

Удачная охота гравитационщиков

Кандидат
физико-математических наук
С.М. Комаров

Сентябрь 2015 года. Заканчивается пятнадцатый год безуспешных попыток поймать гравитационные волны в американском эксперименте LIGO. Обе его антенны — одна из них расположена в Хенфорде (штат Вашингтон), близ побережья Тихого океана, а вторая на другом конце континента, в луизианском Ливингстоне, — только что модернизированы и проходят техническую проверку. У аналогичной итало-французской антенны VIRGO в Италии, неподалеку от Пизы, похожая модернизация пока не закончена, немецко-британская же антенна GEO600 под Ганновером не модернизирована, и особых надежд поймать на ней какой-либо сигнал нет.

Техник, назовем его Билл, разглядывает полученные при калибровке луизианской антенны данные. «Глянь-ка, что за чертовщина?» — обращается он к коллеге с условным именем Джон. «Слушай, да это же небось сигнал!» — отвечает тот. «А может, какой-то глюк. Электрический, например?» — «Давай спросим, что видят в Хенфорде?»

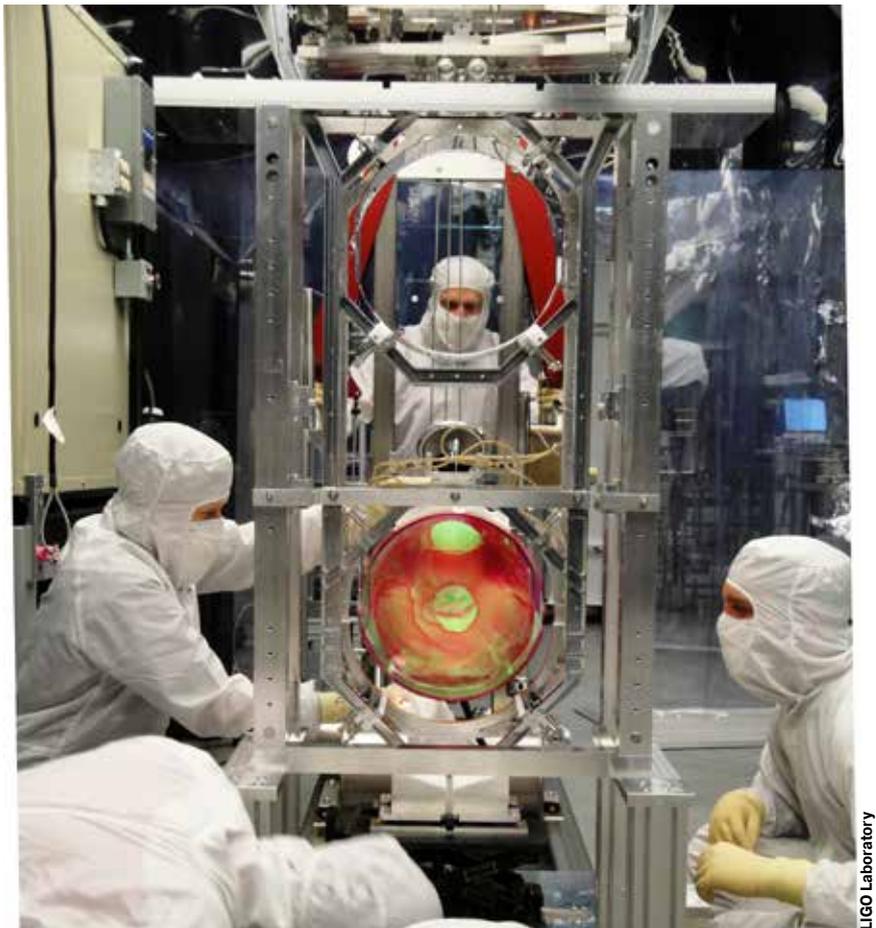
На проворде техник со второй антенны, допустим, Пол. «Что вы там увидели? Какой-то импульс? Сейчас я у нас гляну. Точно, и у нас импульс. Во сколько, говорите, он у вас появился? А у нас на семь миллисекунд позже. Так это, стало быть, СИГНАЛ!»

Примерно вот так 14 сентября 2015 года в 5:51 утра по летнему среднеамериканскому восточному времени во время технического прогона оборудования перед вводом реконструированной установки в эксплуатацию было экспериментально доказано существование гравитационных волн, предсказанных Альбертом Эйнштейном более ста лет тому назад.

