

02;15

О возможности постановки эксперимента по поиску стерильного нейтрино

© А.П. Серебров, А.К. Фомин, В.Г. Зиновьев, В.Г. Ивочкин,
Ю.Е. Логинов, Г.А. Петров, В.А. Соловей, А.В. Чёрный,
О.М. Жеребцов, Р.М. Самойлов, В.П. Мартемьянов, В.Г. Циноев,
В.Г. Тарасенков, В.И. Алёшин, А.Л. Петелин, С.В. Павлов,
М.Н. Святкин, А.Л. Ижутов, С.А. Сазонтов, Д.К. Рязанов,
М.О. Громов, В.В. Афанасьев, В.И. Рыкалин

Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова (ПИЯФ),
Гатчина
НИЦ „Курчатовский институт“, Москва
Научно-исследовательский институт атомных реакторов, Димитровград
ГНЦ „Институт физики высоких энергий“, Протвино
E-mail: serebrov@rnpfi.spb.ru

Поступило в Редакцию 18 декабря 2013 г.

В настоящее время активно обсуждается возможность существования стерильного нейтрино, имеющего значительно меньшее сечение взаимодействия с веществом, чем, например, электронные антинейтрино от реактора. Предполагается, что благодаря переходу реакторных антинейтрино в стерильное состояние может наблюдаться эффект осцилляций на коротких расстояниях (5–15 м) от реактора и дефицит потока реакторных антинейтрино на больших расстояниях. Исследована возможность постановки эксперимента по поиску осцилляций реакторных антинейтрино в стерильное состояние на исследовательских реакторах. Модельный эксперимент проведен на 16-мегаваттном реакторе ВВР-М ПИЯФ с целью реализации полномасштабного эксперимента на 100-мегаваттном реакторе СМ-3 НИИАР. Исследованы фоновые условия для проведения такого эксперимента на обоих реакторах. Сделан вывод о возможности реализации полномасштабного эксперимента „Нейтрино-4“ на реакторе СМ-3 НИИАР.

Еще в 1957 году Б.М. Понтекорво первоначально предполагал [1,2], что возможны переходы нейтрино в стерильное состояние, т.е. в состояние с исключительно малой константой взаимодействия и противоположным направлением спина. Дальнейшее развитие идеи нейтринных осцилляций позволило описать нейтринные осцилляции в модели

3 нейтринных поколений с массами m_1 , m_2 , m_3 , которые являются смешанными состояниями электронного, мюонного и тау-нейтрино. Однако имеется ряд экспериментальных фактов, которые указывают на необходимость расширения этой схемы [3,4].

Для проверки гипотезы нами разработан проект эксперимента „Нейтрино-4“ на 100-мегаваттном реакторе СМ-3 [5]. С целью подготовки к эксперименту на реакторе СМ-3 мы выполнили экспериментальные исследования на реакторе ВВР-М. Задачей данного эксперимента являлась регистрация нейтрино от реактора в условиях значительного фона космического излучения на поверхности Земли, а также в условиях нейтринного и гамма-фона в экспериментальном зале исследовательского реактора. Этот эксперимент должен был измерить отношение эффект/фон на реакторе ВВР-М и исследовать принципиальную возможность постановки такого эксперимента на реакторе СМ-3, сравнивая фоновые условия. Отношение эффект/фон есть отношение разности счета нейтринного детектора с включенным и выключенным реактором (эффект) к счету с выключенным реактором (фон). Это отношение должно быть больше единицы для получения хорошей чувствительности эксперимента.

