ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 539.1.074.82

УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ С ЛЕГКИМИ ЯДРАМИ СО СПЕКТРОМЕТРОМ ПАР ЭЛЕКТРОНОВ И ПОЗИТРОНОВ

© 2025 г. С. Х. Караевский[a], С. И. Поташев[a,b], Ю. М. Бурмистров[a], А. А. Каспаров[a,*], Е. А. Пермяков[a], В. Н. Пономарев[a], В. И. Разин[a]

[a] *Институт ядерных исследований Российской академии наук*

Россия, Москва, 117312, просп. 60-летия Октября, 7а

[b] *Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук*

Россия, 119991, Москва, Ленинский просп., 53

**e-mail: kasparov200191@gmail.com*

Поступила в редакцию 18.12.2024 г.

После доработки 22.01.2025 г.

Принята к публикации 25.02.2025 г.

Разработана установка для исследования взаимодействия быстрых нейтронов с энергией свыше 1 МэВ с легкими ядрами с вылетом ядра ^{3}H или ^{4}He и электрон-позитронной пары. Она включает в себя позиционно-чувствительный детектор нейтронов с размерами 50×50 мм^2, состоящий из слоя исследуемого ядра и пропорциональной камеры, два позиционно-чувствительных кремниевых детектора размерами 64×64 мм^2 и два сцинтилляционных детектора на основе кристаллов NaI диаметром 42 мм и высотой 46 мм с разрешением по энергии электронов около 4.5%. Пространственная реконструкция события и измерение энергии и угла вылета электрона и позитрона позволят исследовать редкие внутриядерные процессы с рождением пар электронов и позитронов внутренней конверсии.

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследование внутренней кластерной структуры легких ядер, таких как ^{10}B, ^{11}B, ^{9}Be и ^{8}Be, а также изучение каналов их распада является в настоящее актуальной задачей. Ядро ^{8}Be может образоваться в возбужденном состоянии и распадаться не только с испусканием гамма-кванта, но и с испусканием электрон-позитронной пары внутренней конверсии. В

реакции взаимодействия протона с ядром ^{7}Li образуется ядро ^{8}Be*, которое в редких случаях (с вероятностью 0.0001–0.001 по сравнению с испусканием γ-кванта) может распадаться с испусканием e^{+}–e^{-}-пары внутренней конверсии. В распределении таких событий по углу разлета e^{+} и e^{-}, которое, как ожидалось в рамках Стандартной модели, должно быть монотонно убывающей функцией, было обнаружено аномальное увеличение вблизи угла 140°, что может быть связано с рождением новой частицы-бозона с $J^{P} = 1^{+}$ с массой примерно 16.7 МэВ [1]. Это можно было бы проверить, если доказать существование или установить верхний предел на существование этой частицы в другой реакции, $n + {}^{10}\mathrm{B} \rightarrow {}^{3}\mathrm{H} + {}^{8}\mathrm{Be}^{*}$, при энергии около 18 МэВ, идентифицируя вылет ядра ^{3}H с образованием промежуточного ядра ^{8}Be*.

В исследованиях E_0-переходов в ядрах использовался спектрометр пар электронов и позитронов на основе пластмассовых сцинтилляторов [2]. В данной работе использовалась комбинация тонких (0.5 мм) и толстых (от 2 до 5 см) пластмассовых сцинтилляторов NE 102A для идентификации электронов и позитронов. Однако энергетическое разрешение составляло около 12%, а угловое разрешение было невысоким, поскольку определялось размерами сцинтилляторов, которые составляли от 2 до 4 см.

Для поиска экзотических бозонов, распадающихся на электрон и позитрон, использовалась установка с дрейфовыми камерами и пластмассовыми сцинтилляторами для запуска триггера событий [3].

Для одновременного измерения энергии и углового распределения электронов и позитронов для исследования мультипольных ядерных переходов создана установка из шести пластмассовых ΔE–E-телескопов [4].

В настоящей работе представлены результаты создания на нейтронном канале РАДЭКС ИЯИ РАН установки для исследования взаимодействия быстрых нейтронов с энергией более 1 МэВ с легкими ядрами с регистрацией электрон-позитронной пары и ядра ^{3}H или ^{4}He для идентификации исследуемой реакции. Эта установка включает в себя не только детектор электронов и позитронов с позиционным разрешением не менее 2 мм, но и позиционно-чувствительный детектор нейтронов и вторичных ядер [5], что расширяет функциональные возможности установки.

2. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Установка, схема которой представлена на рис. 1, состоит из позиционно-чувствительного детектора нейтронов (ПЧДН) на основе слоя с исследуемым ядром и пропорциональной камеры, двух позиционно-чувствительных кремниевых детекторов (ПЧКД) и двух сцинтилляционных детекторов (СД) на основе кристаллов NaI. Установка

предназначена для исследования взаимодействия быстрых нейтронов с энергией более 1 МэВ с легкими ядрами для идентификации исследуемых реакций, в частности

$$n + {}^{10}\mathrm{B} \rightarrow {}^{4}\mathrm{He} + {}^{7}\mathrm{Li}, \quad n + {}^{10}\mathrm{B} \rightarrow {}^{4}\mathrm{He} + {}^{7}\mathrm{Li} + \gamma,$$

$$n + {}^{10}\mathrm{B} \rightarrow {}^{3}\mathrm{H} + {}^{4}\mathrm{He} + {}^{4}\mathrm{He}, \quad n + {}^{9}\mathrm{Be} \rightarrow {}^{4}\mathrm{He} + {}^{4}\mathrm{He} + 2n.$$

Пространственная реконструкция зарегистрированных событий позволит исследовать внутриядерные переходы и редкие внутриядерные процессы с возможным рождением пар электронов и позитронов внутренней конверсии.

Рис. 1. Схема установки для исследования взаимодействия быстрых нейтронов с легкими ядрами...

Эксперименты по исследованию кластерной структуры легких ядер будут выполняться на канале быстрых нейтронов РАДЭКС линейного ускорителя протонов ИЯИ РАН. Максимальная энергия нейтронов определяется энергией первичного протонного пучка.

Нейтроны будут регистрироваться с помощью ПЧДН, который является одновременно твердотельной мишенью и детектором вторичных ядер с измерением их ионизационных потерь и угла вылета. Мишень является сменной, в настоящее время изготовлены мишени из ^{10}B толщиной 3 мкм и ^{9}Be толщиной 1 мкм. Точка ядерного взаимодействия также определяется с помощью ПЧДН. Угол вылета электрона или позитрона определяется позицией этой точки и позицией, зарегистрированной соответствующим ПЧКД толщиной 0.35 мм. Энергия электрона или позитрона измеряется с помощью сцинтилляционного детектора на основе кристалла NaI диаметром 42 мм и высотой 46 мм, просматриваемого фотоумножителем ФЭУ-143. Угол вылета электрона или позитрона с энергией от 4 до 12 МэВ измеряется с помощью ПЧКД релятивистских частиц, обладающих минимальной ионизацией.

Ожидаемые параметры отдельных частей установки приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры отдельных частей установки

Загрузочная способность ПЧДН нейтронами с энергией более 1 МэВ	10^9 с$^{-1}$ · см$^{-2}$
Чувствительная площадь ПЧДН	5 × 5 см^2
Позиционное разрешение ПЧДН	0.2 см
Число электронных каналов ПЧДН	4 × 8 = 32
Чувствительная площадь ПЧКД	6.4 × 6.4 см^2
Число электронных каналов ПЧКД	32
Чувствительные размеры СД: диаметр и высота	4.2 и 4.6 см
Телесный угол каждого плеча при расстоянии 20 см от мишени	0.1 ср
Угловое разрешение при расстоянии 20 см от мишени	10 мрад

3. ПОЗИЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ДЕТЕКТОР НЕЙТРОНОВ

Новый двухкоординатный позиционно-чувствительный детектор нейтронов размерами 50×50 мм^2 [5], схематично представленный на рис. 2, состоит из двух слоев исследуемого ядра (^{10}B или ^{9}Be), каждый из которых имеет толщину от 1 до 3 мкм, и проволочной камеры (шаг проволочек составляет 2 мм) с четырьмя чувствительными газовыми промежутками для измерения частичных и полных потерь вылетающего из реакции ядра, а также координаты точки взаимодействия. Применение второго слоя изотопа ^{10}B позволяет вдвое увеличить эффективность установки. Такая конструкция детектора позволяет определить энергию, угол вылета и тип ядра, а также энергию нейтрона. Кроме того, по величинам ионизационных потерь в четырех последовательных чувствительных газовых промежутках можно идентифицировать вылетающее ядро и, соответственно, канал реакции, в котором оно образовалось [6, 7].

Рис. 2. Двухкоординатный позиционно-чувствительный детектор нейтронов размерами 50×50 мм^2...

4. ПОЗИЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ КРЕМНИЕВЫЙ ДЕТЕКТОР ЭЛЕКТРОНОВ

Однокоординатный позиционно-чувствительный детектор электронов размерами 64×64 мм^2, толщиной 0.35 мм с шагом чувствительных элементов 2 мм совместно с ПЧДН будет применяться для определения угла вылета электрона или, соответственно, позитрона. Он состоит из собственно кремниевого детектора, 32-канального предварительного усилителя и 32-канального повторителя для сопряжения с модулем оцифровки с получением 32 осциллограмм.

Осциллограмма сигнала с одного из выходов данного детектора от радиоактивного источника ^{90}Sr (^{90}Y) представлена на рис. 3а, а спектр ионизационных потерь электронов – на рис. 3б. Запуск оцифровки будет осуществляться под управлением сигнала от ПЧДН. Появление сигнала в кремниевом детекторе указывает на регистрацию заряженной частицы (электрона или позитрона), а отсутствие сигнала в нем при наличии сигнала в сцинтилляционном детекторе указывает на регистрацию γ-кванта. Таким образом, по совпадению обоих сигналов от электрона и позитрона можно идентифицировать редкие события с образованием пары e^+ и e^- в данной ядерной реакции.

Рис. 3. Результаты измерений с помощью однокоординатного кремниевого позиционно-чувствительного детектора электронов размерами 64×64 мм^2...

5. СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ ДЕТЕКТОР ЭЛЕКТРОНОВ

Для определения энергии электрона и позитрона используются два сцинтилляционных детектора на основе NaI толщиной 46 мм и диаметром 42 мм. Они чувствительны к γ-квантам. Факт регистрации электрона (позитрона) можно установить по совпадению сигналов от ПЧКД и NaI-детектора. Факт регистрации пары устанавливается по совпадению сигналов от двух ПЧКД и двух NaI-детекторов. Факт регистрации γ-кванта устанавливается по отсутствию сигнала от ПЧКД и наличию сигнала от NaI-детектора. Ожидаемое разрешение NaI-детектора – около 3–4% при энергии 8 МэВ. Сигнал триггера от регистрации нейтрона в ПЧДН запускает сбор данных установки.

6. СПЕКТР ОТ РАДИОАКТИВНОГО ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОНОВ

Для выбора режима работы сцинтилляционного детектора выполнялось измерение энергетического спектра электронов от радиоактивного источника ^{90}Sr (^{90}Y). Спектры при напряжении 1600 и 1700 В представлены на рис. 4а и рис. 4б соответственно. При напряжении 1600 В наблюдается характерный спектр энергий электронов, ограниченный нижним порогом регистрации около 0.75 МэВ с положением максимума около 1 МэВ. При напряжении 1700 В резко нарастает собственный шум фотоумножителя. Это приводит к тому, что электрический пробой в детекторе вызывает паразитные сигналы большой амплитуды, отражающиеся в спектре как длинный хвост на рис. 4а. При напряжении ниже 1600 В наблюдается значительное падение амплитуды сигнала и, как следствие, эффективности детектора. Таким образом, напряжение 1600 В является оптимальным.

Рис. 4. Результаты измерений с помощью детектора NaI. Спектры электронов из источника...

7. СПЕКТР КОСМИЧЕСКОГО ФОНА И РАЗРЕШЕНИЕ ПО ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОНОВ

Спектр ионизационных потерь космического фона измерялся с помощью сцинтилляционного детектора NaI при напряжении 1700 В (рис. 5а) и 1600 В (рис. 5б). Сравнивая два этих спектра, находим, что и здесь присутствует увеличенный шум детектора, связанный с большими амплитудами в спектре от электрического пробоя. Калибровка спектра на рис. 5б основана на сравнении вычисленных ионизационных потерь релятивистских частиц (мюонов) и положения ярко выраженного пика в конце спектра космических частиц.

Рис. 5. Результаты измерений с помощью детектора NaI. Спектры космического фона...

Высота детектора составляет H = 4.2 см, плотность NaI равна ρ = 3.67 г·см$^{-3}$, удельные ионизационные потери релятивистских частиц с минимальной ионизацией dE / dx = 2 МэВ·г$^{-1}$·см^2. Средние ионизационные потери составляют

$$\Delta E = \rho \frac{dE}{dx} H. \quad (1)$$

Аппроксимация фона экспоненциальным спадом и аппроксимация мюонного пика гауссианом при ионизационных потерях релятивистских мюонов около 33 МэВ, вычисленные по формуле (1), дают разрешение по энергии для релятивистских частиц с минимальной ионизирующей способностью на уровне не хуже 6.3% при напряжении 1700 В и не хуже 4.5% при напряжении 1600 В. При напряжении питания 1550 В измеренное разрешение по энергии было также не хуже 4.5%, но наблюдалось падение эффективности детектора до 85% по сравнению с эффективностью при напряжении 1600 В. Таким образом, выбирается рабочее напряжение 1600 В.

