

Гравитационные волны – вестники космических катастроф

К.А. ПОСТНОВ,
доктор физико-математических наук
ГАИШ МГУ

В то время, когда готовилась к печати эта статья (конец ноября 2017 г.), термин “гравитационные волны” прочно вошел в лексикон не только научных книг и журналов, и само явление стало популярной темой для обсуждения в средствах массовой информации (Земля и Вселенная, 2018, № 1). Предсказанные в 1916 г. в работах А. Эйнштейна, гравитационные волны были впервые экспериментально зарегистрированы двумя наземными лазерными интерферомет-



рами LIGO (от англ. Laser Interferometry Gravitational wave Observatory; Земля и Вселенная, 2016, № 4) в США 14 сентября 2015 г.

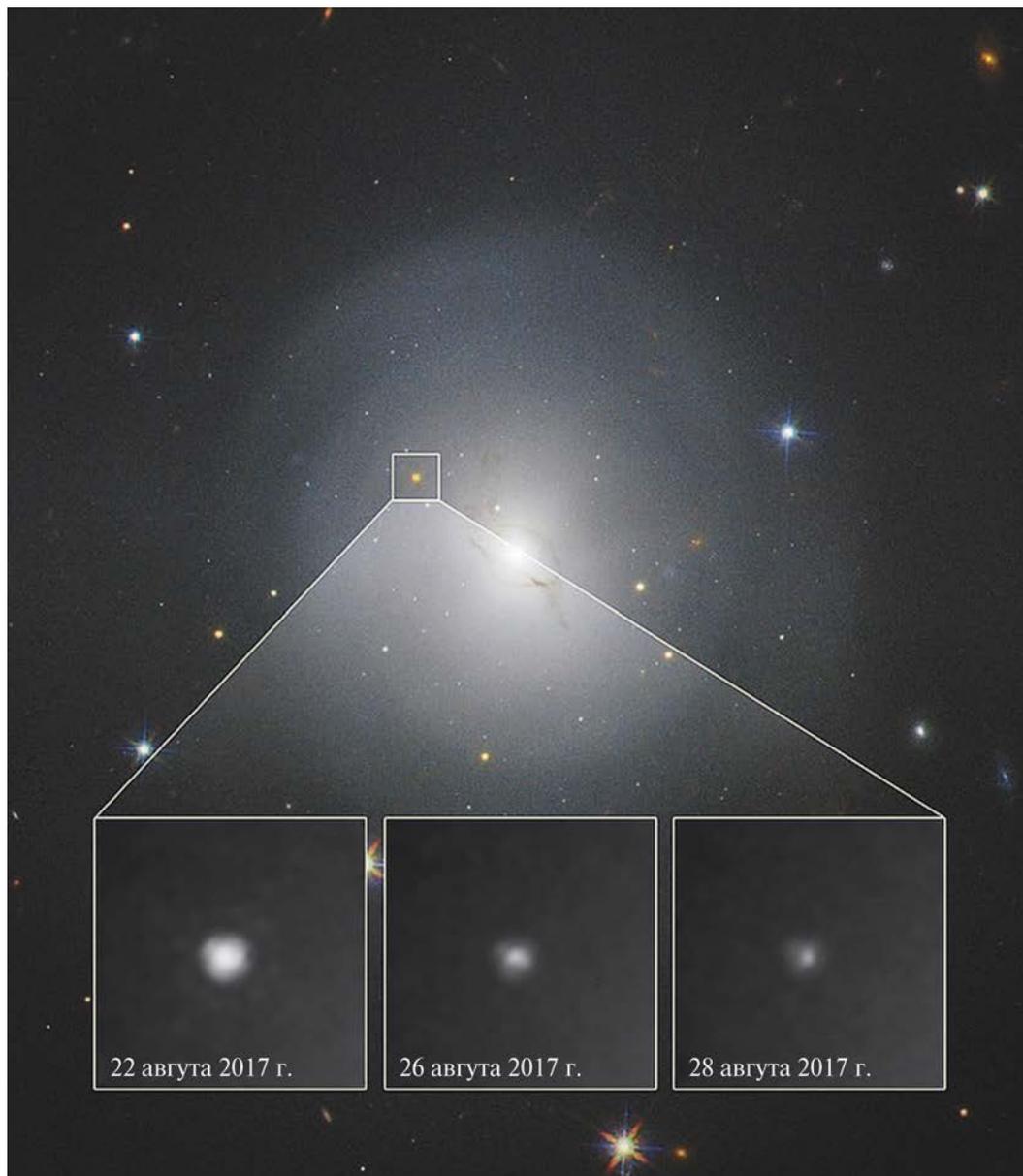
(событие GW150914). Это открытие положило начало возникновению и развитию новой ветви науки – гравитационно-волновой астрономии. Блестящим подтверждением фундаментальности их экспериментального обнаружения стало присуждение Нобелевской премии по физике в 2017 г. трем ведущим ученым из проекта LIGO – Райнеру Вайссу, Барри Баришу и Кипу Торну, которые стояли у истоков проекта LIGO и внесли определяющий вклад в его успех.

За прошедшие два года детекторы LIGO (и с августа 2017 г. европейский детектор VIRGO) уже зарегистрировали 6 надежных событий. Пять из них оказались результатом слияния двойных систем – черных дыр с массами от примерно $9 M_{\odot}$ до $31 M_{\odot}$; одно событие (GW170817) явилось результатом сли-

яния двойных нейтронных звезд, оно сопровождалось электромагнитным излучением: от радио- до гамма диапазона. Анализ данных продолжается, и к моменту выхода этой статьи число событий, возможно, еще увеличится. Цель предлагаемой статьи – дать читателю представление о наи-

более важных физических и астрофизических следствиях открытия и изучения гравитационных волн за последние два года. Для более глубокого ознакомления с гравитационно-волновой тематикой рекомендуем читателю ознакомиться с уже опубликованными статьями¹, а также с