Схема детектора представлена на рис. 1. Объем детектора $0.9 \times 0.9 \times 0.5 \text{ м}^3$. В детекторе используется 16 фотоэлектронных умножителей ФЭУ-49Б, расположенных на верхней поверхности детектора. Детектор сцинтилляционного типа основан на использовании реакции $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$. Сначала детектор регистрирует позитрон, энергия которого определяется энергией антинейтрино, а также 2 аннигиляционных гамма-кванта с энергией по 511 keV. В результате появляется первый сигнал с полной энергией, складывающийся из кинетической энергии позитрона и энергии его аннигиляции. Возникающий в реакции нейтрон замедляется и поглощается гадолинием (Gd) с образованием каскада гамма-квантов с суммарной энергией около 8 MeV. В детекторе регистрируется 2 последовательных сигнала от позитрона и нейтрона (стартовый и стоповый сигналы) с временем задержки, определяемым временем термализации нейтрона и временем жизни нейтрона до захвата ядрами среды. Спектр антинейтрино восстанавливается из спектра позитронов, так как в первом приближении связь между энергией позитрона и антинейтрино линейна: $E_{\bar{\nu}} = E_{e^+} + 1.8 \text{ MeV}$. Детектор заполнен жидким сцинтиллятором BC 525 с содержанием гадолиния 1 g/l. Световой выход сцинтиллятора BC 525 составляет $7 \cdot 10^3$ фотонов на 1 MeV.

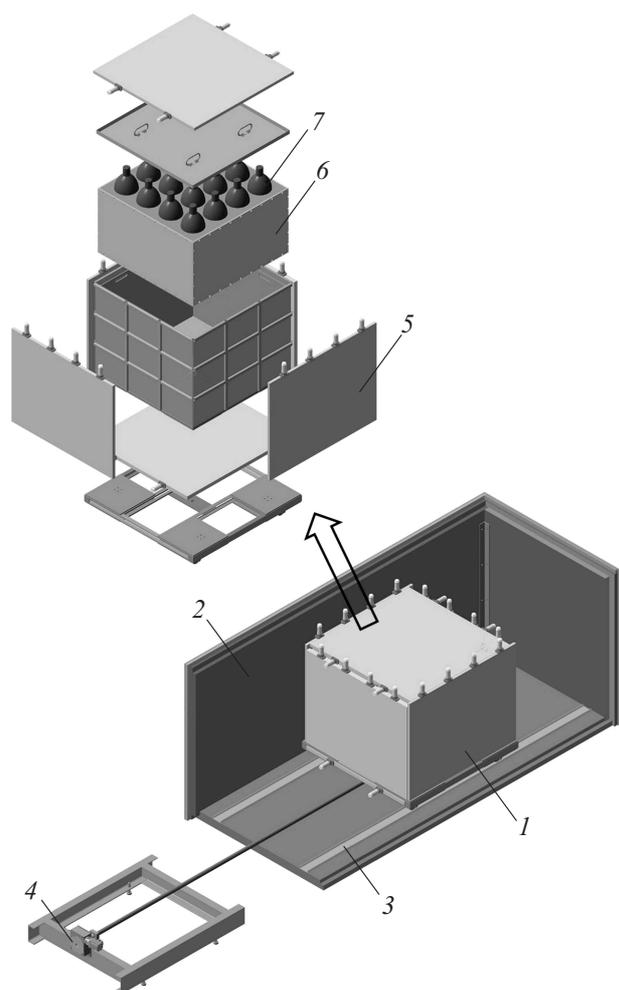


Рис. 1. Схема модели установки на реакторе ВВР-М для поиска осцилляций реакторных антинейтрино в стерильное состояние. 1 — детектор реакторных антинейтрино, 2 — пассивная защита, 3 — рельсы, 4 — двигатель для перемещения детектора, 5 — сцинтилляционные пластины антисовпаденческой защиты с ФЭУ, 6 — объем со сцинтилляционной жидкостью (~ 400 л), 7 — ФЭУ детектора.

