

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

95-13

P13-95-13

В.А.Баранов, В.В.Жук, Э.М.Козулин, И.В.Покровский

ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
НЕЙТРОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ
НА ОСНОВЕ NE-213

1995

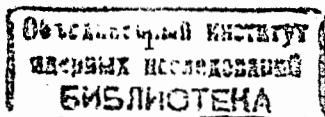
При экспериментальном исследовании угловых и энергетических распределений нейтронов в спонтанном и вынужденном делении, а также при взаимодействии тяжелых ионов с ядрами возникает задача регистрации нейтронов с высокой эффективностью в области энергий 0.5-50 МэВ.

Наиболее сложная проблема для детекторов с применением жидких сцинтилляторов – получение хорошего светосбора при высокой эффективности регистрации нейтронов, поскольку вероятность регистрации нейтрона определяется как вероятностью возникновения вспышки в сцинтилляторе при попадании в него нейтрона, так и вероятностью регистрации света от этой вспышки с помощью ФЭУ.

В работе [1] представлен позиционно-чувствительный нейтронный детектор (ПЧНД), позволяющий регистрировать нейтроны с высокой эффективностью. Детектор имеет форму цилиндра внутренним диаметром 60 мм и длиной 1 м с толщиной стенок 3 мм, заполненного жидким сцинтиллятором и просматриваемого с обоих торцов двумя ФЭУ. При создании ПЧНД был осуществлен метод регистрации нейтронов, основанный на фиксации трех параметров: времени пролета нейтронов, амплитуды и формы импульса детектора.

Выбор формы и отражающих материалов контейнера детектора производился на основе анализа расчетов сбора света в детекторе с желанием получить у него оптимальные характеристики при максимально эффективном светосборе и минимальном энергетическом пороге регистрации нейтронов.

Свет от сцинтилляционной вспышки ослабляется в результате ряда отражений от стенок контейнера и поглощения в сцинтилляторе и стенках контейнера (пропорционально числу отражений и



пути прохождения света). В больших ПЧНД это приводит к зависимости собирания света на ФЭУ от положения места возникновения сцинтилляций вдоль оси детектора. С одной стороны, такое изменение световыхода может быть использовано, чтобы получить дополнительную информацию о месте возникновения сцинтилляции и таким образом улучшить позиционное разрешение. С другой стороны, изменение световыхода вдоль оси детектора вызывает ухудшение отношения сигнала к шуму, что приводит к ухудшению энергетического, временного и позиционного разрешения. Более того, это приводит к зависимости эффективного энергетического порога и, следовательно, нейтронной эффективности от положения места возникновения сцинтилляций внутри детектора [2]. Таким образом, основными критериями для длинного ПЧНД являются: максимально постоянное значение сбора света вдоль сцинтиллятора и максимальное значение абсолютного световыхода. Поэтому зависимость светосбора ПЧНД от местоположения источника света вдоль длинной оси детектора должна быть учтена при анализе расчетов выхода света в длинном ПЧНД.

Для оценки эффективности светосбора в ПЧНД была использована программа PHOTON, специально созданная для расчета эффективности сбора света в сцинтилляционных счетчиках различной геометрии. В программе по методу Монте-Карло моделируется поведение света на границе двух сред с различными показателями преломления и разными длинами поглощения света. Программа написана на языке FORTRAN, использует библиотеку CERN (подпрограммы TIMEL, TIMEX и пакет HBOOK для получения гистограмм). Моделирование прохождения света начинается либо из заданной точки, либо случайной точки на линии, диске, в цилиндрическом объеме и т.д. Источнику света можно задать любое местоположение внутри объема сцинтиллятора. Для каждого фотона расчеты проводятся до тех пор, пока он либо достигнет фотокатода ФЭУ, либо поглотится в сцинтилляторе (или материале отражающего контейнера), либо отразится во внешнее пространство. Моделирование проводится для сцинтилляторов и световодов, ограниченных плоскими, сферическими и цилиндрическими поверхностями. Поверхности могут быть гладкими (зеркальными) или шероховатыми (диффузное отражение). На границе двух прозрачных сред с различными показателями преломления вероятность отра-