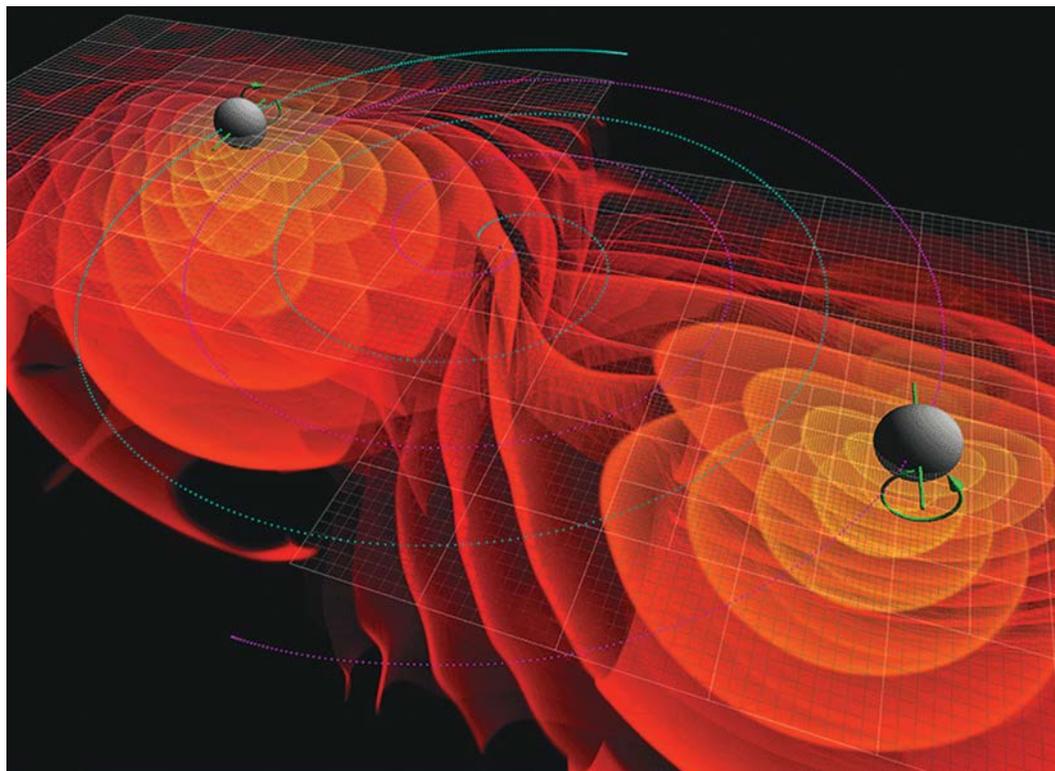
¹ Журнал “Успехи фундаментальных наук”, 2017. Т. 187. С. 883–914.



Место локализации в галактике NGC 4993 (созвездие Гидры) первого зарегистрированного гравитационно-волнового всплеска GW170817, произошедшего в результате слияния двух нейтронных звезд. Зарегистрирован 17 августа 2017 г. Оптическое послесвечение гамма-всплеска GRB170817A (см. врезку) наблюдалось 22, 26 и 28 августа 2017 г. с помощью KTX. Фото NASA.

более ранним обзором жука “Открытие гравита- этап в исследованиях академика А.М. Черепа- ционных волн: новый- черных дыр”².

²Журнал “Успехи фундаментальных наук”, 2016. Т. 186. С. 1001–1010.



Модель излучения гравитационных волн в виде “ряби”, возникающей при сближении черных дыр. Рисунок К. Хенце (Исследовательский центр Эймса, NASA).

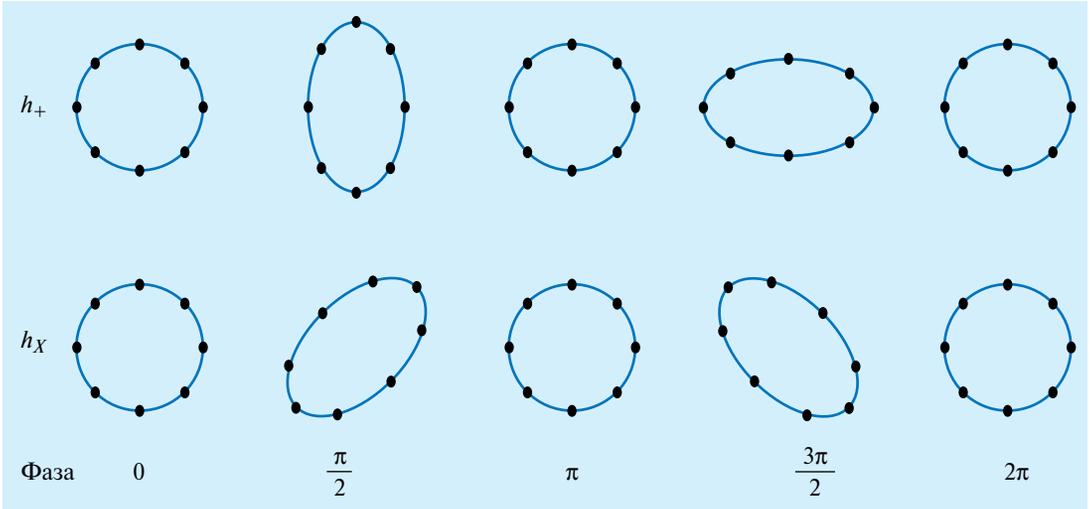
ОТЛИЧИЕ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН ОТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ

Часто гравитационные волны (ГВ) называют “рябью” (или “складками») пространства–времени, распространяющимися со скоростью света, что выражает довольно точно явление. Представим гладкую поверхность Мирового океана с ровным, искривленным лишь шарообразностью Земли горизонтом, на фоне этой гладкой поверхности всегда есть волны, которые распространяются в

различных направлениях. Морские волны переносят энергию и импульс (во время шторма – весьма значительные!). В теории гравитации А. Эйнштейна – общей теории относительности (ОТО) – гравитация есть искривление пространства–времени; ГВ – слабые возмущения кривизны, распространяющиеся на фоне “средней”, плавно меняющейся от точки к точке кривизны пространства–времени. (В ОТО пространство и время – равноправные сущности,

которые не существуют независимо друг от друга, как в теории Ньютона). Еще более глубокая аналогия гравитационных волн с электромагнитными волнами (ЭВ) в вакууме. В обоих случаях ГВ и ЭВ в пустом пространстве распространяются с одной и той же фундаментальной скоростью – скоростью света.

ГВ и ЭВ различаются “характером” и взаимодействием: если ЭВ действуют только на пробные частицы, обладающие электрическим за-



Виды приливного действия гравитационных волн на пробные массы (отмечены точками). Гравитационная волна распространяется перпендикулярно плоскости рисунка. Верхний ряд – поляризация h_+ , нижний – h_x ; внизу показана фаза волны.

рядом, то ГВ действуют на любые тела и частицы (в том числе на незаряженные и без массы: например, на фотоны), отклоняя их траектории движения. Как и ЭВ, ГВ обладают двумя поляризациями – независимыми и неустраняемыми никакими преобразованиями компонентами. Однако, если для ЭВ это, как в случае линейной поляризации, есть плоскость, в которой с частотой волны колеблется вектор электрической или магнитной напряженности поля, то для ГВ состояние поляризации определяется двумерным полем приливных ускорений. Они действуют на свободные, не связанные никакими силами (кроме внешних гравитационных),

пробные частицы с малыми массами так, чтобы можно было пренебречь взаимным гравитационным взаимодействием). Произвольное переменное, с частотой ГВ, поле ускорений всегда можно разложить на эти две составляющие – h_+ и h_x . Амплитуда ЭВ характеризуется модулем вектора электрической или магнитной напряженности, являющиеся размерными величинами – зависят от выбранной системы единиц: например, величина напряженности магнитного поля в системе единиц СГСЭ измеряется в Эрстедах или Гауссах. Амплитуда гравитационной волны, в отличие от ЭВ, – это безразмерная величина; она характеризуется просто

числом, показывающим относительное изменение расстояния L между пробными частицами при прохождении ГВ: $h = \Delta L/L$. Так же, как и амплитуда ЭВ, амплитуда ГВ обратно пропорциональна расстоянию до источника: $h \sim 1/r$.

