

УДК 531.5

ББК 22.6, 22.3

Об открытии гравитационных волн на школьном уроке физики

Майорова Татьяна Игорьевна

ассистент кафедры физики и технических дисциплин

Ульяновский государственный педагогический университет

имени И.Н. Ульянова

г. Ульяновск, Россия

Большакова Катерина Александровна

аспирант кафедры физики и технических дисциплин, 2 год обучения,

Ульяновский государственный педагогический университет

имени И.Н. Ульянова

г. Ульяновск, Россия

Трофимов Егор Иванович

студент

Ульяновский государственный педагогический университет

имени И.Н. Ульянова

г. Ульяновск, Россия

Аннотация. Обозначена потребность освещения исторического развития открытия явления – гравитационные волны. Авторы исходят из того, что вводится учебный предмет «Астрономия» в школах. Данный факт приводит к нескольким вопросам, на которые предстоит ответить. В представленной статье делается акцент, что изложенный материал может быть использован в рамках преподавания, как астрономии, так и физики. Материал об открытии гравитационных волн подробно изложен, начиная с первых представлений об этом явлении, первых экспериментов и заканчивая вопросами, на которые возможно ответить после открытия гравитационных волн.

Ключевые слова: астрономия, гравитационные волны, методика преподавания.

1. Введение. 7 июня 2017 года подписан приказ Министерства образования и науки Российской Федерации № 506 «О внесении изменений в федеральный компонент государственных образовательных стандартов начального общего, основного общего и среднего (полного) общего образования, утвержденный приказом Министерства образования российской Федерации от 5 марта 2004 г. № 1089». Данный приказ вносит изменения в часть II федерального компонента «Среднее (полное) общее образование» по вопросу возвращения в обязательную часть учебного плана предмета «Астрономия».

Так, в 2017-2018 году в школах появился учебный предмет «Астрономия». Преподаватели, что когда-то вели астрономию, успели что-то подзабыть, а молодые – не вели ни одного урока по этому предмету. В связи с этим необходимо восстанавливать методику преподавания предмета, а кому-то научиться преподавать астрономию.

Со времени исчезновения из учебных планов школ и вновь включения в него предмета «Астрономия» прошло около 10 лет. За это время наука, в том числе и астрономия, обогатилась рядом достижений и открытий. В области астрономии самым обсуждаемым является открытие явления гравитационных волн.

Материал, представленный во второй части, представляет интерес для преподавателей астрономии, а так же тех, кто хочет подробнее знать об этом явлении. Его можно использовать как на уроках астрономии, так и на уроках физики, так как в физике изучается раздел «Механические и электромагнитные волны». Изучение гравитационных волн учащимися может происходить в рамках исследовательской работы или при написании реферата и последующего его представления на одном из уроков по физике или астрономии.

2. Об открытии гравитационных волн. Многие века наблюдение космоса ограничивалось очень узким спектром электромагнитных волн – видимым излучением. Используя глаз, как детектор, а изобретенные в 17 веке телескопы –

как усилители сигнала, было сделано немало открытий. Постепенно развитие науки позволило полагаться на всё разнообразие электромагнитных волн. Современные средства наблюдения включают уже весьма массивные радиотелескопы, инфракрасные и гамма-телескопы, расположенные на орбите Земли, позволяющие рассматривать электромагнитное взаимодействие во всех его проявлениях. Однако не только фотоны способны передавать информацию от далеких объектов. С древности известно еще одно взаимодействие, которое на космических масштабах играет, пожалуй, главную роль. Речь, конечно же, идет о гравитационном взаимодействии.

В классической теории гравитации Ньютона считалось, что гравитационное взаимодействие осуществляется с бесконечной скоростью и моментально начинает действовать на любом расстоянии. Однако, А. Эйнштейн в ОТО отказался от принципа дальнего действия и принял конечность скорости распространения гравитационного взаимодействия. [5, с. 7]

Гравитационное взаимодействие, подобно, электромагнитному, распространяется в пространстве волнообразно. Не совсем корректно называть эти гравитационные волны распространением гравитационного возмущения. Принцип эквивалентности, характерный гравитационному взаимодействию, делает понятия «гравитация» и «геометрия пространства» равнозначными. Строго говоря, не важно, что несет ответственность за траекторию пробной частицы: сила гравитации, или же искривление самого пространства. Опираясь на общую теорию относительности (далее по тексту ОТО), можно сделать вывод, что тяготение – это следствие искривления пространственно-временного континуума. Материя Вселенной при помощи гравитации меняет геометрию мира в течение миллиардов лет, а на этом фоне пробегает пространственно-временная рябь гравитационных волн. [3; 5, с. 8-9]

«Взмахните рукой — и по всей Вселенной побегут гравитационные волны. Они расходятся почти от любого движущегося предмета — прыгающего по лужайке кролика, вылетевшей из ствола пули, стартующей ракеты» - С. Попов, М. Прохоров. Призрачные волны вселенной.

