

Гравитационные волны

В.Б. Брагинский, М.В. Сажин

Предисловие

Цель этого популярного обзора – описание одного из направлений исследований современной астрофизики. Цель этих исследований – обнаружение и изучение гравитационного излучения от различных астрофизических источников. В ходе этих исследований будет получена качественно новая информация о процессах в нашей Вселенной, об эволюции некоторых ее компонентов. Кроме того, ожидается, что будут решены несколько фундаментальных физических проблем. Исследования в этом направлении по необходимости привели к разработке качественно новых методов прецизионных измерений. Уже разработанные методы, а также планируемые к разработке в ближайшие годы, найдут применение в других областях физики, а также техники.

Содержание

I.	I. Историческое введение, основные сведения о свойствах космических источников гравитационного излучения.	1-5
	Взаимодействие обычной материи с гравитационной волной, устройство наземных лазерных гравитационно-волновых антенн.	
	Ожидаемые результаты исследований на наземных гравитационно-волновых антеннах.	5-11
II.	Внеземные гравитационно-волновые антенны (проект LISA).	12-13
		13-14
	Гравитационные волны во Вселенной.	15-18
	Пульсары и анизотропия РИ как детекторы ГВ.	18-24
	Заключение.	24-26

I. Историческое введение, основные сведения о свойствах астрофизических источников гравитационного излучения.

В самом конце первой мировой войны в 1918г., т. е. через два года после опубликования уравнений Общей Теории Относительности (ОТО), А. Эйнштейн публикует еще одну статью, в которой показывает, что из уравнений ОТО следует существование гравитационных волн. Эти волны в вакууме должны распространяться со скоростью, равной скорости света. В этой же статье приведена и формула для мощности гравитационного излучения, возникающего всегда, если массы движутся с переменным ускорением [1].

Уравнения ОТО для слабых гравитационных полей сходны с уравнениями Максвелла для электромагнитных полей. С помощью уравнений Максвелла можно предвычислить, какое электрическое поле и какое магнитное поле породят электрические заряды и электрические токи. При переменном движении зарядов возникнут и электромагнитные волны, которые, по выражению голландского физика Г.А. Лоренца, отпочковываются и далее существуют независимо от породивших их зарядов или токов. Сходное положение дел и с уравнениями ОТО, однако есть и существенные различия. Первое и самое существенное различие состоит в том, что уравнения ОТО основаны на так называемом принципе эквивалентности (по существу это опытный факт) массы инертной (той, которая входит во второй закон механики Ньютона) и массы гравитационной (входящей в гравитационный закон Ньютона). Лучше формулировать этот принцип, как равенство

отношений гравитационной массы к инертной для любых тел. Этот принцип позволил придать уравнениям ОТО универсальный характер: любая конечная масса изменяет (искривляет) метрику пространства-времени. Из уравнений ОТО можно, например, рассчитать траекторию движения пробной массы вблизи какого-либо массивного тела (в первом приближении расчет даст тот же ответ, что и “по Ньютону”) а также предсказать, как изменится ход часов вблизи этого массивного тела. Поэтому уравнения ОТО описывают компоненты тензора кривизны нашего пространства-времени, порожденные любыми массами (и их энергией тоже). Иногда уравнения ОТО называют уравнениями геометродинамики. Как отмечалось выше, при переменных ускорениях массивных тел возникает порожденное ими гравитационное излучение. Это излучение, также как и электромагнитные волны, отпочковывается от источника (т. е. от ускоренно двигавшихся массивных тел) и существует независимо от источника, распространяясь в вакууме со скоростью равной скорости света. О гравитационных волнах уместно употреблять термин “рябь на кривизне пространства-времени”, предложенный проф. К.С. Торном (см. обзор [2]). Этот термин подчеркивает их универсальный характер.

Второе существенное различие между уравнениями ОТО и электродинамики состоит 1) в относительной малости (слабости) гравитационного взаимодействия и 2) в том, что все гравитационные заряды (массы) притягиваются (не существуют, как в электродинамике, положительные и отрицательные заряды). Слабость гравитационного взаимодействия удобно “проиллюстрировать” на примере двух протонов: их притяжение из-за гравитационных масс в $1,6 \times 10^{34}$ раз меньше чем электростатическое отталкивание. Землянам уместно помнить, что только наличие у нашей планеты массы 6×10^{21} тонн создает ускорение вблизи ее поверхности $9,8 м / с^{-2}$ для всех тел без различия. Одинаковость отношения гравитационной массы (заряда) к массе инертной приводит к тому, что, если придать каким-то образом ускорение одной массе (заряду) другая масса (заряд) должна иметь противоположное направление ускорения (центр масс должен остаться на месте). В этом случае, пользуясь термином из электродинамики, не будет дипольного излучения а будет только квадрупольное. Квадрупольный излучатель можно представить себе, как два дипольных излучателя, которые “мешают” друг другу. Иными словами, излучение одного почти полностью “вычитается” (компенсируется) другим дипольным излучателем. Это, последнее обстоятельство и явилось причиной того, что после появления в 1918 г. статьи А. Эйнштейна о гравитационных волнах у экспериментаторов не возник интерес к идее попытаться в земных, лабораторных условиях повторить опыт Герца, но для гравитационных волн. Если, например, раскрутить гантель с двумя массами по тонне каждая и мощным метровым их скрепляющим стержнем то, используя лучшие стали, можно достичь частоты вращения гантели около $100 Гц$ и, по формуле А. Эйнштейна окажется, что мощность гравитационного излучения не превысит $10^{-23} \text{ эрг} / \text{сек} = 10^{-30} \text{ Ватт}$!

Прошло 30 лет после предсказания А. Эйнштейна о существовании гравитационного излучения. Первым, кто обратил внимание на возможность “использования” внеземных (астрофизических) источников был советский физик В.А. Фок. Действительно, массы планет и звезд на много порядков больше масс, которыми может “располагать” экспериментатор в наземной лаборатории. В.А. Фок оценил величину мощности гравитационного излучения, возникающего при вращении планеты Юпитера вокруг Солнца. Эта величина оказалась неожиданно большой: около $4 \times 10^9 \text{ эрг} / \text{сек} = 400 \text{ Ватт}$ [3]. Еще через несколько лет после работы В.А. Фока началась серьезная “проработка” (по существу – поиск)

возможных мощных источников гравитационного излучения от космических катастроф. Значительный вклад в этом направлении исследований внесли советские физики Я.Б. Зельдович, И.С. Шкловский, Н.С. Кардашев, И.Д. Новиков. Их анализ, выполненный в начале 60-х годов показал, что если на большую черную дыру упадет нейтронная звезда, то несколько процентов от произведения массы звезды на c^2 превратится в всплеск гравитационного излучения. Эти работы положили начало широкому “поиску” (созданию прогноза) самых различных космических источников гравитационного излучения. О некоторых из них будет рассказано в следующих разделах. В этом поиске участвовало и сегодня участвует больше ста космологов-теоретиков (см. например обзоры [2, 4]). Почти сразу же, в самом начале этого поиска, в результате просмотра астрономических каталогов двойных звезд (а таких в нашей Галактике около 50%) оказалось, что сравнительно недалеко от нашего Солнца есть близкие двойные звезды излучающие больше 10^{22} *Ватт* гравитационного излучения (!), т. е. мощность порядка 0.1% от того, что наше Солнце “отдает” в виде оптического и инфракрасного электромагнитного излучения. Правда гравитационное излучение от этих двойных звезд имеет период порядка единиц часов. До Земли от таких источников доходит поток с плотностью $\cong 10^{-13}$ *Вт / м²*. Если бы наземные гравитационные антенны обладали бы такой же эффективностью, как и электромагнитные антенны, то зарегистрировать такой поток мощности не составило бы никакого труда. Однако особенности квадрупольного “характера” гравитационного излучения проявляются и в слабости взаимодействия волны с гравитационно-волновой антенной. Об этом будет подробно рассказано в следующем разделе.

В 1967 г. произошло знаменательное событие: Дж. Белл и Э. Хьюиш [5] открыли первые нейтронные звезды. До этого теоретики лишь предполагали существование таких объектов (масса такой звезды примерно равна массе Солнца, размер – около 10 км). По существу было открыто то, что теперь принято называть пульсарами: быстро вращающиеся нейтронные звезды с большим магнитным полем и одной особенностью (ось магнитного момента не совпадает с осью вращения). С этого времени космологи-теоретики получили надежное экспериментальное доказательство существования таких массивных и компактных звезд, и задача о расчете величины и формы всплеска гравитационного излучения от слияния пары таких звезд стала остро актуальной. Несколько групп решали эту задачу разными способами. На решение ее ушло больше десяти лет. В настоящее время достигнуто согласие между независимыми группами о том, что всплеск излучения имеет полную энергию около одного процента (!) от Mc^2 (M – масса звезды), т. е. 10^{45} *Джоуля* = 10^{52} *эрга*. Всплеск представляет собой во времени пуг длительностью в несколько секунд с возрастающей к концу частотой и плавно изменяющейся амплитудой. Средняя частота в таком всплеске – около 100 *Гц*. Однозначного, полного согласия о форме всплеска и средней частоте нет в первую очередь потому, что точно не известно уравнение состояния для вещества, из которого “сделана” нейтронная звезда. Нет и согласия о том, как часто такие события происходят. Довольно значительное число исследователей согласно с хорошо обоснованной моделью Г. Бете и Г. Брауна, которая предсказывает частоту: одно слияние в 104 лет в одной галактике. Чтобы зарегистрировать на Земле “пролет” одного всплеска примерно раз в месяц необходимо “использовать” примерно 105 галактик. Это количество занимает сферу с радиусом около 1026 см. Учитывая полную величину энергии во всплеске и это расстояние до края сферы, экспериментаторы должны создать антенны, которые могли бы зарегистрировать плотность потока мощности в гравитационной волне примерно равную $10 \text{ эрг} / (\text{сек} \cdot \text{см}^2) = 10^{-2} \text{ Вт} / \text{м}^2$.

Приведенные выше оценки и являются основой для программы наземных гравитационно-волновых антенн в проектах LIGO и VIRGO. Они подробно описаны в следующем разделе. Уместно отметить, что если консервативно-оптимистическая оценка: одно событие в галактике раз в 10^4 лет неверна, но верна пессимистическая – один раз в 10^5 лет, то в перспективе развития этих проектов предусмотрено повышение чувствительности (через примерно 6-7 лет) на порядок. Так что и в этом, неблагоприятном случае всплески будут зарегистрированы (см. детали в обзоре [6]).

В заключение этого раздела уместно отметить, что через несколько лет после открытия нейтронных звезд-пульсаров Дж. Тэйлор и Р. Халс открыли двойной пульсар (обе звезды – нейтронные) со сравнительно коротким периодом обращения. Тщательные измерения монотонного увеличения частоты обращения (сближение компонентов за счет потери ньютоновской энергии на гравитационное излучение) позволило проверить формулу А. Эйнштейна для этого излучения. Она оказалась верной, погрешность измерений – около 3%.

II. Взаимодействие обычной материи с гравитационной волной, устройство наземных лазерных гравитационно-волновых антенн

Принцип эквивалентности не только “затрудняет” излучение гравитационных волн, но и “делает” взаимодействие между обычной материей и такими волнами очень слабым. Электромагнитная волна (в классическом приближении) может быть обнаружена в точке. Если электромагнитная волна распространяется вдоль оси X , то вектор напряженности электрического поля волны должен быть в плоскости YZ , и расположенные рядом электрические заряды разных знаков (например, электрон и протон) в таком поле должны колебаться (в первом приближении) в этой же плоскости, параллельно вектору напряженности, но в противоположных направлениях. Эти колебания могут быть зарегистрированы, в принципе, по величине смещения одного заряда относительно другого (или относительно незаряженной массы). Если в плоскости YZ расположить вдоль направления вектора электрического поля металлический стержень (в котором протоны, входящие в состав ядер, “жестко закреплены”, но есть много свободных электронов), то стержень будет заряжаться так, что в один полупериод электромагнитной волны один конец стержня будет заряжен положительно, а второй – отрицательно. В следующий полупериод – наоборот. Два таких стержня, расположенных последовательно образуют антенну (изобретенную еще в 1887 г. Г.Р. Герцем), которыми уставлены многие крыши домов на нашей планете для приема электромагнитных волн (телевизионных передач). Можно сказать, что электромагнитная волна это распространяющееся волновое поле поперечных переменных ускорений для электрических зарядов. В отличие от нее гравитационная волна это также распространяющееся волновое поле, но поперечных переменных неоднородных ускорений (градиентов ускорений). Если гравитационная волна распространяется вдоль оси X , и если в плоскости YZ разместить свободные точечные массы, то из-за конечной разности расстояний между массами можно наблюдать колебания одной массы относительно другой с частотой волны ω_{grav} . Если пара масс расположена вдоль оси Y , то величина амплитуды колебаний в Δl направлении Y равна

$$\Delta l = \frac{1}{2} h l, \quad (1)$$

где l – расстояние между массами, h – амплитуда возмущения метрики, вызванного гравитационной волной. Если пара масс расположена вдоль оси \mathbf{Z} , то колебания будут в противофазе по отношению к колебаниям первой пары (см. рис. 1).

