

## ГРАВИТАЦИОННО-ВОЛНОВОЕ НЕБО

В. М. ЛИПУНОВ

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

### GRAVITATIONAL WAVE SKY

V. M. LIPUNOV

*After eighty years since the theoretical prediction of gravitational waves, mankind has approached closer to their detection. In early 2001 new detectors will be put in operation, enabling us to open the gravitational wave firmament.*

*Через восемьдесят лет после теоретического предсказания гравитационных волн Альбертом Эйнштейном человечество вплотную приблизилось к их открытию. В начале 2001 года вступят в строй первые детекторы, способные открыть перед нами гравитационно-волновой небосвод.*

[www.issep.rssi.ru](http://www.issep.rssi.ru)

В 1916 году сразу после создания общей теории относительности (ОТО) Альберт Эйнштейн понял, что тяготение, которое он интерпретировал как кривизну пространства–времени, не только связано с массами, но также способно, подобно электромагнитным волнам, свободно распространяться в пустом пространстве. Пространство и время, подобно водной глади, способны беспокойно волноваться, покрывая Вселенную пространственно-временной рябью. В сущности поэзия этих слов физически очень приземлена: многочисленные атомные часы и стандартные метры, разбросанные нашим воображением по Вселенной, будут периодически ускоряться и замедляться, расширяться и сужаться подобно тому, как колеблются электрические заряды в телевизионных антеннах на наших крышах. Стандартный метр, расположенный поперек гравитационной волны, будет периодически изменять свою длину на величину  $h$  метров. Безразмерное число  $h$  называется амплитудой волны. На самом деле одного числа недостаточно для описания гравитационной волны — амплитуда колебаний также зависит от направления отрезка и типа самой волны (например, протяженное твердое тело будет деформироваться по-разному в разных направлениях).

Первая гравитационно-волновая антенна как раз и была протяженным твердым телом в форме цилиндра. Ее построил американский физик Джозеф Вебер в начале 60-х годов в Мэриленде (США). Чувствительные пьезодатчики, расположенные по бокам цилиндра, были способны регистрировать сигнал с амплитудой  $10^{-15}$ , что при размере цилиндра в 1 м дает абсолютный сдвиг порядка размера ядра атома ( $10^{-13}$  см). И такой сигнал был обнаружен. Но найти подходящий его источник на Земле или в космосе не удалось. Никто не смог ни подтвердить, ни опровергнуть реальность сигнала, и международное сообщество отнесло его на счет неучтенных шумов, тем более что современные твердотельные детекторы, которые в тысячи раз чувствительнее, до сих пор молчат. В прошлом году я побывал вблизи Рима на самой чувствительной антенне под названием “Нептун”. Зрелище впечатляющее! Как любит шутить руководитель эксперимента профессор Пищела: “Здесь,

под Римом, самое холодное место Вселенной!” Тамшний цилиндр для подавления тепловых колебаний охлаждается жидким гелием до температуры 0,5 К, а температура Вселенной выше: 2,7 К.

Итак, ученые последние 30 лет безуспешно пытаются открыть волны пространства–времени. Тем не менее мы уверены, что Вселенная буквально наполнена волнами Эйнштейна и человечество вплотную приблизилось к их открытию.

Дело в том, что физики решили вернуться к простейшему варианту – поставить на пути волны обычные отрезки! Лучшей здесь оказалась схема двух взаимно перпендикулярных отрезков, каждый из которых является плечом старого доброго интерферометра Майкельсона, только интерферометра очень большого. Например, в проекте LIGO (Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory) длина плеча равна 4 км! Это, как надеются создатели, повысит чувствительность в тысячи раз и позволит достигнуть величины  $h = 10^{-21}$ .

## КАК ИЗЛУЧАЮТСЯ ГРАВИТАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ

Кто и что излучает гравитационные волны? Например, вы, уважаемый читатель, потрясите рукой – и во все стороны Вселенной со скоростью света помчатся волны пространства–времени. Они нигде не поглотятся и будут вечным свидетельством вашего существования. След от прочтения этой статьи останется вечным. Другое дело, что он будет очень слабым. А как создать более мощный сигнал?

