

470  
ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лаборатория ядерных проблем

В.С.Евсеев, В.И.Комаров, В.З.Куш, В.С.Роганов,  
В.А.Черногорова, М.М.Шимчак

P-470

СЛОИСТЫЙ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ ДЕТЕКТОР  
ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ  
В ПРИСУТСТВИИ  $\gamma$ -КВАНТОВ

В.С.Евсеев, В.И.Комаров, В.З.Куш, В.С.Роганов,  
В.А.Черногорова, М.М.Шимчак

Р-470

СЛОИСТЫЙ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ ДЕТЕКТОР  
ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ  
В ПРИСУТСТВИИ  $\gamma$ -КВАНТОВ

Приводится описание слоистого детектора, имеющего высокую эффективность регистрации нейтронов и малочувствительного к  $\gamma$ -квантам. Детектор предназначается для регистрации нейтронов с энергией в интервале 5-20 Мэв.

Для решения многих задач ядерной физики и физики элементарных частиц требуются детекторы нейтронов, позволяющие с высокой эффективностью /  $\sim 10\%$  / регистрировать быстрые нейтроны на фоне  $\gamma$ -квантов. Такой фон особенно опасен, когда его источником является сама мишень.

До последнего времени такие детекторы были неизвестны. С конца 1958 года появились сообщения <sup>/1-3/</sup> о создании нейтронного детектора, в котором отделение протонов отдачи от электронов основано на различии во временных характеристиках световых вспышек, вызванных этими частицами в сцинтилляторах.

В настоящей статье описывается еще один тип детектора - слоистый детектор, предназначенный для эффективной регистрации быстрых нейтронов на фоне  $\gamma$ -квантов. После того, как этот детектор был изготовлен и испытан, в литературе появилось краткое сообщение <sup>/4/</sup> об использовании детектора такого же типа, не содержащее, однако, подробного его описания.

#### Принцип работы и конструкция детектора

Принцип работы слоистого детектора основан на использовании различия в пробегах протонов и электронов одной и той же энергии <sup>x/</sup>. Детектор для регистрации нейтронов с энергией  $E_n / E_{n \text{ макс}} > E_n > E_{\text{пор}}$  состоит из нескольких сцинтиллирующих слоев толщиной  $h$ . Пусть  $E_e$  есть энергия электрона, дающего в сцинтилляторе световую вспышку той же величины, что и протон отдачи с энергией  $E_{n \text{ макс}}$ . Тогда толщина  $h$  выбирается меньше пробега электрона с энергией  $E_e$ , но больше пробега протона отдачи с энергией  $E_{n \text{ макс}}$ . При этом условии электроны с энергией большей  $E_e$  смогут попасть в соседний слой или пройти через несколько слоев.

---

<sup>x/</sup> Ранее в нашей лаборатории была сделана попытка использовать слоистый сцинтиллятор для выделения короткопробежных протонов на фоне длиннопробежных <sup>/5/</sup>.

В детекторе соседние слои разделены светонепроницаемыми перегородками и свет от всех четных слоев собирается на один фотоумножитель, а от всех нечетных - на другой. Если энергия электрона достаточна, чтобы он проник в соседний слой, то в обоих ФЭУ одновременно возникают импульсы. Электронное устройство отбрасывает совпадающие импульсы и пропускает для амплитудного анализа одиночные импульсы, возникающие в любом из двух ФЭУ. Это позволяет отделить протоны отдачи от электронов, образованных  $\gamma$ -квантами.

Изготовленный нами слоистый детектор состоит из 28 дисков пластического скintиллятора /на основе полистирола с добавками 2% р-терфенила + 0,2%  $\alpha$ -NPO/ диаметром 80 мм и толщиной  $h = 4$  мм.  $h$  определялось из условий, о которых уже говорилось выше, для  $E_{пор} = 5$  Мэв и  $E_{ампл} = 20$  Мэв.

Соседние диски отделялись друг от друга черной бумагой толщиной 0,05 мм и плотно сжимались. Оптического контакта бумаги с дисками не было. Детектор состоит из двух идентичных частей, расположенных одна за другой. В каждой части свет от четных дисков направляется световодами из плексигла-са на два ФЭУ-29 /см. рис.1/.

Чтобы свет из четных дисков не попадал на ФЭУ, осматривающие нечетные диски /и наоборот/, боковые поверхности дисков были разделены на четыре равных части и две противоположные покрывались алюминиевой фольгой.