Конечно, этот воображаемый разговор — просто шутка, на самом деле все было не так. Результаты измерений поступают в компьютерный центр, где из них в ходе длительных расчетов извлекают полезные данные, и занимаются этим совсем не те люди, что настраивают аппаратуру. Однако что-то в этом роде кто-то наверняка сказал, когда было замечено сходство двух импульсов на антеннах, разделенных тремя тысячами километров. С этого момента — фиксации долгожданного результата — начала свой отсчет история гравитационной астрономии.

Импульс, о котором идет речь, — это дошедший до Земли след слияния двух черных дыр где-то в глубине Вселенной. Но откуда известно, что физики получили именно ожидаемый много лет сигнал и именно от события такого типа, если разглядеть слияние черных дыр в оптический телескоп нет никакой возможности? Чтобы ответить на это вопрос, поговорим о гравитационных волнах.

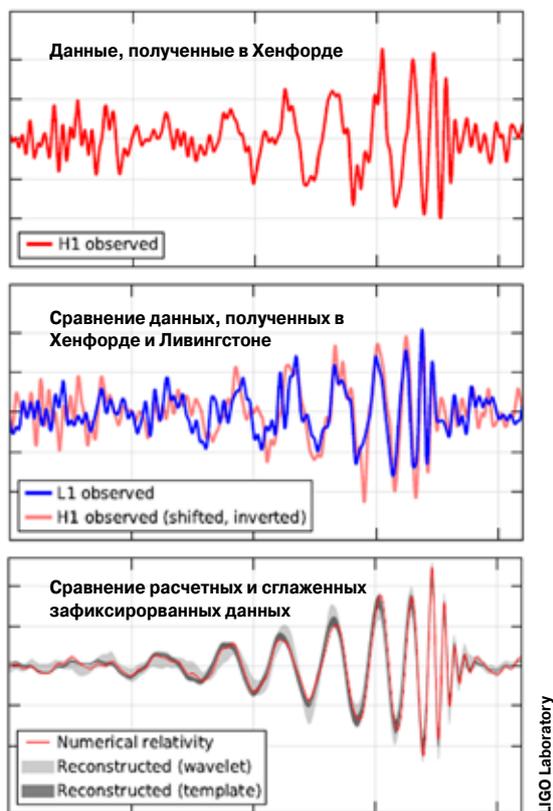
В соответствии с теорией Эйнштейна, материя — не важно, в виде обладающего массой вещества или энергии — де-



LIGO Laboratory

формирует пространство-время. Взаимодействие полей деформации от двух материальных тел обеспечивает их притяжение. Обычно область деформации перемещается вместе с телом, подобно его тени. Однако есть обстоятельства, когда деформация отрывается от породившего ее тела и убегает от него прочь в виде волны. Для этого всего лишь требуется, чтобы тело двигалось ускоренно. Гравитационное взаимодействие очень слабое, поэтому мы не чувствуем гравитационных волн, которые сами постоянно излучаем и которые непрерывно сквозь нас проходят, порождаемые движениями как различных предметов, окружающих нас, так и небесных тел.

Но есть уникальные события, при которых сила гравитационных волн становится ощутимой. Первое по мощности среди них — слияние черных дыр. Когда две дыры так сближаются, что гравитация подавляет их кинетическую энергию и заставляет вращаться друг вокруг друга, получается устойчивая пара. Ее судьба предрешена: круговое движение ускоренное — дыры испускают гравитационные волны, теряя энергию движения; расстояние между ними сокращается. Проходят тысячелетия, и вот две дыры оказались на критически близком расстоянии для того, чтобы слиться в одну. Они устремляются друг к другу с субсветовой скоростью — и в несколько мгновений исчезают. Эта катастрофа порождает огромную гравитационную волну. Например, если сливаются дыры массой в несколько солнечных масс, ее энергия будет сопоставима с массой



Сигналы, полученные антеннами на разных краях североамериканского континента, оказались практически идентичными и совпали с расчетным спектром для слияния двух черных дыр.

Солнца, умноженной на квадрат скорости света (вспомним Эйнштейна). Для сравнения: превращение в энергию по этой формуле одного килограмма вещества дает столько же энергии, сколько взрыв бомбы в три десятка мегатонн тротилового эквивалента. А масса Солнца на 30 порядков больше! Столь сильную волну можно попытаться поймать, даже будучи за миллионы световых лет от источника.