8. ВЫВОДЫ

На нейтронном канале РАДЭКС ИЯИ РАН создана установка для изучения реакций взаимодействия быстрых нейтронов с легкими ядрами и с рождением пар e^+ и e^- внутренней конверсии. Установка включает в себя позиционно-чувствительный детектор нейтронов и одновременно мишень, а также спектрометр пар электронов и позитронов. Получена экспериментальная оценка энергетического разрешения при регистрации электронов не хуже 4.5% при ионизационных потерях релятивистских мюонов около 33 МэВ. Оптимальное напряжение питания для сцинтилляционного детектора составило 1600 В. Данная установка позволяет исследовать редкие внутриядерные процессы с рождением пар электронов и позитронов внутренней конверсии, кластерную структуру легких ядер, а также провести поиск экзотических бозонов, находящихся вне Стандартной модели элементарных частиц.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Выражаем огромную благодарность старшему научному сотруднику ИЯИ РАН, Ивашкину А. П., за помощь и поддержку данной работы.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление № 6 “Ядерная и радиационная физика”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Krasznahorkay A.J., Csatlos M., Csige L. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2016. V. 116. P. 042501. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.042501
2. *Stiebing K.E., de Boer F.W.N., Frohlich O. et al.* // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 2004. V. 30. P. 165. https://doi.org/10.1088/0954-3899/30/2/014
3. *Blomqvist K.I., Boeglin W.U., Bohm R. et al.* // Nucl. Instr. and Meth. A. 1998. V. 403. P. 263. https://doi.org/10.1016/S0168-9002(97)01133-9
4. *Gulyas J., Ketel T.J., Krasznahorkay A.J. et al.* // Nucl. Instr. and Meth. A. 2016. V. 808. P. 21. https://doi.org/10.1016/j.nima.2015.11.009
5. *Поташев С.И., Афонин А.А., Бурмистров Ю.М., Драчев А.И., Каспаров А.А., Караевский С.Х., Мешков И.В., Пономарев В.Н.* // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2024. № 8. С. 36. https://doi.org/10.31857/S1028096024080058
6. *Поташев С.И., Каспаров А.А., Пономарев В.Н.* // Известия РАН. Серия физическая. 2022. Т. 86. № 9. С. 1304. https://doi.org/10.31857/S0367676522090241
7. *Potashev S.I.* // Phys. Atom. Nucl. 2023. V. 86. P. 850. https://doi.org/10.1134/S1063778823050344

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Схема установки для исследования взаимодействия быстрых нейтронов с легкими ядрами: *1* – фильтр из кадмия, *2* – ПЧДН, *3* – слой-мишень, *4* и *5* – ПЧКД, *6* и *7* – сцинтилляционные детекторы NaI.

Рис. 2. Двухкоординатный позиционно-чувствительный детектор нейтронов размерами 50×50 мм^2: *1* – передняя кремниевая пластина со слоем ядра-мишени, *2* – задняя кремниевая пластина со слоем ядра-мишени, *3* – проволочный катод X_1, *4* – проволочная сетка Y_1, *5* – проволочный анод, *6* – проволочная сетка X_2, *7* – проволочный катод Y_2.

Рис. 3. Результаты измерений с помощью однокоординатного кремниевого позиционно-чувствительного детектора электронов размерами 64×64 мм^2: **а** – осциллограмма сигнала от электрона одного из выходов детектора; **б** – спектр ионизационных потерь электронов из источника ^{90}Sr (^{90}Y) одного из выходов детектора.

Рис. 4. Результаты измерений с помощью детектора NaI. Спектры электронов из источника ^{90}Sr (^{90}Y) при следующих напряжениях: **а** – 1700 В, **б** – 1600 В.

Рис. 5. Результаты измерений с помощью детектора NaI. Спектры космического фона с аппроксимацией убывающей экспонентой и гауссианом для пика космических релятивистских мюонов с минимальной ионизацией при следующих напряжениях: **а** – 1700 В, **б** – 1600 В.

