

УДК 378 : 531.232:378.091.5

**БЕРЕСТОВОЙ Анатолий Михайлович,**

кандидат физико-математических наук, доцент, Учебно-научный профессионально-педагогический институт Украинской инженерно-педагогической академии  
e-mail: etffizika@rambler.ru

**НЕФЕДОВА Инна Витальевна,**

кандидат физико-математических наук, доцент, Учебно-научный профессионально-педагогический институт Украинской инженерно-педагогической академии  
e-mail: inna7str@gmail.com

**БУЛГАКОВА Ирина Владимировна,**

старший преподаватель,  
Учебно-научный профессионально-педагогический институт Украинской инженерно-педагогической академии  
e-mail: pokataeva2@ua.ua

## РАСКРЫВАЕМ ЕЩЕ ОДНУ ТАЙНУ ВСЕЛЕННОЙ

*В статье рассмотрена методика изложения материала з дисциплины «Концепции современного естествознания», посвященному одному из четырех фундаментальных взаимодействий – гравитационному. Стимулом ее написания явилось сравнительно недавнее сообщение об открытии гравитационных волн, которое блестяще подтвердило многолетние кропотливые усилия физиков-теоретиков.*

***Ключевые слова:** гравитационное поле; гравитационная волна, ее характеристика; источники волн; лазерный гравитационно-волновой интерферометр.*

**Постановка проблемы.** При изучении дисциплины «Концепции современного естествознания» рассматриваются ядерное, электромагнитное, слабое и, наконец, гравитационное взаимодействие. Гравитационные силы действуют на больших расстояниях, являются силами притяжения и чрезвычайно малые по величине. Но если число взаимодействующих частиц достаточно велико (например, Солнце или звезды), то при определенных условиях гравитационные силы могут стать значительно больше остальных даже ядерных. Гравитационные силы сыграли важную роль в происхождении и эволюции Вселенной и определяют ее будущее [1; 2; 3].

**Анализ основных исследований и публикаций. Цель статьи.** Действие гравитационных сил мы ощущаем на каждом шагу в виде силы тяжести, веса тела и пр. Математическое выражение этих закономерностей заключено в законе всемирного тяготения, предложенным Ньютоном (1687). Гравитационное поле возникает вокруг тел любой массы, но проявляет себя, когда массы тел достаточно велики – планеты, звезды, галактики. Если тела покоятся или движутся равномерно, то говорят о стационарном гравитационном поле (не зависящим от времени), создаваемом этими телами. Ньютонская гравитация не нуждается в таком понятии, как гравитационная волна. Но физики частенько оперируют таким понятием как волна. Но далеко не все четко

представляют, что такое гравитационные волна и, прежде всего, каковы источники этих волн и каким образом они образуются и где их можно искать.

**Изложение основного материала исследований.** Прежде чем разобраться с гравитационными волнами, следует вспомнить те волновые процессы, с которыми студенты знакомились в курсе физики. Самыми простыми являются механические волны, возникающими при наличии среды (вода, воздух, металл). Например, волны на водной поверхности от упавшего предмета, являются механическими волнами. Помните высказывание Козьмы Пруtkова: «бросая в воду камешки, смотри на круги, ими образуемые, иначе это будет пустою забавою» [4]. Глядя на волны, мы замечаем, что любая из точек этой волны колеблется около положения равновесия (такая волна называется поперечной); но гребни волны разбегаются с определенной скоростью и несут на себе импульс и энергию. В продольных волнах колебания частиц происходит вдоль направления движения. Пример таких волн – звуковые.

Студенты также знакомы с электромагнитными волнами, для распространения которых среда не нужна – колеблются уже не частицы вещества, а напряженность электрического и магнитного полей, которые воедино связал Максвелл в своих уравнениях. Вектор  $\vec{E}$  и вектор  $\vec{B}$  колеблются в плоскости, перпендикулярной направлению распространения; такая волна также является поперечной и в вакууме распространяется со скоростью света. Генерируют такие волны с помощью колебательных контуров, в простейшем случае состоящих из конденсатора и индуктивности. Причиной электромагнитных волн является движение зарядов (чаще всего это электроны) с переменным ускорением. Излучение электромагнитного поля имеет дипольный характер (так как существуют электрические заряды разных знаков).

Для обнаружения электромагнитных волн низкой частоты, например, можно воспользоваться заряженным шариком, подвешенным на нити. Под воздействием вектора напряженности электрического поля электромагнитной волны шарик будет совершать колебания относительно положения равновесия. В случае высокочастотного поля электромагнитные волны в принимающей антенне вызывает высокочастотный электрический ток.

