

PACS numbers: 04.80.Nn; 95.55.Y

Криогенная гравитационная антенна четвертого поколения

Дж. Фроссати

В настоящее время в качестве наиболее чувствительных детекторов гравитационных волн используются металлические цилиндры весом в несколько тонн, охлаждаемые до температуры жидкого гелия, а с недавних пор — и до температуры $T \simeq 100$ мК (Наутилус). Однако достижимая в этом случае чувствительность недостаточна для детектирования волн, приходящих от столь отдаленных объектов, чтобы частота событий составляла несколько единиц в год. Охлаждение сферических детекторов массой около 100 т до температуры около 10 мК должно помочь достигнуть необходимой чувствительности и дать начало новой астрономии.

Введение

Гравитационные волны были предсказаны Эйнштейном в 1916 г. в рамках его общей теории относительности, однако никогда не наблюдались экспериментально, несмотря на интенсивные усилия многих экспериментальных групп в течение последних 30 лет (см. [1] и список литературы там). Одной из причин этого является тот факт, что лишь ускоренные массы, обладающие квадрупольным моментом, могут излучать g -волны, так как производная по времени от дипольного момента $\mathbf{d} = \sum_i m_i \mathbf{x}_i$ (где m_i — масса, $\mathbf{x}_i$ — положение i -й частицы тела) равна нулю в силу закона сохранения полного момента системы. Излучаемая мощность, таким образом, пропорциональна $1/c^5$ вместо $1/c^3$, как для электромагнитных волн. Например, стальной цилиндр весом 1000 т и длиной 100 м, вращающийся с максимальной возможной с точки зрения прочности стали скоростью ($\omega = 20$ рад s^{-1}) вокруг оси, перпендикулярной оси цилиндра, излучал бы 10^{-26} Вт. Эту исключительно малую мощность в конце концов можно было бы зарегистрировать, если бы имелся детектор, способный поглотить всю излучаемую энергию. К сожалению, эффективность даже самых лучших детекторов исключительно низка. Тем, кто знаком с физикой низких температур, легко понять эту проблему по аналогии с проблемой сопротивления Капицы. На самом деле, уравнения Эйнштейна схожи с уравнениями упругости обычной среды с точностью до замены размерности упругой константы $c^4/8\pi G$ на размерность силы вместо силы, деленной на длину. Здесь G — гравитационная постоянная:

$$G = (6,6720 \pm 0,0041) \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/\text{с}^2 \cdot \text{кг},$$

c — скорость света. Согласно Блайру [1], пространственно-временной континуум можно рассматривать как исключительно жесткое упругое тело (коэффициент упругости порядка 10^{43} Н), в котором g -волны ведут себя как звуковые волны, распространяющиеся со скоростью света. Характерный импеданс твердого тела по отношению к звуковой волне $\rho V/\sigma$ (где σ — площадь сечения тела, перпендикулярного волновому вектору волны), для случая пространства-времени может быть выражен как $c^3 G^{-1}$. Для границы между жидким гелием и медью

отношение импедансов есть $(\rho V)_{\text{Cu}}/(\rho V)_{\text{He}} \simeq \simeq 1,8 \cdot 10^3$, тогда как для пространства-времени и меди оно достигает величины порядка 10^{28} . Это означает, что g -волны проходят сквозь обычную материю, практически не "замечая" ее. Передача энергии от высокоскоростных "фононов" массивной антенне происходит, таким образом, очень неэффективно, с характерным сечением

$$\Sigma_0 = 0,68 \text{ Гв}^2 \text{ М}/\pi \text{ с}^3$$

(для волны, падающей в оптимальном направлении [2]), где v — скорость звука в материале детектора и M — масса детектора. Характерное сечение Σ_0 современных детекторов, имеющих массу около 2 т, для скорости звука порядка 5 км s^{-1} не превышает величины порядка 10^{-25} . Предполагая, что такой детектор настроен на наш вращающийся цилиндр, получим для поглощаемой энергии величину порядка $10^{-25} \cdot 10^{-26} = 10^{-51}$ Вт, что соответствует одному кванту (3 Гц) за 10^{11} лет!

По рассмотренным выше причинам единственными кандидатами на источники гравитационных волн, регистрация которых возможна в земных условиях, являются такие космические объекты, как сверхновые, коалесценция двойных звезд, захват звезд черными дырами и тому подобные события. Частота таких событий в нашей Галактике очень низка. Сверхновые можно ожидать раз в 30–40 лет, бинарную коалесценцию — один раз за 100 тысяч лет. Если в середине Галактики существует большая черная дыра, она может захватывать звезду один раз за тысячу лет [3]. Таким образом, очевидно, что для регистрации гравитационных волн необходимо охватывать гораздо большие объемы пространства. Предпочтительным источником является большой Вирго-кластер, расположенный на расстоянии 10–20 Мпк (1 Мпк $\simeq 3,6 \cdot 10^6$ св. лет) и содержащий около 2500 галактик. В этом случае можно ожидать нескольких событий в год.