Всего в детекторе имеется 8 световодов и 8 ФЭУ-29, каждый из которых помещен в отдельную магнитную защиту из мягкого железа. Оптического контакта между скintилляторами и световодами не было. Это приводило к небольшому уменьшению амплитуды импульса с выхода ФЭУ, но упрощало работу с детектором.

#### Электроника детектора

Все 8 ФЭУ работали при напряжении около 1000 в, причем напряжение на каждом ФЭУ можно было регулировать отдельно. Каждые четыре ФЭУ, осматривающие четные или нечетные диски, имели общую нагрузку 2 ком.

Блок-схема электроники показана на рис. 2.

Импульсы от каждой группы ФЭУ через предусилители ПУ1, ПУ2, кабели РК-50 длиной 50 м поступают на вход усилителей У1, У2 /с регулируемым коэффициентом усиления 1-1,5/, предназначенных для выравнивания амплитуд между группами ФЭУ. Максимальная амплитуда импульсов от  $\gamma$ -квантов  $^{60}\text{Co}$  на входе У1 или У2 была около 0,1 в.

С выхода каждого из этих усилителей импульсы поступают в сумматор и на усилители У3, У4 /с коэффициентом усиления  $\sim 400\%$ . Схема совпадений с разрешающим временем  $\sim 10^{-7}$  сек вырабатывает запирающий импульс, который формируется ограничивающим усилителем и поступает в запирающее устройство. Длительность запирающего импульса  $0,6 \cdot 10^{-6}$  сек.

Сумматор характеризуется величиной коэффициента суммирования  $S = \frac{A_{1+2}}{A_{1,2}}$  где

$A_{1,2}$  - амплитуда импульса на выходе сумматора, когда на один из входов подается импульс амплитуды  $A$ ;  $A_{1+2}$  - амплитуда импульса на выходе, когда на оба входа подаются импульсы с амплитудой  $1/2 A$ .

В работе использовался сумматор, изображенный на рис. 3, имеющий  $S = 0,97$  в рабочем диапазоне амплитуд.

После сумматора импульсы дополнительно усиливаются и задерживаются во времени так, что попадают в запирающее устройство на середину соответствующих им запирающих импульсов. Одиночные импульсы, возникающие в любой из двух групп ФЭУ, проходят через запирающее устройство и поступают в анализирующее устройство.

### Основные характеристики детектора

При отключенной схеме совпадений и коэффициенте суммирования  $S = 1$  слоистый детектор не отличается от детектора с монолитным сцинтиллятором и имеет высокую эффективность регистрации как нейтронов так и  $\gamma$ -квантов. При включенной схеме совпадений эффективность регистрации нейтронов уменьшается незначительно, в то время как эффективность регистрации  $\gamma$ -квантов уменьшается в значительно большей степени.

В качестве характеристики уменьшения эффективности регистрации нейтронов и  $\gamma$ -квантов введем коэффициент отбрасывания  $K$ , определяемый следующим соотношением:

$$K = \frac{N^-}{N^+}$$

где  $N^-$  - счет на некотором пороге интегрального дискриминатора при выключенной схеме совпадений,  $N^+$  - счет на том же пороге дискриминатора при включенной схеме совпадений.

Необходимо отметить, что коэффициент отбрасывания  $\gamma$ -квантов при падении  $\gamma$ -квантов параллельно оси детектора больше, чем при их изотропном распределении. Все измерения параметров детектора проводились при расположении источников исследуемых частиц на оси детектора, на расстоянии приблизительно 30 см от центра детектора, поскольку детектор предназначен для регистрации нейтронов из мишени, расположенной на оси детектора в присутствии  $\gamma$ -квантов, также образующихся в мишени.

Порядок величины  $K_\gamma$  можно определить из следующих простых соображений. Для оценки эффективности отбрасывания при  $E_\gamma < 10$  Мэв достаточно рассмотреть кинематику комптоновского рассеяния в пластинах сцинтиллятора. В пластине толщиной 4 мм электроны оставляют  $\lesssim 1,5$  Мэв. Если порог срабатывания запирающего устройства соответствует 0,2 Мэв, как это осуществлено в рассматриваемом детекторе, то все комптоновские электроны отдачи с энергией  $> 2$  Мэв будут заведомо отброшены. Если установить порог регистрации в анализирующем устройстве соответствующий 2 Мэв, то выше этого порога  $\gamma$ -кванты могут быть зарегистрированы лишь в результате двойного комптоновского рассеяния в пластинах одной четности. Это произойдет только при условии, что в обоих случаях рассеяния электроны не вызовут срабатывания запирающего устройства, а сумма энергий обоих комптоновских электронов больше 2 Мэв. В результате этого коэффициент отбрасывания снижается до нескольких десятков.

