

Гравитационные волны и черные дыры

А.М. ЧЕРЕПАЩУК,
академик
ГАИШ МГУ

Многолетние усилия ученых по поиску и детектированию гравитационных волн увенчались открытием огромного научного значения. 14 сентября 2015 г. на американской гравитацион-



но-волновой обсерватории LIGO был зарегистрирован гравитационно-волновой всплеск от слияния двух черных дыр. С этого момента начался новый этап в исследованиях этих объектов.

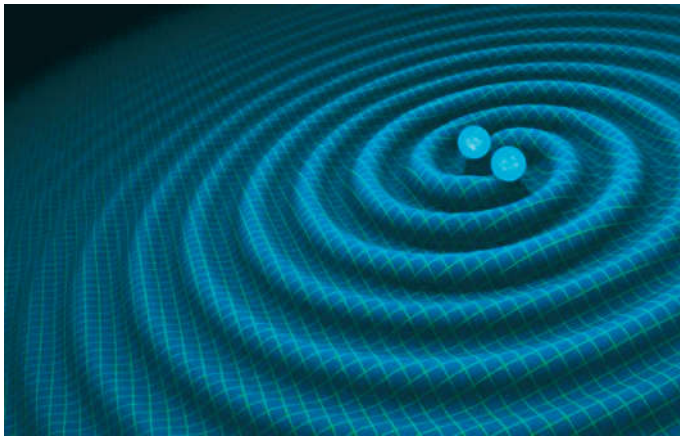
ЧТО ТАКОЕ
ГРАВИТАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ?

Появившаяся с развитием технологий возможность работы астрономических телескопов за пределами земной атмосферы, начавшаяся после запуска 4 октября 1957 г. в СССР первого искусственного спутника Земли, позволила освоить новые диапазоны спектра электромагнитного излучения (гамма-диапазон, рентгеновский, ультрафиолетовый, инфракрасный и радиоди-

апазоны; Земля и Вселенная, 1973, № 1; 1993, № 2; 2007, № 6; 2009, № 2; 2012, № 5; 1976, № 5; 1965, № 3; 2014, №№ 4, 5; 2009, № 6; 2014, № 1; 1977, №№ 4, 5; 1994, № 1; 2008, № 4; 2005, № 3). Это привело к новым открытиям в астрономии, в частности, к открытию черных дыр в рентгеновских двойных системах.

Однако не только электромагнитное излучение несет информацию о природе небесных тел. Например, наблюдения потоков нейтрино разных

энергий от Солнца после открытия нейтринных осцилляций позволили окончательно доказать термоядерную природу выделения энергии в его недрах. К настоящему времени нейтринная астрономия активно развивается (Земля и Вселенная, 1979, № 1; 2011, № 1). Планируется продолжать наблюдение не только солнечных, но и высокоэнергичных нейтрино от вспышек сверхновых звезд, а также и процессов, происходящих в ядрах галактик.



Условная картина распространения гравитационных волн от вращающейся двойной звездной системы.

Ученые потратили много времени и сил на то, чтобы освоить принципиально новый канал информации о Вселенной, основанный на регистрации гравитационных волн (возмущения гравитационного поля, имеющие характер волн, распространяющихся в вакууме со скоростью света; Земля и Вселенная, 1981, № 6). Они излучаются телами (массами), движущимися с переменным ускорением, и имеют характер поперечных волн с двумя независимыми компонентами, которые определяют два состояния поляризации волны. Гравитационные волны переносят энергию и импульс. Воздействуя на тела, они вызывают относительные смещения их частей – деформацию, на этом явлении основаны методы их поиска. Из-за относительной малости гравитационной постоянной гравитационные волны очень трудно обнаружить.

Эти волны были предсказаны Альбертом Эйнштейном в 1916 г., сразу после создания им Общей теории относительности (ОТО), в которой гравитация описывается как проявление кривизны пространства-времени (Земля и Вселенная, 2010, № 1, с. 57; 2014, № 4, с. 110).

В 1962 г. была впервые опубликована идея российских ученых М.Е. Герценштейна и В.И. Пустовойта об использовании лазерного интерферометра для регистрации гравитационных волн. В 1992 г. международная Лазерно-интерферометрическая гравитационно-волновая колаборация LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) начала работы по созданию детектора гравитационных волн с беспрецедентной чувствительностью. Инициаторами создания обсерватории LIGO были американские ученые Кип Торн, Рональд Драйвер и Рай-

нер Вайсс. В LIGO работает более 1000 человек из 15 стран, из них 8 – сотрудники физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. Группу российских специалистов возглавляет член-корреспондент РАН В.Б. Брагинский. В нее входят ученые из Института прикладной физики РАН (Нижний Новгород), руководитель – член-корреспондент РАН Е.А. Хазанов.

В 2015 г. (то есть почти четверть века спустя после начала работ) тяжелые и многоэтапные работы по созданию LIGO были завершены и увенчались открытием гравитационно-волнового сигнала от слияния черных дыр в двойной системе (Земля и Вселенная, 2016, № 3, с. 36). Это открытие ознаменовало новый этап в исследованиях черных дыр во Вселенной.

ОТКРЫТИЕ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН

Обсерватория LIGO состоит из двух гравитационно-волновых антенн, расположенных на территории США и разнесенных на расстояние примерно 3 тыс. км друг от друга. Одна антенна (H1) создана в Хэнфорде (штат Вашингтон), другая (L1) – в Ливингстоне (штат Луизиана). Усилиями международного научного сообщества удалось решить сложнейшую и высокотехнологичную задачу – создать два детектора гравитационных волн H1 и L1, которые могут измерять смещения пробных тел – зеркал интерферометра весом 40 кг с точностью 10^{-19} м, что на четыре порядка меньше размеров атомного ядра. Каждая из гравитационно-волновых антенн (Земля и Вселенная, 1973, № 4) представляет собой два лазерных интерферометра, размещенных в вакуумных трубах диаметром 1,5 м и длиной 4 км, расположенных перпендикулярно друг к другу.