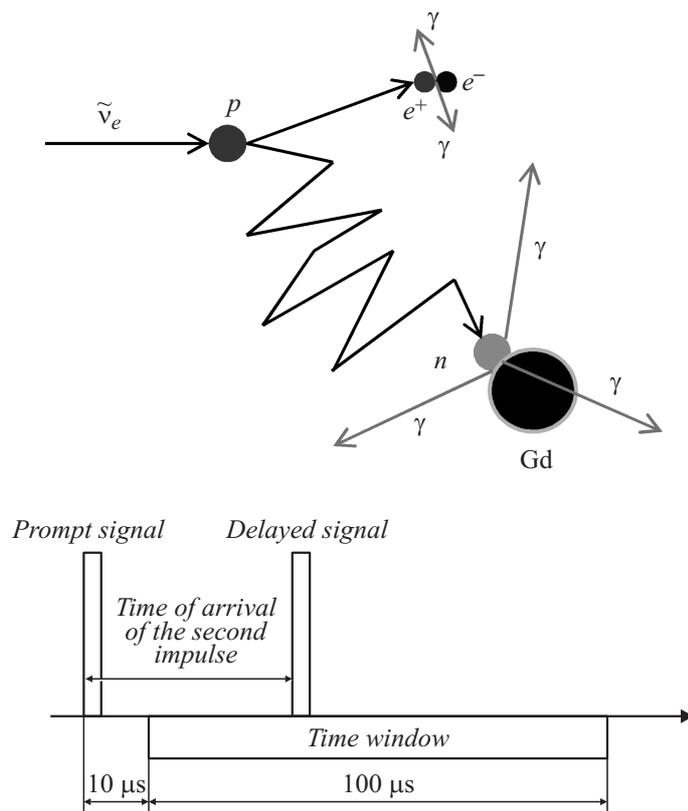


Рис. 2. Процесс регистрации реакторных антинейтрино и схема задержанных совпадений.

Детектор окружен 6 сцинтилляционными пластинами $0.9 \times 0.9 \times 0.03$ м с ФЭУ, являющимися антисовпаденческой защитой от космических мюонов. Когда мюон проходит через пластины, то сигнал от пластин блокирует сигнал от детектора. Это так называемая активная защита детектора. Вся сборка окружена пассивной защитой из свинца 7 см, бетона 45 см и борированного полиэтилена 8 см. Фактор подавления нейтронного и гамма-фона при работающем реакторе составляет 4–5 порядков величины. Детектор может перемещаться внутри защиты

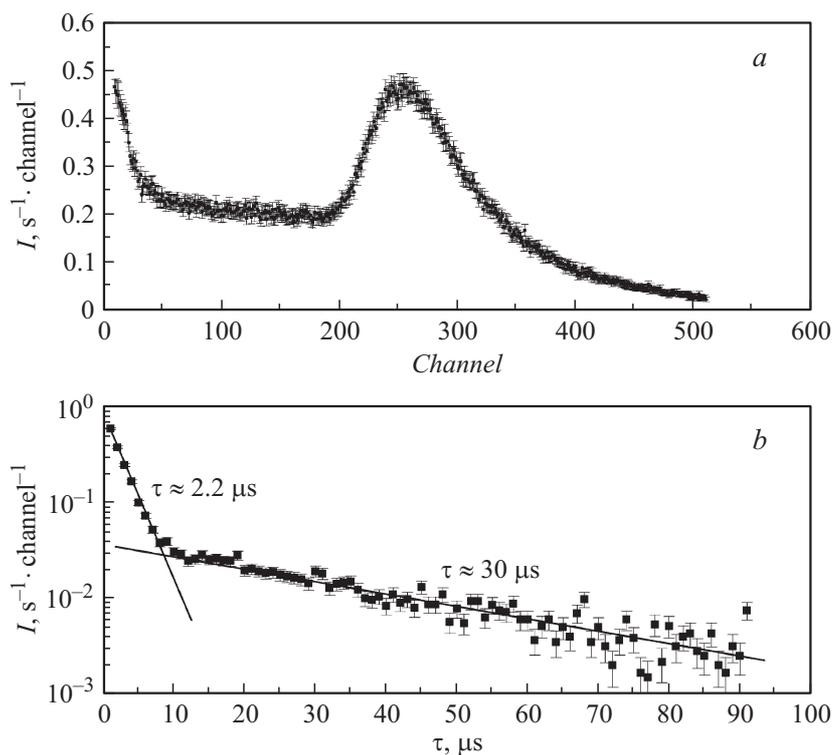


Рис. 3. Энергетический спектр детектора (*a*) и временной спектр задержанных совпадений (*b*). Один канал равен 220 keV.