Простая формула (1) подчеркивает с одной стороны универсальность взаимодействия гравитационной волны с материей, с другой стороны нелокальность взаимодействия (необходимость иметь конечное l). Очевидно, что относительные колебания с амплитудой Δl вызваны реальной силой

$$F_{grav} = \frac{1}{2} h l \times m \omega_{grav}^2, \quad (2)$$

где m – величина пробной массы. Ясно, что и сила F_{grav} и вызванные ею колебания с амплитудой Δl порождены градиентом ускорения. Очевидно также, что вместо точечных масс можно использовать протяженное тело, в котором сила F_{grav} возбудит механические колебания. Эта идея была высказана впервые профессором Мэрилендского Университета (США) Дж. Вебером. Он реализовал экспериментальную программу поисков всплесков гравитационного излучения (1959-1969), используя в качестве приемников удлинённые полуторатонные алюминиевые цилиндры, хорошо изолированные от сейсмических шумов. Цилиндры, размещенные на расстоянии около тысячи километров друг от друга в вакуумных камерах, должны были “вздрагивать” синхронно (схема совпадения) на частотах близких к самой низкой по частоте резонансной механической моде колебаний цилиндра (около 1 кГц). В 1969 он объявил об открытии таких всплесков с амплитудой возмущения метрики $h \cong 10^{-16}$. В 1971-1973 несколько групп исследователей разных стран (в том числе и группа из физического факультета МГУ совместно с группой из Института Космических Исследований РАН) повторили его опыты и получили отрицательный результат. Частичным оправданием Дж. Веберу служит одно важное обстоятельство: к этому времени теоретики-космологи еще не имели надежного прогноза частоты таких всплесков и величины амплитуды возмущения метрики h (и соответственно величин F_{grav} и Δl).

Астрофизический прогноз (см. предшествующий раздел) предсказывает один всплеск примерно раз в месяц со средней частотой $\omega_{grav} \cong 2\pi 10^2 \text{сек}^{-1}$ и плотностью потока мощности $\cong 10 \text{эрг}/(\text{сек} \cdot \text{см}^2) = 10^{-2} \text{Вт}/\text{м}^2$. Этой величине соответствует амплитуда возмущения метрики $h \cong 10^{-21}$ т. е. на пять (!) порядков меньше, чем в опытах Дж. Вебера.

* Название LIGO – аббревиатура от Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory (Лазерная интерферометрическая гравитационно-волновая обсерватория); VIRGO (название франко-итальянского проекта) – латинское ДЕВА – название созвездия, в котором наземные астрономы часто наблюдают вспышки сверхновых звезд в скоплении галактик, эти вспышки могут сопровождаться всплесками гравитационного излучения.

Если расположить две свободные пробные массы на расстоянии

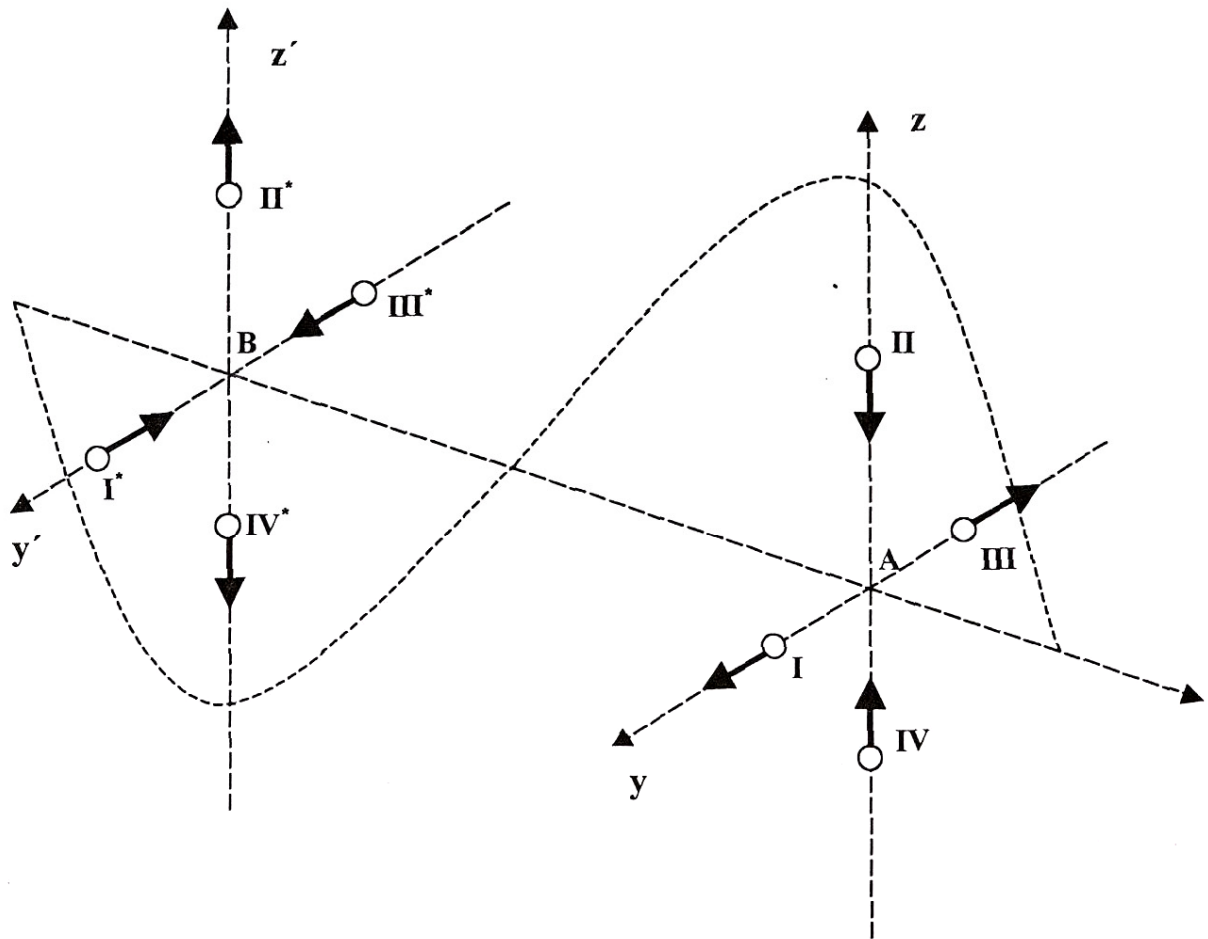


рис. 1

СТРУКТУРА ПОЛЯ УСКОРЕНИЙ, СОЗДАВАЕМЫХ ПЛОСКОЙ ГРАВИТАЦИОННОЙ ВОЛНОЙ, РАСПРОСТРАНЯЮЩЕЙСЯ В НАПРАВЛЕНИИ x . НА РИСУНКЕ СТРЕЛКАМИ ИЗОБРАЖЕНЫ УСКОРЕНИЯ ПРОБНЫХ МАСС **I**, **II**, **III**, **IV** (РАЗМЕЩЕННЫХ В ПЛОСКОСТИ yz) И ПРОБНЫХ МАСС **I***, **II***, **III***, **IV*** (РАЗМЕЩЕННЫХ В ПЛОСКОСТИ $y'z'$). ЭТИ УСКОРЕНИЯ МОГУТ БЫТЬ ИЗМЕРЕНЫ НАБЛЮДАТЕЛЯМИ **A** И **B**. РАССТОЯНИЕ МЕЖДУ ПЛОСКОСТЯМИ yz И $y'z'$ РАВНО ПОЛОВИНЕ ДЛИНЫ ГРАВИТАЦИОННОЙ ВОЛНЫ.

$l = 4$ км, то возмущение метрики с $h \cong 10^{-21}$ приведет к колебаниям пробных масс с амплитудой $\Delta l = 2 \times 10^{-16}$ см (!). Если величина пробных масс $m = 104$ г = 10 кг, то такие колебания возникнут в результате действия на них разности сил с амплитудой $F_{grav} \cong 2 \times 10^{-6}$ дин = 2×10^{-11} Ньютон (!). Приведенные величины и есть основные цели на первом этапе в двух международных проектах LIGO и VIRGO* – наземных лазерных гравитационно-волновых антеннах. Две антенны LIGO уже “работают” с 2000 г. и по настоящее время (лето 2003 г.). Одна антенна VIRGO “вступит в строй” в ближайшие месяцы (см. подробнее в обзоре [6] и в цитированных в нем оригинальных статьях). История возникновения этих двух проектов заслуживает здесь краткого освещения. В 1962 г., сразу же после изобретения Т. Мейманом лазера, советские физики М.Е. Герценштейн и В.И. Пусто-

войт [7] предложили использовать два далеко разнесенных, свободно подвешенных массивных зеркала (в качестве пробных масс), которые используются как оптический резонатор Фабри-Перо. Накачка резонатора мощным когерентным излучением от лазера должна обеспечить высокую чувствительность при измерении малых колебаний таких зеркал. Эта идея, сформулированная за 7 лет до “открытия” Дж. Вебера на алюминиевых цилиндрах, оказалась весьма плодотворной, во-первых, потому что совершенствование лазеров различных типов привело к тому, что теперь в распоряжении физиков-экспериментаторов имеются оптические автогенераторы с очень узкой линией генерации и очень высокой стабильностью средней частоты. Во-вторых, потому, что оптики-технологи научились делать такие отражающие зеркала (на них нанесено 20-30 пар тонких слоев диэлектриков), которые обладают замечательной отражательной способностью: из 106 фотонов, падающих на зеркало, “гибнет” (превращается в тепловые фотоны) один (!), а остальные отражаются. В результате многих отражений малая величина $\Delta l = 2 \times 10^{-16}$ см превращается на выходе резонатора в относительно большой сдвиг фазы оптической волны порядка $\Delta\varphi = 10^{-8}$ рад. В антенне два взаимно перпендикулярных плеча (два резонатора Фабри-Перо), оптические колебания, возбужденные одним лазером, после прохождения через них “складываются” (интерферируют) на фотодетекторе. Малый сдвиг фаз $\Delta\varphi$ превращается в изменение мощности электрического тока на выходе фотодетектора (см. рис. 2). Первые, “настольные” опыты с моделями таких оптических интерферометров были выполнены Р. Драйвером (Университет г. Глазго) и Р. Вайсом (Массачусетский Технологический Институт) в 70-ые годы. Опыты оказались успешными и в 1981 содружество этих двух экспериментаторов вместе с профессором К. Торном основали проект LIGO (см. подробности в [6, 8]). Первые 15 лет работы проводились на уменьшенном прототипе ($l = 40$ метров), размещенном в одном из зданий Калифорнийского Технологического Института (г. Пасадина). Уместно подчеркнуть, что это была абсолютно пионерская работа для