Как и ЭВ, ГВ переносят энергию и импульс; причем поток энергии, переносимый ГВ, пропорционален квадрату ее амплитуды и квадрату частоты: $F \sim h^2 f^2$. Отметим, что перенос энергии и импульса ГВ долгое время (вплоть до 1960-х гг.) оставался предметом научной дискуссии. Признание того, что ГВ переносят энергию и импульс, а значит, могут совершать работу над пробными телами, и послужило толч-

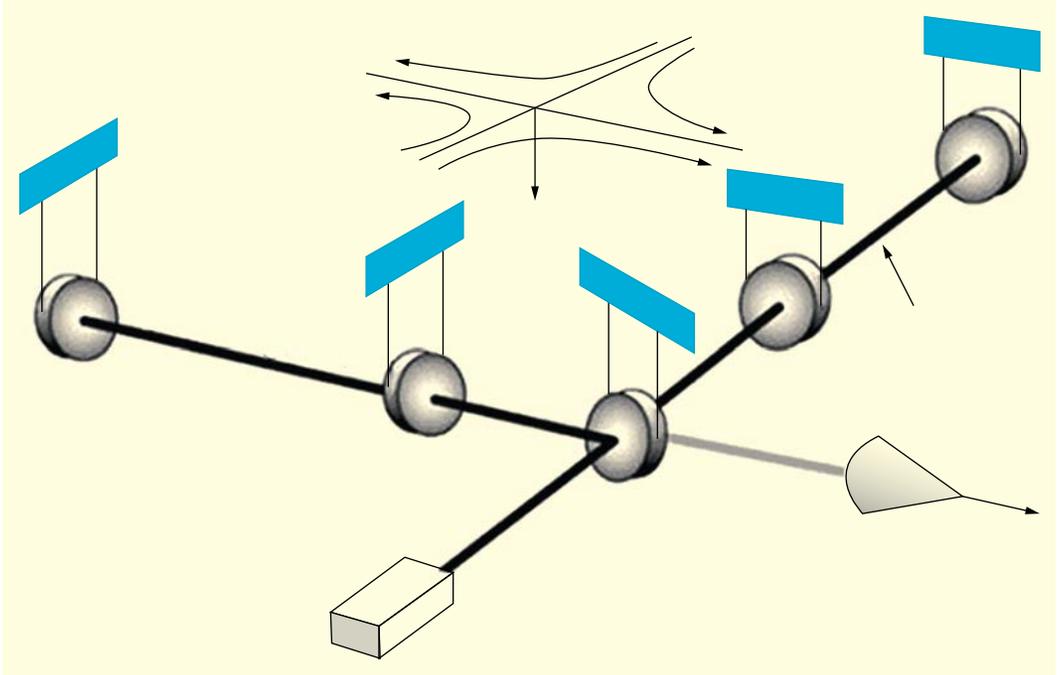


Схема лазерного интерферометра Майкельсона, применяемого для регистрации гравитационных волн. Для увеличения чувствительности в каждое "плечо" интерферометра добавлено дополнительное зеркало, создающее резонатор Фабри–Перо, внутри которого свет многократно отражается, что эффективно увеличивает время его в интерферометре и чувствительность. Падающая волна растягивает и сжимает "плечи" интерферометра, меняя интерференционную картину на фотодетекторе.

ком к развитию методов их экспериментального детектирования.

ЛАЗЕРНЫЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРЫ

Функционирование современных лазерных интерферометров (подобных LIGO) описано с использованием метода, предложенного советскими физиками М.Е.Герценштейном и В.И. Пустовойтом в ключевой статье, опубликованной

в 1962 г.³ вскоре после изобретения лазеров. В этом методе детектором ГВ является классический интерферометр Майкельсона, конечные зеркала которого играют роль пробных масс. При прохождении ГВ (скажем, перпендикулярно плоскости, образованной "плечами" интерферометра) зеркала периодически изменяют их взаимное расположение, причем за период колебаний ГВ относительное изменение

длины "плечей" интерферометра составляет $\Delta L/L = \frac{1}{2}h$. Если в интерферометр "запустить" когерентное лазерное излучение, то в результате интерференции света на фотодетекторе образуется интерференционная картина; когда число интерферирующих длин волн целое, то будет наблюдаться максимум яркости, когда полуцелое – минимум.

Интерференционная картина очень чувстви-

³"Журнал экспериментальной и теоретической физики", 1962. Т. 43. С. 605.

Наземные лазерные интерферометры: а – LIGO (Хэнфорд, США), б – VIRGO (Италия). Фото NSF/LIGO.

тельна к изменению длины L – современные методы позволяют регистрировать изменение интенсивности интерференционной картины при изменении длины “плеча” в одну миллиардную долю длины волны видимого света (около 500 нм). Это позволяет использовать лазерные интерферометры для регистрации чрезвычайно малых смещений, вызываемых ГВ (типичные амплитуды регистрируемых сейчас ГВ – порядка 10^{-21}). Для того, чтобы достичь такой чувствительности, лазерные интерферометры делают очень большими, с характерной длиной “плеч” в 3–4 км, а их схема – гораздо более сложная, чем простейший интерферометр Майкельсона; однако принцип их работы остался неизменным.

В настоящее время действуют четыре интерферометра: два LIGO (длиной 4 км) – в США, VIRGO – в Италии (3 км) и GEO-600 (0,6 км) – в Германии. Строится 3,5-км подземный детектор KAGRA в Японии и “близнец” LIGO – в Индии. Сеть интерферометров необходима для более точного



определения направления прихода ГВ. Каждый интерферометр является практически всенаправленным детектором, поэтому для того, чтобы определить направление прихода ГВ, требуются как минимум три детектора: по измерению времени задержки сигнала на двух детекторах на небесной сфере вырезается относительно узкое кольцо, а пересечение

колец от разных пар дает два “пятна” возможного направления на источник. Синхронная работа двух детекторов LIGO и детектора VIRGO в августе 2017 г. позволила локализовать источник GW170817 от слияния двух нейтронных звезд в области площадью около 30 квадратных градусов. Это позволило обнаружить электромагнитный сигнал, сопровождавший

эту грандиозную космическую катастрофу, в которой ультраплотное вещество разрываемых приливными силами нейтронных звезд породило жесткое электромагнитное излучение.