В 1918 году А. Эйнштейн вывел формулу для интенсивности волны. Оказалось, что получать гравитационные волны и легче и сложнее, чем электромагнитные. Легче потому, что тело, излучающее гравитационные волны, необязательно должно быть заряженным. А труднее потому, что для появления волн пространства и времени нужно не просто ускоренное движение тела, а такое ускоренное движение, при котором менялся бы квадрупольный момент тела. Другими словами, тело должно менять свое место в пространстве таким образом, чтобы сила притяжения вне его менялась неравномерно. Например, сплюснутая вдоль оси вращения репа ничего не излучает, но стоит проткнуть ее осью вращения под углом к оси симметрии – и вы получили источник гравитационных волн, уносящих энергию вращения репы.

Сначала физики собирались взять какое-нибудь тело побольше и тряхнуть посильнее. Например, рассматривался вариант подрыва ядерного устройства для регистрации гравитационных волн. Слава Богу, оказалось, что даже при взрыве ядерной бомбы мощность

излучения гравитационных волн слишком мала для их регистрации.

Советский астрофизик Л.М. Озерной в 1965 году обратил внимание на то, что специально подрывать ничего не надо, потому что во Вселенной постоянно что-то подрывается. Самыми мощными и довольно частыми (раз в несколько десятков лет) являются взрывы сверхновых звезд. При взрыве сверхновой выделяется до 10% полной энергии звезды, то есть порядка

$$0,1 Mc^2 = 2 \cdot 10^{53} \text{ эрг} \frac{M}{M_{\odot}}.$$

Коллапс продолжается тысячную долю секунды, и, следовательно, характерная частота гравитационной волны должна быть порядка 1000 Гц.

Однако взрыв должен быть несимметричным, иначе формула Эйнштейна не сработает. К сожалению, до сих пор ничего не было известно о том, насколько взрыв сверхновой звезды может быть асимметричным. Тем не менее гравитационные детекторы строились в расчете именно на сверхновые. Оценим, какова может быть амплитуда гравитационной волны, рожденной в нашей Галактике. Это можно легко сделать, воспользовавшись законом сохранения энергии, уносимой гравитационной волной, и тем фактом, что поток энергии пропорционален квадрату амплитуды волны:

$$h^2 R^2 = \text{const}.$$

Следовательно, около Земли амплитуда волны

$$h = h_0 \frac{R_*}{R},$$

где  $R_*$  – размер коллапсирующего тела,  $R$  – расстояние до источника, а  $h_0$  – амплитуда волны вблизи источника. Последняя величина полностью определяется коэффициентом конвертации полной энергии в гравитационные волны:

$$h_0 = \alpha^{1/2}.$$

Если коллапс сопровождается образованием черной дыры или нейтронной звезды, размер которых практически равен гравитационному радиусу:

$$R_g = \frac{2GM}{c^2} \approx 3 \text{ км} \frac{M}{M_{\odot}},$$

то получаем ожидаемую амплитуду вблизи детектора

$$h = \alpha^{1/2} \frac{R_g}{R} = \alpha^{1/2} \cdot 10^{-16} \frac{m}{d}.$$

В последней формуле принята астрономическая система единиц,  $m$  – масса в единицах масс Солнца, а расстояние  $d$  – в килопарсеках (кпк).

Например, если взрыв происходит в центре нашей Галактики, до которого примерно 10 кпк, при конвертации  $\alpha = 1\%$  ожидаемая амплитуда оказывается равной  $10^{-18}$ , что вполне доступно современным твердотельным детекторам типа “Нептун”. На рис. 1 представлены карты гравитационно-волнового неба, рассчитанные по распределению галактик до 30 Мпк. При расчете полагалось, что при взрыве сверхновой гравитационные волны уносят 1/100 общей энергии. Но реальная эффективность излучения гравитационных волн  $\alpha$  может быть в миллионы раз ниже, и тогда даже строящиеся детекторы будут бессильны. Не в этом ли причина их молчания?

