые, как всегда, говорят, что человечество начнет путешествовать во времени – я в это не верю. Хотя в общей теории относительности существуют решения, которые позволяют путешественнику совершить замкнутую времениподобную траекторию, то есть прийти в какую-то точку позже, чем он из нее вышел.

Такие решения в общей теории относительности есть, но источники, создающие такие поля, в высшей степени нестабильны, они распадутся прежде, чем что-то

нетривиальное успеет произойти. В этой возможности путешествий во времени много несуразностей, и первая состоит в том, что к нам из будущего еще никто не прилетал. Представьте цивилизацию на десять миллионов лет старше, чем наша. Они могли бы уже быть в состоянии совершить путешествие во времени, если законы природы не запрещают это. Но мы никого из них не видим. А если кто-то когда-нибудь попадет через «котовую нору» в другую Вселенную, обратно он уже не вернется, и мы ничего не узнаем.

Есть еще вот такой полудантасический пример: предотвращение энергетического кризиса при помощи магнитных монополей, которые станут неисчерпаемым источником энергии для человечества.

У магнита всегда есть северный и южный полюс и сколько бы вы ни делили его, вы будете получать более мелкие магнетики, но у каждого будет северный и южный полюс – всегда будем иметь магнитный диполь. Поль Дирак в 30-х гг. XX в. написал гениальную работу о возможном существовании отдельных магнитных зарядов. Магнитный монополю можно представлять, как отдельно взятый полюс постоянного магнита.

После Дирака через 40 лет А. М. Поляков и Герард 'т Хоофт независимо обнаружили, что существование магнитного монополя не только возможно, но и обязательно в полевых теориях определенного класса. Количество рождающихся магнитных монополей определяется процессом развития Вселенной на ранней стадии, поэтому по их отсутствию в настоящее время можно судить об этом процессе. Одно из объяснений

Замкнутая времениподобная линия или замкнутая времениподобная кривая (англ. *closed timelike curve*, СТО) в математической физике – времениподобная кривая на Лоренцевом многообразии, возвращающаяся в исходную пространственно-временную точку, то есть замкнутая мировая линия частицы в пространстве-времени. Существование таких линий в рамках общей теории относительности было впервые вынесено на широкое обсуждение Куртом Геделем в 1949 г. на основании полученного им точного решения уравнений Эйнштейна, известного как метрика Геделя. Подобные кривые возникают и в других решениях, таких как «цилиндр Типлера» и «проходимая кротовая нора». Существование замкнутых времениподобных кривых позволяет путешествия во времени со всеми связанными с ними парадоксами.

Часть физиков предполагает, что будущая теория квантовой гравитации наложит запрет на существование замкнутых времениподобных линий. Эту идею Стивен Хокинг назвал гипотезой о защищенности хронологии (англ. *chronology protection conjecture*). Хорошее обсуждение одной, весьма остроумной, машины времени можно найти в статье <http://www.nature.com/nature/journal/v357/n6373/abs/357019a0.html>

ТОП открытий в области космологии, астрофизики и в физике элементарных частиц за 100 лет, по версии А. Д. Долгова:

Общая теория относительности Эйнштейна.

Теория электрослабого взаимодействия, и вообще развитие калибровочных теорий в физике частиц со спонтанно нарушенной симметрией.

Открытие фундаментальных составляющих всего в природе – кварков

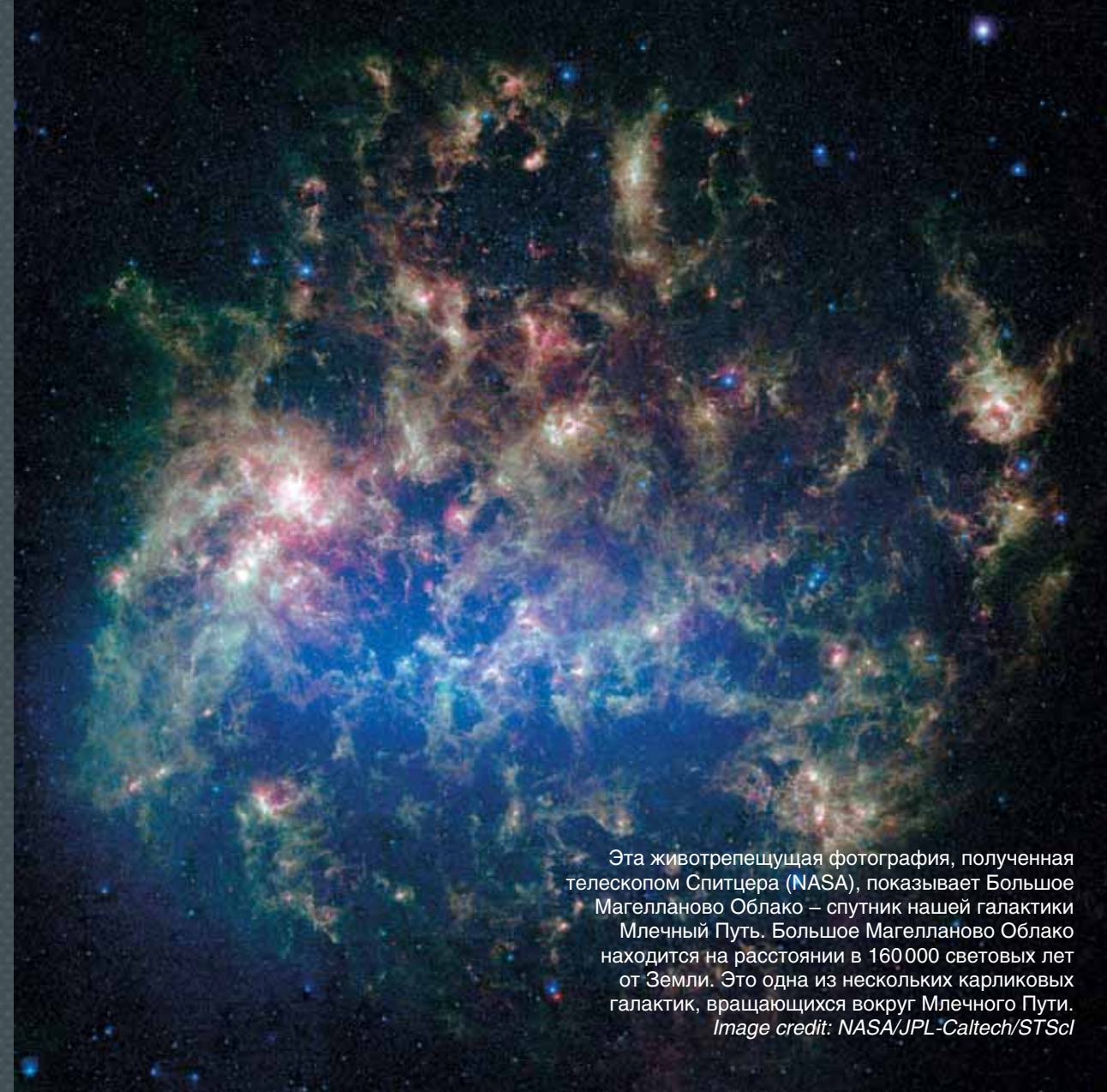
того, что реликтовые магнитные монополи не обнаружены, дается теорией раздувающейся Вселенной (инфляции). Магнитные монополи 'т Хоофта – Полякова обладают некоторыми необычными свойствами, благодаря которым их было бы легко обнаружить. В частности, взаимодействие с магнитным монополю может стимулировать распад нуклона, предсказанный некоторыми моделями великого объединения, то есть выступать в качестве катализатора такого распада.