для измерения зависимости нейтринного потока от расстояния, покрывая диапазон расстояний 5.3–6.6 m от центра активной зоны реактора до центра детектора.

Для выделения искомого сигнала регистрации реакторных антинейтрино следует использовать режим антисовпадений с мюонной активной защитой, а также режим задержанных совпадений, схема которого представлена на рис. 2.

На рис. 3, *a* показан энергетический спектр детектора. Высокоэнергетическая часть спектра с максимумом соответствует мюонам, про-

шедшим через сцинтиллятор в вертикальном направлении и имеющим максимальную длину пробега в сцинтилляторе. Краевые траектории дают низкоэнергетическую часть мюонного спектра. Еще более низкая часть спектра содержит сигналы от захвата нейтронов гадолинием, сигналы от позитронов нейтринной реакции и, наконец, сигналы фоновых гамма-квантов, связанных с радиоактивными загрязнениями. Временной спектр или спектр задержанных совпадений на рис. 3, *b* состоит из двух экспонент. Первая из них с характерным параметром $\tau_1 \approx 2.2 \mu\text{s}$ соответствует мюонам, которые сначала дают стартовый сигнал, останавливаются и затем распадаются. Поэтому характерный параметр этой экспоненты определяется временем жизни мюона. Более детальное изучение этой экспоненты показывает, что она содержит 10%-й вклад быстрой экспоненты с $\tau_2 \approx 0.31 \mu\text{s}$, которая определяется захватом отрицательных мюонов ядрами. Наконец, экспонента с характерным параметром $\tau_n \approx 30 \mu\text{s}$ определяется временем жизни нейтрона до его захвата гадолинием при концентрации гадолия 0.1%.

Эффективность применения указанных выше режимов представлена на рис. 4. Можно видеть, что мюонный пик подавляется практически полностью, а в искомой области нейтринного сигнала происходит подавление фона на 3 порядка величины. Ожидаемая скорость счета антинейтринных событий при 100%-й эффективности детектора могла бы составить 220 day^{-1} или $2.5 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ на расстоянии 5.3 м от центра активной зоны реактора. Выбирая оптимальный энергетический диапазон стартовых и стоповых сигналов в области 2–8 MeV, удалось выделить эффект от включения (выключения) реактора. Временной спектр задержанных совпадений при включенном и выключенном реакторе представлен на рис. 5 для двух расстояний центра детектора от центра активной зоны реактора — 5.3 и 6.6 м. В таблице представлены результаты измерений при включенном и выключенном реакторе, их разность и отношение эффект/фон. Полученный результат для нейтринного эффекта $\Delta_{on-off} = (1.95 \pm 0.24) \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ представляется завышенным, так как расчетная эффективность детектора к регистрации нейтринных событий должна составлять приблизительно 30%. Вполне возможно, что завышение связано с наличием быстрых нейтронов от реактора. Быстрые нейтроны могут имитировать нейтринное событие, где стартовым сигналом является сигнал от протона отдачи при замедлении быстрого нейтрона, а стопом является захват замедленного нейтрона. К сожалению, детальное изучение такого ложного эффекта оказалось невозможно в связи с остановкой реактора. Дальнейшее изу-