Наглядным примером гравитации является натянутая ткань (например, батут). Если поместить на неё тела, то упругая поверхность будет прогибаться. Чем массивнее тело, тем сильнее деформация. Два тела, помещенные на ткань, если они достаточно массивные и «чувствуют» друг друга, в итоге, притянутся. Если же вокруг более тяжелого тела запустить более легкое, оно будет двигаться по окружности «воронки» первого. Всё это напоминает действие гравитации. Искривление же ткани соответствует искривлению пространства, что вызвано массивными телами. А теперь быстро уберем тело с нашей упругой поверхности (или, наоборот, быстро поместим на неё) – при внимательном наблюдении можно будет заметить, что по материи в стороны от тела побежали волны. Если катить тело по поверхности, то другие тела на ней не сразу почувствуют изменения – на это потребуется время. [4]

Несмотря на то, что все движущиеся материальные тела испускают гравитационные волны, обнаружить их крайне проблематично. Причиной этого является то, что гравитационное взаимодействие является среди фундаментальных взаимодействий самым слабым. Чтобы волна была ощутимой для возможностей современной техники, её источник должен быть достаточно «мощным». Помимо этого, для регистрации нужно, чтобы сигнал быстро менялся во времени, т.е. имел достаточно высокую частоту. В противном случае изменения могут быть такими медленными, что их невозможно будет обнаружить.

Какими же характеристиками должен обладать источник гравитационных волн большой интенсивности? Очевидно, что он не может излучить энергии больше, чем его энергия покоя Mc^2 , где c – скорость света. На самом деле в излучение уйдёт лишь часть от этой энергии. Какая именно, зависит от процесса, при котором возникли гравитационные волны. [5, с. 10–13]

Из закона тяготения Ньютона следует, что всякое тело массы M и радиуса R обладает на поверхности гравитационным потенциалом $\phi = GM/R$. С помощью данного потенциала можно найти отношение собственной

гравитационной энергии тела $M\phi$ к его энергии покоя. Этот безразмерный параметр будет равен

$$\frac{\phi}{c^2} = \frac{GM}{Rc^2} = \frac{r_g}{2R} \leq 1,$$

где G – гравитационная постоянная Ньютона, r_g – гравитационный радиус тела массы M .

Гравитационный радиус (или радиус Шварцшильда) определяет радиус сферы, на которой располагался бы горизонт событий, если внутри неё была равномерно распределена вся масса тела M . Более грубо – это радиус черной дыры, которая образовалась бы, если тело заданной массы сжалось до размеров точки.

Исходя из описанного соотношения, можно понять, что наибольшей гравитационной энергией будут обладать источники, радиус которых порядка гравитационного: $R \approx r_g$. В астрофизике такие объекты называют релятивистскими (сверхплотными) звездами. Чтобы понять, насколько плотными и компактными являются такие звезды, следует указать, что гравитационный радиус Солнца составляет $r_g \approx 3$ км при $R \approx 696000$ км и $r_g/R \sim 10^{-6}$. Очевидно, что помимо звезд, большой гравитационной энергией обладают черные дыры, масса которых полностью заключена внутри их горизонта событий.

Чтобы излучение было мощным, необходимо, чтобы энергия высвободилась за кратчайшее время. Процесс, вызывавший появление гравитационных волн, должен идти со скоростями, близкими к скорости света. Это делает эффективный гравитационный излучатель релятивистским не только по величине гравитационного поля, но также и по скорости динамики катаклизма.