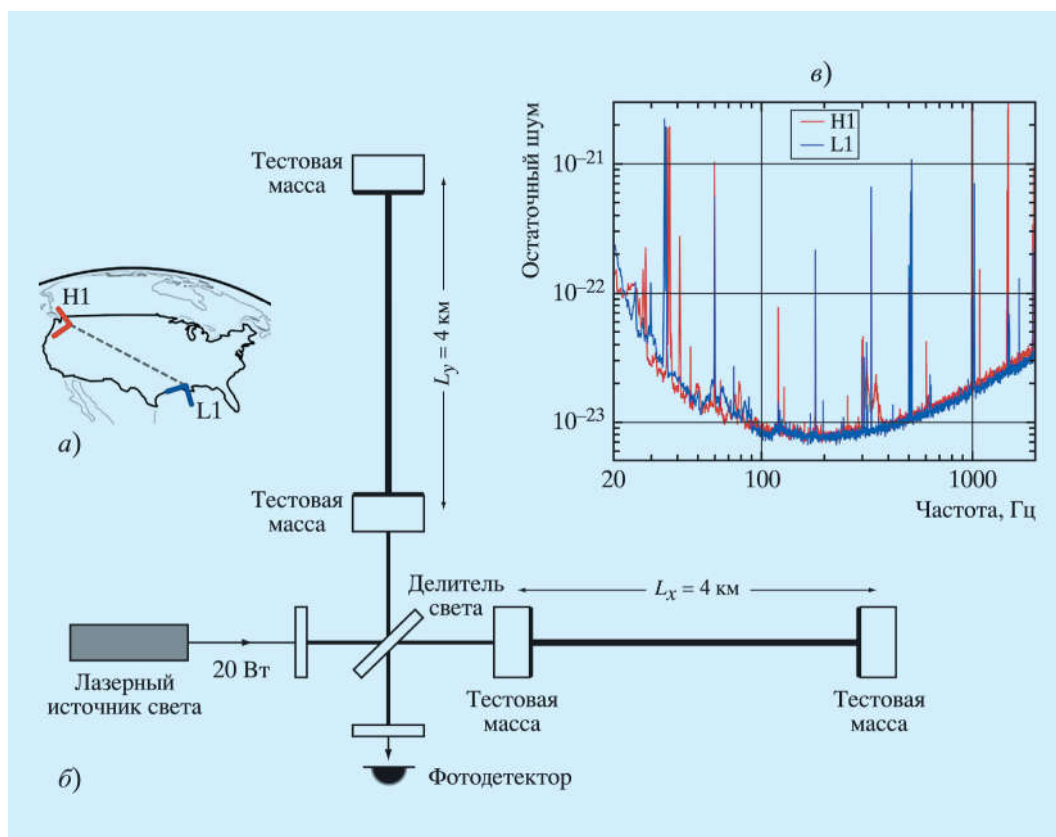
За счет применения специальной многоступенчатой системы демпфирования зеркал сейсмические возмущения подавляются на 10 порядков. Зеркала интерферометра имеют очень большую точность поверхности и чрезвычайно высокий коэффициент отражения, так что

лазерный луч испытывает около 300 отражений от зеркал без существенного уменьшения интенсивности. Итоговая длина интерферометра составляет не 4 км, а $4 \times 300 = 1200$ км, что и обуславливает огромную чувствительность результирующей интерференционной картины к ничтожно малым смещениям зеркал. Приход гравитационной волны вызывает относительные смещения зеркал, они регистрируются по изменению интерференционной картины.

В 2002 г. начались наблюдения на гравитационно-волновой обсерватории LIGO. На достигнутом тогда уровне чувствительности авторам не удалось обнаружить гравитационно-волновые сигналы из космоса. С 2010 г. начались работы по усовершенствованию обсерватории LIGO и повышению ее чувствительности. В 2015 г. ученые стали выполнять исследование гравитационных волн на усовершенствованной обсерватории LIGO – Advanced LIGO. 14 сентября 2015 г. на обеих антеннах (H1 и L1) был зарегистрирован гравитационно-волновой сигнал продолжительностью около полусекунды, который получил обозначение LIGO GW150914. Сигнал представляет собой квазисинусоидальные колебания с увеличивающейся частотой,

изменяющейся от 35 до 150 Гц в течение двух десятых секунды, и нарастающей амплитудой с последующим резким затуханием. Наблюдаемый гравитационно-волновой сигнал хорошо описывается теоретической функцией («кривой блеска»), рассчитанной в рамках ОТО А. Эйнштейна для модели слияния черных дыр (Земля и Вселенная, 1975, № 6; 1976, № 4; 1992, № 3; 1999, № 3; 2010, № 3) в двойной системе.

Соответствующие начальные массы ЧД составляют $36_{-4}^{+5} M_{\odot}$ и $29_{-4}^{+4} M_{\odot}$. При этом энергия, соответствующая трем массам Солнца, излучилась в виде гравитационных волн. Результирующая масса ЧД после слияния равна $62_{-4}^{+4} M_{\odot}$; при этом $3_{+0,5}^{-0,5} M_{\odot}$ излучилась в виде гравитационных волн. Источник гравитационных волн расположен на расстоянии 410_{-180}^{+160} Мпк от Земли, что соответствует $1.34 \cdot 10^9$ св. лет; соответствующее красное смещение равно $z = 0,09_{-0,04}^{+0,03}$. Гравитационно-волновой сигнал пришел сначала на антенну L1 и затем, на $6,9_{-0,4}^{+0,5}$ мс позднее, был зарегистрирован на антенне H1. Это позволило авторам открытия заключить (предполагая, что сигнал распространяется со скоростью света), что гравитационно-волновой сигнал пришел из области, располо-



женной на южной небесной полусфере.

Научное значение этого открытия огромно. Фактически открыт новый канал информации, который (наряду с электромагнитным и нейтринным каналами) позволяет наблюдать различные катастрофические процессы, происходящие во Вселенной – такие, как слияние белых карликов, нейтронных звезд (Земля и Вселенная, 1992, № 3) и черных дыр в двойных системах, взрывы сверхновых звезд, а также, возможно, неизвестные пока явления, например, связанные с космически-

ми струнами, доменными стенками, кротовыми норами, белыми дырами (Земля и Вселенная, 2013, № 2).

Дальнейшее повышение чувствительности гравитационно-волновых детекторов, а также создание космических гравитационно-волновых обсерваторий позволит наблюдать также различные фоновые излучения гравитационных волн, в том числе фон очень длинных гравитационных волн ($\lambda \geq 1$ Мпк), образующихся на переходных стадиях расширения Вселенной.

Принципиальная схема гравитационно-волновой обсерватории LIGO. а) расположение гравитационно-волновых антенн H1 и L1 на территории США; б) оптическая схема лазерной гравитационно-волновой антенны LIGO; в) график чувствительности антенн H1 и L1 как функции частоты принимаемого сигнала.