Следует заметить, что точное вычисление  $K_\gamma$  затруднительно, так как при этом необходимо учитывать многократное рассеяние, флуктуации ионизационных потерь и тормозное излучение электронов. Ясно однако, что чем меньше

толщина диска  $k$ , тем больше  $K_{\gamma}$  для данной энергии  $\gamma$ -квантов, и что чем больше толщина всего детектора, тем больше вероятность многократного комптоновского рассеяния и, следовательно, тем меньше  $K_{\gamma}$ .

Измерения  $K_{\gamma}$  на различных порогах регистрации электронов были проделаны для  $\gamma$ -квантов с энергией 1,33 Мэв /  $Co^{60}$  /, 2,75 Мэв /  $Na^{24}$  / и 4,5 Мэв / реакция  $p + B^{11} \rightarrow C^{12*}$  /<sup>x/</sup>, соответственно. Результаты измерений представлены на рис. 4, где приведены значения  $K_{\gamma}$  в зависимости от порога регистрации электронов.

Представляет интерес значение коэффициента отбрасывания электронов, энергия которых достаточна для того, чтобы пройти через все диски детектора, т.е. больше 20 Мэв. Измерения дали значение коэффициента отбрасывания больше 1000. Приведем также значения коэффициента отбрасывания в том случае, когда запирающий импульс образуется совпадением импульсов от двух ФЭУ, осматривающих один и тот же диск. Этот коэффициент на пороге 1 Мэв /  $Co^{60}$  / оказался равным 100 и  $\sim 1000$  на пороге 2 Мэв /  $Po-Be$  /.

Выше уже отмечалось, что в слоистом детекторе при включенной схеме совпадений имеет место незначительное отбрасывание нейтронов. Это отбрасывание обусловлено как прохождением некоторого числа протонов отдачи в соседние диски, так и двойным рассеянием нейтронов в дисках разной четности.

Для измерения коэффициента отбрасывания нейтронов  $K_n$  и определения эффективности слоистого детектора снимался интегральный спектр протонов отдачи от нейтронов с энергией 14,8 Мэв, образующихся в реакции  $t+d \rightarrow He+n$ . Спектр протонов отдачи при включенной схеме совпадений показан на рис. 5, а значения  $K_n$  для разных порогов регистрации протонов отдачи приведены на рис. 4; из этого рисунка видно, что значение  $K_n$  не превышает 1,5.

Эффективность слоистого детектора при включенной схеме совпадений на пороге  $E_{пор} = 5$  Мэв оказалась  $\approx 15\%$ ; при выключенной схеме совпадений эффективность на этом же пороге была  $\approx 20\%$ . Эта величина совпадает с расчетным значением эффективности монолитного сцинтиллятора тех же размеров.

<sup>x/</sup> Для осуществления этой реакции, а также реакции  $t+d \rightarrow He+n$  использовалась ускорительная трубка на 300 Кэв<sup>16/</sup>.



Разрешающая способность по энергии оценивалась как из спектра протонов отдачи от нейтронов с энергией 14,8 Мэв /см. рис.5/, так и из амплитудного распределения импульсов от электронов с энергией  $\sim 100$  Мэв, проходящих через детектор параллельно его оси. Полуширина линии была /20-25%.

Разрешение, в основном, определяется неоднородностью светосбора в каждом диске и от разных дисков, а также неточностью / 10 % / подгонки амплитуд каждого из восьми ФЭУ. Неоднородность светосбора из одного диска обычно характеризуется величиной  $\Delta = \frac{2(I_{\text{макс}} - I_{\text{мин}})}{I_{\text{макс}} + I_{\text{мин}}} \cdot 100\%$ , где  $I_{\text{макс}}$  и  $I_{\text{мин}}$  - наибольшее и наименьшее значения анодного тока ФЭУ, которые получаются при облучении различных точек сцинтиллятора. Эта величина при использовании двух ФЭУ, осматривающих диск, и отсутствии отражающего покрытия на диске составляла 9%. Измерения, при которых диск осматривался одним ФЭУ, дали величину  $\Delta = 25\%$ . При покрытии диска тонким слоем алюминия путем напыления в вакууме, значения  $\Delta$  составляют, соответственно, 19% и 85%.

