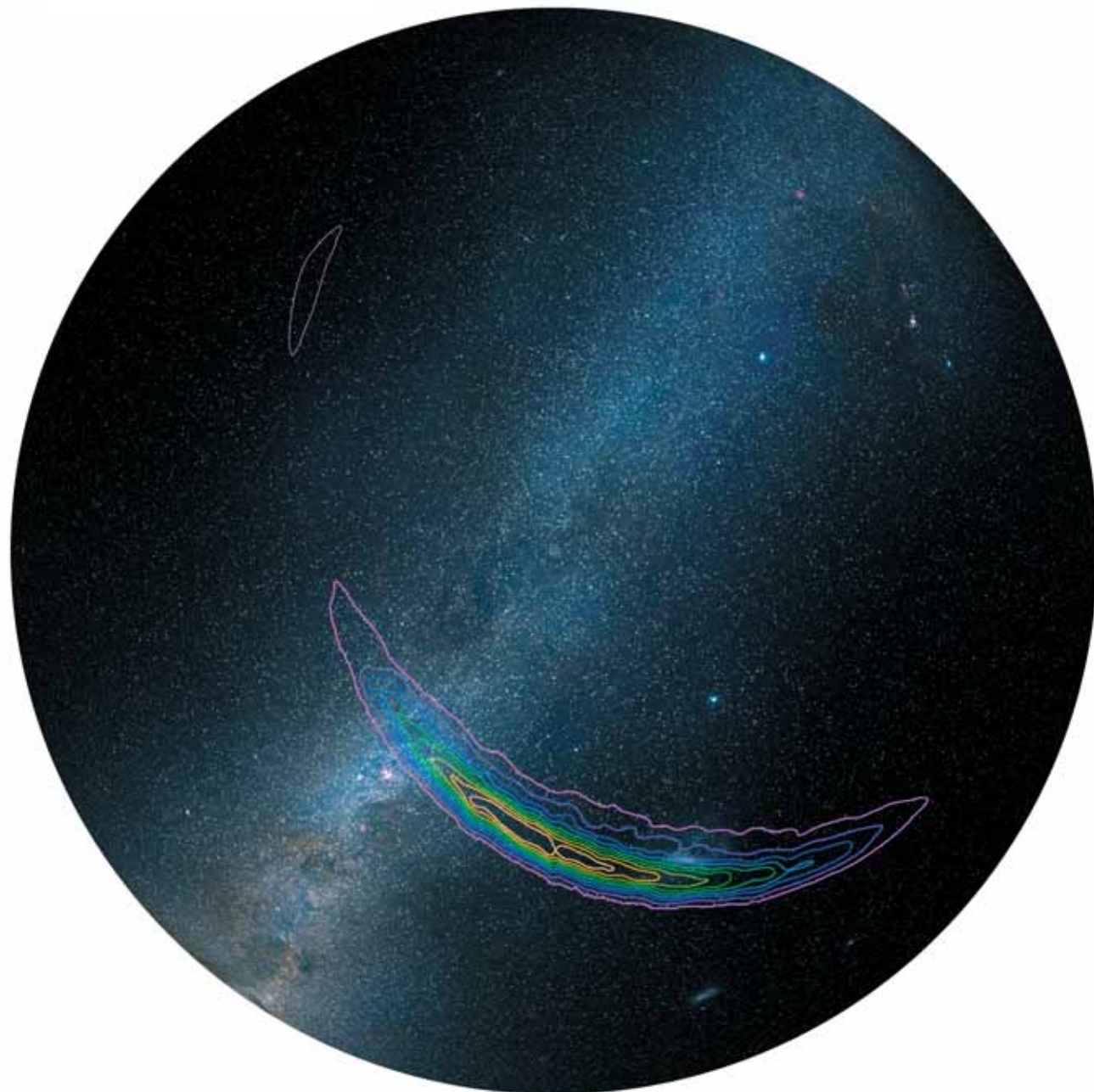




НОБЕЛЕВСКАЯ ПРЕМИЯ по физике за «великую работу»



