

## КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

## Астрофизический смысл открытия гравитационных волн

В.М. Липунов

*Открытие гравитационных волн международной коллаборацией LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory)/Virgo явилось, с одной стороны, триумфальным подтверждением общей теории относительности, а с другой — подтверждением самых общих (фундаментальных) представлений о ядерной эволюции барионного вещества Вселенной, сосредоточенного в двойных звёздах. Эксперимент LIGO/Virgo может стать первым в истории физики экспериментом, в ходе которого обнаружены две физические сущности: гравитационные волны и чёрные дыры.*

**Ключевые слова:** гравитационные волны, чёрные дыры, GW150914, Машина сценариев, роботизированные обсерватории, робот-телескоп МАСТЕР

PACS numbers: 04.30. – w, 95.85.Sz, 97.80. – d

DOI: 10.3367/UFNr.2016.03.037759

## Содержание

1. Введение (1011).
  2. Машина сценариев (1012).
  3. Глобальная сеть телескопов-роботов МАСТЕР (1014).
  4. Наблюдения гравитационно-волнового события GW150914 (1015).
  5. Почему первыми были открыты слияния чёрных дыр? (1016).
  6. Почему массы чёрных дыр оказались намного больше ожидаемых? (1019).
  7. Гамма-событие обсерватории "Ферми" (1020).
  8. Заключение (1021).
- Список литературы (1022).

## 1. Введение

14 сентября 2015 г. усовершенствованная система интерферометров LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) впервые обнаружила гравитационные волны, возникшие в результате слияния двойной системы чёрных дыр с примерно равными массами, удалённых от Земли на расстояние более 1 млрд световых лет [1]. Это открытие, с одной стороны, было ожидаемым предсказанием, согласно современной теории эволюции двойных звёзд, Липуновым и др. [2–4], а с другой — впервые в истории астрономии привело к реальному взаимодействию нового канала информации — гравитационных волн — с электромагнитными обсерваториями наземного и космического базирования

**В.М. Липунов.** Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Университетский просп. 13, 119991 Москва, Российская Федерация; Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Ленинские горы 1, стр. 2, 119991 Москва, Российская Федерация  
E-mail: lipunov@sai.msu.ru

Статья поступила 2 марта 2016 г.

[5]. Благодаря пионерским работам советских астрофизиков в области популяционного синтеза двойных звёзд (Машина сценариев [6]) и созданию Глобальной сети телескопов-роботов МАСТЕР нам удалось принять активное участие в зарождении новой науки — гравитационно-волновой астрономии<sup>1</sup>. Особое значение это открытие может приобрести в связи с одновременным открытием двух объектов, предсказанных общей теорией относительности: гравитационных волн и чёрных дыр.

Впервые идея эксперимента по обнаружению гравитационных волн была высказана в работе М.Е. Герценштейна и В.И. Пустовойта [7] и получила развитие в работах В.Б. Брагинского [8–10]. Кроме того, российские учёные принимали непосредственное участие в самом эксперименте [5, 8, 11, 12]. Таким образом, советские и российские учёные внесли важный вклад в открытие гравитационных волн.

В 1964 г. Я.Б. Зельдович отметил, что особый интерес с точки зрения наблюдения релятивистских звёзд представляют двойные системы [13]. Существование релятивистских звёзд в двойных системах стало очевидным с момента появления первых эволюционных сценариев массивных двойных систем [14–16]. Релятивистские звёзды: нейтронные звёзды (NS — Neutron Star) и чёрные дыры (BH — Black Hole) — являются продуктом эволюции массивных звёзд (более  $10M_{\odot}$ ), способных породить в конце термоядерной эволюции ядра с массами, превосходящими чандрасекаровский предел белых карликов ( $\sim 1,5M_{\odot}$ ) и предел Оппенгеймера – Волкова для нейтронных звёзд ( $\sim 2,5M_{\odot}$ ). Такие процессы могут идти и в так называемых маломассивных системах. Однако образование двойных релятивистских звёзд — двойных

<sup>1</sup> Автору настоящей статьи удалось дважды поучаствовать в истории открытия гравитационных волн: сначала как теоретика — когда под его руководством была создана Машина сценариев, а начиная со второй половины 2015 г. как экспериментатору — руководителю Глобальной сети оптических телескопов-роботов МАСТЕР.

нейтронных звёзд (NS + NS) или чёрных дыр (BH + BH), а также смешанных пар (BH+NS), возможно только в результате эволюции двух массивных звёзд, каждая из которых способна породить релятивистскую звезду. Ещё в XX в. после прямого обнаружения двойной нейтронной звезды в нашей Галактике [17] (Нобелевская премия 1993 г.) стало ясно, что именно двойные релятивистские звёзды могут быть самым надёжным и мощным источником гравитационных волн. Исследование таких систем прекрасно показало корректность общей теории относительности (с точностью до  $\sim (v/c)^5$ ) в полном соответствии с формулой Эйнштейна [18] (1916 г.) для мощности гравитационных волн

$$L = \frac{32}{5} \frac{G^4}{c^5} \frac{M_1^2 M_2^2 (M_1 + M_2)}{A^5}.$$

Здесь  $G$  — гравитационная постоянная,  $M_1$  и  $M_2$  — массы компонентов двойной системы,  $A$  — расстояние между ними (орбиты приняты круговыми),  $c$  — скорость света в вакууме.

Слияние релятивистских звёзд представляет собой самый мощный макропроцесс во Вселенной. Действительно, пусть две массы сталкиваются с максимальной скоростью  $c$ . Мощность этого процесса  $L \approx E/t_{\min}$ , где  $E \approx Mc^2$ , и минимальное время, соответственно,  $t_{\min} = R_{\min}/c$ , а минимальный размер  $R_{\min}$  любого тела — это его гравитационный радиус:  $R_{\min} = R_g = 2GM/c^2$ . Легко увидеть, что максимальная мощность (или, как говорят астрофизики, светимость) составит  $L_{\max} = c^5/G \approx 4,5 \times 10^{59}$  эрг  $c^{-1}$ . Эту мощность Эйнштейн называл естественной светимостью. Замечательно другое: если планковскую энергию  $E_{\text{Pl}} = (hc^5/G)^{1/2} = 1,22 \times 10^{28}$  эВ поделить на планковское время  $t_{\text{Pl}} = (hG/c^5)^{1/2} = 5,39116 \times 10^{-44}$  с, то постоянная Планка  $h$  выпадает из формулы для светимости и опять получается естественная светимость [19]:

$$L_{\text{Pl}} = \frac{E_{\text{Pl}}}{t_{\text{Pl}}} = \frac{c^5}{G} = 4,5 \times 10^{59} \text{ эрг } c^{-1}.$$

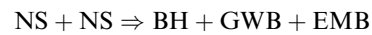
С такой мощностью рождалась наша Вселенная.

Не случайно некоторые самые мощные электромагнитные взрывы, наблюдающиеся во Вселенной, — короткие гамма-всплески — связываются со столкновением нейтронных звёзд, радиус которых близок к минимально возможному.

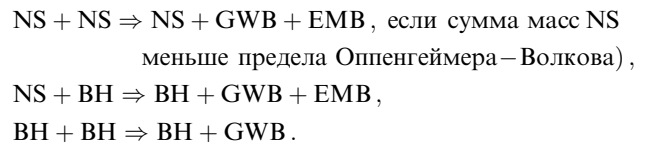
Таким образом, естественная светимость останется даже в будущей теории квантовой гравитации важной величиной<sup>2</sup>. Поэтому самыми мощными макропроцессами во Вселенной являются процессы столкновения релятивистских звёзд. Именно наблюдение двойного радиопульсара PSR 1913+16 показало, что время слияния этих систем меньше хаббловского времени ( $1/H \approx 14$  млрд лет,  $H$  — постоянная Хаббла,  $H \approx 70$  км  $c^{-1}$  Мпк<sup>-1</sup>), и это послужило основой первых экспериментальных оценок частоты слияния нейтронных звёзд во Вселенной и вероятности обнаружения данного процесса [12]. Позд-

нее стало ясно, что слияние нейтронных звёзд, возможно, уже наблюдается как явление коротких гамма-всплесков.

Итак, к началу 1980-х годов стало очевидным, что во Вселенной идут своеобразные макрореакции (М-реакции) "элементарных частиц" Вселенной — нейтронных звёзд и чёрных дыр — с максимально возможной мощностью<sup>3</sup>  $\sim c^5/G \sim 10^{59}$  эрг  $c^{-1}$  [20]:



или



Здесь **GWB** (Gravitational-Wave Burst) и **EMB** (Electromagnetic Burst) — гравитационно-волновая и электромагнитная вспышки. В первом процессе возможны два варианта, в зависимости от верхнего предела массы нейтронной звезды (предела Оппенгеймера–Волкова), который пока точно не установлен.

