

Наука
сегодня

Валентин Руденко

ПОИСК гравитационных волн



Наука
сегодня

Валентин Руденко

ПОИСК ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН



Фрязино
2007

УДК 530.1

ББК 22.31

Р83

Руденко Валентин Николаевич — доктор физ.-мат. наук, проф. физ. факультета МГУ. Зав. Отделом гравитационных измерений ГАИШ.

Область научных интересов — гравитация и астрофизика, гравитационно-волновой эксперимент; теория и методы предельных измерений, радиофизика и лазерная физика.

Руденко В.Н. Поиск гравитационных волн.

Фрязино: «Век 2», 2007, — 64 с. — «Наука сегодня».

ISBN 978-5-85099-171-5

Особенность нынешнего момента в проблеме экспериментального обнаружения гравитационных волн можно условно определить как «напряженное ожидание первого сигнала»... хотя бы одного... для начала.

Если теория верна, их должно наблюдаться... аж несколько штук в год! Таков уровень чувствительности современных гравитационных антенн, достигнутый ценой огромных интеллектуальных и технических усилий, материальных и временных затрат.

На обложке: Лазерный детектор VIRGO в Италии

СОДЕРЖАНИЕ

Волны пространства-времени	6
Чего ждем?.....	10
Это можно регистрировать?	14
Естественные детекторы	18
Новое поколение антенн.....	23
Алгоритмы слепого поиска.....	35
Реликтовый гравитационно-волновой фон.....	45
Космические детекторы	49
Поиск астро-гравитационных корреляций.....	57
Заключение	60

Я спросил тебя:
— Зачем идете в гору вы?
А ты к вершине шла,
а ты рвалась в бой.

В. Высоцкий

Скорый поезд, следующий из Рима вдоль тиренского побережья, проехал Ливорно и подходил к Пизе. Мне предстояло неделю провести у небольшого городка с почти русским звучанием — Кашина, на только что построенной «гравитационной антенне» — оптическом интерферометре Майкельсона на подвесных зеркалах с трехкилометровыми плечами. Этот гигантский бело-голубой искусственный «угол» быстро стал новой достопримечательностью, даже гордостью окрестного населения за то, что Пиза — всемирный исторический центр, теперь становится также центром мировой науки.

В немалой мере этому способствовали расклеенные (хотя и немногочисленные) плакаты-презентации, популярно знакомящие читающую публику с намерениями ученых, работающих на диковинной установке. Их цель — поймать «волны пространства-времени», идущие к нам из космоса. Задача исключительно трудная ввиду крайней слабости таинственных волн, которые образно назывались на плакатах «шепотом Вселенной».

Как восприняли эти разъяснения простые жители, я узнал из разговора с таксистом, который, понимая кивнув на указанный мною адрес — «ВИР-ГО-сайт», уверенно направил машину по хорошо ему знакомому маршруту.

«Вир-го-сайт» — это сайт, посвященный виртуальной гравитации. Сайт находится по адресу: <http://www.virgo-sait.ru>

Волны пространства-времени

Наблюдательная база современной астрофизики несравнима с относительно скромным полем деятельности классического «оптического астронома» середины девятнадцатого века, в распоряжении которого были, в лучшем случае, наземные телескопы с метровыми зеркалами, хотя и высокого качества.

Сегодня оптический инструментарий представлен наземными телескопами с зеркалами диаметром десять метров с разрешением в десятую долю угловой секунды; внеатмосферными орбитальными инструментами, среди которых рекордсменом является телескоп «Хаббл», которому уже доступны наблюдения в ультрафиолете с сотыми долями угловой секунды...

Наше «оптическое зрение» сегодня позволяет видеть объекты, удаленные на расстояния порядка горизонта событий, т.е. того расстояния, которое свет достигает за время жизни Вселенной. Особая роль в «дальнем видении» принадлежит радиотелескопам. Вдобавок к видимому диапазону астрономы освоили низкочастотные каналы — микроволновый и инфракрасный, особенно эффективные при исследовании

Иллюстрация: астрономы используют радиотелескопы для изучения космоса

реликтового излучения и планет Солнечной системы, а также высокочастотные — рентгеновский и гамма, благодаря размещению соответствующих детекторов на орбитальных и межпланетных космических аппаратах. Кроме электромагнитного излучения мы с помощью развитой сети высокогорных и подземных установок в состоянии регистрировать потоки частиц из космоса. Здесь вершиной прогресса стали нейтринные телескопы — крупногабаритные детекторы космических нейтрино, частиц, крайне слабо взаимодействующих с веществом.

Почти все теоретически предсказанные и лабораторно изученные виды «переносчиков астрофизической информации» изучены настолько, что получили, как принято говорить, инженерное решение, т.е. надежно освоены на практике. Все, кроме одного... Гравитация — самое слабое взаимодействие в микромире и самая мощная сила в макромире, остается незадействованной как носитель информации о Вселенной, той самой, которой она управляет.

Формально считается, что гравитационные волны теоретически предсказаны Эйнштейном как одно из следствий его общей теории относительности (ОТО). Но фактически их существование становится очевидным уже в СТО, как результат отказа от ньютоновского принципа дальнего действия в гравитации и перехода к принципу «конечной скорости взаимодействий». Гравитационное поле некоторой массы уже не может мгновенно образоваться во всем окружающем пространстве. На это должно уйти время, зависящее от скорости распространения гравитационного взаимодействия и расстояния до точки наблюдения. Иными словами, некая «гра-

См. также статью «Гравитационные волны» в журнале «Вопросы физики», 1997, № 1, с. 100-101.

витационная волна» должна принести информацию (посредством соответствующего силового действия) о наличии поля в данной точке. Все. Ничего более конкретного об этом в рамках СТО сказать нельзя.

Так что же это за волна? Какое поле? Ответы на эти вопросы зависят от деталей конкретной теории гравитации, в частности — ОТО. Но принципиальный вывод о наличии гравитационных волн содержится в любом более-менее корректном варианте релятивистской теории тяготения. В ОТО гравитационные волны поперечные: в нормальной к распространению волны плоскости гравитационное поле создает относительные ускорения пробных частиц (материальных точек) крестообразной ($\times$) либо плюсообразной (+) структуры (рис. 1), что отвечает двум возможным поляризациям плоской гравитационной волны; одна поляризация переходит в другую при повороте на 45° , что соответствует спину 2 для «гравитона» в сравнении со спином 1 для фотона.

Гораздо более важное отличие связано с одной особенностью гравитационного взаимодействия — принципом эквивалентности. Он утверждает, что динамическая реакция пробного тела в гравитационном поле не зависит от массы этого тела. На школьном языке его формулируют проще: «все тела падают с одинаковым ускорением». В конце концов, принцип эквивалентности приводит к эквивалентности понятий «гравитация» и «геометрия пространства». Безразлично, что несет ответственность за траекторию пробной частицы: сила тяготения или, — считая, что сил вообще нет, — геометрическая структура пространства, по геодезическим линиям которого только и могут перемещаться про-

Вопросы космологии и астрономии. 2017. Т. 16. № 3. С. 106–116. URL: <http://www.astronews.ru/astronomy/article.php?id=106163>

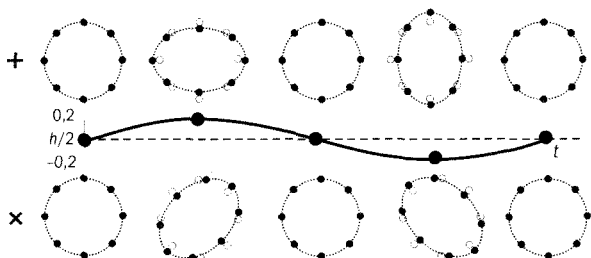


Рис. 1. Поле относительных ускорений гравитационной волны.

бные частицы. При формальном описании динамики реального трехмерного мира как эволюции точки (выписывающей «мировую линию») в четырехмерном пространстве (где четвертая координата — время) мы можем говорить о гравитационных волнах как о возмущениях четырехмерной геометрии мира или, вполне таинственно, как о «волнах пространства-времени».

Материя Вселенной через гравитацию формирует геометрию Мира, меняющуюся с характерным временем в миллиарды и десятки миллиардов лет. На этом квазистатическом сглаженном фоне существует стохастическая высокочастотная «рябь геометрии» — гравитационные волны, порождаемые локальными катаклизмами материи и информационно связывающие различные мировые точки. Сверхзадача для астрофизики нового века — научиться сначала регистрировать эту информацию, а затем и расшифровать ее.

Чего ждем?

Для инженера или физика-экспериментатора, озадаченного созданием гравитационно-волнового детектора, «высоконаучный штиль» предыдущих рассуждений мало что дает. Его больше заинтересовали бы оценки параметров «вероятного сигнала», который должен быть принят. Очевидно, что характерная амплитуда гравитационной волны, производящей возмущение пространства-времени, в безразмерной форме могла бы представляться меняющимся во времени полем относительных деформаций h , или — на языке дифференциальной геометрии — динамических вариаций метрики пространства, окружающего детектор. Энергия, необходимая для возбуждения (раскачки) детектора, должна быть пропорциональна квадрату вариаций метрики и некоторой эффективной площади детектора. При пересчете назад на источник, рассматриваемый как изотропный сферический излучатель, удельная энергия (на единицу площади детектора) должна быть умножена на $4\pi r^2$, где r — расстояние до источника. Естественно, что источник не может

Исследования выполнены в рамках программы фундаментальных исследований «Физика элементарных частиц» РАН

выдать энергии больше, чем его энергия покоя Mc^2 , где c — скорость света. Скорее всего, в излучение уйдет какая-то доля этой энергии. Какая именно, зависит от конкретного динамического процесса, или «катаклизма», испытываемого источником. Расчет таких процессов потребовал бы слишком много математики и специальных знаний. К счастью, составить представление об амплитуде гравитационных волн по порядку величины можно из простых геометрических соображений.

Закон тяготения Ньютона определяет гравитационный потенциал ϕ на поверхности сферического тела массы M и радиуса R как $\phi = GM/R$. Отношение собственной гравитационной энергии тела $M\phi$ к его энергии покоя дает безразмерный параметр $(\phi/c^2) = (GM/Rc^2) = (r_g/2R) \leq 1$, где G — гравитационная постоянная Ньютона; r_g — гравитационный радиус тела массы M ; фактически, r_g — это масса, выраженная в единицах G/c^2 .

При таком описании ясно, что большей гравитационной энергией будут обладать источники с радиусом порядка гравитационного: $R \approx r_g$. Такие объекты в астрофизике называются релятивистскими (или сверхплотными) звездами. Обычные звезды — это объекты со слабым полем, например Солнце имеет $r_g \approx 3$ км и, следовательно, $r_g/R \sim 10^{-6}$. Значительную гравитационную энергию могут трансформировать в гравитационные волны только релятивистские звезды. Чтобы излучение было мощным, эта энергия должна высвободиться за кратчайшее время. Соответствующая длительность динамического процесса, катаклизма, не может быть короче светового времени: $R/c \approx r_g/c$. Для объекта солнеч-

© 2000 г. Издательство «Наука» по заказу РНЦ «Вектор» воспроизведено электронно-оптическим способом

ной массы это времена порядка 10^{-3} – 10^{-4} сек; при этом процесс идет со скоростями близкими к световой. Таким образом, эффективный гравитационный излучатель должен быть релятивистским не только по величине гравитационного поля, но также и по скорости динамики катаклизма. Проще говоря, это взрыв сверхплотной звезды.

Теперь вернемся к оценке амплитуды гравитационной волны, возбуждающей наземный детектор. Величина деформаций, искривляющих пространство на поверхности источника, $h_0 \sim r_g/R$. Распространяясь от источника, волна теряет амплитуду обратно пропорционально пройденному расстоянию. Отсюда ожидаемая амплитуда ГВ на поверхности Земли будет $h \sim (r_g/R) \times (r_g/r)$. Для нейтронной звезды, имеющей $(r_g/R) \sim 0,1$ и образовавшейся при взрыве сверхновой в центре нашей Галактики ($r \sim 10$ кпк), получается оценка амплитуды ГВ-всплеска $h \sim 10^{-18}$. Такого порядка будет относительное изменение расстояния ($h = \Delta l/l$) между двумя свободными пробными частицами, индуцированное ГВ-всплеском. Если источник расположен дальше, например, в скоплении галактик в Деве ($r \sim 15$ Мпк), то ожидаемая амплитуда уменьшается до 10^{-21} . Таким образом, геометрический эффект, производимый ГВ, оказывается ничтожно малым («неосознаваемый чувствами звук», как сказал бы главный герой «Мертвых душ»).

В таком положении, казалось бы, надо рассчитывать на близкие источники. К сожалению, релятивистские звезды, да еще в момент катастроф, появляются не слишком часто. Событие типа вспышки сверхновой имеет вероятность 10^{-2} в одной галактике в течение года. Но и не каждая сверхновая рож-

УДК 517.516.01+517.516.02+517.516.03+517.516.04+517.516.05+517.516.06+517.516.07+517.516.08+517.516.09+517.516.10+517.516.11+517.516.12+517.516.13+517.516.14+517.516.15+517.516.16+517.516.17+517.516.18+517.516.19+517.516.20+517.516.21+517.516.22+517.516.23+517.516.24+517.516.25+517.516.26+517.516.27+517.516.28+517.516.29+517.516.30+517.516.31+517.516.32+517.516.33+517.516.34+517.516.35+517.516.36+517.516.37+517.516.38+517.516.39+517.516.40+517.516.41+517.516.42+517.516.43+517.516.44+517.516.45+517.516.46+517.516.47+517.516.48+517.516.49+517.516.50+517.516.51+517.516.52+517.516.53+517.516.54+517.516.55+517.516.56+517.516.57+517.516.58+517.516.59+517.516.60+517.516.61+517.516.62+517.516.63+517.516.64+517.516.65+517.516.66+517.516.67+517.516.68+517.516.69+517.516.70+517.516.71+517.516.72+517.516.73+517.516.74+517.516.75+517.516.76+517.516.77+517.516.78+517.516.79+517.516.80+517.516.81+517.516.82+517.516.83+517.516.84+517.516.85+517.516.86+517.516.87+517.516.88+517.516.89+517.516.90+517.516.91+517.516.92+517.516.93+517.516.94+517.516.95+517.516.96+517.516.97+517.516.98+517.516.99+517.516.100

дает нейтронную звезду, излучающую ГВ-всплеск. Такой надежный излучатель (долгожданная катастрофа!) как слияние сверхплотных компонентов релятивистской двойной звезды в конце ее орбитальной жизни, длящейся $\sim 10^8$ лет, по самым оптимистическим оценкам имеет вероятность 10^{-4} на галактику в год.