За последние 20–30 лет было создано два типа гравитационных антенн: антенна Вебера и интерферометрическая антенна [1]. В обеих используется тот факт, что g -волны деформируют метрический тензор h таким образом, что в материи, взаимодействующей с волной, возникают напряжения в направлении, перпендикулярном направлению распространения волны. Это напряжение $h = \Delta L/L$ очень мало из-за малого сечения взаимодействия волны с материей. Коллапс сверхновой в центре нашей Галактики (10 кпс) с обращением в гравитационные волны 0,1 % массы Солнца вызвал бы на Земле напряжение $h \simeq 10^{-18}$.

Интерферометрическая антенна представляет собой интерферометр с очень большой базой и относительно тяжелыми зеркалами, в котором исключительно большая эффективная длина L достигается за счет многократного отражения лазерного луча от зеркал. Такие антенны имеют очень высокую потенциальную чувствительность, но в настоящий момент на два порядка величины менее чувствительны, чем антенны Вебера.

Антенны Вебера [4] делают из материала, обладающего высокой добротностью (типичная величина Q — несколько миллионов) и тщательно защищают от внешних вибраций на резонансной частоте. Кроме того, в настоящее время стержни охлаждают для уменьшения броуновского шума. Когда волна проходит через антенну, обычно за несколько миллисекунд, она индуцирует (квадрупольные) колебания, длящиеся в течение

времени порядка Q/ω . Энергия этих колебаний передается детектору, представляющему собой, как правило, резонансно связанную с основным стержнем меньшую массу (или массы) и колеблющуюся, таким образом, с гораздо большей амплитудой. Это движение регистрируется различными методами, причем одним из лучших является емкостной метод. Например, один из электродов конденсатора связан с меньшей массой, имеющей большую амплитуду вибраций, а другой движется вместе с самим стержнем. Конденсатор заряжают и регистрируют модулированное напряжение при помощи СКВИДа (SQUID — сверхпроводящий квантовый интерферометрический магнитный прибор). Кроме того, используются различные другие методы детектирования, имеющие свои достоинства и недостатки. В качестве резонансной частоты стержня выбирают наиболее вероятную частоту предсказываемой волны, имея в виду тот факт, что наибольшая часть энергии гравитационного импульса сосредоточена в миллисекундном временном интервале в диапазоне частот от нескольких сотен до нескольких тысяч герц [1–3].

Необходимость использования низких температур в таких гравитационных детекторах стала ясна в 60-х годах, когда Вебер начал использовать изолированную пару гравитационных антенн при комнатной температуре. Предельная чувствительность, которая может быть достигнута при помощи таких детекторов, выражается в терминах спектральной плотности энергии $f(v_0)$ гравитационного импульса:

$$f(v_0) > \Sigma_0^{-1}(kT/\beta Q + 2kT_n). \quad (1)$$

Здесь масса резонирует на частоте v_0 с добротностью Q при температуре T . Предполагается, что движение регистрируется приемником, электрическая энергия которого составляет часть β от полной энергии антенны, и усиливается электронным прибором с температурой шума T_n . Большая часть экспериментальных групп во всем мире использует цилиндрические стержни из алюминиевого сплава Al5056 высокой добротности Q ($v_s = 5,1 \cdot 10^3$ м/с), длина которых (около 3 м) выбирается таким образом, чтобы их резонансная частота составляла около 1 кГц, где спектральная плотность энергии ожидается максимальной. Типичная масса составляет несколько тонн.

Первый член справа в уравнении (1) представляет собой вклад шумов, вызванных тепловыми флуктуациями в антенне (броуновский шум). Величина флуктуаций зависит от связи между основной модой и тепловым резервуаром. Именно эта связь определяет акустические потери в стержне. Эффективная энергия шумов уменьшается по мере возрастания времени релаксации τ (или добротности Q). Открытие того факта, что при низких температурах можно использовать резкое возрастание добротности алюминиевых сплавов [5, 6] и убедило большую часть экспериментальных групп использовать этот материал.

Второй член в правой части уравнения (1) связан с самим процессом измерения. Он представляет собой вклад электронного шума приемника и усилителя и имеет привычный в области электронного приборостроения найквистовский вид. В гравитационных антеннах естественно использовать усилители на основе СКВИДа, температура шума которых может, в принципе, приближаться к квантовому пределу

$$(T_n = hv/k = 47 \cdot 10^{-9} \text{ К при } 1 \text{ кГц}).$$

Различные поколения антенн Вебера можно классифицировать по их термодинамической температуре. Антенны, разработанные Вебером в 60-х годах и работающие при комнатной температуре, принято относить к первому поколению. Криогенные детекторы (4,2 К), разработанные в 70-х и использовавшиеся в 80-х годах, составляют второе поколение. В 1986 г. три таких криогенных детектора (Рим, LSU и Стэнфорд) определили новую верхнюю границу интенсивности g -волн, доходящих до Земли [7]. В 1989 г. римская антенна Эксплорер, охлажденная до температуры 2 К при помощи сверхтекучего гелия, достигла чувствительности $h \cong 7 \cdot 10^{-19}$ [8].