Из общей теории относительности (ОТО) А. Эйнштейна следовало ряд удивительных выводов. Например, замедление времени в полях сильного тяготения, космологическое красное смещение. Из ОТО следовало также существование гравитационных волн. Эйнштейн отказался от закона всемирного тяготения и выдвинул идею, состоящую в том, что гравитация проявляется в искривлении пространства и времени. Все события развиваются в четырехмерном пространстве: три пространственные координаты и одна – временная. Как прояснилось позже, гравитационные волны возникают и особенно заметны при движении массивных тел с изменяющимся ускорением и связаны с возмущением пространства-времени и образованием пространственно-временной ряби. Следуя этим представлениям, амплитуда гравитационной волны пропорциональна массе и первой производной ускорения.

Первую прямую попытку регистрации гравитационных волн осуществил американский физик Дж. Вебер (1969). В качестве детектора он использовал два алюминиевых цилиндра массой 1,5 т, разнесенных на расстояние 1000 км. Кварцевые пьезоэлектрические датчики прикреплялись к цилиндрам и были включены в схему совпадений (для снижения влияния посторонних помех) и могли регистрировать колебания, возникающие в цилиндрах. В течение трех месяцев зарегистрировано около двадцати событий, по мнению автора, источник которых находится в центре нашей Галактики. Однако опыты были поставлены под сомнение – из них следовала недопустимо большая мощность зарегистрированного излучения – в гравитационное излучение ежегодно переходит масса, равная ста тысячам солнечных масс.

Принципиальное отличие эйнштейновской теории тяготения от ньютоновской можно проследить на характере движения двойной звездной системы. По Ньютону такие звезды при вращении не теряют энергию и в таком состоянии находятся бесконечно долго. По Эйнштейну же выходило, что двойная система звезд непрерывно теряет энергию на излучение гравитационных волн. Причем, частота гравитационного излучения (волны) равна удвоенной частоте орбитального движения [5]. Оценив мощность гравитационной волны,

излучаемую двойной системой Солнце-Земля – а это 200 Вт (что меньше мощности обыкновенного паяльника), мы поймем, что обнаружить экспериментально такие волны невозможно. Так что же делать? Как мы только отметили, Обнаружение гравитационных волн исследователи-теоретики особые надежды возлагали, прежде всего, на двойные звездные системы: нейтронные звезды, вращающиеся вокруг общего центра тяжести; вращение двух черных дыр; движение нейтронной звезды относительно массивной черной дыры. При взаимном движении (а они имеют огромные массы порядка десятков солнечных масс, сосредоточенных в относительно малых объемах) тела сближаются, уменьшается их период обращения.

Американские радиоастрономы Р. Хапс Дж. Тейлор начиная с 1974 г. тщательно измеряли периоды обращения двойной звездной системы PSR B1913+16 (одна звезда нейтронная с периодом вращения 10 оборотов в секунду), находящейся на расстоянии 21 000 св. лет. Период обращения вокруг общего центра составляет 7,75 ч и сокращается на 76 мкс за год (рис. 1), а это связано с уменьшением энергии системы за счет излучения

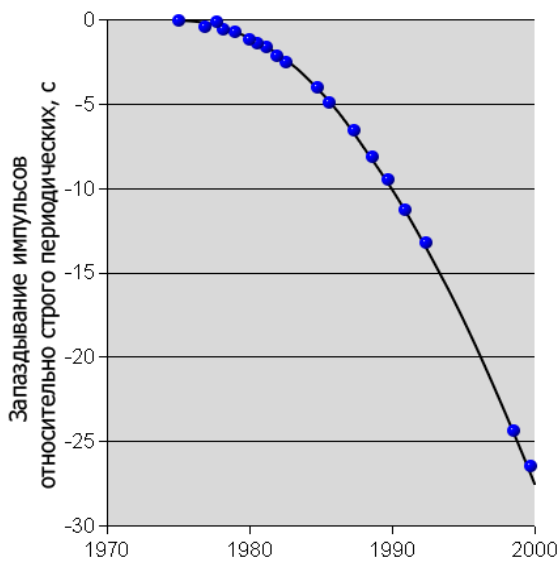


Рис. 1. Уменьшение периода обращения двойной звездной системы PSR B1913+16 специалисты связывают с излучением гравитационных волн

гравитационных волн, что и явилось косвенным подтверждением их существования. В 1993 г. авторы удостоены Нобелевской премии по физике «за открытие нового типа пульсаров, давшее новые возможности в изучении гравитации».

