

Поиск компонентов источников гравитационных волн в электромагнитном диапазоне и с помощью методов астрономии космических лучей

© А. С. Позаненко © А. А. Вольнова © П. Ю. Минаев

Институт космических исследований Российской академии наук, Москва
apozanen@iki.rssi.ru alinusss@gmail.com minaevp@mail.ru

© В. А. Самодуров

Пушинская радиоастрономическая обсерватория, Пушкино
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,
Москва
sam@prao.ru

Аннотация

Рассмотрены примеры возможных сигналов, сопровождающих источники гравитационных волн, обсуждаются проблемы поиска этих сигналов в различных диапазонах электромагнитного излучения, наборы данных для такого поиска, типы данных, на которых производится поиск, и сформулированы требования к поиску. В качестве примера рассматриваются впервые зарегистрированные в эксперименте LIGO гравитационно-волновые события GW150914, GW151226 и LVT151012.

1 Введение

Одной из актуальных задач современной астрофизики является поиск компонентов всплесков гравитационного излучения. В 2015 г. исполнилось 100 лет с тех пор, как Альберт Эйнштейн сформулировал основные принципы Общей Теории Относительности (ОТО) [1]. Большинство наблюдаемых следствий ОТО нашло подтверждение прямыми и многократными наблюдениями. И вот пришел черед подтверждению существования гравитационных волн. 14 сентября 2015 года гравитационные волны (ГВ) были обнаружены двумя пространственно разнесенными детекторами эксперимента LIGO [2]. Насколько надежно открытие? Это главный вопрос экспериментальной физики. История науки знает массу ошибок, сделанных из-за неправильной оценки достоверности. В данном случае совместная значимость того, что оба детектора зарегистрировали

не случайное событие, а реальный сигнал, составляет более 5 стандартных отклонений. Несмотря на то, что значимость регистрации сигнала достаточно велика, необходимы дальнейшие подтверждения. И они были получены последующим детектированием еще двух событий (LVT151012 и GW151226) в октябре и декабре 2015 г. [19]. Большая часть научного сообщества считает, что трех регистраций достаточно для подтверждения обнаружения гравитационных волн. Однако есть и немалая группа ученых, сомневающих в надежности открытия. Совместная регистрация гравитационного события с событием в электромагнитном диапазоне (гамма-излучение, оптика, радио) и/или путем регистрации нейтрино от источника гравитационных волн могла бы положить конец этой дискуссии. Такие наблюдения позволят однозначно связать источник ГВ с уже известными источниками в других диапазонах. Кроме отождествления источника ГВ это открывает новую страницу гравитационной астрономии, когда совместное изучение наблюдательных данных разного типа взаимодействий даст возможность заглянуть туда, куда нельзя заглянуть ни с помощью наблюдений в электромагнитном диапазоне, ни даже с помощью нейтринной астрономии, т.е. заглянуть в такие состояния вещества, которые могут существовать только лишь при коллапсе массивных звезд или же при слиянии тесных релятивистских двойных систем, когда ни электромагнитное излучение, ни даже нейтрино не могут «выбраться» из сверхплотных состояний вещества.

Для дальнейшего исследования ГВ требуется увеличение количества их регистраций и, конечно, необходимо искать источники, сопровождающие излучение ГВ в оптическом или ином диапазоне электромагнитного излучения. Мы рассмотрим примеры возможных наблюдаемых источников, сопровождающих ГВ, проблемы поиска в различных спектрах электромагнитного излучения, наборы

Труды XVIII Международной конференции DAMDID/RCDL'2016 «Аналитика и управление данными в областях с интенсивным использованием данных», Ершово, 11-14 октября 2016

данных для такого поиска, типы данных, на которых производится поиск, и сформулируем требования к поиску. Предложение конкретных решений находится вне рамок нашей работы.