Антенны, работающие при $T < 1$ К

С целью дальнейшего понижения эффективной температуры антенны Фэрбэнксом и его группой было предложено охладить антенну до миллиградусного диапазона. Они рассматривали возможность охлаждения антенны до 2 мК при помощи электронного размагничивания хорошо известной парамагнитной соли ЦМН (церий-магний-нитрат) [9]. Однако это так и не было сделано, и только с появлением мощных рефрижераторов растворения охлаждение столь больших масс металла стало реальным. Первой добилась успеха на этом пути римская группа с антенной Наутилус [10]. Они первыми продемонстрировали, что масса в 2,3 т может быть охлаждена до температуры ниже 100 мК. В ближайшее время за ними должны последовать детектор Орига в Легнаро и детектор Стэнфордского университета. Эти антенны принадлежат к третьему поколению.

Предельная чувствительность Наутилуса при охлаждении до 30 мК и при условии работы СКВИДа на квантовом пределе шумов составляет $3 \cdot 10^{-21}$. Напряжения, вызываемые на Земле событием в вирго-кластере с обращением 0,1 % массы Солнца в гравитационный импульс, составляют $\cong 2 \cdot 10^{-21}$, что соответствует плотности энергии на частоте 1 кГц, равной $f(v_0) = 3 \cdot 10^{-6}$ Дж/м²·Гц. Поперечное сечение Наутилуса для лучшей ориентации составляет $\Sigma_0 = 8,44 \cdot 10^{-25}$ м²·Гц. При усреднении по всем поляризациям и направлениям сечение уменьшается примерно в 7,5 раза. Энергия, поглощаемая антенной, представляет собой произведение $f(v_0)\Sigma_0$ и составляет лишь $3,4 \cdot 10^{-31}$ Дж, что меньше энергии одного кванта на частоте 1 кГц. Для дальнейшего повышения чувствительности необходимо использование квантово-неразрушающей методики, изучаемой в настоящее время [11].

Сферические детекторы (четвертое поколение детекторов Вебера)

Сферические детекторы могут улучшить ситуацию по сравнению с резонансными цилиндрическими даже при неизменном уровне шума.

В 1971 г. Р. Форвард [12] показал, что сферический детектор можно рассматривать как настоящую обсерваторию g -волн. Свободная упругая сфера имеет пять вырожденных квадрупольных вибрационных мод, сильно взаимодействующих с g -волной. Цилиндрический же стержень имеет лишь одну моду. Каждая мода может рассматриваться как отдельная антенна, ориентированная на соответствующее направление и поляризацию. Более того, при сравнении сферы с цилиндрическим

стержнем из того же материала и с той же резонансной частотой (это условие грубо выполняется при соблюдении равенства длины стержня диаметру сферы) сфера имеет большее сечение взаимодействия, так как обладает большей массой и изотропна [13]. К примеру, алюминиевая сфера с резонансом на частоте 1 кГц, той же, что у цилиндрической антенны Наутилус, будет иметь диаметр 3 м и массу почти 38 т, что почти в 17 раз больше, чем масса цилиндра. Сечение взаимодействия увеличится во столько же раз по сравнению с оптимально ориентированным цилиндром и почти в 100 раз при усреднении по всем направлениям.

Так как техническая возможность уменьшения шумов и приближения к квантовому пределу не зависит от того, является ли детектор цилиндром или сферой, указанное выше увеличение сечения приведет к такому же повышению окончательной чувствительности. Это означает, что, если предельная чувствительность оптимально ориентированного цилиндра составляет $h = 3 \cdot 10^{-21}$, то чувствительность сферы равна $h = 3 \cdot 10^{-22}$ при любом направлении волны, так как $h \propto M^{1/2}$. Если, кроме того, вместо алюминия использовать более тяжелый сплав, например CuBe или CuAl, то при приблизительно той же скорости звука получается дополнительное увеличение h в 1,7 раза, что дает значение $1,7 \cdot 10^{-22}$ без привлечения квантово-неразрушающих методов. Сферический детектор может естественным образом регистрировать не только тензорные волны (спин 2), предсказываемые общей теорией относительности, но и скалярные волны (спин 0), предсказываемые другими метрическими теориями гравитации, например теорией Бранса и Дика [14], объединяющей принцип Маха с релятивистской теорией гравитации. Верхние пределы интенсивности и частоты событий, рассмотренные выше для Солнечной системы, недействительны для скалярного излучения. Этот тип излучения может испускаться при изменении во времени монопольного момента, например при радиальных осцилляциях нейтронных звезд, и регистрироваться по возбуждению монопольной моды сферы.

