

5. СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЕ СЧЁТЧИКИ

Сцинтилляционные методы регистрации нейтронов подразделяются на прямые и косвенные. В прямых методах нейтроны, взаимодействуя с ядрами фосфора, образуют заряженные частицы. Для регистрации нейтронов прямым методом используют фосфоры: LiI, стильбен, антрацен и некоторые жидкие фосфоры. В косвенных методах нейтроны взаимодействуют с веществом, находящимся вне фосфора. Эти вещества называют радиаторами. Возникающее в радиаторе γ -излучение детектируется сцинтилляционным счетчиком с твердым или жидким фосфором.

Нейтроны больших энергий (100 – 350 МэВ) регистрируются по протонам отдачи, возникающим в водородсодержащем рассеивателе. Установка представляет собой телескоп из двух антраценовых кристаллов, соединённых с двумя ФЭУ, включёнными в схему совпадений. Распределение пробегов отдачи определяется путём изменения толщины поглотителя между кристаллами. При регистрации нейтронов с энергиями в несколько МэВ используются сэндвичи из люцита и ZnS, регистрирующие протоны отдачи, возникающие в водородсодержащем материале, добавленном к фосфору. Смесь полистирола с ZnS позволила измерять потоки нейтронов от радий-бериллиевого источника, несмотря на наличие большого гамма-фона. Хорошие результаты даёт смесь порошка KI(Tl) и α -бромнафталина. Реакция $^{12}\text{C}(n,2n)^{11}\text{C}$ (^{11}C – позитронный излучатель с $T=20,3$ мин) используется для регистрации нейтронов с энергией больше 20,4 МэВ. Сечение этой реакции почти не зависит от энергии нейтронов. При облучении большого антраценового кристалла в течение 30 мин и регистрации сцинтилляций от позитронов распада в такого же периода можно зарегистрировать поток, равный 15 нейтрон/см²·сек.

Более сложную задачу представляет регистрация медленных и тепловых нейтронов.

Хорошим фосфором для сцинтилляционного счетчика медленных нейтронов является монокристалл LiI(Eu). Он прозрачен для света, имеет короткое время высвечивания. Медленные нейтроны эффективно взаимодействуют с ядрами ^6Li , входящего в состав фосфора. Продукты реакции (α -частица и тритон), суммарная энергия которых равна 4,78 МэВ, вызывают интенсивную вспышку света в фосфоре. Хотя монокристалл LiI чувствителен к γ -квантам, однако только γ -кванты с энергией около 5 МэВ могут создать вспышку света, которая по интенсивности была бы сравнима со вспышкой света от нейтрона. Таких высокоэнергетических γ -квантов в фоновом γ -излучении обычно немного. Импульсы, создаваемые γ -квантами с энергией $E < 5$ МэВ, имеют амплитуду меньше амплитуды импульса от нейтронов и отделяются от нейтронных импульсов амплитудным дискриминатором.

Примером яркого и быстродействующего нейтронного сцинтиллятора является $\text{Cs}_{(2-z)}\text{Rb}_z\text{LiLn}_{(1-x)}\text{X}_6\text{:xCe}^{3+}$, где X представляет собой либо Br либо I, Ln представляет собой Y или Gd, или Lu, или Sc, или La, где z больше или равно 0 и меньше или равно 2, а x составляет более 0,0005, поставляемый в виде монокристалла, порошка либо спрессованным, либо спеченным, либо смешанным со связующим.

Эффективность регистрации нейтронов для параллельного пучка нейтронов определяют по формуле (11.3), где N - число ядер ^6Li в 1 см³ фосфора; σ_α - сечение (n, α)-реакции на ^6Li , см²; I - толщина фосфора, см. Благодаря большому сечению (n, α)-реакции на ^6Li эффективность регистрации тепловых нейтронов достигает 80—90% при толщине фосфора около 4 см. Для повышения эффективности монокристаллы выращивают из сырья, в состав которого входит литий, обогащенный по изотопу ^6Li . Монокристаллы упаковывают в контейнеры, аналогичные контейнерам для кристаллов NaI. (n, α)-Реакцию на ^6Li используют для регистрации нейтронов прозрачными сцинтиллирующими неорганическими пластмассами, называемыми литиевыми стеклами. В их состав входит до 6 вес. % ^6Li . Литиевые стекла обладают хорошей чувствительностью к медленным нейтронам. Эффективность регистрации тепловых нейтронов достигает 100% при толщине стекла 10 - 15 мм. Импульсы, образованные в литиевом стекле γ -квантами с энергией до 1,5 МэВ, меньше по амплитуде импульсов от нейтронов и легко дискриминируются. Литиевые стекла изготавливают в форме цилиндрических шайб, непосредственно располагаемых на фотокатоде ФЭУ. В состав стекла, кроме соединения лития, входят соединения ряда других элементов. Они превращают стекло в фосфор, в котором α -частица вызывает вспышку света.