Нобелевскую премию по физике в 2017 г. присудили ученым из США – Кипу Торну, Райнеру Вайссу и Барри Бэрришу – за основополагающий вклад в создание детектора LIGO и наблюдение гравитационных волн

Кип Торн, Райнер Вайсс и Барри Бэрриш проделали, не побоюсь этого слова, великую работу. Во-первых, это очень тонкий и точный эксперимент: сигнал гравитационной волны настолько слабый, что ученые измеряли расстояние в сто миллионов раз меньшее, чем размер атома. Во-вторых, была проверена *общая теория относительности* (ОТО) для области сильных полей (никто раньше этого не делал) и было доказано, что она работает. В-третьих, появился новый вид телескопов гравитационных волн, при помощи которых ученые смогут проникать вглубь Вселенной на расстояния в миллиарды световых лет. И, в-четвертых, это открытие ставит перед физиками новые проблемы, которые в свою очередь приведут к новым открытиям.

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 *Advanced LIGO* поймал 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 энергии от всей Вселенной. На Землю гравитационное излучение пришло уже сильно ослабленным.

Гравитационная волна, которую зарегистрировал интерферометр LIGO (событие получило обозначение GW150914) и за которую американцы получили Нобелевскую премию, 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.

Недавно интерферометры LIGO уже совместно с третьим детектором – *Advanced Virgo* (Италия) – одновременно зарегистрировали пятую гравитационную волну. Источником сигнала GW170814 стали две черные дыры массами около 31 и 25 масс Солнца, столкнувшиеся на расстоянии 1,8 млрд световых лет от Земли. Масса вновь образованной вращающейся черной дыры примерно 53 масс Солнца. Это означает, что около трех масс Солнца были преобразованы в энергию зафиксированной гравитационной волны. Так как гравитационная волна «падает» не плашмя, а под углом, по трем точкам положение черных дыр на небе можно определить с более высокой точностью.

Ключевые слова: гравитационные волны, черные дыры, эксперимент LIGO, эксперимент Virgo, темная материя, вселенная, Нобелевская премия.

Key words: gravitational waves, black holes, LIGO experiment, Virgo experiment, dark matter, Universe, Nobel Prize



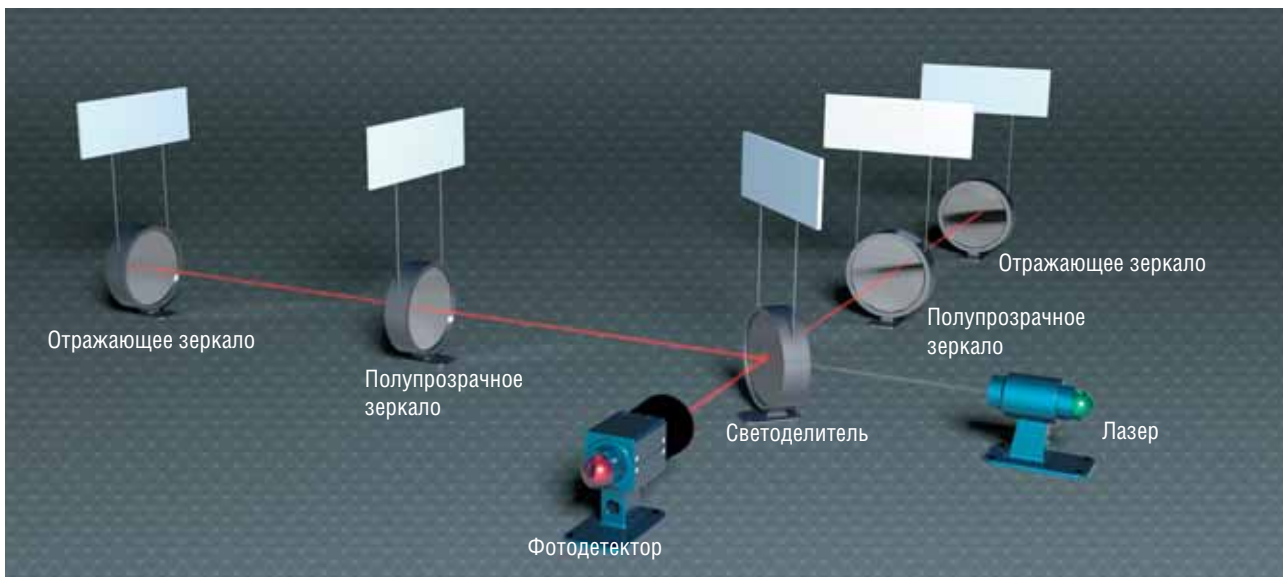
ДОЛГОВ Александр Дмитриевич – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института теоретической и экспериментальной физики им. А. И. Алиханова (Москва), заведующий научной лабораторией космологии и элементарных частиц Новосибирского государственного университета. Член Международного общества общей теории относительности и гравитации. Автор и соавтор более 300 научных работ