Идеальным источником волн пространства–времени должны быть системы двойных звезд. Если орбиты звезд круговые, то полная энергия, уносимая гравитационными волнами, определяется только расстояниями  $A$  между звездами и их массами  $M_1, M_2$  (формула Эйнштейна):

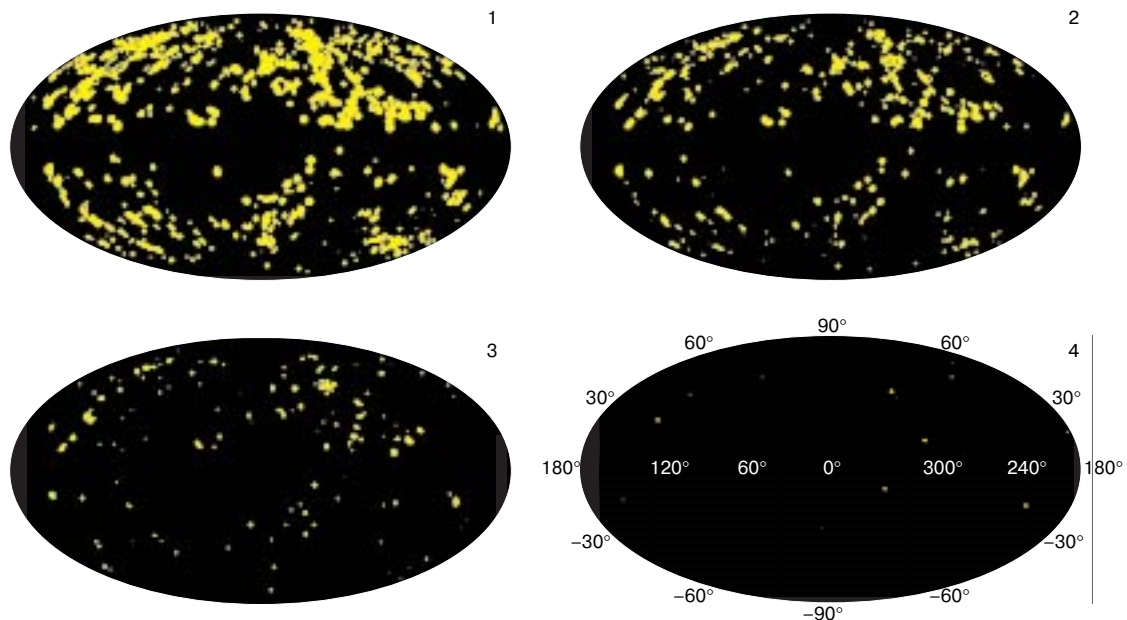
$$L = \frac{32 G^4 M_1^2 M_2^2 (M_1 + M_2)}{5 c^5 A^5}.$$

Двойная система излучает всегда! При этом частота волны равна удвоенной частоте вращения звезд. Чем ближе звезды друг к другу, тем выше гравитационно-волновая светимость. Следовательно, мощность излу-

чения максимальна у наиболее компактных систем и, значит, у наиболее компактных звезд – нейтронных звезд или черных дыр. Такие звезды не просто должны быть во Вселенной, но уже и наблюдаются, да так успешно, что за изучение одной из них присуждена Нобелевская премия 1993 года (Russell A. Hulse и Joseph H. Taylor, Jr.).

### ФОРМУЛА ЭЙНШТЕЙНА РАБОТАЕТ!

В 1975 году американские радиоастрономы Р. Халс и Дж. Тейлор (см. выше) открыли первый двойной радиопульсар с сухим каталожным именем PSR 1913+16. Это оказалась система двух нейтронных звезд, обращающихся друг около друга с периодом 7 h 45 min. Радиопульсар, сверхточные часы в далеком космосе да еще в двойной системе, – настоящая удача! Вскоре по тому, как ходят эти часы, удалось не только взвесить нейтронные звезды с рекордной для астрономии точностью, но и впервые экспериментально подтвердить формулу Эйнштейна. Оказалось, обе нейтронные звезды сближаются, как будто они вращаются не в пустом вакууме, а в вязкой жидкости. Конечно, никакой жидкости нет, а просто они излучают свою энергию в виде гравитационных волн, причем в точности в соответствии с формулой Эйнштейна. Сближение это столь



**Рис. 1.** Гравитационно-волновое небо, ожидаемое для сверхновых звезд. Количество объектов уменьшается с ростом амплитуды сигнала (от 1 к 4). Эта карта построена в ГАИШ МГУ с учетом распределения ближайших галактик по небу (Липунов, Назин, Панченко, Постнов и Прохоров, 1996). В принципе первые всплески от сливающихся нейтронных звезд и черных дыр должны следовать аналогичному распределению по небу

быстро (конечно, по астрономическим масштабам), что через 100 млн лет звезды столкнутся, породив гравитационно-волновой всплеск грандиозной мощности. Сейчас нам известно еще несколько двойных пульсаров с нейтронными звездами и известно, что во Вселенной их миллиарды и, следовательно, есть двойные, которые уже слились, а может быть, сливаются в данную минуту.