Позже Валерий Рубаков, ныне академик, понял, что такие монополи могут быть неисчерпаемым источником энергии. Протон рядом с ним будет распадаться (Рубаков, 1981) и выделять энергию. Попросту, суньте магнитный монополю в чайник, и вода закипит. Но найти монополи трудно – их массы находятся далеко за пределами того, что может быть сегодня рождено на ускорителях, порядка ста тысяч миллиардов масс протона.

Раньше физики думали, что природа следует строгим законам – все, что не разрешено законами физики, не может существовать. Это конечно так, но сегодня физики воспринимают это более позитивно: история нас учит, что все, что не запрещено законами физики, обязательно случается в природе. Кроме того, некоторые законы физики со временем уточняются. Например, долгое время думали, что природа лево-право симметрична (СР-симметрия), это было красиво и считалось законом природы. Теперь мы знаем о нарушении СР-инвариантности. Наличие магнитного монополя не противоречит известным фундаментальным принципам, но и найти мы пока его не можем. Раньше мы приходим к управляемому термоядерному синтезу, мне кажется, чем найдем магнитный монополю.

Мы многое узнали об устройстве Вселенной и еще больше узнаем в будущем, но вместе с тем возникают новые проблемы, все больше и больше появляется новых вопросов.

Во многом мудрости много печали, это так. Но ведь человечество не может обойтись без науки. На этом тернистом пути много трудностей, но тем и интересней.



Эта животрепещущая фотография, полученная телескопом Спитцера (NASA), показывает Большое Магелланово Облако – спутник нашей галактики Млечный Путь. Большое Магелланово Облако находится на расстоянии в 160 000 световых лет от Земли. Это одна из нескольких карликовых галактик, вращающихся вокруг Млечного Пути.
Image credit: NASA/JPL-Caltech/STScI

Литература

- Бондарь А. Е., Долгов А. Д. На темной стороне Вселенной // НАУКА из первых рук. 2014. Т. 59. № 5. С. 24–39.
- Кронин Дж. В. Нарушение СР-симметрии. Поиск его истоков // УФН. 1981. № 135. С. 195–211.
- Окунь Л. Б. Зеркальные частицы и зеркальная материя: 50 лет гипотез и поисков // УФН. 2007. № 177. С. 397–406. <http://ufn.ru/ru/articles/2007/4/h>
- Сахаров А. Д. ВОСПОМИНАНИЯ // Знамя. 1990. № 10–12.
- Сахаров А. Д. ВОСПОМИНАНИЯ // Знамя. 1991. № 1–5, 9, 10.
- Уилл К. М. Двойной пульсар, гравитационные волны и Нобелевская премия // УФН. 1994. № 164. С. 765–773.
- Черепашук А. М. Гравитационное микролинзирование и проблема скрытой массы // Соровский образовательный журнал. 1998. № 3. С. 92–99.

- Blinnikov S. I., Dolgov A. D., Porayko N. K. and Postnov K. Solving puzzles of GW150914 by primordial black holes // Journal of Cosmology and Astroparticle Physics. 2016. N. 11. P. 1–13.
- Cronin James W. CP Symmetry Violation. The Search for Its // Origin: Nobel Lecture. Stockholm. December 11. 1980.
- Dolgov A. D. Beasts in Lambda-CDM Zoo, lecture witch presented at 19th International Moscow School of Physics (44th ITEP Winter School) and of the invited talk at the International Conference: The spacetime odyssey continues NORDITA, Stockholm, June 2 - 5, 2015.
- Dolgov A. D. and Silk J. Baryon isocurvature fluctuations at small scales and baryonic dark matter // Phys. Rev. D. 1993. V. 47.
- Kennefick D. Einstein Versus the Physical Review // Physics Today. 2005. V. 58. N. 9. P. 43.