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

© А. Д. Долгов, 2017



LIGO (*Laser Interferometer Gravitational Observatory*) – гравитационная обсерватория на основе лазерного интерферометра. LIGO включает в себя два одинаковых детектора, расположенных в Ханфорде (штат Вашингтон) и Ливингстоне (штат Луизиана) и разнесенных друг от друга на 3000 км. Наличие двух установок важно сразу по двум причинам. Во-первых, сигнал считается зарегистрированным, только если его увидели 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. *Image Credit: Caltech/MIT/LIGO Lab*



Суть эксперимента *Advanced LIGO*. 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, т. е. 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, т. е. научиться регистрировать сдвиг зеркала даже не на один атом, а на тысячные доли атомного ядра

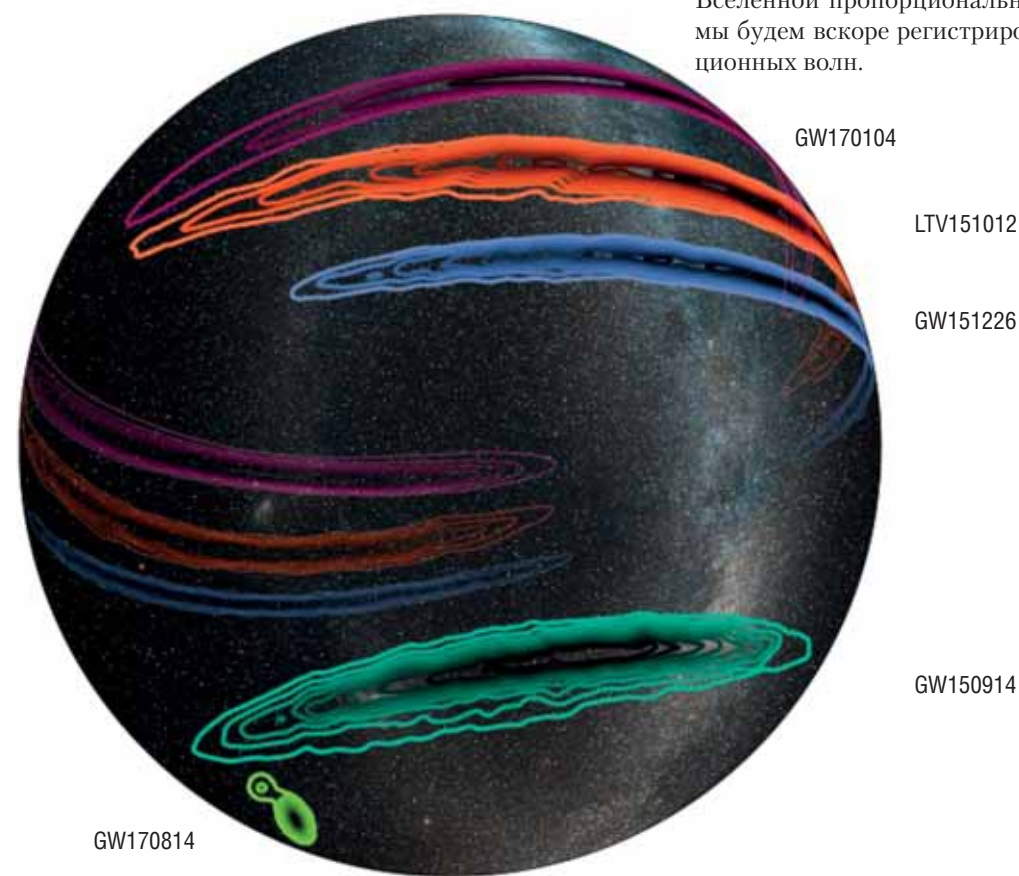
Чем больше будет интерферометров (установка в Италии *Advanced Virgo* уже работает, по-видимому, детектор появится и в Японии), тем больше будет охват неба. Тогда мы сможем определить точное место, откуда придет гравитационная волна, направим туда телескопы и, только представьте, увидим глазом, что происходит на месте, где около миллиарда лет назад слились две черные дыры!