Как видим, чтобы набрать приемлемую частоту событий (темп появления ГВ сигналов) надо рассматривать большой объем Вселенной, зоны с максимальной плотностью галактик, звездных скоплений и т.п. Простые оценки показывают, что при ориентации на ГВ-амплитуду 10^{-21} и приемлемую частоту ~ 10 шт./год (темп получения зарплаты для бюджетного ученого) зона наблюдения имеет радиус $\sim 10\text{--}20$ Мпк, т.е. включает скопление галактик в Деве.

Кроме взрывов сверхновых и слияния релятивистских двойных звезд, еще одним мощным импульсным источником могут служить коллапсары, т.е. катастрофы типа коллапса в черную дыру звезд, превысивших критическую массу. Но и для таких событий сохраняется приведенная выше оценка главных параметров ГВ-сигнала: его амплитуды и частоты появления.

Это можно регистрировать?

После знакомства с теоретическими ожиданиями интенсивности космического гравитационного излучения, нормальный инженер или физик-экспериментатор должен сказать: «Забудьте о его детектировании — оно слишком слабое». В этой классической ситуации, когда «все знают, что этого сделать нельзя, но находится один, который почему-то этого не знает», пионером гравитационно-волнового эксперимента стал Джозеф Вебер (1919–2000) из Мэрилендского университета (США). Он создал гравитационный детектор, который теперь можно увидеть в одном из залов Смитсоновского музея в Вашингтоне. Попросту говоря — это цилиндрическая алюминиевая болванка массой $m = 1,2$ т и длиной $l = 1,5$ м. Вебер резонно полагал, что поле относительных ускорений (рис. 2), переносимых гравитационным излучением, должно вызвать акустические волны в теле детектора, которые будут резонансно усилены по амплитуде при совпадении их частоты с частотой собственных колебаний детектора. Для регистрации акустической вибрации детектора использовались пьезодатчики, приклеенные к его ци-

Рис. 2. Излучение гравитационных волн, вызывающее относительные ускорения



Рис. 2. Джо Вебер и его детектор гравитационных волн.

линдрической поверхности. Веберу удалось довести чувствительность установки до уровня собственных тепловых («броуновских») шумов детектора, то есть регистрировать колебания с амплитудой Δx , энергия которых порядка тепловой kT при комнатной температуре, т.е. $m\omega^2(\Delta x)^2 \approx kT$. На резонансной частоте детектора $\omega = 10^4$ рад/сек, отсюда получим амплитуду $\Delta x \sim 10^{-14}$ см и, соответственно, относительную деформацию $h = \Delta x/l \sim 10^{-16}$. Это на два порядка грубее, чем теоретически требуется для регистрации излучения от источника в центре Галактики.

Тем не менее, Джо Вебер провел в 1968–1972 годах серию наблюдений на паре пространственно разнесенных детекторов (Чикаго–Мэриленд), пытаясь выделить случаи их одновременного срабатывания, т.е. «совпадений». Вот этот прием, — поиск совпадений, — заимствованный из экспериментов в области ядерной физики, и сегодня остается практически единственным методом, позволяющим отли-

... ..

чить эффект глобального воздействия на детекторы от их разнообразных локальных возмущений, которые постоянно возникают вследствие неидеальной изоляции детектора. Только совместные события могут быть кандидатами на гравитационные сигналы. Хотя Вебер отмечал наличие таких событий в своих наблюдениях, их невысокая статистическая значимость вызвала критическое отношение к результатам эксперимента: уверенности в том, что гравитационные волны зарегистрированы, не было.

Тем не менее, первый гравитационно-волновой эксперимент состоялся! Дальнейшее развитие пошло в направлении увеличения чувствительности детекторов веберовского типа, а также разработки новых детекторов «на свободных массах». Целью было достижение чувствительности, адекватной астрофизическому прогнозу. На это ушло тридцать пять лет. Скажем так, небольшой по историческим меркам промежуток времени был истрачен на решение не слишком простых технических проблем, часто находящихся вообще на грани возможного. Между тем, именно в этот период экспериментаторы получили неожиданную поддержку со стороны астрофизиков-наблюдателей.

Длительное слежение за динамикой релятивистской двойной системы PSR1913+16, состоящей из двух нейтронных звезд, одна из которых — радиопульсар, обнаружило постоянное сокращение ее орбитального периода. Скрупулезный анализ данных, накопленных за двадцать пять лет, показал удивительно точное совпадение наблюдаемой динамики изменения периода с теоретической кривой, рассчитанной с учетом потерь энергии на гравитационное

Физический факультет МГУ им. М.В.Ломоносова, кафедра астрофизики и астрономии

излучение. Требуемые для расчета массы компонентов двойной системы были при этом определены экспериментально за счет измерения классических релятивистских эффектов (движение периастро, задержка радиосигналов, и др.), величина которых в сильном гравитационном поле весьма велика.

Таким образом, было найдено косвенное доказательство реальности существования гравитационного излучения в природе. Авторы этой работы, Дж.Тейлор и Р. Халс, в 1993 году получили Нобелевскую премию по физике, а инженеры-исследователи, занятые разработкой и созданием гравитационных антенн, — новое вдохновение в их изнурительном труде, погоне за «синей птицей волн мироздания».

Естественные детекторы

Подготовка новых детекторов — процесс длительный. Нетерпеливый астрофизик, который не хочет ждать, должен поискать «что-нибудь уже готовое» в природе. После того как физическая картина воздействия гравитационной волны на материальные объекты (осциллирующее поле относительных ускорений) стала понятной, возникла идея попытаться обнаружить реакцию космических тел, планет и звезд на такое возмущение в форме их вынужденных колебаний. Первую попытку сделала группа Дж. Вебера, занявшись измерением амплитуды основной квадрупольной или «приливной» моды Земли (период 54 мин.) с помощью гравиметра Ла Косте во время мощного Чилийского землетрясения 1962 года. Землетрясение потребовалось, чтобы увидеть «через гравитационные вариации» колебания этой моды, которые в спокойное время (без подкачки энергией землетрясения) так малы, что не поддаются наблюдению. Вывод авторов был сделан в специальной манере, которая у физиков называется «установление верхней границы эффекта». Здесь в рамках принятой теории рассчитывается интенсивность гравитационной волны, которая могла бы

© 2012 г. Издательство «Искусство». Все права защищены. Фото: Илья Ситов / Иллюстрация: Илья Ситов

возбудить колебания с наблюдаемой амплитудой, и утверждается, что реальная гравитационная волна, если существует, может только быть более слабой, поскольку без землетрясения мы ничего не видим. Это был, хотя и не слишком эвристичный, но все же первый шаг в количественной экспериментальной оценке космического фона ГВ, омывающего Землю. В 70-х годах дело продолжил В.Тумен из Стенфордского университета уже с помощью более чувствительного сверхпроводящего гравиметра. Он попытался обнаружить повышенное возбуждение квадрупольных или антисимметричных мод (за счет действия внешнего фона ГВ) по сравнению с симметричными, которых фон ГВ возбудить не может. И в этом эксперименте явных избыточных возбуждений обнаружено не было. Удалось лишь установить более жесткую (меньшую) верхнюю границу для интенсивности такого фона, которая все равно оставалась на «физически очевидном» (и потому, не слишком интересном) уровне $\sim 10^8$ эрг/см²·сек для частот $\sim 10^{-4}$ Гц.

Позже (1984–1997) были выполнены более детальные исследования рядом авторов с использованием новейших моделей внутренней структуры Земли и экспериментальных данных с глобальных сетей сейсмографов и гравиметров. В результате верхняя граница стохастического ГВ фона на указанных частотах снизилась на два порядка. Подобные оценки были сделаны также по наблюдениям за колебаниями Солнца — использовались данные «гелиевой сейсмологии» — на тех же и более низких частотах. Однако получить здесь более жесткие ограничения на ГВ-фон пока не удалось.

