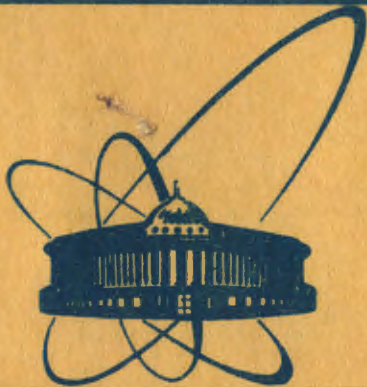


82-549



сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

5168/82

25/10-82

P8-82-549

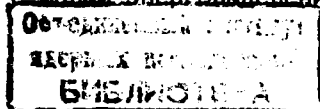
Г.В.Мицельмахер, Б.С.Неганов, В.Н.Трофимов

НОВЫЙ ПОДХОД
К РЕГИСТРАЦИИ $2\beta(0\nu)$ -РАСПАДА

1982

Как известно, возможно существование 2-х типов двойного β -распада: с вылетом двух антинейтрино и безнейтринного. Возросший в последнее время интерес к экспериментальному обнаружению второго из этих процессов связан с возможностью получения информации о сохранении лептонного числа и фундаментальных свойствах нейтрино. С экспериментальной точки зрения $2\beta(0\nu)$ -распад удобен тем, что сумма энергий двух вылетающих электронов постоянна, что может быть мощным критерием выделения процесса из фона. Если это является также и единственным критерием, то основное требование к детектору - высокое энергетическое разрешение, которое должно быть тем лучше, чем больше энергия распада. Это связано с тем, что вероятность $2\beta(2\nu)$ -распада, который будет в этом случае фоновым, значительно сильнее зависит от энергии ($\sim E^{10}$), чем безнейтринного ($\sim E^8$). Лучшие результаты по обнаружению $2\beta(0\nu)$ -распада получены группой Фиорини^{1/}, использовавшей Ge(Li)-детектор с активным объемом 68 см^3 . Детектор одновременно служил и источником распадов $^{76}\text{Ge} \rightarrow ^{76}\text{Se}$. Такое решение позволяет получить максимально возможные эффективность регистрации и энергетическое разрешение, но ограничивает диапазон исследуемых элементов лишь полупроводниками, из которых возможно изготовление детектора. Кроме Ge в их число входит CdTe, обе компоненты которого могут испытывать $2\beta(0\nu)$ -распад, однако характеристики получаемых кристаллов еще явно неудовлетворительны. В области энергии перехода $^{76}\text{Ge} \rightarrow ^{76}\text{Se}$ 2045 МэВ Фиорини было получено разрешение $0,3\%$, что позволило при времени экспозиции 4400 часов в подземной лаборатории /глубина $4200 \text{ м.в.э.}/$ установить нижнюю границу периода полураспада: $T_{1/2} = 5 \cdot 10^{21}$ лет /уровень достоверности 68% /. Во втором цикле работ^{2/} использовались пространственно разделенные детектор и источник $2\beta(0\nu)$ -распадов, что привело к расширению числа исследуемых элементов ценой снижения эффективности и разрешения. При этом использовался аналогичный приемяемому в первом цикле Ge(Li)-детектор с активным объемом 130 см^3 , который регистрировал γ -кванты переходов возбужденных ядер дочерней изобары, образующихся в результате $2\beta(0\nu)$ -распадов, в основное состояние.