Приведенные выше факты игнорировались в течение длительного времени, возможно, по той причине, что сферический резонатор казался не столь практичным и простым, как цилиндрический. Сегодня следующие новые факты дают экспериментаторам достаточную поддержку для начала столь грандиозного проекта:

— надежность существующих резонансных антенн;

— осуществимость идеи охлаждения нового поколения резонансных антенн ниже 0,1 К, продемонстрированная на примере Наутилуса;

— возможность подвеса резонансной массы в узловой точке [15];

— определение четкого метода ориентационного развертывания сигнала от серии приемников, связанных с резонансной массой [16].

Важной остается задача разработки приемников с более низкой температурой шума (в настоящее время она составляет около 1 мК) и большей константой связи β .

Техника охлаждения массивных гравитационных детекторов: Наутилус

В 1971 г. Вебер впервые охладил алюминиевый цилиндр весом в 1,5 т до температуры жидкого гелия и "...сразу же после охлаждения появился очень сильный шум. Частично этот избыточный шум оказался связанным с внутренней структурной релаксацией цилиндра. Частично — с наличием акустической связи с интенсивным шумом систем жидкого азота и жидкого гелия" [17]. Эти рассуждения отражают те трудности работы с гравитационными антеннами при низких температурах, с которыми в дальнейшем в течение двадцати лет боролись несколько исследовательских групп на четырех континентах. Проблема заключалась в том, что впервые высокодобротная масса в несколько тонн должна была охладиться до 4,2 К или ниже, будучи свободной в своем движении и столь хорошо изолированной от внешнего мира, чтобы была возможна регистрация перемещений порядка $\Delta L \simeq 10^{-18}$ м.

В низкотемпературной системе гравитационной антенны криогенные требования и требования акустической изоляции должны быть увязаны друг с другом. Коротко они заключаются в следующем:

а) обеспечить функционирование установки в течение многих месяцев при условии редких и коротких перерывов в снятии данных для криогенного обслуживания;

б) обеспечить постоянную и равномерную температуру антенны; стационарное гауссово распределение амплитуды вибраций антенны в отсутствие сигнала является важным условием ее надежности;

в) не добавлять лишнего механического шума с тем, чтобы не возбуждать вибрационные моды до измеряемого уровня;

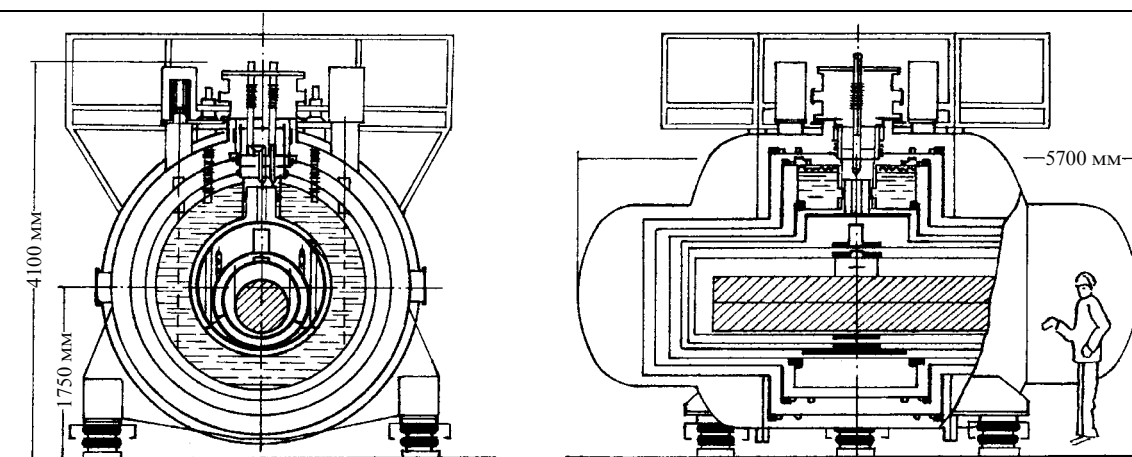


Рис. 1. Принципиальная схема антенны Наутилус

г) защищать собственную высокую механическую добротность Q антенны.

Особой проблемой экспериментов с криогенными гравитационными антеннами является задача обеспечения одновременно хорошего теплового и очень слабого механического контактов между резонансной массой и системой охлаждения.

При 4,2 К ванна с жидким гелием, окружающая антенную вакуумную камеру, служит тепловым резервуаром, а для термолизации детектора используется некоторое количество гелиевого обменного газа, который перед началом снятия данных откачивают. Температура антенны остается около 4,2 К, пока вакуумная камера полностью окружена жидким гелием. Установлено, что механический шум, источником которого является испаряющийся жидкий гелий, должен быть ослаблен в 10^7 раз (140 дБ) с тем, чтобы не возмущать детектор. Это ослабление обеспечивается системой подвески, которая должна быть тщательно отработана как эффективный механический фильтр.