ГРАВИТАЦИОННЫЕ СИГНАЛЫ – “КОСМИЧЕСКИЕ СИРЕНЫ”

Что же ищут гравитационно-волновые интерферометры? – Для ответа на этот вопрос остановимся на источниках ГВ. Читатели, не знакомые с теорией кеплеровского движения в объеме младших курсов университетов, могут сразу же перейти к следующей рубрике, приняв на веру три важнейших утверждения:

– для обнаружения гравитационного сигнала на фоне шумов необходимо как можно точнее знать его частотные характеристики (форму);

– измерение формы гравитационного сигнала от сливающейся двойной системы позволяет сразу же измерить комбинацию масс компонентов систе-

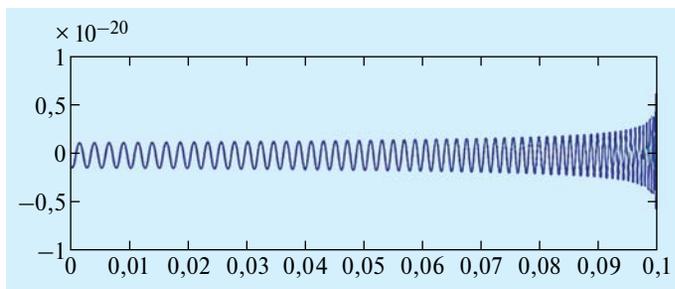
мы (общую массу, или “чирп-массу”);

– параметры гравитационного сигнала от сливающейся двойной системы позволяют измерить расстояние до источника.

Как известно, в классической электродинамике источником электромагнитного излучения являются движущиеся ускоренно электрические заряды: более точно, важна отличная от нуля вторая производная по времени от дипольного момента системы зарядов. В гравитации все “заряды” (массы) имеют один знак, поэтому, например, для двух тяготеющих масс M_1 и M_2 дипольный момент равен нулю в системе центра масс. Не дает вклад в излучение и магнитный дипольный момент, связанный с движением масс (в силу закона сохранения момента количества движения), поэтому низший порядок гравитационного излучения – квадрупольный. Для того, чтобы система масс излучала гравитационные волны, должна быть отличная от нуля вторая

производная квадрупольного момента системы, а поток энергии ГВ определяется квадратом третьей производной от квадрупольного момента системы масс. Сферически-симметричные движения системы (например, вращение вокруг оси симметрии) не приводят к излучению ГВ, так как при этом квадрупольный момент системы не изменяется. Если m – характерная масса, а R – размер системы (например, расстояние между телами в двойной системе), то квадрупольный момент по порядку величины равен $I \sim mR^2$. Для периодически изменяющегося со временем T (или частотой $f = 1/T$) квадрупольного момента I для источника, находящегося на расстоянии r , получаем оценку амплитуды ГВ: $h \sim 10^{-21} (E_k/M_\odot c^2; 100 \text{ Мпк}/r)$, где E_k – кинетическая энергия несферически симметричных движений масс, производящих гравитационное излучение. Из этой, основной, формулы видно, что даже при огромной кинетической энергии движения – по-

Типичная форма гравитационного сигнала (в единицах безразмерной амплитуды ГВ h) от сливающихся тесных двойных систем (“чирп-сигнал”). Сигнал от сливающихся черных дыр может быть сложнее из-за наличия собственного вращения (спина) у компонентов двойной системы. NSF/LIGO.



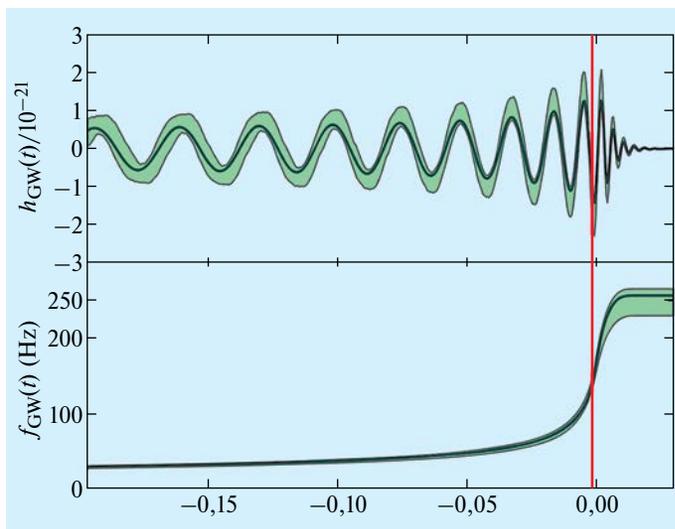
рядка массы покоя Солнца (2×10^{54} эрг) – амплитуда ГВ от космического источника на расстоянии 100 Мпк (326 млн св. лет) ничтожно мала!

Важнейший пример астрофизического источника ГВ – излучение от двойных звезд с массами M_1 и M_2 . В случае тесных двойных систем излучение ГВ приводит к потере энергии орбитального движения и сближению компонентов, которые (с хорошей точностью практически вплоть до слияния) находятся на кеплеровской орбите.

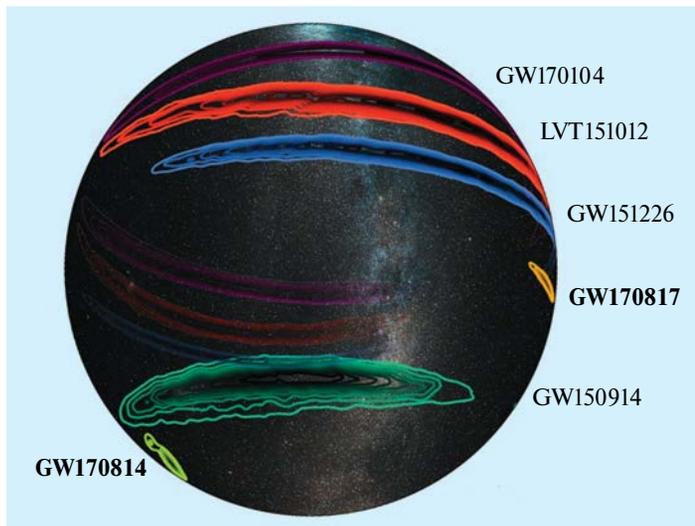
Именно сигналы такой формы, в первую очередь, ищут при анализе данных наблюдений ГВ лазерными интерферометрами. Извлечение сигналов ГВ из зашумленных данных при работе гравитационных интерферометров – очень сложная задача. Упрощенно эту процедуру, называемую методом оптимальной фильтрации, можно описать следующим образом. Для достижения требуемой чувствительности и повышения отношения сигнала к шуму записи детекторов о положении зеркал (пробных масс) интерферометров (фактически наблюдаемый сигнал) на фотодетекторе необходимо сравнить с огромным набором возможных форм сигнала ГВ с различными параметрами. Если сигнал есть, то корреляция окажется положительной для