Другое подходящее событие — слияние нейтронных звезд. Это также монолитные объекты, обладающие колоссальной гравитацией при ничтожном размере, но энергия порождаемой при этом волны несколько меньше. Исследователи надеются разглядеть и волны, порождаемые сверхновыми, и стохастические волны фона, и некоторые другие.

Главное же в том, что профиль волн для каждого типа события прекрасно известен и многократно рассчитан. Поэтому исследователи гравитационных волн, получив подо-

зрительный сигнал, отличающийся от эффектов известных земных событий, например сейсмических волн, сравнивают его профиль с расчетным профилем — шаблоном и узнают, какое именно событие породило сигнал. Именно так, сравнением с шаблоном, и определили, что 14 сентября в 5:51 утра по среднеамериканскому времени на антеннах LIGO была зафиксирована волна от слияния дыры массой в 36 масс Солнца с дырой в 24 массы Солнца. При этом выделилась энергия, сопоставимая с тремя массами Солнца. Случилось это очень далеко — на расстоянии в 1,3 млрд световых лет от Земли, фактически на пороге чувствительности модернизированной антенны.

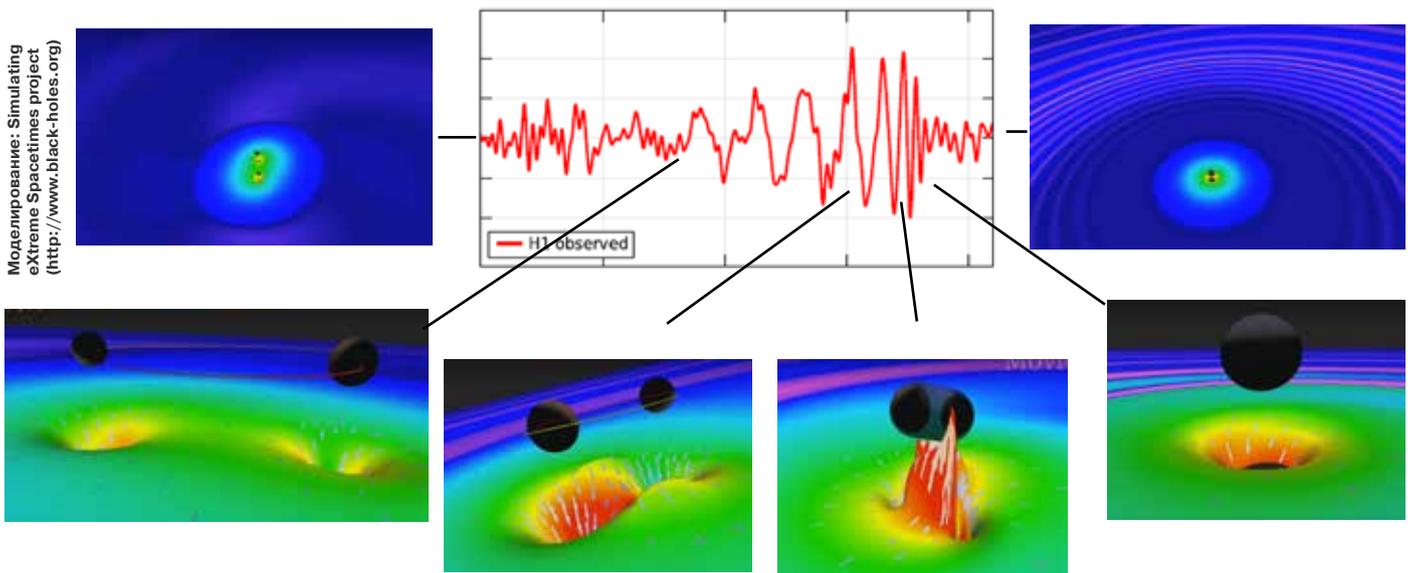
Благодаря тому, что сигнал поймали две антенны, причем с некоторым разбросом по времени, удалось определить направление на источник сигнала — он находится в Южном полушарии. Точнее определить нельзя, для этого нужна третья антенна, но, как мы уже говорили, итальянская антенна была закрыта на ремонт. Исследователям повезло — волна шла очень хорошо, сигнал был отлично виден на обеих антеннах. Если бы он шел стороной и затронул одну антенну, были бы трудности: в физике событие считается состоявшимся, если оно подтверждено еще как минимум одним экспериментом. Одна антенна дала бы лишь основание для размышлений, пришлось бы считать вероятность, что это не случайный импульс, а именно тот сигнал, которого ждали полтора десятка лет. Здесь же все формальные требования техники эксперимента были соблюдены.