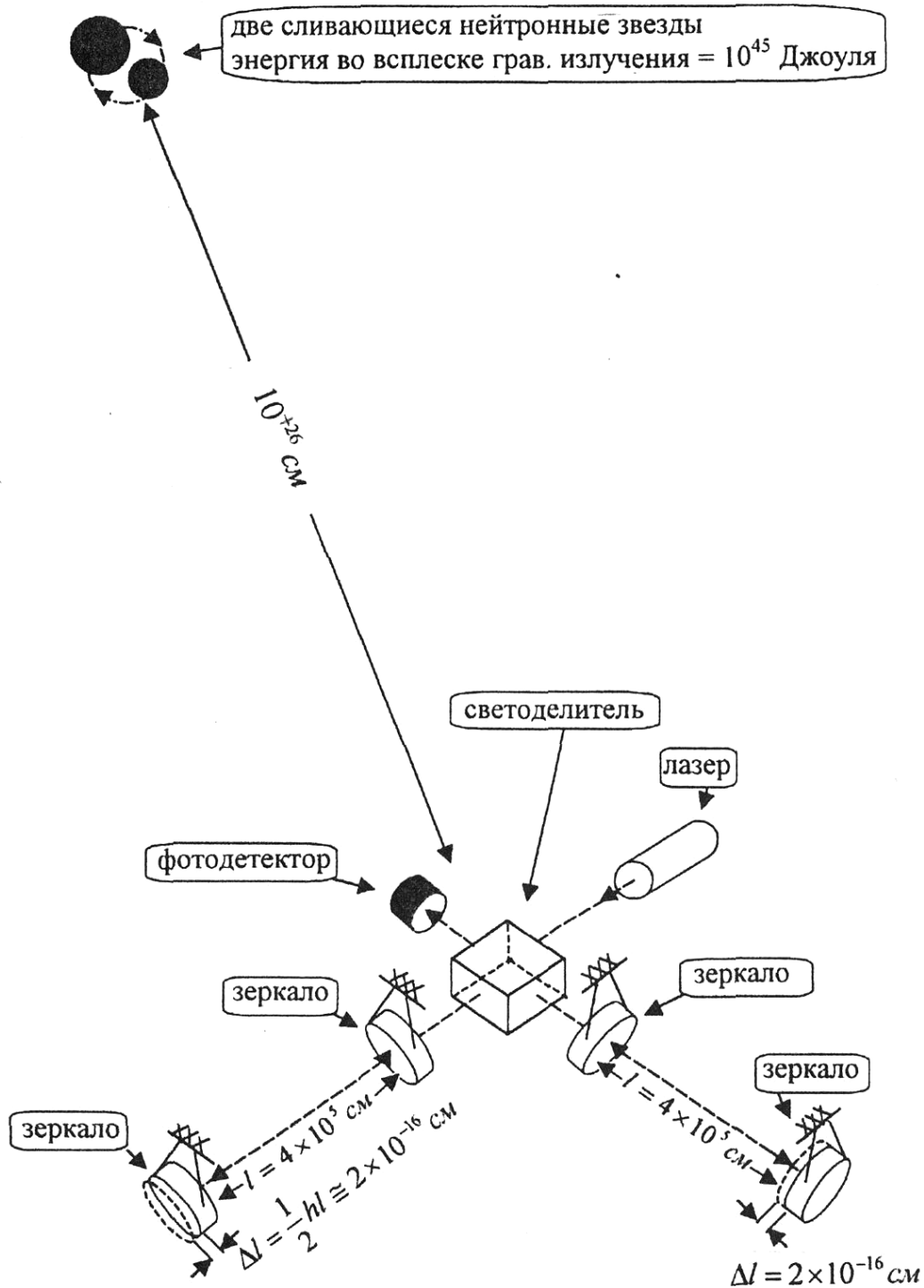


рис. 2

ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА АНТЕНН LIGO И VIRGO.

ДВЕ ПАРЫ ЗЕРКАЛ ОБРАЗУЮТ ДВА РЕЗОНАТОРА ФАБРИ-ПЕГО, КОТОРЫЕ РАЗМЕЩЕНЫ В ВАКУУМНЫХ ТРУБАХ. НА РИСУНКЕ ПОКАЗАНЫ СМЕЩЕНИЯ ЗЕРКАЛ ПРИ ОПТИМАЛЬНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ ВОЛНЫ.



Вид с вертолета (с высоты около 1 км) на одну из двух гравитационно-волновых антенн LIGO. Белая линия, уходящая на север (на фото — вверх) и белая линия, уходящая на запад (на фото – влево) это надземные 4-х километровые «туннели» в которых размещены стальные трубы диаметром 1м 20см. В трубах – вакуум 10^9 Торр и лучи лазера. Зеркала размещены в концах труб и в главном здании, где трубы сходятся. В главном (угловом) трехэтажном здании размещены: лазер, системы слежения, компьютеры экспериментаторов: зеркала в оптическом резонаторе обычно жестко крепятся на массивных оптических скамьях, а в этом (пробном) эксперименте они должны быть очень “нежно” подвешены (см. ниже), а с другой стороны – должны быть выставлены с точностью примерно в одну десятитысячную долю от размера оптической длины волны. Это удалось добиться специально разработанными следящими системами, которые “подстраивали” положение четырех зеркал, delicatно подвешенных на тонких стальных проволоках. Пятнадцать лет работы (почти без публикаций!) привели к положительному результату: прототип антенн надежно регистрировал (за время порядка 5×10^{-3} сек) сдвиг одного зеркала по отношению к другому на 2×10^{-16} см [9].

В 1996 г. началось строительство двух полномасштабных антенн (собственно проект LIGO), одна из которых расположена в галечной пустыне самого северо-западного штата Вашингтон (недалеко от атомных реакторов), а вторая – в дельте Миссисипи. Расстояние между антеннами около 3 тыс. км. Это расстояние гравитационная волна “проходит” за 10 миллисекунд. При времени усреднения $\tau \cong 5 \times 10^{-3}$ сек пара таких антенн, при удачном пространственном расположении источника, сможет определить его угловые координаты с погрешностью в несколько градусов. Антенны LIGO “вступили в строй” два года тому назад, и в настоящее время примерно половину времени работают в режиме записи сигнала. Вторая половина времени расходуется на доводку следящей системы (которая “подстраивает” две пары зеркал) и других элементов антенны. Уже достигнута чувствительность примерно на порядок меньшая планируемой на первом этапе.

При достигнутой уже чувствительности можно обнаружить всплеск от слияния двух нейтронных звезд на расстоянии больше одного мегапарсека. В ближайшие месяцы ожидается, что планируемая величина $h \cong 10^{-21}$ будет достигнута, и в течение нескольких лет будет продолжаться поиск (ожидание) всплесков в режиме совпадения. Затем вся внутренняя начинка будет заменена, и в 2007–2008 г. начнется второй этап, когда чувствительность должна достигнуть $h \cong 10^{-22}$ (и соответственно $\Delta l = 2 \times 10^{-17}$ см). В этом случае можно будет рассчитывать на обнаружение всплесков с расстояния 200–300 мегапарсек.

Здесь уместно коротко описать основные технические особенности антенны. Основная (и самая ее дорогостоящая часть) это две четырехкилометровые вакуумные трубы (диаметром 1,2 м), в которых давление 10^{-9} тор, и кроме этого высокого вакуума и лазерного луча в трубах нет ничего. Трубы “перемежаются” относительно большими вакуумными танками, в которых размещены шедевры антисейсмической изоляции, не подпускающие сейсмические шумы к “нежно” подвешенным десятикилограммовым зеркалам (об уровне “нежности” см. ниже). Лазерная накачка производится от уникально стабилизированного лазера (три ступени стабилизации). Вся система зеркал и стабилизации частоты лазера “обслуживается” довольно сложной системой слежения настройки. Кроме этого, антенну “обслуживает” еще одна система датчиков, которые регистрируют сейсмическую активность, флуктуации магнитного поля Земли в районах антенн и фон космического излучения. Последнее делается для того, чтобы исключить то, что обычно называют сигналом “ложной тревоги”.

Изначально проект LIGO был только национальным, и в нем принимали участие исключительно сотрудники Калтека и MIT (California Institute of Technology and Massachusetts Institute of Technology). Руководство Национальный Фонда Научных Исследований США (которое осуществляет контроль и финансирование) преобразовало этот проект в Международный. В 1993г. к нему присоединилась группа ученых из МГУ (в нее входит и один из авторов этого обзора), позднее присоединилась и группа из Института Прикладной физики РАН (г. Нижний Новгород), группы из Университетов г. Глазго и г. Ганновера. Кроме этих групп в содружество также влились и несколько новых групп из американских университетов (Пенсильванского, Луизианского, Стэнфордского и других). Всего в это содружество входит около 100 ученых и инженеров.

Проект LIGO имеет одну важную особенность, которая отражена в последней букве его названия-аббревиатуры – Обсерватория. Это название есть не только следствие того, что предполагаются многолетние наблюдения (здания и все внутренние инженерные сооружения рассчитаны на 30 лет), но и потому, что предполагается, что чувствительность антенн будет этап за этапом систематически увеличиваться (как следствие изменения внутренней “начинки”: зеркал, их подвески, антисейсмической изоляции и т. п.). Причина такого оптимизма есть следствие одного фундаментального квантового утверждения. Выше отмечалось, что измеряемая разность сил $F_{grav} \cong 2 \times 10^{-6}$ дин, заставляющая зеркала колебаться, порождена плотностью мощности потока гравитационного излучения около 10^{-2} Вт/м². Этой величине соответствует огромное число гравитонов, “проходящих” через сечение антенны (около 1045 “штук”) и соответственно порождающих такую силу. Большое количество гравитонов, позволяет считать такую силу (и даже много меньшую по величине) чисто классической силой (т. е. нет необходимости квантовать поле гравитационной волны). Но квантовая теория измерений утверждает, что для классической силы, действующей на массу (свободную или массу осциллятора) нет минимального предела чувствительности (!). Как мы увидим дальше квантовые ограничения все же существуют, но их можно

обойти. Теперь, необходимо пояснить термин “нежно”, употребленный выше для описания подвеса зеркал оптического резонатора Фабри-Перо, то есть в главном элементе антенны. Кроме силы F_{grav} , на зеркало действуют и другие, которые являются случайными (шумовыми), и которые необходимо уменьшать. Одним из наиболее важных источников шума является связь центра массы зеркала с термостатом. Согласно одной из фундаментальных физических теорем (флуктуационно-диссипативной теореме (FDT)) эта связь определяется



Фото внутри главного здания. Хорошо видна основная (горизонтальная) труба. В больших танках размещены антисейсмические фильтры, на которых подвешены зеркала, составляющие оптические резонаторы Фабри-Перо, коэффициентом трения H , которое в свою очередь определяет величину флуктуационной силы, действующей со стороны термостата на массу. Величина этой случайной силы F_{FDT} в полосе частот Δf равна

$$F_{FDT} = \sqrt{4kTH \Delta f}, \quad (3)$$

где k – постоянная Больцмана, T – температура. Эта сила и “ответственна” за то, что подвешенное на тонких нитях зеркало (по существу – маятник Галилея) имеет среднюю величину энергии флуктуаций (Броуновских колебаний) равную kT . Очевидно, что для обнаружения F_{grav} необходимо, чтобы выполнялось неравенство

$$F_{FDT} < F_{grav} \quad (4)$$

Несложный расчет позволяет оценить величину H при $\Delta f \cong 102 \text{ Гц}$. Нужно, чтобы время релаксации такого маятникового подвеса зеркала $\tau^* = m/H$ было бы больше чем 105 сек. Эта величина и была реализована в подвесе зеркал сегодня работающих антенн членами “команды” Калтека. Величины $H = m/\tau^* \cong 0,1 \text{ г/см}$ для планируемой величины $h \cong 10^{-21}$ достаточно. Однако, для достижения $h = 10^{-22}$, как это видно из формул (3) и (4), необходимо уменьшить H и соответственно увеличить τ^* по крайней мере на два порядка. А если учесть, что крайне желательно иметь большое отношение сигнала к шуму (т. е. F_{grav} должно быть больше F_{FDT} хотя бы на порядок), то ясно что τ^* должно быть порядка нескольких лет. Эту задачу “об уровне нежности” подвеса зеркала решили члены группы МГУ В.П. Митрофанов и К.В. Токмаков. В течение нескольких лет исследований им удалось создать подвес с величиной $\tau^* \cong 5$ лет (!). Эта система будет использована на втором этапе LIGO-II (в 2007–2008 г.).

Кроме требований к подвесу зеркала есть и набор требований и к самому зеркалу, которое само по себе является термостатом, и механические моды которого имеют среднюю энергию kT , которая флуктуирует (броуновские колебания механических мод зеркала). Чтобы снизить вклад этого шума в колебания поверхности вблизи частот около 100 Гц существует одна возможность: увеличивать добротность механических мод. Недавно сотруднику Сиракузского Университета (США) С. Пенн совместно с выпускником МГУ А.Ю. Агеевым удалось достигнуть добротностей механических колебаний плавленого кварца, подвергнутого очень глубокой очистке, достигших величины 2×10^8 . Расчет, который мы здесь не приводим, показывает, что этого вполне достаточно, чтобы достигнуть чувствительности, соответствующей $h \cong 10^{-22}$.

Выше было отмечено, что все же существуют препятствия квантового прохождение, при повышении чувствительности. Эти препятствия, обычно называемые стандартными квантовыми пределами.



Установка зеркал в танках требует защиты их рабочей поверхности от пыли. На

фото (справа) директор одной из антенн Д-р. Ф. Рааб и один из авторов этого обзора в «скафандрах», защищающих зеркала от попадания пыли во время их установки в антенне.