жения или преломления лучей рассчитывается по формулам Френеля. В случае полного внутреннего отражения вероятность отражения принимается равной 100%. Направление рассеяния света от шероховатой поверхности рассчитывается по закону Ламберта: $I = I_0 \cdot \cos(\phi)$. В случае применения сместителя спектра (шифтера) считается, что переизлучаются все попавшие на него фотоны. Для более корректного расчета в программу можно ввести спектры излучения сцинтиллятора и сместителя спектра, спектральные зависимости коэффициентов преломления и длин поглощения используемых веществ.

Некоторый анализ световых характеристик длинных позиционно-чувствительных детекторов с зеркальным и диффузным отражением был дан [2]. Коротко укажем, что применение контейнера с зеркальным отражением приводит к резкой неоднородности светособирания вдоль продольной оси детектора, а при использовании диффузного отражателя полностью теряется информация о местоположении точки возникновения сцинтилляции. В данном случае мы сравниваем световыход разных моделей детекторов относительно модели ПЧНД [1] с контейнером в виде трубы из кварцевого стекла, в котором применены фотоумножители ФЭУ-30 с диаметром фотокатода 50 мм (назовем ее трубой-образцом). Геометрические размеры труб при расчетах не меняются, т.к. они были выбраны из соображений получения высокой эффективности регистрации нейтронов при достаточно хорошем временном разрешении детектора, поскольку с увеличением толщины сцинтиллятора эффективность регистрации нейтронов увеличивается, но временное разрешение ухудшается.

В случае идеальной зеркальной трубы, без учета поглощения света в сцинтилляторе, все фотоны достигнут выходных окон детектора независимо от местоположения точки эмиссии света, т.е. светосбор будет равен 100%. Для идеальной стеклянной трубы обратно в сцинтиллятор отразятся только те фотоны, угол испускания которых больше критического угла падения света относительно нормали к плоскости отражения, определяемого как $\arcsin(n_2/n_1)$, где n_1 и n_2 – коэффициенты преломления для стекла и воздуха соответственно. Согласно расчетам, зависимость светосбора L от положения точки испускания фотонов для идеальной стеклянной трубы, без учета поглощения в сцинтилляторе, описы-

вается горизонтальной линией ($L=40\%$) в пределах ± 40 см относительно середины длины трубы. В реальных же контейнерах в результате поглощения в сцинтилляторе и в материале стенок контейнера наблюдается экспоненциальное уменьшение световыхода [3].

В ходе расчетов использовались следующие характеристики веществ:

NE-213: $n=1.508$ [4]; $l=2$ м [5],
 кварцевое стекло: $n=1.46$ [6]; $l=1$ м [2],
 стекло: $n=1.48$ [6]; $l=0.3$ м [2],
 алюминизированный майлар: $r=0.9$ [6],
 где n - коэффициент преломления;
 l - длина поглощения света;
 r - коэффициент отражения.

В расчетах фотокатод считался абсолютно черным, что, как показано в работе [3], в большинстве случаев не вносит существенной погрешности в результат. Координаты начала движения фотонов разыгрывались случайным образом внутри цилиндрического объема радиусом, равным внутреннему радиусу трубы и длиной 10 см. Таким образом труба была разделена на 10 равномерно светящихся секторов. Кривая светосбора при регистрации света обоими ФЭУ имеет минимум в середине детектора (см. рис.2 и 3), поэтому сбор света с середины трубы пропорционален порогу регистрации нейтронов по энергии. Кривая светосбора для трубы-образца на всех рисунках приведена сплошной линией. Для наглядного сравнения минимум этой кривой мы принимаем равной 1.0.

Ниже приведены результаты расчетов (в относительных единицах) для контейнеров из стеклянной трубы, трубы-образца и кварцевой трубы, обернутой алюминизированным майларом.

На рис.1 показан сбор света на один из фотоумножителей диаметром 50 мм. Видно, что наилучший сбор света обеспечивает контейнер из кварцевого стекла, обернутого алюминизированным майларом, т.к. в стеклянной трубе поглощается больше света в материале контейнера из-за разницы в длинах поглощения света.