определенного набора параметров, если сигнала нет – то корреляции не будет. Так как шумы возникают в интерферометре очень сложной конструкции, с множеством обратных связей, и часто могут иногда принимать форму, близкую к ожидаемой от возможных астрофизических источников, то для регистрации сигнала ГВ требуются, как минимум, два интерферометра, разнесенных на большое расстояние (тысячи километров), с примерно одинаковой чувствительностью. Тогда, если сигнал

есть в одном интерферометре, то он появится и в другом – с задержкой, определяемой временем прохождения гравитационной волны проекции расстояния между интерферометрами на направление распространения волны (в случае интерферометров LIGO – в несколько миллисекунд). Подчеркнем здесь важность знания априорной формы сигнала ГВ: чем точнее она известна, тем с большей уверенностью (с большим отношением сигнала к шуму) сигнал можно обнаружить. В этом – важное отли-



Гравитационно-волновой всплеск GW150914 от источника – образовавшейся черной дыры массой $62 \pm 4 M_{\odot}$, находящейся в 1,3 млрд св. лет от нас. Вверху – форма сигнала в первом источнике (широкая полоса) и модельное описание сигнала от сливающихся черных дыр с массами около $30 M_{\odot}$ (тонкая сплошная линия); внизу – частота сигнала гравитационной волны от времени ($t = 0$, что соответствует образованию конечной черной дыры). Заметен “послезвон” горизонта событий – экспоненциально спадающие колебания после слияния черных дыр. NSF/LIGO.



Области локализации на небесной сфере источников гравитационных волн, обнаруженных двумя интерферометрами LIGO (GW150914, LVT151012, GW151226, GW170104) и тремя интерферометрами LIGO/VIRGO (GW170814, GW170817). LIGO/Virgo/NASA / Л. Сингер.

чие от традиционной регистрации электромагнитных волн: детекторы электромагнитного излучения измеряют энергию (в радиодиапазоне – непосредственно амплитуду напряженности поля) световых потоков при взаимодействии квантов света с материалом детектора, и форма сигнала (временная зависимость) при этом не играет принципиальной роли.

Отметим еще одну важную особенность сигнала ГВ от сливающихся двойных систем: зная, как изменяется частота принимаемого сигнала ГВ от времени, мы получаем возможность непосредственного измерить комбинацию масс компонентов, называемую “чирп-массой”: $(\mu^3 M^2)^{1/5}$, здесь $M = M_1 + M_2$ – полная масса системы, $\mu = M_1 M_2 / M$ – приведенная масса. Учтем, что амплитуда ГВ при слиянии двойных систем зависит

именно от такой комбинации масс. Следовательно, измеряя амплитуду ГВ на определенной частоте $h(f)$, получаем возможность прямого определения расстояния до источника. В этом – уникальное отличие сигналов ГВ, испускаемых сливающимися двойными системами, от электромагнитных волн: для последних определение расстояния до источника только по принимаемому сигналу невозможно. Проблема определения расстояний до космических источников в астрономии – одна из самых трудных; а в случае сливающихся тесных двойных систем расстояние до источника сразу же определяется по форме сигнала ГВ.

СЛИЯНИЕ ДВОЙНЫХ ЧЕРНЫХ ДЫР

После нескольких лет интенсивных работ по

улучшению чувствительности лазерных интерферометров LIGO был зарегистрирован (14 сентября 2015 г.) первый в истории гравитационно-волновой сигнал (об истории открытия первого сигнала можно подробно прочитать в статье: <http://adsabs.harvard.edu/abs/2016Univ....2...22C>. Частота и форма сигнала от первого источника ГВ, получившего название GW150914 (по дате открытия), свидетельствовали о слиянии двух очень компактных объектов ($z = 0,09 \pm 0,03$) с массами $29 \pm 4 M_\odot$ и $36 \pm 4 M_\odot$, которые образовали черную дыру массой около $62 M_\odot$, находящуюся в 1,3 млрд св. лет от нас. Как известно, в рамках ОТО никакой компактный объект, кроме черной дыры, не может иметь массу свыше $3 M_\odot$, поэтому был немедленно сделан вывод об открытии слияния двух массивных черных дыр. Он был подкреплен наблюдением специфической формы сигнала уже после их слияния. При

Параметры сливающихся двойных ЧД

Характеристики сливающихся компонентов двойных систем	Событие, дата регистрации				
	GW150914 14.09.2015	GW151226 25.12.2015	GW170104 4.01.2017	GW170608 8.06.2017	GW170814 14.08.2017
Масса первого компонента, M_{\odot}	36,2	14	31,2	12	30,5
Масса второго компонента, M_{\odot}	29,1	7,5	19,3	7	25,3
Общая масса двойной системы, M_{\odot}	62,3	20,8	48,7	18	53,2
Спин образовавшейся керровской ЧД	0,68	0,74	0,64	0,69	0,70
Расстояние до источника, Мпк	420	440	880	340	540

Примечание. В таблице финальный спин образовавшейся при слиянии черной дыры дан в безразмерных единицах (максимальный спин равен 1), он определяется, в основном, орбитальным движением сливающихся компонент.

этом образуется черная дыра большей массы, но несколько меньше суммарной массы сливающихся компонент – примерно 10% массы излучается в виде ГВ. Все возмущения горизонта событий вновь образующейся черной дыры экспоненциально затухают, превращаясь в дополнительное излучение ГВ (стадия “послезвона”), с характерным временем, определяемым массой и моментом импульса (спином) образовавшейся черной дыры. Таким образом, по форме сигнала ГВ удалось независимо измерить массу и спин образовавшейся черной дыры. Форма сигнала

на всех фазах (до слияния ЧД, во время и после него) соответствовала ОТО – с точностью до нескольких процентов.

Первое событие по обнаружению ГВ стало фундаментальным открытием по двум причинам: во-первых, были впервые экспериментально обнаружены гравитационные волны, которые предсказывались 100 лет назад как одно из следствий ОТО А.Эйнштейна; во-вторых, были экспериментально открыты сливающиеся двойные черные дыры, существование которых до настоящего времени оставалось лишь гипотезой. Заметим, что существование двойных черных

дыр с массами около $10 M_{\odot}$ предсказывались как следствие эволюции массивных двойных звезд в пионерских работах первой половины 1990-х гг. российских астрофизиков А.В. Тутукова и Л.Р. Юнгельсона (ИНАСАН) и группы В.М. Липунова, К.А. Постнова и М.Е. Прохорова (ГАИШ МГУ). Более того, прогнозировалось, что из-за большой массы (на порядок больше массы нейтронных звезд) они с большей вероятностью должны были быть открыты первыми интерферометрами LIGO⁴. Так и случилось, что блестяще подтвердило правильность базовых астрофизических

⁴ См. подробнее в обзоре: Гришук Л.П., Липунов В.М., Постнов К.А., Прохоров М.Е., Сатяпракаш Б.С. Гравитационно-волновая астрономия: в ожидании первого зарегистрированного источника // Успехи физических наук, 2001. Т. 171. С. 3–59.

