

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

**Объединенная научная сессия
Отделения физических наук Российской академии наук
и Объединенного физического общества Российской Федерации**

(1 декабря 2004 г.)

1 декабря 2004 г. в конференц-зале Физического института им. П.Н. Лебедева РАН состоялась Объединенная научная сессия Отделения физических наук Российской академии наук и Объединенного физического общества Российской Федерации. На сессии были заслушаны доклады:

1. **Кузьмин Л.С.** (Чалмерский технологический университет, Гетеборг, Швеция). *Сверхчувствительные болометры на холодных электронах для исследования темной материи и темной энергии.*

2. **Ткаля Е.В.** (Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва). *Индукцированный распад ядерного изомера $^{178m2}\text{Hf}$ и "изомерная бомба".*

Краткое содержание докладов публикуется ниже.

PACS numbers: 07.57.-e, 07.57.Kp, 95.55.Rg

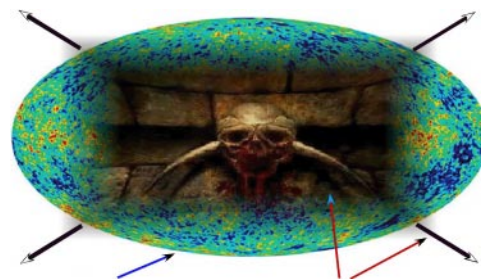
Сверхчувствительные болометры на холодных электронах для исследования темной материи и темной энергии

Л.С. Кузьмин

1. Введение

Крупнейшим достижением 2003 года журналом *Science* было признано доказательство существования *темной материи и темной энергии* [1]. Картина ранней Вселенной (рис. 1), сделанная на субмиллиметровых волнах аэро-статным телескопом БУМЕРАНГ и на миллиметровых волнах космическим телескопом Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP), подтвердила, что 96 % Вселенной состоит из мистической темной энергии (73 %) и темной материи (23 %). Наиболее шокирующим заключением было признано ускорение расширения Вселенной под действием темной энергии!

Важнейшей задачей фундаментальной науки в XXI веке является выяснение мистической природы сил, вызывающих ускорение расширения Вселенной и прогнозирование ее судьбы. Для понимания природы этих явлений космологии будущего требуется более детальная картина реликтового фонового излучения на субмил-



4% – обычная материя 96% – темная энергия + темная материя

Рис. 1. Доказательство существования темной материи, темной энергии и ускорения Вселенной как крупнейшее достижение года в соответствии с классификацией журнала *Science*. На рисунке представлена временная интерпретация темной энергии, которая будет заменена на реальное объяснение неизвестных сил при малейшем прогрессе в этой области.

лиметровых волнах. Требуется новое поколение телескопов и новое поколение датчиков, чтобы решать эти задачи [2–4].

Недавно российскими учеными в содружестве с учеными Чалмерского технологического университета (Швеция) был предложен и успешно реализован *болометр на холодных электронах (БХЭ)*, который представляется самым вероятным кандидатом для нового поколения предельных детекторов [5–9]. Создание такого болометра стало *поворотным моментом в развитии сверхчувствительных детекторов* благодаря двум основным причинам:

1. Вследствие *эффекта электронного охлаждения* абсорбера работа осуществляется при электронной температуре ниже фоновой. Это приводит к исключительно высокой чувствительности БХЭ. Принципиально новый подход в развитии сверхчувствительных детекторов состоит в *замене искусственного перегрева болометров* (типичного для болометра на сверхпроводящем переходе (БСП), transition edge sensor (TES)) на *эффективное электронное охлаждение* с соответствующим заметным улучшением чувствительности БХЭ.

2. Благодаря применению *прямого электронного охлаждения абсорбера*, вся приходящая мощность сигнала выносится из абсорбера в систему считывания. Это позволяет реализовать *предельный болометр, ограничен-*

ный фоном, и, что особенно важно, ведет к сохранению высокой чувствительности БХЭ при больших фоновых нагрузках. БХЭ позволяет избежать проблемы насыщения, типичной для болометра на сверхпроводящем переходе (БСП).

Проблемы темной материи и темной энергии признаны важнейшими Европейским космическим агентством (ЕКА) и НАСА, поскольку они составляют 96 % Вселенной. ЕКА была организована серия совещаний в Кардиффе, Дельфте, Мадриде [2] и Париже [3], на которых разрабатывались концепции космических телескопов будущего для исследования темной Вселенной. Результатом этих совещаний стала выработка новой Европейской космической программы Cosmic Vision 2015–2025 [3].

На этих совещаниях на вопрос о европейской стратегии: объединяться с США или создавать полностью европейские проекты, был выработан ответ: объединяться, поскольку даже у Евросоюза недостаточно технологических и финансовых ресурсов. При этом было подчеркнуто, что объединяться на условии, что каждый участник вносит свой технологический вклад.

Такой же вопрос можно поставить и о сотрудничестве России и Евросоюза. По аналогии можно предложить ответ: безусловно объединяться с собственным весомым технологическим вкладом в областях, где мы еще сохраняем сильные позиции.

В предлагаемой здесь программе рассмотрен реалистический путь для развития полноправного международного сотрудничества. За основу предлагается взять концепцию болометра на холодных электронах, которая позволяет объединить усилия пока еще сильных криогенных и радиоастрономических школ России и внести решающий вклад в развитие новых систем сверхчувствительных детекторов. Это будет хорошим вкладом для участия в международных проектах.

