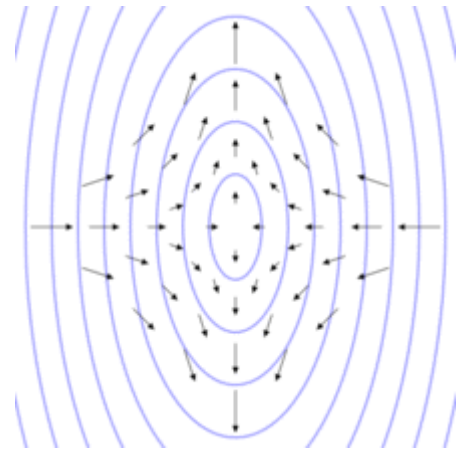


Гравитационные волны

Материал из Википедии — свободной энциклопедии

Гравита́цио́нные во́лны — изменения гравитационного поля, распространяющиеся подобно волнам. Излучаются движущимися массами, но после излучения отрываются от них и существуют независимо от этих масс^[1]. Математически связаны с возмущением метрики пространства-времени и могут быть описаны как «рябь пространства-времени»^[2].

В общей теории относительности и в большинстве других современных теорий гравитации гравитационные волны порождаются движением массивных тел с переменным ускорением^[3]. Гравитационные волны свободно распространяются в пространстве со скоростью света. Ввиду относительной слабости гравитационных сил (по сравнению с прочими) эти волны имеют весьма малую величину, с трудом поддающуюся регистрации.



Поляризованная гравитационная волна

Гравитационные волны предсказываются общей теорией относительности (ОТО). Впервые они были непосредственно обнаружены в сентябре 2015 года двумя детекторами-близнецами обсерватории LIGO, на которых были зарегистрированы гравитационные волны, возникшие, вероятно, в результате слияния двух чёрных дыр и образования одной более массивной вращающейся чёрной дыры. Косвенные свидетельства их существования были известны с 1970-х годов — ОТО предсказывает совпадающие с наблюдениями темпы сближения тесных систем двойных звёзд за счёт потери энергии на излучение гравитационных волн. Прямая регистрация гравитационных волн и их использование для определения параметров астрофизических процессов является важной задачей современной физики и астрономии.

В рамках ОТО гравитационные волны описываются решениями уравнений Эйнштейна волнового типа, представляющими собой движущееся со скоростью света (в линейном приближении) возмущение метрики пространства-времени. Проявлением этого возмущения должно быть, в частности, периодическое изменение расстояния между двумя свободно падающими (то есть не испытывающими влияния никаких сил) пробными массами. Амплитудой *h* гравитационной волны является безразмерная величина — относительное изменение расстояния. Предсказываемые максимальные амплитуды гравитационных волн от астрофизических объектов (например, компактных двойных систем) и явлений (взрывов сверхновых, слияний нейтронных звёзд, захватов звёзд чёрными дырами и т. п.) при измерениях в Солнечной системе весьма малы ($h=10^{-18}$ — 10^{-23}). Слабая (линейная) гравитационная волна согласно общей теории относительности переносит энергию и импульс, движется со скоростью света, является поперечной, квадрупольной и описывается двумя независимыми компонентами, расположенными под углом 45° друг к другу (имеет два направления поляризации).

Разные теории по-разному предсказывают скорость распространения гравитационных волн. В общей теории относительности она равна скорости света (в линейном приближении). В других теориях гравитации она может принимать любые значения, в том числе до бесконечности. По

данным первой регистрации гравитационных волн их дисперсия оказалась совместимой с безмассовым гравитоном, а скорость оценена как равная скорости света^[4].

За экспериментальное обнаружение гравитационных волн была присуждена Нобелевская премия по физике 2017 года^[5].

Содержание

Генерация гравитационных волн

Гравитационные волны, излучаемые системой двух тел

Гравитационный коллапс двойной системы

Основные точные решения уравнений Эйнштейна для гравитационных волн

Объёмные волны Бонди — Пирани — Робинсона

Метрика Такено

Метрика Розена

Метрика Переса

Цилиндрические волны Эйнштейна — Розена

Регистрация гравитационных волн

Экспериментальные подтверждения

Открытие

Дальнейшие наблюдения

Научные перспективы

Гравитационно-волновая астрономия

Гравитонный лазер

Связь на гравитационных волнах

История

См. также

Примечания

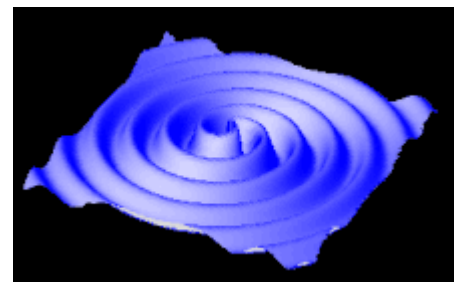
Литература

Ссылки

Генерация гравитационных волн

Гравитационную волну излучает любая материя, движущаяся с асимметричным ускорением^[7]. Для возникновения волны существенной амплитуды необходимы чрезвычайно большая масса излучателя или/и огромные ускорения, амплитуда гравитационной волны прямо пропорциональна *первой производной ускорения* и массе генератора, то есть $\sim m \frac{da}{dt}$. Однако если некоторый

объект движется ускоренно, то это означает, что на него действует некоторая сила со стороны другого объекта. В свою очередь, этот другой объект испытывает обратное действие (по 3-му закону Ньютона), при этом оказывается, что $m_1 a_1 = - m_2 a_2$. Получается, что два объекта излучают гравитационные волны только в паре,



Система из двух нейтронных звезд порождает рябь пространства-времени

причём в результате интерференции они взаимно гасятся почти полностью. Поэтому гравитационное излучение в общей теории относительности всегда носит по мультипольности характер как минимум квадрупольного излучения. Кроме того, для нерелятивистских излучателей в выражении для интенсивности излучения имеется малый параметр $\left(\frac{r_g r^2}{(cT)^3}\right)^2$,

где r_g — гравитационный радиус излучателя, r — его характерный размер, T — характерный период движения, c — скорость света в вакууме^[8].

Наиболее сильными источниками гравитационных волн являются:

- сталкивающиеся галактики (гигантские массы, очень небольшие ускорения),
- гравитационный коллапс двойной системы компактных объектов (колоссальные ускорения при довольно большой массе). Как частный и наиболее интересный случай — слияние нейтронных звёзд. У такой системы гравитационно-волновая светимость близка к максимально возможной в природе планковской светимости^[9].