## ПЕРВЫЕ ЗВЕЗДЫ ГРАВИТАЦИОННО-ВОЛНОВОГО НЕБА

Нейтронные звезды — это элементарные частицы Вселенной. Напомним, что нейтронные звезды были предсказаны Л.Д. Ландау как гигантские, весом с нормальную звезду типа Солнца, атомные ядра. Грубо говоря, это ядра супертяжелого элемента с порядковым номером  $10^{58}$ .

Халс-тейлоровский пульсар свидетельствует: во Вселенной идут реакции столкновения нейтронных звезд NS:



Такая реакция обязательно должна сопровождаться всплеском гравитационных волн (Gravitational Wave Burst — GWB), возможно, образованием черной дыры (Black Hole — BH), излучением нейтрино и, возможно,  $\gamma$ -всплеском (Gamma Ray Burst — GRB, см. статью автора [4]).

Замечательно, что при слипании нейтронных звезд коэффициент  $\alpha$  максимален и достигает десятков процентов. Из формулы Эйнштейна следует, что гравитационно-волновая светимость в момент полного слияния приближается к максимальному пределу:

$$L_{\max} = \frac{c^5}{G} \approx 10^{59} \text{ эрг/с.}$$

Эта величина, которую Эйнштейн назвал естественной светимостью, похоже, действительно является верхним пределом светимости в природе. Давайте рассмотрим процесс, в котором вся энергия некоторой массы вещества  $Mc^2$  переходит в излучение за кратчайшее время  $t_{\min} = R_g/c$ . Разделив максимальную энергию на минимальное время, получим в точности естественную светимость. Это поистине огромная величина. Например, самые мощные объекты Вселенной — квазары излучают в сотни миллиардов раз меньше. Но самое удивительное, что этот предел, полученный в рамках общей теории относительности, не изменится даже в будущей теории квантовой гравитации. Если разделить планковскую энергию на планковское время, то постоянная Планка выпадет и останется естественная светимость!

Но как часто во Вселенной происходят столкновения нейтронных звезд? Уже грубая оценка частоты таких событий, опирающаяся на наблюдения двойных

пульсаров, показала, что слияния должны происходить в нашей Галактике раз в миллион лет. Именно под эту цифру и строится самый большой приемник гравитационных волн LIGO. На самом деле оценка эта сильно занижена, так как для получения гравитационных волн неважно, чтобы нейтронные звезды были радиопульсарами, которых гораздо меньше, чем потухших пульсаров — обычных нейтронных звезд. Расчеты, проведенные в Государственном астрономическом институте им. П.К. Штернберга, показывают, что в среднем одно слияние происходит раз в 10 000 лет.

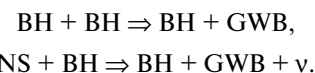
Конечно, никто не собирается ждать 10 000 лет до очередного столкновения нейтронных звезд. Ведь во Вселенной миллиарды галактик. Их плотность примерно равна 1 галактике на 100 кубических Мпк. Процесс настолько эффективен, что уже первая очередь LIGO с чувствительностью  $h_{\min} = 10^{-21}$  позволит наблюдать слияния с расстояния 100 млн пк. Действительно, если чувствительность равна  $h_{\min}$ , то максимальное расстояние, на котором еще виден источник,

$$R_{\max} = \frac{h_0}{h_{\min}} R_g = 100 \text{ Мпк.}$$

Это расстояние можно назвать гравитационно-волновым горизонтом детектора. Внутри этого горизонта находится примерно 10 000 галактик, и, следовательно, в таком объеме за один год происходит примерно одно слияние.

Конечно, цифра получается не очень большой. Гравитационно-волновая вспышка за год да еще на самом пределе чувствительности — это действительно немного. Поэтому строители интерферометров ничего особенного не ждут от первой очереди проекта. А зря!