Сверхдлинные гравитационные волны могли формироваться, например, в конце инфляционной стадии развития Вселенной – когда ее возраст составлял около 10^{-36} с, в эпоху распада скалярного поля и обра-

зования частиц материи. Такое фоновое гравитационное излучение было предсказано в 1974 г. в ГАИШ МГУ профессором Л.П. Грищуком, который рассмотрел параметрический механизм усиления гравитационных волн в расширяющейся Вселенной.

С открытием гравитационных волн встает на прочный наблюдательный базис новая наука – геометродинамика, которая начала развиваться в начале 1960-х гг. в работах Дж.А. Уилера, К.С. Торна, В.Л. Гинзбурга, Я.Б. Зельдовича,

Вид гравитационно-волновой обсерватории с высоты «птичьего полета».

И.Д. Новикова и других ученых. Геометродинамика – это наука, изучающая нелинейную динамику пустого, сильно искривленного пространства-времени. Гравитационно-волновая астрономия дает нам принципиально новую возможность исследовать не только различные материальные тела – такие, как звезды, галактики, но и пустое пространство-время, которое можно теперь рассматривать как один из видов материи, свойства которой можно исследовать с помощью гравитационно-волновых телескопов.

Особенно ярко раскрываются удивительные свойства пространства-времени при взаимодействии таких

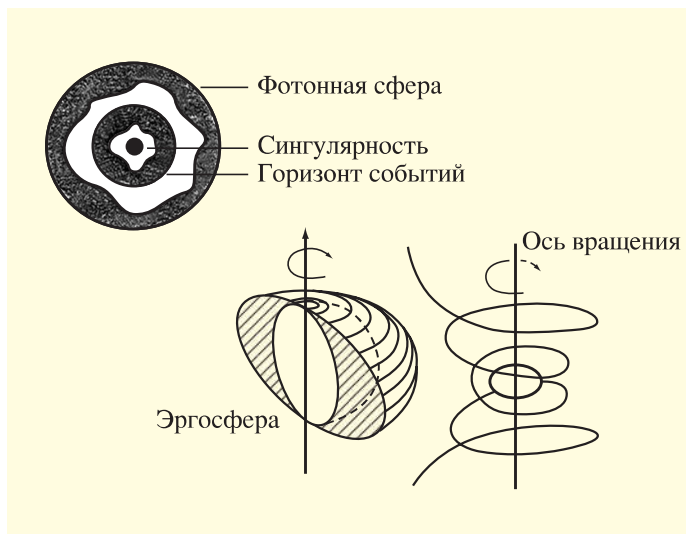
экстремальных объектов, как черные дыры.

УНИКАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ЧЕРНЫХ ДЫР

Черные дыры образуются при коллапсах (сжатии) массивных тел. По современным представлениям, с учетом эффектов ОТО, если масса ядра звезды, затронутого термоядерными реакциями, превышает $3 M_{\odot}$, то при коллапсе ядра образуется ЧД. Если же масса ядра звезды менее $3 M_{\odot}$, то в конце эволюции звезды образуется нейтронная звезда или белый карлик (Земля и Вселенная, 1992, № 3).

Под черной дырой понимается объект (точнее, область пространства-времени), гравита-





Схематическое изображение черных дыр: шварцшильдовской (невращающейся) и вращающейся. Внутри фотонной сферы лучи света движутся по замкнутым траекториям. Внутри эргосферы луч света завихряет свою траекторию.

сионное поле которого настолько сильно, что никакой сигнал (даже свет) не может вырваться из него на пространственную бесконечность; то есть вторая космическая скорость для ЧД равна скорости света в вакууме. Физической границей ЧД является горизонт событий — световая поверхность в пространстве-времени, на которой, с точки зрения далекого наблюдателя, ход времени останавливается.

В центре ЧД находится сингулярность с формально бесконечной плотностью, куда материя сколлапсировала (в сопутствующей системе отсчета), образовав ЧД. В сингулярности царят пока неизвестные нам законы квантовой гравитации, там отсутствуют классические пространство и время. Однако, поскольку сингулярность

расположена в будущем по отношению к горизонту событий, неизвестность законов квантовой гравитации не мешает исследователям описывать горизонт событий и основную часть внутренней ЧД с помощью классической ОТО.

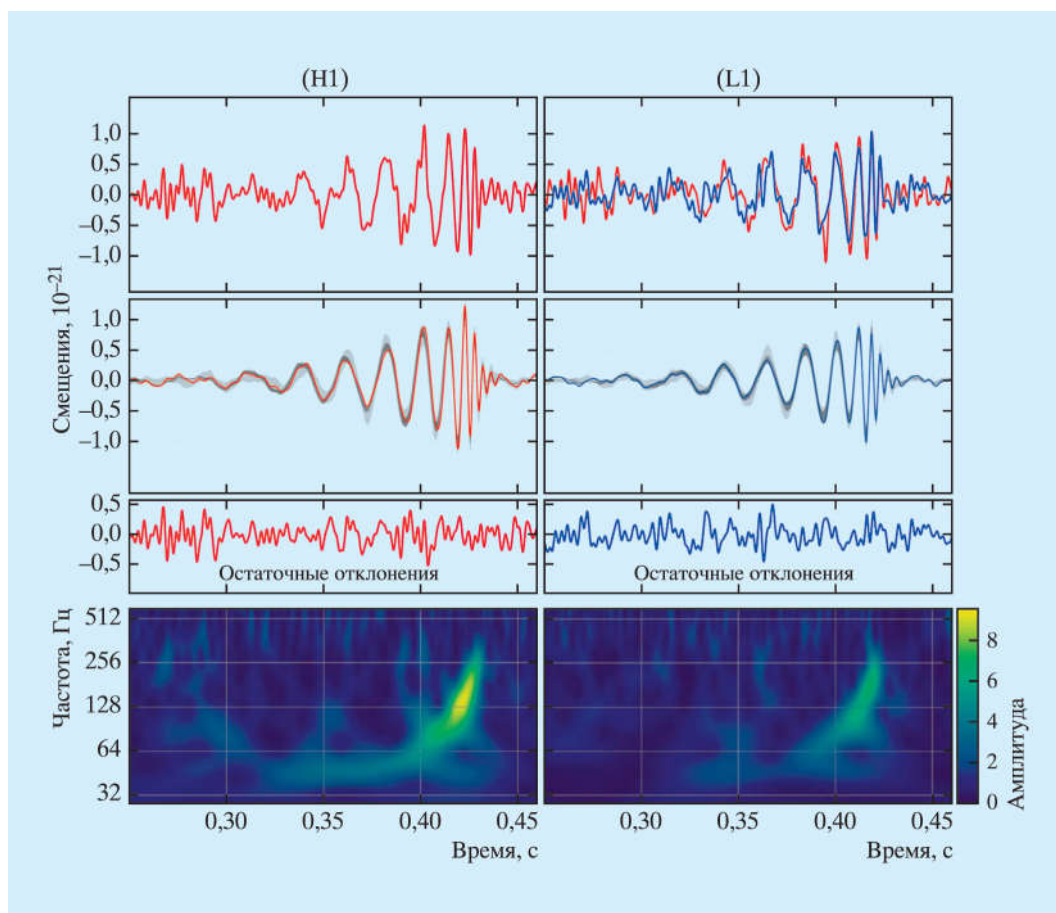
Характерный размер ЧД задается гравитационным (шварцшильдовским) радиусом