2 Источники и сигналы от них

Источниками ГВ, доступными для детектирования в настоящее время, являются взрывы Сверхновых с коллапсирующим ядром в ближайших галактиках и слияния тесных двойных или же кратных систем, в которых есть пара в любом сочетании: нейтронная звезда (НЗ)/черная дыра (ЧД). Первое зарегистрированное гравитационно-волновое событие GW150914 было слиянием системы двух ЧД на расстоянии от Земли, эквивалентном космологическому красному смещению $z=0.09$ [2]. Аналогично, два последующих события, GW151226 (значимость 5.3 стандартных отклонения), и LVT151012 (1.7 стандартных отклонения) также представляют собой слияние двойных систем, состоящих из черных дыр и расположенных на космологических расстояниях $z=0.09$ и $z=0.20$ [19]. Так как значимость LVT151012 невелика, то это событие считается кандидатом, что, впрочем, не мешает включать его в статистический анализ распределения черных дыр по массам, распределения ЧД и частоты слияния ЧД в локальной Вселенной и т.п. [19]. За время цикла наблюдений с 12 сентября 2015 по 19 января 2016 не было зарегистрировано гравитационно-волновых событий от слияния систем типа НЗ/НЗ или НЗ/ЧД, это позволило получить верхний предел на частоту слияния таких систем в локальном объеме Вселенной, и предел оказался существенно меньше, чем частота слияний ЧД/ЧД [20]. Это не является оптимистичным прогнозом для поиска компонентов гравитационно-волновых событий в спектре электромагнитного излучения.

Сигнал от слияния двойной системы смоделирован и представляет собой пакет из увеличивающихся по амплитуде колебаний с уменьшающимся периодом. Такой «рисунок» (шаблон) и ищется вейвлетным анализом во временных рядах величин смещений пробных тел в детекторах LIGO. Локализация же проводится методом триангуляции, где задержка прихода сигнала на один детектор относительно других детекторов (в настоящее время работают два детектора) определяют область допустимых значений положения источника на небесной сфере. Если время регистрации известно достаточно точно и определяется, в основном, лишь интенсивностью зарегистрированного сигнала, то область локализации определяется существенно менее точно и может составлять сотни квадратных градусов.

Сверхновые с коллапсирующим ядром (SN II, SN Ib/c) проявляют себя в оптическом диапазоне давно и успешно наблюдаются как быстро нарастающий по потоку точечный объект, расположенный в родительской галактике. Максимум кривая блеска

достигает через несколько дней после начала роста и затем происходит более медленный спад. В некоторых редких случаях Сверхновая сопровождается классическим (длинным) гамма-всплеском. Впрочем, обычно говорят, что гамма-всплеск сопровождается появлением сверхновой. Излучение гамма-всплеска регистрируется как в гамма-диапазоне, так и в фазе послесвечения, в оптическом, рентгеновском и радио- диапазонах [3].

Электромагнитное излучение может возникнуть и при слиянии систем НЗ/НЗ, НЗ/ЧД в виде короткого гамма-всплеска длительностью существенно меньше, чем в предыдущем случае, а также менее интенсивным (по сравнению с длинными всплесками) послесвечением также регистрируемом в оптическом, рентгеновском и радио- диапазонах. В течение нескольких суток после слияния может наблюдаться «килоновая». Во многом килоновая аналогична понятию сверхновой и связана с распадом радиоактивных элементов, синтезированных при слиянии двойной системы [21]. Килоновая уже наблюдалась, по крайней мере, в одном случае - в кривой блеска послесвечения короткого гамма-всплеска GRB 130603B [22].

А вот слияние системы ЧД/ЧД не должно сопровождаться сколько-нибудь значимым электромагнитным излучением. Впрочем, совсем близко, через 0.4 сек после регистрации гравитационно-волнового события GW150914 гамма-детекторы космического эксперимента GBM на обсерватории Ферми зарегистрировали сигнал, морфологически похожий именно на короткий гамма-всплеск [4]. Хотя это может быть и простым совпадением во времени. Собственно, точность локализации на небесной сфере, а также точность совпадения во времени и являются главными проблемами при архивном поиске, а скорость реакции на ГВ, полнота покрытия и глубина обзора – при поиске в режиме реального времени.

3 Проблемы поиска

Точность локализации источника гравитационных волн на небесной сфере составляет сотни квадратных градусов. Апертурные телескопы в радио-, оптическом, рентгеновском и гамма-диапазонах не способны охватить такое большое поле зрения за одно наведение. Необходимы скоординированные наблюдения многих обсерваторий на Земле для сканирования всей области локализации. Если сигнал в оптическом или радио- диапазоне, сопровождающий гравитационно-волновое событие, достаточно продолжительный, то при сканировании действительно можно обнаружить транзитный объект. Но таких транзитных объектов различной природы в достаточно большой области локализации может быть несколько, и, следовательно, предстоит выбирать, какой именно из транзитных объектов принадлежит гравитационно-волновому событию.