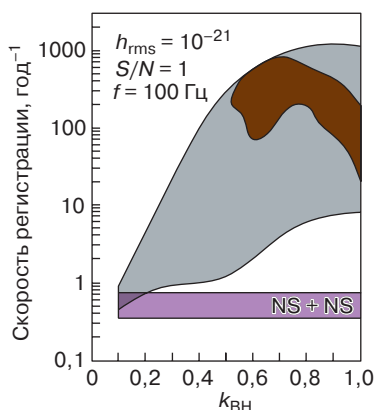
Обратите внимание, что гравитационно-волновой горизонт детектора пропорционален гравитационному радиусу сталкивающихся звезд, который сам пропорционален массе, следовательно, частота столкновений внутри горизонта — кубу массы! Но есть только один релятивистский объект, который по массе превосходит нейтронные звезды, — это черные дыры. Вернее, есть пока лишь их теоретическое предсказание и неплохие наблюдательные кандидаты (см. статью А.М. Черепашука [5]) в двойных рентгеновских системах. Кроме того, законы звездной эволюции убеждают нас в том, что во Вселенной идут реакции столкновения релятивистских звезд:



Средняя масса черных дыр примерно в 10 раз выше, чем масса нейтронных звезд, и объем внутри горизонта в тысячу раз больше! Но о черных дырах, вернее, о том, как они образуются, астрономы пока знают гораздо

меньше, чем про нейтронные звезды, и средняя частота слияний известна гораздо хуже. Тем не менее недавние теоретические расчеты показывают, что при всех неопределенностях первые гравитационно-волновые детекторы будут чаще регистрировать слияния черных дыр, а не нейтронных звезд (рис. 2).

Этот результат, полученный несколько лет назад, оказался совершенно неожиданным для строителей интерферометров. Дело в том, что в нескольких странах (Японии, Италии и Германии) идет строительство собственных интерферометров меньших размеров и потому более дешевых. Все они будут способны зарегистрировать сигналы от слияния черных дыр. Регистрация такого сигнала позволит точно измерить массу сливающихся звезд, а сравнение с теоретической формой всплеска позволит, быть может, доказать существование черных дыр в природе. Таким образом, впервые в истории физики в одном эксперименте могут быть открыты сразу две новые физические сущности: гравитационные волны и черные дыры.



**Рис. 2.** Ожидаемая скорость регистрации гравитационно-волновых всплесков от слияния нейтронных звезд и черных дыр в зависимости от неизвестного пока параметра  $k_{BH}$  — доли вещества звезды, уходящего в черную дыру в момент ее образования. Зачерненная область, напоминающая голову доисторического чудовища, — это рассчитанная на основе современной теории эволюции двойных звезд область вероятной частоты регистрации. Область велика — много неизвестных параметров, но она везде значительно выше частоты детектирования сигнала от сливающихся нейтронных звезд (полоса NS + NS). Диаграмма показывает, что первыми будут открыты сливающиеся черные дыры (Липунов, Постнов и Прохоров, 1997)

## СВЕРХЗАДАЧА

Астрономия подобна археологии. Глядя на ближайшие звезды мы видим их такими, какими они были десятки лет назад. Ближайшие галактики представляются нам

моложе на несколько миллионов лет, а далекие квазары — уже на миллиарды. Взгляд на небо — это взгляд в прошлое Вселенной. Теперь мы знаем, что было время, когда Вселенной не было.

Прорыв человека к гравитационно-волновому каналу информации можно сравнить лишь с открытием Галилея, когда он впервые повернул телескоп к звездному небу. И сравнение это будет не в пользу Галилея.

Видимый свет — электромагнитные волны были доступны человеку всегда. Весь окружающий мир построен человеком в основном на зрительных ощущениях. Гигантские телескопы, созданные в конце второго тысячелетия, позволили заглянуть в такие места Вселенной, где еще нет ни человека, ни звезд, ни галактик. На расстоянии в десять миллиардов световых лет мы уперлись в непрозрачную стену — вещество Вселенной в те времена, оказывается, было столь плотным, что совершенно непрозрачно для электромагнитных волн. Эта стена испускает так называемое реликтовое излучение, которое приходит к нам в виде радиоволн, впервые зарегистрированных в 1965 году.