Оценим амплитуду гравитационной волны, возбуждающей наземный детектор. Величина деформаций, искривляющих пространство на поверхности источника, $h_0 \sim r_g/R$. Как и любая сферическая волна, гравитационная теряет амплитуду обратно пропорционально пройденному расстоянию. Так, амплитуда

гравитационных волн на поверхности Земли будет $h \sim (r_g/R) \times (r_g/r)$. Если рассматривать нейтронную звезду, образовавшуюся при взрыве сверхновой в центре нашей Галактики ($r \sim 10$ кпк), и имеющей $(r_g/R) \sim 0,1$, получим, что амплитуда регистрируемых гравитационных волн будет $h \sim 10^{-18}$. Такого порядка будет относительное изменение расстояния ($h = \Delta l/l$) между двумя свободными пробными частицами, индуцированное гравитационной волной. Это соответствует изменению расстояния между двумя телами, расположенными в 1 км друг от друга, на величину порядка размеров ядра атома (10^{-15} м).

Чтобы обнаружить гравитационные волны, следует рассчитывать на гораздо меньшую амплитуду. Дело в том, что вспышки сверхновых происходят в одной галактике в среднем раз в 100 лет. При такой малой вероятности удачной находки в одной нашей Галактике, следует увеличить число наблюдаемых галактик. Достаточно крупное скопление галактик расположено в созвездии Девы. Расстояние до них порядка 10–20 Мпк. При таком расстоянии до источника амплитуда гравитационной волны, регистрируемая на Земле будет уже $h \sim 10^{-21}$. Частота событий, порождающих эти гравитационные волны, будет составлять порядка 10 шт./год. [5, с. 10–13]

2.1. Первые детекторы гравитационных волн. Необходимость измерения крайне малых величин заставляет искать различные нестандартные способы регистрации гравитационных волн. Первопроходцем в этом направлении является Джозеф Вебер (1919–2000). В качестве детектора он использовал алюминиевый цилиндр массой 1,2 тонны и длиной 1,5 метра. Данный тип антенн, называемых твердотельными, основан на следующем. Поле относительных ускорений, переносимых гравитационным излучением, должно заставлять колебаться молекулы детектора, вызывая акустические волны внутри него. Если частота вынужденных колебаний совпадет с частотой собственных колебаний детектора, то акустические вибрации будут резонансно усилены по амплитуде. Такие усиленные колебания регистрируются сетью пьезодатчиков. [3; 5, с. 14–16]

Для фильтрации гравитационных импульсов на фоне различных шумов, регистрируемых датчиками, используют несколько весьма удаленных друг от друга детекторов. Для снижения шума детекторы устанавливают на специальных антисейсмических подвесках, снабжают электромагнитной экранировкой, помещают в вакуум. Помимо этого, применяют сверхглубокое охлаждение детекторов до температуры менее 1 К, что позволяет уменьшить тепловые колебания молекул вещества – так называемый броуновский шум.

Вебер провел в 1968 – 1972 годах серию экспериментов на паре пространственно разнесенных детекторов (Чикаго – Мэриленд), пытаясь выделить случаи их одновременного срабатывания. В 1969 году на страницах *Physical Review Letters* он сообщил, что ему удалось обнаружить колебания с амплитудой 10^{-16} . Однако, это заявление было встречено весьма скептически. Можно заметить, что чувствительность датчиков Вебера, составляющая 10^{-16} , на два порядка не дотягивает до теоретической и, причем, весьма оптимистической величины 10^{-18} для сверхновой, наблюдаемой в нашей Галактике. Ошибся ли Вебер в статистической обработке результатов, или датчики сработали на какое-то другое возмущение – точно не известно. Таким образом, первая попытка обнаружить гравитационные волны успехом не увенчалась. [3; 5, с. 14–16]

2.2. *Астрофизические доказательства гравитационных волн.* Создание более совершенных и чувствительных детекторов наткнулось на различные технические проблемы, на решение которых уходили многие годы. Но экспериментаторам пришли на помощь астрофизики-наблюдатели.

В 1974 году американский радиоастроном Джозеф Тейлор и его студент Рассел Халс обнаружили двойную систему PSR B1913+16, состоящую из двух нейтронных звезд, одна из которых является радиопульсаром. При тщательном анализе оказалось, что период этой двойной системы сокращается. Причем величина этого изменения хорошо согласуется с решениями уравнений ОТО, описывающих потерю энергии звездной пары, обусловленную гравитационным излучением. Таким образом, было найдено косвенное доказательство реальности

существования гравитационного излучения в природе. За это открытие Тейлор и Халс в 1993 году получили Нобелевскую премию по физике. [5, с. 16–17]