См. также: [1] В.Тумен, 1979; [2] В.Тумен, 1984; [3] В.Тумен, 1987; [4] В.Тумен, 1988; [5] В.Тумен, 1989; [6] В.Тумен, 1990; [7] В.Тумен, 1991; [8] В.Тумен, 1992; [9] В.Тумен, 1993; [10] В.Тумен, 1994; [11] В.Тумен, 1995; [12] В.Тумен, 1996; [13] В.Тумен, 1997; [14] В.Тумен, 1998; [15] В.Тумен, 1999; [16] В.Тумен, 2000; [17] В.Тумен, 2001; [18] В.Тумен, 2002; [19] В.Тумен, 2003; [20] В.Тумен, 2004; [21] В.Тумен, 2005; [22] В.Тумен, 2006; [23] В.Тумен, 2007; [24] В.Тумен, 2008; [25] В.Тумен, 2009; [26] В.Тумен, 2010; [27] В.Тумен, 2011; [28] В.Тумен, 2012; [29] В.Тумен, 2013; [30] В.Тумен, 2014; [31] В.Тумен, 2015; [32] В.Тумен, 2016; [33] В.Тумен, 2017; [34] В.Тумен, 2018; [35] В.Тумен, 2019; [36] В.Тумен, 2020; [37] В.Тумен, 2021; [38] В.Тумен, 2022; [39] В.Тумен, 2023; [40] В.Тумен, 2024; [41] В.Тумен, 2025; [42] В.Тумен, 2026; [43] В.Тумен, 2027; [44] В.Тумен, 2028; [45] В.Тумен, 2029; [46] В.Тумен, 2030; [47] В.Тумен, 2031; [48] В.Тумен, 2032; [49] В.Тумен, 2033; [50] В.Тумен, 2034; [51] В.Тумен, 2035; [52] В.Тумен, 2036; [53] В.Тумен, 2037; [54] В.Тумен, 2038; [55] В.Тумен, 2039; [56] В.Тумен, 2040; [57] В.Тумен, 2041; [58] В.Тумен, 2042; [59] В.Тумен, 2043; [60] В.Тумен, 2044; [61] В.Тумен, 2045; [62] В.Тумен, 2046; [63] В.Тумен, 2047; [64] В.Тумен, 2048; [65] В.Тумен, 2049; [66] В.Тумен, 2050; [67] В.Тумен, 2051; [68] В.Тумен, 2052; [69] В.Тумен, 2053; [70] В.Тумен, 2054; [71] В.Тумен, 2055; [72] В.Тумен, 2056; [73] В.Тумен, 2057; [74] В.Тумен, 2058; [75] В.Тумен, 2059; [76] В.Тумен, 2060; [77] В.Тумен, 2061; [78] В.Тумен, 2062; [79] В.Тумен, 2063; [80] В.Тумен, 2064; [81] В.Тумен, 2065; [82] В.Тумен, 2066; [83] В.Тумен, 2067; [84] В.Тумен, 2068; [85] В.Тумен, 2069; [86] В.Тумен, 2070; [87] В.Тумен, 2071; [88] В.Тумен, 2072; [89] В.Тумен, 2073; [90] В.Тумен, 2074; [91] В.Тумен, 2075; [92] В.Тумен, 2076; [93] В.Тумен, 2077; [94] В.Тумен, 2078; [95] В.Тумен, 2079; [96] В.Тумен, 2080; [97] В.Тумен, 2081; [98] В.Тумен, 2082; [99] В.Тумен, 2083; [100] В.Тумен, 2084; [101] В.Тумен, 2085; [102] В.Тумен, 2086; [103] В.Тумен, 2087; [104] В.Тумен, 2088; [105] В.Тумен, 2089; [106] В.Тумен, 2090; [107] В.Тумен, 2091; [108] В.Тумен, 2092; [109] В.Тумен, 2093; [110] В.Тумен, 2094; [111] В.Тумен, 2095; [112] В.Тумен, 2096; [113] В.Тумен, 2097; [114] В.Тумен, 2098; [115] В.Тумен, 2099; [116] В.Тумен, 2100; [117] В.Тумен, 2101; [118] В.Тумен, 2102; [119] В.Тумен, 2103; [120] В.Тумен, 2104; [121] В.Тумен, 2105; [122] В.Тумен, 2106; [123] В.Тумен, 2107; [124] В.Тумен, 2108; [125] В.Тумен, 2109; [126] В.Тумен, 2110; [127] В.Тумен, 2111; [128] В.Тумен, 2112; [129] В.Тумен, 2113; [130] В.Тумен, 2114; [131] В.Тумен, 2115; [132] В.Тумен, 2116; [133] В.Тумен, 2117; [134] В.Тумен, 2118; [135] В.Тумен, 2119; [136] В.Тумен, 2120; [137] В.Тумен, 2121; [138] В.Тумен, 2122; [139] В.Тумен, 2123; [140] В.Тумен, 2124; [141] В.Тумен, 2125; [142] В.Тумен, 2126; [143] В.Тумен, 2127; [144] В.Тумен, 2128; [145] В.Тумен, 2129; [146] В.Тумен, 2130; [147] В.Тумен, 2131; [148] В.Тумен, 2132; [149] В.Тумен, 2133; [150] В.Тумен, 2134; [151] В.Тумен, 2135; [152] В.Тумен, 2136; [153] В.Тумен, 2137; [154] В.Тумен, 2138; [155] В.Тумен, 2139; [156] В.Тумен, 2140; [157] В.Тумен, 2141; [158] В.Тумен, 2142; [159] В.Тумен, 2143; [160] В.Тумен, 2144; [161] В.Тумен, 2145; [162] В.Тумен, 2146; [163] В.Тумен, 2147; [164] В.Тумен, 2148; [165] В.Тумен, 2149; [166] В.Тумен, 2150; [167] В.Тумен, 2151; [168] В.Тумен, 2152; [169] В.Тумен, 2153; [170] В.Тумен, 2154; [171] В.Тумен, 2155; [172] В.Тумен, 2156; [173] В.Тумен, 2157; [174] В.Тумен, 2158; [175] В.Тумен, 2159; [176] В.Тумен, 2160; [177] В.Тумен, 2161; [178] В.Тумен, 2162; [179] В.Тумен, 2163; [180] В.Тумен, 2164; [181] В.Тумен, 2165; [182] В.Тумен, 2166; [183] В.Тумен, 2167; [184] В.Тумен, 2168; [185] В.Тумен, 2169; [186] В.Тумен, 2170; [187] В.Тумен, 2171; [188] В.Тумен, 2172; [189] В.Тумен, 2173; [190] В.Тумен, 2174; [191] В.Тумен, 2175; [192] В.Тумен, 2176; [193] В.Тумен, 2177; [194] В.Тумен, 2178; [195] В.Тумен, 2179; [196] В.Тумен, 2180; [197] В.Тумен, 2181; [198] В.Тумен, 2182; [199] В.Тумен, 2183; [200] В.Тумен, 2184; [201] В.Тумен, 2185; [202] В.Тумен, 2186; [203] В.Тумен, 2187; [204] В.Тумен, 2188; [205] В.Тумен, 2189; [206] В.Тумен, 2190; [207] В.Тумен, 2191; [208] В.Тумен, 2192; [209] В.Тумен, 2193; [210] В.Тумен, 2194; [211] В.Тумен, 2195; [212] В.Тумен, 2196; [213] В.Тумен, 2197; [214] В.Тумен, 2198; [215] В.Тумен, 2199; [216] В.Тумен, 2200; [217] В.Тумен, 2201; [218] В.Тумен, 2202; [219] В.Тумен, 2203; [220] В.Тумен, 2204; [221] В.Тумен, 2205; [222] В.Тумен, 2206; [223] В.Тумен, 2207; [224] В.Тумен, 2208; [225] В.Тумен, 2209; [226] В.Тумен, 2210; [227] В.Тумен, 2211; [228] В.Тумен, 2212; [229] В.Тумен, 2213; [230] В.Тумен, 2214; [231] В.Тумен, 2215; [232] В.Тумен, 2216; [233] В.Тумен, 2217; [234] В.Тумен, 2218; [235] В.Тумен, 2219; [236] В.Тумен, 2220; [237] В.Тумен, 2221; [238] В.Тумен, 2222; [239] В.Тумен, 2223; [240] В.Тумен, 2224; [241] В.Тумен, 2225; [242] В.Тумен, 2226; [243] В.Тумен, 2227; [244] В.Тумен, 2228; [245] В.Тумен, 2229; [246] В.Тумен, 2230; [247] В.Тумен, 2231; [248] В.Тумен, 2232; [249] В.Тумен, 2233; [250] В.Тумен, 2234; [251] В.Тумен, 2235; [252] В.Тумен, 2236; [253] В.Тумен, 2237; [254] В.Тумен, 2238; [255] В.Тумен, 2239; [256] В.Тумен, 2240; [257] В.Тумен, 2241; [258] В.Тумен, 2242; [259] В.Тумен, 2243; [260] В.Тумен, 2244; [261] В.Тумен, 2245; [262] В.Тумен, 2246; [263] В.Тумен, 2247; [264] В.Тумен, 2248; [265] В.Тумен, 2249; [266] В.Тумен, 2250; [267] В.Тумен, 2251; [268] В.Тумен, 2252; [269] В.Тумен, 2253; [270] В.Тумен, 2254; [271] В.Тумен, 2255; [272] В.Тумен, 2256; [273] В.Тумен, 2257; [274] В.Тумен, 2258; [275] В.Тумен, 2259; [276] В.Тумен, 2260; [277] В.Тумен, 2261; [278] В.Тумен, 2262; [279] В.Тумен, 2263; [280] В.Тумен, 2264; [281] В.Тумен, 2265; [282] В.Тумен, 2266; [283] В.Тумен, 2267; [284] В.Тумен, 2268; [285] В.Тумен, 2269; [286] В.Тумен, 2270; [287] В.Тумен, 2271; [288] В.Тумен, 2272; [289] В.Тумен, 2273; [290] В.Тумен, 2274; [291] В.Тумен, 2275; [292] В.Тумен, 2276; [293] В.Тумен, 2277; [294] В.Тумен, 2278; [295] В.Тумен, 2279; [296] В.Тумен, 2280; [297] В.Тумен, 2281; [298] В.Тумен, 2282; [299] В.Тумен, 2283; [300] В.Тумен, 2284; [301] В.Тумен, 2285; [302] В.Тумен, 2286; [303] В.Тумен, 2287; [304] В.Тумен, 2288; [305] В.Тумен, 2289; [306] В.Тумен, 2290; [307] В.Тумен, 2291; [308] В.Тумен, 2292; [309] В.Тумен, 2293; [310] В.Тумен, 2294; [311] В.Тумен, 2295; [312] В.Тумен, 2296; [313] В.Тумен, 2297; [314] В.Тумен, 2298; [315] В.Тумен, 2299; [316] В.Тумен, 2300; [317] В.Тумен, 2301; [318] В.Тумен, 2302; [319] В.Тумен, 2303; [320] В.Тумен, 2304; [321] В.Тумен, 2305; [322] В.Тумен, 2306; [323] В.Тумен, 2307; [324] В.Тумен, 2308; [325] В.Тумен, 2309; [326] В.Тумен, 2310; [327] В.Тумен, 2311; [328] В.Тумен, 2312; [329] В.Тумен, 2313; [330] В.Тумен, 2314; [331] В.Тумен, 2315; [332] В.Тумен, 2316; [333] В.Тумен, 2317; [334] В.Тумен, 2318; [335] В.Тумен, 2319; [336] В.Тумен, 2320; [337] В.Тумен, 2321; [338] В.Тумен, 2322; [339] В.Тумен, 2323; [340] В.Тумен, 2324; [341] В.Тумен, 2325; [342] В.Тумен, 2326; [343] В.Тумен, 2327; [344] В.Тумен, 2328; [345] В.Тумен, 2329; [346] В.Тумен, 2330; [347] В.Тумен, 2331; [348] В.Тумен, 2332; [349] В.Тумен, 2333; [350] В.Тумен, 2334; [351] В.Тумен, 2335; [352] В.Тумен, 2336; [353] В.Тумен, 2337; [354] В.Тумен, 2338; [355] В.Тумен, 2339; [356] В.Тумен, 2340; [357] В.Тумен, 2341; [358] В.Тумен, 2342; [359] В.Тумен, 2343; [360] В.Тумен, 2344; [361] В.Тумен, 2345; [362] В.Тумен, 2346; [363] В.Тумен, 2347; [364] В.Тумен, 2348; [365] В.Тумен, 2349; [366] В.Тумен, 2350; [367] В.Тумен, 2351; [368] В.Тумен, 2352; [369] В.Тумен, 2353; [370] В.Тумен, 2354; [371] В.Тумен, 2355; [372] В.Тумен, 2356; [373] В.Тумен, 2357; [374] В.Тумен, 2358; [375] В.Тумен, 2359; [376] В.Тумен, 2360; [377] В.Тумен, 2361; [378] В.Тумен, 2362; [379] В.Тумен, 2363; [380] В.Тумен, 2364; [381] В.Тумен, 2365; [382] В.Тумен, 2366; [383] В.Тумен, 2367; [384] В.Тумен, 2368; [385] В.Тумен, 2369; [386] В.Тумен, 2370; [387] В.Тумен, 2371; [388] В.Тумен, 2372; [389] В.Тумен, 2373; [390] В.Тумен, 2374; [391] В.Тумен, 2375; [392] В.Тумен, 2376; [393] В.Тумен, 2377; [394] В.Тумен, 2378; [395] В.Тумен, 2379; [396] В.Тумен, 2380; [397] В.Тумен, 2381; [398] В.Тумен, 2382; [399] В.Тумен, 2383; [400] В.Тумен, 2384; [401] В.Тумен, 2385; [402] В.Тумен, 2386; [403] В.Тумен, 2387; [404] В.Тумен, 2388; [405] В.Тумен, 2389; [406] В.Тумен, 2390; [407] В.Тумен, 2391; [408] В.Тумен, 2392; [409] В.Тумен, 2393; [410] В.Тумен, 2394; [411] В.Тумен, 2395; [412] В.Тумен, 2396; [413] В.Тумен, 2397; [414] В.Тумен, 2398; [415] В.Тумен, 2399; [416] В.Тумен, 2400; [417] В.Тумен, 2401; [418] В.Тумен, 2402; [419] В.Тумен, 2403; [420] В.Тумен, 2404; [421] В.Тумен, 2405; [422] В.Тумен, 2406; [423] В.Тумен, 2407; [424] В.Тумен, 2408; [425] В.Тумен, 2409; [426] В.Тумен, 2410; [427] В.Тумен, 2411; [428] В.Тумен, 2412; [429] В.Тумен, 2413; [430] В.Тумен, 2414; [431] В.Тумен, 2415; [432] В.Тумен, 2416; [433] В.Тумен, 2417; [434] В.Тумен, 2418; [435] В.Тумен, 2419; [436] В.Тумен, 2420; [437] В.Тумен, 2421; [438] В.Тумен, 2422; [439] В.Тумен, 2423; [440] В.Тумен, 2424; [441] В.Тумен, 2425; [442] В.Тумен, 2426; [443] В.Тумен, 2427; [444] В.Тумен, 2428; [445] В.Тумен, 2429; [446] В.Тумен, 2430; [447] В.Тумен, 2431; [448] В.Тумен, 2432; [449] В.Тумен, 2433; [450] В.Тумен, 2434; [451] В.Тумен, 2435; [452] В.Тумен, 2436; [453] В.Тумен, 2437; [454] В.Тумен, 2438; [455] В.Тумен, 2439; [456] В.Тумен, 2440; [457] В.Тумен, 2441; [458] В.Тумен, 2442; [459] В.Тумен, 2443; [460] В.Тумен, 2444; [461] В.Тумен, 2445; [462] В.Тумен, 2446; [463] В.Тумен, 2447; [464] В.Тумен, 2448; [465] В.Тумен, 2449; [466] В.Тумен, 2450; [467] В.Тумен, 2451; [468] В.Тумен, 2452; [469] В.Тумен, 2453; [470] В.Тумен, 2454; [471] В.Тумен, 2455; [472] В.Тумен, 2456; [473] В.Тумен, 2457; [474] В.Тумен, 2458; [475] В.Тумен, 2459; [476] В.Тумен, 2460; [477] В.Тумен, 2461; [478] В.Тумен, 2462; [479] В.Тумен, 2463; [480] В.Тумен, 2464; [481] В.Тумен, 2465; [482] В.Тумен, 2466; [483] В.Тумен, 2467; [484] В.Тумен, 2468; [485] В.Тумен, 2469; [486] В.Тумен, 2470; [487] В.Тумен, 2471; [488] В.Тумен, 2472; [489] В.Тумен, 2473; [490] В.Тумен, 2474; [491] В.Тумен, 2475; [492] В.Тумен, 2476; [493] В.Тумен, 2477; [494] В.Тумен, 2478; [495] В.Тумен, 2479; [496] В.Тумен, 2480; [497] В.Тумен, 2481; [498] В.Тумен, 2482; [499] В.Тумен, 2483; [500] В.Тумен, 2484; [501] В.Тумен, 2485; [502] В.Тумен, 2486; [503] В.Тумен, 2487; [504] В.Тумен, 2488; [505] В.Тумен, 2489; [506] В.Тумен, 2490; [507] В.Тумен, 2491; [508] В.Тумен, 2492; [509] В.Тумен, 2493; [510] В.Тумен, 2494; [511] В.Тумен, 2495; [512] В.Тумен, 2496; [513] В.Тумен, 2497; [514] В.Тумен, 2498; [515] В.Тумен, 2499; [516] В.Тумен, 2500; [517] В.Тумен, 2501; [518] В.Тумен, 2502; [519] В.Тумен, 2503; [520] В.Тумен, 2504; [521] В.Тумен, 2505; [522] В.Тумен, 2506; [523] В.Тумен, 2507; [524] В.Тумен, 2508; [525] В.Тумен, 2509; [526] В.Тумен, 2510; [527] В.Тумен, 2511; [528] В.Тумен, 2512; [529] В.Тумен, 2513; [530] В.Тумен, 2514; [531] В.Тумен, 2515; [532] В.Тумен, 2516; [533] В.Тумен, 2517; [534] В.Тумен, 2518; [535] В.Тумен, 2519; [536] В.Тумен, 2520; [537] В.Тумен, 2521; [538] В.Тумен, 2522; [539] В.Тумен, 2523; [540] В.Тумен, 2524; [541] В.Тумен, 2525; [542] В.Тумен, 2526; [543] В.Тумен, 2527; [544] В.Тумен, 2528; [545] В.Тумен, 2529; [546] В.Тумен, 2530; [547] В.Тумен, 2531; [548] В.Тумен, 2532; [549] В.Тумен, 2533; [550] В.Тумен, 2534; [551] В.Тумен, 2535; [552] В.Тумен, 2536; [553] В.Тумен, 2537; [554] В.Тумен, 2538; [555] В.Тумен, 2539; [556] В.Тумен, 2540; [557] В.Тумен, 2541; [558] В.Тумен, 2542; [559] В.Тумен, 2543; [560] В.Тумен, 2544; [561] В.Тумен, 2545; [562] В.Тумен, 2546; [563] В.Тумен, 2547; [564] В.Тумен, 2548; [565] В.Тумен, 2549; [566] В.Тумен, 2550; [567] В.Тумен, 2551; [568] В.Тумен, 2552; [569] В.Тумен, 2553; [570] В.Тумен, 2554; [571] В.Тумен, 2555; [572] В.Тумен, 2556; [573] В.Тумен, 2557; [574] В.Тумен, 2558; [575] В.Тумен, 2559; [576] В.Тумен, 2560; [577] В.Тумен, 2561; [578] В.Тумен, 2562; [579] В.Тумен, 2563; [580] В.Тумен, 2564; [581] В.Тумен, 2565; [582] В.Тумен, 2566; [583] В.Тумен, 2567; [584] В.Тумен, 2568; [585] В.Тумен, 2569; [586] В.Тумен, 2570; [587] В.Тумен, 2571; [588] В.Тумен, 2572; [589] В.Тумен, 2573; [590] В.Тумен, 2574; [591] В.Тумен, 2575; [592] В.Тумен, 2576; [593] В.Тумен, 2577; [594] В.Тумен, 2578; [595] В.Тумен, 2579; [596] В.Тумен, 2580; [597] В.Тумен, 2581; [598] В.Тумен, 2582; [599] В.Тумен, 2583; [600] В.Тумен, 2584; [601] В.Тумен, 2585; [602] В.Тумен, 2586; [603] В.Тумен, 2587; [604] В.Тумен, 2588; [605] В.Тумен, 2589; [606] В.Тумен, 2590; [607] В.Тумен, 2591; [608] В.Тумен, 2592; [609] В.Тумен, 2593; [610] В.Тумен, 2594; [611] В.Тумен, 2595; [612] В.Тумен, 2596; [613] В.Тумен, 2597; [614] В.Тумен, 2598; [615] В.Тумен, 2599; [616] В.Тумен, 2600; [617] В.Тумен, 2601; [618] В.Тумен, 2602; [619] В.Тумен, 2603; [620] В.Тумен, 2604; [621] В.Тумен, 2605; [622] В.Тумен, 2606; [623] В.Тумен, 2607; [624] В.Тумен, 2608; [625] В.Тумен, 2609; [626] В.Тумен, 2610; [627] В.Тумен, 2611; [628] В.Тумен, 2612; [629] В.Тумен, 2613; [630] В.Тумен, 2614; [631] В.Тумен, 2615; [632] В.Тумен, 2616; [633] В.Тумен, 2617; [634] В.Тумен, 2618; [635] В.Тумен, 2619; [636] В.Тумен, 2620; [637] В.Тумен, 2621; [638] В.Тумен, 2622; [639] В.Тумен, 2623; [640] В.Тумен, 2624; [641] В.Тумен, 2625; [642] В.Тумен, 2626; [643] В.Тумен, 2627; [644] В.Тумен, 2628; [645] В.Тумен, 2629; [646] В.Тумен, 2630; [647] В.Тумен, 2631; [648] В.Тумен, 2632; [649] В.Тумен, 2633; [650] В.Тумен, 2634; [651] В.Тумен, 2635; [652] В.Тумен, 2636; [653] В.Тумен, 2637; [654] В.Тумен, 2638; [655] В.Тумен, 2639; [656] В.Тумен, 2640; [657] В.Тумен, 2641; [658] В.Тумен, 2642; [659] В.Тумен, 2643; [660] В.Тумен, 2644; [661] В.Тумен, 2645; [662] В.Тумен, 2646; [663] В.Тумен, 2647; [664] В.Тумен, 2648; [665] В.Тумен, 2649; [666] В.Тумен, 2650; [667] В.Тумен, 2651; [668] В.Тумен, 2652; [669] В.Тумен, 2653; [670] В.Тумен, 2654; [671] В.Тумен, 2655; [672] В.Тумен, 2656; [673] В.Тумен, 2657; [674] В.Тумен, 2658; [675] В.Тумен, 2659; [676] В.Тумен, 2660; [677] В.Тумен, 2661; [678] В.Тумен, 2662; [679] В.Тумен, 2663; [680] В.Тумен, 2664; [681] В.Тумен, 2665; [682] В.Тумен, 2666; [683] В.Тумен, 2667; [684] В.Тумен, 2668; [685] В.Тумен, 2669; [686] В.Тумен, 2670; [687] В.Тумен, 2671; [688] В.Тумен, 2672; [689] В.Тумен, 2673; [690] В.Тумен, 2674; [691] В.Тумен, 2675; [692] В.Тумен, 2676; [693] В.Тумен, 2677; [694] В.Тумен, 2678; [695] В.Тумен, 2679; [696] В.Тумен, 2680; [697] В.Тумен, 2681; [698] В.Тумен, 2682; [699] В.Тумен, 2683; [700] В.Тумен, 2684; [701] В.Тумен, 2685; [702] В.Тумен, 2686; [703] В.Тумен, 2687; [704] В.Тумен, 2688; [705] В.Тумен, 2689; [706] В.Тумен, 2690; [707] В.Тумен, 2691; [708] В.Тумен, 2692; [709] В.Тумен, 2693; [710] В.Тумен, 2694; [711] В.Тумен, 2695; [712] В.Тумен, 2696; [713] В.Тумен, 2697; [714] В.Тумен, 2698; [715] В.Тумен, 2699; [716] В.Тумен, 2700; [717] В.Тумен, 2701; [718] В.Тумен, 2702; [719] В.Тумен, 2703; [720] В.Тумен, 2704; [721] В.Тумен, 2705; [722] В.Тумен, 2706; [723] В.Тумен, 2707; [724] В.Тумен, 2708; [725] В.Тумен, 2709; [726] В.Тумен, 2710; [727] В.Тумен, 2711; [728] В.Тумен, 2712; [729] В.Тумен, 2713; [730] В.Тумен, 2714; [731] В.Тумен, 2715; [732] В.Тумен, 2716; [733] В.Тумен, 2717; [734] В.Тумен, 2718; [735] В.Тумен, 2719; [736] В.Тумен, 2720; [737] В.Тумен, 2721; [738] В.Тумен, 2722; [739] В.Тумен, 2723; [740] В.Тумен, 2724; [741] В.Тумен, 2725; [742] В.Тумен, 2726; [743] В.Тумен, 2727; [744] В.Тумен, 2728; [745] В.Тумен, 2729; [746] В.Тумен, 2730; [747] В.Тумен, 2731; [748] В.Тумен, 2732; [749] В.Тумен