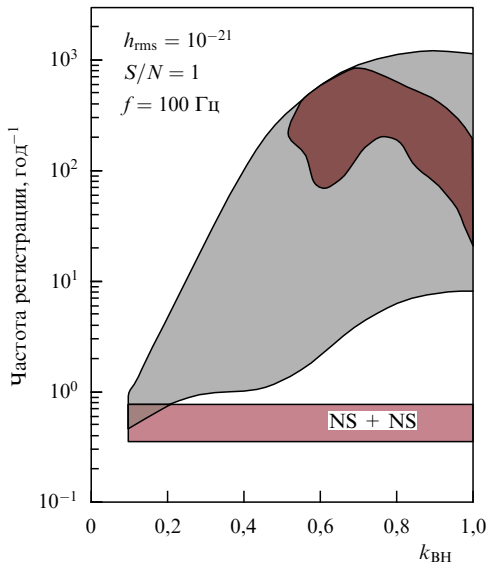
К началу 1980-х годов "сечение" (или, скажем так, вероятность этих реакций) было неизвестным. В частности, не было ясно, какие из этих процессов чаще происходят во Вселенной. Понятно, что результат эксперимента LIGO зависит от того, на какой частоте будет находиться максимум его чувствительности. Частота гравитационной волны, излучаемой двойной системой, определяется частотой её обращения, точнее, она равна удвоенной частоте орбитального вращения  $\Omega = 2\pi/P$ . Согласно третьему закону Кеплера  $P^2/A^3 \sim (M_1 + M_2)^{-1}$ . В то же время наименьшее расстояние прямо пропорционально массе:  $A \sim M_1 + M_2$  (гравитационный радиус Шварцшильда). Отсюда получается, что максимальная частота двойной системы в момент соприкосновения — слияния компонентов —  $\nu = 2/P \sim 1/(M_1 + M_2)$ . Поскольку масса чёрных дыр может быть в несколько десятков раз больше, их частота  $\nu$  будет на порядок меньше, чем у нейтронных звёзд. Оценки показали, что первые события должны принадлежать диапазону частот 100–200 Гц (!), а не области 1000 Гц, характерной для нейтронных звёзд. То есть гравитационный детектор должен иметь широкую настройку! А это вопрос денег и времени. Например, твердотельные приёмники и даже некоторые интерферометры первоначально настраивались на частоту порядка 1 кГц.

## 2. Машина сценариев

В начале 1980-х годов появился новый метод исследования поздних стадий эволюции звёзд — популяционный синтез двойных звёзд с учётом образования и эволюции релятивистских звёзд — нейтронных звёзд и чёрных дыр [21, 22]. В первых работах, в частности, было показано формирование релятивистских двойных систем с чёрными дырами. Этот метод впервые позволил получить ожидаемую частоту слияния двойных NS, нормированную на скорость постоянного звездообразования, харак-

<sup>2</sup> Конечно, светимость не является лоренц-инвариантной величиной, поскольку при движении относительно наблюдателя будут изменяться и энергия, и время, за которое выделяется эта энергия. Однако с точки зрения астрофизики это не очень важно, так как в современной расширяющейся Вселенной нет ситуаций, в которых макроисточник движется к нам с релятивистской скоростью.

<sup>3</sup> Например, светимость квазаров, считавшихся в XX в. самыми мощными объектами Вселенной, на 10 порядков меньше.



**Рис. 1.** (В цвете онлайн.) "Лохнесское чудовище" (Голова динозавра). Ожидаемая скорость регистрации (приёмником с чувствительностью  $h_{\text{rms}} = 10^{-21}$  при отношении сигнала к шуму  $S/N = 1$  на частоте  $f = 100$  Гц) гравитационно-волновых всплесков от слияния нейтронных звёзд и чёрных дыр в зависимости от неизвестного пока параметра  $k_{\text{BH}}$  — доли вещества звезды, уходящего в чёрную дыру в момент её образования. Серая область — скорость слияния чёрных дыр на детекторах типа LIGO при всех возможных параметрах сценария эволюции двойных звёзд со слабым звёздным ветром. Напоминающая голову доисторического чудовища коричневая область — рассчитанная на основе современной теории эволюции двойных звёзд область вероятной частоты регистрации. Эта область довольно велика — много неизвестных параметров, но она всюду лежит значительно выше области частоты детектирования сигнала от сливающихся нейтронных звёзд (горизонтальной полосы с надписью NS + NS). Диаграмма показывала, что первыми будут открыты сливающиеся чёрные дыры [2].

терного для нашей Галактики с массой  $10^{11} M_{\odot}$  [20], а также рассчитать амплитуду и непрерывный спектр гравитационно-волнового фона, создаваемого двойными звёздами [23]. Независимо похожие расчёты были проведены в [24], где были включены в рассмотрение также процессы слияния чёрных дыр. Однако именно с помощью Машины сценариев в 1997 г. впервые удалось показать в работах Липунова и др. [2–4], что первыми событиями на детекторах типа LIGO должны быть слияния двойных релятивистских систем, содержащих чёрные дыры: BH + BH, BH + NS (рис. 1).

Тема гравитационных волн тесно смыкается с исследованиями гамма-всплесков, в особенности так называемых коротких гамма-всплесков, которые связываются со слияниями нейтронных звёзд и смешанных систем. Однако не следует ожидать прямого отождествления гамма-всплесков с процессом слияния нейтронных звёзд. Дело в том, что излучение гамма-всплесков сильно анизотропно и сосредоточено в малом телесном угле, порядка нескольких градусов. Поэтому большинство гамма-всплесков "стреляет" мимо Земли. Например, вероятность одновременного детектирования гравитационно-волновых всплесков и гамма-всплесков (Gamma-Ray Burst — GRB) равна  $\sim 1/1000$ . Запомним последнюю оценку, поскольку она будет важна, когда в разделе 7 мы будем анализировать сообщения о возможном детектировании гамма-всплеска космической обсерваторией "Ферми" во время события GW150914.

Однако есть несколько аргументов в пользу образования квазиизотропного электромагнитного излучения, предшествующего моменту столкновения и сопровождающего его, а также послесвечения при слияниях с участием нейтронных звёзд.

В 1984 г. Блинныеков с соавторами [25] впервые показали, что слияние нейтронных звёзд может сопровождаться мощной электромагнитной вспышкой. Липунов, Панченко в [26] показали, что при слиянии нейтронных звёзд, ещё перед их столкновением, возможно образование мощного нетеплового излучения пульсарного типа (в смысле механизма, а не периодичности). Потухшие когда-то радиопульсары могут на мгновение вспыхнуть снова, но не в результате спинового вращения, как обычно, а вследствие орбитального движения, которое на последних стадиях слияния достигает килогерцевой частоты. В этом случае создаются условия для образования вблизи поверхности нейтронной звезды областей, в которых электрическое поле направлено параллельно магнитному, причём силовые линии магнитного поля разомкнуты. Используя стандартный аргумент с потоком электромагнитной энергии вектора Пойнтинга, можно получить, что к моменту столкновения светимость нетеплового излучения (в том числе рентгеновского и радиоизлучения) может в несколько миллионов раз превосходить светимость известного радиопульсара в Крабовидной туманности при равных значениях магнитного поля. В случае нестандартного магнитного поля ( $H \sim 10^{13} - 10^{14}$  Гс) светимость может возрасти ещё примерно в 10000 раз, и тогда такой пульсар будет виден с расстояний до 100 Мпк. Это, кстати, превышает горизонт чувствительности усовершенствованного интерферометра LIGO [1] по сливающимся нейтронным звёздам.

После слияния возможен выброс части радиоактивного вещества, в котором идут реакции слипания тяжёлых радиоактивных элементов, и через промежуток времени от нескольких часов до нескольких суток возможно появление так называемой килоновой (Kilonova) [27]. Ещё один процесс при слиянии — это временное образование быстровращающегося самогравитирующего тела — спинара [28]. Специально повторим, что здесь мы не включаем в рассмотрение явление гамма-всплеска с электромагнитным излучением, сосредоточенным в узком джете [29, 30], поскольку вероятность его регистрации при первых успешных наблюдениях гравитационных волн очень мала.

Начиная с середины 2015 г. российская система широкопольных телескопов-роботов МАСТЕР присоединилась к электромагнитной поддержке гравитационно-волновых экспериментов LIGO/Virgo [5]. Стоит сказать несколько слов о возникновении системы МАСТЕР. В 2003 г. мы начали при поддержке частным спонсором развивать роботизированные наблюдения астрономических взрывных объектов [31], в первую очередь ранние наблюдения собственного оптического излучения гамма-всплесков. К настоящему времени нами при поддержке программой развития Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (МГУ) и открытым акционерным обществом (ОАО) «Московское объединение "Оптика"» создана глобальная сеть идентичных двойных широкоугольных телескопов, расположенных в Северном и Южном полушариях [11, 32–34] (рис. 2).

16 сентября 2015 г. в 05 ч 39 мин 58 с по всемирному времени (UT) мы получили матрицу вероятностей обла-



**Рис. 2.** Расположение телескопов-роботов Глобальной сети МАСТЕР и гравитационно-волновых антенн американского интерферометра LIGO. Телескопы МАСТЕР расположены (с востока на запад): под Благовещенском, в Тункинской долине (Астрофизический центр Тунка, Байкал), под Екатеринбургом, Кисловодском, в Крыму, Южной Африке, на Канарских островах и в Аргентине. Флажок вблизи Москвы — место первого тестового телескопа-робота МАСТЕР I (прообраза МАСТЕР II), построенного в Домодедовском районе), который сейчас в наблюдениях не участвует. Все телескопы сети МАСТЕР работают в полностью автоматическом режиме, и при получении сигнала они могут наводиться в любую точку неба, доступную в настоящий момент, менее чем за 20 с. Система МАСТЕР осуществляет самый быстрый в мире оптический обзор неба до 19–20-й звёздной величины — 64 квадратных градуса (кв. град) за 1 мин.

сти ошибок первого гравитационно-волнового алерта ALIGO trigger G184098 [35]. С последующей ближайшей ночи начали инспекцию вероятных областей всеми телескопами сети МАСТЕР. Была исследована область звёздного неба величиной около 5000 кв. град с различным пределом, достигающим 20-й звёздной величины. Эти результаты кратко представлены в общей статье групп электромагнитной поддержки эксперимента коллаборации LIGO/Virgo [5] и более подробно в статье команды МАСТЕР [12].