2.3. *Миссии WMAP и PLANCK.* Косвенное доказательство существования гравитационных волн вселило в экспериментаторов уверенность. Продолжились попытки зафиксировать их. Но не всегда эти попытки оказывались результативными. Показательной является история с коллаборацией WMAP, изучающей поляризацию реликтового излучения. Для этого используется очень чувствительный микроволновый телескоп, расположенный на Южном полюсе. В 2014 году было сделано сенсационное заявление, что удалось обнаружить следы гравитационных волн в реликтовом излучении. В полученных телескопом WMAP картах поляризации были обнаружены так называемые В-моды — характерные особенности поляризации, которые могли быть вызваны сильными гравитационными волнами, возникшими в первые мгновения с момента образования Вселенной в период инфляции. Это открытие должно было добавить последнее подтверждение теории космологической инфляции. Но, несмотря на начальный ажиотаж вокруг этой новости, многие начали высказывать сомнения: не является ли эта поляризация следствием теплового излучения межзвездной пыли нашей Галактики.

Исследовательская группа, зная о такой возможности, выбрала для наблюдений участок неба, свободный от пыли, а на основе своих вычислений пришли к выводу, что пыль не может давать такую картину. Однако для однозначного отделения пыли стоило бы провести измерения на разных частотах — интенсивность излучения от пыли сильно растет с повышением частоты. В итоге точку в спорах поставили данные с космической обсерватории «Планк». Телескоп, обзоревающий всё небо и лишенный вредного действия атмосферы, показал, что пренебрегать засветкой от пыли нельзя. Полученный результат не отменяет возможность наличия в сигнале WMAP гравитационных волн, просто их интенсивность на фоне космической пыли может оказаться весьма небольшой. Но однозначно становится понятным, что первоначальное заявление

ВISER2 является слишком оптимистичным и нуждается, как минимум, в дальнейших экспериментальных проверках. [1,6]

2.4. *Интерференционные детекторы.* Впрочем, несмотря на многочисленные неудачные попытки экспериментального обнаружения гравитационных волн, учёным всё же удалось их зафиксировать. Сделать это удалось с помощью интерференционных детекторов.

Регистрация малых величин вариации метрики как относительных пространственных деформаций $h = \Delta l/l$ может идти двумя путями: либо увеличивать расстояния между пробными свободными телами, либо улучшать точность измерения изменения расстояния. Очевидно, что для твердотельных детекторов гравитационных волн первый путь невозможен из-за сложности создания массивных и протяженных твердых тел, которые, к тому же, необходимо изолировать от воздействия окружающей среды. Второй путь упирается в возможности физических принципов детектирования и большую шумовую засветку. Исходя из вышесказанного, вытекает, что наиболее оптимально измерять расстояния между двумя отдельными массивными телами, расположенными на значительном расстоянии. Делать это можно при помощи электромагнитных волн, например, лазерного излучения, наблюдая картину интерференции. [5, с. 26–27]

Впервые использовать оптический интерферометр Майкельсона для детектирования гравитационных волн предложили советские физики М. Е. Герценштейн и В. И. Пустовойт. В 1962 году они опубликовали свои идеи в статье *Журнала Экспериментальной и Теоретической Физики*.

Интерферометр, предназначенный для изучения гравитационных волн, представляет две перпендикулярные вакуумные камеры длиной в несколько километров. На конце каждого плеча интерферометра устанавливается массивное зеркало. Луч лазера, обладающего большой мощностью и строгой монохроматичностью, на входе расщепляется на два пучка, которые идут по обеим камерам, отражаются от зеркал, возвращаются обратно и соединяются в полупрозрачном зеркале. По наблюдаемой картине интерференции лучей,

прошедших разные камеры, можно определить изменение длины плеч интерферометра. Это изменение при наблюдении гравитационных волн позволит определить величину относительных деформаций. Для улучшения точности измерений американский профессор Рейн Вайс предложил увеличивать «эффективную длину» плеч интерферометра за счет многократных отражений оптического луча от пробных масс-зеркал в каждом из плеч. Таким образом, интерферометр с линейными размерами в 3 км при 100-кратных отражениях луча в каждом из плеч будет иметь эффективную длину плеча в 300 км. [5, с. 26–27]

Антенны гравитационного излучения, основанные на данном принципе, построены в США (проект LIGO – Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) и в Европе (проект Virgo). Проект LIGO состоит из двух детекторов-близнецов: один расположен на севере Тихоокеанского побережья США под Сиэтлом (Ханфорд, шт. Вашингтон), второй – на юге, у Ливингстона (шт. Луизиана). Расстояние между детекторами LIGO составляет около 3000 км, что позволяет эффективно проводить фильтрацию шумов и, по задержке сигнала, определять область неба, из которой он пришел. Антенна детектора Virgo расположена в Италии в Пизанской долине. Использование всех трёх детекторов позволяет, во-первых, снизить вероятность ложного срабатывания, а во-вторых, точнее локализовать район прихода сигнала.