2. Новое поколение болометров на холодных электронах

Для понимания природы темной материи и темной энергии космологии будущего нужна более детальная картина реликтового фонового излучения на субмиллиметровых волнах. Требуется новое поколение телескопов и новое поколение датчиков, чтобы решать эти задачи. Предлагаемые космические миссии NASA: SPIRIT, SPECS, SAFIR будут определять высочайший уровень требований к болометрам в ближайшем будущем.

Целью развития детекторов является достижение мощности, эквивалентной шуму (МЭШ) на уровне 10^{-20} Вт Гц $^{-1/2}$, в диапазоне 40–500 мкм для решетки болометров размером 100×100 элементов [2–4] с низкодиссипативной электроникой считывания. Ни одна существующая технология не может удовлетворить этим требованиям. Чтобы удовлетворить этим требованиям, необходимо совершить технологический прорыв. Анализ показывает, что предложенная концепция предельного болометра на холодных электронах с сильной электротермической обратной связью (рис. 2) имеет реальные шансы стать лидирующей концепцией в этом развитии [5–9].

3. Сравнение БХЭ и БСП

Заметным шагом в развитии сверхпроводящих детекторов было внедрение БСП с сильной электротермической

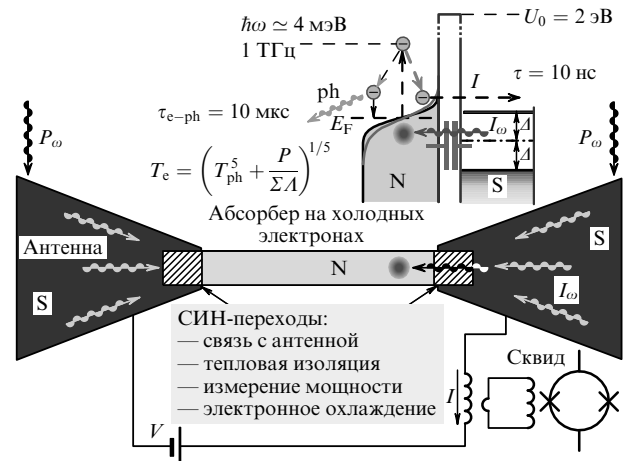


Рис. 2. БХЭ, емкостно связанный с антенной через туннельные переходы сверхпроводник–изолятор–нормальный металл (СИН), используемые для прямого электронного охлаждения и измерения мощности. Мощность сигнала прикладывается к сенсору через емкость туннельных переходов, диссипируется в абсорбере, нагревая холодные электроны, и выносится обратно из абсорбера горячими электронами через те же туннельные СИН-переходы. Электронное охлаждение служит сильной отрицательной электротермической обратной связью, улучшающей все характеристики БХЭ (постоянную времени, отклик и МЭШ).

обратной связью [10]. Однако в БСП возникают проблемы с избыточным шумом, насыщением и с искусственным нагревом мощностью смещения для обратной связи. Искусственный нагрев сводит к нулю все усилия по глубокому охлаждению и не дает реальных перспектив для реализации предельных параметров болометра. Кроме того, этот нагрев устанавливает предельную мощность насыщения и резко ограничивает динамический диапазон.

В противоположность искусственному перегреву в работах [5, 6] была предложена принципиально новая концепция болометра на холодных электронах с прямым электронным охлаждением абсорбера. БХЭ — единственная активная концепция, которая позволяет удалять мощность фона из абсорбера. В БХЭ отсутствует дополнительный тепловой перегрев (главная проблема БСП) и осуществляется прямое электронное охлаждение абсорбера. В этом и состоит принципиально новый подход в создании современных сверхчувствительных детекторов. Прямое электронное охлаждение может оказаться особенно важным при реализации системы в присутствии реальной тепловой фоновой нагрузки. Охлаждение помогает избежать полного насыщения детектора, когда мощность сигнала достигает мощности смещения по постоянному току, что является сложной проблемой для БСП. Широкий динамический диапазон БХЭ может быть реализован в случае применения системы считывания на основе сверхпроводящих квантовых интерферометров (сквидов). При этом вся мощность сигнала попадает в систему считывания, имеющую большой динамический диапазон. На возможное возражение, что туннелирование электронов увеличит дробовой шум, можно ответить простым аргументом: если мощность не удалять туннельным переходом, то точно такой же дробовой шум будет создаваться фонами посредством увеличения электрон-фононного взаимодействия.

Работу БХЭ можно проанализировать, используя уравнение теплового баланса [11, 12]

$$P_{\text{cool}}(V, T_e, T_{\text{ph}}) + \Sigma \Lambda (T_e^5 - T_{\text{ph}}^5) + C_A \frac{dT}{dt} = P_0 + \delta P(t). \quad (1)$$

Здесь $\Sigma \Lambda (T_e^5 - T_{\text{ph}}^5)$ — тепловой поток от электронов к фононам в нормальном металле, Σ — постоянная материала, Λ — объем абсорбера, T_e и T_{ph} — соответственно электронная и фононная температуры абсорбера, $P_{\text{cool}}(V, T_e, T_{\text{ph}})$ — мощность охлаждения СИН-переходами, $C_A = \gamma T_e$ — удельная теплоемкость нормального металла, $P(t)$ — входная мощность СВЧ-сигнала.