### 3. Глобальная сеть телескопов-роботов МАСТЕР

Прежде всего договоримся о терминологии. На регулярных международных конференциях, посвящённых роботизированным обсерваториям и телескопам, было выработано следующее определение телескопа-робота (Robotic Autonomous Observatories workshop-2009): телескопом-роботом является телескоп, способный без участия человека проводить многодневные астрономические наблюдения, автоматически получая и обрабатывая изображения, помещая данные о новых объектах в свою базу данных и сообщая о них телеграммами и электронными письмами. Конечно, такой телескоп можно использовать и в удалённом, управляемом по Интернету человеком, режиме. Но последнее происходит в исключительных случаях и, как правило, снижает эффективность работы систем. В ряде случаев робот МАСТЕР сам посылает научную телеграмму, и если адресатом является другой робот, то публикация происходит автоматически. Такая работа уже осуществляется телескопами МАСТЕР при детектировании потенциально опасных астероидов, движущихся с большой угловой скоростью, и наблюдениях гамма-всплесков, при которых события меняются за несколько десятков секунд.

Идея [34] создания сети МАСТЕР состояла в том, чтобы установить в Северном и Южном полушариях на

восточных и западных широтах идентичные полностью автоматизированные телескопы-роботы МАСТЕР II [11]. Каждый телескоп МАСТЕР II состоит из двух широкопольных телескопов с диаметром 400 мм и полем зрения 4 кв. град каждый, установленных на одной сверхбыстрой монтировке (скорость наведения  $\approx 20^\circ - 30^\circ$  в секунду) и снабжённых третьей осью, позволяющей сводить и разводить трубы. Последнее приспособление даёт возможность получать в параллельном положении синхронные изображения быстропеременных объектов в разных фильтрах или поляризациях. МАСТЕР II — единственный в мире широкопольный цветной телескоп, позволяющий измерять поляризацию быстропеременных объектов. Параллельное положение труб обычно применяется во время "алертных" наблюдений гамма-всплесков, как правило, в двух поляризациях. В настоящее время сеть МАСТЕР является лидером ранних оптических наблюдений гамма-всплесков [36]. Недавно телескопы МАСТЕР зафиксировали самую раннюю поляризацию оптического излучения гамма-всплесков [37]. Однако большую часть времени телескопы сети МАСТЕР заняты регулярным обзором ночного неба с целью выявления новых объектов, не содержащихся в мировых каталогах и базе данных самого телескопа.

Главным достоинством сети МАСТЕР является уникальное математическое обеспечение, которое даёт возможность автоматически выделять около 10 различных типов астрофизических транзиентов. Это позволяет телескопам МАСТЕР, несмотря на их небольшие размеры, успешно конкурировать с крупнейшими широкопольными телескопами мира (Pan-STARRS (Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System), Catalina, iPTF (intermediate Palomar Transient Factory)) в части обнаружения астрофизических взрывов во Вселенной.

Важнейшей характеристикой сети МАСТЕР является её географическое расположение, которое делает её в настоящее время единственной в мире распределённой по Земному шару системой поисковых широкопольных телескопов. Эти достоинства сети МАСТЕР, которые

прекрасно проявились во время оптических наблюдений первого события LIGO 14 сентября 2015 г., и позволили внести решающий вклад в обзор вероятной области нахождения источника гравитационных волн (области локализации) [5].

Глобальная сеть МАСТЕР в настоящее время включает в себя пять обсерваторий в России и три за рубежом: МАСТЕР-Амур расположен вблизи г. Благовещенска на базе Благовещенского государственного педагогического университета, МАСТЕР-Тунка — в Тункинском астрофизическом центре Научно-исследовательского института прикладной физики Иркутского государственного университета, МАСТЕР-Урал — в Коуровской обсерватории Уральского федерального университета, МАСТЕР-Кисловодск — под Кисловодском на высокогорной солнечной станции Пулковской (Главной) обсерватории РАН, МАСТЕР-Крым — в посёлке Научный на базе МГУ, MASTER-SAAO — в Южно-Африканской обсерватории (ЮАР, Сазерленд), MASTER-IAC — на острове Тенерифе (Испания) в обсерватории Теиде Института астрофизики Канарских островов и MASTER-OAFA — в Андах в Обсерватории Национального университета Сан-Хуана (Аргентина). Все обсерватории оснащены роботизированными камерами сверхширокого поля (по  $16 \times 24$  кв. град с пределом до 11-й звёздной величины за 1 с и пределом до 13,5-й звёздной величины при сложении кадров).

Задача камер сверхширокого поля состоит в постоянной (без пауз) съёмке звёздного неба. При общей площади около 5000 кв. град вероятность случайного попадания гамма-всплеска в поле зрения равна  $1/8$ , что позволяет получать синхронные с моментом вспышки или даже предшествующие ему изображения квадрата ошибок космических вспышек. Фактически это единственный способ наблюдать собственное оптическое излучение коротких гамма-всплесков, малая длительность которых (не более 4 с) не позволяет осуществлять алертные наблюдения, синхронные с гамма-наблюдениями, даже на сверхбыстрых установках сети МАСТЕР.

В последние три года сеть МАСТЕР обнаружила на небе более 1000 новых взрывающихся объектов. Среди них — собственное оптическое излучение гамма-всплесков (самых мощных электромагнитных событий во Вселенной), вспышки сверхновых, в том числе типа Ia, с помощью которых тестируются свойства космической энергии вакуума, новые и карликовые новые звёзды (ядерные взрывы на белых карликах), взрывы квазаров и активных галактических ядер (физическая плазма в поле тяготения сверхмассивных чёрных дыр), потенциально опасные астероиды и кометы, оптические транзиенты неизвестной пока природы, такие как MASTER OT J095310.04+335352.8 (затменная двойная с необычайно большим, около 69 лет, периодом переменности [38]) или аномально яркие красные новые (MASTER OT J004207.99+405501.1/M31LRN 2015) (LRN — Luminous Red Nova в галактике M31), которые являются результатом столкновения обычных звёзд.

#### 4. Наблюдения гравитационно-волнового события GW150914

Начиная с момента получения алерта 16 сентября 2015 г., в соответствии с погодными условиями и условиями ночного времени, телескопами МАСТЕР-Амур, МАСТЕР-

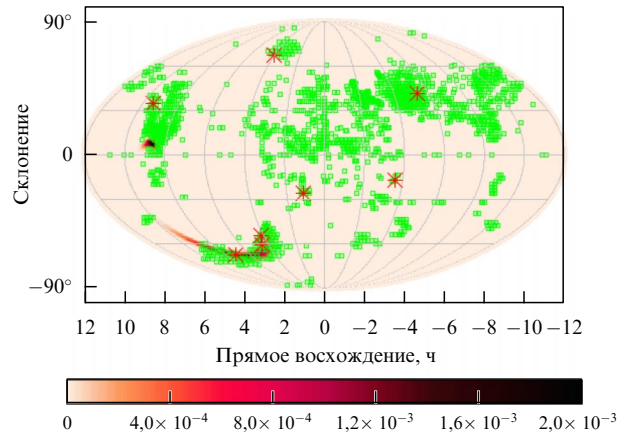


Рис. 3. (В цвете онлайн.) Карта обзора неба после получения алерта (и до его получения, случайная съёмка 15 сентября) GW150914/G184098 сетью МАСТЕР (зелёные квадраты). Оранжевым цветом показана вероятность локализации гравитационно-волнового события. Красными звёздочками показаны транзиенты, найденные сетью МАСТЕР в ходе обзора ([http://master.sai.msu.ru/static/G184098/G184098\\_4.png](http://master.sai.msu.ru/static/G184098/G184098_4.png)).

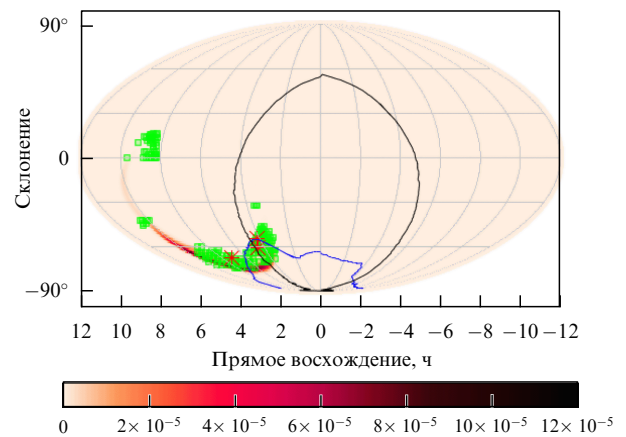


Рис. 4. (В цвете онлайн.) Окончательное распределение вероятностей гравитационно-волнового события LIGO GW150914/G184098 [1]. Показаны область обзора телескопами МАСТЕР (зелёным цветом) и три транзиента, обнаруженные ими (красным цветом). Синим цветом показана 1-сигма-квадратичная ошибка возможного события, зарегистрированного космической обсерваторией "Ферми" [12, 39]. Выделенная чёрным цветом яйцеобразная область — тень Земли в наблюдениях "Ферми".

Тунка, МАСТЕР-Кисловодск, MASTER-SAAO и MASTER-IAC была начата инспекция областей локализации гравитационно-волнового события G184098/GW150914. Всего за неделю была пройдена область площадью около 5000 кв. град, часть которой площадью 560 кв. град, как оказалось в дальнейшем, принадлежала области наиболее вероятной локализации указанного гравитационно-волнового (ГВ) события на Южном небе (рис. 3, 4). Нами было открыто восемь оптических транзиентов, три из которых находились внутри или вблизи окончательной области локализации ГВ-события. Позднее выяснилось, что в ходе стандартного обзора неба за сутки до получения первых координат ГВ-всплеска мы сняли соответствующую ему область площадью 16 кв. град.