Введенные выше коэффициенты отбрасывания правильно описывают свойства детектора только в том случае, когда коэффициент суммирования  $S = 1$ . Действительно, уменьшение  $S$  приводит к уменьшению амплитуд суммируемых импульсов в спектре, полученном при выключенной схеме совпадений, так что часть спектра вблизи его верхней границы будет обусловлена только одиночными импульсами. Поэтому коэффициент отбрасывания вблизи максимальной амплитуды будет спадать к единице. Наоборот, при  $S > 1$  коэффициент отбрасывания вблизи максимальной амплитуды стремится к бесконечности.

Эта зависимость  $K$  от  $S$  иллюстрируется рис. 6, где приведены результаты измерений  $K$  /проделанных с  $Co^{60}$ / вблизи максимальной амплитуды при разных значениях  $S$ . Как указывалось выше, в электронной схеме детектора использовался сумматор с  $S = 0,97$ , так что приведенные значения  $K_u$  и  $K_n$  несколько занижены.

Изучалась также зависимость коэффициента отбрасывания от коэффициентов усиления усилителей  $U_3$  и  $U_4$ . Эта зависимость имела вид насыщающейся кривой и рабочая точка была выбрана в начале насыщения.

Сравнение слоистого детектора, изготовленного нами, со слоистым детектором, использованным в <sup>14</sup>, показывает, что последний имеет значение  $K_u$



на пороге регистрации электронов 2,2 Мэв /  $E_{\gamma} = 2,75$  Мэв / примерно вдвое больше. Это связано с тем, что в детекторе<sup>/4/</sup> толщина каждой пластины в 1,2 раза, а общая толщина в 2,7 раза меньше, чем в детекторе, описание которого приведено выше. Последнее обстоятельство делает детектор<sup>/4/</sup> примерно вдвое менее эффективным к нейтронам.

Что касается высокоэффективного нейтронного детектора другого типа<sup>/2/</sup> для регистрации нейтронов в присутствии гамма-квантов, то относительно большого детектора такого типа данных почти нет. По-видимому, он имеет  $K_{\gamma}$  больше, чем  $K_{\gamma}$  слоистого детектора. Недостатком детектора такого типа<sup>/2/</sup> является большое мертвое время /  $5 \cdot 10^{-6}$  сек /, что приводит к уменьшению эффективности регистрации нейтронов при большом счете как гамма-квантов так и нейтронов.

Слоистый детектор может быть применен при значительно больших нагрузках, так как уменьшение эффективности к нейтронам обусловлено только плотностью и длительностью запирающих импульсов, вызванных гамма-квантами. В детекторе, изготовленном нами, длительность запирающего импульса составляла  $0,6 \cdot 10^{-6}$  сек, но она может быть уменьшена до величины  $10^{-8}$  сек, определяемой длительностью световой вспышки в сцинтилляторе.

Слоистый детектор имеет наибольшее отбрасывание для гамма-квантов, направленных вдоль его оси. Однако он может успешно применяться и для уменьшения изотропно распределенного внешнего фона гамма-квантов. Так, например, включение схемы совпадений в детекторе, расположенном в измерительном павильоне синхроциклотрона Объединенного института ядерных исследований, в 20 раз уменьшило внешний фон на пороге, соответствующем энергии электрона, равной 3 Мэв.

Детектор нейтрона такого типа может быть выполнен в виде слоистого пропорционального счетчика. При этом амплитуды импульсов от протонов и электронов одной и той же энергии отличаются незначительно, и при регистрации нейтронов на некотором пороге  $K_{\gamma}$  будет значительно больше, чем  $K_{\gamma}$  на том же пороге в том случае, когда применен органический сцинтиллятор. Особенно удобен слоистый пропорциональный счетчик для регистрации нейтронов малой энергии.

В заключение авторы выражают благодарность И.В.Сизову за помощь при работе на ускорительной трубке, а также Ю.К.Акимову и В.А.Запевалову за ценные советы при разработке электроники детектора.

Рукопись поступила в издательский отдел  
27 января 1960 года.