Гравитационные волны, излучаемые системой двух тел

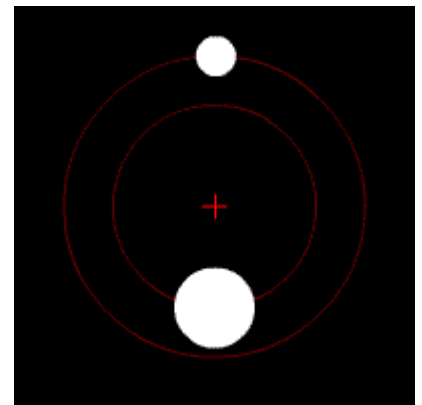
Два гравитационно связанных тела с массами m_1 и m_2 , движущиеся нерелятивистски ($v \ll c$) по круговым орбитам вокруг их общего центра масс (см. задача двух тел) на расстоянии r друг от друга, излучают гравитационные волны следующей мощности, в среднем за период^[6]:

$$-\frac{d\mathcal{E}}{dt} = \frac{32 G^4 m_1^2 m_2^2 (m_1 + m_2)}{5 c^5 r^5},$$

где G — гравитационная постоянная. Вследствие этого система теряет энергию, что приводит к сближению тел, то есть к уменьшению расстояния между ними. Скорость сближения тел:

$$\dot{r} = -\frac{64 G^3 m_1 m_2 (m_1 + m_2)}{5 c^5 r^3}.$$

Для Солнечной системы, например, наибольшее гравитационное излучение производит подсистема Солнца и Юпитера. Мощность этого излучения примерно 5 киловатт; мощность, излучаемая подсистемой Солнце — Земля, составляет около 200 Вт. Таким образом, энергия, теряемая Солнечной системой на гравитационное излучение за год, совершенно ничтожна по сравнению с характерной кинетической энергией тел^{[10][11]}. Частота излучаемых гравитационных волн равна удвоенной частоте обращения системы двух тел.



Два тела, движущиеся по круговым орбитам вокруг общего центра масс

Гравитационный коллапс двойной системы

Любая двойная звезда при вращении её компонент вокруг общего центра масс теряет энергию (как предполагается — за счёт излучения гравитационных волн) и, в конце концов, сливается воедино. Но для обычных, некомпактных, двойных звёзд этот процесс занимает очень много времени, много большее настоящего возраста Вселенной. Если же двойная компактная система состоит из пары нейтронных звёзд, чёрных дыр или их комбинации, то слияние может произойти за несколько миллионов лет. Сначала объекты сближаются, а их период обращения уменьшается. Затем на заключительном этапе происходит столкновение и

несимметричный гравитационный коллапс. Этот процесс длится доли секунды, и за это время в гравитационное излучение уходит энергия, составляющая по некоторым оценкам более 50 % от массы системы.

Основные точные решения уравнений Эйнштейна для гравитационных волн

Объёмные волны Бонди — Пирани — Робинсона

Эти волны описываются метрикой вида

$$ds^2 = (dx^0)^2 - ((dx^1)^2 + \alpha(dx^2)^2 + 2\beta(dx^2 dx^3) + \gamma(dx^3)^2).$$

Если ввести переменную $u = x^0 - x^1$ и функцию $\lambda = \alpha\gamma - \beta^2$, то из уравнений ОТО получим уравнение

$$\frac{d^2\lambda}{du^2} - \frac{1}{2}\frac{d\lambda}{du}\frac{d(\ln\lambda)}{du} - \frac{d\alpha}{du}\frac{d\gamma}{du} - \left(\frac{d\beta}{du}\right)^2 = 0.$$

Метрика Такено

имеет вид

$$ds^2 = (P + S)(dx^0)^2 - 2Sdx^0 dx^1 - (P - S)(dx^1)^2 - \alpha(dx^2)^2 - 2\beta(dx^2 dx^3) - \gamma(dx^3)^2,$$

где P, S -функции, α, β, γ удовлетворяют тому же уравнению.

Метрика Розена

$$ds^2 = e^{2\mu}[(dx^0)^2 - (dx^1)^2] - (u^2)[e^{2\nu}(dx^2)^2 - e^{-2\nu}(dx^3)^2],$$

где μ, ν удовлетворяют уравнению

$$2\frac{d\mu}{du} = u\left(\frac{d\nu}{du}\right)^2.$$

Метрика Переса

$$ds^2 = (dx^0)^2 - (dx^1)^2 - 2\varphi(dx^0 + dx^1)^2 - (dx^2)^2 - (dx^3)^2,$$

при этом $\frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2\partial x^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial x^3\partial x^3} = 0$.

Цилиндрические волны Эйнштейна — Розена

В цилиндрических координатах такие волны имеют вид

$$ds^2 = [(dx^0)^2 - dr^2]e^{2\gamma-2\psi} - (dz^2)e^{2\psi} - r^2(d\varphi^2)e^{-2\psi}$$

и выполняются

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^{02}} - \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} = 0,$$

$$\frac{\partial \gamma}{\partial r} = r \left[\left(\frac{\partial \psi}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial \psi}{\partial x^0} \right)^2 \right],$$

$$\frac{\partial \gamma}{\partial x^0} = 2r \frac{\partial \psi}{\partial r} \frac{\partial \psi}{\partial x^0}.$$

Регистрация гравитационных волн

Регистрация гравитационных волн достаточно сложна ввиду слабости последних (малого искажения метрики). Приборами для их регистрации являются детекторы гравитационных волн. Попытки обнаружения гравитационных волн предпринимаются с конца 1960-х годов. Гравитационные волны детектируемой амплитуды рождаются при коллапсе двойного пульсара. Подобные события происходят в окрестностях нашей галактики ориентировочно раз в десятилетие^[12].

С другой стороны, общая теория относительности предсказывает ускорение взаимного вращения двойных звёзд из-за потери энергии на излучение гравитационных волн, и этот эффект надёжно зафиксирован в нескольких известных системах двойных компактных объектов (в частности, пульсаров с компактными компаньонами). В 1993 году «за открытие нового типа пульсаров, давшее новые возможности в изучении гравитации» открывателям первого двойного пульсара PSR B1913+16 Расселу Халсу и Джозефу Тейлору мл. была присуждена Нобелевская премия по физике. Ускорение вращения, наблюдаемое в этой системе, полностью совпадает с предсказаниями ОТО на излучение гравитационных волн. Такое же явление зафиксировано ещё в нескольких случаях: для пульсаров PSR J0737-3039, PSR J0437-4715, SDSS J065133.338+284423.37 (обычно сокращённо J0651)^[13] и системы двойных белых карликов RX J0806. Например, расстояние между двумя компонентами А и В первой двойной звезды из двух пульсаров PSR J0737-3039 уменьшается примерно на 2,5 дюйма (6,35 см) в день из-за потерь энергии на гравитационные волны, причём это происходит в согласии с ОТО^[14]. Все эти данные интерпретируются как не прямые подтверждения существования гравитационных волн.

По оценкам наиболее сильными и достаточно частыми источниками гравитационных волн для гравитационных телескопов и антенн являются катастрофы, связанные с коллапсами двойных систем в ближайших галактиках. Ожидается, что в ближайшем будущем на усовершенствованных гравитационных детекторах будет регистрироваться несколько подобных событий в год, искажающих метрику в окрестности Земли на 10^{-21} — 10^{-23} . Первые наблюдения сигнала оптико-метрического параметрического резонанса, позволяющего обнаружить воздействие гравитационных волн от периодических источников типа тесной двойной на излучение космических мазеров, возможно, были получены на радиоастрономической обсерватории РАН, Пуцино^[15].