Контейнер из плексигласа не рассматривался, т.к. сцинтиллятор NE-213 по отношению к нему является химически агрессивной средой.

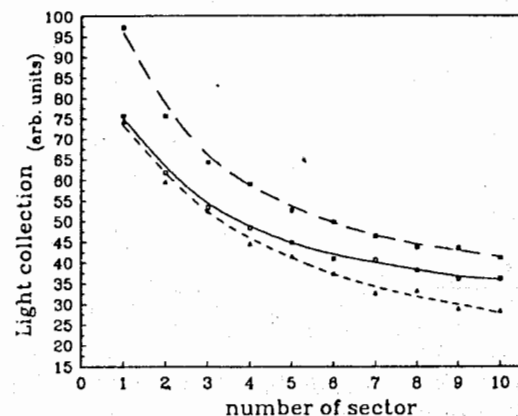


Рис.1. Светосбор для стеклянной трубы (линия короткого пунктира), трубы-образца (сплошная линия) и кварцевой трубы, обернутой алюминизированным майларом (линия длинного пунктира). Диаметр фотокатода 50 мм.

Ход зависимости сбора света на оба ФЭУ для трубы-образца и кварцевой трубы, покрытой зеркально отражающим материалом, приведен на рис.2.

Видно, что зеркально отражающий материал с коэффициентом отражения 0.9 увеличивает сбор света с середины детектора примерно в 1.2 раза.

Согласно расчетам, достаточно хороший сбор света достигается при использовании фотоумножителей с диаметром фотокатода, близким к внешнему диаметру трубы. Результаты расчетов для контейнера из кварцевой трубы с диаметрами фотокатодов ФЭУ, равными 70 мм, приведены на рис.3.

Сравнительный анализ сбора света на фотокатоды ФЭУ диаметром 70 мм (короткий пунктир) и 50 мм показывает, что отношение количества собираемого света с середин детекторов равно 1.8, а это приблизительно соответствует отношению площадей фотокатодов с диаметрами 70 и 50 мм. Для контейнера из кварцевой трубы, покрытой алюминизированным майларом, (длинный пунктир), свет с которой собирается на фотокатоды диаметром 70 мм, полученное

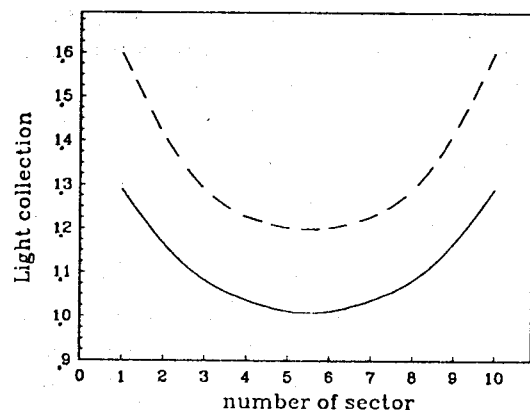


Рис.2. Светосбор для трубы-образца и кварцевой трубы, обернутой алюминизированным майларом. Диаметры фотокатодов 50 мм.

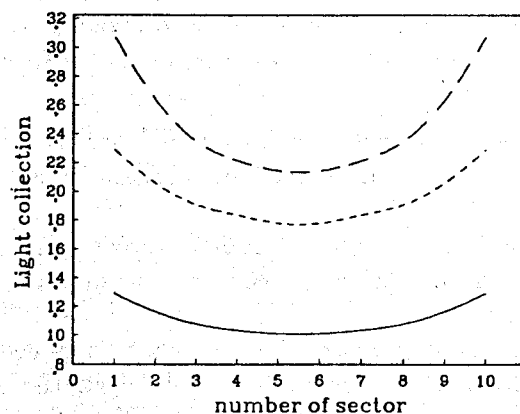


Рис.3. Сбор света в контейнерах из трубы-образца на ФЭУ с фотокатодами диаметром 50 мм (сплошная линия), 70 мм (линия короткого пунктира) и контейнера из кварцевой трубы, обернутой алюминизированным майларом, на ФЭУ с фотокатодами 70 мм (линия длинного пунктира).