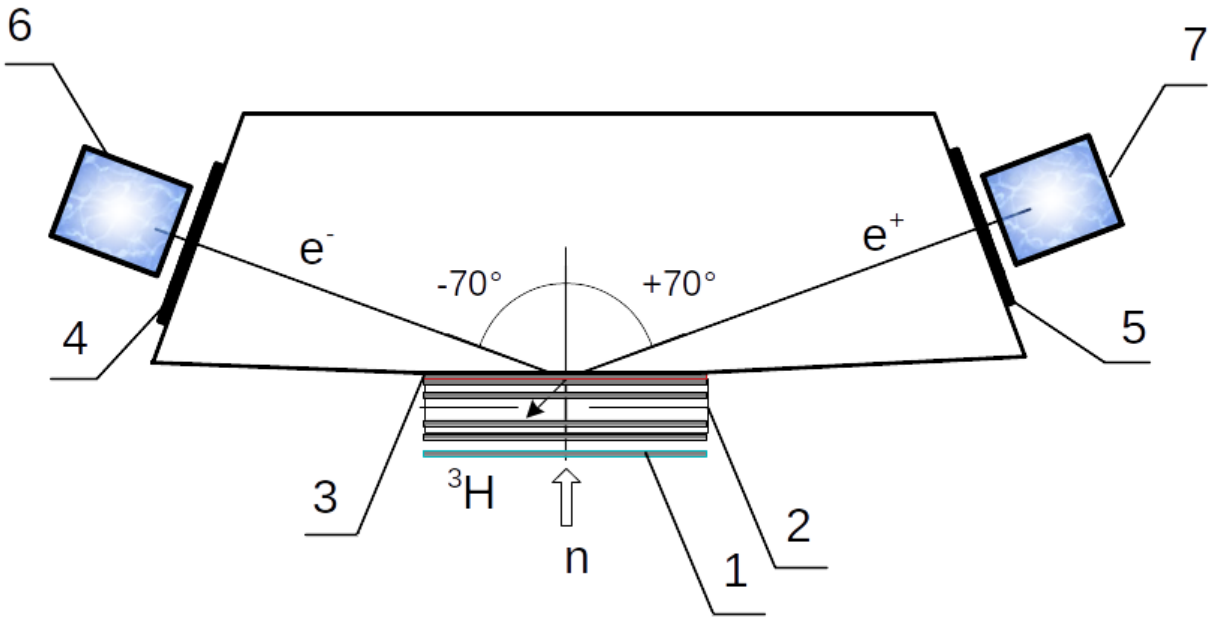


Рис. 1