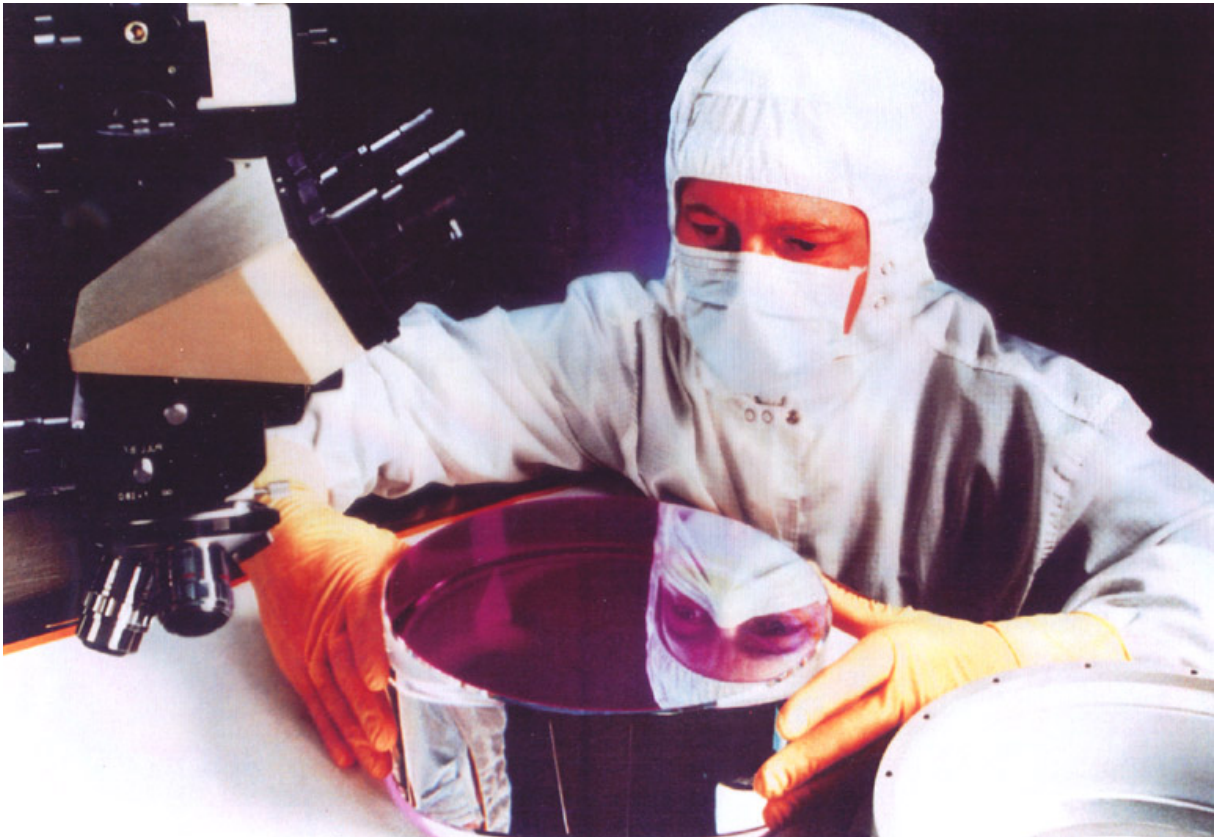


Фото одного из зеркал (пробных масс антенны) в руках оператора. Зеркало изготовлено из плавленного кварца высокой чистоты (потери на поглощение: 10^{-6} на длине 1 см). Поверхность зеркала — вогнутая (радиус кривизны 14 км) изготовлена с уровнем точности 10^{-7} см, покрыта многослойным диэлектрическим отражателем (отличие коэффициента отражения от единицы порядка 10^{-5}). (Standard Quantum Limits – SQL), возникают, если в измерительной системе выбрана “неправильная” наблюдаемая – координата (они известны более тридцати лет [10]). Происхождение SQL пределов очень простое: они есть следствие соотношений неопределенностей Гейзенберга для координаты и импульса, и конечности времени измерения τ_{meas} . В соответствии с этими соотношениями при протяженном во времени измерении координаты непрерывно немного возмущается импульс (т. е. и скорость, если пробная масса – свободная). В течение полного времени измерения τ_{meas} возмущение в начале интервала превращается в добавочное возмущение координаты. В результате за полное время измерения τ_{meas} координату свободной массы m нельзя измерить точнее чем

$$\Delta x_{SQL} \cong \sqrt{\frac{\hbar \tau_{meas}}{2m}} = 1,6 \times 10^{-17} \text{ см} \left(\frac{\tau_{meas}}{5 \times 10^{-3} \text{ s}} \right)^{\frac{1}{2}} \times \left(\frac{m}{10^4 \text{ gram}} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad 5)$$

Эта величина очень близка к планируемой в LIGO-II $\Delta x \cong 2 \times 10^{-17}$ см ! Иными словами, на втором этапе LIGO экспериментаторы должны вплотную приблизиться к “зоне” квантового “поведения” макроскопических зеркал и к тому же при комнатной температуре.

Как обойти препятствие SQL известно давно: например не следует измерять Δl , но сделать измеритель, который регистрировал бы только изменение скорости (или импульса) одного зеркала относительно другого. В настоящее время в содружестве LIGO идет интенсивная проработка новых, как принято называть, топологий лазерных гравитационно-волновых антенн, чувствительность которых не ограничена величиной SQL. Наиболее перспективные из них предложены членом группы МГУ Ф.Я. Халили. По-видимому, в ближайшие годы эти топологии будут опробованы на макетах с тем, чтобы по завершении этапа LIGO-II (примерно в 2010-2011 гг.) приступить к очередной переоснастке антенн. Существующие сегодня оценки возможностей новых квантовых методов измерений позволяют надеяться выиграть в чувствительности по крайней мере раза в 3-5, т. е. достигнуть чувствительности $h \cong (2-3) \cdot 10^{-23}$ на третьем этапе LIGO.

Приведенные в этом разделе примеры разработок качественно новых технологий и методов измерений это отнюдь не все, что сделано в содружестве LIGO. Объем этого обзора не позволяет перечислить все новые приемы и методы измерений уже созданные в рамках этой программы. Не вызывает сомнений, что эти методы и технологии найдут применение в других областях экспериментальной физики.

III. Ожидаемые результаты исследований на наземных гравитационно-волновых антеннах

В первом разделе этого обзора было отмечено, что в проектах LIGO и VIRGO в первую очередь ожидается обнаружение всплесков излучения от сливающихся двойных нейтронных звезд. Однако потенциально существуют и другие возможные источники всплесков в рабочем частотном диапазоне антенн (от 30 Гц до 1 кГц). К ним следует отнести взрывы сверхновых звезд. Такие взрывы происходят много чаще чем слияния нейтронных звезд (один раз в 20-40 лет в одной галактике). Однако теоретикам-космологам пока не удалось разработать модель такого взрыва, из которой следовал бы сценарий всплеска гравитационного излучения. Дело в том, что имеющиеся сценарии (удовлетворительно описывающие наблюдения) основаны на сферически симметричном взрыве. Но при такой картине нет гравитационного излучения (т. к. нет квадрупольной компоненты движения масс звезды во время взрыва). Вполне вероятно, что наличие значительного вращательного момента у такой звезды до взрыва, приведет к нарушению сферической симметрии движения массы во время взрыва и соответственно к всплеску гравитационного излучения.

Детальный анализ формы всплеска от слияния двух нейтронных звезд вне всякого сомнения должно помочь создать уравнение состояния для нейтронной материи, из которой состоят такие звезды. Уместно напомнить, что в земных условиях экспериментаторы таким видом материи не располагают.

Есть довольно большая вероятность, что с повышением чувствительности (на этапе LIGO-II или LIGO-III) удастся зарегистрировать всплеск гравитационных волн, возникающий при слиянии двух черных дыр (относительно небольшой массы). Теоретики-космологи на сегодня могут “предсказать” только то, что такие процессы возможны. Однако, как часты такие слияния – моделей нет. Очень важно отметить, что при слиянии черных дыр будут происходить процессы, для которых еще не разработаны теоретические методы анализа (гравитационный потенциал на поверхности черной дыры **точно** равен квадрату скорости света).

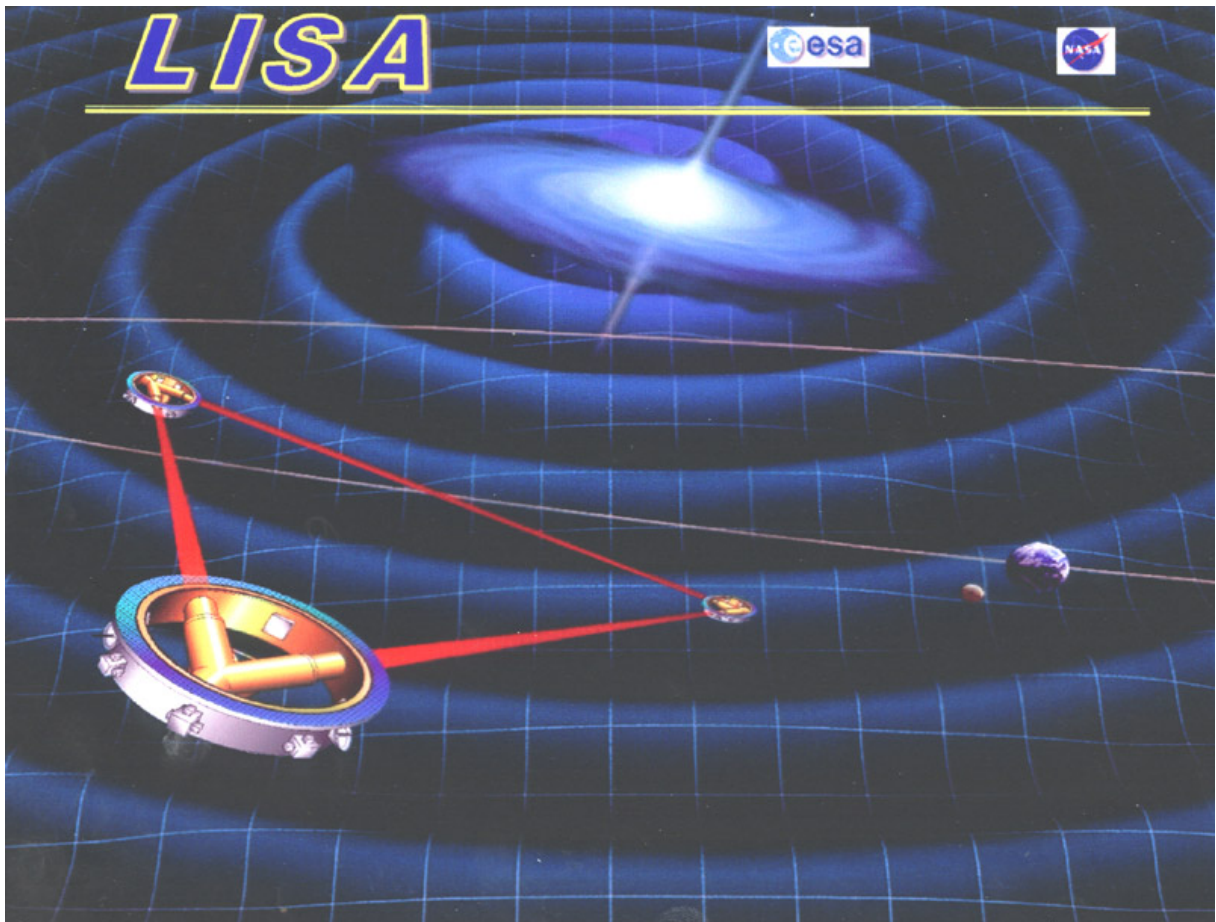
Иными словами, решение этой задачи – это случай решения ультрарелятивистского гравитационного взаимодействия. Несколько групп теоретиков в течение более десяти лет пытались (и пока безуспешно) решить эту задачу. По образному выражению одного из них в этом случае (т. е. при слиянии двух черных дыр) мы имеем дело только с эволюцией пространства и времени, а материи здесь нет. Можно и иначе характеризовать поиск такого рода всплесков: в этом случае будет проверяться ОТО для очень сильных гравитационных полей.

Кроме поиска всплесков от разных астрофизических явлений взрывного характера, есть еще одна “область применения” антенн LIGO и VIRGO: это поиски корреляций между зарегистрированными всплесками гравитационного излучения и другими событиями, регистрируемыми наземными устройствами в частности гамма-всплесками, сверхмощными ливнями космического излучения. И в этом случае можно надеяться получить качественно новую информацию о процессах в нашей Вселенной.