Уравнение (1) можно разделить на не зависящую от времени часть

$$\Sigma \Lambda (T_{e0}^5 - T_{\text{ph}}^5) + P_{\text{cool}0}(V, T_{e0}, T_{\text{ph}}) = P_0$$

и зависящую от времени часть

$$\left(\frac{\partial P_{\text{cool}}}{\partial T} + 5 \Sigma \Lambda T_e^4 + i \omega C_A \right) \delta T = \delta P. \quad (2)$$

Первый член $G_{\text{cool}} = \partial P_{\text{cool}} / \partial T$ представляет собой тепловую проводимость охлаждения СИН-переходами, которая дает отрицательную электротермическую обратную связь (ЭТОС); когда она велика, то температурный отклик δT уменьшается, поскольку охлаждающая мощность P_{cool} компенсирует изменение мощности сигнала на болометре. Второй член $G_{e-ph} = 5 \Sigma \Lambda T_e^4$ представляет собой электрон-фононную тепловую проводимость абсорбера. Из уравнения (2) мы можем найти эффективную комплексную тепловую проводимость, которая определяет температурный отклик БХЭ на входную мощность,

$$G_{\text{eff}} = G_{\text{cool}} + G_{e-ph} + i \omega C_A. \quad (3)$$

По аналогии с БСП [10] эффективная тепловая проводимость БХЭ увеличивается за счет эффекта электронного охлаждения (отрицательной ЭТОС). Токковый отклик можно записать как

$$S_i = \frac{\partial I}{\partial P} = \frac{\partial I / \partial T}{G_{\text{cool}} + G_{e-ph} + i \omega C_A} = \frac{\partial I / \partial T}{G_{\text{cool}} (L + 1) [1 + i \omega \tau]}, \quad (4)$$

где $L = G_{\text{cool}} / G_{e-ph} \gg 1$ — коэффициент ЭТОС,

$$\tau = \frac{C_A}{G_{e-ph} + G_{\text{cool}}} = \frac{\tau_0}{L + 1} \quad (5)$$

— эффективная постоянная времени, $\tau_0 = C_A / G_{e-ph}$ (около 10 мкс при $T = 100$ мК).

Принципы действия БХЭ и БСП в режиме задания напряжения смещения сравниваются на рис. 3, 4 (подробное описание можно найти в работе [13]). БСП (см. рис. 3) нагревают напряжением смещения до критической температуры сверхпроводника T_c мощностью P_{bias} . Эта температура поддерживается во всем динамическом диапазоне работы болометра (до насыщения) за счет

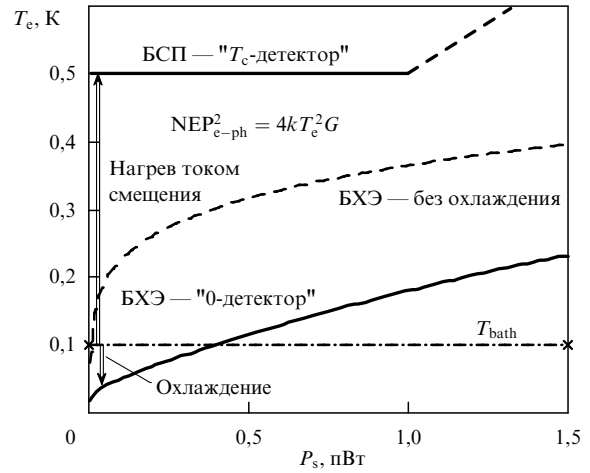


Рис. 3. Электронная температура как функция мощности сигнала P_s для $T_{\text{bath}} = 100$ мК в случае БХЭ и БСП. Для БХЭ T_e всегда охлаждается до минимально возможного уровня. Для $P_s < 0,4$ пВт величина T_e для БХЭ меньше T_{bath} (действительно, болометр на холодных электронах). Для БСП T_e равна T_c во всем диапазоне мощностей вплоть до мощности насыщения. После насыщения происходит неконтролируемый рост температуры и полное прекращение работы болометра.

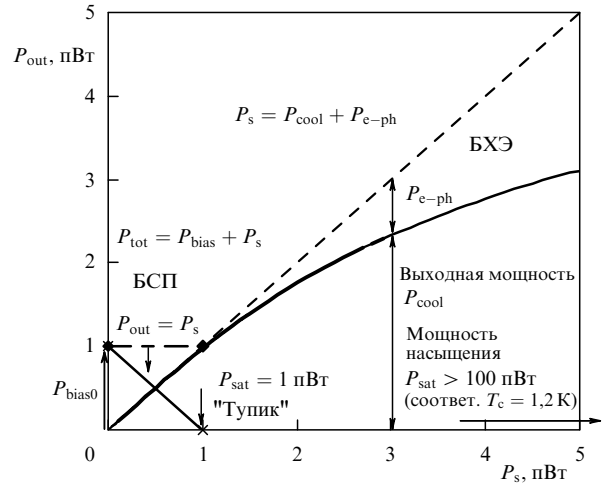


Рис. 4. Выходная мощность БХЭ (P_{cool}) и БСП ($-\delta P_{\text{bias}}$) в зависимости от мощности сигнала. Эти мощности практически совпадают для БХЭ при малой мощности сигнала. При более высокой мощности сигнала P_s она распределяется между P_{cool} и P_{e-ph} . Полное насыщение произойдет только тогда, когда температура возрастет до критической температуры алюминиевых электродов (P_{sat} в районе 100 пВт). Выходная мощность БСП равна уменьшению мощности смещения, пропорциональной входному сигналу. Мощность насыщения соответствует начальной мощности смещения с полной невосприимчивостью к сигналу после этого уровня.