Ещё одной возможностью детектирования фона гравитационных волн, заполняющих Вселенную, является высокоточный тайминг удалённых пульсаров — анализ времени прихода их импульсов, которое характерным образом изменяется под действием проходящих через пространство между Землёй и пульсаром гравитационных волн. По оценкам на 2013 год,

точность тайминга необходимо поднять примерно на один порядок, чтобы можно было задетектировать фоновые волны от множества источников в нашей Вселенной, и эта задача может быть решена до конца десятилетия^[16].

Согласно современным представлениям, нашу Вселенную заполняют реликтовые гравитационные волны, появившиеся в первые моменты после Большого взрыва. Их регистрация позволит получить информацию о процессах в начале рождения Вселенной.^[9] В марте 2014 года в Гарвард-Смитсоновском центре астрофизики американской группой исследователей, работающей над проектом BICEP2, было объявлено о детектировании по поляризации реликтового излучения ненулевых тензорных возмущений в ранней Вселенной, что также является открытием этих реликтовых гравитационных волн^{[17][18]}. Однако почти сразу этот результат был оспорен, поскольку, как выяснилось, не был должным образом учтён вклад межзвёздной пыли. Один из авторов, Дж. М. Ковац (англ. *Kovac J. M.*), признал, что «с интерпретацией и освещением данных эксперимента BICEP2 участники эксперимента и научные журналисты немного поторопились»^{[19][20]}.

Экспериментальные подтверждения

Открытие

11 февраля 2016 года было объявлено об экспериментальном открытии гравитационных волн коллаборациями LIGO и VIRGO.^[22] Сигнал слияния двух чёрных дыр с амплитудой в максимуме около 10^{-21} был зарегистрирован 14 сентября 2015 года в 9:51 UTC двумя детекторами LIGO в Хэнфорде и Ливингстоне через 7 миллисекунд друг от друга, в области максимальной амплитуды сигнала (0,2 секунды) комбинированное отношение сигнал-шум составило 24:1. Сигнал был обозначен GW150914^[23]. Форма сигнала совпадает с предсказанием общей теории относительности для слияния двух чёрных дыр массами 36 и 29 солнечных; возникшая чёрная дыра должна иметь массу 62 солнечных и параметр вращения $a = 0,67$. Расстояние до источника около 1,3 миллиарда световых лет, излучённая за десятки доли секунды в слиянии энергия — эквивалент около 3 солнечных масс^{[21][24][25]}.

Благодаря практически одновременному наблюдению гравитационно-волнового события GW170817 и электромагнитного сигнала GRB 170817A впервые установлены прямые ограничения на отклонение скорости гравитационных волн от скорости света. Если такое отклонение существует, оно лежит в пределах от -3×10^{-15} до $+0,7 \times 10^{-15}$, то есть совместимо с нулём в пределах погрешности^[26].

За экспериментальное обнаружение гравитационных волн в 2017 году была присуждена Нобелевская премия по физике^[5].

Дальнейшие наблюдения

Четвёртое наблюдение было сделано ещё 14 августа 2017 года (при этом к наблюдениям подключился новый прибор (третий на планете) — европейский VIRGO, при этом точность возросла почти в 10 раз)^[27].

17 августа 2017 один из двух детекторов установки LIGO зафиксировал небывало длинный — около 100 секунд — сигнал (позже выяснилось, что волну, искажённую шумами, увидел и второй детектор LIGO, а также и VIRGO). Несколько секунд спустя мощную вспышку гамма-излучения заметили автоматические телескопы «Ферми» и «Интеграл». Благодаря такому богатому набору наблюдений удалось достаточно точно предсказать, где искать источник, и вскоре он был найден — столкновение двух нейтронных звезд (то есть килоновая) 1,1 и 1,16 массы Солнца в 130 млн световых лет от нас, в созвездии Гидры^[28].

Научные перспективы

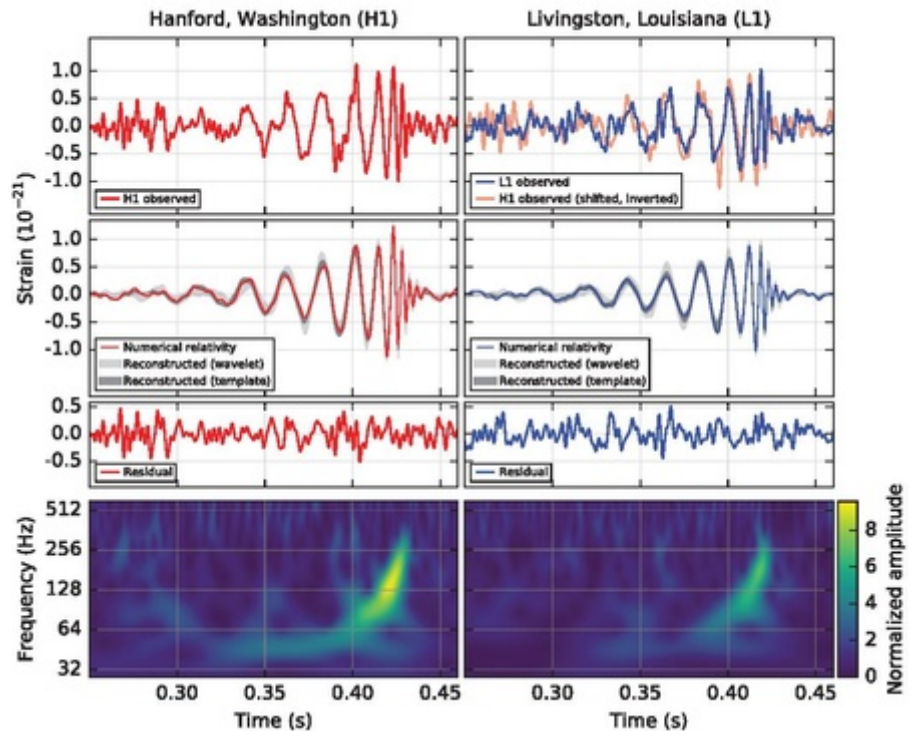
Гравитационно-волновая астрономия

По мнению американского астрофизика Лоуренса Краусса, если в будущем удастся измерить сигнатуру инфляционных гравитационных волн, это позволит существенно приблизить исследования к моменту Большого Взрыва, а также проверить инфляционную модель Вселенной и разрешить другие насущные проблемы теоретической физики и космологии^[29].

Гравитонный лазер

Идея гравитонного лазера возникла в связи с появлением лазера и открытием гравитационных волн. Предполагается, что, в силу универсального принципа корпускулярно-волнового дуализма, существуют кванты гравитационного излучения гравитоны (со спином 2). Они, как и кванты электромагнитного излучения фотоны (со спином 1), являются бозонами. Следовательно, теоретически можно создать гравитонный лазер — устройство для гравитационного излучения, подобное лазеру для электромагнитного излучения^[30].