Из сказанного очевидно, что идеальным решением для поиска $2\beta(0\nu)$ -распада было бы создание детектора, являющегося одновременно источником, обладающего высокими энергетическим разрешением и эффективностью, который может быть изготовлен из любого необходимого элемента. Мы полагаем, что, используя достижения физики низких и сверхнизких температур, можно приблизиться к такому решению. Покажем вначале, что принципиально возможна регистрация процессов с малым энерговыделением /прохождение



частицы, распад радиоактивного ядра и т.д./ в больших массах / ≈ 1 кг/ по изменению температуры. Эта возможность вытекает из трех фактов: 1/ любое взаимодействие излучения с веществом сопровождается тепловыми потерями; 2/ относительное и абсолютное изменение температуры быстро растет при понижении рабочей температуры T , особенно для монокристаллических диэлектриков, теплоемкость которых $C \sim T^3$; 3/ существуют методы измерения низких температур с разрешением $\Delta T/T$ до 10^{-9} . Для примера возьмем монокристалл диэлектрика массой 1 кг при температуре 0,01 К и теплоемкостью $10^{-11} \text{ Дж} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{К}^{-1} = 60 \text{ МэВ} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$. Это значение теплоемкости нуждается в обосновании. Экспериментальных данных по теплоемкости монокристаллических диэлектриков в этой области температур нет из-за чрезвычайной сложности /или невозможности/ ее определения в наземных условиях, когда теплоприток от космического и радиоактивного фона порядка $10^{-14} \text{ Вт} \cdot \text{г}^{-1} = 60 \text{ кэВ} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{г}^{-1}$. В области гелиевых температур теплоемкость, например монокристаллических Ge и Si, хорошо описывается кубической зависимостью от T и имеет величину $C/1\text{К}/ = 5 \cdot 10^{-7} \text{ Дж} \cdot \text{г}^{-1}$, тогда экстраполяция дает $C/0,01\text{К}/ = 5 \cdot 10^{-13} \text{ Дж} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{К}^{-1} = 3 \text{ МэВ} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$. В силу простоты кристаллической решетки и возможности выращивания сверхчистых монокристаллов Ge и Si высокого качества нет оснований сомневаться в правомерности такой экстраполяции, по крайней мере для этих полупроводников. Тогда при $\Delta T/T = 10^{-7}$ минимально регистрируемая энергия, перешедшая в тепло, $\epsilon_{\min} = 60 \text{ эВ}$. При энергии $2\beta(0\nu)$ -распада, например, 2 МэВ это будет соответствовать разрешению лучше 0,1%. Центральной проблемой теплового метода регистрации является термометрия. К термометру предъявляются жесткие требования: хорошее разрешение $\Delta T/T$, нулевой теплопровод к детектору, малая теплоемкость. Этим требованиям удовлетворяет сквидовый магнитометр, измеряющий электронную намагниченность, которая подчиняется закону Кюри $M \sim T^{-1}$. Анализ термометрии выходит за рамки данного сообщения, отметим лишь, что парамагнитный сквидовый термометр позволяет легко реализовать динамический диапазон 120 дБ при сохранении постоянной чувствительности, равной пороговой, причем в этом диапазоне детектор еще можно рассматривать как линейное устройство. Переходя далее к возможности тепловой регистрации $2\beta(0\nu)$ -распада, следует прежде всего заметить, что этот процесс редкий, поэтому проблема фона - решающая. Необходимым условием такой регистрации является достаточное быстродействие детектора, позволяющее разделить во времени фоновые тепловые импульсы. Наиболее медленными процессами тепловой регистрации являются установление равновесной температуры по объему детектора и установление теплового равновесия между кристаллической решеткой и электронной спиновой системой, характеризуемые временами τ_V и τ_{SL} соответственно. При диффузном распространении тепла из точечного источника τ_V по порядку величины равно $C\rho L^2/\lambda$, где C - теплоемкость, ρ - плотность, L - линейные размеры