$$r_g = \frac{2GM}{c^2},$$

где M — масса тела, G — гравитационная постоянная, c — скорость света. Величина шварцшильдовского радиуса $r_g = 9$ мм (для Земли), $r_g = 3$ км (для Солнца), $r_g = 90$ км (для ЧД с массой $30 M_\odot$; такие ЧД открыты по гравитационно-волновому излучению обсерваторией LIGO) и $r_g = 40$ а.е. (для объекта в $2 \times 10^9 M_\odot$; такие ЧД встречаются в ядрах галактик). Для невраща-

ющейся шварцшильдовской ЧД радиус горизонта событий r_h равен шварцшильдовскому радиусу: $r_h = r_g$. Для вращающейся ЧД радиус горизонта событий меньше шварцшильдовского радиуса: $r_h < r_g$. В этом случае горизонт событий погружен внутрь эргосферы, содержащей вихревое гравитационное поле. Горизонт событий — это не твердая наблюдательная поверхность, а граница в пространстве-времени между различными сигналами, движущимися со скоростью света.

Особенности на горизонте событий, возникающие, например, в метрике Шварцшильда, могут быть устранены выбором соответствующей системы отсчета. Например, для наблюдателя, свободно «падающего» на ЧД, горизонта событий не возникает. Поэтому «свободно падающий» наблюдатель может проникнуть внутрь ЧД и «достичь» центральной сингулярности, где он будет «разорван» огромными приливными силами. Свойства горизонта событий уни-



Вид гравитационно-волнового сигнала от слияния двух черных дыр, зарегистрированного 14 сентября 2015 г. на двух гравитационно-волновых антеннах H1 (слева) и L1 (справа). На графике справа гравитационно-волновые сигналы от антенны H1 и L1 совмещены (учтена задержка 6,9 мс). Верхние графики – результаты наблюдений, в центре – сглаженные наблюдаемые сигналы с наложенными на них теоретическими «кривыми блеска» (ниже приведены остаточные отклонения наблюдаемого гравитационно-волнового сигнала от теоретической «кривой блеска», рассчитанной в рамках ОТО для слияния двух черных дыр). Внизу изображения отражают результаты частотного анализа наблюдательных данных (из статьи *Abbot et al., 2016*).

кальны. Одни из них могут уйти на пространственную бесконечность, другие не могут. Может ли сигнал навсегда покинуть ЧД – зависит

от области пространства-времени, которая расположена в будущем по отношению к источнику сигнала. Таким образом, движение горизон-

та событий ЧД зависит от того, что произойдет с ним в будущем (!). Эту необычную его особенность – способность «чувствовать» будущее – ученые иногда называют «телеологической» природой горизонта. Можно утверждать, что именно наличие горизонта событий отличает ЧД от обычных материальных тел (например, от нейтронных звезд), которые имеют твердую наблюдаемую поверхность. Поэтому главная задача при исследованиях

ЧД – доказать существование у них горизонтов событий. Необходимо с помощью прямых наблюдений убедиться в том, что у кандидата в ЧД нет твердой наблюдаемой поверхности, а есть именно горизонт событий. Установить отсутствие наблюдаемой поверхности у объекта значительно труднее, чем убедиться в ее присутствии – как это делается, например, в случае нейтронных звезд путем наблюдений феноменов радиопульсара, рентгеновского пульсара и рентгеновского барстера 1-го типа. Гравитационно-волновая астрономия дает нам уникальную возможность прямого доказательства наличия горизонтов событий у ЧД.

Ученые обсерватории LIGO впервые зафиксировали 14 сентября 2015 г. явление, когда две черные дыры в двойной системе слились в одну, более массивную ЧД. Причем авторам удалось наблюдать не только процесс их слияния, но и стадию затухающих колебаний горизонта событий вновь образовавшейся более массивной ЧД (стадия «ring down»). В недалеком будущем, при повышении точности наблюдений гравитационно-волновых сигналов, детальное изучение различных мод затухающих колебаний сформировавшегося общего горизонта событий на стадии «ring

down» позволит окончательно доказать наличие горизонта событий у ЧД.