В 1968 году Ф. Дайсон опубликовал статью, в которой отметил, что Земля может рассматриваться как более высокочастотный гравитационный детектор, если принять во внимание неоднородности плотности и модуля сдвига в ее структуре. Как известно, Земля грубо может быть представлена трехслойной структурой «кора (мантия) — внешнее (жидкое) ядро — внутреннее (твердое) ядро». На границах имеют место скачки плотности и параметров упругости. В этих зонах может происходить эффективное поглощение гравитационного возбуждения. В частности, можно ожидать генерации сейсмоакустических поверхностных волн на «пульсарных частотах» порядка единиц герц.

Вскоре после этой публикации появились статьи с положительными результатами измерений с помощью сейсмографов на частотах некоторых конкретных пульсаров (точнее, на удвоенной частоте их радиоимпульсов). Наиболее «нашумевший» случай относится к пульсару CP1133 (частота 1.65 Гц). В статье, опубликованной в таком известном журнале как «Nature» (1972, т.240), представлялись данные по регистрации аномальных пиков сейсмографом, установленным в Синайской пустыне (г. Эйлат). Пороговый сигнал соответствовал сейсмическому шуму с амплитудой $\sim 10^{-9}$ см. Как показал последующий анализ, эта амплитуда все же слишком велика, чтобы гравитационное излучение пульсаров могло ее создать при самых оптимистичных предположениях о структуре этих источников.

В конце 80-х идея сейсмографического детектирования гравитационных волн была рассмотрена в новом ключе, как возможность регистрации коротких

мощных ГВ-всплесков в диапазоне частот 0.01–0.1 Гц. Астрофизический прогноз здесь более благоприятен, чем на «веберовских» частотах (~ 1 кГц) и дает для ожидаемой амплитуды ГВ величину $\sim 10^{-16}$ при длительности сигнала порядка периода волны.

Дополнительным преимуществом здесь являются два обстоятельства. Во-первых, существование так называемого «окна прозрачности» в спектре сейсмического шума, интенсивность которого снижается в этом диапазоне на два порядка (до 10^{-8} см) в результате некоторого баланса между влиянием флуктуаций атмосферного давления и океанических волновых процессов. Во-вторых, феномен «блочной структуры» земной коры (гипотеза М.А. Садовского), согласно которой кора представляет собой геометрическую иерархию блоков, разделенных разломами (некоторая система локальных неоднородностей). Типичный размер блока, например, для европейской части России ~ 70 – 100 км. Всплеск гравитационного излучения длительностью ~ 30 сек с амплитудой $h \sim 10^{-17}$ вызовет абсолютную деформацию блока $\sim 10^{-10}$ см. Это на два порядка меньше среднего сейсмического шумового фона. Однако, использование сейсмической решетки из многих (до тысячи) датчиков и дополнительная фильтрация с опорой на специфическую пространственную структуру вынужденных деформаций в поле гравитационной волны должны помочь в преодолении этого дефицита.

Современный эксперимент по сейсмографическому детектированию всплесков гравитационного излучения представляется в следующем виде. На подобранном по результатам геофизической раз-

С.А.Александров, А.А.Борисов, А.А.Васильев, А.А.Васильев, А.А.Васильев, А.А.Васильев, А.А.Васильев, А.А.Васильев, А.А.Васильев, А.А.Васильев, А.А.Васильев

ведки полигоне, занятым блоком (локальной неоднородностью) указанных размеров, устанавливается решетка сейсмодатчиков и проводятся многоканальные наблюдения с фильтрацией данных по специфическим алгоритмам, учитывающим «окраску» сигнальных ГВ-возмущений. Первые попытки таких измерений уже предпринимались. В частности, были исследованы данные сейсмических решеток под Москвой (Обнинск) и сети Терраскоп в Южной Калифорнии в период вспышки сверхновой SN1987A. Хотя некоторые коррелированные сигналы были обнаружены, статистика собранного материала оказалась недостаточной для надежных выводов в пользу регистрации аномального события. Нет сомнений, что подобные наблюдения будут продолжаться.

Новое поколение антенн

Задумаемся: что ограничивает чувствительность твердотельной резонансной антенны и как вообще ее можно увеличить? Прежде всего, это тепловой броуновский шум. Его спектральная плотность (энергия на единицу спектрального интервала в 1 герц) пропорциональна температуре и обратно пропорциональна массе и добротности детектора. Последний параметр — добротность, определяет скорость потери колебательной энергии. Без лишних деталей можно сказать, что добротность близка к числу колебаний за время релаксации детектора или, на жаргоне механиков, за «время звона». Ударили болванку — она звенит, но постепенно ее акустические вибрации затухают из-за внутреннего трения. Число колебаний, за которое их амплитуда уменьшается в несколько раз, называют добротностью детектора.

Попробуем «поиграть» этими параметрами с целью уменьшения теплового шума. Массу болванки сильно увеличить (по сравнению с веберовской) затруднительно, учитывая допустимые масштабы лабораторного детектора, который необходимо еще поместить в вакуумную камеру, укрепить на анти-

© 1999-2000 гг. "ИЗДАТЕЛЬСТВО РАДИОТЕХНИКА". Все права защищены. Тираж 1000 экз.

сейсмической подвеске, снабдить электромагнитной экранировкой, и т.п. Разумные габариты болванки позволяют рассчитывать на массу в 2–3 тонны, максимум 5 т.

Добротность, в принципе, есть свойство материала, поэтому изменяться с ростом массы болванки она не должна. Таким образом, основным рычагом борьбы с тепловым шумом является понижение температуры. Примерно двадцать лет ушло на разработку и реализацию техники сверхглубокого охлаждения массивного детектора до температуры порядка $0,01\text{ K}$. При этом оказалось, что с охлаждением растет также и добротность детектора (уменьшаются внутренние потери энергии колебаний в материале). Так, вместо начальной величины в 100 тысяч (при $T = 300\text{ K}$) низкотемпературная добротность алюминиевой болванки (при $T = 2\text{ K}$) для основной продольной моды колебаний достигает нескольких миллионов. Совокупная оптимизация ключевых параметров дает уменьшение шума на шесть–восемь порядков по энергии и на три–четыре — по амплитуде шумовых деформаций детектора. В итоге, реализация криогенной программы привела к созданию твердотельных детекторов с остаточной спектральной амплитудой деформационного шума (или шума «метрических вариаций») не превышающей уровня $h \sim 10^{-22}\text{ Гц}^{-1/2}$. Это означает, что амплитуда 10^{-22} может быть измерена за время 1 сек, а за 100 сек можно измерить амплитуду 10^{-23} .

Следующим ключевым параметром приемника является его «полоса приема» — область частот, в которой обеспечивается высокая чувствительность. Здесь ограничения вносит другой источник флукту-

матору; сенсор измеряет амплитуду трансформатора). Таким способом полоса приема твердотельных антенн была расширена до 10–20 Гц, но большего достичь пока не удалось. Эта задача была успешно решена с другим типом гравитационно-волнового приемника — интерферометрической антенной на свободных массах.

Идея антенны на свободных массах естественно возникает при внимательном взгляде на математическую запись вариаций метрики как относительных пространственных деформаций: $h = \Delta l/l$. Понятно, что зарегистрировать малые h можно двумя путями: либо научиться измерять очень малые вариации расстояния между двумя точками (Δl), в которых расположены пробные массы, либо расстояние между этими точками (l) должно быть большим. Отсюда ясно, что надо делать протяженный детектор с эффективным масштабом в километры вместо метров (как это было у веберовского детектора). Но в этом случае детектор уже не может быть сплошным твердым телом. Это могут быть отдельные пробные тела, подвешенные как маятники, расстояние между которыми точно измеряется с помощью электромагнитных волн, например, лазерным излучением (рис. 3).