электротермической обратной связи. Принцип действия БХЭ имеет схожие признаки, но при одном принципиальном отличии: рабочая точка смещается к нулевой температуре! Начиная с базовой фононной температуры $T_{\text{ph}} = 100$ мК, охлаждающая проводимость G_{cool} уменьшает электронную температуру до минимально возможной. Зависимость выходной мощности P_{out} от мощности сигнала P_s приведена на рис. 4. Для обеих концепций мощность P_{out} примерно равна входной мощности в диапазоне мощности нагрева для БСП и типичной

мощности охлаждения для БХЭ. Точность вынесения мощности в БХЭ или компенсации в БСП определяется силой электротермической обратной связи, так называемого усиления петли обратной связи L . Для БСП величина L определяется нелинейностью зависимости $R(T)$ и может достигать 1000. Для БХЭ L определяется как отношение тепловых проводимостей (см. (4)). Проблема насыщения очень существенна для БСП (TES): мощность насыщения P_{sat} в точности равна приложенной мощности нагрева постоянным смещением P_{bias} (см. рис. 4).

При достижении мощности насыщения БСП полностью перестает реагировать на входной сигнал. Поскольку невозможно заранее предсказать предполагаемый уровень максимальной тепловой нагрузки, то и выбор P_{sat} становится действительно сложной проблемой.

Совершенно иная ситуация наблюдается для насыщения БХЭ: выходная охлаждающая мощность будет просто отклоняться от линейной зависимости $P_{\text{cool}}(P_s)$. Для типичной мощности охлаждения в районе 1 пВт отклонение от линейной зависимости $P_{\text{out}}(P_s)$ составит всего лишь несколько процентов от этого уровня (см. рис. 4). По мере дальнейшего роста мощности сигнала отклонение будет увеличиваться, но БХЭ будет продолжать работать. Остается только вопрос калибровки этой зависимости. Окончательное насыщение БХЭ происходит при уровне входной мощности около 100 пВт, когда температура достигает величины критической температуры для алюминиевого электрода.

4. Предельные шумовые характеристики БХЭ.

Общая предельная шумовая формула

Шумовые свойства болометра характеризуются мощностью, эквивалентной шуму (МЭШ, или NEP), которая является суммой трех различных вкладов, как это было определено в [11, 12]:

$$\text{NEP}_{\text{tot}}^2 = \text{NEP}_{\text{e-ph}}^2 + \text{NEP}_{\text{SIN}}^2 + \frac{\delta I^2}{S_I^2}, \quad (6)$$

$$\text{NEP}_{\text{e-ph}}^2 = 10k_B \Sigma \Lambda (T_c^6 + T_{\text{ph}}^6).$$

Здесь $\text{NEP}_{\text{SIN}}^2$ — это шумы СИН-туннельных переходов, член $\delta I^2/S_I^2$ возникает за счет конечных шумов сквид-усилителя δI . Шумы СИН-переходов имеют три компоненты: дробовой шум $2eI/S_I^2$, флуктуации теплового потока через туннельный переход и корреляционную компоненту между этими двумя процессами [11, 12]:

$$\text{NEP}_{\text{SIN}}^2 = \frac{\delta I_{\omega}^2}{S_I^2} - 2 \frac{\langle \delta P_{\omega} \delta I_{\omega} \rangle}{S_I} + \delta P_{\omega}^2. \quad (7)$$

За счет корреляционной компоненты дробовой шум, в принципе, может быть снижен на 30–70%. Похожим образом корреляция снижает тепловой шум в БСП.

Вопрос о предельных шумовых характеристиках возникает в связи с высочайшими требованиями к МЭШ для будущих проектов НАСА и ЕКА [2–4] и формулируется так: насколько реалистично требование $\text{NEP} = 10^{-20}$ Вт Гц $^{-1/2}$? Мы проанализировали предельные возможности БХЭ [13]. Фотонный шум не включен в этот анализ, поскольку он может рассматриваться как внешний шум сигнала, одинаковый для всех типов приемников. Величина МЭШ определяется дробовым

шумом мощности фоновой нагрузки. При этом дробовой шум рассматривается в обобщенном виде, включая электрон-фононный дробовой шум за счет эмиссии фононов. Мы пренебрегаем другими источниками шума по причине их малости. Для уровня мощности $P_0 = 10$ фВт этот предел достигается при низких температурах (~ 100 мК) и малом объеме абсорбера ($\Lambda \leq 0,003$ мкм 3), когда можно пренебречь электрон-фононной шумовой компонентой.

Можно вывести общую предельную формулу МЭШ в пределе ограничения дробовым шумом [13]:

$$\text{NEP}_{\text{shot}} = (2P_0 E_{\text{quant}})^{1/2}, \quad (8)$$

где E_{quant} — энергия квантования мощности, P_0 — приложенная мощность: $E_{\text{quant}} = k_B T_c$ для абсорбера из нормального металла, $E_{\text{quant}} = \Lambda$ для сверхпроводящего абсорбера.