Какие бы мы ни строили сверхмощные телескопы в будущем, мы не сможем заглянуть дальше (и в пространстве и во времени). Но эта стена, за которой рождаются элементарные частицы, атомы, да и сама Вселенная, совершенно прозрачна для гравитационных волн. Но откуда они возьмутся, если там, за стеной, еще нет никаких тел?

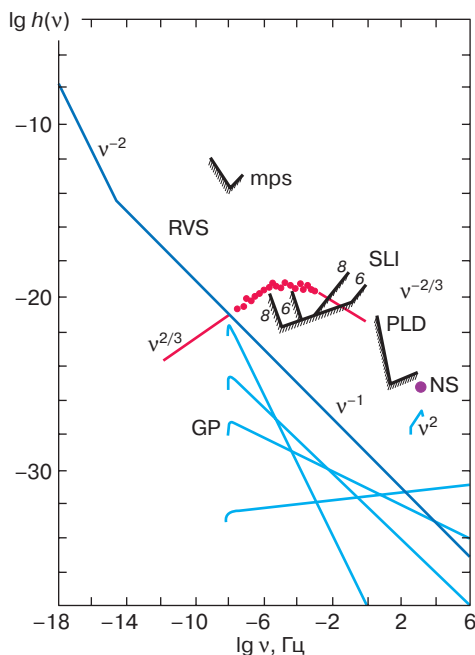
Да, действительно, звезды и галактики возникли только через сотни миллионов лет после рождения Вселенной. А до этого она представляла собой практически идеально однородное и изотропное пространство—время. Но раз галактики, а вместе с ними и звезды, и планеты, и, наконец, люди появились, следовательно, какие-то шероховатости, способные излучать гравитационные волны, были и на ранних стадиях расширения Вселенной.

Парадокс и красота общей теории относительности состоит в том, что космологические гравитационные волны появляются даже в абсолютно однородной, но расширяющейся Вселенной. Еще в 70-е годы XX века советский астрофизик Л.П. Гришук доказал это математически. Это означает, что в любом случае сейчас Вселенную наполняют реликтовые гравитационные волны, рожденные в самом начале расширения. Их регистрация позволила бы понять, каким образом наше пространство—время появилось на свет. Вообще говоря, с надеждой обнаружить космологический фон строятся современные интерферометры и проектируются будущие. В первые десятилетия следующего века планируется запуск на космическую орбиту гравитационно-волновой

антенны (проект LISA – Laser Interferometer Space Antenna).

Возникает вопрос, не поблекнут ли космологические гравитационные волны на фоне “современного” излучения, рожденного в нашей и других галактиках? Ведь примерно половина всех звезд Вселенной двойные. Вселенная кишит гравитационными волнами, а Земля буквально купается в этом гравитационно-волновом море.

В 1965 году советский астроном А. Мироновский впервые попытался определить, на каких частотах сильнее всего “штормит”. Оказалось, что максимальная амплитуда создается самыми тесными нормальными звездами типа W Большой Медведицы. Это звезды с периодом в несколько часов находятся так близко друг от друга, что касаются своими поверхностями, и все вместе создают волнение с амплитудой порядка  $10^{-19}$ . Это продемонстрировало, что двойные звезды могут создать проблемы для обнаружения космологического фона. Возникла задача попытаться рассчитать полный спектр излучения двойных звезд Вселенной. Такой расчет был проведен в 1986 году советскими астрофизиками. Поскольку большинство двойных звезд пока не на-