ГОРИЗОНТ СОБЫТИЙ У ЗВЕЗДНЫХ ЧЕРНЫХ ДЫР

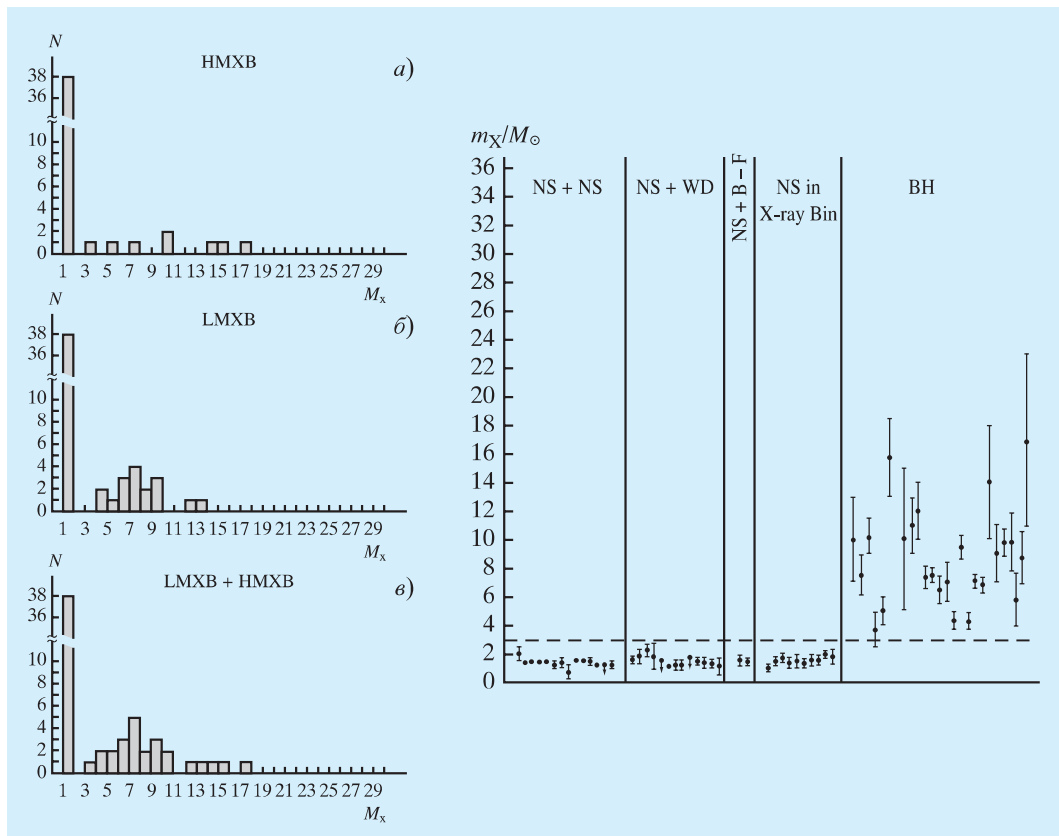
Благодаря накопленному богатому наблюдательному материалу по нейтронным звездам и черным дырам звездных масс, астрономы уже имеют веские, но, к сожалению, пока лишь косвенные аргументы в пользу наличия у ЧД горизонтов событий.

К настоящему времени измерены массы у 27 черных дыр в рентгеновских двойных системах, которые лежат в пределах от 4 до 16 M_{\odot} . Массы определены по движению оптических звезд с использованием законов Кеплера. Поскольку радиусы орбит рентгеновских двойных систем в миллионы раз больше гравитационных радиусов их компонентов, то применение закона тяготения Ньютона и следующих из него законов Кеплера в данном случае вполне оправдано. Радиусы тех же 27 черных дыр оценены по быстрой переменности рентгеновского излучения, возникающего при аккреции вещества, поставляемого спутниками – оптическими звездами. Они не превышают 10 шварцшильдовских радиусов r_g .

Кроме того, к настоящему времени измерены массы 70 нейтронных

звезд в двойных системах. Все они показывают явные признаки наблюдаемой поверхности, то есть относятся к радиопульсарам, рентгеновским пульсарам или рентгеновским барстерам 1-го типа. Напомним, что феномен радиопульсара связан с быстрым осевым вращением нейтронной звезды и сильным магнитным полем, «привязанным» к ее поверхности. Феномен рентгеновского пульсара обусловлен аккрецией вещества на магнитные полюса быстро вращающейся сильно намагниченной нейтронной звезды (ось магнитного диполя не совпадает с осью вращения нейтронной звезды). Феномен рентгеновского барстера 1-го типа связан с термоядерными взрывами накопленного при аккреции вещества на поверхности нейтронной звезды со сравнительно слабым магнитным полем. Очевидно, что если бы у нейтронных звезд не было наблюдаемых поверхностей, то мы не смогли бы наблюдать у них феномены радиопульсара, рентгеновского пульсара и рентгеновского барстера 1-го типа.

Таким образом, благодаря многолетним исследованиям тесных двойных систем звезд с релятивистскими компонентами астрономы имеют сведения о массах и наблюдательных прояв-



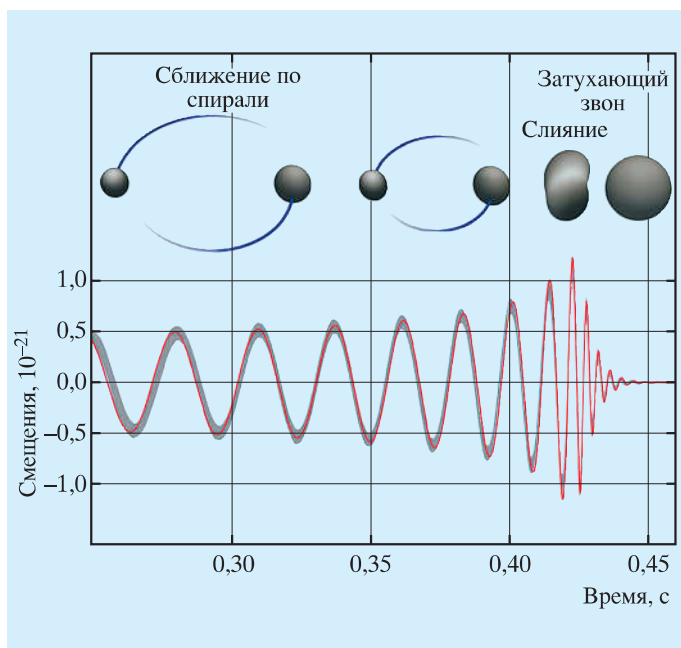
Графики распределения масс нейтронных звезд (высокий пик слева) и черных дыр в рентгеновских двойных системах (слева). Здесь HMXB обозначает массивные рентгеновские двойные (а), LMXB – маломассивные рентгеновские двойные (б). Диаграмма массы нейтронных звезд (NS) и черных дыр (BH) в рентгеновских двойных системах (справа). Массы радиопульсаров в двойных системах с нейтронными звездами – NS + NS, массы радиопульсаров в двойных системах с белыми карликами – NS + WD, массы радиопульсаров в двойных системах с невырожденными звездами – NS + B-F, массы рентгеновских пульсаров в двойных системах – NS in X-ray bin, массы черных дыр – BH. Горизонтальная пунктирная линия «отсекает» значение массы в $3M_\odot$ – абсолютный верхний предел массы нейтронной звезды, предсказанный в ОТО.