После такого незапланированного успеха — сигнала, полученного еще до начала регулярных наблюдений, — началась настоящая работа: первая серия наблюдений длилась с сентября по январь 2015 года. Сейчас идет обработка данных, и результаты скоро, видимо, станут известны общественности.

Что могут дать наблюдения за гравитационными волнами? Фактически открывается новая область астрономии. С помощью гравитационного телескопа можно попытаться заглянуть туда, где не видно света, например внутрь черной дыры, а там нас ждет какая-то другая физика — та, что у нас есть сейчас, дает совершенно нефизическое решение в виде сингулярности, то есть обращения параметров объекта в ноль или бесконечность. Слияние нейтронных звезд, падение звезды в дыру — все это мы теперь сможем наблюдать. Гравитационные волны легко проходят сквозь материю, и с их помощью удастся заглянуть в области, закрытые от нас скоплением межзвездного вещества. И главное — человек получает инструмент для изучения устройства самого пространства-времени, инструмент, которого до сих пор не было. Кто знает, может быть, именно этот инструмент откроет путь к тому, о чем мечтало не одно поколение фантастов и их читателей, — созданию гиперпространственных переходов, обеспечивающих быстрое перемещение на большие расстояния.

В СССР первые сообщения о возможности детектирования гравитационных волн появились в конце 50-х годов. Так, в «Журнале экспериментальной и теоретической физики» в 1960 году вышла статья В.Б. Брагинского с коллегами из МГУ

LIGO, Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (Обсерватория гравитационных волн с лазерным интерферометром), управляется консорциумом из Калифорнийского и Массачусетского технологических институтов при финансировании Национального научного фонда США, а также при участии британского Совета по науке и технологии, немецкого Общества Макса Планка и австралийского исследовательского совета. Переговоры о финансировании инициаторы проекта Кип Торн, Рональд Древер и Райнер Вайс вели с 1992 году, выделено оно было в 1994-м. Это один из крупнейших по затратам проектов фонда. Антенну построили в 2000 году, первые систематические наблюдения начались в 2002 году, в 2007-м антенна была модернизирована в первый раз, в 2010-м началась вторая модернизация, которая и привела к успешному наблюдению в сентябре 2015 года. Сейчас в работе обсерватории участвует более 1000 человек из 83 организаций 15 стран мира.



Моделирование позволило определить, какой этап в эволюции системы из двух черных дыр порождает тот или иной участок пакета гравитационных волн. Сначала идут слабые, неотличимые от фона, волны от вращения черных дыр. По мере их сближения увеличивается как деформация пространства, так и амплитуда волн. В момент слияния энергия выплескивается, порождая максимум волны. Затем все затухает и большие волны от этого источника не будет

им. М.В.Ломоносова о возможности измерения в лабораторном эксперименте скорости распространения гравитационных волн с помощью твердотельных детекторов. Именно Брагинский, ныне член-корреспондент РАН, стал главным инициатором отечественных исследований гравитационных волн и создателем соответствующей отечественной научной школы. В 1963 году он оценил, что при тогдашнем оборудовании можно фиксировать вызванные прохождением волн смещения порядка 10^{-17} метра. В том же 1963 году В.И.Пустовойт и М.Е.Герценштейн из ФИАна им. П.Н.Лебедева АН СССР предположили, что лучше всего для детектирования гравитационных волн подойдут оптические резонаторы. Напомним, что к тому времени американец Джозеф Вебер уже ставил свои опыты с резонаторами в виде огромных алюминиевых цилиндров. Опыты оказались неудачными: в 70-х годах исследователи предположили, что фиксируемые ими волны

не имеют никакого отношения к гравитационным волнам космического происхождения. Неудача Вебера на полтора десятилетия отвлекла внимание от этой проблемы. Новый всплеск интереса к гравитационным волнам возник в середине 80-х годов, а антенны LIGO начали строить в 1994 году.

К сожалению, из-за непростого положения в нашей науке, сложившегося к концу 80-х годов, создать собственную высокочувствительную гравитационную антенну отечественным исследователям не удалось. Однако их опыт и знания пригодились при создании аппаратуры для международных проектов, в частности при совершенствовании антенн LIGO.