Как было сказано выше, единственным рефрижератором, способным обеспечить температуру до 10 мК в непрерывном режиме при наличии больших тепловых нагрузок, является машина растворения [18]. Самая мощная машина растворения в диапазоне 50 мК и ниже (до 1,9 мК) была построена в Лаборатории им. Камерлинг-Оннеса и может поглощать 25 мКВт тепла, подводимого к камере растворения [19], при температуре 10 мК и скорости циркуляции до 10^{-2} моль/с.

Существуют машины растворения со скоростью циркуляции, превышающей 1 моль/с [20], и с очень большой холодопроизводительностью при $T > 100$ мК. Машины растворения являются сами по себе источниками шума, поэтому при проектировании необходимо минимизировать такие эффекты, как турбулентность и трение. Для этого следует использовать минимально возможный поток при имеющейся тепловой нагрузке на антенну и экраны. При понижении температуры ниже 1 К наиболее эффективным механизмом теплопередачи между антенной и охлаждающей системой становится теплопроводность твердых тел. Это делает задачу механической изоляции антенны от охлаждающей системы при сверхнизких температурах гораздо более трудной, чем при температуре жидкого гелия.

После тщательного анализа осуществимости проекта [21] первый сверхнизкотемпературный детектор Наутилус был построен, собран и испытан. Общий вид низкотемпературной установки изображен на рис. 1. Ключевой в криостате является его центральная секция, которая короче самой цилиндрической антенны (в дальнейшем именуемой стержнем). Эта секция содержит два экрана, охлаждаемых газообразным гелием, контейнер с жидким гелием (емкостью 200 л), три массивных медных кольца и специальный рефрижератор растворения ^3He в ^4He [22]. Из торцевых крышек, закрепленных на каждой ступени криостата, образуется семь полных экранов, окружающих стержень. Экраны подвешены друг к другу при помощи титановых прутков и образуют каскад механических фильтров. В результате достигается ослабление механических вибраций на резонансной частоте стержня (около 900 Гц) приблизительно на 260 дБ.

Первый медный экран имеет тепловой контакт с "градусной" (1 К) камерой рефрижератора. Промежуточные и внутренние экраны термически связаны с двумя

серебряными теплообменниками машины растворения; стержень охлаждается от камеры растворения [23] через медный прут, навитый на центральную часть стержня. Для уменьшения степени передачи стержню механических вибраций каждый холодопровод имеет участок, состоящий из мягкой многожильной медной косы [24].

На рис. 2 показано изменение температуры стержня во время охлаждения. Около трех недель и 8000 литров жидкого азота потребовалось для достижения 77 К, около одной недели и 5000 литров гелия — для достижения 4,2 К. Стержень выдерживался при температуре 4,2–8 К в течение приблизительно двух недель для проведения различных тестов. Затем продолжалось дальнейшее охлаждение. Начальная температура стержня и трех медных экранов составляла около 8 К. После заполнения "градусной" камеры гелием под низким давлением конденсировалась смесь и начиналась циркуляция в машине растворения. Через три дня калиброванный германиевый термометр зарегистрировал температуру 95 мК на торце стержня и 63 мК — в камере растворения.

Фактическое поведение системы при охлаждении совпало с более ранней моделью [25]. Из измеренной величины разности температур камеры растворения и торца стержня (около 30 мК) была определена верхняя граница теплоподвода к антенне. Он составил 10 мКВт, что соответствует плотности теплового потока $1,7$ мКВт/м². Скорость испарения гелия составила 50 литров в день.

Следующий этап

Вооружившись приобретенным при работе с Наутилусом опытом, рассмотрим новое поколение гравитационных детекторов — сферическую антенну. Так как для регистрации пяти квадрупольных мод и, возможно, монопольной моды требуется по крайней мере шесть приемников, следует ожидать существенного снижения высокой добротности, полученной с Al5056: предположительно в 2–3 раза каждым приемником. В связи с этим представляется целесообразным использовать сплав, который можно охладить до более низкой температуры, и тем самым сохранить неизменным или уменьшить значение $T_{\text{eff}} = T/\beta Q$. В этом смысле представляют интерес медные сплавы, в частности CuBe и CuAl, которые не являются сверхпроводниками и примерно в три раза тяжелее Al5056. И Be, и Al могут растворяться в меди до концентрации 10 %, при этом скорость звука составляет $v = 4700$ м/с для CuAl, $v \cong 4300$ м/с для 5 %-ного раствора Be в Cu и $v \cong 5300$ м/с — для 10 %-ного. Для BeCu более низкой концентрации величина Q была измерена и составила $Q \cong 10^7$ [26].