Оценки предельной МЭШ для основных типов сверхпроводящих болометров (включая болометр на кинетической индуктивности БКИ) сделаем для случая относительно низкой фоновой нагрузки $P_0 = 10$ фВт и представим в виде таблицы:

Таблица

Тип болометра	Энергия квантования, мкэВ	Характерный параметр абсорбера, мК	NEP_{shot} , 10^{-19} Вт Гц $^{-1/2}$
БХЭ	$k_B T_c = 9$	$T_c = 50$	1
БСП	$\Lambda = 73$	$T_c = 500$	4
БКИ [11, 12]	$\Lambda = 200$	$T_c = 1200$ (Al)	7

Самая низкая МЭШ достигается в БХЭ при наименьшем уровне квантования. Однако даже эти предельные параметры P_0 и E_{quant} показывают, что достижение значений $\text{NEP} = 10^{-20}$ Вт Гц $^{-1/2}$, требуемых НАСА для своих будущих полетов [2–4], оказывается нереалистичным.

Различают системы двух типов.

1. Системы с линейной по температуре теплопроводностью:

— паукообразный БСП с тепловой проводимостью по проводникам;

— БХЭ с охлаждением СИН-переходами (слабая зависимость от температуры: $G \sim T^{1/2}$).

Предельный дробовой шум в этом случае описывается общей формулой (8) с численным коэффициентом 2.

2. Системы с преобладанием электрон-фононной проводимости (сильная нелинейность по температуре: $G_{\text{e-ph}} \sim T^4$):

— все болометры на толстой подложке с электрон-фононной проводимостью;

— интегрированный с антенной БСП с андреевскими зеркалами — приемник на основе разогрева электронов в нормальном металле с андреевскими зеркалами.

За счет сильной нелинейности электрон-фононного взаимодействия предельный дробовой шум описывается модифицированной формулой с увеличенным до 10 коэффициентом:

$$\text{NEP}_{\text{shot-e-ph}} = (10P_0 E_{\text{quant}})^{1/2}. \quad (9)$$

Это означает, что если оставить систему релаксировать посредством электрон-фононного взаимодействия, то

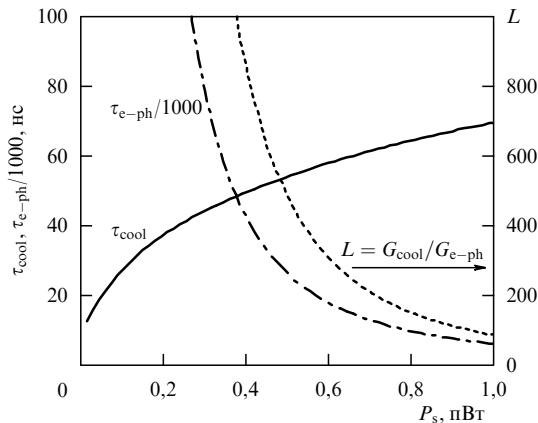


Рис. 5. Постоянная времени БХЭ τ_{cool} в зависимости от мощности сигнала P_s . Электрон-фононная постоянная времени τ_{e-ph} показана для сравнения (уменьшена в 1000 раз). Постоянная времени τ_{cool} значительно короче, чем τ_{e-ph} , и разница возрастает с уменьшением мощности сигнала и усилением электронного охлаждения. Усиление петли обратной связи L отрицательной электротермической обратной связи показано пунктиром. Усиление петли возрастает для малых P_s за счет уменьшения G_{e-ph} .

дробовой шум возрастает за счет сильной нелинейности электрон-фононной тепловой проводимости, в отличие от линейных систем со слабой зависимостью от температуры (либо ее полным отсутствием). Формулы (8), (9) можно эффективно использовать для оценки предельных параметров БХЭ и других болометров для заданных параметров детектирующей системы.

5. Постоянная времени

Зависимость постоянной времени БХЭ от приходящей мощности (5) показана на рис. 5. Как и для БСП, она сильно сокращается за счет усиления петли обратной электротермической связи L (5). Тепловая проводимость канала охлаждения G_{cool} слабо зависит от приходящей мощности и немного возрастает для малых мощностей (τ_{cool} уменьшается). В отличие от этого электрон-фононная проводимость G_{e-ph} сильно зависит от мощности, поскольку пропорциональна T_e^4 , и сильно уменьшается для малых мощностей (соответствующая τ_{e-ph} увеличивается). В результате L заметно возрастает для малых мощностей и превышает уровень 1000.

Интересно отметить, что постоянная времени БХЭ в режиме задания тока будет увеличиваться по сравнению с внутренней электрон-фононной постоянной времени [11]. Причина заключается в уменьшении полной тепловой проводимости болометра за счет отрицательного отклика перехода по напряжению (положительной электротермической обратной связи).

6. Квантовая эффективность

Предельные формулы дробового шума (8), (9) дают ограничения для МЭШ в зависимости от двух параметров: мощности фона P_0 и энергии квантования E_{quant} . Зависимость от P_0 достаточно очевидна: чем большая мощность приложена, тем больше будет шум в чувствительном элементе при любом варианте приемника. Обычно мы не можем сильно изменить этот параметр и реализация определяется внешними условиями. Второй параметр E_{quant} оказывается более важным для реализации минимальной МЭШ. Этот уровень энергии характе-

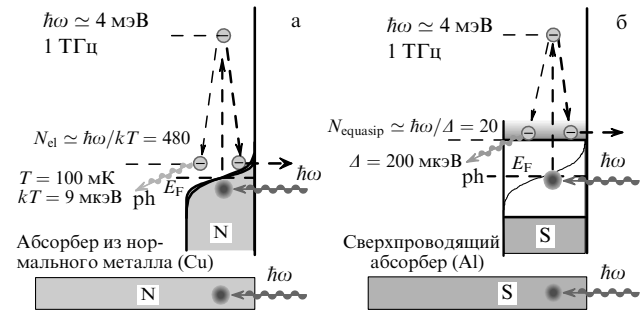


Рис. 6. Квантовая эффективность металлического (а) и сверхпроводящего (б) абсорбера. Электрон возбуждается после поглощения фотона до одной и той же энергии (4 мэВ для частоты сигнала 1 ТГц) в обоих абсорберах. Затем электрон релаксирует за счет электрон-электронных взаимодействий и энергия распределяется между горячими электронами на уровне квантования $E_{\text{quant}} = kT$ для нормального металла (а) и между квазичастицами на уровне квантования $E_{\text{quant}} = \Delta$ для сверхпроводника (б). Квантовая эффективность составляет 480 для нормального металла и 20 для сверхпроводника.