Современные гравитационные антенны используют принцип интерферометра Майкельсона — того самого, которым хотели измерить эфирный ветер: луч лазера разделяется на два луча, которые расходятся в перпендикулярных направлениях. Там каждый луч проходит систему из двух зеркал и возвращается к детектору. Расстояние между зеркалами в антеннах LIGO — четыре километра. На детекторе при сложении лучей возникает интерференционная картинка, которая меняется при изменении длины пути луча. Она может измениться из-за множества причин. Ищут же последствия одной — деформации пространства-времени в области

Пределы измерений

Модернизация антенны LIGO повысила чувствительность в десять раз, что увеличило число регистрируемых событий в 3000 раз. И сразу после модернизации было зафиксировано событие, произошедшее очень далеко. Вглядимся в масштаб Вселенной. Галактика Млечный Путь имеет диаметр 100 тысяч световых лет и толщину 3 тысяч световых лет. По оценкам, в ней содержатся сотни миллионов черных дыр звездной массы. Слияние таких дыр и зафиксировали, согласно сравнению с расчетным шаблоном, антенны LIGO 14 сентября. Расстояние до соседней галактики — туманности Андромеды — 3,6 млн. световых лет, до спутников — Магеллановых Облаков — 160 тысяч световых лет. Событие же произошло на расстоянии в 1,3 млрд световых лет, в сотни раз большем, чем расстояние

между галактиками. При этом амплитуда гравитационной волны обратно пропорциональна расстоянию до источника. Значит, от источника, скажем, в туманности Андромеды амплитуда была бы в 400 раз больше, а если бы событие случилось в Млечном Пути — то и вовсе в 15 тысяч раз. То есть даже до модернизации антенна LIGO должна была многократно фиксировать слияния черных дыр в Млечном Пути и галактиках локального скопления. А она не фиксировала. Видимо исследователям из группы LIGO просто улыбнулась удача. Именно так считает астрофизик из Северо-западного университета США Василики Калогера, занимающаяся компактными объектами — черными дырами, нейтронными звездами, белыми карликами: «Слияния черных дыр редки, именно поэтому наш детектор должен быть доста-

точно чувствительным, чтобы достигнуть больших расстояний и, соответственно, большого объема пространства — это увеличивает шанс заметить явление. А сильный сигнал из Галактики можно ждать десятилетиями, если не больше». Кроме того, в предыдущие годы антенна работала отнюдь не на пределе своей точности и реально она вышла на предполагаемый режим лишь непосредственно перед последней модернизацией. Проектная же чувствительность ожидается к 2021 году. Есть и еще одно обстоятельство: частота волны. Сначала рабочая частота антенны была в районе 100 Гц, а теперь покрывает диапазон 50—1000 Гц. Даже если рядом случится событие, которое породит волны с частотой за пределами этого интервала, то сколь бы мощным оно ни было, антенна его пропустит.



КАЛЬКУЛЯТОР

между зеркалами, причем искомое изменение расстояния очень мало: на антенне LIGO оно составляет 10^{-21} метра! Это все равно что зафиксировать смещение яблока на диаметр одного атома. Такую точность обеспечивает максимальное устранение помех. А мешает измерениям все — сейсмические волны, тепловое расширение-сжатие, колебания зеркал, висящих на подвесах, флуктуации давления света, электростатические заряды и многое другое.

Для уменьшения шумов нужно было решить множество материаловедческих задач, в чем и приняли участие исследователи из МГУ под руководством профессора физического факультета В.В. Митрофанова, возглавляющего российскую группу в коллаборации LIGO. Например, именно они доказали, что если сменить стальные нити подвеса зеркал на сделанные из плавленого кварца, то шум от них существенно уменьшится; с ними время затухания колебаний достигло пяти лет! Детальный расчет электростатических зарядов на поверхности зеркал позволил оптимизировать их конструкцию, а открытие нового класса фундаментальных термодинамических флуктуаций — существенно изменить всю оптическую конфигурацию антенны.

Подобные усовершенствования значительно увеличили чувствительность антенн. После реконструкции зеркала потяжелели в четыре раза — до 40 кг, диаметр вырос с 25 до 34 см, стало возможным использовать лазер с мощностью в двадцать раз больше прежней (200 Вт вместо 10), сейсмический шум стал пренебрежимо мал, а порог по частоте снизился с 40 до 10 Гц. В общем, число возможных событий, которые теперь способна зафиксировать антенна, выросло в 3000 раз.