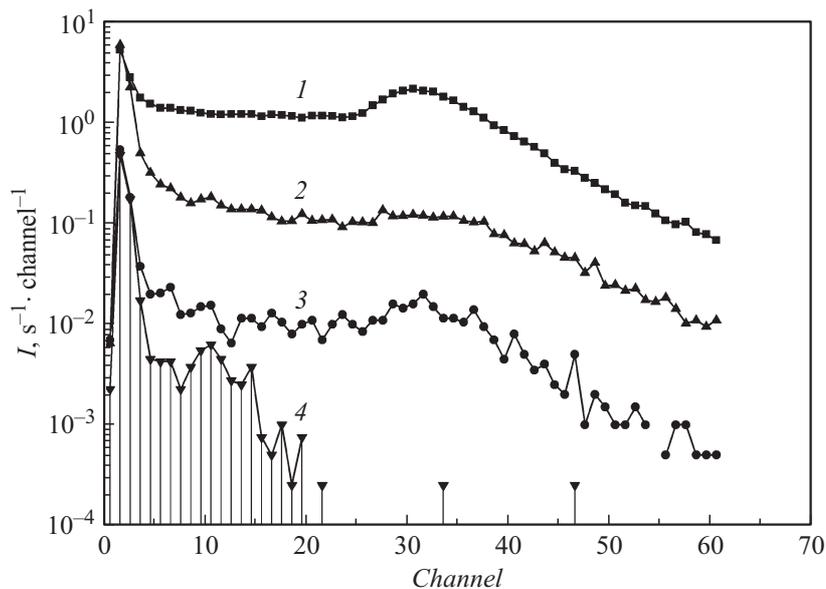


Рис. 4. Энергетический спектр мгновенных процессов: в детекторе (1), после включения антисовпадений с внутренней мюонной защитой (2). Режим задержанных совпадений (3); режим задержанных совпадений с включенной внутренней мюонной защитой, в котором исключены первые $10 \mu\text{s}$, в основном ответственные за мюонные процессы (4). Один канал равен 1800 keV .

чение ложного эффекта от быстрых нейтронов является исключительно важным. Как средство борьбы с этим ложным эффектом предполагается использовать метод дискриминации сигналов по форме импульса, так как сигнал от протона отдачи должен иметь „затянутый хвост“ [6].

Таким образом, в исключительно сложных фоновых условиях экспериментального зала исследовательского реактора удалось начать работы по регистрации сигнала реакторных антинейтрино на реакторе ВВР-М. Для получения заключения о возможности постановки эксперимента по поиску осцилляций реакторных антинейтрино в стерильное состояние на реакторе СМ-3 были проведены сравнительные измерения фоновых условий. Одним из очевидных факторов улучшения отношения эффект/фон является мощность реактора СМ-3, которая в 5.5 раза выше.