детектора, λ - теплопроводность. Отсюда для монокристаллических диэлектрических детекторов с массой порядка 1 кг $10^{-8} \leq \tau_V \leq 10^{-1}$ с. Для получения оценки τ_{SL} необходима экстраполяция известных данных от области гелиевых температур с учетом того, что при этих температурах спин-решеточная релаксация в основном осуществляется прямыми /валлеровскими/ процессами, для которых $\tau_{SL} \sim T^{-1}$. Тогда $10^{-8} \leq \tau_{SL} \leq 10$ с. Таким образом, можно надеяться получить быстродействие детектора по переднему фронту теплового импульса $\tau_0 \approx 10^{-2}$ с. Для оценки достижимой частоты фоновых импульсов воспользуемся результатами Фиорини /1,2/. Прежде всего из них следует, что фон на глубине 4200 м.в.э. и при использовании хорошей пассивной защиты /в первом цикле: 5 см дважды дистиллированной ртути + 4 см бескислородной меди + 10 см низкорадиоактивного свинца + 10 см обычного свинца + 0,2 см кадмия + 20 см парафина/ определяется только радиоактивной загрязненностью самого детектора и ближайших к нему конструкционных деталей установки. Загрязненность Ge(Li) детектора ^{238}U и ^{232}Th , включая продукты их распада, была меньше $10^{-17} \text{ Ки} \cdot \text{г}^{-1}$, что соответствует концентрации менее 10^{11} см^{-3} и скорости счета фона менее $1 \text{ час}^{-1} \text{ кг}^{-1}$. Основной вклад в фон давал холодопровод из бескислородной меди высокой проводимости, на котором крепился детектор и загрязненность которого оказалась менее $10^{-16} \text{ Ки} \cdot \text{г}^{-1}$. Исходя из этой величины и считая массу ближайших к детектору деталей порядка 10 кг, а эффективность регистрации им распад в этих деталях 100%, получим скорость фонового счета меньше $0,4 \text{ с}^{-1}$. Таким образом, выполнимо не только необходимое, но и достаточное условие тепловой регистрации $\tau_0 \ll \tau_{\text{ф}}$, где $\tau_{\text{ф}}$ - период следования фоновых импульсов. Дальнейшее улучшение определяется как повышением быстродействия, так и снижением скорости фонового счета. Быстродействие реально может оказаться лучше приведенной оценки за счет недиффузного характера теплопроводности при обсуждаемых температурах и взаимодействия неравновесных тепловых фононов со спинами, прямого взаимодействия первичных и вторичных частиц со спин-системой, регистрации локальной температуры. Фон в принципе может определяться загрязненностью только детектора, поэтому достижение скорости счета $(1 \div 0,1) \text{ мин}^{-1}$ не представляется безнадежным.

Кроме рассмотренного источника фона, при тепловом детектировании имеются специфические источники: виброакустический, электромагнитный, а также релаксационные процессы с выделением энергии внутри самого детектора. Из них первые два являются тривиальными и их величина зависит от качества изоляции детектора в криостате от этих паразитных теплопритоков. В предварительных опытах, используя сравнительно простые приемы /фундамент на газовых амортизаторах, безшумные насосы, мягкую подвеску камеры калориметра с образцом в криостате, тщательную экранировку всех измерительных проводов, батарейное питание измерительных схем и т.д./, нам удалось в наземных условиях при боль-

шом уровне сейсмических и электромеханических помех снизить теплоприток от этих источников до уровня менее 10^{-16} Вт·г⁻¹ /при массе образца 10 кг/. Поэтому есть надежда в подземной лаборатории достичь требуемого уровня не более 10^{-23} Вт·г⁻¹ = $0,06$ эВ·с⁻¹·кг⁻¹. Более серьезную трудность представляют релаксационные процессы, связанные с неидеальностью кристаллической решетки детектора. Впервые подобный процесс был обнаружен нами в поликристаллической меди^{/8/} после охлаждения до 1 К, когда диссипируемая в нем мощность может быть приближенно записана в виде $W(t) = W_1 \exp(-t/r_1) + W_2 \exp(-t/r_2)$, где W_1 для разных образцов меняется от $5 \cdot 10^{-10}$ Вт·г⁻¹ до $5 \cdot 10^{-13}$ Вт·г⁻¹, $W_2 = 0,1W_1$, а r_1 и r_2 имеют величины порядка 100 и 1000 часов соответственно. Основной особенностью этой релаксации является ее атермический характер^{/4/}, так что "заморозить" ее нельзя. Очевидно, единственным способом преодолеть эту трудность является использование бездефектных монокристаллов, однако на практике любой монокристалл конечных размеров является дефектным из-за наличия поверхности. В настоящий момент пока нельзя определенно сказать, на каком уровне позволит это реализовать тепловой детектор отдельных событий. Окончательный ответ может быть получен только из эксперимента.