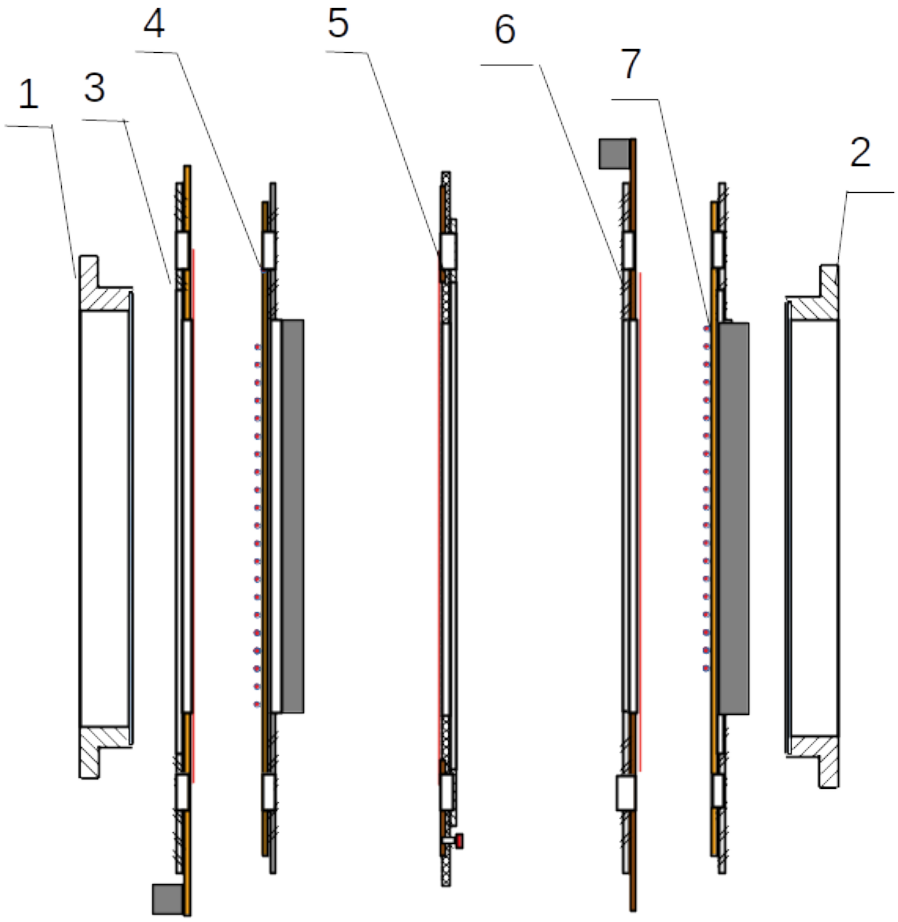
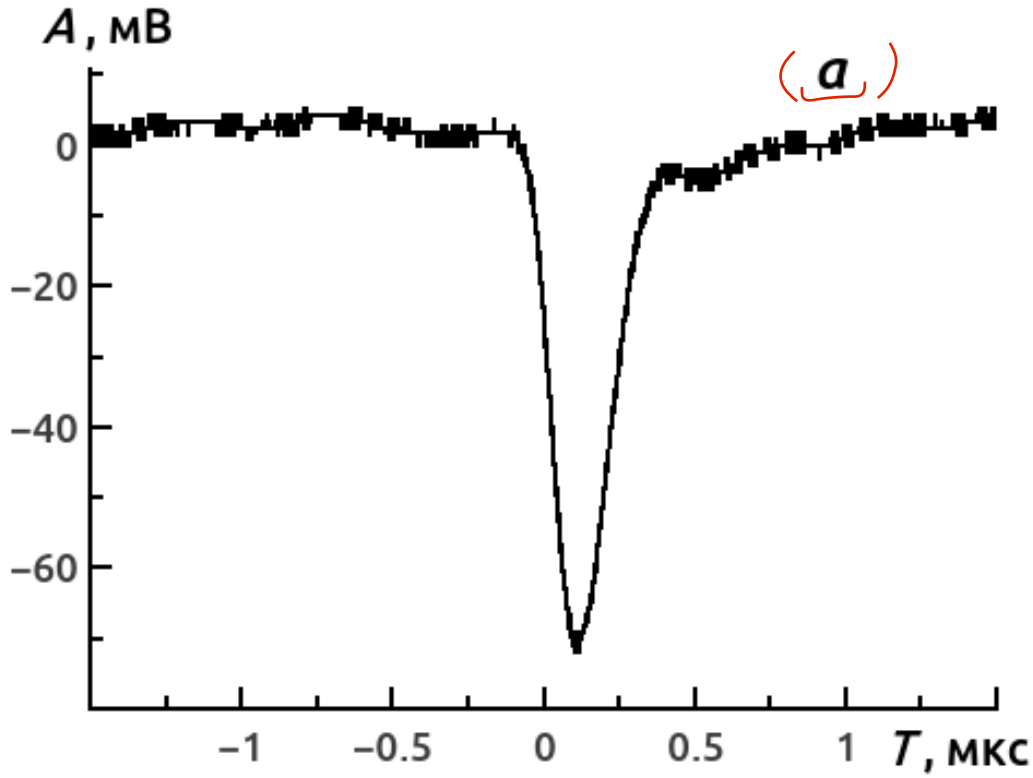