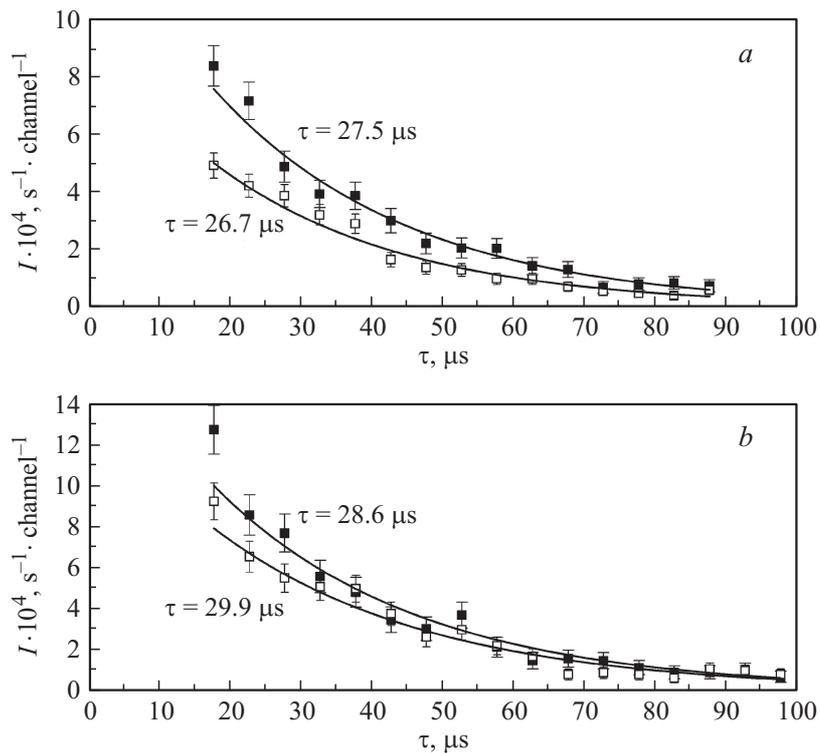


Рис. 5. Временной спектр задержанных совпадений для положения центра детектора 5.3 (a) и 6.6 м (b) от центра активной зоны реактора при включенном (■) и выключенном реакторе (□).

Вторым важнейшим фактором является фон быстрых нейтронов адронной компоненты космического излучения. Последняя определяется конструкцией здания — количеством обычного и тяжелого бетона над нейтринной установкой. Прямые сравнительные измерения показали, что поток быстрых нейтронов в помещении, подготовленном под нейтринную лабораторию на СМ-3 (и пока не снабженном пассивной защитой), составляет $4 \cdot 10^{-4} \text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$, а на реакторе ВВР-М в защите $4 \cdot 10^{-3} \text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$, т. е. на порядок величины выше. Кроме того, были проведены сравнительные измерения потока космических мюонов:

Результаты измерений

	Reactor ON $I, 10^{-3} \text{ s}^{-1}$	Reactor OFF $I, 10^{-3} \text{ s}^{-1}$	$\Delta, 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ on-off	Δ/OFF
$R = 5.3 \text{ m}$	6.43 ± 0.20	4.48 ± 0.13	1.95 ± 0.24	0.43 ± 0.055
$R = 6.6 \text{ m}$	6.09 ± 0.26	5.07 ± 0.21	1.02 ± 0.34	0.21 ± 0.066

$80 \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ на реакторе ВВР-М и $60 \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ на реакторе СМ-3. Все это указывает на то, что имеется возможность получить на реакторе СМ-3 соотношение эффект/фон порядка единицы и больше. При таком соотношении эффект/фон проведение эксперимента по поиску осцилляций реакторных антинейтрино в стерильное состояние на реакторе СМ-3 представляется возможным.

Детектор будет состоять из 5 секций с общим объемом жидкого сцинтиллятора 1.5 m^3 . Диапазон перемещений обеспечивает измерения от 6 до 13 м. В настоящее время на реакторе СМ-3 подготовлено помещение нейтринной лаборатории, устанавливается 60-тонная пассивная защита из свинца и борированного полиэтилена. Детальное описание проекта представлено в работе [5].

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение № 8702, и Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 12-02-12111-офи_м.

Список литературы

- [1] Понтекорво Б. // ЖЭТФ. 1957. Т. 33. С. 549; 1958. Т. 34. С. 247.
- [2] Понтекорво Б. // ЖЭТФ. 1967. Т. 53. С. 1717.
- [3] Mention G., Fechner M., Lasserre Th. et al. // Phys. Rev. D. 2011. V. 83. P. 073 006.
- [4] Mueller T., Lhuillier D., Fallot M. et al. // Phys. Rev. C. 2011. V. 83. P. 054 615.
- [5] Серебров А.П., Фомин А.К., Зиновьев В.Г. и др. // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. В. 14. С. 25.
- [6] Furuta H. // Confer. Proc. Applied Antineutrino Physics. Корея, 2013.
<https://indico.cern.ch/contributionDisplay.py?contribId=8&confId=245969>