Стекла на основе цирконосиликатов и бериллиевых фосфатов, хотя и отличаются повышенной радиационной стойкостью и световыходом, не обладают достаточно высокой технологичностью. Более технологичными оказались стекла на базе литиевого силикатного стекла с церием, обладающие повышенной чувствительностью к нейтронам. При содержании Li_2O на уровне 22,5 моль.% стекло имеет световыход с максимумом спектра радио-люминесценции 3,2 эВ, в 1,8 раза превышающий световыход принятых за эталон стекол NE-905. Регистрация тепловых нейтронов осуществляется по реакции $^6\text{Li}_3(n, \alpha)^3\text{H}$. Продукты реакции - альфа-частицы - вызывают в стекле сцинтилляции длительностью 60 нс. На базе ^6Li -силикатных стекол, активированных церием (например, стекло, имеющих состав $^6\text{Li}_2\text{O-MgO-SiO}_2\text{-Ce}$) изготовлен сцинтилляционный детектор нейтронов с повышенными техническими характеристиками.

Для регистрации медленных нейтронов используют также смесь веществ, содержащую ^{10}B и фосфор ZnS (например, смесь порошков борной кислоты и сернистого цинка). Такой фосфор обладает слабой чувствительностью к γ -квантам, однако имеет плохую прозрачность для собственного света. Последнее ограничивает его использование, так как возможно применение лишь тонких слоев фосфора, а это снижает его эффективность. Чтобы повысить чувствительность детектора к нейтронам, изготавливают слоистый фосфор. В этом фосфоре тонкие слои смеси чередуются со слоями прозрачного органического стекла, служащих световодами для выхода света к фотокатоду ФЭУ. Эффективность регистрации нейтронов детектором со слоистым фосфором достигает 30%.

Более эффективными фосфорами при регистрации медленных нейтронов являются некоторые сцинтиллирующие жидкости с добавкой растворимых соединений бора. Нейтроны взаимодействуют с бором, образуя α -частицу, которая вызывает вспышку света в жидком фосфоре. К весьма чувствительным детекторам нейтронов такого типа относится детектор с фосфором из жидкого толуола, в котором растворен метилборат (соединение бора). Приготовленный фосфор заливают в герметичный контейнер с толщиной рабочего объема по направлению потока нейтронов около 1 см. Пробег электронов, образованных γ -квантами, не укладывается на такой толщине фосфора, вследствие чего импульсы от них имеют небольшую амплитуду и отделяются от нейтронов с помощью амплитудного дискриминатора. Эффективность детектора зависит от количества введенного в жидкий фосфор ^{10}B и может достигать 50% при энергии нейтронов 1 кэВ. При регистрации быстрых нейтронов сцинтилляционным методом используют реакцию упругого рассеяния быстрых нейтронов на ядрах водорода. Быстрый нейтрон образует протон отдачи большой энергии, который вызывает вспышку в фосфоре. В качестве фосфоров применяют органические монокристаллы стильбена, антрацена, толана. Основная трудность при детектировании нейтронов такими фосфорами - их высокая чувствительность к γ -излучению. Импульсы от γ -квантов сравнимы с импульсами от протонов или даже больше их. Это объясняется тем, что конверсионная способность фосфоров для β -частицы выше, чем для протона. На базе стильбена созданы детекторы нейтронов, в которых удается разделить нейтронную и γ -компоненты импульсов друг от друга. Время высвечивания стильбена, возбуждаемого β -частицей и протоном, различно. Это свойство стильбена отражается на характеристиках выходного импульса ФЭУ. С помощью специальной электронной аппаратуры можно по различию в характеристиках выходных импульсов разделить импульсы от нейтронов и γ -квантов.

Коротко остановимся на преимуществах и недостатках сцинтилляторов на базе ^6Li и ^{10}B .