Впервые использовать оптический интерферометр Майкельсона как детектор гравитационных волн предложили советские ученые М.Е.Герценштейн и В.И.Пустовойт, опубликовав статью в ЖЭТФ (43, с. 605) за 1962 год. Затем американский профессор Рейн Вайс дополнил эту схему идеей увеличения «эффективной длины» плеч интерферометра за счет многократных отражений оптического луча

рис. 3. Интерферометрическая антенна на свободных массах. 1 — пробная масса; 2 — оптический луч; 3 — зеркало; 4 — фотодетектор

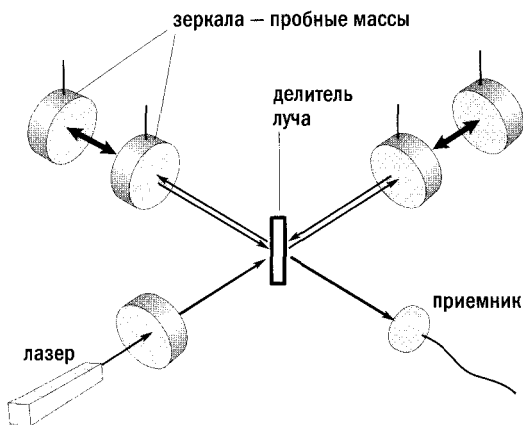


Рис. 3. Гравитационный интерферометр.

от пробных масс-зеркал в каждом из плеч. Так, пробежав плечо в 3 км «туда-обратно» 100 раз, луч как бы соединит пробную пару с базой в 300 км. Если за время пробега луча знак гравитационного сигнала (поля, переносимого волной) сохраняется, измеряемая величина деформации будет увеличена в 100 раз. Условие сохранения знака поля простое: «эффективная длина» плеч не может превышать половину длины гравитационной волны. На частоте волны 1 кГц этот масштаб как раз равен 300 км. На радиотехническом языке такая антенна называется «согласованной с принимаемым излучением».

Такие интерферометры уже построены в США (проект LIGO) и в Европе (итало-французский проект VIRGO). В настоящее время ведется их отладка для достижения проектной чувствительности. Это

весьма дорогие приборы, создание которых, однако, оправдано фундаментальностью научной проблемы. Инженерное решение было найдено как комбинация двухплечевого интерферометра Майкельсона с оптическими резонаторами Фабри–Перо. Фактически, каждое из простых зеркал в плечах «майкельсона» было заменено более сложным двойным зеркалом, эталоном Фабри–Перо, являющимся к тому же «прибором с многократными отражениями», или «многопроходным». Число проходов «туда-обратно» в нем описывается специальным параметром «резкость» F , который приближенно связан с коэффициентом отражения зеркал (R) соотношением $F = 2(1-R)^{-1}$, т.е. при $R = 0,98$, число проходов $F = 100$, и т. д.

Все элементы интерферометра: зеркала, делитель луча, а также источник оптической мощности — лазер, подвешиваются на специальных антисейсмических фильтрах (при этом характерная маятниковая частота подвесок оказывается порядка одного герца) и размещаются в трубах с высоким вакуумом. Получить интерференцию на подвешенных (болтающихся!) зеркалах задача не простая, без специальных следящих систем тут не обойтись. Весь этот гигантский интерферометр опутан сложными электронными системами обратных связей, удерживающих зеркала в «рабочей точке» для реализации интерференции с требуемой точностью примерно одна миллиардная часть полосы микронной ширины!

Для частот, хотя бы на порядок превышающих маятниковую частоту подвесок, т.е. начиная с 10 Гц и выше, массы–зеркала могут считаться практически свободными. Их реакция на поле переменных ускорений гравитационной волны не зависит от ее

www.kvant.ru, www.kvant.ru, www.kvant.ru, www.kvant.ru, www.kvant.ru, www.kvant.ru, www.kvant.ru, www.kvant.ru, www.kvant.ru, www.kvant.ru

частоты и определяется только амплитудой метрических вариаций. Это означает, что интерферометрическая антенна является широкополосным приемником, в отличие от твердотельных детекторов-болванок. При взаимном относительном смещении масс-зеркал выходной сигнал антенны появляется как возмущение стационарной интерференционной картины, т.е. вариации освещенности, регистрируемые фотодиодом. Чувствительность определяется естественными шумами, среди которых главными будут тепловой шум подвесок, ограничивающий точность измерений на низких частотах (ниже 10 Гц) и оптический фотонный шум лазерной накачки. Последний, в принципе, частотно-равномерный, но из-за падения механо-оптического коэффициента передачи с повышением частоты гравитационного сигнала (выше 100 Гц) этот шум ослабляет чувствительность на высоких частотах.

В итоге, хотя интерферометрическая антенна и считается широкополосной, ее «зона наилучшего приема» занимает конечную область спектра частот между десятками герц и несколькими килогерцами с минимумом спектральной шумовой амплитуды (т.е. с максимальной чувствительностью) в районе 100 Гц. Этот минимум для проектов LIGO и VIRGO должен составить $\sim 10^{-22} \text{ Гц}^{-1/2}$, причем чувствительность LIGO на практике уже почти достигла этого уровня. На килогерцевой частоте шумовые характеристики существующих интерферометрических и лучших твердотельных антенн близки к уровню $\sim 10^{-21} \text{ Гц}^{-1/2}$.

Как и обычные радиоантенны, их «гравитационные собратья» обладают специфической «диаграм-

© Издательство «Наука» 2000. Все права защищены. Тираж 1000 экз.

мой направленности», т.е. их способность к приему сигнала не изотропна, она зависит от направления его прихода. Для «болваночного детектора», или «гравитационного квадруполя», оптимальное направление прихода перпендикулярно продольной оси болванки; ширина зоны удовлетворительного приема около этого направления составляет угол примерно 30° ; при этом диаграмма аксиально симметрична. Для интерферометра структура диаграммы направленности более сложная, как отвечающая двум перпендикулярным «гравитационным квадруполям». Так или иначе, важно, что гравитационный детектор «видит» не все небо одновременно. По этой причине интересно было бы иметь глобальную сеть детекторов взаимно оптимально ориентированных. До такой оптимизации пока еще далеко, хотя какая-то сеть детекторов уже существует.

В Европе наибольший вклад принадлежит итальянским ученым. Три твердотельных детектора: криогенный ($T = 2\text{ K}$) «Эксплорер» (ЦЕРН, Женева), и два суперкриогенных ($T = 0,01\text{ K}$), — «Наутилус» (Фраскати, пригород Рима) и «Аурига» (Линьяро, пригород Падуи), — разработаны и созданы (рис. 4) Национальным институтом ядерной физики, имеющим отделения во многих городах Италии. Тот же институт в содружестве с Академией наук Франции построил в рамках совместного проекта трехкилометровый гравитационный интерферометр VIRGO, расположенный в Пизанской долине (рис. 5). Из других европейских стран можно упомянуть только совместный англо-германский проект GEO, приведший к созданию шестисотметрового интерферометра «GEO-600» под Ганновером.

Физический институт имени Л.Д.Ландау, Москва, 125480, Россия, e-mail: l.d.landau@phs.ru

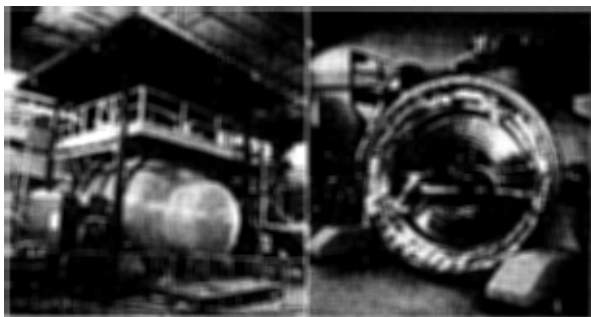


Рис. 4. Суперкриогенные детекторы
«Наutilus» и «Аурига».

В США после «веберовского периода» были выполнены серьезные исследования всей проблемы гравитационно-волнового эксперимента и приоритет был отдан развитию интерферометрических установок, хотя один криогенный детектор «Аллегро» все же был построен и работает в Луизианском университете (Батон-Руж). Но главным достижением большой кооперации американских университетов, финансируемой Национальным научным фондом, стало создание двух четырехкилометровых интерферометров, в рамках проекта LIGO. Один установлен на северо-западе под Сиэтлом (Ханфорд, шт. Вашингтон), второй — на юге, у Ливингстона (шт. Луизиана). Расстояние между этими детекторами около 3000 км, так что американские исследователи могут проводить поиск космических гравитационных сигналов по «схеме совпадений» независимо от остального научного сообщества.

Кроме этого работают японский трехсотметровый интерферометр TAMA-300 (Токио) и австралийс-

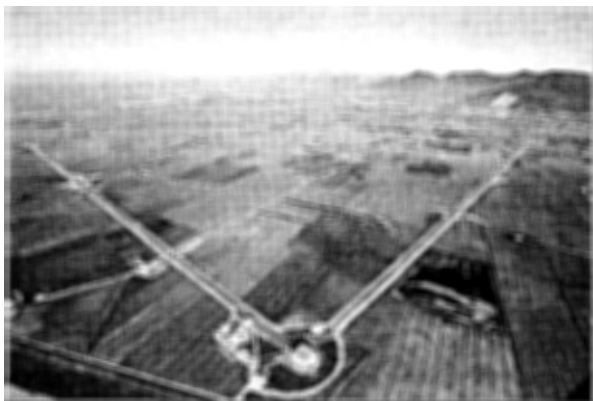


Рис. 5. Лазерный детектор VIRGO в Италии.

кий криогенный детектор «Ниобе» (Перт). Этим парк действующих инструментов исчерпывается.

Имеются, однако, планы дальнейшего совершенствования и развития техники гравитационно-волновых антенн, которые пока реализуются в виде инженерных расчетов, лабораторных экспериментов с малыми моделями и технической отработки отдельных узлов будущих установок. Здесь упомянем только главные из таких проектов. В классе твердотельных приемников уже ряд лет идет разработка и исследование сферического гравитационного детектора, преимущество которого при той же массе и температуре состоит в его «всепоглощенности», т.е. изотропной антенной диаграмме. Такой детектор, в некотором смысле, эквивалентен сразу пяти цилиндрическим болванкам, скрещенным оптимальным образом. При этом значительно увеличивается ве-

роятность детектирования случайных гравитационных всплесков и сокращается вероятность пропуска сигнала. Вдобавок рассматривается техническая возможность увеличения массы сферы до 30 тонн при охлаждении ее до единиц милликельвинов, что в перспективе должно привести к чувствительности $10^{-23} \text{ Гц}^{-1/2}$.

Интерферометры с большой базой также продолжают развиваться. В лаборатории уже отработаны модификации с охлаждаемыми подвесками и зеркалами, которые сулят достижение чувствительности даже выше, чем $10^{-23} \text{ Гц}^{-1/2}$, да к тому же еще в широкой полосе частот. Предлагаются также «беззеркальные» отражающие системы, т.е. без напыления отражающих покрытий, обладающих специфическим шумом.

Наконец, особняком стоит весьма амбициозный проект космического лазерного интерферометра LISA с базой в несколько миллионов километров, рассчитанный на прием сверхнизких частот $10^{-1} - 10^{-3} \text{ Гц}$, которые характерны для всплесков от массивных релятивистских объектов типа черных дыр, а также для излучения двойных белых карликов. Исследования по этому проекту проводят совместно NASA и ESA (Европейское космическое агентство), но его осуществление потребует, в лучшем случае, десятилетий.

Итак, в области гравитационно-волновой астрономии мы стоим сегодня у порога первых открытий. Научный мир ждет рождения новой области знаний, которая откроет новый канал информации о Вселенной. Возможно, это случится уже в первой длительной, по крайней мере — годовой, серии

Вопросы радиофизики и астрофизики. 2010. № 1. С. 10-15. URL: http://www.phys.spb.ru/Voprosy/Voprosy_2010_1_10-15.pdf

наблюдений на новом поколении интерферометров и криогенных детекторов. Ах, как хотелось бы поймать эту синюю птицу удачи, «прежде чем» и «для того чтобы» пускаться в дальнейший путь — в лабиринт новых исследований.

Наблюдения на гравитационных антеннах, однако, очень сложны. Чтобы пояснить это, обсудим некоторые более тонкие проблемы, связанные с гравитационно-волновой астрономией.

Алгоритмы слепого поиска

Наблюдения в гравитационно-волновом эксперименте осложнены не только слабостью ожидаемых сигналов. Сами эти сигналы — короткие всплески гравитационного излучения — являются случайными событиями «во времени и пространстве», ибо заранее не известны ни момент их появления, ни координаты на небесной сфере, откуда они могут поступить. Пока такое знание недоступно нам даже в принципе: вероятность релятивистской катастрофы в какой-либо конкретной галактике за время человеческой жизни крайне мала, потому, для повышения средней частоты событий до разумной величины, необходим охват наблюдениями большого числа галактик — то есть ждать сигнала нужно со всех направлений одновременно. Таким образом, наблюдения на гравитационных антеннах — это поиск случайных сигналов с неизвестными параметрами и координатами источников, который можно назвать «поиском вслепую». Тем не менее, теория оптимальной фильтрации и наличие мощных вычислительных средств позволяют и для такого рода наблюдений сформулировать ряд практических алгоритмов.