Мощность гравитационного излучения достигает колоссального значения при слиянии двойных систем звезд. Сам процесс слияния может занимать много миллионов лет (в рассмотренном случае столкновение произойдет через 33 млн. лет), но заключительный этап сближения и слияния – гравитационный коллапс двойной системы – происходит за доли секунды. При распространении гравитационной волны происходит растяжение пространства в одном направлении и сжатие его в перпендикулярном направлении (такой вид движения волн назван квадрупольным излучением).

Все тела, находящиеся в области распространения волны, сопротивляются этому за счет сил упругости и деформируются, испытывая сжатие и растяжение. Таким образом, получается, что пространство-время является носителем

гравитационных волн, напоминая звуковые волны, средой для распространения которых является воздух. Не является ли деформированное пространство-время тем мировым эфиром, который был предложен Х. Гюйгенсом?

Казалось бы, что зарегистрировать гравитационную волну очень просто: подвесить пробную массу (как это сделано в опытах Вебера) и ждать, когда проходящая волна отклонит эту массу от положения равновесия. Но в силу чрезмерно малой энергии волны такие отклонения ничтожно малы. Поэтому для увеличения чувствительности установки используют две свободно подвешенные массы, расположенные на максимально возможном удалении. Волна вынуждает эти массы смещаться относительно друг друга – увеличивая или уменьшая расстояние между ними – с периодом гравитационной волны.

Для четкого понимания процесса регистрации гравитационных волн полезно вспомнить устройство интерферометра, связанного с именем Майкельсона, с помощью которого ученый пытался обнаружить светонесущий эфир, в котором распространяются электромагнитные волны (физикам опыт известен как отрицательный опыт). В интерферометре пучок света расщеплялся на два пучка, которые расходятся под прямым углом друг к другу, отражаются от равноудаленных зеркал, накладываются друг на друга и дают интерференционную картину (чаще всего в виде чередующихся темных и светлых полос). Полезно вспомнить условия наблюдения устойчивой картины: интерферирующие лучи должны иметь одинаковые частоты, постоянную разность начальных фаз колебаний в

данной точке и колебания вектора напряженности электрического поля должны происходить в одной плоскости.

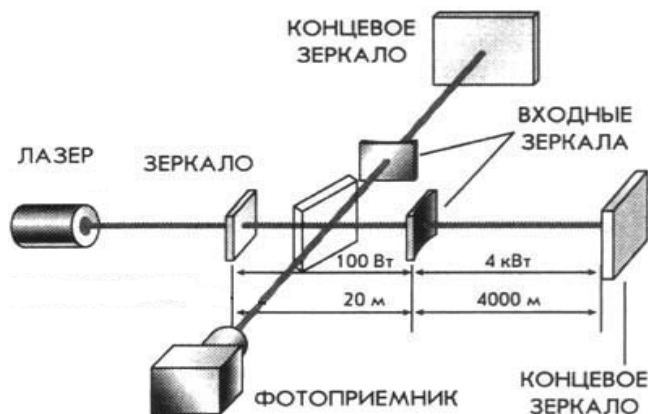


Рис. 2. Принципиальная схема лазерного гравитационного интерферометра

перпендикулярных направлениях (плечах интерферометра). В плечах интерферометра подвешены входные и концевые зеркала, специальным образом изолированные от различных шумов. Эти зеркала играют роль пробных масс (диаметр зеркал – 25 см, масса – около 100 кг). С целью увеличения длины пробега лазерного луча (укорочения плеч интерферометра) введен резонатор Фабри-Перо. Когда проходит гравитационная волна, эти зеркала чуть-чуть

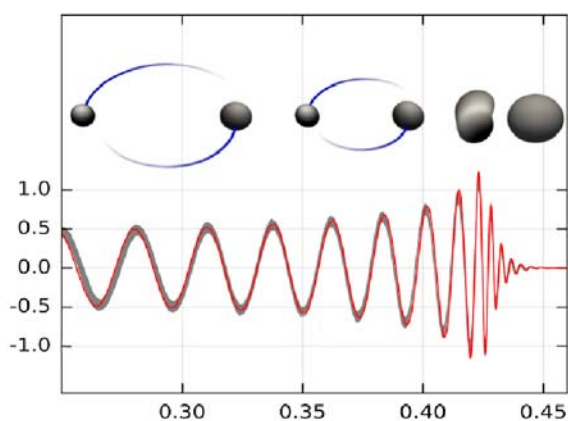


Рис. 3. Спектр гравитационной волны (по оси ординат – относительное сжатие-растяжение пространства-времени, по оси абсцисс – время до слияния и в момент слияния в секундах)

изменяющейся амплитуды. Экспериментаторам удалось разобраться в многочисленных шумах, превосходящих амплитуду гравитационной волны. Кроме того, были проведены симуляции (компьютерные моделирования) столкновения и слияния черных дыр. Результатом многолетних трудов удалось оценить значение  $\Delta L \sim 10^{-17}$  м и так называемое ожидаемое растяжение  $\Delta L/L \sim 10^{-21}$ .