Анализ оптических вспышек (транзиентов), найденных телескопами-роботами МАСТЕР, показал, что две

из них являются карликовыми новыми звёздами — объектами нашей Галактики, а объект MASTER OT J040938.68-541316.9 с огромной вероятностью является сверхновой первого типа I, открытой хотя и до достижения максимума блеска, но всё-таки вблизи него. Для достижения максимума блеска сверхновым типа I требуется 8–10 дней, а эта сверхновая была открыта через два дня после гравитационно-волнового триггера. Поэтому мы можем сделать надёжный вывод об отсутствии какой-либо причинно-следственной связи между гравитационно-волновым импульсом и взрывом сверхновой.

Как отмечается в статье Б. Эббота с соавторами [1], Глобальная российская сеть телескопов-роботов МАСТЕР внесла решающий вклад в оптические наблюдения квадрата ошибок первого в истории гравитационно-волнового всплеска.

## 5. Почему первыми были открыты слияния чёрных дыр?

Работа [3] 1997 года носит название "Первые события LIGO: слияния двойных чёрных дыр" ("First LIGO events: binary black holes mergings"). Обнаруженный 14 сентября 2015 г. гравитационно-волновой всплеск явился результатом слияния двух чёрных дыр [1, 40], что находится в соответствии с предсказанием популяционного синтеза, проведённого с помощью Машины сценариев [2–4], и, таким образом, это открытие подтверждает правильность наших представлений об эволюции двойных звёзд.

Как показано в работе Липунова и др. [2], независимо от конкретного сценария эволюции и его параметров первыми событиями на интерферометрах типа LIGO будут слияния с участием чёрных дыр, что наиболее ярко представлено на рис. 1 [2]. Обсудим подробнее метод получения этого результата, тем более что в то время появлялись статьи, в которых утверждалось, что чёрные дыры вообще не должны сливаться и, следовательно, они не могут быть целью первых гравитационно-волновых интерферометров типа LIGO.

Действительно, вычисление частоты событий слияния с участием чёрных дыр — дело очень трудное. Простые аналитические оценки, основанные на наших представлениях о ядерной эволюции звёзд, наталкиваются на огромные неопределённости, связанные с многовариантностью начальных условий и сложной структурой эволюционных треков в двойных системах (см. статью Х. Бете с соавтором [41] на эту тему). Поэтому для анализа различных сценариев эволюции двойных систем и расчёта возможных параметров конечных продуктов эволюции Корниловым и Липуновым был предложен специальный метод популяционного синтеза — численное моделирование большого количества треков двойных систем методом Монте-Карло (Машина сценариев — Scenario Machine) [21, 22].

Уже первые расчёты с использованием Машины сценариев позволили получить статистические свойства различных типов массивных двойных систем, в том числе на конечных стадиях звёздной эволюции с образованием двойных релятивистских систем, которые и являются потенциальными источниками гравитационно-волновых импульсов в момент их слияния. Проведённые расчёты на усовершенствованной Машине сценариев уже в 1987 г. позволили определить частоту слияния нейтронных

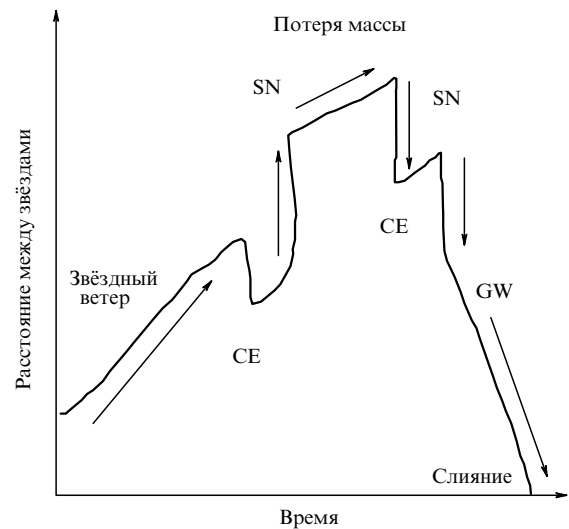


Рис. 5. Качественная картина изменения расстояния между звёздами в двойной системе. Звёздный ветер (потеря массы) увеличивает расстояние между звёздами. Однако асимметричный взрыв сверхновой (SN) и стадия с общей оболочкой (common envelope — CE), возникающая, когда одна из звёзд фактически поглощает другую, приводят к сближению звёзд — слиянию — и возникновению гравитационной волны (gravitational wave — GW).

звёзд в галактике с заданными темпом звездообразования — функцией Солпитера [20, 23]. В 1993 г. были проведены первые расчёты слияния чёрных дыр и показано, что темп их слияния может быть сравнимым с темпом слияния нейтронных звёзд [24]. Однако огромное количество плохо определённых параметров эволюции двойных звёзд не позволило установить, насколько частыми могут быть события на гравитационно-волновых детекторах типа LIGO/Virgo. Наиболее удачная попытка была сделана с помощью Машины сценариев в работах Липунова и др. [2, 6].

Следует подчеркнуть, что, в отличие от других кодов популяционного синтеза, Машина сценариев всегда нацелена на сравнение результатов численного моделирования со всем корпусом наблюдательной информации о релятивистских стадиях двойных звёзд: радиопульсаров в двойных системах с разными типами компаньонов, рентгеновских пульсаров, кандидатов в чёрные дыры, миллисекундных радиопульсаров и т.д. Это позволяло подбирать оптимальные параметры звёздной эволюции таким образом, чтобы наблюдаемое распределение нейтронных звёзд и чёрных дыр не противоречило наблюдениям. Какие это параметры?

Проиллюстрируем их на примере одного из треков Машины сценариев, приводящих к слиянию двух чёрных дыр (рис. 5, 6) [12, 42]. Из формулы (1) Эйнштейна для гравитационно-волновой светимости следует, что скорость потери вращательного момента определяется расстоянием между компонентами и их массами. Следовательно, те процессы, которые изменяют расстояние между звёздами, являются ключевыми для конечного слияния релятивистских звёзд.

Обратимся к рис. 5 и 6. Вначале две массивные звезды образуются как звёзды главной последовательности. В данном случае это две голубые звезды с массами, близкими к верхнему пределу масс образующихся в настоящее время звёзд. Вследствие высокой светимости эти

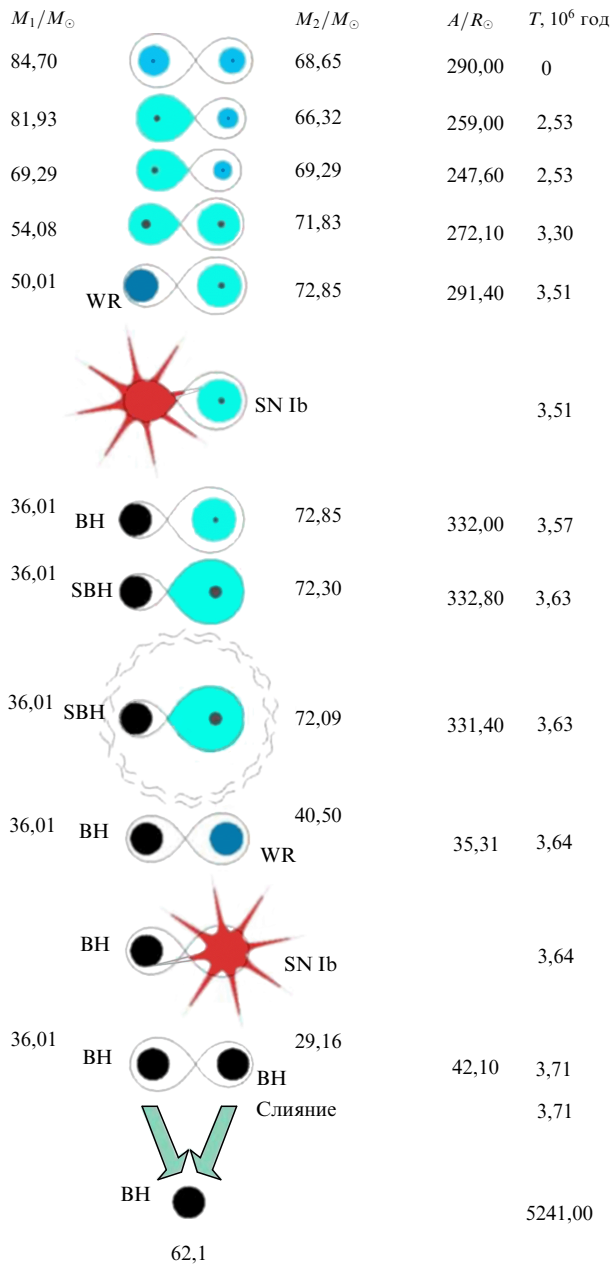


Рис. 6. Один из возможных эволюционных треков, рассчитанный с помощью онлайн-версии Машины сценариев [43]. Две звезды главной последовательности с массами  $M_1$  и  $M_2$  начинают эволюционировать,  $T$  — время начала каждой из стадий,  $A$  — расстояние между звёздами,  $R_\odot$  — радиус Солнца.

звёзды под действием давления света теряют вещество в виде звёздного ветра. При этом звёздный ветер уносит не только массу звезды, но и орбитальный момент, в котором она участвует. Если звёздный ветер достаточно быстрый — а это так в случае массивных голубых звёзд, где его скорость достигает  $1500-2000 \text{ км с}^{-1}$ , — и сферически-симметричный, то двойная система начинает "разъезжаться". Качественно это можно объяснить следующим образом: при изотропном истечении масса звезды уменьшается быстрее, чем момент вращения, и удельный момент возрастает, что возможно только при удалении звёзд друг от друга.