Всенаправленные детекторы гамма-диапазона, расположенные на орбите Земли на космических обсерваториях (например, GBM/Fermi, Konus-Wind, SPI-ACS/INTEGRAL, БДРГ/Ломоносов) способны регистрировать сигналы одновременно со всего неба, но не способны производить точную локализацию. В этом случае искать нужный сигнал можно по совпадению во времени. Однако и тут остается фактор возможного случайного совпадения. Вопрос детектирования компонента гравитационно-волнового события в электромагнитном диапазоне может быть решен, например, или путем синхронной регистрации в гамма- и оптическом или радио-диапазонах, или регистрации в гамма-диапазоне с последующим отождествлением источника в оптике и радио, аналогично тому, как сейчас происходит отождествление компонентов космических гамма-всплесков. Во многом, задача идентификации гравитационно-волнового события подобна тому, что происходило с поиском компонентов гамма-всплесков с момента их открытия (1967) [5] до первого обнаружения в рентгеновском и оптическом диапазоне (1998) [6]. Первая широкомасштабная кампания поиска была проведена, начиная, примерно, с суток после регистрации GW 150914 во всех диапазонах и длилась в течение нескольких месяцев [7-10]. Результатов, кроме уже упоминавшегося короткого гамма-всплеска [4], кампания не принесла.

Разнородность данных препятствует строго одинаковому поиску даже в данных одного типа. Например, разные энергетические диапазоны гамма-детекторов, наблюдения в различных широкополосных фильмах разных областей возможной локализации и т.п.

Еще одной неопределенностью можно считать незнание всех возможных форм сигнала в электромагнитном диапазоне, сопровождающих, и возможно предшествующих, гравитационно-волновому событию. Кроме уже рассмотренных выше, необходимо искать пакеты периодических или квазипериодических осцилляций в гамма-диапазоне, связанных с колебаниями аккреционного диска, возникающего после слияния компактных систем. Впрочем, так как мы не знаем деталей слияния, то возможна регистрация и нового типа сигналов, не подпадающих ни под один рассмотренный шаблон.

4 Наборы и типы данных, инфраструктура

Достаточно разнородные данные соответствуют различным диапазонам, но везде - это в том или ином виде временные ряды. В гамма-диапазоне - это временные ряды или равноотстоящих по времени бинов или данные записи каждого фотона, зарегистрированного всенаправленным детектором (время регистрации фотона и его энергия). Наиболее подходящие для такого поиска работающие в настоящее время эксперименты GBM/Fermi, Konus-Wind, SPI-ACS/INTEGRAL. Данные экспериментов

GBM/Fermi, SPI-ACS/INTEGRAL являются публично доступными. Во всех трех экспериментах, а также множестве других, предназначенных для изучения космических гамма-всплесков, существует система автоматического выделения всплеска, основанная на поиске кратковременного превышения сигнала над медленно меняющимся фоном. Но не всегда значимость того или иного транзитного события достаточна для автоматического отбора, и необходимо использовать архивы данных для повторного поиска транзиевтов, соответствующих гравитационно-волновому событию. Именно так и был найден возможный компонент GW 150914 в эксперименте GBM/Fermi [4]. В данных других аналогичных экспериментов (Konus-Wind, SPI-ACS) этот сигнал найден не был, наиболее вероятно, из-за более низкой чувствительности.

Данные нейтринных обсерваторий и данные обсерваторий космических лучей (высокоэнергичных фотонов и заряженных частиц с энергией ~ 1 ГэВ и более) также надо рассматривать при поиске компонента гравитационно-волнового события. Эти данные аналогичны пофотонной записи, рассмотренной выше, но для космических лучей и для высокоэнергичного мюонного нейтрино можно определить еще и положение возможного источника на небесной сфере, впрочем, это положение также весьма приблизительное. Нейтринный телескоп IceCube [11], отечественные нейтринные телескопы Байкальской нейтринной и Баксанской нейтринной обсерватории [12] необходимо использовать при поиске компонентов. Эксперимент IceCube уже работает как по программе поиска совпадений, так и сам является источником для организаций кампаний, аналогичных гравитационно-волновым, а именно по поиску транзиевтов, сопровождающих штучно зарегистрированные нейтрино [13].

Данные апертурных телескопов представляют собой те же самые временные ряды, но только записанные с различных участков небесной сферы (оптические телескопы) и иногда в нескольких различных диапазонах длин волн (радиотелескопы). Среди радиотелескопов существуют телескопы с фазированным сбором сигнала с множества антенн, которые позволяют осматривать одновременно большие участки неба (BCA, LOFAR). Данные с таких телескопов наиболее пригодны к поиску плохо локализованных источников. Например, данные BCA уже позволили открыть несколько новых пульсаров [14,15], а данные LOFAR были использованы для обзора части неба, совпадающей с северной частью локализации GW 150914.