ризует квантовую эффективность болометра (рис. 6). Возбуждение электрона под действием кванта типичной частоты 1 ТГц до уровня энергии 4 мэВ после поглощения кванта является одним и тем же для всех концепций. Затем происходит релаксация энергии за счет электрон-электронного взаимодействия, снижающая энергию до различных уровней.

Для БХЭ энергия будет распределяться между электронами на уровне $kT = 9$ мэВ (рис. 6а). Это дает квантовую эффективность после поглощения одного кванта $N = 480$ электронов на квант при температуре 100 мК. Для БСП и БКИ релаксация энергии останавливается на уровне энергетической щели (рис. 6б), что дает следующую квантовую эффективность: $N = 96$ для БСП (где $\Delta = 45$ мэВ) и $N = 20$ для БКИ (где $\Delta = 200$ мэВ). Поэтому введение сверхпроводящего абсорбера значительно уменьшает квантовую эффективность, что приводит к более высокому уровню дробового шума и требует более чувствительной схемы считывания.

7. Оптимизация работы БХЭ

Наш анализ влияния тепловой фоновой нагрузки на шумовые свойства в различных конфигурациях БХЭ показывает, что оптимальным будет болометр с заданием напряжения на СИН-переходы и считыванием тока с помощью сквида [12]. Для анализа предельных характеристик примем следующие типичные значения: объем абсорбера $0,01$ мкм³, что реалистично для современной технологии, токовый шум сквида 5 фА Гц^{-1/2} [12], сопротивление перехода 1 кОм. Результаты приведены на рис. 7 для уровня фона $P_0 = 0,01$ пВт. Эта величина фона достаточно низкая и принята для анализа предельных характеристик болометра. Полная $NEP = 1,2 \times 10^{-19}$ Вт Гц^{-1/2} в основном определяется дробовым шумом СИН-переходов за счет приходящей тепловой мощности. Электрон-фононная компонента и шумы усилителя ниже уровня шумов СИН-перехода, соответствующего пределу ограничения фоном. Отклик $S = dI/dP$ достигает максимальной величины 150 нА пВт⁻¹ и определяется, в основном, электронной температурой абсорбера (энергией квантования) и окон-

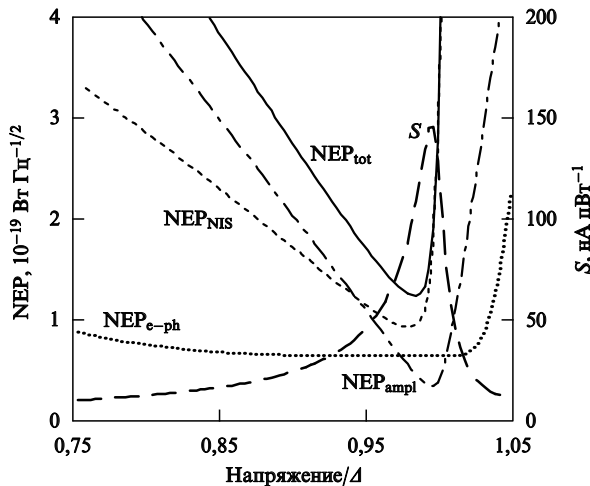


Рис. 7. МЭШ оптимального болометра в присутствии фоновой мощности 0,01 пВт для $A = 0,01$ мкм³, $R = 1$ кОм, $S_{\text{SQUID}} = 5$ фА Гц^{-1/2} и физической температуры 100 мК.

чательно квантовой эффективностью БХЭ. Для сравнения похожие значения $S = 200$ нА пВт⁻¹ можно получить и для БСП в случае сравнительно низкого напряжения смещения $V_{\text{bias}} = 5$ мкВ.

Мы проанализировали также концепцию оптимального БХЭ для температуры 300 мК в присутствии фоновой мощности ($P_0 = 0,1$ пВт) и тех же параметрах сквида [12]. Оптимальный режим можно реализовать, когда тепловая "охлаждающая проводимость" через туннельные переходы превышает фундаментальную электрон-фононную проводимость. В этих условиях уровень МЭШ, равный 10^{-18} Вт Гц^{-1/2}, при 300 мК может быть достигнут в присутствии мощности $P_0 = 0,1$ пВт для типичных значений сопротивления перехода $R = 1$ кОм, $S_{\text{SQUID}} = 10$ фА Гц^{-1/2} и объема абсорбера $A = 0,005$ мкм³. Такой объем абсорбера приближается к технологическому пределу.

Экспериментальный тест сделан для БХЭ в режиме задания тока [8]. Минимальные значения МЭШ достигают уровня меньше 10^{-18} Вт Гц^{-1/2} на частотах считывания больше 100 Гц (рис. 8). Высокочастотный отклик болометра продемонстрирован до частоты 1,8 ТГц в системе с высокотемпературным джозефсоновским переходом [14].