Итак, получается, что звёздный ветер — это враг слияний, поскольку он удаляет звёзды друг от друга и

одновременно уменьшает их массу, которая тоже входит в формулу Эйнштейна. К сожалению, до сих пор не существует самосогласованной теории звёздного ветра, и нам приходится использовать различные основанные на законах сохранения феноменологические формулы, качественно подтверждённые наблюдениями. Например, очень популярной в XX в. была формула, согласно которой импульс, уносимый веществом звёздного ветра, пропорционален импульсу фотонов, излучаемых звездой [43]:

$$\frac{dM_w}{dt} V_w \sim \frac{L}{c},$$

где  $dM_w/dt$  — темп потери массы в виде звёздного ветра,  $V_w$  — скорость звёздного ветра,  $L$  — светимость звезды.

В последней формуле темп звёздного ветра оказывается пропорциональным светимости звезды, делённой на скорость звёздного ветра, которая примерно равна параболической скорости звезды. Эта формула хорошо подтверждается наблюдениями горячих звёзд в нашей Галактике [44], если в ней положить скорость ветра равной трём параболическим скоростям у поверхности звезды. Если эту формулу использовать непосредственно, то оказывается, что массивные звёзды не успевают потерять существенной части своей начальной массы ( $< 10\%$ ) и не могут значительно удалиться друг от друга. После того как первая, первоначально более массивная, звезда покинет главную последовательность и заполнит свою полость Роша, начинаются катастрофические явления в двойной системе.

Прежде всего, если отношение масс компонентов достаточно велико, то вещество с первого компонента не может осесть на второй — велика тепловая инерция. Это, скорее всего, может привести к образованию так называемой общей оболочки, резкому увеличению динамического трения в двойной системе и сближению компонентов. Однако в рассматриваемом варианте этого не происходит, так как массы звёзд примерно одинаковы. Поэтому после сброса оболочки на месте первой звезды остаётся гелиевое ядро (весь водород в центре уже сгорел, и звезда больше не относится к сверхгигантам). Гелиевые звёзды, называемые звёздами Вольфа–Райе (WR), наблюдаются астрономами. Время жизни таких звёзд на порядок меньше, чем у водородных звёзд. Поэтому через несколько сотен тысяч лет, когда в центре оформится углеродно-кислородное ядро, первая звезда начинает коллапсировать, и её оболочка взрывается как сверхновая звезда. В этот момент судьба двойной системы подвергается огромной опасности, так как мгновенный сброс более чем половины массы системы разрушает её. Отсюда появляется очень важный и совсем плохо определяемый параметр  $k_{BH}$  — доля вещества, переходящего в чёрную дыру во время взрыва сверхновой (именно он изменяется вдоль горизонтальной оси на рис. 5). Это параметр нашей задачи.

Есть и другой параметр — взрыв может быть асимметричным, и тогда предположение о половине сброшенной массы не будет выполняться и задача станет ещё более неоднозначной. После образования чёрной дыры формируется система голубого сверхгиганта и чёрной дыры! В нашей Галактике такая система наблюдается — это кандидат в чёрные дыры номер один (хронологически) Лебедь X-1 (Cyg X-1). Далее эволюция зеркально повторяется со второй звездой. Однако в этом случае при

заполнении гигантом своей полости Роша и бурном перетекании со звезды на существенно меньшую по массе чёрную дыру наступает стадия с общей оболочкой! А далее — второй взрыв и образование двойной чёрной дыры. Как видим, эволюция расстояния между звёздами в двойной системе — это борьба двух факторов: сброс вещества удаляет компоненты друг от друга, а образование общей оболочки их сближает, приготавливая систему чёрных дыр к слиянию.

Таким образом, основные параметры системы [6]: функция распределения компонентов по отношению масс  $\varphi(q)$  ( $q = M_2/M_1 < 1$ ), эффективность общей оболочки и мощность звёздного ветра. При этом остаются также более определённые параметры, такие как функция распределения начальной массы Солпитера и распределение двойных систем на главной последовательности по полюсам, которые считаются гораздо лучше известными [45].

Казалось бы, при таком количестве неопределённых совершенно невозможно, хотя бы приближённо, судить о скорости слияния чёрных дыр в нашей и других галактиках. В принципе очевидно, что просто так рассчитать частоту слияния невозможно. Поэтому, кстати, и появлялись работы, в которых чёрные дыры вообще не сливались.

Однако главная идея Машины сценариев состоит в том, что мы пытались не просто вычислить предполагаемые свойства и статистику ненаблюдаемых стадий эволюции двойных звёзд (а ведь стадия слияния чёрных дыр до 14 сентября 2015 г. не наблюдалась!), но и одновременно правильно описать наблюдаемые стадии. Чем больше наблюдаемых стадий вы используете в качестве реперных точек, тем точнее ваши предсказания свойств ненаблюдаемых стадий. Например, в нашей Галактике наблюдается чёрная дыра с голубым сверхгигантом. Следовательно, моделируя галактику, необходимо следить за тем, чтобы на вашем искусственном небе оставался хотя бы один кандидат в чёрную дыру с голубым сверхгигантом<sup>4</sup>. Кроме того, в нашей Галактике наблюдается несколько десятков рентгеновских пульсаров — аккрецирующих нейтронных звёзд в паре с массивными голубыми звёздами — и около 10 радиопулсаров в паре с нейтронными звёздами. Это всё разные стадии одной и той же эволюции — эволюции массивной двойной системы. С другой стороны, представим, что одна из голубых звёзд породила не чёрную дыру, а нейтронную звезду, тогда мы должны наблюдать двойные радиопулсары с чёрными дырами — а их пока не обнаружено. Надо учитывать и этот факт в популяционном синтезе.

Конечно, столь сложный расчёт требовал проведения гигантской астрофизической работы, работ по программированию и выполнению вычислений, но к 1997 г., когда мы провели расчёты чёрных дыр, мы имели 15-летний опыт популяционного синтеза и смогли создать именно такой пакет программ, который позволял одновременно рассчитать эволюцию и нейтронных звёзд, и чёрных дыр, и обычных звёзд. Подчеркнём, что до сих пор за рубежом не создано программы, аналогичной

Машины сценариев по широте охвата популяционного синтеза двойных звёзд. В частности, до сих пор в других программных пакетах не принимается в расчёт вращательная эволюция замагниченных нейтронных звёзд. Отсюда иногда происходят огромные различия в предсказаниях Машины сценариев и других программ популяционного синтеза относительно скорости слияния релятивистских звёзд.

Для того чтобы получить наиболее достоверное предсказание первых событий на гравитационно-волновых интерферометрах, в работе [2] мы рассчитали сценарий со слабым звёздным ветром, варьируя все плохо известные параметры, перечисленные выше. При этом особое внимание мы уделяли тому, чтобы в нашей Галактике была по крайней мере одна двойная система типа Лебедь X-1 и не имелось ни одного пульсара с чёрной дырой на 1000 одиночных радиопулсаров [31, 46]. Напомним, что такие системы не открыты до сих пор, хотя обнаружено уже около 2000 одиночных радиопулсаров.

Очевидно, что первое условие накладывает нижнее ограничение на частоту слияния чёрных дыр, а второе условие ограничивает её сверху. Большая серая область на рис. 1 — это и есть результат расчёта при всех возможных перечисленных параметрах. Таким образом, в сценарии со слабым ветром мы имеем определённый итог: первые события на детекторах типа LIGO/Virgo должны происходить с участием чёрных дыр! В работах [3, 4] мы пришли к тому же результату, но уже в рамках сценария с большой потерей массы в виде звёздного ветра.

Что такое большой (или сильный) звёздный ветер? Мы уже отмечали, что мощность звёздного ветра имеет решающее значение для судьбы двойной системы и возможности слияния продуктов её эволюции. В конце XX в. возникла идея сильного звёздного ветра, рассчитываемого по так называемой энергетической формуле:

$$\frac{1}{2} \frac{dM_w}{dt} V_w^2 = L.$$

Очевидно, что в этом случае звёздный ветер возрастает в  $c/V_w$  раз. Согласно этой формуле звезда с массой порядка  $100M_\odot$  теряет более 90 % массы и может не только не породить чёрную дыру с массой  $(20-30)M_\odot$ , но и вообще породить не чёрную дыру, а всего лишь нейтронную звезду. Конечно, при таком ветре компоненты двойных систем удаляются друг от друга ещё на стадии главной последовательности (горения водорода) и, казалось бы, они уже не сольются. Однако красота метода Машины сценариев заключается в том, что при таком ветре без введения дополнительных условий не только не сольются чёрные дыры, но и с неба исчезнут объекты типа Лебедь X-1 или, например, халс-тейлоровский пульсар, за открытие которого уже вручена Нобелевская премия.

В работе [4] мы провели расчёты в сценарии с сильным ветром и показали, что если мы хотим получить картину, соответствующую наблюдаемой картине релятивистских двойных, то надо ввести некую анизотропию коллапса во время вспышки сверхновой. Оказывается, небольшие скорости отдачи (наподобие той, которую получает пушка при выстреле), порядка  $150-200 \text{ км с}^{-1}$ , разрушают системы двойных нейтронных звёзд и связывают двойные чёрные дыры. Этот эффект очень понравился известному физика XX в. Нобелев-

<sup>4</sup> Конечно, могут возникнуть сомнения: всего одна чёрная дыра — разве это статистика? Но дело в том, что и в соседних галактиках с похожим темпом звездообразования обнаружены системы, состоящие из голубого сверхгиганта и кандидата в чёрные дыры.