Оптические данные, возможно, самые информативные, как с точки зрения полезности информации, так и с точки зрения информационного объема. Дело в том, что в оптическом диапазоне точность локализации максимальна, и это позволяет идентифицировать найденный объект с уже имеющимися в каталогах (например, с галактикой)

и/или целенаправленно исследовать свойства объекта с помощью дополнительных, более чувствительных наблюдений. Наиболее полезны обзоры, позволяющие отсканировать всю область локализации одним и тем же инструментом, но зачастую это принципиально невозможно, т.к. исходная область локализации может находиться и в северной, и в южной части неба, как это и было с источником GW 150914. Системы существующих телескопов iPTF, Pan-STARRS, MASTER и планирующихся к введению в строй, A3T-33BM, LSST наиболее пригодны к такому типу обзоров.

Оптические данные представляют собой данные с ПЗС-матрицы, т.е. двумерную матрицу значений сигнала, записанную с $N \times M$ пикселей ПЗС-матрицы. Как правило, исследования проводят не с исходными данными (как в гамма-диапазоне и иногда в радиодиапазоне), а с уже редуцированными данными и с построенными на их основе каталогами, т.е. с обнаруженными на снимках объектами, выделенными специальной процедурой и имеющие, по крайней мере, координаты и оценку потока [16]. Исследования заключаются в сравнении потока от известных ранее объектов (например, из других каталогов, или же из каталогов своих же, более ранних наблюдений) и/или поиске новых объектов, имеющих признак предполагаемого явления (кратковременная вспышка, сверхновая, килоновая, послесвечение гамма-всплеска, или же так называемый гамма-всплеск-сирота, т.е. гамма-всплеск, не сопровождающийся вспышкой именно в гамма-диапазоне). Именно редукция и составление каталогов являются наиболее времязатратной процедурой [17].

5 Требования к поиску

Коротко рассмотрим требования к наблюдениям и поиску сигналов, сопровождающих гравитационно-волновое событие. Можно коротко сформулировать их так: быстро, глубоко, во всех диапазонах, с полным охватом возможной области локализации.

При выборе глубины (чувствительности) обзора необходимо максимизировать глубину охвата, т.е. объем пространства, просматриваемый при обзоре. Иногда этот показатель называют термином «grasp».

Очевидно, что время начала обзора должно быть минимизировано, также как и время оповещения о необходимости таких наблюдений. Ширина охвата возможных наблюдателей должна быть максимальной. Последнее, кстати, не выполняется в консорциуме LIGO/Virgo, где подписка на оповещения возможна лишь после подписания соответствующего соглашения с консорциумом.

Чрезвычайно важной является скорость обработки полученных данных, т.е. выделения новых источников и сравнения с существующими каталогами. Идеальной скоростью была бы обработка в режиме реального времени.

Важным является проведение наблюдений во всех диапазонах. В экспериментах с использованием космических гамма-детекторов это происходит автоматически (если они находятся во включенном состоянии). В обзорных радиотелескопах (LOFAR, BSA), наблюдающих одновременно большую часть небесной сферы, наблюдения возможной области локализации также происходят автоматически при совпадении части области локализации с полем зрения телескопа.

При поиске важно использовать все различные модели предполагаемого сигнала как для оптимизации поиска, так и для увеличения чувствительности поиска на представленных данных. Например, если происходит поиск периодического, но ограниченного во времени сигнала, то целесообразно использовать вейвлетный анализ с базовыми квазипериодическими функциями.

Необходимо проводить поиск в архивных данных, наблюдения которых могут соответствовать времени появления гравитационно-волнового события или же покрывать область его локализации.

Поскольку данные неоднородны, так как генерируются различными инструментами, то необходимо проведение взаимных калибровок для совместной оценки значимости найденных сигналов, а в случае их отсутствия, совместной оценки пределов на потоки излучения от предполагаемых источников. И, конечно же, необходима инфраструктура для быстрого и наиболее широкого распространения полученных результатов об обнаружении или же не обнаружении источников в области локализации гравитационно-волнового сигнала. В настоящее время эту роль успешно выполняет сеть GCN [18].

6 Вместо заключения

Поиск компонентов гравитационно-волновых событий уже начался, и в немалой степени успешность поиска будет зависеть от координированного информационного обеспечения поисковых наблюдений, эффективных алгоритмов обработки и их программной реализации.

Благодарности

Работа частично поддержана грантами РФФИ 16-07-01028 и 16-32-00489 мол_а.