8. Планируемые международные проекты

1. НАСА разрабатывает амбициозный проект космического ИК интерференционного телескопа SPIRIT и субмиллиметрового зонда для оценки структуры космоса SPECS. У этих проектов высочайший уровень требований к болометрическим приемникам. Для детекторов поставлена задача приблизиться к уровню мощности, эквивалентной шуму МЭШ $< 10^{-20}$ Вт Гц^{-1/2} в диапазоне длин волн 40–500 мкм в решетке из 100×100 детекторов, снабженной малодиссипативной электроникой считывания. В настоящее время ни одна из традиционных существующих технологий не может удовлетворить таким требованиям. Болометр на холодных электронах предоставляет шанс достичь столь высоких характеристик.

2. Европейское космическое агентство организовало консорциум "Разработка сверхпроводниковых сверхчув-

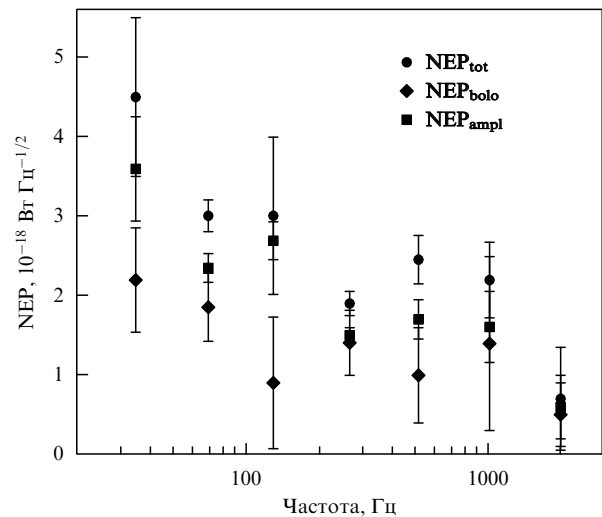


Рис. 8. МЭШ (NEP) оптимального болометра в присутствии фоновой мощности 0,01 пВт для $A = 0,03$ мкм³, $R = 14$ кОм и физической температуры 100 мК [8].

ствительных датчиков" (координатор Ravinder Bhatia, Ravinder.Bhatia@esa.int). Группа российских ученых, сотрудничающих с Чалмерским университетом, была приглашена в этот консорциум для развития концепции предельного болометра на холодных электронах. Вначале, в 2003 г., на равных конкурировали концепции болометра на сверхпроводящем переходе (БСП, или TES), датчика на кинетической индуктивности (KID) и болометра на холодных электронах (БХЭ). В 2004 г. TES был исключен из приоритетов ЕКА, и сейчас концепция БХЭ признана как одна из двух лидирующих концепций для будущих аэростатных и космических проектов. Мы считаем это признанием большого успеха международного сотрудничества с участием сильнейших групп из России. В случае поддержки этой концепции и в России шансы стать ведущим кандидатом для европейской программ у БХЭ резко возрастают. Финансовая поддержка РАН поможет перенести разработанную российскими учеными технологию в отечественные институты.

3. В настоящее время разработчикам БХЭ предложено принять участие в аэростатных экспериментах ОЛИМПО, осуществляемых командой проекта БУМЕ-РАНГ (координаторы — Кардиффский университет, Philip.Mauskopf@astro.cf.ac.uk и Римский университет, участники — Кембриджский университет, Институт космических исследований Нидерландов, фирма VTT (Финляндия), несколько американских и итальянских университетов). В случае успеха этого проекта открываются новые перспективы внедрения разработанных болометров в другие проекты.

4. Разработчики БХЭ также приглашены участвовать в европейском аэростатном проекте ПИЛОТ (<http://www.cesr.fr/%7Ebernard/ELISA/>) для создания многоканальной системы с БХЭ-решеткой (координатор — CESR, Тулуза, Martin.Giard@cesr.fr). Система считывания на транзисторах с высокой подвижностью электронов и с мультиплексором с частотным разделением каналов будет создаваться в IPHT (Йена, Германия) с участием российских ученых. Активное привлечение институтов РАН представляется весьма перспективным.

5. Разработчики БХЭ приглашены участвовать в Европейском космическом проекте "Far IR Proto-Galaxy Imager: Interferometer" в рамках Европейской программы Cosmic Vision 2015–2025 [3]. В интересах развития российской науки важно не упустить такой шанс. Активное участие Российской академии наук может значительно укрепить наши позиции в этом Европейском проекте.

6. Международный проект СУБМИЛЛИМЕТРОН (<http://www.asc.rssi.ru/submillimetre/submill.htm>, <http://fy.chalmers.se/~kuzmin/Projects/Platform.html>), руководимый Астрокосмическим центром (АКЦ) ФИАН и корпорацией "Энергия", предполагает создание космической научной платформы с криогенным телескопом и набором сверхпроводниковых приемников.

7. Два совместных проекта Чалмерского университета и АКЦ ФИАН поданы в Шведское национальное космическое агентство "Submillimeter Space Telescope for Photometric Sky Survey" (<http://fy.chalmers.se/~f4agro/Submillimetre/SubmmSNSB.htm>) и "Imaging Arrays of Superconducting Detectors" (<http://fy.chalmers.se/~kuzmin/Projects/SUPERIMAGE.html>).