IV. Внеземные гравитационно-волновые антенны (проект LISA)

Проект LISA (Laser Interferometer Space Antenna) сходен с проектами LIGO и VIRGO. В нем также используются свободные массы, удаленные на большое расстояние l , и лазерный интерферометр для измерения малых вариаций расстояния Δl , вызванных гравитационными волнами. Количественное различие заключается в величине l и рабочем диапазоне частот гравитационного излучения: диапазон частот от 10-5 Гц до 10-2 Гц (т. е. много ниже чем в LIGO и VIRGO), а $l = 5 \times 10^6 \text{ км} = 5 \times 10^{11} \text{ см}$ (т. е. на 6 порядков больше чем в наземных антеннах). Соответственно проект LISA рассчитан на совершенно другие типы астрофизических источников (см. ниже). Пробными массами в этом проекте являются три спутника, которые находятся друг от друга на расстоянии 5 млн. километров, а все вместе на орбите Земли (вокруг Солнца). Эта “группа” спутников будет “размещена” примерно на расстоянии 20 млн. км от Земли (см. рис.3). В отличие от LIGO и VIRGO лазерные интерферометры LISA смогут использовать только одно отражение (из-за ослабления оптического потока, вызванного дифракцией).

Для того чтобы оценить насколько сложен этот проект уместно привести характерные величины для области частот вблизи 10-3 Гц, около которой LISA будет обладать наибольшей чувствительностью $h \cong 2 \cdot 10^{-22}$: $\omega_{grav} = 2\pi \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$, $\Delta l = 5 \times 10^{-11} \text{ см}$, $a_{grav} = 2 \times 10^{-15} \text{ см} / \text{с}^2$. Величину $\Delta l = 5 \times 10^{-11} \text{ см}$ относительно нетрудно измерить даже при однократном отражении (ей соответствует довольно большой сдвиг фазы $\Delta\varphi = 3 \times 10^{-6} \text{ рад}$). Ключевой величиной в этом случае является амплитуда разности ускорений $a_{grav} = 2 \times 10^{-15} \text{ см} / \text{с}^2$. Дело в том, что при достаточно точных измерениях орбит спутников оказывается, что они движутся и не по ньютоновским орбитам и даже не по эйнштейновским (т. е. в соответствии с ОТО). Для относительно легких спутников (массой порядка 100 кг) это отличие в величине ускорений просто измерить: оно около $10^{-5} \text{ см} / \text{с}^2$ для низколетящих околоземных и порядка $10^{-6} \text{ см} / \text{с}^2$ для спутников достаточно далеких от Земли. В первом случае спутников “притормаживают” хвосты земной атмосферы, во втором – это, в основном, простой эффект давления солнечной радиации (которая ко всему прочему не постоянна). Как отделаться от этого неприятного “волочения” спутников (в англоязычной литературе употребляется термин drag) известно давно. Нужно внутрь (в самый центр) спутника поместить управляющую массу. Она защищена от давления хвостов атмосферы и от давления солнечной радиации. Массу следует окружить бесконтактными датчиками координат (массы относительно центра спутника). Датчики



должны управлять несколькими маломощными реактивными двигателями. Цель этого “управления”: “выставить” весь спутник так, чтобы управляющая масса все время находилась в гравитационном центре спутника. Первый такой спутник был сделан и запущен в 1972г. профессором ДеБра и его коллегами из Стэнфордского Университета (США). В нем удалось “подавить” негравитационное ускорение спутника до $10^{-8} \text{ см} / \text{с}^2$. В последующие годы, на других спутниках остаточное “волочение” было снижено до $10^{-10} \text{ см} / \text{с}^2$.

Из этого краткого описания ясно, насколько сложна задача разработчиков спутникового “оснащения” в проекте LISA, в котором негравитационное остаточное ускорение должно быть на уровне меньшем $10^{-15} \text{ см} / \text{с}^2$ (при времени усреднения порядка 10^3 с) т. е. на пять (!) порядков лучше, чем достигнутое к настоящему времени. Для иллюстрации сложности этой задачи уместно указать на то, что стенки камеры, в которую помещена управляющая масса, должны иметь одну и ту же температуру. Допускается разница в температуре не более $10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}$ (а ведь на спутник “обрушивается” несколько киловатт мощности оптического излучения Солнца!).

В ближайшие два года предполагается в рамках проекта LISA запустить пробный спутник, на котором должно быть проведено испытание описанной выше системы подавления “волочения” спутника. Три собственно основных спутника LISA предполагается “установить” на их орбитах в 2010–2012 гг.

Как отмечалось выше, физические задачи проекта LISA существенно отличаются от задач LIGO и VIRGO. Причина отличия – другой диапазон длин волн гравитационного излучения. Первое, что смогут зарегистрировать с большой надежностью, это гравитационное излучение от близких к нашей Солнечной системе двойных звезд (а не редкое в Галактике слияние нейтронных пар!). У многих таких двойных звезд хорошо известен период обращения (по оптическим измере-

ниям), и эта информация существенно облегчает задачу обнаружения. Вторая задача – это обнаружение излучения при поглощении сверхмассивными черными дырами нейтронных звезд. Наиболее интересным с нашей точки зрения является третья задача: обнаружение фона реликтового гравитационного излучения (аналогичного реликтовому электромагнитному излучению, открытому в 1965 г.). Когда такое открытие произойдет – на улице космологов будет большой праздник, т. к. информация о величине и спектре этого излучения должна весьма существенно повлиять на наши представления об очень ранних стадиях процесса рождения нашей Вселенной.

Подробное описание проекта LISA читатель сможет найти в сборнике статей [11].

V. Гравитационные волны во Вселенной

Между гравитационными волнами и электромагнитными волнами существует много сходства, но есть и существенные различия. Одно из различий, которое важно для этого параграфа — допустимые частоты свободно распространяющегося излучения. Диапазон электромагнитного излучения, которое может свободно распространяться в лаборатории, на Земле или в космическом пространстве, ограничен. Со стороны верхних частот эти ограничения начинаются с частоты фотонов порядка 10^{26} Гц, со стороны нижних частот ограничения начинаются для волн порядка $10 - 100$ Гц. Волны более низкой частоты или более высокой частоты, чем этот диапазон, эффективно поглощаются веществом, которое присутствует в лаборатории, на Земле, в космическом пространстве. Несмотря на эти ограничения, диапазон частот, в котором свободно существует электромагнитное излучение, как можно видеть из приведенных оценок, достаточно широк.

Для гравитационных волн диапазон свободного распространения волн существенно шире. Самые высокочастотные гравитоны, которые могут распространяться в нашей Вселенной, могут иметь частоту, сравнимую с так называемой планковской частотой 10^{43} Гц. Самые низкочастотные гравитационные волны имеют период сравнимый со временем существования Вселенной или частоту 10^{-18} Гц. Другими словами, диапазон, дозволенный для свободного распространения гравитационных волн, значительно шире диапазона свободного распространения электромагнитных волн. Происходит так потому, что коэффициент поглощения гравитационного излучения примерно на сорок порядков (10^{-40}) слабее, чем у электромагнитного излучения. Это важное отличие позволяет «аккумулировать» в гравитационном излучении значительно больше информации о состоянии вещества, которое излучает гравитационные волны.

Наша Вселенная расширяется. В расширяющейся Вселенной гравитационные волны претерпевают эволюцию, которую сейчас мы кратко опишем. Так же как и у электромагнитной волны, у гравитационной волны меняется частота, она испытывает красное смещение. Волна, которая была испущена с частотой f_g в некоторый момент времени в прошлом, будет наблюдаться с частотой f_0 . Меняться будет не только частота. Амплитуда волны

также будет адиабатически убывать. Если в начальный момент времени амплитуда волны составляла h_g , то сегодня она будет иметь величину h_0 :

$$f_0 = \frac{f_g}{1+z} \quad \text{и} \quad h_0 = \frac{h_g}{1+z},$$

где z – красное смещение эпохи излучения [12].

Вселенная расширяется с момента времени, который называется «Большой Взрыв» или сингулярность. Волны – это колебательный процесс, который характеризуется периодом. Если с момента «Большого Взрыва» времени прошло меньше, чем период, то волна еще не успела «колебнуться» один раз и для наблюдателя такая волна выглядит застывшей неравномерностью пространства–времени. Поэтому в космологии выделяется момент времени, когда гравитационная волна приобретает свойства волнового процесса. Он называется моментом выхода волны из-под горизонта частиц и определяется равенством длины волны размеру горизонта частиц (длине светового пути с момента начала расширения).

Наиболее интересную информацию гравитационные волны будут приносить из ранней Вселенной, когда температура плазмы в ней была значительно выше, чем все температуры, полученные в условиях земных лабораторий.

Введем следующие обозначения: температуру окружающей плазмы в ранней Вселенной обозначим T_g , а амплитуда излучения пусть будет h_g . Температуру будем измерять в энергетических единицах – так принято в физике высоких энергий. Единица измерений 1 ГэВ (GeV) – гигаэлектронвольт, что примерно соответствует 10^{13} К. Амплитуда и частота в современную эпоху будут:

$$h_0 = 5 \times 10^{-13} h_g \frac{1 \text{ GeV}}{T_g}$$

и

$$f_0 = 10^{-8} \frac{T_g}{1 \text{ GeV}} \text{ Гц.}$$

Волны с частотой 1 кГц, которые могут быть зарегистрированы интерферометром LIGO, излучаются, а, следовательно, и несут информацию о Вселенной с температурой 10^{11} ГэВ. Из этих формул можно исключить температуру T_g и тогда получим совсем простую формулу:

$$h_0 = 5 \times 10^{-21} h_g \frac{f_1}{f_0}, \quad (6)$$

здесь $f_1 = 1$ Гц. Плотность энергии в таком излучении будет меньше, чем плотность в реликтовом электромагнитном излучении, если амплитуда волн в момент излучения меньше единицы. Точнее, плотность энергии гравитационного излучения можно оценить как:

$$\varepsilon_g \approx h_g^2 \varepsilon_\gamma$$

где $\varepsilon_\gamma = 4 \times 10^{-13}$ эрг см⁻³.

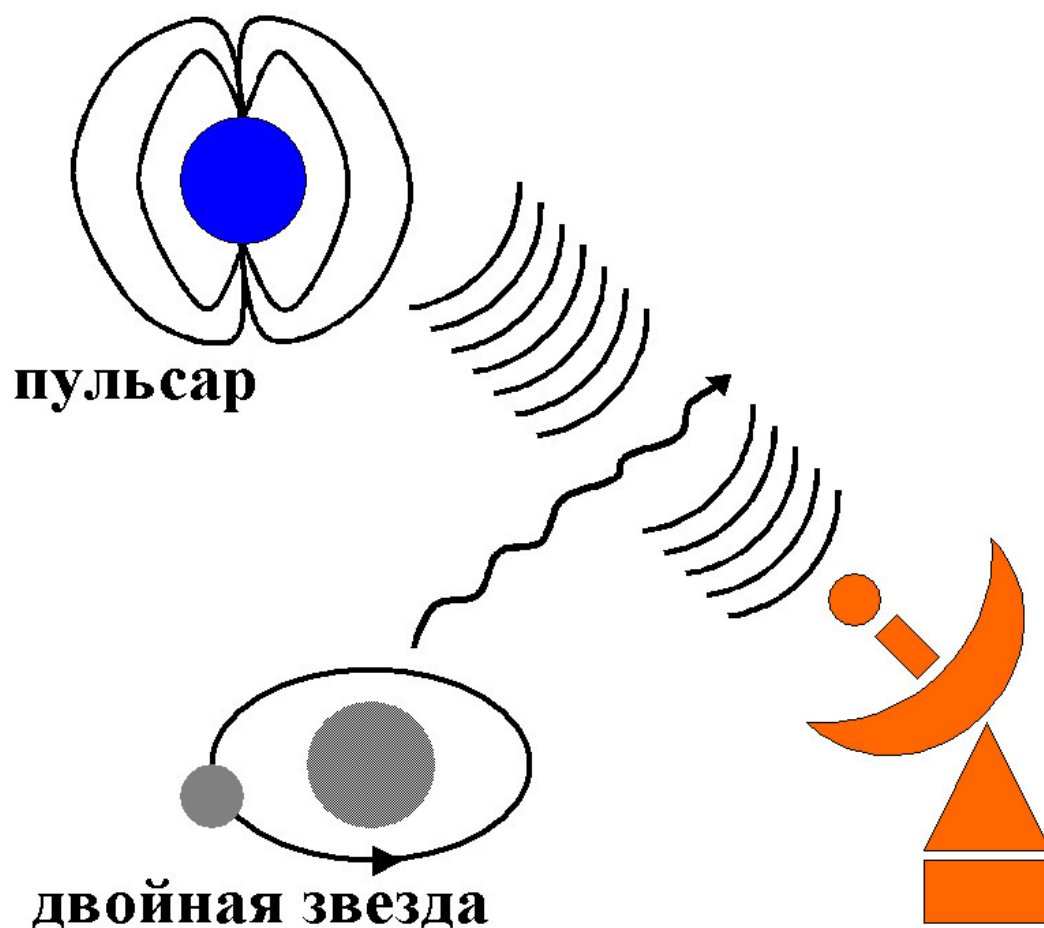
Интересно также отметить, что когда температура во Вселенной составляет величину $10^3 \div 10^4$ ГэВ, то гравитационные волны, которые генерируются в эту эпоху, сегодня попадают в диапазон детектора LISA $f_0 = 10^{-4} \div 10^{-5}$ Гц.