лениях около сотни релятивистских объектов (70 нейтронных звезд и 27 черных дыр). Оказывается, нейтронные звезды и черные дыры

различаются не только по массам (массы ЧД превышают $3M_\odot$, а массы нейтронных звезд не превышают $3M_\odot$ – значение верхнего предела

для нейтронных звезд). Нейтронные звезды и ЧД радикально различаются также и по наблюдательным проявлениям, в полном согласии с ОТО. У всех 70 нейтронных звезд, показывающих признаки наблюдаемых поверхностей, масса не превышает $3M_\odot$ – абсолютного верхнего предела массы нейтронной звезды, предсказываемого ОТО.

Ни один (!) из 27 массивных компактных объектов (кандидатов в ЧД) массой более $3M_\odot$ не показывает признаков наблюдаемой поверхности



Схематическое изображение процесса слияния двух черных дыр (вверху). Отмечены три стадии слияния: первая стадия – *inspiral* – спиральное сближение черных дыр, обусловленное излучением двойной системой гравитационных волн и соответственно потерей энергии и углового момента; вторая стадия – *merging* – собственно процесс слияния; третья стадия – *ring down* – стадия затухающих нерадиальных колебаний вновь образовавшегося горизонта событий более массивной черной дыры. В середине рисунка приведена соответствующая кривая изменения интенсивности гравитационно-волнового излучения. Из статьи *Abbot et al., Phys. Rev. Lett. 2016, V. 116.*

сти, то есть не является ни радиопульсаром, ни рентгеновским пульсаром, ни рентгеновским барстером 1-го типа. Согласно ОТО, черные дыры не имеют наблюдаемой поверхности, у них есть лишь горизонт событий – световая поверхность в пространстве-времени. Поэтому от них нельзя ожидать наличия строго периоди-

ческих пульсаций радионейтрального или рентгеновского излучения или термоядерных взрывов на поверхности – рентгеновских барстеров. Это и наблюдается в действительности: от тяжелых ($M > 3 M_{\odot}$) компактных объектов наблюдается иррегулярная переменность рентгеновского излучения в течение около 10^{-3} с или не строго периодическая

переменность – квазипериодические осцилляции рентгеновского излучения (QPO).

Следует отметить, что, помимо описанных четких различий в наблюдательных проявлениях аккрецирующих нейтронных звезд и кандидатов в ЧД, имеются и более тонкие различия, связанные с формой и характером изменения во времени спектров их рентгеновского излучения. Они свидетельствуют о том, что нейтронные звезды обладают наблюдаемыми поверхностями, а кандидаты в ЧД ($M > 3 M_{\odot}$) ими не обладают. Все перечисленные факты для почти сотни релятивистских объектов всеяют в нас уверенность в том, что многочисленные кандидаты в ЧД действительно имеют горизонты событий.

К сожалению, пока существование горизонтов событий у кандидатов в ЧД на основе изложенных фактов нельзя считать окончательно доказанным. Дело в том, что и некоторые нейтронные звезды могут не показывать признаков наблюдаемой поверхности. Например, если ось магнитного диполя у быстро вращающейся сильно намагниченной нейтронной звезды совпадает с осью ее вращения, то феномен рентгеновского пульсара при аккреции не будет наблюдаться. В этом случае тяжелую

($M > 3M_{\odot}$) нейтронную звезду можно спутать с черной дырой.

Для доказательства существования горизонта событий необходимо пронаблюдать эффекты, специфичные для ЧД. Такими можно считать различные моды колебаний горизонта событий при слиянии двух черных дыр и характерное затухание этих колебаний после процесса слияния (стадия «ring down»). Все эти эффекты в принципе можно наблюдать с помощью современных и будущих гравитационно-волновых телескопов.

Вполне возможно, что именно на этом пути будет получено окончательное доказательство существования горизонтов событий у черных дыр; после чего, безусловно, будет присуждена Нобелевская премия за открытие черных дыр во Вселенной.

КАК ОБРАЗУЮТСЯ ДВОЙНЫЕ ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ

Гравитационно-волновой объект LIGO GW150914 продемонстрировал слияние массивных ЧД с массами в $36 M_{\odot}$ и $29 M_{\odot}$. Двойная система, породившая такие массивные черные дыры, должна состоять из очень массивных звезд массой $80-100 M_{\odot}$, которые относительно редко встречаются в галактиках. Например, в нашей

Галактике известно менее десятка двойных систем, у которых масса хотя бы одного из компонентов превышала $50 M_{\odot}$. Среди них можно отметить тесную двойную систему WR20a в созвездии Киля, состоящую из двух звезд с избытком гелия в атмосферах массами $83 M_{\odot}$ и $82 M_{\odot}$. В рассеянном скоплении NGC 3603 (созвездие Киля, 20 тыс. св. лет от нас) недавно открыта тесная двойная система с массами компонент $116 M_{\odot}$ и $89 M_{\odot}$. Так что массивные тесные двойные звезды, подходящие для образования пары ЧД с массами $29 M_{\odot}$ и $36 M_{\odot}$, хотя и очень редки, но все же существуют.

Кстати, в 1997 г. сотрудниками ГАИШ МГУ В.М. Липуновым, К.А. Постновым и М.Е. Прохоровым на основе эволюционных расчетов в рамках «Машины сценариев» было теоретически предсказано, что первыми на обсерватории LIGO должны быть открыты не сливающиеся нейтронные звезды, а именно черные дыры. Авторами было показано, что хотя частота слияния черных дыр в двойных системах существенно ниже, чем частота слияния нейтронных звезд, но при слиянии черных дыр выделяется гораздо большая энергия в виде гравитационных волн. Это позволяет регистрировать гравитационно-вол-

новые излучения с гораздо больших расстояний, чем при слиянии нейтронных звезд. Поскольку объем исследуемого пространства пропорционален кубу расстояния, то количество доступных для наблюдений сливающихся пар ЧД возрастает и, соответственно, растет вероятность их обнаружения с помощью гравитационно-волновых телескопов. При этом естественно, что из-за влияния эффектов наблюдательной селекции первыми должны открываться наиболее массивные сливающиеся пары ЧД.