Подводя итог, следует сделать вывод, что два фундаментальных достижения криогеники: метод получения стационарных сверхнизких температур растворением ³He в ⁴He и измерительная техника на основе эффекта Джозефсона - позволяют говорить о тепловой регистрации процессов с малым энерговыделением (≥ 10 эВ·кг⁻¹), хотя технические трудности в применении к конкретным задачам исключительно велики. Однако не следует забывать, что история ядерно-физического эксперимента знает случаи, когда задачи, считавшиеся первоначально вообще безнадежными, были в конце концов решены. Самым блестящим примером такого рода, является, пожалуй, реализация Дэвисом предложения Б.Понтекорво по регистрации солнечных нейтрино хлор-аргоновым методом, когда необходимо было преодолеть разрыв в величине измеряемых сечений около 20 порядков. При успешном решении проблемы тепловой регистрации поиск $2\beta(0\nu)$ -распада был бы, на наш взгляд, наиболее естественным применением нового метода.

Авторы глубоко признательны профессору В.П.Джелепову за многолетнюю поддержку предварительных низкотемпературных исследований и В.Г.Зинову, Ю.К.Акимову, Ц.Вылову за полезные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Fiorini E. et al. Nuovo Cimento, 1973, 13A, 747.
2. Bellotti A. et al. Lett. Nuovo Cim., 1982, 33, 273.
3. Неганов Б.С., Трофимов В.Н. Письма в ЖЭТФ, 1978, 28, вып.6, 356.
4. Неганов Б.С. и др. Препринт ОИЯИ, Р8-81-68, 1981.

Рукопись поступила в издательский отдел
13 июля 1982 года.

Мицельмахер Г.В., Неганов Б.С., Трофимов В.Н.
Новый подход к регистрации $2\beta(0\nu)$ -распада

P8-82-549

Обсуждается возможность использования двух фундаментальных достижений криогеники: метода получения сверхнизкой стационарной температуры растворением ^3He в ^4He и измерительной техники на основе эффекта Джозефсона для регистрации процессов с малым энерговыделением ($\geq 10 \text{ эВ}\cdot\text{кг}^{-1}$) по изменению температуры детектора. Тепловое детектирование может иметь преимущество перед существующими методами ядерной физики при регистрации редких процессов с малой передачей импульса или при необходимости высокого энергетического разрешения. В качестве примера рассмотрена проблема поиска безнейтринного двойного β -распада по выделяющейся энергии, которая в этом случае постоянна. Оценка фоновых условий с использованием известных результатов группы E. Фиорини приводит к выводу о достижимости необходимого быстродействия теплового детектора. Отмечено, что основную трудность могут представлять релаксационные процессы с выделением энергии в самом детекторе.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1982

Micelmacher G.V., Neganov B.S., Trofimov V.N.
A New Method of $2\beta(0\nu)$ Decay Registration

p8-82-549

The possibility of using two fundamental cryogenic achievements, the receipt of ultralow stationary temperature by dilution of ^3He in ^4He and the measuring technique based on Josephson's effect for the registration of processes with very small energy release ($\geq 10 \text{ eV}\cdot\text{kg}^{-1}$), when the temperature change is detected, is discussed. Thermal detection can have an advantage as compared with conventional methods of nuclear physics for registration of rare processes with small impulse transfer or when the high energy resolution is needed. As an example, the problem of search of neutrinoless double β -decay, when the energy release is constant, is discussed. The well-known results of E. Fiorini and coworkers were used for estimating the background conditions, and the conclusion is drawn that the needed speed of thermal detector response can be achieved. It is noted that the energy relaxation processes in detector is the main difficulty when realizing the new method.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1982

Перевод О.С.Виноградовой.