Из формулы (6) видно, что следы каждой эпохи сохраняются в виде гравитационного излучения определенной частоты.

Изучая излучение на различных частотах, астрономы могут изучать различные эпохи, как биологи по кольцевым срезам дерева могут изучать состояние дерева в течение жизни. Поэтому для космологов и астрономов важны гравитационные волны самых разных частот, в идеале желательно наблюдать гравитационные волны от частот порядка 10^{-18} Гц до частот порядка 10^{43} Гц. Естественно для столь чудовищно широкого диапазона частот необходимы разные детекторы. На различных типах детекторов мы сейчас и остановимся.

Гравитационные волны чрезвычайно слабо взаимодействуют с веществом (как было отмечено выше). Это свойство является большим недостатком для физиков, которые хотят зарегистрировать гравитационные волны. Однако для космологов, которые хотят использовать этот вид излучения как новый телескоп для изучения глубинных свойств материи и нашей Вселенной — это большое преимущество. От первых мгновений новорожденной Вселенной до нас могут доходить только гравитационные волны. Любые другие виды излучения будут поглощены чудовищной толщей горячего вещества. Только гравитационные волны могут донести до нас свойства Вселенной в эти первые мгновения ее жизни.

Выше были описаны проекты LIGO и LISA — проекты лазерных интерферометров. Эффективно такие интерферометры могут регистрировать волны с длиной порядка размеров плеча интерферометра.



На рисунке изображена принципиальная схема детектирования гравитационных волн методом тайминга пульсаров. От пульсара к радиотелескопу, который стоит на Земле, распространяются импульсы. Гравитационные волны от двойной звезды (или другого источника излучения) распространяются перпендикулярно траектории пульсар — Земля. В этом случае возникает переменный показатель преломления для импульсов пульсара. Этот показатель не зависит от частоты импульсов. Конечно, чтобы получить плечо с эффективным размером порядка нескольких световых лет или больше необходимо искать соответствующие интерферометры в космосе. Там существуют такие источники радиоизлучения. Конечно, эти источники не могут работать как земные интерферометры, но принцип работы таких детекторов очень близок к ним.

VI. Пульсары и анизотропия РИ (реликтового излучения) как детекторы ГВ (гравитационных волн)

Длинные гравитационные волны с длиной волны в несколько световых лет тоже можно детектировать с помощью интерферометров. Если в качестве источника радиоизлучения взять пульсар, то размер плеча такого интерферометра будет равен расстоянию до пульсара. Пульсар – это нейтронная звезда в нашей Галактике, он является источником радиоимпульсов. Период следования импульсов является удивительно стабильным. Стабильность периода некоторых пульсаров сравнима со стабильностью лучших земных часов, а стабильность так называемых миллисекундных пульсаров даже превосходит земные часы. Поэтому вместо излучения лазера можно использовать излучение пульсара. На рис. 4 показана принципиальная схема регистрации гравитационных волн от двойной

звездной системы при помощи импульсов пульсара. Роль сдвига фазы оптического излучения здесь играет задержка импульсов. В том случае, когда радиоимпульсы пульсара распространяются в поле гравитационной волны, интервал между импульсами меняется. Как следствие, возникает неравномерность во времени их путешествия от пульсара до наблюдателя. Другими словами, импульсы пульсара приходят к наблюдателю через неравные промежутки времени. Неравномерность времени прихода импульсов равняется:

$$\frac{\delta P}{P} = n_p + n_{IM} + \frac{1}{2}h \quad (7)$$

Время прихода импульсов от различных пульсаров наблюдается уже несколько десятилетий. Этот метод изучения астрономических объектов называется таймингом пульсаров. Таким методом можно регистрировать не только монохроматические гравитационные волны, как показано на этом рисунке, но и стохастический фон волн, рожденных в ранней Вселенной.

Неравномерность прихода импульсов складывается из-за двух механизмов. Первый – это неравномерность посылки импульсов самим пульсаром, его внутренний шум тайминга. Второе слагаемое возникает из-за переменного показателя преломления межзвездной среды по пути радиоимпульса, неточность измерения времени прихода также дает вклад в тайминг и, наконец, влияние гравитационных волн по пути распространения импульса – это последнее слагаемое в формулу (7), которое для нас является наиболее интересным. Все остальные слагаемые просто мешают выделить последнее. Неравномерность, возникающую по пути, можно выделить и учесть, наблюдая пульсар на разных частотах. В межзвездной плазме импульсы распространяются с разной скоростью, и эта неравномерность тайминга легко выделяется радиоастрономическими методами. Неравномерность излучения импульсов тоже можно выделить и уменьшить, наблюдая несколько пульсаров. Шум приемной аппаратуры является самым фундаментальным. Его также можно учесть и уменьшить, как описано в предыдущих параграфах, но это требует очень больших усилий, которые до сих пор в радиоастрономии не применялись.

Остается резюмировать, что современная точность тайминга пульсаров позволяет достичь точности измерений h на уровне 3×10^{-15} [13], в интервале периодов 1 – 3 года, что, однако, недостаточно для детектирования гравитационных волн из космоса.

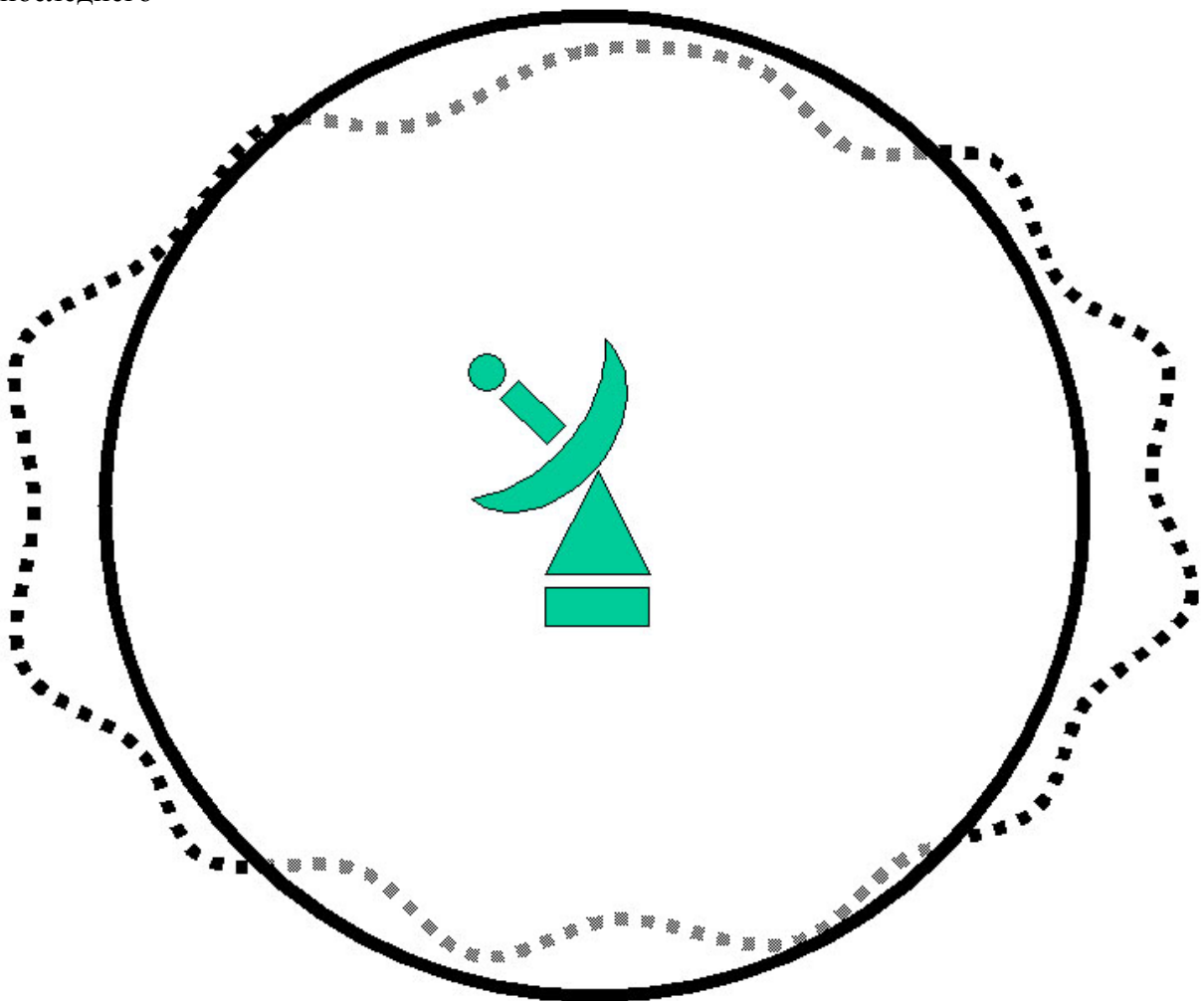
Здесь уместно вновь напомнить, что пульсары уже были использованы для проверки общей теории относительности. Уникальный космический прибор — двойной пульсар PSR 1913 + 16. Это тесная двойная система, один из компонентов которой — пульсар. Он обладает стабильностью достаточной для проведения прецизионных экспериментов по проверке общей теории относительности. Массы обеих компонент порядка солнечной массы, а близость двух масс обеспечивает сильное гравитационное поле. Все это позволило провести измерения классических тестов общей теории относительности, таких как: смещение периастра, эффекта Шапиро, кроме того, на этой системе был измерен эффект следующего порядка малости и, наконец, было измерено изменение орбитального периода двойной системы из-за потерь на гравитационное излучение. Измерения блестяще подтвердили предсказания Эйнштейна о существовании гравитационного излучения и сами уравнения общей

теории относительности. Нелишне напомнить, что за экспериментальное изучение общей теории относительности в гравитационной лаборатории, созданной самой природой — двойном пульсаре PSR 1913 + 16, астрономы, которые его открыли и изучали — Дж. Тэйлор и Ч. Халс — удостоены Нобелевской премии по физике.

Рассмотрим, наконец, способы детектирования гравитационных волн с периодом порядка возраста нашей Вселенной. Для этого нам надо выбрать излучатель, расположенный на расстоянии

$$L = c T_U$$

здесь c — скорость света, а T_U — возраст Вселенной. Во Вселенной есть и такие источники электромагнитных фотонов! Это поверхность последнего



На рисунке изображена плоскость последнего рассеяния (сплошная линия), от которой фотоны движутся к радиотелескопу (в центре круга). Температура этой поверхности является постоянной. Пунктирная линия представляет слабые неоднородности температуры на поверхности последнего рассеяния, созданные гравитационными волнами с длиной порядка расстояния от наблюдателя до поверхности последнего рассеяния. рассеяния (объяснение термина «поверхность последнего рассеяния» см. ниже). Правда, в отличие от других способов детектирования гравитационных волн, здесь мы не можем наблюдать переменности сигнала во времени — слишком уж длительный период. Но мы можем наблюдать «застывшую» картинку на небесной сфере.

Кроме того, в этом случае мы не знаем, когда вышел фотон, мы не можем измерять его задержку или сдвиг фазы излучения. Но мы можем измерять производную от фазы по времени — частоту фотонов. Сравнивая частоты фотонов, идущих с разных направлений, можно зарегистрировать гравитационные волны. Обсудим, как космологи сейчас пытаются детектировать космологические гравитационные волны.

Мы живем в расширяющейся Вселенной. Кинетические и динамические параметры расширения характеризуются масштабным фактором и его зависимостью от времени. Масштабный фактор — это функция, зависящая только от времени и показывающая как изменяется расстояние между двумя пробными частицами во Вселенной во время ее расширения.

В прошлом, когда масштабный фактор был примерно в тысячу раз меньше, расстояние между пробными частицами были в тысячу раз меньше, а вещество было в миллиард раз плотнее, во Вселенной была высокотемпературная плазма, состоящая из электронов, протонов, массивных слабо взаимодействующих частиц и фотонов. Количество фотонов было гораздо больше, чем количество частиц другого сорта в несколько миллиардов раз, и именно поэтому Вселенная называется "горячей". При расширении температура падает и Вселенная остывает. Темп расширения значительно более медленный, чем характерное время установления равновесия в горячей плазме, поэтому частицы в ней находятся в термодинамическом равновесии. Одной из таких частиц является фотон. В вакууме фотон распространяется со скоростью света, не изменяя своей частоты, в горячей плотной плазме из-за рассеяния на электронах фотоны меняют частоту и «забывают» первоначальную информацию.