Предполагается, что в природе явление, подобное гравитонному лазеру, может существовать в окрестности чёрных дыр^[31]. В настоящее время, из-за чрезвычайной малости гравитационной постоянной, генерация вынужденного гравитационного излучения не осуществлена. Обсуждаются лишь гипотетические возможные конструкции гравитационного лазера.



Первый зафиксированный гравитационно-волновой сигнал^[21].

Слева данные с детектора в Хэнфорде (H1), справа — в Ливингстоне (L1). Время отсчитывается от 14 сентября 2015, 09:50:45 UTC. Для визуализации сигнала он отфильтрован частотным фильтром с полосой пропускания 35—350 Герц для подавления больших флуктуаций вне диапазона высокой чувствительности детекторов, также были применены полосовые режекторные фильтры для подавления шума самих установок. Верхний ряд: напряжения h в детекторах. GW150914 сначала прибыл на L1 и через $6.9^{+0.5}_{-0.4}$ мс на H1; для визуального сравнения данные с H1 показаны на графике L1 в обращённом и сдвинутом по времени виде (чтобы учесть относительную ориентацию детекторов). Второй ряд: напряжения h от гравитационно-волнового сигнала, пропущенные через такой же полосный фильтр 35—350 Гц. Сплошная линия — результат численной относительности для системы с параметрами, совместимыми с найденными на базе изучения сигнала GW150914, полученный двумя независимыми кодами с результирующим совпадением 99,9. Серые толстые линии — области 90 % доверительной вероятности формы сигнала, восстановленные из данных детекторов двумя различными методами. Тёмно-серая линия моделирует ожидаемые сигналы от слияния чёрных дыр, светло-серая не использует астрофизических моделей, а представляет сигнал линейной комбинацией синусоидально-гауссовых вэйвлетов. Реконструкции перекрываются на 94 %. Третий ряд: Остаточные ошибки после извлечения отфильтрованного предсказания сигнала численной относительности из отфильтрованного сигнала детекторов. Нижний ряд: представление частотной карты напряжений, показывающее возрастание доминирующей частоты сигнала со временем.

Связь на гравитационных волнах

Теоретически существует возможность использовать гравитационные волны для дальней беспроводной связи; этот принцип был запатентован советским учёным В. А. Буниным в 1972 году^{[32][33]}.

Преимуществом гравитационно-волновой связи (*устар.*: грависвязи) по сравнению с радиосвязью является способность гравитационных волн проходить, почти не поглощаясь, сквозь любые вещества, тогда как электромагнитные волны сквозь электропроводящие среды (например, землю и морскую воду) практически не проникают^[34].

Работы в этом направлении велись в лабораториях СССР и в других странах^[34]. Но на практике из-за трудностей генерации и детектирования гравитационных волн, вызванных крайней малостью гравитационных сил, гравитационно-волновую связь осуществить не удалось.

В настоящее время работы по генерации и детектированию гравитационных волн в лабораторных условиях находятся на теоретической стадии^[35]. Изучаются возможности излучения гравитационных волн электродинамическими системами^[36].

Выдвинута гипотеза о возможности генерации высокочастотных гравитационных волн в конденсированной диэлектрической среде под действием интенсивного лазерного излучения и обратного процесса детектирования гравитационных волн этой средой путём преобразования гравитационного излучения в оптическое (повторение эксперимента Герца для гравитационных волн).^[37]

Гравитационно-волновая связь упоминается как атрибут техники далёкого будущего в ряде произведений научно-фантастической литературы (например, С. Снегов «Люди как боги», К. Булычёв «Похищение Тесея», С. Лукьяненко «Именем Земли» и др.).

История

История самого термина «гравитационная волна», теоретического и экспериментального поиска этих волн, а также их использования для исследований явлений, недоступных иными методами^[38].

- 1900 — Лоренц предположил, что гравитация «...может распространяться со скоростью, не большей скорости света»^[39];
- 1905 — Пуанкаре впервые ввёл термин гравитационная волна (фр. *onde gravifique*). Пуанкаре на качественном уровне снял устоявшиеся возражения Лапласа^[40] и показал, что связанные с гравитационными волнами поправки к общепринятым законам тяготения Ньютона порядка v/c сокращаются, таким образом, предположение о существовании гравитационных волн не противоречит наблюдениям^[41];
- 1916 — Эйнштейн показал, что в рамках ОТО механическая система будет передавать энергию гравитационным волнам и, грубо говоря, любое вращение относительно неподвижных звёзд должно рано или поздно остановиться, хотя, конечно, в обычных условиях потери энергии порядка $1/c^4$ ничтожны и практически не поддаются измерению (в этой работе он ещё ошибочно полагал, что механическая система, постоянно сохраняющая сферическую симметрию, может излучать гравитационные волны)^[42];
- 1918 — Эйнштейн вывел квадрупольную формулу^[43], в которой излучение гравитационных волн оказывается эффектом порядка $1/c^5$, тем самым исправив ошибку в своей предыдущей работе (осталась ошибка в коэффициенте, энергия волны в 2 раза меньше^[44]);

- 1923 — Эддингтон — поставил под сомнение физическую реальность гравитационных волн «...распространяются... со скоростью мысли». В 1934 году, при подготовке русского перевода своей монографии «Теория относительности», Эддингтон добавил несколько глав, включая главы с двумя вариантами расчётов потерь энергии вращающимся стержнем, но отметил, что использованные методы приближенных расчётов ОТО, по его мнению, неприменимы к гравитационно связанным системам, поэтому сомнения остаются^[45];
- 1937 — Эйнштейн совместно с Розеном исследовал цилиндрические волновые решения точных уравнений гравитационного поля. В ходе этих исследований у них возникли сомнения, что гравитационные волны, возможно, являются артефактом приближенных решений уравнений ОТО (известна переписка относительно рецензии на статью Эйнштейна и Розена «Существуют ли гравитационные волны?»^{[46][47][48]}). Позднее он нашёл ошибку в рассуждениях, окончательный вариант статьи с фундаментальными правками был опубликован уже в «Journal of the Franklin Institute»^[49];
- 1957 — Герман Бонди и Ричард Фейнман предложили мысленный эксперимент «трость с бусинками» в котором обосновали существование физических последствий гравитационных волн в ОТО

Затем это письмо описывает фейнмановский детектор гравитационных волн: это просто две бусинки, свободно скользящие (но с малым трением) по твёрдому стержню. Когда волны проходят через стержень, атомные силы оставляют длину стержня фиксированной, но соответствующее расстояние между двумя бусинками осциллирует. Таким образом, две бусинки трут стержень, выделяя в результате тепло.^{[50][51]}