При плотности $7,58$ м/см³ трехметровая сфера из CuAl будет весить 107 т. На рис. 3 показана принципиальная схема такого детектора, названного GRAIL (Gravitational Radiation Antenna In Leiden). Аналогичный проект создается для "последователя" Наутилуса. Другие сферические детекторы обсуждаются в настоящее время в Луизиане, в Стэнфорде, в Мэриленде и в Бразилии [27].

Рассмотрим по порядку наиболее важные аспекты проекта GRAIL.

а) Охлаждение от комнатной температуры до 4,2 К

Постоянная времени для охлаждения сферы от комнатной температуры определяется соотношением $\tau = R^2/D$, где $D = k/\rho c$ — коэффициент диффузии, который для сплава Al5056 равен $4,5 \cdot 10^{-5}$ м²/с, а для 10 %-ного CuAl — $1,76 \cdot 10^{-5}$ м²/с. При $R = 1,5$ м имеем $\tau \cong 13$ ч для

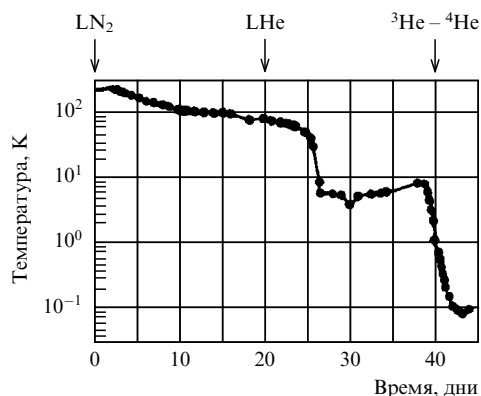


Рис. 2. Зависимость температуры цилиндрического стержня от времени

Al5056 и $\tau \cong 33$ ч для CuAl. Эти величины быстро убывают с понижением температуры, достигая значений в несколько секунд при 2 К. В случае использования для охлаждения метода обменного газа, как в антенне Наутилус, замена цилиндра сферой радиусом 0,3 м приведет к возрастанию постоянной времени до двух лет!

В связи с вышеизложенным мы вынуждены охлаждать сферу путем прямого контакта с холодным газообразным гелием, аналогично тому, как это делают в CERN'e [28]. Холодный газообразный гелий циркулирует через теплообменник, охлаждаемый жидким азотом, и впрыскивается на высокой скорости на уровне нижней части сферы до тех пор, пока не будет достигнута температура $T \cong 80$ К. Затем охлаждение продолжают при помощи гелиевого оживителя (производительностью 100 л/ч), и охлаждение до 4 К занимает еще около 10 дней. После откачки внутренней вакуумной рубашки сфера продолжает охлаждаться обычным образом машиной растворения. Охлаждение от 300 К до 4 К займет около трех недель. За время откачки внутренней вакуумной рубашки 15000-литровый гелиевый контейнер заполняется гелием и оживитель отсоединяется от криостата для уменьшения вибраций.

б) Охлаждение до 10 мК

Эксперимент с Наутилусом показал, что теплоподвод к стержню составил около 10 мВт ($1,7$ мВт/м²). Для сферы он составил бы 48 мВт (в предположении, что теплоподвод пропорционален площади поверхности). Взяв для запаса еще коэффициент 2, получим требуемую холодопроизводительность 100 мВт при 10 мК, что всего в четыре раза больше холодопроизводительности рефрижераторов, уже построенных в Лейдене [19].

Необходимая скорость циркуляции может быть получена из следующего соотношения:

$$\dot{n} = \frac{\dot{Q}}{82T^2} = 3 \cdot 10^{-2} \frac{\text{моль}}{\text{с}}.$$

При такой циркуляции холодопроизводительность при 200 мК будет составлять около 100 мВт.

Для охлаждения от 1 К до 200 мК необходимо отвести энергию

$$H = \int_0^T c_{\text{Cu}} dT,$$

где $c_{\text{Cu}} \cong 10^{-4}$ Дж/г, или $H \cong 10^4$ Дж. Если предположить, что машина растворения находится при темпера-

туре 200 мК, то для охлаждения сферы до этой температуры нужно около одного дня.

Дальнейшее охлаждение до 10 мК требует отвода энергии

$$H \cong \int_{0,01}^{0,2} 10^{-4} T dT = 2 \cdot 10^{-6} \text{ Дж/г},$$

или 200 Дж, в предположении, что теплоемкость CuAl равна теплоемкости Al5056 (мы не располагаем данными по теплопроводности CuAl при очень низких температурах).

Таким образом, так как энтальпия и холодопроизводительность убывают как T^2 , потребуется около одного дня для охлаждения до 10 мК. В результате охлаждение сферической 100-тонной антенны до 10 мК может быть произведено менее чем за месяц. Огромная осторожность необходима в отношении магнитных примесей, которые могут увеличить время охлаждения в области низких температур на 1–2 порядка.