См. также: [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29], [30], [31], [32], [33], [34], [35], [36], [37], [38], [39], [40], [41], [42], [43], [44], [45], [46], [47], [48], [49], [50], [51], [52], [53], [54], [55], [56], [57], [58], [59], [60], [61], [62], [63], [64], [65], [66], [67], [68], [69], [70], [71], [72], [73], [74], [75], [76], [77], [78], [79], [80], [81], [82], [83], [84], [85], [86], [87], [88], [89], [90], [91], [92], [93], [94], [95], [96], [97], [98], [99], [100], [101], [102], [103], [104], [105], [106], [107], [108], [109], [110], [111], [112], [113], [114], [115], [116], [117], [118], [119], [120], [121], [122], [123], [124], [125], [126], [127], [128], [129], [130], [131], [132], [133], [134], [135], [136], [137], [138], [139], [140], [141], [142], [143], [144], [145], [146], [147], [148], [149], [150], [151], [152], [153], [154], [155], [156], [157], [158], [159], [160], [161], [162], [163], [164], [165], [166], [167], [168], [169], [170], [171], [172], [173], [174], [175], [176], [177], [178], [179], [180], [181], [182], [183], [184], [185], [186], [187], [188], [189], [190], [191], [192], [193], [194], [195], [196], [197], [198], [199], [200], [201], [202], [203], [204], [205], [206], [207], [208], [209], [210], [211], [212], [213], [214], [215], [216], [217], [218], [219], [220], [221], [222], [223], [224], [225], [226], [227], [228], [229], [230], [231], [232], [233], [234], [235], [236], [237], [238], [239], [240], [241], [242], [243], [244], [245], [246], [247], [248], [249], [250], [251], [252], [253], [254], [255], [256], [257], [258], [259], [260], [261], [262], [263], [264], [265], [266], [267], [268], [269], [270], [271], [272], [273], [274], [275], [276], [277], [278], [279], [280], [281], [282], [283], [284], [285], [286], [287], [288], [289], [290], [291], [292], [293], [294], [295], [296], [297], [298], [299], [300], [301], [302], [303], [304], [305], [306], [307], [308], [309], [310], [311], [312], [313], [314], [315], [316], [317], [318], [319], [320], [321], [322], [323], [324], [325], [326], [327], [328], [329], [330], [331], [332], [333], [334], [335], [336], [337], [338], [339], [340], [341], [342], [343], [344], [345], [346], [347], [348], [349], [350], [351], [352], [353], [354], [355], [356], [357], [358], [359], [360], [361], [362], [363], [364], [365], [366], [367], [368], [369], [370], [371], [372], [373], [374], [375], [376], [377], [378], [379], [380], [381], [382], [383], [384], [385], [386], [387], [388], [389], [390], [391], [392], [393], [394], [395], [396], [397], [398], [399], [400], [401], [402], [403], [404], [405], [406], [407], [408], [409], [410], [411], [412], [413], [414], [415], [416], [417], [418], [419], [420], [421], [422], [423], [424], [425], [426], [427], [428], [429], [430], [431], [432], [433], [434], [435], [436], [437], [438], [439], [440], [441], [442], [443], [444], [445], [446], [447], [448], [449], [450], [451], [452], [453], [454], [455], [456], [457], [458], [459], [460], [461], [462], [463], [464], [465], [466], [467], [468], [469], [470], [471], [472], [473], [474], [475], [476], [477], [478], [479], [480], [481], [482], [483], [484], [485], [486], [487], [488], [489], [490], [491], [492], [493], [494], [495], [496], [497], [498], [499], [500], [501], [502], [503], [504], [505], [506], [507], [508], [509], [510], [511], [512], [513], [514], [515], [516], [517], [518], [519], [520], [521], [522], [523], [524], [525], [526], [527], [528], [529], [530], [531], [532], [533], [534], [535], [536], [537], [538], [539], [540], [541], [542], [543], [544], [545], [546], [547], [548], [549], [550], [551], [552], [553], [554], [555], [556], [557], [558], [559], [560], [561], [562], [563], [564], [565], [566], [567], [568], [569], [570], [571], [572], [573], [574], [575], [576], [577], [578], [579], [580], [581], [582], [583], [584], [585], [586], [587], [588], [589], [590], [591], [592], [593], [594], [595], [596], [597], [598], [599], [600], [601], [602], [603], [604], [605], [606], [607], [608], [609], [610], [611], [612], [613], [614], [615], [616], [617], [618], [619], [620], [621], [622], [623], [624], [625], [626], [627], [628], [629], [630], [631], [632], [633], [634], [635], [636], [637], [638], [639], [640], [641], [642], [643], [644], [645], [646], [647], [648], [649], [650], [651], [652], [653], [654], [655], [656], [657], [658], [659], [660], [661], [662], [663], [664], [665], [666], [667], [668], [669], [670], [671], [672], [673], [674], [675], [676], [677], [678], [679], [680], [681], [682], [683], [684], [685], [686], [687], [688], [689], [690], [691], [692], [693], [694], [695], [696], [697], [698], [699], [700], [701], [702], [703], [704], [705], [706], [707], [708], [709], [710], [711], [712], [713], [714], [715], [716], [717], [718], [719], [720], [721], [722], [723], [724], [725], [726], [727], [728], [729], [730], [731], [732], [733], [734], [735], [736], [737], [738], [739], [740], [741], [742], [743], [744], [745], [746], [747], [748], [749], [750], [751], [752], [753], [754], [755], [756], [757], [758], [759], [760], [761], [762], [763], [764], [765], [766], [767], [768], [769], [770], [771], [772], [773], [774], [775], [776], [777], [778], [779], [780], [781], [782], [783], [784], [785], [786], [787], [788], [789], [790], [791], [792], [793], [794], [795], [796], [797], [798], [799], [800], [801], [802], [803], [804], [805], [806], [807], [808], [809], [810], [811], [812], [813], [814], [815], [816], [817], [818], [819], [820], [821], [822], [823], [824], [825], [826], [827], [828], [829], [830], [831], [832], [833], [834], [835], [836], [837], [838], [839], [840], [841], [842], [843], [844], [845], [846], [847], [848], [849], [850], [851], [852], [853], [854], [855], [856], [857], [858], [859], [860], [861], [862], [863], [864], [865], [866], [867], [868], [869], [870], [871], [872], [873], [874], [875], [876], [877], [878], [879], [880], [881], [882], [883], [884], [885], [886], [887], [888], [889], [890], [891], [892], [893], [894], [895], [896], [897], [898], [899], [900], [901], [902], [903], [904], [905], [906], [907], [908], [909], [910], [911], [912], [913], [914], [915], [916], [917], [918], [919], [920], [921], [922], [923], [924], [925], [926], [927], [928], [929], [930], [931], [932], [933], [934], [935], [936], [937], [938], [939], [940], [941], [942], [943], [944], [945], [946], [947], [948], [949], [950], [951], [952], [953], [954], [955], [956], [957], [958], [959], [960], [961], [962], [963], [964], [965], [966], [967], [968], [969], [970], [971], [972], [973], [974], [975], [976], [977], [978], [979], [980], [981], [982], [983], [984], [985], [986], [987], [988], [989], [990], [991], [992], [993], [994], [995], [996], [997], [998], [999], [1000].

Исходная веберовская стратегия — поиск совпадений на независимых антеннах — и теперь остается главным критерием обнаружения сигнала. Однако она усложнена (и обогащена) более тщательным методом отбора наиболее вероятных кандидатов. Теперь можно говорить не только о поиске, но об анализе совпадений, ориентированном на определенный тип источников.

Логически совпадение событий, зарегистрированных двумя антеннами, подразумевает, что они произошли в один и тот же момент времени, но физически означает их попадание во временное окно выбранной ширины Δt . При этом сами зарегистрированные импульсы либо их фронты должны быть короче этого окна. Условие «короткого импульса» соответствует также астрофизическим ожиданиям, поскольку все мыслимые «релятивистские катастрофы», — такие как взаимный пролет, столкновение и слияние сверхплотных звезд, а также их коллапс, — теоретически имеют очень короткие фазы мощного гравитационного излучения. Как правило, излучаемый импульс укладывается в один-три периода характерной (несущей) частоты. Вот это условие «короткого сигнала» является первым (известным еще Веберу) правилом селекции подозрительных импульсов, которые в дальнейшем следует проверить по критерию совпадения.

Но даже если зафиксировано совпадение, надо еще доказать, что оно не является случайным. В сигнале, снимаемом с любой антенны, всегда есть шумовые выбросы (кратковременные всплески), и один из них, по случаю, может произойти одновременно с шумовым всплеском на другой антенне.

Всплески на одной антенне могут совпасть со всплесками на другой антенне.

Примерами специфических «портретных форм» служат всплески от слияния релятивистских двойных звезд, от взрывов сверхновых типа IIa и от коллапсаров. Поясним алгоритм «портретной фильтрации». Ярко выраженной и довольно легко поддающейся расчету является форма гравитационного сигнала от сливающейся релятивистской двойной в так называемой спиральной стадии этого процесса, т.е. когда, теряя энергию на излучение, компоненты падают друг на друга по спиральной траектории. При этом наиболее интенсивный короткий всплеск рождается на последних оборотах перед взаимным касанием компонентов.

Например, знаменитый двойной пульсар PSR 1913+16, упомянутый выше, на протяжении его долгой жизни ($\sim 10^8$ лет) излучает слабые и практически монохроматические гравитационные волны на частоте около 10^{-4} Гц, а в конце своей жизни должен «проскочить» частотный интервал от 10 до 10^3 Гц за время около 3 секунд. При этом всего за три последних витка своей «смертельной спирали», т.е. примерно за тысячную долю секунды, он излучит в форме гравитационных волн энергию порядка $0,01 Mc^2$.

Таким образом, ожидаемая форма данного всплеска — это короткий импульс с нарастающей по частоте и амплитуде несущей. На сленге радиооператоров такой импульс называют «ксилофоном» или «чирпом», по-русски — «чирикающим сигналом». Соответственно будет выглядеть и реакция антенны. Имея в виду поиск именно таких сигналов, компьютер теперь может игнорировать все выбросы (и соответствующие «совпадения»), которые не похожи

тивных действиях»: последовательным перебором «семейства портретов» по их параметрам с разумным шагом дискретизации. Для каждого члена семейства следует выполнить операцию вычисления коррелятора и в конце отдать предпочтение той «опорной функции формы», которая обеспечивает максимальное уменьшение шума выбросов (или лучшее отношение сигнал/шум).

Таким образом, слепой поиск неизбежно приводит к многоканальной параллельной процедуре обработки данных, поступающих с гравитационной антенны. Каждый канал, т.е. отдельная компьютерная программа, осуществляет согласованную фильтрацию со своим портретом сигнала и затем компьютер делает выбор наилучшего канала по критерию сигнал/шум. Данные именно этого канала используются далее при поиске совпадений.

Похожие алгоритмы используются и в программах поиска ГВ-всплесков, порожденных сверхновыми и коллапсарами, с той лишь разницей, что неопределенность параметров здесь существенно больше, что требует вычислительных процедур большего объема. Вообще, как показывают расчеты, полномасштабный «слепой поиск» в реальном времени требует вычислительных мощностей, достигающих до терафлопа и более, что на сегодня является непомерной вычислительной нагрузкой. По этой причине исследуются иерархические процедуры с постепенным наращиванием точности.

Казалось бы, всего этого можно избежать, если ориентироваться на конкретный источник с известными координатами. Очевидный пример — пульсар, вращающаяся нейтронная звезда со стабильным

© Издательство «Наука» и ее филиалы, и другие организации, имеющие лицензию на воспроизведение, распространение, копирование и иное использование произведения в печатном, аудио- и видеотекстовом виде

известна фаза вращения. В принципе, это позволяет осуществить очень чувствительный синхронный прием непрерывного гравитационного сигнала, который может посылать пульсар. К сожалению, и такие источники опутаны неопределенностями настолько, что без многоканальной вычислительной процедуры при детектировании не обойтись. Останемся на этом чуть подробнее.

Дело прежде всего в том, что вращающееся, но сферически симметричное тело, не может излучать гравитационные волны (интуитивно это понятно: вращение сферы не изменяет ее гравитационное влияние на внешнего наблюдателя). Для излучения требуется отсутствие у звезды аксиальной симметрии. Формально ее моменты инерции по двум осям (x , y) в плоскости перпендикулярной оси вращения z не должны быть равными. Отношение их разности к центральному моменту по оси вращения характеризуется малым параметром асимметрии $\varepsilon < 1$. Релятивистскому сверхплотному объекту, каким является нейтронная звезда с ее сверхсильным гравитационным полем, в процессе формирования крайне сложно сохранить сколько-нибудь заметную аксиальную асимметрию. Теоретические оценки дают весьма широкий диапазон параметра ε — от 10^{-5} до 10^{-9} , что означает слабость гравитационного излучения пульсара. В самом оптимистическом варианте ($\varepsilon \approx 10^{-5}$) оценка амплитуды вариаций метрики у Земли, производимых пульсаром, расположенным в центре Галактики, составляет $h \sim 10^{-25}$, что очень мало. Тем не менее, когерентное (синфазное) накопление такого непрерывного сигнала в течение трех

Вопросы астрофизики и космологии. Т. 1. М.: Наука, 1988. С. 100-101.

месяцев допускает его регистрацию при шумовом фоне $\sim 10^{-22}$ Гц $^{-1/2}$ (т.е. современными ГВ-антеннами). Такое представление лежит в основе соответствующей программы поиска: надо произвести поиск вслепую по всему небу, чтобы случайно наткнуться на пульсар с достаточно сильным гравитационным излучением. При этом вероятность такой встречи также весьма неопределенна.

Доля нейтронных звезд в полном населении Галактики составляет по разным оценкам от 0,1% до 1%, т.е. в Галактике 10^8 – 10^9 нейтронных звезд; однако не ясно, сколько из них могут быть пульсарами. Сейчас известно более тысячи пульсаров, но только у 30 из них частоты радиоимпульсов (частоты вращения) лежат в диапазоне приема гравитационных антенн 100–1000 Гц. Разумно ожидать, что в действительности пульсаров таких гораздо больше, и «слепой поиск» на гравитационных антеннах в случае успеха как раз поможет их идентифицировать. Выполнение самого поиска с накоплением слабого «пульсарного сигнала» оказывается, однако, совсем не тривиальной задачей.