зических представлений об эволюции массивных двойных систем.

Несколько неожиданной оказалась большая масса черных дыр в источнике GW150914 – примерно втрое больше средней массы черных дыр, известных до этого открытия по динамическим измерениям в галактических массивных рентгеновских двойных системах⁵. Для того, чтобы получить столь большие массы черных дыр из эволюции массивных звезд, требуется предположить, что практически вся масса звезды перед коллапсом ядра попадает в черную дыру. До открытия GW150914 это утверждение было одной из смелых гипотез.

Кроме этого, подтвердилось и предположение, что такие массивные черные дыры возникают из звезд с пониженным содержанием тяжелых элементов (в астрономии все элементы после гелия называются “тяжелыми”, или “металлами”). Наличие таких элементов в атмосфере звезд ведет к сильному увеличению скорости сброса массы звезды еще на стадии Главной последовательности из-за мощного давления излучения в спектральных линиях

тяжелых элементов. Рассматриваются и другие гипотезы происхождения двойных массивных черных дыр – от динамического образования в плотных звездных скоплениях (например, в ядрах молодых шаровых скоплений) до “экзотических” первичных ЧД, которые могли образовываться во Вселенной задолго до появления первых звезд и галактик.

До конца ноября 2017 г. опубликовано пять зафиксированных случаев уверенных слияний двойных черных дыр. Некоторые их параметры, полученные из анализа принятого сигнала ГВ, представлены в таблице (по информации, взятой с официального сайта LIGO: www.ligo.org).

Значения, приведенные в таблице, демонстрируют широкий спектр масс двойных черных дыр, его невозможно было измерить прежними астрофизическими методами. Богатая информация об этих источниках и каналах их образования – предмет активных научных исследований.

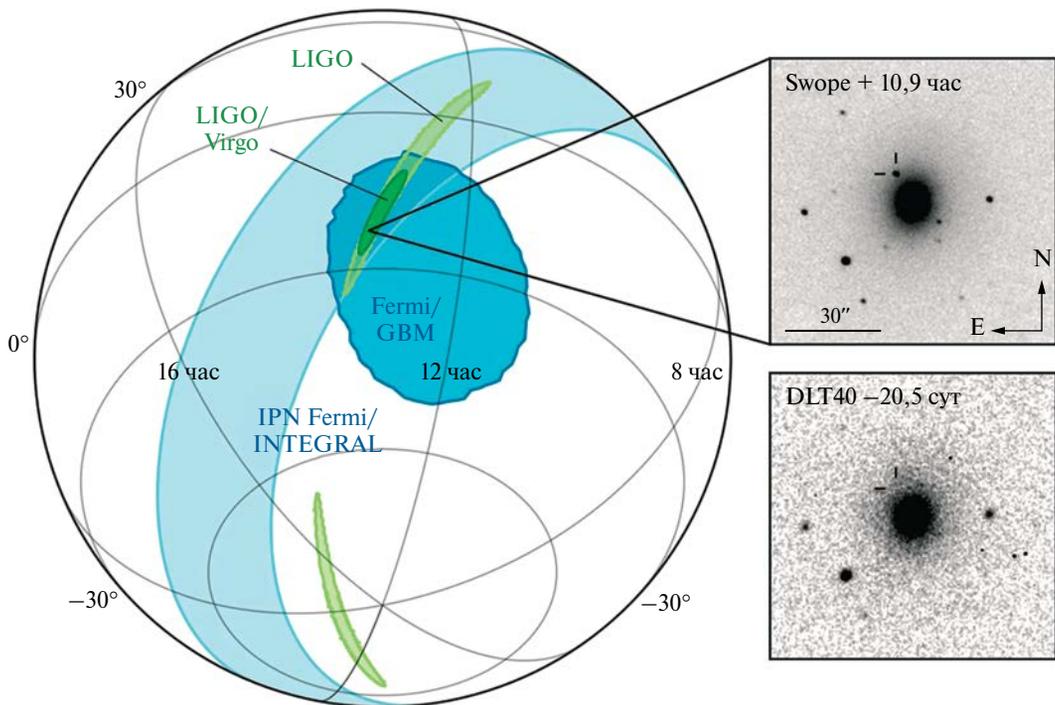
ПЕРВОЕ СЛИЯНИЕ ДВОЙНЫХ НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД

Событие GW170817, произошедшее 17 августа

2017 г., стоит особняком⁶. Во-первых, как и событие GW170814, слияние системы двойных черных дыр было ассоциировано с независимо наблюдавшимся коротким гамма-всплеском GRB170817A, который произошел через $1,74 \pm 0,05$ с после максимума гравитационно-волнового сигнала, произошедшего в эллиптической галактике NGC 4993 в созвездии Гидры (130 млн св. лет от нас, или 40 Мпк). Оно было зарегистрировано тремя синхронно работающими детекторами: двумя LIGO и VIRGO. Рекордная длительность этого слияния в полосе чувствительности интерферометров – 10–300 Гц (около 100 секунд!) – свидетельствовала об относительно малой общей массе двойной системы ($2,7\text{--}3,3 M_{\odot}$), что сразу же навело на мысль о слиянии двух нейтронных звезд. Дальнейший анализ формы ГВ-сигнала показал, что наиболее вероятные массы сливающихся компонентов: $1,36\text{--}2,26 M_{\odot}$ и $0,86\text{--}1,36 M_{\odot}$ (большие неопределенности связаны с незнанием собственного вращения компонент массой $2,82 M_{\odot}$). Детектирование с помощью трех интерферометров позво-

⁵ См. подробнее в обзоре: *Черпащук А.М.* Наблюдения звездных и сверхмассивных черных дыр // *Успехи физических наук*, 2016. Т. 186. С. 778–789.

⁶ *Abbott B.P. et al.* LIGO Scientific Collaboration Virgo Collaboration GW170814: A Three-Detector Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Coalescence // *Physical review letters*, 2017. Т. 119. № 23.



Локализация на небесной сфере источника GW170817 от сливающихся нейтронных звезд и сопутствующего гамма-всплеска GRB170817A выполнено с помощью детекторов LIGO/VIRGO. Светло-зеленым показана область, в которой искали источник с помощью детектора LIGO; темно-зеленым – по данным LIGO и VIRGO; темно-синим – по данным обсерватории “Ферми” (детектор GBM); голубым – расположение источника, по данным обсерваторий “Ферми” и “Интеграл”. На врезке – первое наблюдение килоновой AT 2018gfo в галактике NGC 4993 с помощью телескопа “Swope” примерно через 11 ч после слияния (вверху) и та же область неба, снятая в патрульных наблюдениях сверхновых с помощью телескопа DLT40 за 20,5 сут до события. Рисунок из журнала “The Astrophysical Journal Letters” (2017. Т. 848. № 2).