скому лауреату Х. Бете. В конце своей долгой плодотворной жизни Бете занялся популяционным синтезом, пытаясь выяснить частоту слияния релятивистских звёзд во Вселенной. И в одной из последних работ Бете написал [41]: "In particular, these authors (Lipunov, Postnov, Prokhorov, 1997 [4]) find that introduction of kick velocities increases their merging rate by an order of magnitude. Portegies Zwart, Yungelson [47] find zero mergers without kick velocities"<sup>5</sup>.

Тем не менее парадокс состоит в том, что во Вселенной гораздо чаще сливаются двойные нейтронные звёзды, чем чёрные дыры. Например, частота слияний нейтронных звёзд в галактике типа нашей составляет одно слияние в 10 тыс. лет (с точностью до множителя 2–3 [20]), а частота слияний чёрных дыр намного меньше — один раз в несколько сотен тысяч лет. Однако на детекторе (см. рис. 1) выигрывают чёрные дыры. Всё дело в том, что детектируемый сигнал — некое смещение плеч интерферометра, пропорциональное амплитуде гравитационной волны  $h$  (безразмерное число), — представляет собой сжимающуюся и растущую гармошку известной формы. Закладывая априорную форму сигнала, мы получаем эффективное увеличение чувствительности во много раз. Но в этом случае величина сигнала будет пропорциональна так называемой щебечушей массе<sup>6</sup>

$$M = \frac{(m_1 m_2)^{3/5}}{(m_1 + m_2)^{1/5}}$$

в степени 5/6. Поскольку амплитуда убывает обратно пропорционально расстоянию до источника, детектируемый объём для чёрных дыр будет пропорционален кубу мощности сигнала, и для чёрных дыр он получается в несколько тысяч раз больше! Именно поэтому "лохнесское чудовище" (см. рис. 1) и возвышается над сливающимися нейтронными звёздами.

## 6. Почему массы чёрных дыр оказались намного больше ожидаемых?

Во многих дискуссиях, прошедших после открытия первого слияния чёрных дыр, активно обсуждалась аномально высокая (по мнению многих) масса этих чёрных дыр — масса каждой из них оказалась равной примерно  $30M_{\odot}$ . Действительно, статистика так называемых кандидатов в чёрные дыры, которые были открыты в последние 30 лет, показывает, что средняя масса чёрных дыр в двойных системах порядка  $(6-7)M_{\odot}$  [48]. Однако сразу отметим, что большинство кандидатов в чёрные дыры, для которых было установлено более или менее корректное значение массы, представляет собой так называемые рентгеновские новые — двойные системы, в которых оптическими компонентами являются карликовые звёзды с массой порядка или

меньше массы Солнца. А такие системы не порождают двойных чёрных дыр и не являются прямыми прародителями событий на детекторе LIGO. Как мы подчёркивали, двойные чёрные дыры — это результат эволюции систем, в которых обоими компонентами являются массивные звёзды, способные рожать чёрные дыры сами по себе. С учётом последнего, по-видимому, надо объяснять не то, почему чёрные дыры GW150914 столь велики, а то, почему чёрные дыры в системах рентгеновских новых сравнительно малы по массе. Ниже мы вернёмся к этому вопросу, но сначала обсудим ещё ряд факторов, обуславливающих сравнительно большую массу первых обнаруженных сливающихся чёрных дыр.

Итак, о чём говорит большая масса события первой гравитационно-волновой вспышки GW150914? Первый очевидный вывод: это событие является результатом эволюции массивной двойной системы со слабым звёздным ветром, который мы использовали в работе [2]. На рисунках 5, 6 мы представили возможный эволюционный трек, который приводит к слиянию двух чёрных дыр с массами  $29M_{\odot}$  и  $36M_{\odot}$ . Этот трек сгенерирован с помощью онлайн-версии Машины сценариев [43].

Как мы отмечали, только благодаря слабости (относительной) звёздного ветра обе чёрные дыры получились достаточно массивными и соответствующими наблюдениям. В принципе до середины 1990-х годов большинство исследователей склонялось к модели звёздного ветра Де Ягера [44], которая основывалась исключительно на наблюдательном материале. Сильный звёздный ветер ввёл в теорию эволюции очень массивных звёзд с начальной массой более  $(40-50)M_{\odot}$  Вусли [49]. Подчёркнём, что энергетический (а не импульсный) звёздный ветер был введён "вручную" и он не был ни рассчитан самосогласованным образом, ни наблюдательно подтверждён. Этот вопрос остаётся дискуссионным, и, скорее всего, вскоре он решится в пользу относительно слабого звёздного ветра.

С другой стороны, известно, что звёзды со слабой металличностью обладают гораздо менее слабыми ветрами. Дело в том, что радиативное давление пропорционально сечению взаимодействия фотонов с атомами и ионами вещества. Это сечение резко возрастает даже при небольшом содержании металлов в атмосфере звезды. Имеются даже полуфеноменологические формулы зависимости темпа потери массы звёздами от степени содержания в них металлов, т.е. содержания металлов в их атмосферах. Такие слабометаллические звёзды должны были рождаться первыми (популяция III) во Вселенной или в карликовых галактиках типа Магеллановых Облаков, где металличность понижена.

Хотя в расчётах, проведённых в работе [2], и не имелся в виду сценарий эволюции двойных звёзд поколения III [50, 51], но они фактически непосредственно применимы и к нему, так как в указанных расчётах звёздный ветер фактически не уносит значительного количества массы прогенитора (progenitor), что характерно для звёзд с низким содержанием тяжёлых элементов.

Кроме того, имеется эффект селекции, обуславливающий высокую вероятность наблюдать события с аномально большой суммарной массой чёрных дыр [12]. Плотность событий с амплитудой  $h$  на детекторе можно получить, рассмотрев шаровой слой радиуса  $r$ . Очевидно, что  $dN(r|h_0) = 4\pi r^2 dN(h_0) dr$ , где  $dN(h_0)$  — число слияний в единице объёма с амплитудой гравитационной

<sup>5</sup> "В частности, эти авторы (Липунов, Постнов, Прохоров [4]) обнаружили, что отдача увеличивает скорость слияния на порядок величины. Портегис Цварт, Янгельсон [47] не обнаружили слияния в отсутствие скорости отдачи".

<sup>6</sup> В англоязычной литературе используется термин "чирпированная масса" (chirp mass), происхождение которого связано с популярной аналогией гравитационно-волнового всплеска шороху Вселенной. Например, частота гравитационных волн во время слияния чёрных дыр является достаточно низкой и только в самом конце слияния может достигать нескольких сотен герц.

волны  $h_0$  на единичном расстоянии. Перейдя к наблюдаемой амплитуде  $h = h_0/r$ , получим

$$dN(h|h_0) = 4\pi dN(h_0) \frac{h_0^3}{h^4} dh.$$

Окончательное распределение относительной вероятности амплитуд гравитационной волны на детекторе найдём после интегрирования по всем  $h_0 = \Gamma M^{5/6}$  (где  $\Gamma$  — фактор, учитывающий расстояние до двойной системы и частоту возникающей гравитационной волны) или по всем чирп-массам:

$$dN(h) = \frac{4\pi}{h^4} \int dN(h_0) h_0^3 dh_0 = \frac{4\pi}{h^4} \frac{5}{3} \Gamma^4 \int dN(M) M^{7/3} dM.$$

Вероятность зарегистрировать событие с амплитудой, большей некоторого порога  $\Pi$ , выражается как

$$P(h > \Pi) \approx \frac{20\pi}{\Pi^3} \Gamma^4 \int dN(M) M^{7/3} dM.$$

Очевидно, что дополнительный вес  $M^{7/3}$  сильно увеличивает вероятность наблюдений событий, связанных именно с большой чирп-массой сливающихся релятивистских объектов.

Смещение медианы ожидаемого распределения в сторону больших масс увеличивается почти в два раза, и слияние чёрных дыр с суммарной массой более  $50M_\odot$  представляется вполне обычным [52].

На рисунке 6 мы приводим в качестве иллюстрации один из возможных треков, сгенерированных в онлайн-версии Машины сценариев. В основу положен сценарий с малым звёздным ветром. Мы считаем, что этот сценарий применим не только к звёздам первого поколения, для которых ветер может быть аномально малым, но и к массивным звёздам, образующимся в настоящее время. Мы видим, что система проходит две вспышки сверхновых и одну стадию с общей оболочкой примерно за 3,7 млн лет. Однако само слияние наступает только через 5 млрд лет.

Есть ещё одно важное обстоятельство, в пользу которого говорят параметры события GW150914. Это достаточная близость между собой масс слившихся чёрных дыр. В свою очередь последнее означает, что начальное отношение масс массивных двойных тоже было близким к единице, что и подтверждается треком. Это служит прекрасным аргументом в пользу функции распределения массивных двойных систем по отношению масс  $q = M_2/M_1 < 1$  с максимумом при единице, которая была предложена в [53] и которую мы использовали в расчётах Машины сценариев как предпочтительную:  $\varphi(q) \sim q^2$ .

Теперь вернёмся к вопросу: почему массы чёрных дыр в маломассивных двойных системах так малы? Дело в том, что при малом начальном отношении масс,  $q = M_2/M_1 \lesssim 100$ , карликовая звезда просто не успевает образоваться (прийти на главную последовательность) и "выпаривается" голубой звездой, превосходящей её по светимости в несколько миллионов раз. Действительно, концентрационная стадия протозвезды продолжается в течение теплового времени:  $t_{\text{th}} \sim 3 \cdot 10^7 (M_2/M_\odot)^2$ .