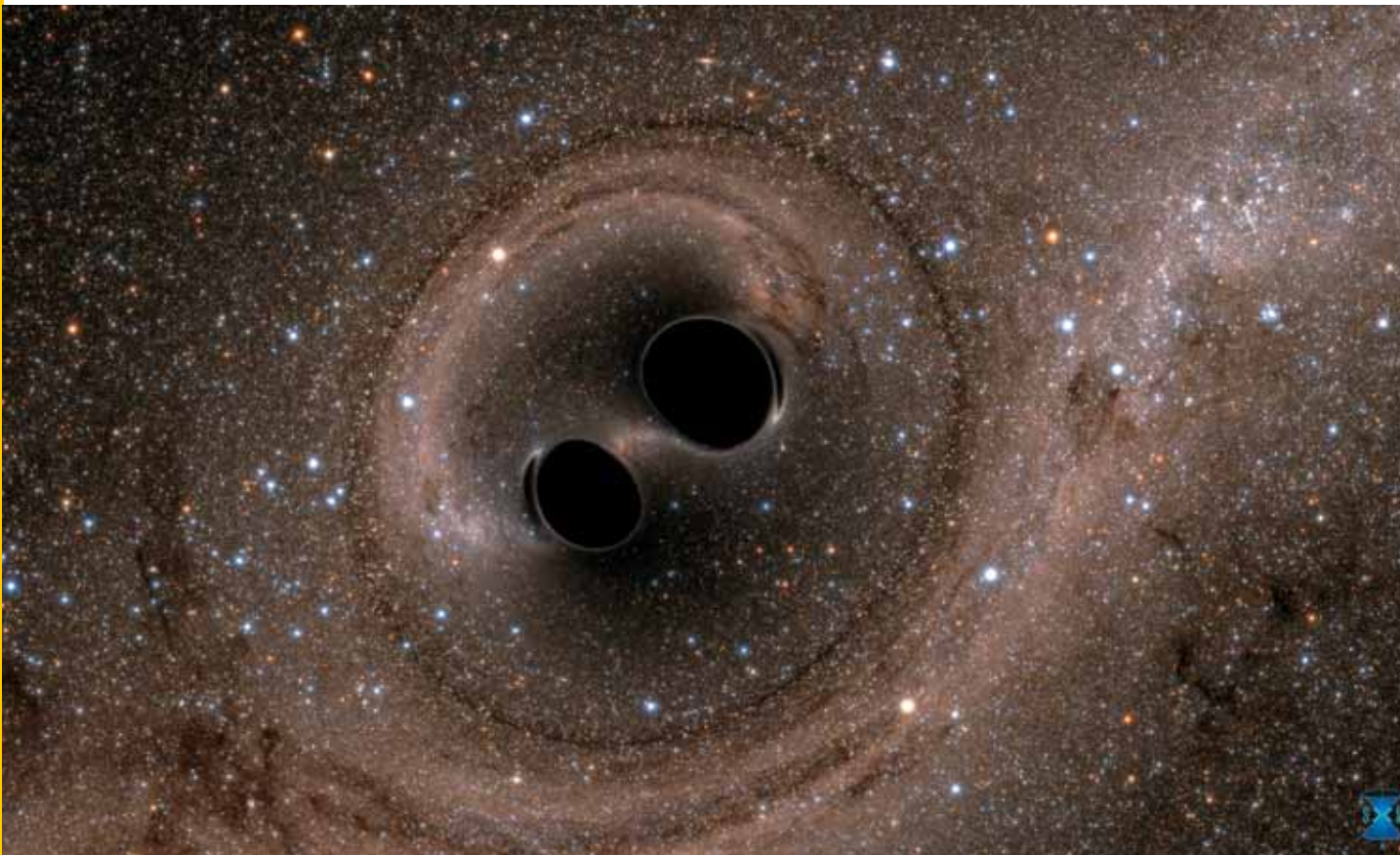
В нашей галактике много двойных звездных систем (их даже больше, чем одинарных). Возникают они довольно «просто»: в неоднородном облаке межзвездного газа образуются два центра конденсации, два сгустка, в каждом из которых появляется звезда – вот вам двойная звездная система. Одна черная дыра тоже образуется 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