Причина состоит в том, что гравитационное излучение пульсара воспринимается с Земли не как строго одночастотный (монохроматический) процесс. Оно воспринимается как квазимонохроматическое излучение, модулированное по частоте, что обусловлено относительной скоростью источника и приемника (переменный доплеровский сдвиг частоты), а также эффектами скачков (звездотрясений) и замедления вращения самого пульсара. Кроме того, имеет место амплитудная модуляция излучения, связанная с движением диаграммы направленнос-

Downloaded from <http://www.nr.ru/> on 01/04/2018 by 193.10.135.105, IP: 193.10.135.105

спектра излучения, появление т.н. боковых частотных компонентов, которые «отсасывают на себя» радиационную энергию. Очевидно, что прежде чем накапливать «пульсарный сигнал», надо произвести его демодуляцию, чтобы аккуратно собрать «рассеянную энергию» на одной центральной частоте.

Современная процедура демодуляции проводится компьютерной обработкой данных с помощью перекодировки данных в новой, т.н. канонической, временной шкале. Последняя определяется с учетом центральной частоты пульсара и параметров модуляции, зависящих как от орбитальных вариаций движения, так и от динамических процессов в самом пульсаре. Очевидно, что как раз эти параметры не могут быть известны точно (особенно для еще не открытых пульсаров!). Теория может дать только правдоподобную оценку их интервала, которую закладывают в память компьютера. Тогда для реализации демодуляции и последующего накопления опять остается один путь — многоканальный прием с перебором возможных значений параметров модуляции при распределении их по каналам (читай, по различным вычислительным программам компьютера).

Тут снова возникает проблема объема и скорости вычислений, т.е. мощности компьютерного парка, его современных технических и экономических ограничений. По мере их снятия будут совершенствоваться программы гравитационного поиска пульсаров. Первые попытки регистрации пульсарных гравитационных волн уже начались на существующих антеннах обоего типа.

РЕЛИКТОВЫЙ гравитационно-волновой фон

Чрезвычайно интересно и важно было бы зарегистрировать реликтовое гравитационное излучение, рожденное в эпоху Большого взрыва, и отделившееся от вещества в процессе расширения Вселенной. Как полагают космологи, подобно фону реликтовых фотонов, открытому в 1965 г. и интенсивно изучаемому сейчас, должен существовать и фон реликтовых гравитационных волн, гравитонов, с весьма разнообразными частотами.

Реликтовый электромагнитный фон, его пространственные неоднородности (флуктуации) несут информацию о том, какой была Вселенная, точнее, ее горячая материя, спустя примерно миллион лет после Большого взрыва. Именно тогда в результате расширения и остывания первородной плазмы фотоны смогли отделиться от остального вещества, поскольку оно стало прозрачным для излучения. В дальнейшем это излучение расширялось самостоятельно и остывало. В наши дни, спустя 14 млрд. лет после Большого взрыва, мы воспринимаем его как почти изотропное реликтовое микроволновое радиоизлучение с температурой около 3 К.

Реликтовый гравитационно-волновой фон

подобное должно было присутствовать с гравитационным излучением, но с одним весьма серьезным отличием. Гравитационное взаимодействие самое слабое из всех, известных нам сегодня. Например, в атоме водорода гравитационное взаимодействие между протоном и электроном слабее электромагнитного в $2,3 \times 10^{39}$ раз. По этой причине гравитоны могут отделиться от вещества гораздо раньше фотонов. Как показывают теоретические оценки, Вселенная становится прозрачной для гравитонов уже в возрасте, сравнимом с планковским временем, т.е. спустя всего лишь 10^{-43} сек после Большого взрыва!

Таким образом, если удастся зарегистрировать реликтовый гравитационный фон и измерить его характеристики, такие как плотность, температура и т. п., то мы подойдем к началу мироздания невообразимо близко. Кстати, именно по этой причине некоторые скептики считают эту задачу практически невыполнимой. Между тем, физики заметили, что, в отличие от электромагнитного излучения, первичное гравитационное излучение может усиливаться параметрически (т. е. частотно-избирательно) в сильно меняющемся гравитационном поле Вселенной на ранних стадиях ее эволюции. Поэтому его спектр, в отличие от спектра фотонов, может быть неравновесным, не планковским, а иметь повышенную интенсивность в отдельных диапазонах частот.

В теории существуют различные сценарии развития этого фона. В оптимистическом варианте фоновое среднее значение метрических вариаций в диапазоне приема гравитационных антенн ($\sim 100\text{--}1000$ Гц) ожидается на уровне $h \sim 10^{-24}$ при очень узкой полосе приема $\Delta f = 3 \times 10^{-8}$ Гц. На первый

Одобрено редакцией. В печать передано 10.05.2016 г. 10:00. Подписано в печать 10.05.2016 г. 10:00.

особенно после изучения ситуации с пульсарами. Однако положение здесь значительно сложнее.

Есть принципиальное различие в задачах детектирования очень слабых сигналов электромагнитной и гравитационной природы. И в том, и в другом случае нам необходимо выловить очень слабый сигнал на фоне собственных шумов детектора. В случае с электромагнитным сигналом мы можем, открывая и закрывая апертуру антенны, сравнивать шумы детектора с потоком «сигнал + шум» и таким образом выделять сигнал. Но в случае с гравитационными волнами «закрыть вход антенны» мы не можем: гравитационной экранировки не существует! Известная задача теории обнаружения «одного шума на фоне другого шума» имеет решение при отличии их законов распределения. Но как реликтовый гравитационный фон, так и собственный шум гравитационной антенны предполагаются нормальными гауссовыми шумами. В такой ситуации есть единственная возможность — необходимо измерять взаимную кросс-корреляционную функцию выходных сигналов двух совершенно одинаковых гравитационных детекторов.

Идея этого метода состоит в том, что приходящий из космоса «сигнальный шум» для обеих антенн будет общим, одинаковым даже по фазе, поэтому он должен дать заметный (в пределе — единичный) вклад в кросс-корреляцию. Напротив, собственные шумы антенн независимы, так что их кросс-корреляция должна стремиться к нулю. Простые расчеты показывают, что отношение сигнал/шум на выходе коррелятора будет накапливаться и расти со време-

Copyright © 2012 by Astro-Net, Inc. All rights reserved. Printed in the United States of America.

ния и ширины полосы приема. При этом даже чувствительности антенн на уровне $h \sim 10^{-21} \text{ Гц}^{-1/2}$ хватает, чтобы поймать вариации метрического фона $\sim 10^{-24}$ за время наблюдения равное одному году. Но это при условии, что два приемника находятся в одном месте (для полной тождественности фазы «сигнальных шумов»). На практике антенны разнесены — чем дальше, тем лучше; этого требует стратегия «алгоритма совпадений». В итоге нарушается условие коррелированности «сигнальных откликов» антенн, и отношение сигнал/шум сильно падает. Факторы ослабления сейчас рассчитаны практически для всех известных пар детекторов глобальной сети; в лучшем случае они порядка одной десятой и меньше. Поэтому требуется увеличение чувствительности антенн обоих типов.

Радикальное решение этой проблемы — строительство двух детекторов в одном месте. Это и сделано на интерферометрической антенне Хенфорда. Там в одной вакуумной трубе-световоде параллельно смонтированы два интерферометра с плечами в 2 и 4 км. Остается ждать результатов.

Гравитационная волна «деформирует пространство» пропорционально своей амплитуде $h = \Delta l / l$. В максимуме, на масштабе равном половине длины волны, абсолютное значение вариации длины между пробными массами будет порядка $\Delta l = h \lambda_g / 2$, т.е. величина эффекта, подлежащего измерению, растет с уменьшением частоты. Вдобавок, астрофизический прогноз ожидаемых гравитационных сигналов также сулит нарастание их интенсивности с понижением частоты.

Эти обстоятельства заставляют исследовать возможность создания гравитационных детекторов с базой порядка астрономической единицы (1 а.е. равна 150 млн. км) и более. Естественно, первое, что «приходит на ум», это — попытаться использовать для такой цели далекие межпланетные космические аппараты. Они и так «уже летят», имея свои специализированные программы. Нужно лишь добавить к ним анализ телеметрических данных в ракурсе поиска «неожиданных и необъяснимых» другими очевидными причинами скачков вариаций их расстояния от Земли.

В. В. Брусиловский, доктор физико-математических наук

цы микрон для $h \sim 10^{-17}$. Такие возмущения в лабораторных условиях измеряются легко, но в космическом масштабе это нетривиальная задача. Очевидно, что регистрирующим инструментом в космосе может быть только радиолокационная аппаратура, устанавливаемая на космических станциях. Преимущество следует отдать доплеровскому методу, в котором регистрируются изменения относительной скорости аппарата по измеряемым вариациям частоты зондирующего электромагнитного излучения $\Delta v = c \cdot (\Delta v/v)$.

Во-первых, потому что слежение за относительной скоростью станций фильтрует монотонные вариации в их положении, происходящие без ускорений. Во-вторых, измерение частотных сдвигов с помощью атомных стандартов частоты на сегодня технически наиболее продвинутая область измерительного искусства. Предложение доплеровской локации для целей обнаружения всплесков гравитационного излучения впервые было сделано советскими учеными В.Б. Брагинским и М.Е. Герценштейном («Письма в ЖЭТФ», т. 5, 348, 1967), но детальные разработки этого метода и реализация его на практике принадлежит ученым Лаборатории Реактивного Движения США (Калифорнийский Технологический Институт, Пасадена). Оценки показывают, что под действием всплеска гравитационного излучения с амплитудой $h \sim 10^{-15} - 10^{-17}$, содержащего несколько колебаний на частоте $\sim 10^4$ Гц, вариация скорости далекого (1 а.е.) космического аппарата относительно Земли составит $\Delta v \sim 10^{-5} - 10^{-7}$ см/сек. В шестидесятые годы XX века этот уровень более чем на четыре

локаторов. Последующий прогресс систем дальней космической связи сделал идею «доплеровской гравитационной антенны» гораздо менее абстрактной.

Прежде всего, была детально исследована реакция доплеровской антенны на «свободных массах» (Земля – космический аппарат) на воздействие гравитационно-волнового всплеска. И здесь ученых ждал сюрприз – реакция оказалась весьма специфической. Временная структура вариаций частоты принимаемого электромагнитного сигнала при проходе гравитационного импульса через «доплеровскую пару» оказалась «триплетной», т.е. электромагнитный отклик с разными временными задержками трижды повторил форму гравитационного всплеска. Чтобы понять этот феномен на качественном уровне, рассмотрим упрощенную схему эксперимента, представленную на рис. 6.

Наземная станция слежения обменивается электромагнитными зондирующими импульсами с космическим аппаратом, а под углом θ к соединяющей их линии АВ проходит короткий всплеск гравитационного излучения длительности τ . Короткий в том смысле, что покрываемая им пространственная область $\sim \tau c$ оказывается значительно меньше, чем расстояние между Землей и космическим аппаратом $\tau \ll l$. Подчеркнем следующие особенности данной конфигурации: а) гравитационный импульс одновременно не может воздействовать на Землю и космический аппарат; б) фазовая скорость перемещения фронта гравитационной волны вдоль линии АВ оказывается больше скорости света из-за наклонного падения гравитационной волны $v_p = c/\sin\theta$.

Рис. 6. Схематическое изображение взаимодействия гравитационного импульса с системой Земля – космический аппарат



Рис. 6. Схема эксперимента.

В «доплеровском слежении за КА» измеряется сдвиг частоты сигнала зондирующего генератора при отражении от КА. Что должен «увидеть» наземный наблюдатель можно понять из следующих рассуждений. В момент t_0 прихода гравитационной волны в точку А (первое касание) её воздействие сдвигает частоту сигнала, т.е. измеряется частотный сдвиг $(\Delta\nu/\nu) \sim h(t_0)$. Затем, когда гравитационный импульс проходит пространство между точками А, В, он не влияет на измеряемый сдвиг. Достигая КА, гравитационный импульс воздействует на отраженные фотоны, меняя их частоту. Это происходит в момент $t_0 + (l \sin\theta/c)$, но измеряется этот сдвиг только когда эти фотоны вернутся к наземной станции,

т.е. в момент $t_0 + (v/c)(1 + \sin\theta)$. Форма второго сигнала будет такой же (ведь ГВ импульс тот же самый), но со знаком минус, т.к. «сдвинулся» приходящий фотон по отношению к зондирующему. Пройдя КА, гравитационный всплеск уходит в космическое пространство, но станция слежения зарегистрирует «память о нем» еще раз, когда вернутся те фотоны, которые были посланы в момент первого касания. Они вернутся в момент $t_0 + 2l/c$. Это будет тот же «перевернутый сигнал» или сдвиг со знаком минус. Так получается «триплетная структура» доплеровского отклика космического детектора на короткий гравитационно-волновой всплеск.

Эта удивительная особенность может быть использована для фильтрации сигнала, т.е. при выделении его на преобладающем шумовом фоне, который эффективно может быть подавлен отбором только тех выбросов, которые имеют похожую триплетную структуру. Более того, эта структура может дать информацию о направлении прихода гравитационного излучения: ведь временное положение её центрального пика зависит от угла падения гравитационной волны на линию «доплеровской связки». Прием сигналов одновременно от двух аппаратов, находящихся под разными углами θ , может дать двумерные координаты источника.

Требуемая стабильность задающего генератора наземной станции должна быть не хуже h , т.е. с участием атомных стандартов частоты, у которых $(\Delta\nu/\nu) \sim 10^{-14} - 10^{-16}$, можно говорить о возможности регистрации низкочастотных гравитационных всплесков вполне на уровне существующего астрофизического прогноза.