В процессе охлаждения при помощи циркулирующего газообразного гелия очень важно избегать конденсации примесей на сфере и приемниках, так как это вызывает падение добротности. Использование несверхпроводящего сплава с теплопроводностью, превышающей теплопроводность алюминиевого сплава Al5056 в 100–1000 раз, должно обеспечить малые (в несколько милликельвинов) тепловые градиенты по сфере.

в) Подвеска

Измерение перемещений порядка 10^{-22} м возможно лишь при выполнении условий чрезвычайной предосторожности в отношении передачи антенне дополнительных вибраций на резонансной частоте. Полагая характерную амплитуду вибраций в земных условиях на

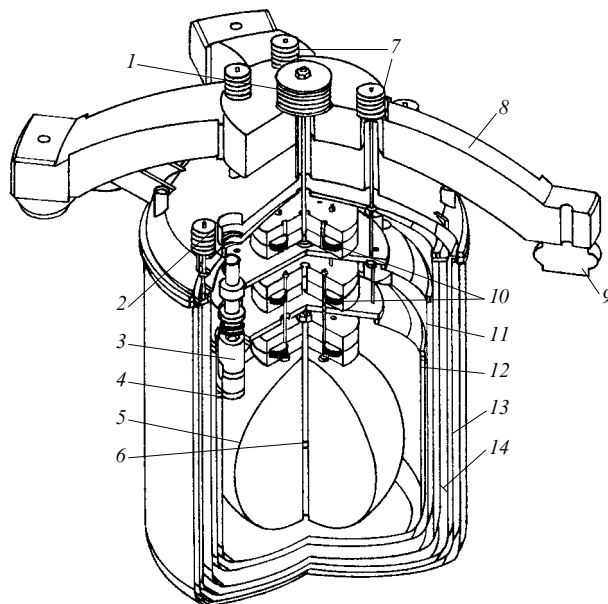


Рис. 3. GRAIL: сферическая антенна (100 т, 10 мК). Обозначения: 1 — резиновые демпферы сферы, 2 — резиновые демпферы гелиевой ванны, 3 — рефрижератор растворения, 4 — камера растворения, 5 — сфера диаметром 3 м, 6 — медный пруток, служащий подвеской и холодопроводом, 7 — резиновые демпферы медных экранов, 8 — бетонная опора, 9 — воздушный демпфер, 10 — сильфоны с жидким гелием, 11, 12 — медные экраны (0,7 К и 50 мК соответственно), 13 — экран (70 К), 14 — гелиевый контейнер (15000 л)

частоте 1 кГц равной 10^{-6} м, получаем, что необходимо их ослабление более чем в 10^{16} раз (-320 дБ). Ослабление в 160 дБ может быть обеспечено при комнатной температуре демпферами, составленными из резиновых и стальных пластин. Очень важным моментом является развязка ванны с кипящим гелием от сферы, как это показано на рис. 3.

Тепловые экраны обеспечивают защиту машины растворения и закреплены независимо друг от друга на бетонной опоре. При дальнейшем демпфировании доминантным фактором становится тепловой шум, что означает необходимость низкотемпературной защиты.

Интересной представляется возможность использования нового типа низкотемпературных демпферов на базе сильфонов, заполненных жидким гелием.

При давлении 20 атм гелий деформируется под максимальной нагрузкой на 15 %, тогда как сталь с модулем Юнга $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па — лишь на 0,2 %.

Если позаботиться о том, чтобы давление не превышало давления затвердевания (скажем, 20 атм), то частота такой пружины будет почти в 10 раз ниже, чем эквивалентной стальной. Оценка степени ослабления одним элементом подвески (две медные пластины и 8 сильфонов диаметром 30 см) дает значение около 55 дБ вместо 30 дБ для схожей, но традиционной подвески [29]. Таким образом, можно надеяться на суммарное ослабление вибраций в 160 дБ при комнатной температуре плюс 165 дБ за счет гелиевой подвески и плюс по меньшей мере 70 дБ за счет медного прута, удерживающего сферу. Получаем, по крайней мере на бумаге, почти 400 дБ.

Такая подвеска оставляет также возможность для внешнего вмешательства. Например, если какой-то паразитный резонанс оказывается близким к резонансу сферы, изменяя давление гелия, мы можем сдвинуть его в более безопасную область. Другую интересную возможность дает использование гелиевой подвески из смеси ^3He и ^4He в качестве неметаллического холодопровода между медными пластинами и машиной растворения. Все, что для этого нужно, это покрыть спеченным серебряным порошком внутренние поверхности оснований сильфонов.