Когда Вселенная расширяется настолько, что плазма остывает до температуры рекомбинации, то электроны начинают соединяться с протонами, образуя нейтральный водород, а фотоны, которые были в этом месте, начинают распространяться практически свободно. Фотон одна из частиц, которая была в плазме, и именно эти фотоны являются реликтовыми.

На рис.5 показано как движутся фотоны. В центре рисунка находится наблюдатель. Естественно, фотоны, вышедшие из места, нарисованного сплошной линией, идут во всех направлениях. Мы видим не все фотоны, а только те, которые дойдут до нас. Точки, из которых фотоны доходят до наблюдателя, образуют так называемую поверхность последнего рассеяния (она то и изображена сплошной линией). Это единственный источник во Вселенной, внутри которого мы находимся. Мы видим реликтовые фотоны со всех направлений. В момент рекомбинации температура этой поверхности равна примерно 3 000 К. Ее температура в современный момент времени 3 К. Это уменьшение температуры произошло из-за расширения Вселенной, из-за эффекта Доплера.

Надо сказать, что реликтовые фотоны обладают уникальным свойством. Температура по поверхности последнего рассеяния почти постоянна. Космологи называют это свойство изотропией. Температура изотропна с точностью до 3 милликельвина. Анизотропия — это разница температуры в разных направлениях на небе. Измерим телескопом яркость реликтового излучения в каком — либо направлении на небе, повернем его на 180° и увидим, что температура изменилась примерно на 3 милликельвина. Это происходит из-за того, что Земля, солнечная система, наша Галактика двигаются сквозь реликтовое излучение с

некоторой скоростью – это, так называемый, кинетический член в анизотропии реликтового излучения, который отвечает за дипольную анизотропию. Поэтому по ходу движения температура чуть выше, сзади температура несколько ниже.

Помимо кинетического члена есть и потенциальные члены в анизотропии реликтового излучения, которые обязаны своему происхождению гравитационным полям очень больших масштабов. Масштаб переменности этих полей сравним с расстоянием до поверхности последнего рассеяния.

Во Вселенной должны существовать гравитационные волны с длиной, значительно превышающей расстояние до сферы последнего рассеяния. Давайте рассмотрим, как приливное гравитационное поле такой волны влияет на состояние реликтовых фотонов. Фотоны движутся с поверхности последнего рассеяния до наблюдателя. Как и в лазерном интерферометре появляется два свободных тела — источник фотонов (кусочек поверхности) и наблюдатель, который принимает эти микроволновые фотоны. Распределение потенциала в приливном поле имеет характерную седлообразную форму. Рассмотрим два направления, по которым гравитационный потенциал меняется наиболее сильно. Первое направление – изменение потенциала от минимального до экстремального значения (которое приходится на седлообразную точку) и вновь уменьшение его до минимального значения. Второе направление выберем так, чтобы потенциал менялся от максимального до экстремального значения, а затем вновь возрастал до максимального значения. Для седлообразной поверхности эти два направления перпендикулярны друг другу. Седлообразная точка является точкой экстремума и совпадает с положением наблюдателя. Фотоны двигаются с поверхности последнего рассеяния к наблюдателю. Когда они двигаются вдоль первого направления, т.е. по потенциалу вверх, они теряют энергию и становятся более красными, когда они "скользят" по потенциалу вниз, они приобретают энергию и становятся голубыми. Для одного фотона меняется частота, для ансамбля реликтовых фотонов меняется температура. Возникает следующая картина: в направлении на минимум потенциала наблюдается понижение температуры, в других направлениях, наблюдается повышение температуры. Возникает характерная квадрупольная компонента в угловом распределении температуры по небесной сфере или, как говорят космологи, возникает квадрупольная флуктуация температуры. Период угловой зависимости составляет 90° . Для гравитационных волн с длиной несколько меньшей расстояния до сферы последнего рассеяния, угловой период уже меньше 90° . Гравитационные волны нескольких частот уже формируют причудливый "муар" на сфере последнего рассеяния.

Амплитуда температурной флуктуации в зависимости от амплитуды гравитационной волны составляет

$$\frac{\delta T}{T} \propto \frac{1}{2} h$$

На рис. 5 пунктирной линией показано искажение температуры реликтового излучения в присутствии приливного поля, созданного гравитационными волнами с различными периодами, которые несколько меньше возраста нашей Вселенной.

Прежде чем перейти к описанию экспериментов, надо сказать, что во Вселенной существуют не только гравитационные волны, но и гравитационные поля, связанные с контрастом плотности вещества. Амплитуда этих полей

значительно больше, чем гравитационных волн. Поле, связанное с контрастом плотности, также будет вызывать анизотропию. Точнее, анизотропия, вызванная неоднородной плотностью вещества во Вселенной и анизотропия, вызванная гравитационными волнами, складываются. Наблюдая только анизотропию выделить вклад гравитационных волн в эту сумму невозможно.

К счастью, излучение характеризуется не только интенсивностью, но и поляризацией. Поляризация характеризуется тремя параметрами Стокса. Надо сказать, что поле, вызванное неоднородным распределением вещества во Вселенной, и поле гравитационных волн вызывают только линейную поляризацию реликтового излучения. Различие возникает, когда мы рассматриваем четность поляризации. Гравитационное поле, связанное с неоднородным распределением вещества, создает только, так называемую, *E* моду поляризации. Картинка распределения поляризации *E* моды в какой – либо небольшой части небесной сферы является симметричной относительно отражения в зеркале или, как говорят математики, инвариантной при преобразованиях четности. Гравитационные волны создают как *E* моду поляризации, так и *B* моду поляризации реликтового излучения. *B* мода является неинвариантной при преобразованиях четности [14]. На этом математическом принципе основан способ, который позволяет измерить количество космологических гравитационных волн.

Анизотропия реликтового излучения была обнаружена в 1992 году в результате работы спутника "Реликт". В январе 1992 года группа, в которую входили сотрудники ИКИ АН СССР Струков И.А., Скулачев Д.П., Брюханов А.В. и сотрудник ГАИШ МГУ Сажин М.В., на семинаре в астрономическом институте (ГАИШ МГУ) объявила, что зарегистрирована анизотропия реликтового излучения, хотя отношение сигнала к шуму в этом эксперименте было небольшое -- порядка трех. Мы опубликовали статью в "Письмах в Астрономический Журнал" и послали в "MNRAS" журнал Королевского астрономического общества (Великобритания), где она также была опубликована через несколько месяцев.

К тому времени на орбите работал американский спутник "COBE" (аббревиатура английских слов "COsmic Background Explorer"). Это был аппарат, аналогичный спутнику "Реликт", только более совершенный. Он имел три частотных канала, в каждом из каналов было два радиометра. Вскоре после нашей статьи, была опубликована статья группы COBE, где были изложены результаты работы спутника и объявлено о детектировании анизотропии реликтового излучения.

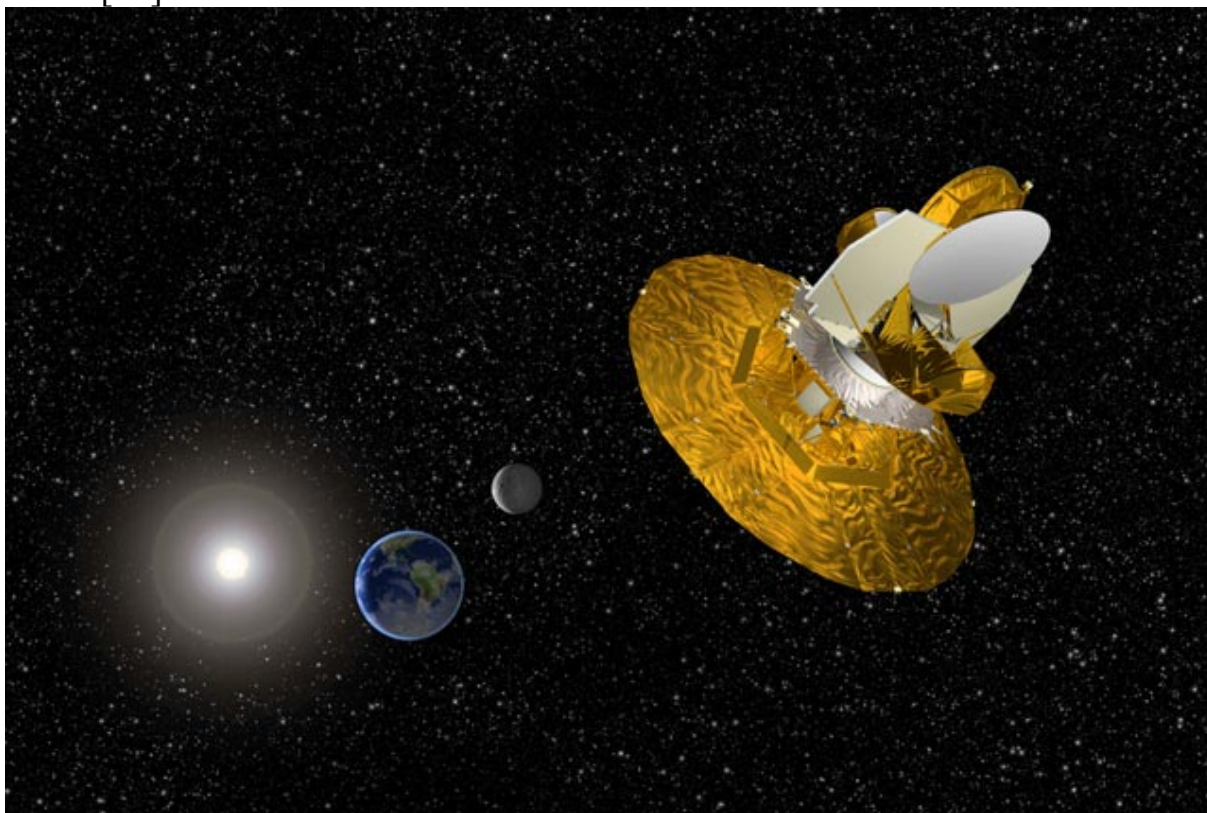
Три частотных канала позволили группе COBE уверенно выделить анизотропию на поверхности последнего рассеяния от анизотропии галактического и внегалактического радиоизлучения. Этот факт, а также большее отношение сигнал/шум после завершения эксперимента (COBE работал на орбите свыше 4 лет), позволяет американским исследователем связывать открытие анизотропии реликтового излучения с результатами аппарата COBE.

После первых успешных экспериментов по наблюдению анизотропии реликтового излучения, космологи неоднократно проводили такие наблюдения и изучали анизотропию.

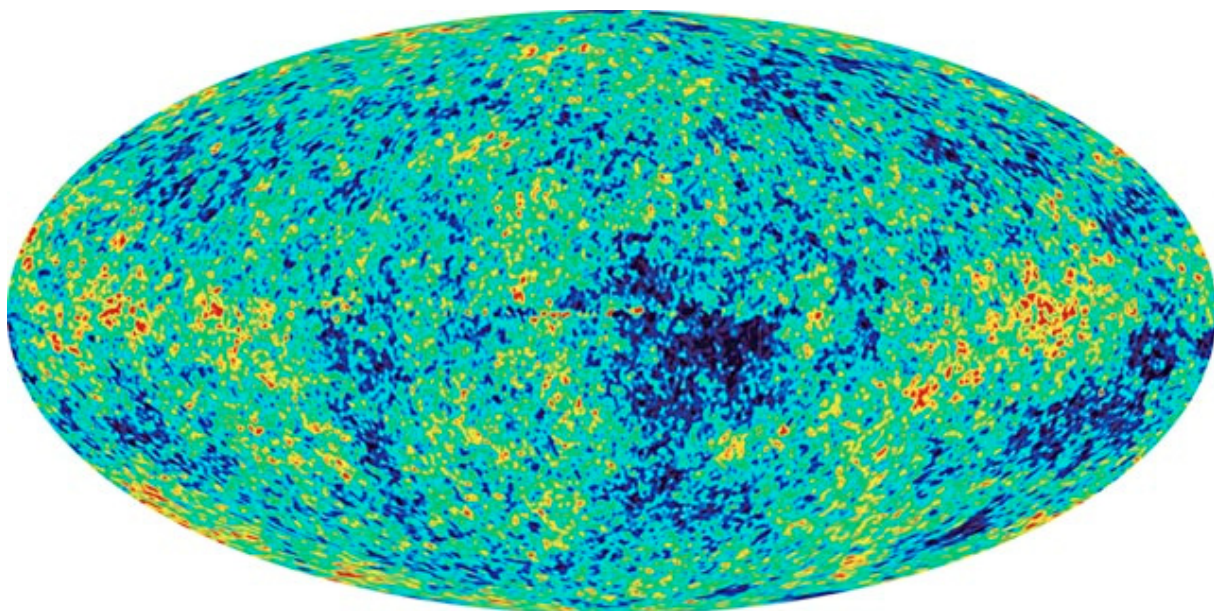
Однако, качественно новые результаты были получены в течение последних пяти лет. Эта новая информация об анизотропии была получена в

результате проведения экспериментов «Бумеранг», «Археопс» и, наконец, WMAP. Результаты последнего эксперимента, WMAP, были опубликованы в начале 2003 года

[15].