Гравитационные волны даже такими совершенными детекторами были обнаружены не сразу. Два детектора LIGO проработали с 2002 по 2010 год, а Virgo действовал с 2007 по 2011 год. После безуспешных поисков было решено их модернизировать.

Усовершенствованный комплекс Advanced LIGO был запущен в начале осени 2015 года. И уже через три дня, 14 сентября на нем был зафиксирован сигнал, который тщательно проанализировали, исключив альтернативные интерпретации. И только 11 февраля 2016 года на специальной пресс-конференции ученые коллаборации LVC (LIGO) уверенно объявили о первом прямом детектировании гравитационных волн с соотношением сигнал/шум 24 и

достоверностью в 5.1σ (это соответствует одному ложному срабатыванию детектора раз в 203000 лет). [7]

2.5. *Сигналы гравитационных волн.* Расчеты показывают, что данная гравитационная волна, согласно ОТО, соответствует слиянию двух черных дыр массами 36 и 29 солнечных, находящихся друг от друга на расстоянии 350 км (при радиусе Шварцшильда порядка 210 км). Фотометрическое расстояние до системы составляет в 410 Мпк. В результате этого космического катаклизма образовалась новая черная дыра с массой 62 солнечных. Три недостающих массы Солнца (порядка 5% массы всей системы) в этой катастрофе были излучены в виде гравитационных волн. Казалось бы, наши представления о черных дырах говорят, что ничто не способно покинуть горизонта событий, даже свет. Тем более масса, которая целиком заключена внутри черной дыры. Объяснение этого феномена достаточно простое: это не чёрные дыры теряют массу; это общее количество энергии превращается из одной формы – двух разделённых несвязанных масс – в другую: единую, сильно связанную массу и гравитационное излучение. В результате сближения по спирали и слияния ничто изнутри чёрных дыр не выходит наружу, это пространство-время деформируется под воздействием потенциальной гравитационной энергии. На последней фазе слияния горизонт событий принимает наиболее эффективную форму – сферы или сфероида. Именно в самую последнюю долю секунды испускается большая часть энергии, но никакие частицы изнутри горизонта событий не выходят наружу. [8]

Гравитационные волны, образующиеся при слиянии черных дыр – весьма надежное и, пока единственное доказательство того, что системы, состоящие из двух черных дыр, существуют. Но, к сожалению, наблюдать процесс и его результат в других диапазонах невозможно. На фоне этого крайне привлекательно выглядит космический катаклизм с участием других компактных объектов – нейтронных звезд.

Нейтронные звезды представляют собой сверхплотные объекты, образующиеся после взрыва сверхновых. Вещество внутри нейтронной звезды

сжато настолько, что все электроны захвачены протонами, т.е. эта звезда состоит из нейтронной сердцевины, а ядра лёгких и тяжелых элементов образуют лишь тонкую кору на поверхности. При массах близких к солнечной массе, нейтронные звезды обладают размерами всего в 10-20 км, что дает плотность порядка 10^{17} кг/м³. Помимо такой колоссальной плотности, данные объекты имеют мощное магнитное поле с индукцией от тысяч до миллиардов тесла (у Земли эта величина не превышает 0,065 Тл). Многие нейтронные звезды при взрыве сверхновой получают большой угловой момент. В таком случае они наблюдаются как пульсары. [2]

17 августа 2017 года в 21:41:04 UTC был зафиксирован четвертый с начала наблюдений гравитационных волн сигнал. Характерным отличием данного сигнала является его длительность: если предыдущие сигналы длились не больше 3 секунд, то новый продолжался более 100 секунд. Гравитационный всплеск зафиксировали все три действующих детектора гравитационных волн. На основе задержек сигналов установлена область, из которой тот исходил: она составляет примерно 2 градуса в ширину и 15 градусов в длину и занимает 28 квадратных градуса, что эквивалентно сотням площадей Луны на небе. Данная область находится в созвездии Гидры с центром в районе звезды ψ Гидры. [9]

На 1.7 секунд позже гравитационного сигнала космическими гамма-телескопами «Ферми» и «Интеграл» был зафиксирован мощный всплеск, который длился лишь 2 секунды.