Выше было продемонстрировано, что для регистрации медленных нейтронов можно использовать в качестве активной среды ^6Li или ^{10}B содержащие пластические сцинтилляторы. Их преимущество перед любыми газонаполненными счётчиками в том, что они «быстрые»: времена высвечивания таких сцинтилляторов составляют нескольких наносекунд, что позволяет регистрировать быстрое изменение потоков нейтронов. В борсодержащих пластических сцинтилляторах происходит регистрация продуктов реакции $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$. Напомним, что в 6% случаев эта реакция идет по каналу образования α -частиц с энергией 1.78 МэВ и прямого перехода ^7Li на свой основной уровень. В 94% случаев эта реакция идет по каналу образования α -частиц с энергией 1.47 МэВ и возбужденного состояния $^{7*}\text{Li}$ с последующим быстрым его переходом в основное состояние Li и излучением γ -кванта с энергией 0.478 МэВ.

В отличие от лития использование соединений на основе дешевого природного бора в пластических сцинтилляторах выгодно тем, что в природном боре содержится достаточно много, 19.9%, необходимого для регистрации замедленных нейтронов изотопа ^{10}B , что позволяет обойтись без дорогостоящей процедуры его обогащения. Сечения реакции нейтронов σ с энергией 1 эВ на ^6Li и ^{10}B составляют 149 и 609 барн соответственно и с энергией изменяются как $\sigma \sim 1/\sqrt{E_n}$. Видно, что использование ^{10}B для регистрации нейтронов в 4 раза эффективнее использования ^6Li , однако энерговыделение в реакции $^6\text{Li}(n,\alpha)t$ составляет 4.8 МэВ, и эта реакция не сопровождается излучением γ -квантов. Использование в пластических сцинтилляторах ^6Li (вместо ^{10}B) увеличивает энерговыделение от реакций регистрации нейтронов почти в три раза. Поэтому для решения ряда задач (например, при регистрации космического излучения) литиевые полистирольные сцинтилляторы имеют неоспоримое преимущество перед борсодержащими сцинтилляторами.

Быстрые сцинтилляционные детекторы нейтронов, используемые в космофизике, делятся на два типа: детекторы нейтронов с замедлителем и тонким сцинтиллятором и детекторы нейтронов с толстым сцинтиллятором, который одновременно служит и замедлителем.

На **Рис. 7а** показана простая конструкция детектора нейтронов с тонким сцинтиллятором толщиной 5 мм и размерами равными рабочей площади фотокатода ФЭУ. С помощью оптического клея борсодержащий сцинтиллятор приклеивался на световод-миксер света на основе полиметилметакрилата (ПММА), который также служил отражателем нейтронов. Другая сторона световода с помощью кремнеорганического (силиконового) клея приклеивалась к входному окну ФЭУ. Для замедления быстрых нейтронов

использовался полиэтилен (ПЭ) толщиной около 5 см. Для увеличения светосбора на ФЭУ, сцинтиллятор и световод были обернуты отражающей бумагой Tyvek.

Для уменьшения вклада от фоновых γ -квантов перед детектором устанавливается экран из свинца (Pb) толщиной 5 см. Детектор способен регистрировать как нейтроны, так и отдельные частицы, а также он может использоваться как в счетном режиме, так и в режиме измерения амплитуд.

Испытание предложенных схем показало, что создание детекторов нейтронов с большой эффективной рабочей площадью возможно на основе конструкции **Рис. 7в**, в которой используются спектросмещающие волокна и фотоприемники с высокой квантовой чувствительностью (около 80—90%) к длинноволновой области спектра (т.е. лавинных фотодиодов и др.). Для создания детектора нейтронов со средними значениями эффективной рабочей площади и съемом света на ФЭУ может быть использована конструкция **Рис. 7б**. Для создания быстрого детектора нейтронов с относительно небольшой эффективной рабочей площадью, способного надежно работать в условиях высоких загрузок, наиболее оптимальной оказалась конструкция детектора **Рис. 7а** со съемом света на ФЭУ.

На **Рис. 8** показана простая конструкция детектора быстрых нейтронов с размерами сцинтиллятора равными рабочей области фотокатода ФЭУ-110. С помощью кремнеорганического клея сцинтиллятор приклеивался к входному окну ФЭУ. В отличие от аналогичного детектора для регистрации замедленных нейтронов **Рис. 8а**, толщина используемого здесь сцинтиллятора составляет 75 мм и вокруг сцинтиллятора отсутствует замедлитель. В объеме сцинтиллятора происходит замедление быстрых нейтронов путем образования каскадов из протонов отдачи различных энергий. Сцинтилляция, вызванная каждым протоном отдачи, регистрируется ФЭУ. Для сокращения времени замедления быстрого нейтрона в сцинтиллятор вводят 0.2—0.3% бора.