Около 1,3 млрд. лет тому назад в области Вселенной, находящейся на расстоянии 1,3 млрд. световых лет от нас две черные дыры, вращающиеся вокруг общего центра в течение многих миллионов лет, за полсекунды, слились воедино. Мощнейший поток гравитационных волн отправился в далекое путешествие и достиг Земли 14 сентября 2015 года и зафиксирован двумя гравитационными детекторами, находящимися на расстоянии 1000 км друг от друга. Сначала сигнал зафиксирован в Ливингстоне, штат Луизиана, а спустя 7 мс в Хенфорде, штат Вашингтон с возрастающей частотой от 35 до 250 Гц (рис. 3). Анализ спектра показал, что взаимодействующие черные дыры имели достаточно большие массы – до слияния 29 и 36 солнечных масс, после слияния масса новой дыры оказалась равной

Среди большой разновидности гравитационных детекторов мы остановимся на проекте ЛИГО (LIGO – Лазерно-интерферометрическая гравитационно-волновая обсерватория, 1992), результатом многолетней работы которой была регистрация гравитационных волн от двух слившихся черных дыр.

Гравитационный детектор это лазерный интерферометр с двумя плечами примерно по  $L=4$  км (рис.2). Стабилизированный по частоте излучения лазер (с длиной волны 1,06 мкм не видимой глазом) посылает луч, который разделяется в двух взаимно

начинают колебаться в определенной фазе. Свет отражается от этих зеркал, потом опять собирается на делителе и интерферирует на детекторе. Когда зеркала висят свободно (то есть на них не действует гравитационная волна), свет приходит на детектор в определенной фазе. Когда зеркала начинают смещаться в горизонтальной плоскости и под действием гравитационной волны в самом благоприятном случае падающей перпендикулярно плоскости интерферометра, смещают зеркала, увеличивая первое плечо ( $L+\Delta L$ ) и сжимая другое ( $L-\Delta L$ ). В последующий момент первое плечо уменьшается, а другое – увеличивается. В начале измерений в интерференционной картине наблюдается темнота. При прохождении волны интерференционная картина нарушается, фаза колебаний лазерного луча смещается в одну или другую сторону, появляются просветленные области, что и фиксируется фотоприемником в виде

62 массам Солнца. Три массы ушло на поразительно большую энергию излучения – выделилась гравитационная энергия в десятки раз большая, излучаемой всеми звездами Вселенной. Таким образом, состоялась самая первая регистрация гравитационных волн.

**Выводы.** Предложенная методика и последовательность изложения темы о гравитационных волнах – структура гравитационной волны, источники волн, методы их регистрации, предшествующие эксперименты и эксперимент по программе ЛИГО – показала свою эффективность. Для повышения интереса при изложении данного материала мы бы рекомендовали лектору начать свое выступление со слов, приведенных чуть выше: «Один миллиард триста миллионов лет тому назад вращались вокруг общего центра две черные дыры, постепенно приближаясь друг к другу. В последнюю секунду произошло их слияние и возникшие гравитационные волны отправились в далекое путешествие...». Очевидно, что в данной работе охвачен узкий круг источников гравитационных волн – только двойные звездные системы. И за пределами остались не менее интересные и полные неожиданности исследования и других источников мощных гравитационных волн – гравитационный коллапс звезды, приводящий к образованию нейтронных звезд, черных дыр и появлению сверхновых звезд, столкновения галактик. В скором времени мы станем свидетелями потрясающих и изумительных открытий, связанных с запуском космического телескопа LISA с длиной плеч интерферометра 5 км.

#### Список использованной литературы

1. Новиков И.Д. Черные дыры и Вселенная. / И.Д. Новиков. – М. : Молодая гвардия, 1985. –190 с.
2. Моше Д. Астрономия / Д. Моше. – М. : Просвещение, 1985. – 256 с.
3. Хокинг С. Краткая история времени от большого взрыва до черных дыр / С. Хокинг. – СПб. : Амфора, 2001 – 100 с.
4. Сочинения Козьмы Пруткова. – М. : Художественная литература, 1976. – 381 с.
5. Шкловский И.С. Звезды: их рождение, жизнь и смерть / И.С. Шкловсий. – М. : Наука, 1984. – 384 с.