- 1962 — Владислав Пустановойт и Михаил Герценштейн описали принципы использования интерферометров для обнаружения длинноволновых гравитационных волн^{[52][53]};
- 1964 — Филип Петерс и Джон Мэтью теоретически описали гравитационные волны, излучаемые двойными системами^{[6][54]};
- 1969 — Джозеф Вебер, основатель гравитационно-волновой астрономии, сообщает об обнаружении гравитационных волн с помощью резонансного детектора — механической гравитационной антенны^{[55][56]}. Эти сообщения порождают бурный рост работ в этом направлении во многих странах. В частности, Райнер Вайсс, один из основателей проекта LIGO, начал эксперименты в то время. Ни один из тогдашних опытов, однако, не подтвердил сообщение Вебера.
- 1978 — Джозеф Тейлор сообщил об обнаружении гравитационного излучения в двойной системе пульсара PSR B1913+16^[57]. Исследования Джозефа Тейлора и Рассела Халса заслужили Нобелевскую премию по физике за 1993 год. На начало 2015 года три пост-кеплеровских параметра, включающих уменьшение периода вследствие излучения гравитационных волн, было измерено, как минимум, для 8 подобных систем^[58];
- 2002 — Сергей Копейкин и Эдвард Фомалонт произвели с помощью радиоволновой интерферометрии со сверхдлинной базой измерения отклонения света в гравитационном поле Юпитера в динамике, что для некоторого класса гипотетических расширений ОТО позволяет оценить скорость гравитации — отличие от скорости света не должно превышать 20 %^{[59][60][61]} (данная трактовка не общепринята^[62]);
- 2006 — международная команда Марты Бургей (Обсерватория Паркса, Австралия) сообщила о существенно более точных подтверждениях ОТО и соответствия ей величины излучения гравитационных волн в системе двух пульсаров PSR J0737-3039A/B^[63];
- 2014 — астрономы Гарвард-Смитсоновского центра астрофизики (BICEP) сообщили об обнаружении первичных гравитационных волн при измерениях флуктуаций реликтового излучения^{[64][65]}. На настоящий момент (2016) обнаруженные флуктуации считаются не имеющими реликтового происхождения, а объясняются излучением пыли в Галактике^[66];

- 2016 — международная коллаборация LIGO сообщила об обнаружении события прохождения гравитационных волн GW150914. Впервые сообщено о прямом наблюдении взаимодействующих массивных тел в сверхсильных гравитационных полях со сверхвысокими относительными скоростями ($v/c > 0,5$), что позволило проверить корректность ОТО с точностью до нескольких постньютоновских членов высоких порядков. Измеренная дисперсия гравитационных волн не противоречит сделанным ранее измерениям дисперсии и верхней границы массы гипотетического гравитона ($< 1,2 \times 10^{-22}$ эВ), если он в некотором гипотетическом расширении ОТО будет существовать^{[16][21]}.
- 2017 — зарегистрирован первый гравитационно-волновой всплеск сопровождаемый электромагнитным излучением, произошедший в результате слияния двух нейтронных звёзд (GW170817).
- 2019 — зарегистрирован первый гравитационно-волновой всплеск, произошедший в результате слияния нейтронной звезды и черной дыры (S190426с ВП:БУС).

См. также

- Открытие гравитационных волн
- Численная относительность
- DECIGO
- PSR B1913+16 — двойная система — пульсар, исследование которой дало первое косвенное подтверждение существования гравитационных волн.
- PSR J0737-3039 — двойная система пульсаров, исследование которой дало весомое косвенное подтверждение существования гравитационных волн.
- TOBA

Примечания

1. *В. Б. Брагинский, А. Г. Полнарёв. Гравитационные волны* (http://www.femto.com.ua/articles/part_1/0855.html) // Физическая энциклопедия : [в 5 т.] / Гл. ред. А. М. Прохоров. — М.: Советская энциклопедия (т. 1—2); Большая Российская энциклопедия (т. 3—5), 1988—1999. — ISBN 5-85270-034-7.
2. *Алексей Левин. Гравитационные волны: дорога к открытию* (http://elementy.ru/nauchno-populyarnaya_biblioteka/432942/Gravitatsionnye_volny_doroga_k_otkrytiyu) . «Троицкий вариант». № 3(197), 23 февраля 2016 года.
3. Гравитационное излучение (<http://www.astronet.ru/db/msg/1191763>) / Брагинский В. Б. // Физика космоса: Маленькая энциклопедия (<http://www.astronet.ru/db/FK86/>) / Редкол.: Р. А. Сюняев (Гл. ред.) и др. — 2-е изд. — М.: Советская энциклопедия, 1986. — С. 224—225. — 783 с. — 70 000 экз.
4. Учёные зафиксировали предсказанные Эйнштейном гравитационные волны (<https://meduza.io/news/2016/02/11/uchenye-zafiksirovali-gravitatsionnye-volny>) .
5. The Nobel Prize in Physics 2017 (https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2017/) . www.nobelprize.org. Дата обращения 4 октября 2017.
6. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория поля* // Теоретическая физика. — 8-е изд., стереот.. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. — Т. II. — С. 475. — ISBN ISBN 5-9221-0056-4.
7. В первом приближении, если третья производная тензора квадрупольного момента масс системы отлична от нуля, то система будет излучать гравитационные волны^[6].
8. *Мизнер Ч., Торн К., Уилер Дж. Гравитация*. — М.: Мир, 1977. — Т. 3. — С. 205. — 510 с.
9. *Липунов В. М. Гравитационно-волновое небо*. // Соросовский образовательный журнал, 2000, № 4, с. 77-83.