лили ограничить область ошибок направления на источник площадкой примерно в 30 квадратных градусов в районе южного созвездия Гидры, что было более чем в 10 раз меньше площади неопределенности сигналов ГВ, регистрируемых до этого только с помощью двух интерферометров LIGO. Но самое главное – через

1,7 с после момента объединения черных дыр (максимальной амплитуды сигнала) космическими обсерваториями “Ферми”, “Интеграл” и “Конус-Винд” (“Konus-WIND”) был зарегистрирован слабый короткий гамма-всплеск GRB170817A, область локализации которого “перекрывалась” с областью сигнала ГВ. Это придало

дополнительную уверенность в том, что произошло слияние двойной системы, по крайней мере, одним из компонентов которой была нейтронная звезда!

Дело в том, что еще в 1984 г. в пионерской работе российских астрофизиков С.И. Блинникова, Т. Переводчиковой, И.Д. Новикова и А.Г. Полнарева⁷ впервые было

⁷“Письма в Астрономический журнал”, 1984. Т. 10. С. 422.

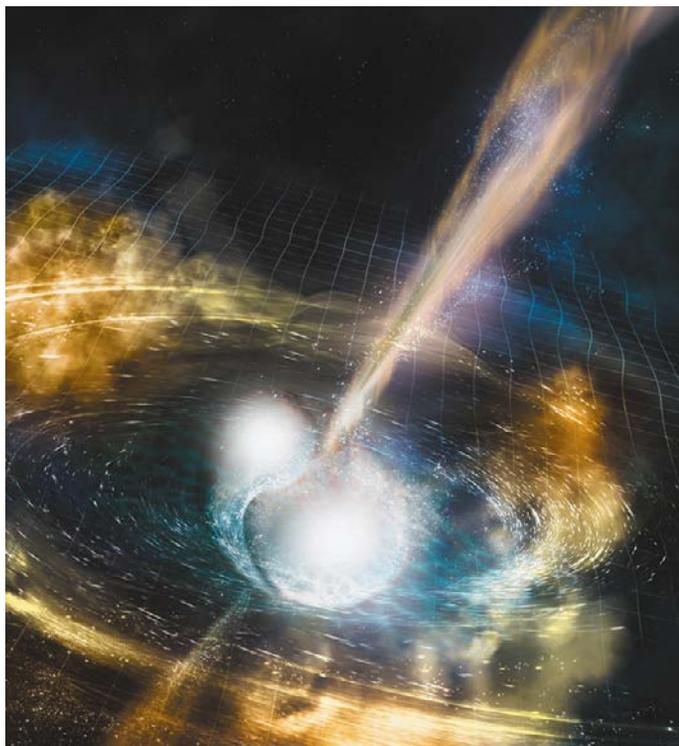


Иллюстрация столкновения нейтронных звезд (событие GW170817). Узкий выброс по диагонали – поток гамма-лучей. Светящееся облако вокруг звезд – источник видимого света (килоновая), его наблюдали с помощью телескопов после слияния. Рисунок А. Симоне (NSF/LIGO/Sonoma State University).

отмечено, что при слиянии тесных двойных систем с нейтронными звездами должен генерироваться мощный импульс жесткого электромагнитного излучения, который может наблюдаться как короткий (с длительностью порядка секунды) космический гамма-всплеск. В те годы природа космических гамма-

всплесков еще была неизвестна, поэтому отождествление коротких гамма-всплесков с внегалактическими сливающимися двойными нейтронными звездами было очень смелой гипотезой; понадобилось 34 года для того, чтобы она блестяще подтвердилась во время наблюдения за

источником GW170817 в августе 2017 г.!

Итак, благодаря одновременным ГВ- и гамма-наблюдениям события GW170817 астрономам стала известна относительно небольшая область неба, откуда пришел сигнал ГВ, и расстояние до источника – 40 Мпк⁸. Это позволило немедленно выделить все галактики в этой области и начать их наблюдения с целью поиска возможного оптического источника. В работу включились многие автоматизированные системы телескопов разного размера во всем мире: в том числе российская система телескопов-роботов “МАСТЕР” под руководством профессора В.М. Липунова (ГАИШ МГУ), и спустя 11ч после открытия GW170817 поступило первое сообщение об обнаружении нового оптического источника (AT 2017gfo), находящегося примерно в 2 кпк от центра спиральной галактики NGC 4993, в созвездии Гидры.

Вся мощь наземных и космических обсерваторий была брошена для наблюдений за этим новым источником, оставшимся после слияния нейтронных звезд GW170817. В этих наблюдениях и анализе их результатов приняли

⁸ *Abbott B.P. et al. Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger // The Astrophysical Journal Letters, 2017. Т. 848. № 2.*

участие тысячи астрономов всего мира, и результаты оказались поистине ошеломляющими. Полученные следствия из наблюдений GW170817 и его электромагнитного послесвечения в разных диапазонах спектра можно разделить на две группы:

- слияние двух нейтронных звезд в источнике GW170817 с помощью гравитационно-волновых детекторов и наблюдения короткого гамма-всплеска GRB170817A;

- электромагнитное послесвечение от остатков слияния двойной системы нейтронных звезд в течение примерно месяца после слияния.

Рассмотрим их подробнее. В результате наблюдений событий GW170817 и GRB170817A можно сделать выводы:

- впервые обнаружено слияние двойных нейтронных звезд, сливающихся под действием гравитационного излучения. Такова судьба тесных двойных пульсаров, орбита которых уменьшается из-за излучения ГВ в полном соответствии с квадрупольной формулой ОТО А. Эйнштейна (самый известный – пульсар Халса–Тейлора PSR 1913+16);

- из анализа формы ГВ-сигнала получены новые ограничения на уравнения состояния сливающихся нейтронных звезд;

- экспериментально определен темп слия-

ния двойных нейтронных звезд в локальном объеме 1 Гпк^3 (порядка 1500 событий в год), в согласии с астрофизическими ожиданиями;

- экспериментально доказано, что слияние двойных нейтронных звезд сопровождается коротким импульсом гамма-излучения, что подтверждает гипотезу о происхождении коротких гамма-всплесков от слияния двойных нейтронных звезд;

- сравнивая расстояние до источника, которое было измерено в результате ГВ-наблюдений, с красным смещением галактики NGC 4993, уточнена постоянная Хаббла (70 км/с/Мпк), которая оказалась в согласии с независимыми астрономическими измерениями;

- принимая во внимание время задержки между моментом слияния (излучением основной доли ГВ) и приходом гамма-излучения ($\Delta t = 1,7 \text{ с}$) с недостижимой ранее точностью получены ограничения на отличие скорости распространения гравитационных волн от скорости света: несомненно, это важнейший фундаментальный результат этих наблюдений: он позволил значительно ограничить ряд модификаций ОТО, предсказывающих отличие скорости ГВ от скорости света;

- анализ времени распространения ЭМ и ГВ-сиг-

нала в потенциале Галактики позволил получить новое ограничение на отличие гравитационной и инертной массы (проверка принципа эквивалентности) в ОТО.