На небесной карте изображено примерное положение источников всех зарегистрированных ранее гравитационных волн, в том числе GW170814. *LIGO/Caltech/MIT/Leo Singer (Milky Way image: Axel Mellinger)*

не в процессе звездного коллапса, а за счет каких-то других процессов. Кроме того, черные дыры, которые образуются при коллапсе массивной звезды, обычно имеют массу не более 10 солнечных масс, а здесь мы имеем черные дыры с массами 36 и 29 солнечных масс. Есть еще одна особенность: у этих черных дыр практически отсутствовал 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)

Как сказал Кип Торн на пресс-конференции, посвященной открытию гравитационных волн, коллаборации 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, что количество событий слияния черных дыр в доступной для наблюдения части Вселенной пропорционально ее объему, то на Земле мы будем вскоре регистрировать все больше гравитационных волн.





До сих пор не понимаю, почему Нобелевскую премию по физике не получил Г. И. Будкер, а позже – А. Н. Скринский. Академик Будкер был пионером в работах со встречными пучками. По-моему, сам Ландау со смехом воспринимал его идею бить вакуумом по вакууму. А теперь все ускорители работают на встречных пучках. Технологию фокусировки пучка придумал академик Скринский – и все этим пользуются. Кстати, идея интерферометрического детектирования гравитационных волн тоже была предложена советскими физиками М. Е. Герценштейном и В. И. Пустовойтом в 1962 г. Тогда только-только был придуман лазер, а Д. Вебер приступил 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. Важнейшую роль в реализации проектов на основе лазерных интерферометров сыграли работы по анализу шумов в таких системах еще одного российского физика – В. Б. Брагинского. Основной алгоритм анализа сигналов LIGO, благодаря которому впервые были зарегистрированы гравитационные волны, реализовал выпускник физического факультета НГУ С. Клименко. Также свой вклад в открытие внес еще один выпускник НГУ – Ю. Миненков

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

Литература

Долгов А. Д. «... При большой температуре для Вселенной сшита шуба по ее кривой фигуре» // НАУКА из первых рук. 2016. Т. 71/72. № 5/6. С. 17–30.

Уилл К. М. Двойной пульсар, гравитационные волны и Нобелевская премия // УФН. 1994. № 164. С. 765–773.

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.

Dolgov A. D., Silk J. Baryon isocurvature fluctuations at small scales and baryonic dark matter // Phys. Rev. D. 1993. V. 47.