10. В результате, большие полуоси планет не уменьшаются вследствие гравитационного излучения, а увеличиваются (для Земли на ~ 1 см в год) вследствие уменьшения массы Солнца.
11. *Мизнер Ч., Торн К., Уилер Дж.* Гравитация. — М.: Мир, 1977. — Т. 3. — С. 218. — 510 с.
12. LIGO: A Quest for Gravity Waves. (<http://astroguyz.com/2010/03/12/ligo-a-quest-for-gravity-waves/>) *Astro Guyz* March 12, 2010.
13. CfA Press Room (<http://www.cfa.harvard.edu/news/2012/pr201225.html>)
14. Космический дуэт кружится все быстрее (<http://www.rosinvest.com/news/101052/>) (недоступная ссылка). Дата обращения 18 июня 2007. Архивировано (<https://web.archive.org/web/20070927141232/http://www.rosinvest.com/news/101052/>) 27 сентября 2007 года.
15. *Сипаров С. В., Самодуров В. А.* Выделение составляющей излучения космического мазера, возникающей из-за гравитационно-волнового воздействия. (<http://www.computeroptics.smr.ru/KO/PDF/KO33-1/10.pdf>) Архивная копия (<http://web.archive.org/web/20131029191524/http://www.computeroptics.smr.ru/KO/PDF/KO33-1/10.pdf>) от 29 октября 2013 на *Wayback Machine* // Компьютерная оптика № 33 (1), 2009, с. 79.
16. *Yunes N., Siemens X.* Gravitational-Wave Tests of General Relativity with Ground-Based Detectors and Pulsar-Timing Arrays // *Living Reviews in Relativity*. — 2013. — Т. 16. — С. 9. — doi:10.12942/lrr-2013-9 (<https://dx.doi.org/10.12942%2Flrr-2013-9>) . — . — arXiv:1304.3473.
17. Открытие, достойное Нобелевской премии (<https://naked-science.ru/article/sci/gravitational-waves-big-bang-theory>)
18. *BICEP2 Collaboration, Ade P. A. R., Aikin R. W., Barkats D., Benton S. J., Bischoff C. A., Bock J. J., Brevik J. A., Buder I., Bullock E., Dowell C. D., Duband L., Filippini J. P., Fliescher S., Golwala S. R., Halpern M., Hasselfield M., Hildebrandt S. R., Hilton G. C., Hristov V. V., Irwin K. D., Karkare K. S., Kaufman J. P., Keating B. G., Kernasovskiy S. A., Kovac J. M., Kuo C. L., Leitch E. M., Lueker M., Mason P., Netterfield C. B., Nguyen H. T., O'Brient R., Ogburn IV, R. W., Orlando A., Pryke C., Reintsema C. D., Richter S., Schwarz R., Sheehy C. D., Staniszewski Z. K., Sudiwala R. V., Teply G. P., Tolan J. E., Turner A. D., Vieregg A. G., Wong C. L., Yoon K. W.* BICEP2 I: Detection Of B-mode Polarization at Degree Angular Scales // *ArXiv e-prints*. — 2014. — . — arXiv:1403.3985.
19. Вселенная, Зельдович, Массандра (http://www.gazeta.ru/science/2014/06/23_a_6081757.shtml#1326) .
20. <https://www.theguardian.com/science/2014/jun/04/gravitational-wave-discovery-dust-big-bang-inflation> (<https://www.theguardian.com/science/2014/jun/04/gravitational-wave-discovery-dust-big-bang-inflation>)
21. *B. P. Abbott (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration) et al.* Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger (<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.116.061102>) (англ.) // *Physical Review Letters* : journal. — 2016. — Vol. 116, no. 6. — doi:10.1103/PhysRevLett.116.061102 (<https://dx.doi.org/10.1103%2FPhysRevLett.116.061102>) .
22. *Алексей Понятов* Они существуют! Гравитационные волны зарегистрированы // *Наука и жизнь*. — 2016. — № 3. — URL: <http://www.nkj.ru/archive/articles/28316/>
23. Gravitational waves detected 100 years after Einstein's prediction (<http://news.ufl.edu/articles/2016/02/gravitational-waves-detected-100-years-after-einsteins-prediction.php>) — на сайте Флоридского университета
24. GRAVITATIONAL WAVES DETECTED 100 YEARS AFTER EINSTEIN'S PREDICTION (<http://public.virgo-gw.eu/gravitational-waves-detected-100-years-after-einsteins-prediction/>) (англ.). VIRGO. Дата обращения 11 февраля 2016.
25. *Emanuele Berti.* Viewpoint: The First Sounds of Merging Black Holes (<https://physics.aps.org/articles/v9/17>) (англ.). *Physical Review Letters* (11 February 2016). Дата обращения 11 февраля 2016.
26. *Abbott B. P. (LIGO Scientific Collaboration, Virgo Collaboration, Fermi Gamma-ray Burst Monitor, and INTEGRAL) et al.* Gravitational Waves and Gamma-Rays from a Binary Neutron Star Merger: GW170817 and GRB 170817A (англ.) // *The Astrophysical Journal* : journal. — IOP Publishing, 2017. — Vol. 848, no. 2. — doi:10.3847/2041-8213/aa920c (<https://dx.doi.org/10.3847%2F2041-8213%2Faa920c>) .

27. Слияние двух дыр (<https://www.svoboda.org/a/28762545.html>) . Радио Свобода. Дата обращения 21 октября 2018.
28. От нейтронных звезд до выборов в РАН (<https://www.svoboda.org/a/28952721.html>) . Радио Свобода. Дата обращения 21 октября 2018.
29. Krauss, 2018, с. 399—397.
30. К. П. Станюкович Гравитационное поле и элементарные частицы. — М., Наука, 1965. — Тираж 7600 экз. — с. 182, 244
31. *Éric Dupuis and M. B. Paranjape* New sources of gravitational wave signals: The black hole graviton laser (<https://doi.org/10.1142/S0218271818470090>) International Journal of Modern Physics D Vol. 27, No. 14, 1847009 (2018)
32. Авторское свидетельство СССР на изобретение № 347937 «Система передачи и приёма сигналов с помощью гравитационных волн» (<https://findpatent.ru/patent/34/347937.html>) . Заявлено 02.III.1959. Опубликовано 11.X.1972.
33. Открытия советских учёных, 1979, с. 129.
34. *Григорьев В. И., Мякишев Г. Я.* Силы в природе. — М.: Наука, 1973. — С. 85, 87. — Тираж 100 000 экз.
35. *Д. Д. Иваненко, Г. А. Сарданишвили* Гравитация. - М., ЛКИ, 2012 - ISBN 978-5-382-01360-2 - с. 62
36. *Гальцов Д. В., Грац Ю. В., Петухов В. И.* Излучение гравитационных волн электродинамическими системами. - М., МГУ, 1984. - 128 с.
37. *Горелик В. С., Гладышев В. О., Кауц В. Л.* О генерации и детектировании высокочастотных гравитационных волн в диэлектрических средах при их возбуждении оптическим излучением (<https://elibrary.ru/item.asp?id=32555556>) // Краткие сообщения по физике Физического института им. П. Н. Лебедева Российской Академии Наук. 2018. Т. 45. № 2. С. 10-21.
38. *Пайс А.* Научная деятельность и жизнь Альберта Эйнштейна / Пер. с англ./Под ред. акад. А. А. Логанова. — М.: Наука, 1989. — С. 269. — ISBN 5-02-014028-7.
39. *Lorentz H. A.* Considerations on Gravitation (https://en.wikisource.org/wiki/Considerations_on_Gravitation) (англ.) = Considerations de la pesanteur // Proc Koninkl akad.. — Amsterdam, 1900. — 25 April (vol. 6). — P. 603. — doi:10.1007/978-94-015-3445-1_6 (https://dx.doi.org/10.1007%2F978-94-015-3445-1_6) .
40. *Лаплас П. С.* Изложение системы мира = Le Systeme du Monde. — Л.: Наука, 1982. — С. 197.
41. *Пуанкаре А.* О динамике электрона. 1905 // К работам Анри Пуанкаре “О ДИНАМИКЕ ЭЛЕКТРОНА” = Sur la dynamique de l’électron / комментарии акад. Логанова А. А.. — ИЯИ АН СССР, 1984. — С. 18, 93.
42. *Эйнштейн А.* Приближенное интегрирование уравнений гравитационного поля = Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation : 1916 : [пер. с нем.] : [арх. (<https://archive.org/details/sitzungsberichte1916deutsch>) 26 февраля 2016] // Собрание научных трудов. — М.: Наука, 1965. — Т. 1. — С. 514—523.
43. *Эйнштейн А.* О гравитационных волнах = Über Gravitationswellen : 1918 : [пер. с нем.] : [арх. (<http://echo.mpiwg-berlin.mpg.de/ECHOdocuView?url=/permanent/echo/einstein/sitzungsberichte/W7ZU8V1E/index.meta>) 26 февраля 2016] // Собрание научных трудов. — М.: Наука, 1965. — Т. 1. — С. 631—646.
44. *Thorne, Kip S.* Multipole expansions of gravitational radiation (<http://resolver.caltech.edu/CaltechAUTHORS:THOrmp80a>) (англ.) // Reviews of Modern Physics. — 1980. — 1 April (vol. 52, iss. 2). — P. 318. — ISSN 0034-6861 (<https://www.worldcat.org/search?fq=x0:jrnl&q=n2:0034-6861>) . — doi:10.1103/RevModPhys.52.299 (<https://dx.doi.org/10.1103%2FRevModPhys.52.299>) .
45. *Эддингтон А.С.* Теория относительности = The Mathematical Theory of Relativity. — Л.: Гос. тех.-теор. изд-во, 1934. — С. 236.
46. *Корягин Владимир.* Включил заднюю (<http://lenta.ru/articles/2016/02/16/albert/>) . Лента.ру (16 февраля 2016).