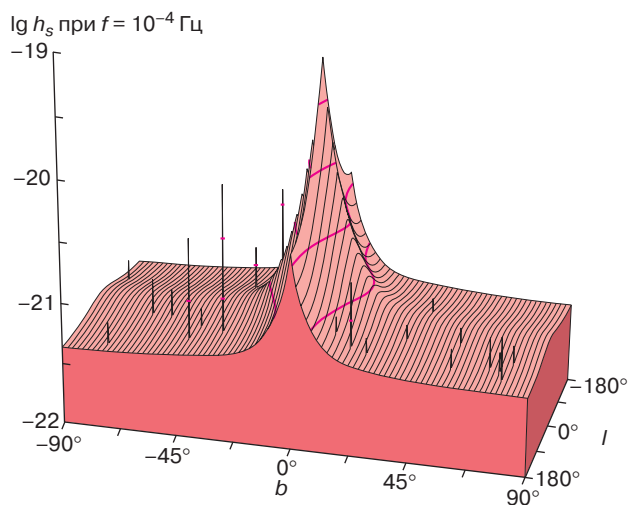


**Рис. 3.** Расчет гравитационно-волнового спектра, создаваемого двойными звездами нашей Галактики (Липунов и Постнов, 1986). Наклонные линии показывают предполагаемую амплитуду космологических гравитационных волн. Кроме того, показаны пределы чувствительности проектируемых лазерных интерферометров

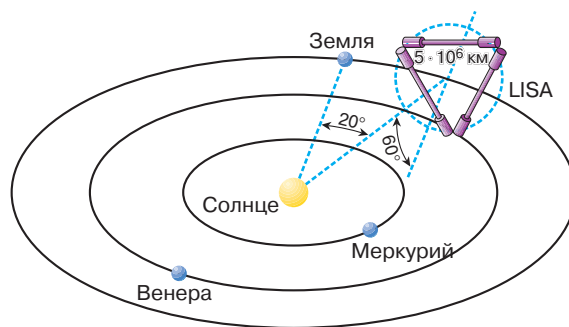
блюдается, пришлось их смоделировать с учетом всех наших знаний о законах эволюции (рис. 3).

Оказалось, что главный вклад вносят двойные звезды нашей Галактики. При этом они перекрывают космологический фон в широком диапазоне частот – от  $10^{-1}$  до  $10^{-8}$  Гц. Однако наша Галактика плоская и на гравитационно-волновом небе выглядит примерно так же, как и на электромагнитном небе (рис. 4), в виде своеобразного гравитационно-волнового Млечного Пути.

Вдали от плоскости галактики главный сигнал будут давать двойные звезды далеких галактик, распределенные по небу достаточно равномерно. Тем не менее на краях спектра есть определенные окна, в которые



**Рис. 4.** Гравитационно-волновой фон, создаваемый двойными звездами нашей и ближайших галактик (Липунов, Назин, Панченко, Постнов и Прохоров, 1995). Показана амплитуда фона от галактических координат. Расчет проведен с помощью специальной компьютерной программы “Машина сценариев” (см. [3])



**Рис. 5.** Проект космического гравитационно-волнового интерферометра LISA

можно увидеть реликтовый фон. И это оставляет надежду на то, что мы когда-нибудь узнаем, как родилась наша Вселенная.

Для детектирования таких низкочастотных волн необходимы интерферометры с гигантской базой, которые нужно строить в космическом пространстве. В проекте LISA (рис. 5) предполагается запустить в Солнечную систему несколько космических аппаратов, которые составят гигантский лазерный интерферометр с плечом в несколько миллионов километров. Возможно, тогда мы узнаем, как появилась наша Вселенная, а пока будем в ней жить.

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. *Липунов В.М.* В мире двойных звезд. М.: Наука, 1986.
2. *Липунов В.М.* Все нейтронные звезды. М.: Просвещение, 1989.
3. *Липунов В.М.* Искусственная Вселенная // Соросовский Образовательный Журнал. 1998. № 6. С. 82–89.
4. *Липунов В.М.* Военная тайна астрофизики // Там же. № 5. С. 83–89.
5. *Черепашук А.М.* Черные дыры в двойных звездных системах // Там же. 1997. № 3. С. 87–93.
6. *Шакура Н.И.* Нейтронные звезды и черные дыры в двойных звездных системах. М.: Знание, 1976.
7. *Шкловский И.С.* Звезды, их рождение, жизнь и смерть. М.: Наука, 1984.

*Рецензент статьи А.М. Черепашук*

\* \* \*

Владимир Михайлович Липунов, доктор физико-математических наук, профессор кафедры астрофизики и звездной астрономии физического факультета МГУ. Область научных интересов – астрофизика релятивистских звезд: нейтронных звезд, белых карликов и черных дыр. Автор более 100 научных работ, научных монографий и популярных книг, соавтор сборника задач по астрофизике.