Здесь изображено положение спутника WMAP в точке L2, а также Земли, Луны и Солнца.



Карта анизотропии реликтового излучения. Небесная сфера представлена в проекции Аитова-Гаммера. Синий цвет показывает понижение температуры по сравнению со средней температурой. Красный цвет означает повышение температуры. Средняя дисперсия температуры по карте составляет примерно 100 микрокельвин. Название спутника WMAP представляет собой аббревиатуру "Wilkinson Microwave Anisotropy Probe". Вначале этот спутник назывался "MAP".

Теперь его название изменилось. Знаменитый американский ученый Дэвид Вилкинсон, который был одним из авторов проекта "MAP", умер в сентябре 2002 года, его ученики и соавторы решили назвать спутник в его честь.

Спутник представляет из себя аппарат весом 830 кг. Он был запущен в 2001 году и выведен в точку **L2**, которая находится на расстоянии 1.5 млн. км от Земли в стороне, противоположной Солнцу. Время жизни спутника в рабочей точке предполагается не менее двух лет, три дополнительных месяца предназначены для вывода спутника в расчетную точку. На рис. 6 художник представил положение спутника в точке **L2**.

В результате работы спутника была получена карта яркости сферы последнего рассеяния. Это карта представлена на рис.7. Пятна различного цвета представляют различие в температуре этой поверхности. Как видно из рисунка, наблюдаемую картину сформировали волны гравитационного поля различной длины. Самая большая длина превышает десять миллиардов световых лет, самая короткая волна составляет сотни миллионов световых лет. Естественно, что изменение этой картины во времени требует наблюдений в течение сотен миллионов лет. Наблюдать это невозможно, поэтому вместо временных изменений космологи наблюдают угловые изменения.

Здесь надо сказать, что анизотропия реликтового излучения вызвана гравитационным полем, связанным с неоднородным распределением вещества во Вселенной. Это доказано наблюдениями поляризации со спутника WMAP. Космологические гравитационные волны пока не обнаружены. Теоретические оценки показывают, что для наблюдения гравитационных волн необходимо повысить чувствительность приборов, по крайней мере, на порядок. Космологи — экспериментаторы сейчас работают над этой проблемой.

VII. Заключение

Из статьи может создаться впечатление о чрезвычайной трудности проблемы детектирования гравитационных волн. И это правильное впечатление. Может быть, не стоит решать эту проблему вообще? Ведь так много проблем вокруг!

Поэтому необходимо сказать несколько слов о том, почему физики прилагают много усилий для детектирования гравитационных волн.

Методы физических исследований менялись на протяжении веков. Современная физика родилась в эпоху Возрождения, когда Галилео Галилей установил метод экспериментального исследования физических явлений. Со временем физики проникали все дальше вглубь вещества. Для проникновения вглубь вещества для изучения молекул, а затем и атомов понадобились физические приборы с большим значением энергии на частицу. Переход к меньшим масштабам требовал все большей энергии частиц, с помощью которых исследовались эти масштабы. В прошлом столетии физики изобрели ускорители элементарных частиц. С их помощью была исследована структура атома и атомного ядра, а также структура физических взаимодействий на более мелких масштабах. Повышая энергии частиц, физики дошли до технологического предела мощности. Сейчас готовится эксперимент **LHC** в ЦЕРНЕ, во всемирной ядерной лаборатории. В ускорителе этого эксперимента протоны будут «разогнаны» до энергий 10 000 ГэВ, в 10 000 раз больше чем энергия покоя самого протона. Но

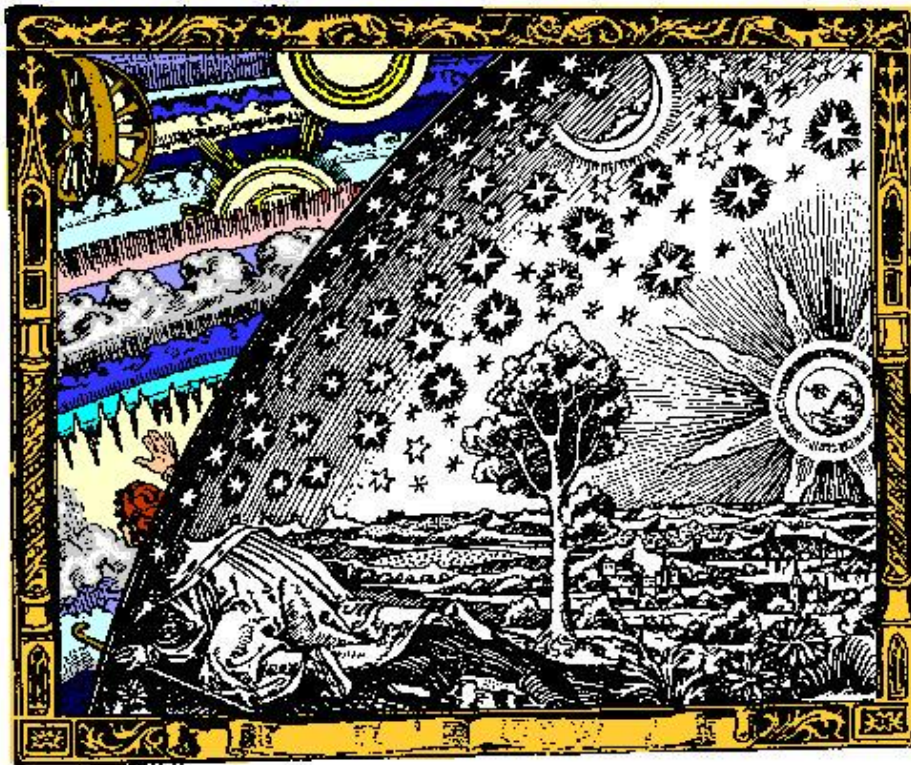
вот построить ускоритель на энергии, которые значительно больше этой — современные технологические возможности пока не позволяют.

Так что же, это означает конец экспериментального метода исследования физических взаимодействий? Ответ простой — нет, не означает. Просто меняются инструменты исследований. Теперь таким инструментом станет гравитационно-волновая астрономия.

Исследование всплесков из космоса на обсерватории LIGO позволит изучать не только внутреннюю структуру нейтронных звезд, но и структуру пространства — времени вблизи горизонта черной дыры. Этот вид исследований невозможно проводить в лабораторных условиях в принципе. Сейчас не видно других физических методов исследований, которые позволили бы изучать эти свойства.

Уже сейчас, основываясь на данных анизотропии, можно сделать некоторые предварительные выводы о структуре взаимодействий в области энергий 10^{16} ГэВ. Несмотря на то, что космологические гравитационные волны не зарегистрированы, одно весьма важное заключение можно сделать уже сейчас — теория инфляции во Вселенной является в общих чертах правильной. Во Вселенной был режим доминирования скалярного поля! Это первые экспериментальные данные, относящиеся к физике взаимодействий вблизи планковских масштабов энергий.

Первые физические данные были получены об энергетических масштабах порядка 0.1 эВ. Это были данные о химических реакциях в веществе. Экспериментально — лабораторные исследования, а затем и технологическое освоение энергий порядка 1 КэВ — 1 МэВ, открыли атомный век с его технологией и, вообще говоря, с присущими ему недостатками. Это было продвижение «всего лишь» в миллион раз по шкале энергий. Что же может сулить человечеству продвижение.



Средневековый путешественник добрался до края Земли, просунул голову сквозь небесную твердь и наблюдает движение планет. Именно так средневековые астрономы представляли устройство нашей Солнечной системы миллиарды и миллиарды раз по шкале энергий? Об этом сейчас можно только гадать [16].

Обнаружение космологических гравитационных волн позволит нам «заглянуть» в раннюю Вселенную, позволит нам изучать физику при таких энергиях, о которых физики на Земле могут только мечтать.

Стоит в заключение вновь подчеркнуть, что гравитационные волны прямо пока еще не открыты. В каждом из частотных диапазонов существуют пока только верхние пределы на мощность излучения или на амплитуду гравитационных волн. Тем не менее, гравитационные волны в течение ближайших 5-7 лет будут открыты, сомнений в этом у экспертов нет.

В этой статье мы нарисовали общую картину результатов, ожидаемых от гравитационно-волновой астрономии. Мы также обсудили типы детекторов гравитационных волн, некоторые из которых уже работают, другие будут реализованы в ближайшем будущем. Конечно, картина ожидаемых открытий, которую мы набросали, может быть далека от реальности, как любил повторять знаменитый советский физик академик Я.Б.Зельдович: «Полна чудес могучая природа». Для иллюстрации загадок природы и неопределенности теоретического знания, мы помещаем знаменитую картинку, приведенную К.Фламарионом в одной из своих книг по астрономии (рис. 8). Эта картинка пришла к нам из средних веков. На ней изображен путешественник, который добрался до края Земли, выглянул за небесную твердь и наблюдает движение предвечных звезд. Так изображали себе мироздание средневековые люди. Изобретение телескопа очень сильно изменило эту картину. Не исключено, что современная картина «Большого Взрыва» также претерпит существенные изменения, когда в астрономии появится новое окно во Вселенную — гравитационно-волновая астрономия.

Цитируемая литература

1. A. Einstein, Sitzber. Preuss. Akad. Wiss. **1**, 154, (1918).
K.S. Thorn, In 300 years of Gravitation (eds. S.W. Hawking, W. Israel), Cambridge Univ. Press, (1987).
В.А. Фок, Теория пространства, времени, тяготения. М. Физматгиз, 1948.
2. В.Б. Брагинский, УФН, **86**, 433, (1965).
3. J. Bell, A. Hewish, Nature, **213**, 12, (1967).
4. В.Б. Брагинский, УФН, **170**, 743, (2000).
5. М.Е. Герценштейн, В.И. Пустовойт, ЖЭТФ, **16**, 433, (1962).
6. A. Abramovichi et al, Science **256**, 326, (1992).
7. A. Abramovichi et al, Phys. Lett. A, **218**, 157, (1996).
8. В.Б. Брагинский, ЖЭТФ, **53**, 1434, (1967).
Proceeding of the 4th International LISA symposium, Class. and Quantum Gravity, v.20, n 10, (2003).
M.V.Sazhin, Ya.B.Zeldovich, In: My Universe.(eds. B.Ya.Zeldovich, M.V.Sazhin), Harwood Acad. Publ. (1992).
D.R.Stinebring et al., Phys.Rev.Lett., v.65, p.285, (1990)
U.Seljak, M.Zaldarriaga, Phys.Rev.Lett., v.78, p.2054, (1997).
9. <http://map.gsfc.nasa.gov>
Сажин М.В. Современная космология в популярном изложении. М.: УРСС. 2002.

Рис.4. На рисунке изображена принципиальная схема детектирования гравитационных волн методом тайминга пульсаров. От пульсара к радиотелескопу, который стоит на Земле, распространяются импульсы. Гравитационные волны от двойной звезды (или другого источника излучения) распространяются перпендикулярно траектории пульсар – Земля. В этом случае возникает переменный показатель преломления для импульсов пульсара. Этот показатель не зависит от частоты импульсов.

Рис.5. На рисунке изображена плоскость последнего рассеяния (сплошная линия), от которой фотоны движутся к радиотелескопу (в центре круга). Температура этой поверхности является постоянной. Пунктирная линия представляет слабые неоднородности температуры на поверхности последнего рассеяния, созданные гравитационными волнами с длиной порядка расстояния от наблюдателя до поверхности последнего рассеяния.

Рис.6. Здесь изображено положение спутника WMAP в точке L_2 , а также Земли, Луны и Солнца.

Рис.7. Карта анизотропии реликтового излучения. Небесная сфера представлена в проекции Аитова-Гаммера. Синий цвет показывает понижение температуры по сравнению со средней температурой. Красный цвет означает повышение температуры. Средняя дисперсия температуры по карте составляет примерно 100 микрокельвин.

Рис.8. Средневековый путешественник добрался до края Земли, просунул голову сквозь небесную твердь и наблюдает движение планет. Именно так средневековые астрономы представляли устройство нашей Солнечной системы.