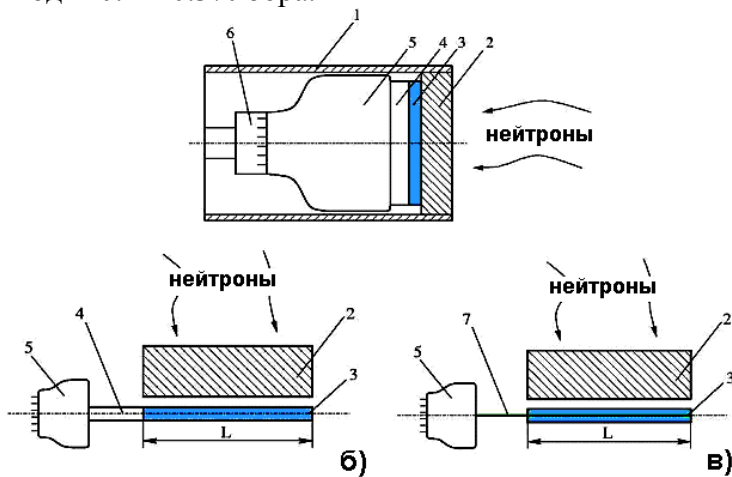


Рис. 7. Конструкции детекторов нейтронов, использующих замедлитель и тонкие пластмассовые сцинтилляторы: а) детектор с небольшой эффективной рабочей площадью для работы в условиях высоких загрузок; б) детектор с повышенной эффективной рабочей площадью; в) детектор с высокой эффективной рабочей площадью, использующий спектросмещающее волокно или световод сместитель спектра. 1 — полиэтиленовый корпус, 2 — полиэтиленовый замедлитель, 3 — тонкий сцинтиллятор, 4 — световод-смеситель света, который одновременно служит отражателем нейтронов, 5 — ФЭУ, 6 — умножитель напряжения для ФЭУ и электроника, 7 — спектросмещающее волокно (или световод сместитель спектра).

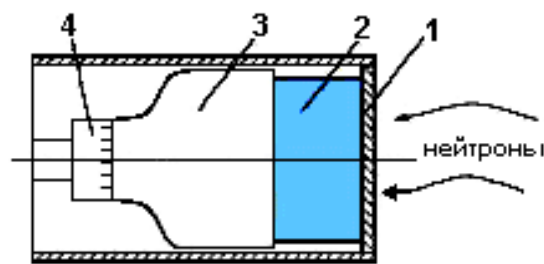


Рис. 8. Конструкция детектора нейтронов с толстым сцинтиллятором. 1 — корпус; 2 — толстый сцинтиллятор; 3 — ФЭУ; 4 — умножитель напряжения для ФЭУ и регистрирующая электроника.

Быстрые детекторы нейтронов используют на астрофизических станциях, а также при мониторинге мест хранения отработанного ядерного топлива.

В сцинтилляционных счетчиках для быстрых нейтронов используют смесь фосфора ZnS и водородсодержащего вещества, например органического стекла (плексиглас). Из такого фосфора готовят цилиндрические шайбы. Плохая прозрачность фосфора для испускаемого света ограничивает толщину шайб 2 - 5 мм. При таких толщинах фосфора эффективность счетчика к нейтронам невелика. Детектор слабочувствителен к γ -излучению.

В косвенных методах детектирования нейтронов сцинтилляционный счетчик регистрирует γ -излучение, возникающее при взаимодействии нейтронов с веществом, расположенным вне фосфора. Для регистрации γ -излучения применяют высокоэффективные сцинтилляционные счетчики с NaI или жидкий фосфор больших объемов. Поток нейтронов и γ -квантов коллимируют на радиатор. В радиаторе возникает захватное γ -излучение, которое регистрируется сцинтилляционным детектором. Следовательно, в косвенных методах детектирования нейтроны непосредственно не попадают в кристалл NaI или жидкий фосфор. При такой схеме детектирования γ -излучение, сопровождающее нейтроны, не создает нежелательного фона. Эффективность регистрации нейтронов по захватному γ -излучению в значительной степени зависит от четырех факторов. Во-первых, от материала радиатора, с которым взаимодействуют нейтроны. Чем больше

нейтронов поглощается в радиаторе, тем выше эффективность метода. Во-вторых, от среднего числа γ -квантов ν , испускаемых на один захват нейтрона. В-третьих, от телесного угла, под которым фосфор «видит» радиатор, и, в-четвертых, от эффективности фосфора к захватному γ -излучению.