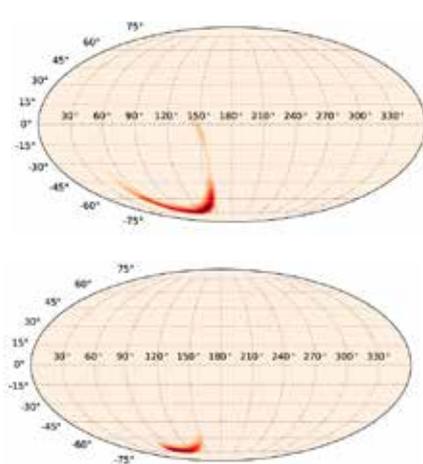
СОБЫТИЕ

С первой фиксацией гравитационных волн работы по совершенствованию антенн не заканчиваются, а, наоборот, получают новый импульс, поскольку теперь понятно, к чему нужно стремиться. В настоящее время идет подготовка к созданию третьей антенны LIGO — в Индии, а в Камиоке, где уже находятся детекторы нейтрино, строят японскую антенну, в космосе же планируется развернуть орбитальную обсерваторию LISA. Во всех этих проектах технические хитрости, обеспечившие нынешний успех антеннам LIGO, будут не только использованы, но и приумножены.



Направление на юг

Двумя антеннами можно определить лишь приблизительное направление на сигнал. А нет ли третьего прибора, который поможет в этом деле? Как оказалось, такой прибор имеется. Это орбитальная рентгеновская обсерватория «Fermi», которая следит за гамма-всплесками. После получения информации о гравитационном событии работающие на ней астрономы решили проверить, не проявилось ли оно на рентгеновском излучении Вселенной. И точно, в Южном полушарии небесной сферы был обнаружен слабый рентгеновский сигнал, появившийся спустя 0,4 секунды после гравитационного события и продолжавшийся около секунды. Спектр излучения захватил область от 50 до 980 кэВ (http://gammaray.nsstc.nasa.gov/gbm/publications/preprints/gbm_ligo_preprint.pdf). Накануне события и после него в этой области небесной сферы никаких источников рентгеновских лучей не было зафиксировано, что дало основание предположить: всплеск, возможно, порожден последствиями катастрофического слияния черных дыр. Действительно, гравитационная волна обладает колоссальной плотностью энергии, которая постепенно падает по мере удаления волны от источника. Если она,



Исходная область (а) расположения источника гравитационного сигнала на небесной сфере существенно сократилась (б) после прибавления данных обсерватории «Fermi» (V. Connaughton et al. Fermi GBM Observations of LIGO Gravitational Wave Event GW150914. Препринт НАСА)

еще не растеряв энергии, столкнется, например, с облаком межзвездного газа, его частицы вполне смогут приобрести достаточное ускорение для излучения рентгена. Совмещение карт позволило на 90% сократить область возможного нахождения источника гравитационного сигнала.

Впрочем, есть ненулевая вероятность, что сигнал шел от Земли. Дело в том, что у обсерватории невысокое пространственное разрешение и положение источника сигнала определяют расчетным

путем. Такой расчет дает наибольшую вероятность источника сигнала именно в направлении на планету, а не от нее. Исследователи, впрочем, такую версию отвергают, ведь на Земле рентгеновское и гамма-излучение такой мощности если и появляются, то во время сильных грозных разрядов. А в найденной области никаких гроз в тот момент не было.

Единственное мощное событие в Южном полушарии примерно в это время — землетрясение магнитудой 8,3 балла у берегов Чили. Оно произошло спустя два дня, 16 сентября 2015 года, в 22:54 по Гринвичу в 229 км на север от Сантьяго-де-Чили (точные координаты: $31^{\circ}34'12''$ южной широты, $71^{\circ}39'14,4''$ западной долготы). Но вряд ли обсерватория «Fermi» могла заметить какой-то предвестник землетрясения. Обычно таким предвестником бывает эмиссия нейтронов, а электромагнитное излучение не пробьется сквозь толщу горных пород: очаг землетрясения лежал на глубине 25 км. Впрочем, желающие могут произвести необходимые расчеты для совмещения приводимой карты небесной сферы с глобусом на момент события.

Как бы то ни было, прибавление данных о рентгеновском излучении позволяет существенно уменьшить область, из которой пришел сигнал, и есть мнение, что сочетание двух методов существенно облегчит жизнь исследователям гравитационных волн.