#### Referenes

1. Novikov, I.D. (1985). *Black Holes and the Universe*. Moscow: The Young Guard. (in. Rus.)
2. Moshe D. (1985). *Astronomy*. Moscow: Enlightenment. (in. Rus.)
3. Hawking, S. (2001). *A Brief History of Time From the Big Bang to Black Holes*. St. Petersburg. (in. Rus.)
4. *Compositions by Kozma Prutkov*. (1976). Moscow: Fiction. (in. Rus.)
5. Shklovski, I.S. (1984). *Stars: their birth, life and death*. Moscow: Science. (in. Rus.)

#### **BERESTOVOY Anatolii,**

Ph.D in Physics-and-Mathematics, Associate Professor,  
Educational-and-Scientific Professional-and-Pedagogical Institute of the Ukrainian Engineering-and-Pedagogical Academy  
e-mail: etffizika@rambler.ru

#### **NEFYODOVA Inna,**

Ph.D in Physics-and-Mathematics, Associate Professor,  
Educational-and-Scientific Professional-and-Pedagogical Institute of the Ukrainian Engineering-and-Pedagogical Academy  
e-mail: inna7str@gmail.com

#### **BULHAKOVA Iryna,**

Senior Lecturer,  
Educational-and-Scientific Professional-and-Pedagogical Institute of the Ukrainian Engineering-and-Pedagogical Academy  
e-mail: pokataeva2@ya.ua

### **WE ARE DISCLOSING ONE MORE MYSTERY OF THE UNIVERSE**

*Abstract.* This article is devoted to one of the four known fundamental interactions – gravitational interaction. This publication was stimulated by the relatively recent recorded gravity waves under the project code-named LIGO (abbreviated name – laser-interferometric gravitational wave observatory, USA). Gravitational interaction is an important section in the course "Modern Natural Science Concepts". Systematic presentation of the material presented in this work, in our opinion, will allow students to more deeply internalize the program material in the study of this discipline. It is possible that it will be useful for teachers conducting similar courses.

*Gravity, body weight – some manifestations of the action of gravitational forces. Newton's law of universal gravitation – a mathematical expression of the forces. According to this law, the interaction of bodies is*

*caused by the gravitational field. The concept of a gravitational wave is absent here and appears in the general theory of relativity (GTR) of Einstein. It is useful for students to recall the formation of mechanical waves mechanism, for the propagation of which a medium is needed, and electromagnetic waves, for which the medium is not needed, the vector of electric and magnetic field strength oscillates in the wave. In accordance with GRT, gravitational waves arise and are especially noticeable when massive bodies with varying acceleration are moving. Gravity manifests itself in the curvature of space-time and in the formation of space-time ripples.*

*Special hopes were placed on binary star systems: neutron stars revolving around a common center of gravity, rotation of two black holes, motion of a neutron star relative to a massive black hole.*

*In this paper, we briefly considered the first unsuccessful Weber's experience in the detection of gravitational waves. The results of long-term observations of the motion character of the double star system PSR B1913 + 16 are considered. The observed shortening of the rotation period of one of the two components the radio astronomers R. Haps and J. Taylor interpreted as radiation of gravitational wave energy, for which they became Nobel Prize laureates.*

*The power of gravitational radiation reaches a colossal value when the binary systems of stars merge: neutron stars that rotate around a common center of gravity, the rotation of two black holes, the motion of a neutron star relative to a massive black hole. The principle of operation of a laser interferometer, the features of its operation are described. The gravitational detector according to the LIGO program recorded the moment of the fusion of two black holes, which occurred 1.3 million years ago. The results of the experiment are presented. Analysis of the spectrum showed that the interacting black holes had sufficiently large masses – 29 and 36 solar masses before merging. After the confluence, the mass of the new hole turned out to be 62 masses of the Sun. Three masses were spent on radiation in the form of gravitational waves.*

*In this work covered by a small number of sources of gravitational waves – only binary star system. And beyond were the equally interesting and full surprises of research and other sources of powerful gravitational waves-the gravitational collapse of the star, which leads to the formation of neutron stars, black holes and the appearance of supernovae, the collision of galaxies. Soon we will witness astounding and amazing discoveries connected with the launch of the LISA space telescope with an arm length of 5 km interferometer.*

**Key word:** *Gravitational field; gravitational wave, its characteristics; wave source; laser gravitational-wave interferometer.*

*Одержано редакцією 12.06.2017  
Прийнято до публікації 16.06.2017*