На этой стадии радиус звезды определяется условием её полной ионизации, зеркально тому, как стадия рекомбинации во Вселенной делает Вселенную прозрачной. Для ионизации всех атомов водорода необходима энергия  $13,6M_2/m_p$  [эВ] (где  $m_p$  — масса про-

тона), эту энергию затрачивает гравитационное поле звезды  $GM_2^2/R_2$ . Приравнявая, получаем радиус протозвезды  $R_2 \sim 150R_\odot (M_2/M_\odot)$ . Теперь вычислим излучаемую голубой массивной звездой энергию, перехватываемую маломассивной протозвездой. Оптически непрозрачная протозвезда будет перехватывать энергию  $L_2 = (1/4)(R_1/a)^2 L_1$ , где  $a$  — расстояние между звёздами. После поглощения и разогрева возникнет испаряющий протозвезду звёздный ветер, минимальная интенсивность которого определяется законом сохранения импульса:  $dM_2/dt \sim (L_2/3)v_p c$  [44], где  $v_p$  — параболическая скорость. Полная потеря массы будет пропорциональна времени жизни голубой массивной звезды  $T_1$ . Полагая полную потерю массы равной массе карлика  $M_2$ , получаем условие испарения маломассивной протозвезды  $a < 450R_\odot (M_2/M_\odot)$ . Отсюда следует, что все эти системы не выживают, а значит, не участвуют в образовании рентгеновских новых. Таким образом, единственным условием выживания красного карлика в двойных системах с голубым сверхгигантом является следующее: ядерное время массивной звезды должно быть больше теплового времени протозвезды карлика, т.е.

$$q_0 = \frac{M_2}{M_1} \gtrsim \frac{1}{17}.$$

Поскольку масса малого компонента  $M_2 \lesssim M_\odot$ , мы получаем, что среди рентгеновских новых не должно быть массивных голубых прогениторов с массой более  $17-20M_\odot$ ! Подчеркнём, что это масса прародителя на главной последовательности. Следовательно, масса чёрной дыры меньше примерно в два раза, т.е. совпадает со средней массой рентгеновских новых.

Таким образом, малая средняя масса чёрных дыр, которая наблюдалась ранее, связана с тем, что массивные прогениторы испаряют своих компаньонов, тем самым разрушая двойные системы, и выпадают из статистики. Вместе с тем относительно большая масса события GW150914 вполне укладывается в расчётные параметры сценария эволюции массивных звёзд со слабым звёздным ветром с учётом эффектов селекции, вызванной увеличением горизонта обнаружимости слияний с возрастанием общей массы двойной системы.

## 7. Гамма-событие обсерватории "Ферми"

В программе электромагнитной поддержки гравитационно-волнового эксперимента LIGO приняли участие также все рентгеновские и гамма-обсерватории, в том числе российско-американский эксперимент Konus-Wind (Interplanetary Network), INTEGRAL (International Gamma-ray Astrophysics Laboratory), Swift-BAT (Burst Alert Telescope) и Swift-XRT (X-ray Telescope), гамма-обсерватория "Ферми", японский эксперимент MAXI (Monitor of All-sky X-ray Image) [1]. Однако только обсерватория "Ферми" сообщила об открытии слабого короткого (длительностью менее 1 с) гамма-всплеска через 0,4 с после гравитационно-волнового триггера на детекторе GBM (Gamma Burst Monitor) [39]. Всплеск, имевший энергию  $\sim 3 \times 10^{-7}$  эрг, был обнаружен постфактум в архивной записи гамма-фона после получения алерта G184098.

На рисунке 4 можно увидеть область локализации события "Ферми". Общая область пересечения квадрата ошибок LIGO и "Ферми" покрыта наблюдениями те-

телескопа MASTER-SAAO, расположенного в ЮАР, на 90 %. Эта область находилась только телескопом МАСТЕР, и мы не нашли никаких следов оптического излучения, которое могло бы быть связано с гравитационно-волновым событием GW150914/G184098, ярче 19-й звёздной величины [12]. Мы не будем здесь обсуждать реальность события "Ферми".

Однако обсудим возможную связь гамма-всплеска со слиянием чёрных дыр. Как мы отмечали, излучение стандартных гамма-всплесков сильно анизотропно и вероятность одновременной регистрации гравитационных волн и гамма-всплесков много меньше 1/100. Кроме того, энергия гамма-всплеска, если его отнести на расстояние события GW150914, составит  $E_{\text{Ферми}} \sim 2 \times 10^{49}$  эрг  $\text{с}^{-1}$ , что намного меньше типичных значений для изотропной энергии гамма-всплесков. Таким образом, эту гипотезу, активно обсуждаемую в статье [54], следует отвергнуть.

Согласно общей теории относительности электромагнитное излучение при слиянии двух незаряженных чёрных дыр могло возникнуть только как результат наличия дополнительного вещества в двойной системе чёрных дыр или в их ближайшей окрестности. Например, Липунов и Сажин [55] в 1984 г. отметили, что мощная электромагнитная вспышка могла бы возникнуть при слиянии двух окружённых плотным звёздным скоплением сверхмассивных чёрных дыр, которые присутствуют почти во всех ядрах галактик. Очевидно, что к случаю GW150914/G184098 это неприменимо. Однако какое-то вещество вокруг чёрных дыр могло бы накопиться в результате аккреции межзвёздного газа на стадии, предшествующей слиянию. Если принять типичный коэффициент выделения энергии вблизи аккрецирующих чёрных дыр  $\sim 10\%$  [54], то требуемая масса окажется порядка  $\Delta M \sim 10^{-3} M_{\odot}$ , что близко к массе Юпитера. Кажется, это совсем немного, однако если мы учтём задержку  $\Delta t \sim 0,4$  с, что соответствует расстоянию  $10^{10}$  см, то плотность плазмы вблизи чёрных дыр должна быть порядка плотности воды:  $\rho \sim \Delta M / (c\Delta t)^3 \sim 1$  г  $\text{см}^{-3}$ . Это реальная плотность Юпитера! Однако представить себе такое кольцо или планету в системе двух голубых сверхгигантов невозможно. Какое-то вещество могло быть захвачено на стадии, на которой характерное расстояние между чёрными дырами было много меньше  $c\Delta t \sim 10^{10}$  см. Вследствие непрерывного излучения гравитационных волн длительность этой стадии не может превышать величину

$$t \sim \frac{I\Omega^2}{2L} \sim \left( \frac{A}{10^{10} \text{ см}} \right)^4 / \left( \frac{M}{60M_{\odot}} \right)^3 \times 1 \text{ год}.$$

Максимальная масса, которая могла бы накопиться за 1 год,  $\Delta M \sim (dM/dt) \times 1$  год, а скорость аккреции можно оценить по формуле Бонди – Хойла (см. [42]):

$$\frac{dM}{dt} = \frac{\pi(2GM)^2}{v^3} \rho \sim 10^{-12} M_{\odot} \text{ год}^{-1} \times \left( \frac{M}{60M_{\odot}} \right)^2 \frac{\rho}{10^{-24} \text{ г см}^{-3}} \left( \frac{V}{10 \text{ км с}^{-1}} \right)^{-3}.$$

Здесь  $M$  — суммарная масса чёрных дыр,  $V$  — скорость движения чёрных дыр относительно межзвёздной среды в хозяйской галактике,  $\rho$  — плотность межзвёздной среды.

Очевидно, что невозможно накопить массу, равную  $10^{-3} M_{\odot}$ , за один год. Таким образом, следует признать, что событие, обнаруженное обсерваторией "Ферми", никак не связано с событием LIGO GW150914.

## 8. Заключение

Прорыв человека к гравитационно-волновому каналу информации можно сравнить лишь с открытием Галилея, когда он впервые направил телескоп на звёздное небо. Несомненно, в ближайшее время гравитационно-волновая астрономия станет статистически обоснованной наукой. Мы сможем детально исследовать самые мощные процессы в нашей Вселенной, протекающие при слиянии релятивистских звёзд. Однако есть и более фундаментальные задачи. Ещё в 1970-е годы советский астрофизик Л.П. Гришук [56] показал, что Вселенную наполняют реликтовые гравитационные волны, возникшие в самом начале её рождения. Регистрация этих волн позволила бы понять, как образовалось наше пространство-время. Вообще говоря, с надеждой обнаружить космологический фон строятся современные интерферометры и планируются будущие. Но возникает вопрос: не поблекнут ли космологические гравитационные волны на фоне "современного" излучения, рождённого в нашей и других галактиках?

Примерно половина всех звёзд Вселенной — двойные. Вселенная кишит гравитационными волнами, а Земля буквально купается в этом гравитационно-волновом море. В 1965 г. советский астроном В.Н. Мионовский [57] впервые попытался определить, на каких частотах сильнее всего "штормит". Оказалось, что максимальная амплитуда создаётся самыми тесными нормальными звёздами типа звезды W Большой Медведицы. Эти звёзды с периодом в несколько часов находятся так близко друг к другу, что соприкасаются своими поверхностями, и все вместе создают волнение с безразмерной амплитудой гравитационной волны  $h \sim 10^{-20}$ . Отсюда следует, что двойные звёзды могут создать проблемы для обнаружения космологического фона.

Возникла задача рассчитать полный спектр излучения двойных звёзд Вселенной. Такой расчёт был проведён в 1986 г. советскими астрофизиками [58]. Оказалось, что главный вклад вносят двойные звёзды нашей Галактики. При этом они перекрывают космологический фон в широком диапазоне частот — от  $10^{-5}$  Гц до нескольких герц. Однако наша Галактика — плоская, и на гравитационно-волновом небе она выглядит примерно так же, как и на электромагнитном небе, — в виде своеобразного гравитационно-волнового Млечного Пути.