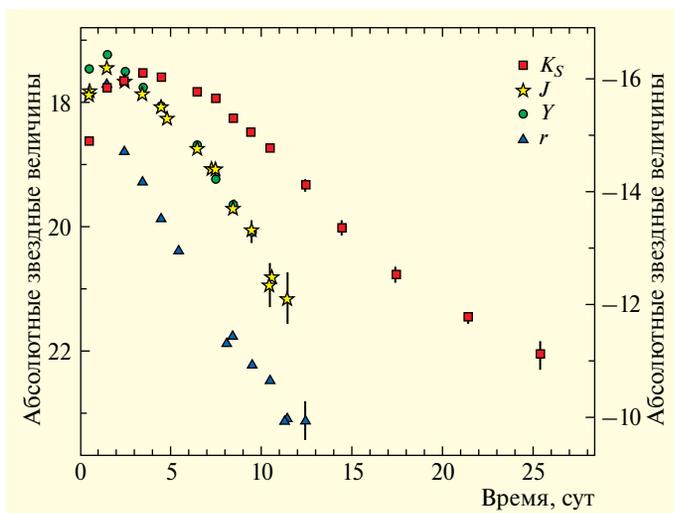
НАБЛЮДЕНИЯ “ЗОЛОТОЙ” КИЛОНОВОЙ

В 1993 г. астрофизиками Л.Ли и Б.Пачиньским введен новый термин “килоновая” – астрономическое событие, происходящее в двойных системах при слиянии двух нейтронных звезд или нейтронной звезды с черной дырой, по мощности равное 1000 Новым. Оно означает оптическое и ИК-излучение остатков слияния двух нейтронных звезд, связанное с их нагревом из-за распада обильно образующихся неустойчивых тяжелых элементов при слиянии. Названное “килоновой” явление, возникшее от слияния двойных нейтронных звезд GW170817, показывает, что излучаемая энергия может превосходить в 1000 раз энергию, излучаемую Новыми. Современные численные расчеты слияния двух нейтронных звезд предсказывают, что вещество нейтронных звезд с массой в несколько процентов от массы Солнца, выбрасывается при их слиянии. Это вещество – нейтроны и протоны – начинают образовывать тяжелые ядра, вплоть до трансура-

График оптического (фильтр r) и инфракрасного (фильтры K_s , J , Y) блеска излучения килоновой AT 2017gfo. Приведен промежуток времени (в днях) после слияния двух нейтронных звезд в событии GW170818. NSF/LIGO.

новых элементов, многие из которых – неустойчивые, они распадаются с выделением частиц и тепловой энергии. По мере распада, с характерным временем, составляющим несколько дней или недель, эта энергия нагревает выброшенную массу (часть из которой движется с умеренно релятивистскими скоростями, порядка 20% от скорости света); поэтому на месте слияния должен наблюдаться оптический и ИК-источники. Эти предсказания, сделанные в середине 1990-х – начале 2000 г., блестяще подтвердились в процессе фотометрических и спектральных наблюдений затухающих оптического и ИК-излучений в течение десятков дней: светимость килоновой в максимуме составила 10^{42} эрг/с.

Взаимодействие расширяющихся остатков килоновой AT 2017gfo (GW170817) с окружающей межзвездной средой создало ударную волну, радиоизлучение от которой было зарегистрировано через 16 сут после слияния черных дыр с по-



мощью 27-ми радиотелескопов VLA (США). Время существования этого постепенно затухающего радиоисточника может длиться годы – пока ударная волна “тормозится” в окружающей среде.

По-видимому, самый главный результат проведенных исследований – новое понимание процессов образования основной части элементов r -процесса (ядер, которые могут образовываться только при наличии большой окружающей плотности нейтронов); так что время захвата нейтронов – короче времени радиоактивного распада ядер к стабильным изотопам. Самыми известными r -элементами являются благородные металлы – серебро, золото, платина, а также уран, плутоний и другие тяжелые элементы. Моделирование свечения килоновой AT 2017gfo показывает, что

при слиянии нейтронных звезд образовалось от $100 M_{\odot}$ до $200 M_{\odot}$ чистого золота и от $30 M_{\odot}$ до $60 M_{\odot}$ урана! Таким образом, слияния двойных нейтронных звезд могут быть главным каналом образования r -элементов в природе. Стоит отметить, что впервые эта идея была высказана в работе американских астрофизиков Дж. Латтимера и Д. Шрамма в 1974 г. Это – огромный прогресс в нашем понимании эволюции химических элементов.

НАЧАЛО МНОГОКАНАЛЬНОЙ АСТРОНОМИИ

Начавшаяся в 2015 г. эра гравитационно-волновой астрономии на наших глазах достигла колоссальных успехов: она положила начало новому типу исследований космических явлений – многоканальной астрономии. Теперь информацию о космических источниках

ученые получают, благодаря успехам многоволновой астрономии, из разных по физической природе каналов: электромагнитному, гравитационно-волновому, по нейтринному излучению и потокам космических лучей (частиц, ускоренных до сверхвысоких энергий). Эти каналы имеют свою специфику: используются разные методы наблюдений и обработки данных и разные типы источников.

Наиболее значительные космические катастрофы, сопровождающиеся огромным энерговыделением в электромагнитном диапазоне, – вспышки сверхновых и космические гамма-всплески. От сверхновых ученые уже наблюдали потоки теплового нейтринного излучения, сопровождавшего коллапс ядра массивной звезды и образова-

ние компактного остатка в виде нейтронной звезды (сверхновая SN 1987A в Большом Магеллановом Облаке, расположенная в 168 тыс. св. лет от нас; Земля и Вселенная, 2017, № 4). Из наблюдений установлено, что ударные волны, образующиеся от взаимодействия быстро расширяющегося остатка взрыва сверхновой с межзвездной средой, являются источником ускорения космических лучей с энергией вплоть до 10^{15} эВ. С началом эры гравитационно-волновой астрономии впервые удалось наблюдать слияния массивных двойных черных дыр, а теперь уже – и двойных нейтронных звезд (GW170817).

Выводы, получаемые в результате использования методов гравитационно-волновой астрономии, имеют фундаментальное значение

для теории гравитации (проверка ОТО и ее расширений), образования и эволюции звезд (формирование двойных нейтронных звезд и черных дыр звездной массы) и космологии. В краткой статье даже трудно перечислить постоянно растущее количество новых наблюдений, идей и расчетов, которые были инициированы – первым в истории астрономии открытием (14 сентября 2015 г.) гравитационно-волнового сигнала GW150914 от сливающихся двойных черных дыр и от слияния двойных нейтронных звезд GW170817 с последующим электромагнитным излучением (17 августа 2017 г.). Несомненно, эти две даты навсегда займут свое почетное место в золотом фонде истории фундаментальных научных открытий.