Литература

- [1] Einstein, 1915, «Die Feldgleichungen der Gravitation». Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin: 844—847.
- [2] B.P. Abbot *et al.*, 2016, Phys.Rev.Lett., 116, 24, id.241103
- [3] N. Gehrels, E. Ramirez-Ruiz, and D.B. Fox, 2009, Annual Review of Astronomy and Astrophysics, Vol. 47: 567-617

- [4] V. Connaughton, E. Burns, A. Goldstein, *et al.*, 2016, arXiv:1602.03920.
- [5] R.W. Klebesadel, I.B. Strong, and R.A. Olson 1973, *Ap.J. (Letters)* 182, L85.
- [6] J. Castro-Tirado, J. Gorosabel, N. Benitez, *et al.*, 1998, *Science*, Vol. 279, Iss. 5353, p. 1011.
- [7] T. Morokuma, M. Tanaka, Y. Asakura, *et al.*, 2016, eprint arXiv:1605.03216.
- [8] Z. Bagoly, D. Szécsi, L. G. Balázs, *et al.*, 2016, eprint arXiv:1603.06611.
- [9] M. M. Kasliwal, S. B. Cenko, L. P. Singer, *et al.*, 2016, eprint arXiv:1602.08764.
- [10] S. J. Smartt, K. C. Chambers, K. W. Smith, *et al.*, 2016, eprint arXiv:1602.04156.
- [11] IceCube Neutrino Observatory <https://icecube.wisc.edu/>
- [12] Баксанская нейтринная обсерватория (БНО) ИЯИ РАН <http://www.inr.ru/bno.html>
- [13] S. Adrián-Martínez, A. Albert, M. André, *et al.*, 2016, *The Astrophysical Journal*, v. 823, article id. 65.
- [14] S. A. Tyul'bashev, V. S. Tyul'bashev, V. V. Oreshko, S. V. Logvinenko, 2016, *Astronomy Reports*, Volume 60, Issue 2, pp.220-232.
- [15] V. A. Samodurov, A. E. Rodin, M. A. Kitaeva, E. Isaev, D. V. Dumskij, D. Churakov, M. Manzyuk The daily 110MHz sky survey (BSA FIAN): online database, science goals data processing by distributed computing. Труды XVII международной конференции «Аналитика и управление данными в областях с интенсивным использованием данных» (“Data Analytics and Management in Data Intensive Domains” (DAMDID)). Обнинск: НИЯУ МИФИ, 2015. P. 127-128.
- [16] А.С. Позаненко, А.А. Вольнова, Использование астрономических каталогов для поиска аномальных объектов. Аналитика и управление данными в областях с интенсивным использованием данных: XVII Международная конференция DAMDID / RCDL'2015 (Обнинск, 13-16 октября 2015 года, Россия): Труды конференции / под ред. Л.А. Калиниченко, С.О. Старкова – Обнинск, ИАТЭ НИЯУ МИФИ, С.315, 2015.
- [17] Л. А. Калиниченко, Е. П. Гордов, А. А. Вольнова, Н. Н. Киселева, Д. А. Ковалева, О. Ю. Малков, И. Г. Окладников, Н. Л. Подколodный, А. С. Позаненко, Н. В. Пономарева, С. А. Ступников, А. З. Фазлиев Проблемы доступа к данным в исследованиях с интенсивным использованием данных в России. Аналитика и управление данными в областях с интенсивным использованием данных: XVII Международная конференция DAMDID / RCDL'2015 (Обнинск, 13-16 октября 2015 года, Россия): Труды конференции / под ред. Л.А. Калиниченко, С.О. Старкова – Обнинск, ИАТЭ НИЯУ МИФИ, С.387, 2015.
- [18] http://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3_archive.html
- [19] P. Abbott, *et al.*, 2016, eprint arXiv:1606.04856
- [20] P. Abbott, *et al.*, 2016, eprint arXiv:1607.07456
- [21] L. Li, B. Paczynski, 1998, *ApJ*, 507, L59
- [22] N. R. Tanvir, A. J. Levan, A. S. Fruchter, *et al.*, 2013, *Nature*, 500, 547

A search of counterparts of the sources of gravitational waves in different wavelength of electromagnetic radiation and with methods of cosmic rays astronomy

Alexei S. Pozanenko, Alina A. Volnova, Pavel Yu. Minaev, Vladimir A. Samodurov

We consider various signals, which may accompany transient sources of gravitational waves. Also we discuss problems of a counterpart search of gravitational transients. We briefly describe data sets and data types generating in search campaigns. We also formulate requirements for the search. As an example we consider the first gravitational wave events GW150914, GW151226 and candidate LVT151012 detected by the LIGO experiment.