Вдали от плоскости галактики главный сигнал будут давать двойные звёзды далёких галактик, распределённые по небу достаточно равномерно. Тем не менее на краях спектра есть "окна", в которые можно увидеть реликтовый фон. И это даёт надежду на то, что мы когда-нибудь узнаем, как родилась наша Вселенная.

Для детектирования таких низкочастотных волн необходимы интерферометры с гигантской базой, которые надо строить в космическом пространстве. В проекте LISA (Laser Interferometer Space Antenna) предполагается запустить в Солнечную систему несколько космических аппаратов, которые образуют гигантский лазерный интерферометр с плечом в несколько миллионов километров.

Возможно, тогда мы узнаем, как появилась наша Вселенная.

**Благодарности.** Автор хотел бы выразить благодарность Кипу Торну и вспомнить добрым словом Леонида Петровича Грищука, предсказавшего космологический гравитационный волновой фон (см. [56]) и не дожившего всего нескольких лет до открытия гравитационных волн. С подачи этих людей мы провели расчёты, о которых шла речь в статье.

## Список литературы

- Abbott B P et al. (LIGO Scientific Collab., Virgo Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **116** 061102 (2016)
- Липунов В М, Постнов К А, Прохоров М Е *Письма в Астрон. журн.* **23** 563 (1997); Lipunov V M, Postnov K A, Prokhorov M E *Astron. Lett.* **23** 492 (1997)
- Lipunov V M, Postnov K A, Prokhorov M E *New Astron.* **2** 43 (1997)
- Lipunov V M, Postnov K A, Prokhorov M E *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **288** 245 (1997)
- Abbott B P et al. *Astrophys. J. Lett.* **826** L13 (2016)
- Lipunov V, Postnov K, Prokhorov M *The Scenario Machine: Binary Star Population Synthesis* (Ed. R A Sunyaev) (Amsterdam: Harwood Acad. Publ., 1996)
- Герштейн М Е, Пустовойт В И *ЖЭТФ* **43** 605 (1962); Gertsenshtein M E, Pustovoit V I *Sov. Phys. JETP* **16** 433 (1963)
- Брагинский В Б *УФН* **86** 433 (1965); Braginskii V B *Sov. Phys. Usp.* **8** 513 (1966)
- Брагинский В Б *УФН* **100** 723 (1970); Braginskii V B *Sov. Phys. Usp.* **13** 303 (1970)
- Брагинский В Б *УФН* **170** 743 (2000); Braginskii V B *Phys. Usp.* **43** 691 (2000)
- Lipunov V et al. *Adv. Astron.* **2010** 349171 (2010)
- Lipunov V M et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* (2016), in press; arXiv:1605.01607
- Зельдович Я Б *ДАН СССР* **155** 67 (1964); Zel'dovich Ya B *Sov. Phys. Dokl.* **9** 195 (1964)
- Тутуков А В, Юнгельсон Л Р *Научные информации Астросовета АН СССР* (27) 70 (1973)
- van den Heuvel E P J, Heise J *Nature Phys. Sci.* **239** 67 (1972)
- Clark J P A, van den Heuvel E P J, Sutantyo W *Astron. Astrophys.* **72** 120 (1979)
- Hulse R A, Taylor J H *Astrophys. J.* **195** L51 (1975)
- Einstein A *Sitzungsber. Königl. Preuß. Akad. Wiss.* 688 (1916)
- Lipunov V M, Nazin S N, in *Frontier Objects in Astrophysics and Particle Physics, Vulcano Workshop 1992, 18–23 May, 1992, Vulcano, Italy* (Conf. Proc. Italian Physical Society, Vol. 40, Ed. F Giovannelli, G Mannocchi) (Bologna: Italian Physical Society, 1993) p. 243
- Lipunov V M, Postnov K A, Prokhorov M E *Astrophys. Space Sci.* **252** 401 (1997)
- Корнилов В Г, Липунов В М *Астрон. журн.* **60** 284 (1983); Kornilov V G, Lipunov V M *Sov. Astron.* **27** 163 (1983)
- Корнилов В Г, Липунов В М *Астрон. журн.* **60** 574 (1983); Kornilov V G, Lipunov V M *Sov. Astron.* **27** 334 (1983)
- Липунов В М, Постнов К А *Астрон. журн.* **64** 438 (1983); Lipunov V, Postnov K *Sov. Astron.* **31** 228 (1987)
- Tutukov A V, Yungelson L R *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **260** 675 (1993)
- Блинников С И и др. *Письма в Астрон. журн.* **10** 422 (1984); Blinnikov S I et al. *Sov. Astron. Lett.* **10** 177 (1984)
- Lipunov V M, Panchenko I E *Astron. Astrophys.* **312** 937 (1996)
- Li L-X, Paczyński B *Astrophys. J.* **507** L59 (1998)
- Lipunova G V, Lipunov V M *Astron. Astrophys.* **329** L29 (1998)
- Eichler D et al. *Nature* **340** 126 (1989)
- Narayan R, Paczyński B, Piran T *Astrophys. J.* **395** L83 (1992)
- Липунов В М и др. *Астрофизика* **48** 463 (2005); Lipunov V M et al. *Astrophysics* **48** 389 (2005)
- Kornilov V G et al. *Exp. Astron.* **33** 173 (2012)
- Gorbovskey E S et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **421** 1874 (2012)
- Lipunov V M et al. *Astron. Nachr.* **325** 580 (2004)
- Singer L, GRB Coordinates Network Circular No. 18330 (2015)
- Lipunov V M et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **455** 712 (2016)
- Gorbovskey E S et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **455** 3312 (2016)
- Lipunov V et al. *Astron. Astrophys.* **588** A90 (2016); arXiv:1602.06010
- Connaughton V et al. *Astrophys. J.* **826** L6 (2016); arXiv:1602.03920
- Singer L et al., "LVC trigger G184098 alert 2016", GRB Coordinates Network Circular No. 18388
- Bethe H A, Brown G E *Astrophys. J.* **517** 318 (1999)
- Липунов В М *Астрофизика нейтронных звезд* (М.: Нука, 1987); Пер. на англ. яз.: Lipunov V M *Astrophysics of Neutron Stars* (Berlin: Springer-Verlag, 1992)
- Nazin S N et al. *Gravit. Cosmol.* **4** (Suppl.) 150 (1998); Scenario Machine. 4.0beta, <http://xray.sai.msu.ru/sciwork/scenario.html>
- de Jager C *The Brightest Stars* (Dordrecht: D. Reidel, 1980)
- Тутуков А В, Масевич А Г *УФН* **132** 390 (1980); Tutukov A V, Masevich A G *Sov. Phys. Usp.* **23** 706 (1980)
- Lipunov V M et al. *Astrophys. J. Lett.* **423** L121 (1994)
- Portegies Zwart S F, Yungelson L R *Astron. Astrophys.* **332** 173 (1998)
- Черепашук А М *УФН* **186** 1001 (2016); Cherepashchuk A M *Phys. Usp.* **59** (9) (2016) DOI:10.3367/UFNe.2016.03.037819
- Woosley S E, Langer N, Weaver T A *Astrophys. J.* **411** 823 (1993)
- Kinugawa T et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **442** 2963 (2014)
- Belczynski K et al. *Astrophys. J.* **819** 108 (2016); arXiv:1510.04615
- Phinney E S *Astrophys. J. Lett.* **380** L17 (1991)
- Тутуков А В и др. *Письма в Астрон. журн.* **11** 123 (1985); Tutukov A V et al. *Sov. Astron. Lett.* **11** 52 (1985)
- Loeb A *Astrophys. J.* **819** L21 (2016)
- Липунов В М, Сажин М В *Письма в Астрон. журн.* **8** 649 (1982); Lipunov V M, Sazhin M V *Sov. Astron. Lett.* **8** 350 (1982)
- Грищук Л П и др. *УФН* **171** 3 (2001); Grishchuk L P et al. *Phys. Usp.* **44** 1 (2001)
- Мироновский В Н *Астрон. журн.* **42** 977 (1965); Mironovskii V N *Sov. Astron.* **9** 752 (1965)
- Lipunov V M, Postnov K A, Prokhorov M E *Astron. Astrophys.* **176** L1 (1987)

## Astrophysical sense of the discovery of gravitational waves

V.M. Lipunov

Lomonosov Moscow State University, Sternberg Astronomical Institute, Universitetskii prosp. 13, 119991 Moscow, Russian Federation;  
Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Leninskie gory 1, str. 2, 119991 Moscow, Russian Federation  
E-mail: lipunov@sai.msu.ru

The discovery of gravitational waves by the international collaboration LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory)/Virgo on the one hand is a triumphant confirmation of the general theory of relativity, and on the other it confirms the general fundamental ideas on the nuclear evolution of the Universe baryon matter in binary stars. LIGO/Virgo may turn out to be the first experiment in the history of physics to detect two physical entities, gravitational waves and black holes.

**Keywords:** gravitational waves, black holes, GW150914, Scenario Machine, robotic observatories, telescope robot MASTER

PACS numbers: **04.30** – w, 95.85.Sz, **97.80** – d

Bibliography — 58 references

*Uspekhi Fizicheskikh Nauk* **186** (9) 1011–1022 (2016)

DOI: 10.3367/UFNr.2016.03.037759

Received 2 March 2016

*Physics – Uspekhi* **59** (9) (2016)

DOI: 10.3367/UFNe.2016.03.037759