Данные о районе источника сигнала были разосланы в обсерватории всего мира для точного определения точки, откуда он пришел. Среди тысяч возможных кандидатов первым обнаружил новую светящуюся точку в галактике NGC 4993 чилийский метровый телескоп Swope. Объект 17 звездной величины был найден им спустя 11 часов после детектирования гравитационных волн. В течении часа после этого, независимо от Swope, источник нашли еще 4 обсерватории. Спустя короткое время более 70 телескопов, включая космические «Хаббл» и «Чандра», вели наблюдения объекта во всех диапазонах:

от радиочастотного до рентгеновского, что позволило получить его изображения. [2]

На основе анализа гравитационной волны был сделан вывод, что массы нейтронных звезд находится в пределах 1.1 – 1.6 солнечных, а их диаметры – около 20 км. Фотометрическое расстояние до источника оценивается в 40 Мпк. Это совпадает с расстоянием до NGC 4993. Данный источник гравитационных волн находится на порядок ближе, чем все, зафиксированные до него. [9]

2.6. Вопросы, на которые можно ответить. Благодаря наблюдению источника в самых разнообразных диапазонах, стало возможно уточнить несколько вопросов. [2]

Первый – это скорость гравитационной волны. На основе данных о расстоянии до источника и задержке сигналов, даже с различными моделями, в которых при слиянии нейтронных звезд моменты испускания гравитационных волн и света происходят неодновременно, скорость гравитационной волны с очень высокой точностью совпадает со скоростью света.

Второе – это уточнение значения постоянной Хаббла. Гравитационные волны, подобно сверхновым типа Ia, являются «стандартными свечами». Таким образом, можно определить расстояние до объекта, независимо от других измерений. Зная же величину красного смещения для источника, легко находится постоянная Хаббла. Результат с использованием гравитационных волн совпал с другими независимыми измерениями — на основе реликтового излучения и наблюдения за гравитационно-линзированными объектами. На данный момент, постоянная Хаббла примерно равна 62 – 82 км/(с · Мпк).

Третье – объяснение, откуда во Вселенной берутся золото и другие тяжелые металлы. Как известно, элементы тяжелее железа, образуются только при взрывах сверхновых, однако распространенность этих элементов оказывается слишком большой, чтобы списать это на одни только сверхновые. В данном же событии спектрометрами телескопа VLT (Very Large Telescope) и «Хаббла» было обнаружено присутствие цезия, теллура, золота и платины. По

оценкам, общая масса легких и тяжелых элементов, выброшенных в результате взрыва этой килоновой, составляет 40 масс Юпитера.

Литература.

1. Иванов И. Новые данные обсерватории Planck закрывают чересчур оптимистичную интерпретацию результатов WISEP2. [Электронный ресурс] // «Элементы большой науки»: [Сайт]. [2014]. URL: http://elementy.ru/novosti_nauki/432321 (дата обращения: 14.11.2017).
2. Королёв В. Рождение золота. Пять причин, из-за которых открытие гравитационных волн от нейтронных звезд так важно для науки. [Электронный ресурс] // N+1 Интернет-издание: [Сайт]. [2017]. URL: <https://nplus1.ru/material/2017/10/17/neutronic-gold> (дата обращения: 14.11.2017).
3. Левин А. Гравитационные волны: дорога к открытию. // «Троицкий вариант – Наука». 2016. №4 (198). С. 1–3.
4. Попов С., Прохоров М. Призрачные волны вселенной. // «Вокруг света». 2007. №2. С. 26 – 32
5. Руденко В.Н. Поиск гравитационных волн. Фрязино: «Век 2», 2007
6. Штерн Б. И снова о гравитационных волнах. // «Троицкий вариант – Наука». 2014. №13 (157). С. 3.
7. Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger
8. B. P. Abbott et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration) Phys. Rev. Lett. 116, 061102 – Published 11 February 2016 (<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.116.061102>)
9. Ethan Siegel. Ask Ethan: How Do Gravitational Waves Escape From A Black Hole?(<https://www.forbes.com/sites/startswithabang/2016/12/03/ask-ethan-how-do-gravitational-waves-escape-from-a-black-hole/>)
10. GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral. B. P. Abbott et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration) Phys. Rev. Lett. 119, 161101 – Published 16 October 2017 (<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.119.161101>)