Заключение

Охлаждение 100-тонной массы до миллиградусных температур представляется осуществимым и является, безусловно, наиболее масштабным применением рефрижераторов растворения. Такие сферические детекторы должны открыть новое окно во Вселенную, стать началом новой астрономии, не уступающей по значению радио-или оптической астрономии.

Настоящее предварительное исследование финансировалось Голландским Фондом FOM NWO, Национальным Институтом ядерной физики и физики высоких энергий Нидерландов и Лейденским университетом. Мы благодарны INFN (Рим) за постоянную поддержку гравитационных исследований в Италии и за интерес к новой антенне. Индустрией LIPS были численно исследованы процессы плавления и затвердевания больших сферических объектов из CuAl, а также изготовлена модель диаметром 50 см, в результате чего стало ясно, что изготовление 100-тонного образца осуществимо. Мы очень признательны за их (бесплатную) помощь. Существенный вклад в работу на настоящем этапе проекта GRAIL внесли А. Марченков, А. Семенов, В. Степанкин, В. Фавон и Дж. Нордхук. Мы благодарны им за это.

Список литературы

1. *The detection of gravitational waves* (Ed. D G Blair), (Cambridge: Cambridge University Press, 1991)
2. Amaldi E, Pizzella G, La ricerca delle onde gravitazionali. In Centenario di Einstein, Astrofisica e Cosmologia, Gravitazione, Quanti e Relativita, Giunti Barbera, Firenze, 1979
3. Misner C W, Thorne K S, Wheeler J A *Gravitation* (S Francisco: W H Freeman and Co.)
4. Weber J *Phys. Rev.* **117** 306 (1960)
5. Carelli P et al. *Cryogenics* **15** 406 (1978); Suzuki T, Tsubono T, Hirakawa H. *Phys. Rev. Lett.* **A 67** 2 (1978)
6. Coccia E, Niinikoski T O *Lett. Nuovo Cimento* **41** 242 (1984)
7. Amaldi E et al. *Astron. Astrophys.* **216** 325 (1989)
8. Amaldi E et al. *Europhys. Lett.* **12** 5 (1990)
9. Hamilton W O In *Near zero, new frontiers of physics* (Eds. J D Fairbanks, D S Deaver Jr, C W F Everitt, P F Michelson) (New York: W H Freeman and Co., 1988)
10. Astone P et al. *Europhys. Lett.* **16** 231 (1991)
11. Braginsky V B, Khalili F Ha *Quantum Measurement* (Ed. S Kip Thorne) (Cambridge: Cambridge University Press, 1992)
12. Forward R *Gen. Rel. and Grav.* **2** 149 (1971)
13. Wagoner R V, Paik H J *Experimental Gravitation*. In: *International Symposium held in Pavia* (Acc. Naz. dei Lincei, 1977)
14. Brans C, Dicke R H *Phys. Rev.* **124** 925 (1961)
15. Coccia E *Rev. Sci. Instr.* **55** 1980 (1984)
16. Johnson W W, Merkowitz S M *Phys. Rev. Lett.* **70** 2367 (1993)
17. Weber J *Experimental Gravitation* In: *International Symposium held in Pavia* (Acc. Naz. dei Lincei, 1977)
18. Lounasmaa O V *Experimental Principles and Methods below 1 K* (London: Academic Press, 1974)
19. Vermeulen G A, Frossati G *Cryogenics* **27** 139 (1987)
20. Berglund P, Kyynäräinen J, Niinikoski T O, Rieubland J M In: *International Cryogenic Engineering Conference-9* (Guildford: Butterworths, 1982) Niinikoski T O. In: *International Cryogenic Engineering Conference-10* (Guildford: Butterworths, 1984) and references therein, 1984)
21. Coccia E, Niinikoski T O *J. of Phys. E: Sci. Instr.* **16** 1983 (1983)
22. Bassan M et al. In: *5th Marcel Grossmann Meeting on General Relativity Perth, Western Australia 1988* (Eds. Blair, Bunningham, Ruffini) (World Scientific, 1989)
23. Coccia E, Modena I *Cryogenics* **31** 712 (1991)
24. Coccia E et al. *Rev. Sci. Instr.* **63** 5432 (1992)
25. Coccia E, Pomentale T *CERN Internal Report* (1982) DD/82/16
26. Duffy Jr, W. Preprint.
27. Мы благодарны О.Д. де Агуяру (Бразилия), изучающему аналогичный детектор, за полезные обсуждения
28. Lebrun P *International Cryogenic Engineering Conference-15*
29. Мы благодарны А. Семенову из Института физических проблем им. П.Л. Капицы (Москва), указавшему на эту возможность

Перевод О.А. Андреевой

PACS numbers: 07.55. + x

Последние успехи в магнетизме сильных полей

М. Дате

Рассказывается о последних успехах в области магнетизма сильных полей, достигнутых преимущественно в Центре исследования перспективных материалов Университета г. Осака. Основной предмет деятельности Центра — физика конденсированного состояния, включая