47. *Kennefick Daniel*. Traveling at the Speed of Thought: Einstein and the Quest for Gravitational Waves (<https://books.google.ru/books?id=UgggNsJhCp8C&lpg=PA66&hl=ru&pg=PA83#v=onepage&q&f=false>) (англ.). — Princeton University Press, 2007. — P. 83.
48. *Einstein A.* Letter to J. T. Tate (англ.). — July 27, 1936.
49. *Эйнштейн А.*. О гравитационных волнах (Совместно с Н. Розеном) = On Gravitational Waves. (With N. Rosen) : 1937 : [пер. с англ.] // Собрание научных трудов. — М.: Наука, 1965. — Т. 2. — С. 438—449.
50. *Фейнман Р. Ф., Моринозо Ф. Б., Вагнер У. Г.* Фейнмановские лекции по гравитации = Feynman Lectures on Gravitation / Перев. с англ. Захарова А. Ф.. — М.: «Янус-К», 2000. — С. 36. — ISBN 5-8037-0049-5.
51. *Bondi Hermann*. Plane gravitational waves in general relativity (<http://www.nature.com/nature/journal/v179/n4569/abs/1791072a0.html>) (англ.) // Nature. — Vol. 179. — P. 1072—1073. — doi:10.1038/1791072a0 (<https://dx.doi.org/10.1038%2F1791072a0>) .
52. *Герцештейн М. Е., Пустовойт В. И.* К вопросу об обнаружении гравитационных волн малых частот (http://www.jetp.ac.ru/cgi-bin/dn/r_043_0605.pdf) // ЖЭТФ. — 1962. — Т. 43, вып. 2. — С. 605—607.
53. *Gertsenshtein M. E., Pustovoit V. I.* On the detection of low frequency gravitational waves (http://www.jetp.ac.ru/cgi-bin/dn/e_016_02_0433.pdf) // Soviet Physics JETP. — 1963. — Т. 16, вып. 2. — С. 433—435.
54. *Peters, P.* Gravitational Radiation and the Motion of Two Point Masses (http://www.gravity.psu.edu/numrel/jclub/jc/Peters_PR_136_B1224_1964.pdf) (англ.) // Physical Review : journal. — 1964. — Vol. 136, no. 4B. — P. 1224—1232. — doi:10.1103/PhysRev.136.B1224 (<https://dx.doi.org/10.1103%2FPhysRev.136.B1224>) . — .
55. *J. Weber*. Evidence for Discovery of Gravitational Radiation (<http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.22.1320>) // Phys. Rev. Lett.. — 1969. — Июль (т. 22, вып. 24). — С. 1320—1324. — doi:10.1103/PhysRevLett.22.1320 (<https://dx.doi.org/10.1103%2FPhysRevLett.22.1320>) .
56. *J. Weber*. Anisotropy and Polarization in the Gravitational-Radiation Experiments (<http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.25.180>) // Phys. Rev. Lett.. — 1970. — Июль (т. 25, вып. 3). — С. 180—184. — doi:10.1103/PhysRevLett.25.180 (<https://dx.doi.org/10.1103%2FPhysRevLett.25.180>) .
57. *К. М. Уилл*. Двойной пульсар, гравитационные волны и Нобелевская премия (<http://ufn.ru/ru/articles/1994/7/f/>) (рус.) // Успехи физических наук. — Российская академия наук, 1994. — Т. 164, вып. 7. — С. 765—773. — doi:10.3367/UFNr.0164.199407f.0765 (<https://dx.doi.org/10.3367%2FUFNr.0164.199407f.0765>) .
58. *R. N. Manchester*. Pulsars and gravity // International Journal of Modern Physics D. — 2015. — Март (т. 24). — doi:10.1142/S0218271815300189 (<https://dx.doi.org/10.1142%2FS0218271815300189>) . — arXiv:arXiv:1502.05474.
59. *С.М. Копейкин, Эдвард Фомалонт*. Фундаментальный предел скорости гравитации и его измерение (<http://ziv.telescopes.ru/rubric/hypothesis/?pub=1>) // Земля и Вселенная. — 2004. — Т. 3.
60. *Fomalont, Edward; Kopeikin, Sergei*. The Measurement of the Light Deflection from Jupiter: Experimental Results (англ.) // The Astrophysical Journal : journal. — IOP Publishing, 2003. — Vol. 598. — P. 704—711. — doi:10.1086/378785 (<https://dx.doi.org/10.1086%2F378785>) . — . — arXiv:astro-ph/0302294.
61. *Andrew Robinson*. Einstein: A Hundred Years of Relativity (https://books.google.ru/books?id=Px4_CQAAQBAJ&lpg=PA111&ots=tDPsDVypWT&dq=Einstein%20Kopeikin%20ligo&hl=ru&pg=PA111#v=onepage&q=Einstein%20Kopeikin%20ligo&f=false) . — Palazzo Editions, 2005. — С. 111. — ISBN 0-9545103-4-8.
62. *Will C. M.* The Confrontation between General Relativity and Experiment (<http://relativity.livingreviews.org/Articles/lrr-2014-4/>) (англ.) // Living Reviews in Relativity. — 2014. — Vol. 17, no. 4. — doi:10.12942/lrr-2014-4 (<https://dx.doi.org/10.12942%2Flrr-2014-4>) . — . — arXiv:1403.7377. Архивировано (<https://web.archive.org/web/20150319032804/http://relativity.livingreviews.org/Articles/lrr-2014-4/>) 19 марта 2015 года.