включен «доплеровский поиск» всплесков гравитационного излучения, были межпланетные станции «Пионер 10» и «Пионер 11». Миссии «Пионеров» имели главной целью исследование внешних окраин Солнечной системы за орбитой Марса. В частности, их задачей было изучение параметров межпланетной среды, пояса астероидов и атмосфер Юпитера и Сатурна при проходе окрестности этих планет. Затем аппараты, запущенные последовательно в 1972–73 годах, уходили дальше и покидали пределы Солнечной системы. Последние сеансы связи с ними прошли: в 1995 году с «Пионером 11» на расстоянии ~ 20 а.е., и в 2002 году с «Пионером 10», когда аппарат уже ушел за орбиту Плутона ~ 40 а.е. Их доплеровские данные были использованы для того чтобы найти ограничения сверху на величину гравитационно-волнового фона в частотной области ниже МГц. Поразительным фактом явилось слабое аномальное ускорение $\sim 5 \cdot 10^{-8}$ см·сек⁻², показанное обоими аппаратами, которое нельзя было объяснить действием гравитации планет, межпланетной средой и другими известными астрофизикам причинами. Можно ли приписать это ускорение гравитационно-волновому воздействию пока остается предметом дискуссий между специалистами. Последующими миссиями за орбиту Марса были аппараты «Улисс» (1992) и «Кассини» (1997) (оба названные именами ученых астрономов прошлого). Доплеровский поиск низкочастотных гравитационных сигналов на этих аппаратах проходил уже на уровне $h \sim 10^{-15}$. Обработка и осмысление накопленных данных продолжается в настоящее время.

Ученые обнаружили, что гравитационные волны существуют, но их сила очень мала.

носителем более «умеренной базой» относится также гигантский космический интерферометр ЛИСА, проект которого интенсивно разрабатывается в настоящее время совместно группами NASA и ESA. Эта антенна предназначена для детектирования крайне слабых ($h \sim 10^{-22} - 10^{-23}$) гравитационных сигналов в диапазоне частот $10^{-1} - 10^{-4}$ Гц, поэтому она должна быть вынесена в космос, ибо на Земле невозможно обеспечить отсутствие шумового деформационного фона на столь «исчезающем уровне». Равно как нельзя обеспечить базу, т.е. длину плеч интерферометра в миллионы километров. Источники гравитационных всплесков для такой антенны весьма впечатляющи. Это гигантские черные дыры в ядрах галактик и квазаров в десятки и сотни миллионов солнечных масс, которые притягивают и заставляют «падать на себя» менее массивные черные дыры звездных масс (10–100 масс Солнца). Это слияния массивных «чернодырных двойных» и даже целых двойных галактик на последних витках их взаимной траектории. Непрерывное излучение компактных двойных из черных дыр или нейтронных звезд в спокойный период их эволюции также предмет регистрации для ЛИСА при длительном наблюдении в один год и более. Конструктивно интерферометр ЛИСА мыслится как композиция трех идентичных КА на солнечной орбите близкой к земной. Три КА формируют равносторонний треугольник с длинной стороны в 5 миллионов километров. Каждая станция содержит две «свободно падающих массы», составляющих концы плеч интерферометра типа Майкельсона (с углом 60° в точке разделения плеч).

Рис. 1. Принципиальная схема космического интерферометра ЛИСА

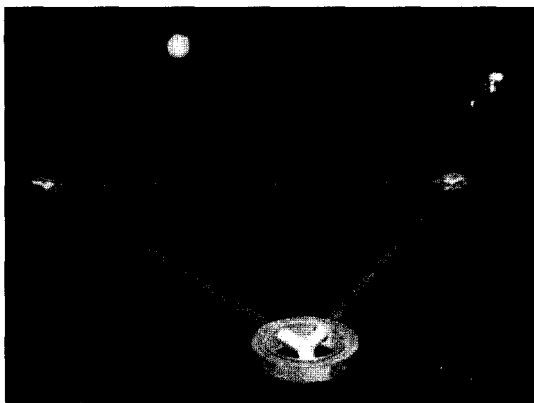


Рис. 7. Космический интерферометр.

Сопряженные с ними «вторые концевые массы» располагаются на двух других КА, размещенных в оставшихся вершинах треугольника (рис. 7). Лазерные лучи связывают КА, образуя три отдельных двухплечевых интерферометра. Центры деления лучей (плеч) находятся в каждом КА. Проектная чувствительность интерферометрических измерений деформаций плеч (сторон треугольника) должна достигать $\Delta l/l \sim 10^{-23}$ при времени накопления данных 1 год. Вариации солнечной постоянной (светимости) и солнечного давления, так же как и потоки солнечных частиц (солнечный ветер) должны компенсироваться следящими системами космических аппаратов, которые выполняются как «спутники, свободные от сноса». Каждый аппарат имеет активный ретранслятор, когерентно (с сохранением фазы) усиливающий отраженную волну.

Поиск астро-гравитационных корреляций

«Слепой поиск», конечно, — авантюра, раздражающая и обескураживающая. Искать «ночью черную кошку в темной комнате»? Нужно быть хотя бы уверенным, что она там есть. Лучше, если их там много: хотя бы одну поймаешь. Но при этом нужен инструмент, например, сачок, и побольше. Еще лучше, если кошки иногда мяучат, а у вас есть чувствительный слуховой аппарат. Тогда можно махать сачком «на звук».

Примерно такая логика лежит в основе идеи поиска взаимосвязанных «астро-гравитационных» событий. Их еще связывают с мультирадиационными источниками, поскольку их появление сопровождается излучениями различной природы: электромагнитным в радио-, оптическом-, рентгеновском- и гамма-диапазонах, а также потоками нейтрино и других компонентов космических лучей. Теоретически это могут быть те же катастрофы, которые мы уже рассматривали как источники гравитационно-волновых всплесков. В частности, взрывы сверхновых звезд, слияние двойных, некоторые виды коллапса должны сопровождаться не только гравитаци-

онным, но также нейтринным и гамма-излучением. Все это должно наблюдаться в виде коротких серий или вспышек.

Вооруженный таким знанием, «гравитационный наблюдатель» будет интересоваться тем, что увидели его коллеги, работающие с другими детекторами. Узнав от них о регистрации вспышки в некоторый момент времени, нужно с особым пристрастием исследовать запись гравитационной антенны в тот же промежуток времени.

Преимущество такой стратегии очевидно: во-первых, резко сокращается массив обрабатываемых данных, во-вторых, появляется потенциальная возможность накопления слабого сигнала путем разумного сложения кусков записей антенны, соответствующих многим вспышкам. Конечно, алгоритм «разумного сложения» можно разработать, лишь опираясь на какую-то астрофизическую модель мультирадиационного источника. Но такие модели пока разработаны слабо. Теория дает лишь самые общие указания, например, длительность интервала времени вокруг вспышки, где может находиться гравитационный сигнал, информацию о его запаздывании или опережении, но тоже весьма приблизительную. Возможно поэтому поиски «нейтринно-гравитационных» и «гамма-гравитационных» корреляций пока не привели к успеху.

Наиболее известным является случай наблюдения нейтринно-гравитационной корреляции во время вспышки Сверхновой 1987А. Итало-американская группа исследователей, работавших с неохлаждаемыми твердотельными детекторами (один в Риме, другой в Мэриленде) заявила о наличии совпадаю-

Вопрос. Почему не регистрируются гравитационные волны от вспышек?

щих сигналов во временной окрестности нейтринных событий, зарегистрированных специальным телескопом под горой Монблан. Число нейтринных событий было равно пяти, а особое внимание к ним было приковано с того момента, как стало известно об оптической регистрации сверхновой в Большом Магеллановом Облаке ($r \approx 52$ кпк), вспыхнувшей 23 февраля 1987 г. О регистрации нейтринных событий заявили также группы других нейтринных телескопов в Японии и США. Впоследствии обнаружился ряд противоречий в нейтринных данных, полученных различными детекторами; это не позволило признать, что имела место первая регистрация «нейтрино от коллапса». (Кстати, до сих пор наблюдателям не удается зафиксировать на месте вспышки той сверхновой наличие какого-либо плотного остатка типа нейтронной звезды или черной дыры.) В отношении гравитационных совпадений, якобы коррелированных с нейтринными событиями, также был проявлен скептицизм, главным образом, по причине неправдоподобно высокой амплитуды сигналов.

И все же этот спорный случай следует считать полезным, поскольку именно он стимулировал развитие алгоритмов поиска «астро-гравитационных корреляций» в общем виде с использованием всей (хотя бы и скудной) априорной информации, которую может дать астрофизика. В последние годы были попытки найти следы гравитационных сигналов, ассоциированных со знаменитыми гамма-всплесками. Пока положительных результатов нет, но надо набраться терпения и совершенствовать технику.

Исследования в области астрофизики и астрономии, проводимые в СССР, России и за рубежом

Последняя фраза наверняка вызовет ироническую реакцию скептика. Сколько же можно «ждать и совершенствовать», и вообще, стоит ли продолжать расходовать «деньги налогоплательщиков» на эту вашу гравитационно-волновую авантюру? На этот и другие критические вопросы типа, «ну что, до сих пор ничего не открыли?», приходится отвечать ученым, убежденным сторонникам необходимости развития гравитационно-волновой астрономии. Да, пока «не открыли, не овладели», но, согласитесь, и предмет исследования абсолютно необычный — волны пространства-времени, порождаемые и управляемые самым слабым среди известных взаимодействий.

Было бы наивно полагать, что открытие этой новой формы материи, а тем более ее использование, возможно без крайнего напряжения и мобилизации всех доступных интеллектуальных и технических ресурсов общества. Нет, это не алхимия нового века, а скорее — вызов цивилизации, наука которой подошла вплотную к фундаментальным тайнам мироздания. Гравитационные волны неизбежно должны

В. И. Арсеньев, доктор физико-математических наук, профессор

ле и в фундамент современной науки как одна из составляющих нашего знания. Им отводится существенная роль в эволюции Вселенной и, естественно, с помощью тех же волн следует эту Вселенную изучать. Теперь нам уже понятно, что только гравитационное излучение способно: «сообщить» о внутренней динамике коллапсирующих объектов; доставить информацию о центральных областях галактик, оккупированных гигантскими черными дырами в миллиарды солнечных масс; наконец, оно позволит «заглянуть задним числом» в юную Вселенную планковского возраста $\sim 10^{-43}$ с!

Одно это должно снять вопросы типа «ради чего?», хотя упомянуты только информационные аспекты обсуждаемого феномена. Ну а если решиться на интерполяцию за рамками общепризнанной науки, то допустимо мыслить линии телекоммуникационной гравитационной связи, реактивные аппараты на гравитационной радиации, гравитационно-волновые приборы интроскопии и т.д. Сегодня это «свободный полет фантазии», однако известно, что «дорогу осилит идущий». Так или иначе, но целесообразность продолжения экспериментальных гравитационно-волновых исследований признается практически всем мировым научным сообществом. Другое дело, что позволить себе такие исследования могут только развитые и экономически состоятельные страны. Но для человечества в целом это приемлемо.

Мы примерно знаем как пойдет дальнейшее развитие гравитационно-волновых наблюдений. После года-полтора лет непрерывной работы пары антенн LIGO американские группы получают новые средства

на модернизацию, а фактически, на создание интерферометров новейшего поколения, криогенных (с охлаждаемыми подвесками зеркал), с улучшенной сейсмической защитой и с чувствительностью не хуже $h \sim 10^{-23}$. С некоторым запаздыванием то же произойдет с установкой VIRGO. Японские группы, построившие установку TAMA-600, разработали проект двух 3-километровых криогенных интерферометров с подземным их размещением в штольнях Камиоканде. Нет сомнений, что они получают финансирование. Итало-голландская группа успешно продвигает проект СФЕРА шарового всенаправленного детектора с подземной установкой в Лаборатории Гран-Сассо. Наконец, проект гигантского космического интерферометра LISA принят ESA и NASA как один из основных для запусков в 2010-2015 годах.

Вот это и есть недвусмысленный ответ на вопрос: «стоит ли тратить деньги налогоплательщиков»? Несомненно, что разумность этих трат обсуждалась и взвешивалась не один десяток раз. Цивилизация выбрала цель, от которой нельзя отказаться на «полдороги». Хотелось бы только, чтобы она не была слишком длинной...

серия «Наука сегодня»

формат 105×165, 64с., обложка

Артур Чернин.

Космология: Большой Взрыв.

Анатолий Черепашук.

Черные дыры во Вселенной.

Марина Бутовская.

Власть, пол и репродуктивный успех.

Марина Бутовская.

Гомосексуализм и эволюция.

Владимир Сурдин. **Неуловимая планета.**

Леонид Корочкин. **Клонирование.**

Юрий Ефремов. **Млечный Путь.**

Светлана Боринская, Николай Янковский.

Люди и их гены: нити судьбы.

Сергей Попов, Михаил Прохоров.

Звезды: жизнь после смерти.

Валентин Руденко.

Поиск гравитационных волн.

Владимир Сурдин. **НЛО: записки астронома.**

Владимир Сурдин. **Астрология и наука.**

Высылаем книги наложенным платежом.

Заявки по адресу:

141195, Фрязино-5, Московской обл., а/я 107,

ООО «Век 2»

или по E-mail: vek-2@mail.ru

Руденко Валентин Николаевич

Поиск гравитационных волн

Подп. в печ. 18.02.2007. Формат 70х90/32.

Усл. п. л. 2,34. Тираж 2500 экз. Заказ № 6689.

ООО «Век 2», 141195, г. Фрязино-5, Моск. обл., а/я 107.

Тел. (495) 785-56-39, доб. *15-14,

Фрязино, пл. Введенского, 1, к. 107.

www.vek2.nm.ru E-mail: vek-2@mail.ru.

Изд. Лиц. ЛР № 070440 от 11.04.97.

Отпечатано в ОАО «Можайский полиграфкомбинат»,
143200, г. Можайск, ул. Мира, 93



9785850991715