Рис. 2


A, мВ
а
0
−20
−40
−60
−1
−0.5
0
0.5
1
T, мкс

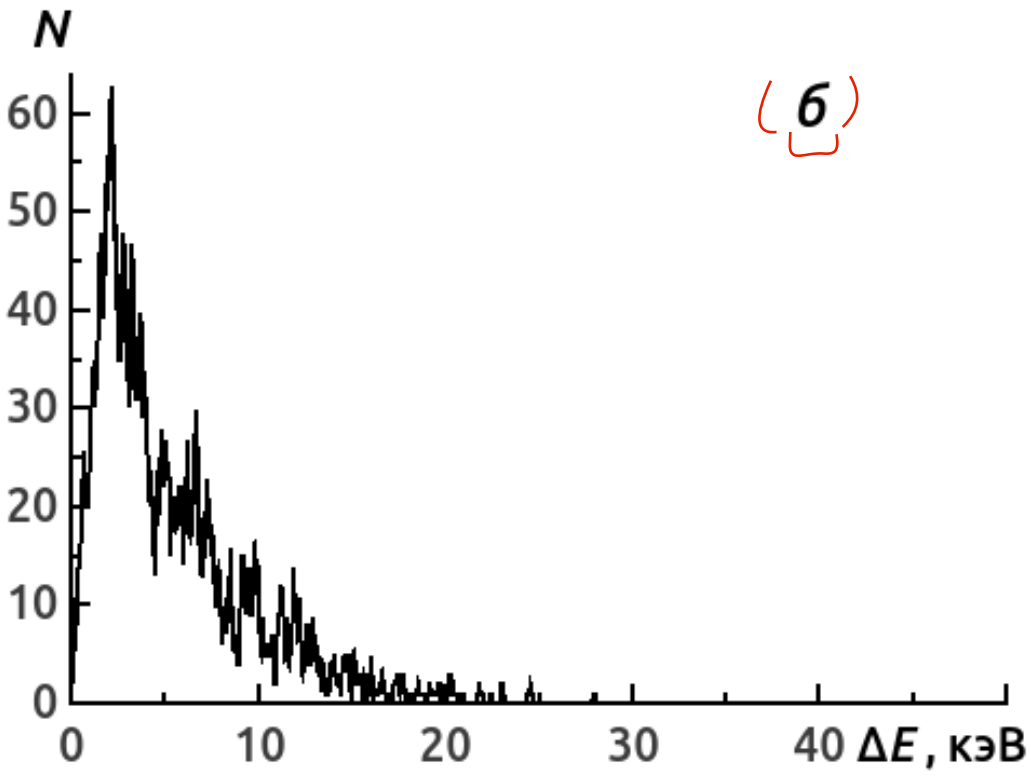

N
б
60
50
40
30
20
10
0
0
10
20
30
40 ΔE, кэВ

Рис. 3

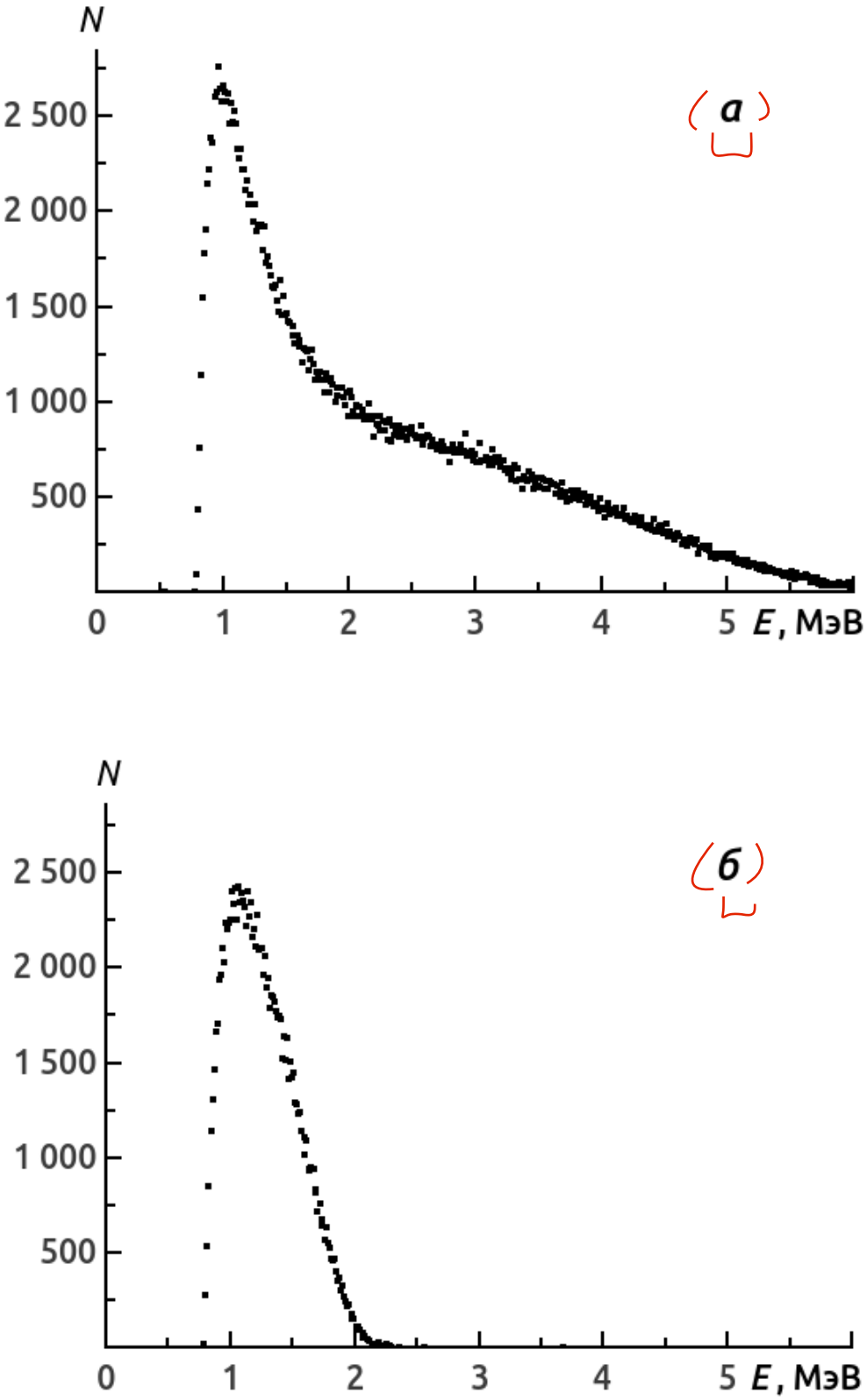

N
2 500
2 000
1 500
1 000
500
0
1
2
3
4
5
E, МэВ
а
N
2 500
2 000
1 500
1 000
500
0
1
2
3
4
5
E, МэВ
б