33. *Kramer, M. and Stairs, I. H. and Manchester, R. N. and McLaughlin, M. A. and Lyne, A. G. and Ferdman, R. D. and Burgay, M. and Lorimer, D. R. and Possenti, A. and D'Amico, N. and Sarkissian, J. M. and Hobbs, G. B. and Reynolds, J. E. and Freire, P. C. C. and Camilo, F.* Tests of General Relativity from Timing the Double Pulsar (<http://science.sciencemag.org/content/314/5796/97.full.pdf>) (англ.) // Science. — 2006. — March (vol. 314, iss. 5796). — P. 97—102. — doi:10.1126/science.1132305 (<https://dx.doi.org/10.1126%2Fscience.1132305>) . — arXiv:arXiv:astro-ph/0609417.
34. *Игорь Иванов.* Эксперимент BICEP2 подтверждает важнейшее предсказание теории космической инфляции (<http://elementy.ru/news/432215>) . Элементы.ру (22 марта 2014).
35. *Ade, P. A. R. and Aikin, R. W. and Barkats, D. and Benton, S. J. and Bischoff, C. A. and Bock, J. J. and Brevik, J. A. and Buder, I. and Bullock, E. and Dowell, C. D. and Duband, L. and Filippini, J. P. and Fliescher, S. and Golwala, S. R. and Halpern, M. and Hasselfield, M. and Hildebrandt, S. R. and Hilton, G. C. and Hristov, V. V. and Irwin, K. D. and Karkare, K. S. and Kaufman, J. P. and Keating, B. G. and Kernasovskiy, S. A. and Kovac, J. M. and Kuo, C. L. and Leitch, E. M. and Lueker, M. and Mason, P. and Netterfield, C. B. and Nguyen, H. T. and O'Brient, R. and Ogburn, R. W. and Orlando, A. and Pryke, C. and Reintsema, C. D. and Richter, S. and Schwarz, R. and Sheehy, C. D. and Staniszewski, Z. K. and Sudiwala, R. V. and Teply, G. P. and Tolan, J. E. and Turner, A. D. and Vieregg, A. G. and Wong, C. L. and Yoon, K. W.* Detection of **B**-Mode Polarization at Degree Angular Scales by BICEP2 (<http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.112.241101>) // Phys. Rev. Lett.. — 2014. — Июнь (т. 112, вып. 24). — doi:10.1103/PhysRevLett.112.241101 (<https://dx.doi.org/10.1103%2FPhysRevLett.112.241101>) .
36. *Верходанов Олег.* Реликтовые гравитационные волны в свете данных обсерватории Planck (<http://elementy.ru/news/432215>) . ПостНаука (29 сентября 2014).

Литература

- *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Теория поля. — Издание 7-е, исправленное. — М.: Наука, 1988. — 512 с. — («Теоретическая физика», том II). — ISBN 5-02-014420-7. — Глава XIII
- *Мизнер Ч., Торн К., Уилер Дж.* Часть VIII. Гравитационные волны // Гравитация / ред.: В. Б. Брагинский, И. Д. Новиков; пер. с англ. А. Г. Полнарёв. — М.: Мир, 1977. — Т. 3. — С. 161—283.
- *Рис М., Руффини Р., Уилер Дж.* Чёрные дыры, гравитационные волны и космология. М.: Мир, 1977
- *Гальцов Д. В., Грац Ю. В., Петухов В. И.* Излучение гравитационных волн электродинамическими системами. — М.: Издательство Московского университета, 1984.
- *Бичак И., Руденко В. Н.* Гравитационные волны в ОТО и проблема их обнаружения. М.: Изд-во МГУ, 1987
- *Руденко В. Н.* Поиск гравитационных волн. Фрязино: Век 2, 2007
- *Липунов В. М.* В мире двойных звезд. М.: Наука, 1986.
- *Липунов В. М.* Все нейтронные звезды. М.: Просвещение, 1989.
- *Липунов В. М.* Искусственная Вселенная // Соросовский Образовательный Журнал. 1998. № 6. С. 82-89.
- *Липунов В. М.* Военная тайна астрофизики // Соросовский Образовательный Журнал. № 5. С. 83-89.
- *Черепашук А. М.* Чёрные дыры в двойных звёздных системах // Соросовский Образовательный Журнал. 1997. № 3. С. 87-93.
- *Черепашук А. М.* Открытие гравитационных волн во Вселенной (http://klnran.ru/wp-content/uploads/2016/04/BVZN_17.pdf) // В защиту науки. — № 17.
- *Шакура Н. И.* Нейтронные звезды и чёрные дыры в двойных звёздных системах. М.: Знание, 1976.
- *Шкловский И. С.* Звезды, их рождение, жизнь и смерть. М.: Наука, 1984.
- *Владимиров Ю. С.* Классическая теория гравитации. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2014.

- *Конюшая Ю. П.* Открытия советских учёных. — М.: Московский рабочий, 1979. — 688 с. — 50 000 экз.
- *Jorge L. Cervantes-Cota, Salvador Galindo-Uribarri, George F. Smoot.* A Brief History of Gravitational Waves (<http://www.mdpi.com/2218-1997/2/3/22>) (англ.) // Universe. — 2016. — Vol. 2. — P. 22. — doi:10.3390/universe2030022 (<https://dx.doi.org/10.3390%2Funiverse2030022>) . — arXiv:1609.09400.
- *Лоуренс Краусс.* Почему мы существуем. Величайшая из когда-либо рассказанных историй = Krauss. The Greatest Story Ever Told - So Far: Why Are We Here?. — М.: Альпина Нон-фикшн, 2018. — 420 с. — ISBN 978-5-91671-948-2.

Ссылки

- Гравитационно-волновая астрономия: в ожидании первого зарегистрированного источника. (http://www.ufn.ru/russian/abst/abst01/abst011_r.html#a) Обзор в УФН.
- Статья о гравитационном излучении (<http://www.astronet.ru:8100/db/msg/1191763>)
- Популярный обзор на начало 2007 г. (https://web.archive.org/web/20071013165011/http://vokrugsveta.ru/publishing/vs/archives/?item_id=3003)
- Итоги обработки данных LIGO S3 в проекте Einstein@Home (<https://web.archive.org/web/20081205145336/http://www.boinc.ru/Doc/Einst/eah/s3summary/index.html>)
- Детектор гравитационных волн (<http://www.minigrail.nl>)
- Гравитационные волны. Передача А. Гордона (<https://intellect-video.com/1538/Gordon-Gravitatsionnye-volny-online/>)
- В поисках гравитационных волн. Проект LIGO (<http://www.atheizmru.ru/science/popular/golubev.htm>)
- Поиск гравитационных волн (<http://elementy.ru/lib/430706>)
- Сейсмометрия установила новые ограничения на интенсивность гравитационно-волнового шума Вселенной (<http://elementy.ru/news/432210>) // Статья на Элементы.ру
- «В ожидании волн и частиц» Документальный фильм про поиск гравитационных волн — Meduza (<https://meduza.io/feature/2016/02/11/v-ozhidanii-voln-i-chastits>)

Источник — https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=Гравитационные_волны&oldid=108072685

Эта страница в последний раз была отредактирована 7 июля 2020 в 18:51.

Текст доступен по лицензии Creative Commons Attribution-ShareAlike; в отдельных случаях могут действовать дополнительные условия.

Wikipedia® — зарегистрированный товарный знак некоммерческой организации Wikimedia Foundation, Inc.