Как уже упоминалось, к настоящему времени измерены массы 27 черных дыр в рентгеновских двойных системах. Из них 10 систем принадлежат к классу массивных рентгеновских двойных систем со спутниками O-B-WR-звездами массой $5-70 M_{\odot}$ и 17 – к классу маломассивных рентгеновских двойных систем, у которых спутники – маломассивные звезды поздних спектральных классов с массами $0,3-2 M_{\odot}$. Распределения масс ЧД в массивных и маломассивных рентгеновских двойных системах существенно различаются, что, по-видимому, отражает различие эволюционных путей для этих двух классов систем: массивные рентгеновские двойные системы эволюцио-

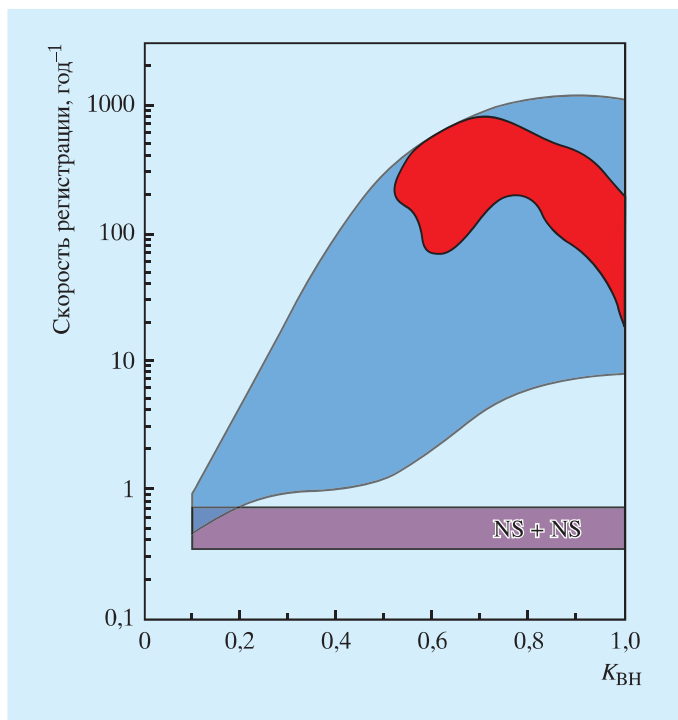


График скорости регистрации гравитационно-волновых всплесков, сопутствующих процессам слияния нейтронных звезд и черных дыр в двойных системах, рассчитанная В.М. Липуновым, К.А. Постновым и М.Е. Прохоровым с помощью «Машины сценариев». Регистрируемая частота слияния черных дыр должна быть выше, чем частота слияния нейтронных звезд, что и наблюдается в действительности. Здесь K_{BH} – доля массы звезды, которая при коллапсе ушла под горизонт событий черной дыры.

нируют, в основном, как разделенные и полуразделенные системы, а маломассивные рентгеновские двойные проходят стадию эволюции с общей оболочкой и с сильной потерей орбитального углового момента. С этим, по-видимому, связано то, что массы ЧД в маломассивных рентгеновских двойных системах концентрируются к значению примерно $8 M_{\odot}$, а массы ЧД в массивных рентгеновских двойных имеют широкое равномерное распределение.

В маломассивных системах их небольшие спутники – оптические звезды – оканчивают

свою эволюцию стадией белого карлика. Поэтому гравитационно-волновые всплески от таких систем должны быть обусловлены слиянием ЧД и белого карлика. В массивных рентгеновских двойных системах спутники – оптические звезды – формируют в конце эволюции нейтронные звезды и ЧД. Поэтому в данном случае гравитационные волны могут генерироваться от слияния двух черных дыр, нейтронной звезды с нейтронной звездой или ЧД с нейтронной звездой. К наиболее массивным рентгеновским двойным системам (по массам ЧД и оптической звезды) от-


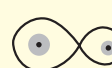
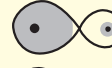






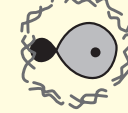




носятся: Cyg X-1 ($M_{BH} = 14,81 M_{\odot}$, $M_V = 19,16 M_{\odot}$), LMC X-1 ($M_{BH} = 10,3 M_{\odot}$, $M_V = 30,6 M_{\odot}$), M33 X-7 ($M_{BH} = 15,55 M_{\odot}$, $M_V = 70 M_{\odot}$). Однако даже у этих весьма массивных систем параметры «не дотягивают» до параметров системы LIGO GW150914: $M_{BH} = 36 M_{\odot}$ и $29 M_{\odot}$. Следует отметить, что массивные звезды заметно теряют свою массу в процессе ядерной эволюции в виде звездного ветра (темп потери массы $10^{-7} - 10^{-5} M_{\odot}$ в год). Это уменьшает вероятность образования очень массивных ЧД в конце эволюции массивных звезд. Поскольку механизм

Последовательность эволюционных стадий для рентгеновской двойной системы с черной дырой IC10X-1, рассчитанная с помощью «Машины сценариев». Указаны начальные и конечные массы компонент в M_{\odot} , расстояния между компонентами a в R_{\odot} и время T , которое двойная система проводит на соответствующей стадии эволюции (в миллионах лет).

ускорения звездных ветров массивных горячих звезд связан с давлением радиации, то темп потери массы в виде ветра в данном случае зависит от непрозрачности звездного вещества: она тем выше, чем больше содержится металлов в веществе звезды. Поэтому наиболее массивные звезды в двойных системах следует ожидать в галактиках с низкой металличностью.

Наиболее подходящие объекты для формирования массивных ЧД – это водородно-гелиевые звезды населения III массой 10^2 – $10^3 M_{\odot}$, которые формировались на ранних стадиях эволюции Вселенной.

В 1990-х гг. выяснилось, что звездный ветер массивных горячих звезд спектральных классов WR и O имеет клочковатую, облачную структуру. Поэтому темпы потери массы этих звезд, определяемые, главным образом, по их тепловому радиоизлучению, яв-

Стадия	M		M	a	T
I + I	94,3		56,7	180	0
III + I	92,5		56,2	190	2,5
IIIe + I	60,8		60,8	180	2,5
WR + I	58,1		61,0	180	3,1
SN	52,3		61,0	190	
BH + I	26,1		61,0	270	3,3
BH + II	26,1		60,9	270	3,5
SBN + IIIs	26,1		54,5	270	3,8
CE	26,1		53,0	260	3,8
BH + WR	26,1		31,6	18	3,8
SN	26,1		28,4	19	
BH + BH	26,1		14,2	30	4,1
BH	40,3				4300

ляются завышенными в 3–5 раз.

Дело в том, что интенсивность теплового радиоизлучения пропорциональна квадрату электронной плотности. Поэтому если мы «соберем» вещество ветра звезды в отдельные многочисленные плот-

ные сгустки, то (при том же значении темпа потери массы звездой) интенсивность теплового радиоизлучения возрастет. Если интерпретировать эту интенсивность в модели однородного ветра – получим завышенное значение массы.