Рис. 4

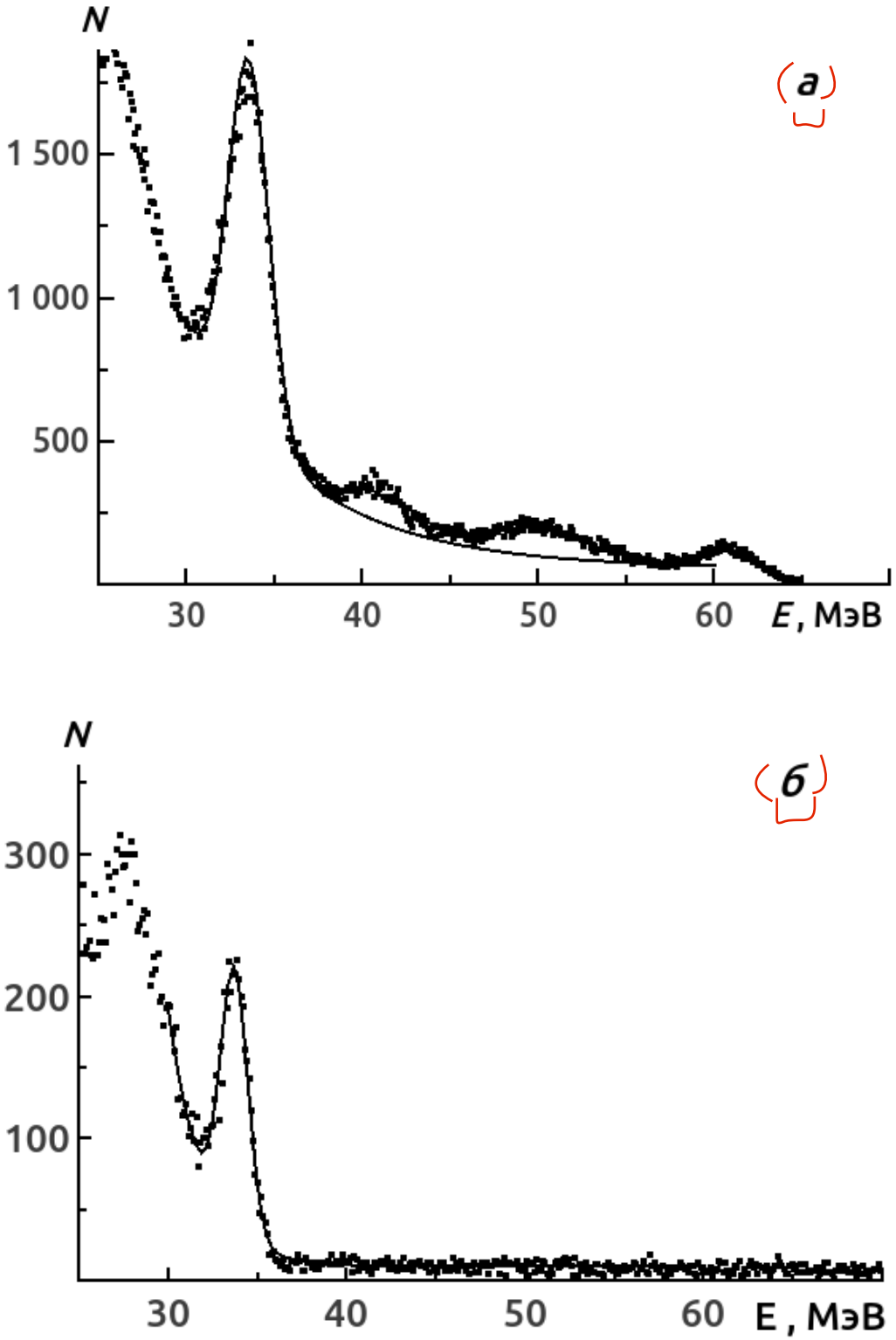


Рис. 5