отношение количества собранного света (1.8) возрастает до значения 2.1 .

Была рассмотрена и более сложная модель детектора, в которой кварцевая труба была окружена со всех сторон четырьмя пластинами-световодами из органического стекла ($n=1.5$, $l=2m$) с добавкой сместителя спектра и обернутых в алюминизированный майлар с внешней стороны. Сбор света рассчитывался на фотокатоды диаметром 100 мм. Моделировался шифтер типа Y7 [7], спектр излучения которого удовлетворительно согласуется со спектральной характеристикой SbCs фотокатода ФЭУ-30. Однако светосбор в этом случае мало отличается от светосбора в кварцевой трубе с отражающим покрытием и диаметрами фотокатодов 70 мм (см. линию длинного пунктира на рис.3). Главным образом это объясняется поглощением собственного излучения шифтера Y7 в результате частичного перекрытия спектров излучения и поглощения.

Оценки по методу Монте-Карло показывают, что наиболее оптимальный материал контейнера, с точки зрения сбора света, — это кварцевое стекло. Диаметр фотокатода ФЭУ должен быть близок к внешнему диаметру трубы. Желательно применять обертку (без оптического контакта с трубой) из зеркально отражающего материала, как довольно простой и дешевый метод увеличения количества собираемого света. Вариант детектора со световодами с добавкой сместителя спектра представляется сложным и требует специального рассмотрения. Такой вариант, возможно, хорош для более длинных ПЧНД, когда зеркально отражающая обертка поглощает большое количество света. Главная проблема состоит в подборе шифтера, который бы конвертировал практически весь сцинтилляционный свет и в то же время слабо поглощал собственное излучение. Реальные световые характеристики такого детектора можно определить только экспериментально.

Авторы выражают искреннюю признательность профессору Ю.Э.Пенионжкевичу за постоянный стимулирующий интерес к данной работе и Е.С.Кузьмину за плодотворные дискуссии при разработке программы PHOTON.

ЛИТЕРАТУРА

1. Alkhazov I.D., Daniel A.V., Kozulin E.M., Kuznetsov A.V., Penionzhkevitch Yu.E., Rubchenya V.A. JINR Rapid Communications, N6[57]-92, p.80.
2. Netter P., Lassen L., Schreck R. Nuclear Instruments and Methods, v.185, 1981, p.165.
3. Цирлин Ю.А., Светособирание в сцинтилляционных счетчиках. М.: Атомиздат, 1975.
4. W.R. Leo, Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments.
5. Kuijper P., Tiesinga C.J., Jonker C.C., Nuclear Instruments and Methods, v.42, 1966, p.56
6. Справочник физических величин, М.: Атомиздат, 1992.
7. Акимов Ю.К., Физика элементарных частиц и атомного ядра, т.25, вып.2, 1994.

Рукопись поступила в издательский отдел
19 января 1995 года.

Баранов В.А. и др.

P13-95-13

Оптимизация выходных характеристик нейтронных детекторов на основе NE-213

В работе рассмотрены методы оптимизации выходных характеристик детекторов нейтронов, основанных на жидком сцинтилляторе NE-213. Представлен сравнительный анализ расчетов сбора света различными моделями длинных позиционно-чувствительных детекторов, на основе чего сделаны выводы об оптимальном варианте конструкции ПЧНД.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им.Г.Н.Флерова ОИЯИ при финансовой поддержке РФФИ, контракт №94-02-06478.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 1995

Перевод авторов

Baranov V.A. et al.

P13-95-13

Optimization of Yield Characteristics of Neutron Detectors on the Base of NE-213

Methods of optimization of the yield characteristics of neutron detectors based on the liquid scintillator NE-213 have been discussed. A comparative analysis of calculating light collection by different models of a long position-sensitive detectors on the base of which the conclusions of optimal variant of the PSND construction have been made are presented.

The investigation has been performed at the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, JINR, under the financial support of the RFRF, contract №94-02-06478.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 1995