Уменьшение темпа потери массы для горячих массивных звезд в 3–5 раз существенно ослабляет влияние звездного ветра на эволюцию этих звезд, что благоприятствует формированию массивных ЧД даже в галактиках с относительно большой металличностью вещества.

С помощью комплекса компьютерных программ, реализующих «Машину сценариев» для тесных двойных систем, разработанных под руководством профессора В.М. Липунова в ГАИШ МГУ, можно рассчитать сценарии эволюции массивной тесной двойной системы, приводящие к формированию двух массивных ЧД и генерации всплеска гравитационно-волнового излучения.

Опишем один из таких сценариев. В начале эволюции масса первичной звезды находится в диапазоне $m_1 = 80\text{--}120 M_{\odot}$, масса вторичной $m_2 = 15\text{--}60 M_{\odot}$, начальная большая полуось орбиты системы находится в диапазоне $a = 170\text{--}200 R_{\odot}$. После выгорания водорода в ядре первичная более массивная звезда заполняет свою критическую полость Роша. Начинается перетекание вещества на соседнюю звезду (как правило, быстрее, чем в ядерной шкале времени эволюции), а заключительная стадия перетекания происходит в шкале времени, близкой к ядерной. После потери первич-

ной звездой водородной оболочки на ее месте остается звезда Вольфа – Райе (WR), которая, взрываясь как сверхновая типа Ib/c, образует ЧД. Далее, закончив эволюцию на главной последовательности, заполняет свою полость Роша вторая звезда. После фазы сверхкритической аккреции на ЧД наступает стадия общей оболочки системы, во время которой компоненты сближаются, но не образуют объект Торна – Житков (звезду с черной дырой в центре), а оболочка нерелятивистского компонента теряется за счет передачи ей кинетической энергии орбитального движения компонентов. Образуется система, состоящая из звезды WR и ЧД (аналог двойной системы CygX-3, состоящей из звезды WR и ЧД). Далее звезда WR взрывается как сверхновая типа Ib/c, и в системе образуется вторая ЧД. Конечным результатом эволюции этой двойной системы является слияние двух черных дыр вследствие потери ими углового момента за счет излучения гравитационных волн, с образованием одиночной массивной ЧД. На конечной стадии слияния двух ЧД формируется всплеск гравитационно-волнового излучения.

Ученые спорят о том, может ли формироваться всплеск электромагнит-

ного излучения при слиянии двух черных дыр, сопутствующий всплеску гравитационно-волнового излучения. Теоретически такого всплеска от слияния двух «чистых» ЧД ожидать не приходится. Однако если в окрестностях финальной двойной системы из-за обмена масс между компонентами сохранился газ, то воздействие на него мощного гравитационно-волнового всплеска может приводить к формированию ударных волн и всплеску электромагнитного излучения.

В этой связи интересно отметить, что космическая гамма-обсерватория «Ферми» через 0,4 с после гравитационно-волнового события, имевшего место 14 сентября 2015 г., зарегистрировала слабый (на уровне трех сигм) секундный всплеск жесткого рентгеновского излучения, который, как и гравитационно-волновой всплеск, пришел из южной небесной полусферы. Специально поставленные наблюдения в других диапазонах спектра (в частности, в оптическом диапазоне – наблюдения с помощью сети роботизированных телескопов МАСТЕР в ГАИШ МГУ) не выявили электромагнитных сигналов в пределах области ошибок (площадь примерно 600 квадратных градусов) гравитаци-

онно-волнового сигнала LIGO GW150914.

КАЧЕСТВЕННО НОВЫЙ ЭТАП
В ИССЛЕДОВАНИИ ЧД

Итак, с открытием гравитационных волн начинается новый этап в исследованиях черных дыр звездных масс. До последнего времени астрономы изучали черные дыры в рентгеновских двойных системах и накопили ценные данные по массам этих экстремальных объектов. Сравнение этих данных с результатами исследований нейтронных звезд в двойных системах позволило сделать важный вывод о том, что нейтронные звезды и черные дыры различаются не только по массам, но и по наблюдательным проявлениям в полном

согласии с предсказаниями ОТО. В частности, удалось показать, что если компактный объект обнаруживает явные признаки наблюдаемой поверхности (является радиопульсаром, рентгеновским пульсаром или рентгеновским барстером 1-го типа), то его масса всегда не превосходит $3 M_{\odot}$ – абсолютно верхнего предела для масс нейтронных звезд, предсказанного в ОТО. Если же масса компактного объекта превышает $3 M_{\odot}$, то он всегда не показывает признаков наблюдаемой поверхности и, скорее всего, вместо наблюдаемой поверхности у такого массивного компактного объекта (кандидата в черные дыры) существует горизонт событий.

Открытие гравитационных волн от слияния черных дыр дает уникальную возможность окончательного доказательства наличия горизонтов событий у черных дыр.

Теперь ученые имеют возможность не только наблюдать черные дыры, но и экспериментировать с ними – исследовать нелинейную динамику сильно искривленного пространства-времени в процессе формирования общего горизонта событий при слиянии двух черных дыр. Это поднимает науку об исследованиях черных дыр на качественно новый уровень, что должно привести к прорыву в нашем понимании природы пространства-времени.

Информация

Уничтожение темной материи в Галактике

Ученые из Гарвардского университета предполагают, что под воздействием жесткого гамма-излучения сверхвысокой энергии, исходящей из центра Млечного Пути, происходит распад темной материи. Природа гамма-излучения до сих пор не изучена, ее проис-

хождение исследуется в том числе с помощью космической гамма-обсерватории «Ферми» (Земля и Вселенная, 2008, № 5, с. 58; 2015, № 3). По мнению астрофизиков, источниками избытка гамма-излучения в центре нашей Галактики могут быть быстро вращающиеся нейтронные звезды – миллисекундные пульсары. Более правдоподобной считается гипотеза о столкновении и распаде вимпов – гипотетически слабо взаимодействующих массивных частиц темной материи, их довольно много в непосредственной близости

от ядра Галактики. Для доказательства этой гипотезы ученым не хватало более точных сведений о распределении гамма-излучения в Галактике. Недавно им удалось разделить поступающее гамма-излучение на компоненты; это помогло определить более точное положение на небосводе источников каждого из компонент. Оказалось, что, скорее всего, вимпы распадаются в соответствии с моделью аннигиляции темной материи.

По материалам интернет-сайтов,
31 марта 2016 г.