8. АКЦ ФИАН получил приглашение участвовать в суборбитальной программе НАСА и предложить аэростатный эксперимент. Такой аэростат будет пролетать через территорию России, и разрешение на полет может быть связано с установкой отечественной системы на борт. В качестве возможного варианта можно рассматривать систему, аналогичную радиотелескопу ОЛИМПО, создаваемому в рамках международной кооперации.

9. Наземный телескоп САО РТ-70 может быть оснащен чувствительным болометрическим приемником. Это одновременно могло бы стать хорошей демонстрацией работоспособности приемника в условиях реального телескопа.

9. Заключение

Подводя итоги изложенному, можно предложить следующие шаги по участию в программах исследования темной материи и темной энергии.

1. Утверждение этой программы на уровне Отделения физических наук РАН.

2. Активное участие в развитии *нового поколения болометров на холодных электронах* с JFET/SQUID системами считывания для *международного аэростатного проекта ОЛИМПО*.

3. Активное участие в создании приемной системы для *международного аэростатного проекта ПИЛОТ* (<http://www.cesr.fr/%7Ebernard/ELISA/>).

4. Участие в *Европейском консорциуме "Развитие сверхпроводниковых сверхчувствительных датчиков"* и участие в *Европейской программе Cosmic Vision 2015–2025* (<http://sci.esa.int/science-e/www/object/index.cfm?fobjectid=35858>).

Участие в *Европейском космическом проекте "Far IR Proto-Galaxy Imager: Interferometer"*.

5. Участие в *аэростатных проектах НАСА* с использованием разработок по пп. 3, 4.

6. Создание субмиллиметровой криогенной приемной системы с БХЭ для наземного телескопа РТ-70.

7. Разработка криогенного космического телескопа по проекту СУБМИЛЛИМЕТРОН на основе широкого международного сотрудничества и приемников, разра-

ботанных для аэростатных проектов (<http://www.asc.rssi.ru/submillimetre/submill.htm>).

Список литературы

1. Seife C "Breakthrough of the year 2003: Illuminating the Dark Universe" *Science* **302** 2038 (2003)
2. *European Space Agency (ESA) Workshop "New Perspectives for Post-Herschel Far Infrared Astronomy from Space"*, Madrid, Spain, September 1–4, 2003; <http://damir.iem.csic.es/workshop/program.html>
3. "European Space Programme Cosmic Vision 2015–2025"¹; <http://sci.esa.int/science-e/www/object/index.cfm?fobjectid=35858>
4. Leisawitz D T et al. *Proc. SPIE* **4013** 36 (2000)
5. Kuzmin L S *Physica B* **284–288** 2129 (2000)
6. Kuzmin L S, Devyatov I A, Golubev D *Proc. SPIE* **3465** 193 (1998)
7. Kuzmin L et al. *Supercond. Sci. Technol.* **17** S400 (2004)
8. Agulo I, Kuzmin L, Tarasov M "Attowatt sensitivity of the cold-electron bolometer" *Appl. Phys. Lett.* (2005) (submitted)
9. Tarasov M и др. *Письма в ЖЭТФ* **76** 588 (2002)
10. Lee A T et al. *Appl. Phys. Lett.* **69** 1801 (1996)
11. Golubev D, Kuzmin L *J. Appl. Phys.* **89** 6464 (2001)
12. Kuzmin L, Golubev D *Physica C* **372–376** 378 (2002)
13. Kuzmin L *Proc. SPIE* **5498** 349 (2004)
14. Tarasov M и др. *Письма в ЖЭТФ* **79** 356 (2004)

PACS numbers: 21.10.Re, 23.20.Lv, 23.20.Nx, 25.20.Dc, **27.70.+q**

Индукцированный распад ядерного изомера $^{178m2}\text{Hf}$ и "изомерная бомба"

Е.В. Ткаля

1. Введение

В последнее время средства массовой информации неоднократно сообщали о планах некоторых стран начать разработку так называемой "изомерной" бомбы на основе ^{178}Hf [1]. Речь идет ни много ни мало как о создании нового вида ядерного оружия, не подпадающего под действие существующих договоров о нераспространении. Основанием для подобных публикаций стали сенсационные результаты по индуцированному распаду долгоживущего изомера $^{178m2}\text{Hf}(16^+, 2446 \text{ кэВ}, 31 \text{ год})$ [2–10], полученные в 1999–2004 гг. группой исследователей под руководством Карла Коллинса (Carl V. Collins), директора Центра квантовой электроники при Техасском университете в Далласе (Center for Quantum Electronics, University of Texas at Dallas). Несмотря на уже пятилетнюю историю вопроса, на русском языке нет ни одной научной публикации, посвященной этой проблеме. Настоящая работа призвана восполнить данный пробел.

Вещество с запасенной энергией вместе с физическим процессом, обеспечивающим ее быстрое высвобождение, — две составляющие любого взрывного устройства. В случае "гафниевого" бомбы энергия заключена в метастабильном состоянии в количестве 2,446 МэВ на ядро, или 1,3 ГДж на 1 г вещества. По мнению экспертов Пентагона [11], "such extraordinary energy density has the potential to revolutionize all aspects of warfare". Вопрос лишь в том, как обеспечить управляемый распад $^{178m2}\text{Hf}$.

Простой способ ускорить распад изомера был найден в экспериментах [2, 3]. Мишень, содержащая ядра

¹ Accepted at European Science Community Meeting, Paris, 15 October 2004.