Суммируя все четыре фактора, напишем формулу для расчета эффективности метода детектирования нейтронов по захватному γ -излучению:

$$\varepsilon_n = \frac{1}{4\pi} D \Omega \nu \varepsilon_\gamma, \quad (19)$$

где D — доля поглощенных нейтронов в радиаторе; Ω - телесный угол, рад; ν - множественность; ε_γ - средняя эффективность регистрации захватного γ -излучения фосфором.

Для увеличения эффективности системы радиатор окружают со всех сторон несколькими фосфорами или помещают его в сквозной канал, проходящий через фосфор. Этим увеличивается телесный угол Ω до (0,7 - 0,8) 4π .

Несмотря на то что фоновое γ -излучение, сопровождающее потоки нейтронов, непосредственно не попадает на фосфор, фон детектора нейтронов по захватному γ -излучению обычно имеет значительную величину. Он обусловлен как собственным фоном системы сцинтилляционного счетчика (особенно при больших размерах фосфоров), так и γ -фоном окружающего пространства. Величину γ -фона можно значительно уменьшить, воспользовавшись свойством (n, γ)-реакции в которой на один захваченный нейтрон одновременно испускается несколько γ -квантов. Для этого сцинтилляционные счетчики, окружающие радиатор, включают попарно в схемы совпадений таким образом, чтобы на регистрирующую систему проходил импульс, если в любых двух счетчиках одновременно регистрируются два γ -кванта. После радиационного захвата нейтрона в радиаторе испускается 4-5 γ -квантов. Они попадают в фосфоры нескольких счетчиков и с большой вероятностью регистрируются по крайней мере в каких-либо двух из них.

Такая система не регистрирует собственный фон фосфоров и γ -фон окружающей среды. Действительно, вероятность того, что в двух фосфорах одновременно возникнут вспышки света от γ -фона, очень мала. При схеме совпадений с разрешающим временем 10^{-7} сек появление одного случайного совпадения в 1 сек соответствует следующей интенсивности регистрации фонового γ -излучения на каждый фосфор:

$$2N_1 N_2 \tau = 1, \quad (20)$$

где τ - разрешающее время схемы совпадений, сек; N_1 , N_2 - скорости счета γ -фона каждым счетчиком, отсчет/сек. Если $N_1 = N_2 = N$, то при значении $\tau = 10^{-7}$ сек

$$N = \frac{1}{\sqrt{2\tau}} = 2,24 \cdot 10^3 \text{ отсчет/сек.}$$

Следовательно, лишь при скорости счета γ -фона более $2 \cdot 10^3$ имп/сек каждым счетчиком система зарегистрирует одно случайное совпадение фоновых импульсов.

Сцинтилляционный счетчик с такой системой подавления γ -фона имеет несколько меньшую эффективность регистрации нейтронов, чем один счетчик γ -квантов. Действительно, если эффективность одного счетчика к захватному γ -излучению равна ε , то эффективность двух одинаковых счетчиков в совпадении равна произведению эффективностей этих счетчиков: $\varepsilon' = \varepsilon^2$. Если радиатор окружен m счетчиками, включенными так, что совпадения в любых двух счетчиках регистрируются, то общая эффективность больше эффективности одного счетчика в число сочетаний из m счетчиков по два:

$$\varepsilon_0 = \varepsilon' \frac{m(m-1)}{2} = \varepsilon^2 \frac{m(m-1)}{2}. \quad (21)$$

При увеличении числа m значение ε_0 возрастает и при $m = 5$ или 6 становится близким к эффективности одного счетчика ε . При этом практически устраняется влияние γ -фона на результаты измерений.

В последнее время появились «нейтроновизеры», Примером может служить 100-канальный однокоординатный сцинтилляционный растровый детектор тепловых нейтронов, изготовленный на основе сцинтилляционного экрана $\text{ZnS}(\text{Ag})^6\text{Li}$. Чувствительный объем отдельного канала детектора имеет ширину 3 мм, высоту 120 мм и набран из трех слоев экрана для увеличения эффективности регистрации. Съем светового сигнала осуществляется с помощью спектросмещающих волокон, проложенных между отдельными слоями экрана. Эффективность регистрации тепловых нейтронов 70%. Каналы регистрации разделены кадмиевыми прокладками толщиной 1.5 мм. Детектор состоит из десяти независимых модулей, в каждом из которых расположены 10 каналов регистрации, электроника обработки сигнала, высоковольтное питание ФЭУ, а также электроника управления модулем и связи с компьютером.