### Л и т е р а т у р а

1. R. Owen. *Nucleonics* 16, N 6, 54, (1958).
2. A. Astbury, J.M. Blair, M. Hussian, M.A.R. Kemp, H. Mairhead, R.G.P. Voss. *Phys.Rev. Letters* V. 3, N 10, 476, (1959).
3. F. Brooks. *Nuclear Instruments* 4, N 3, 151, (1959).
4. W.E. Baker, C. Rubbia. *Phys.Rev. Letters* Vol. 3, N 3, (1959).
5. Ю.К.Акимов. /1954/.
- . В.И.Салацкий, И.В.Сизов. Препринт ОИЯИ /1959/.

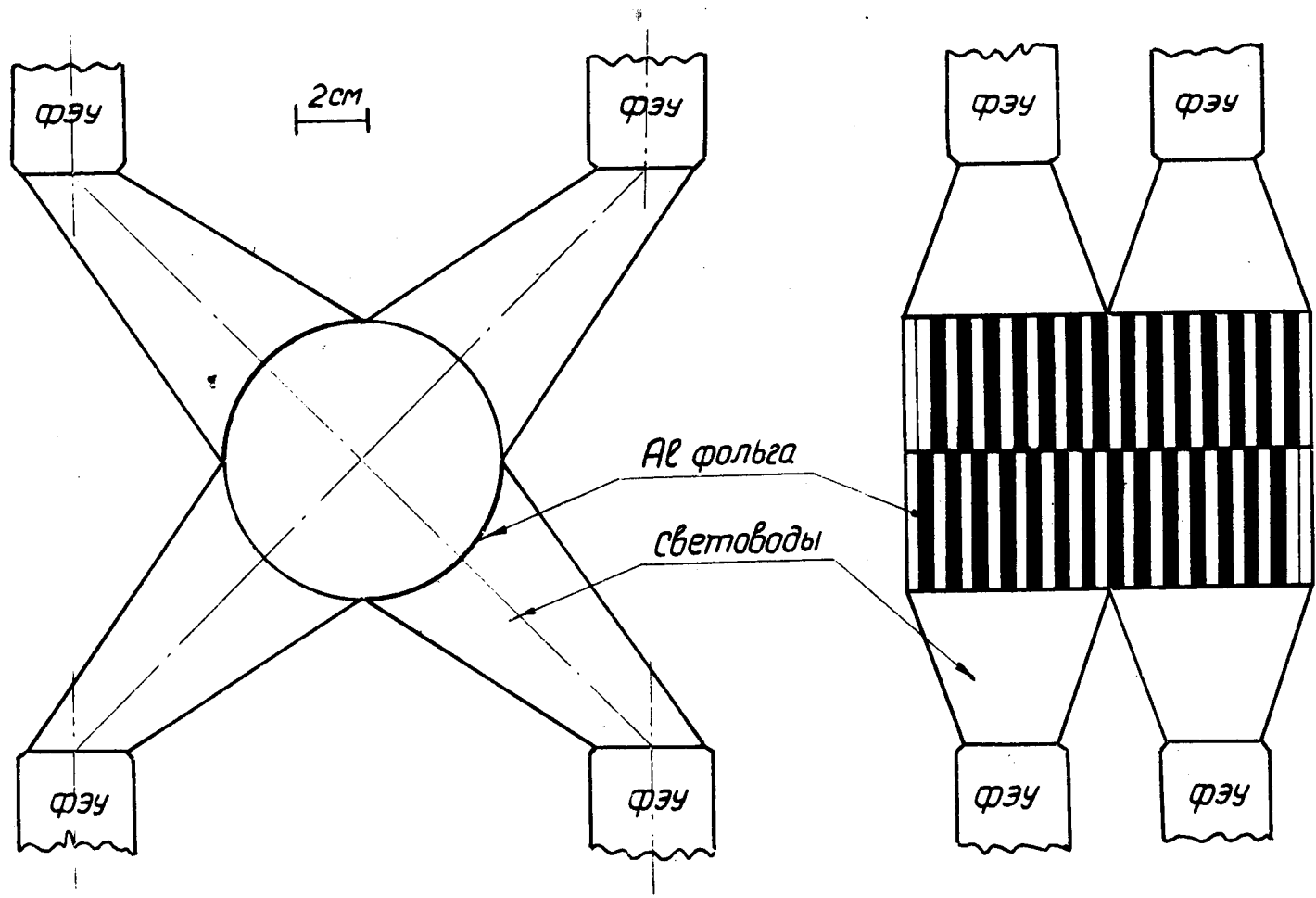


Рис. 1. Схема расположения дисков сцинтиллятора, световодов и фотоумножителей в детекторе.

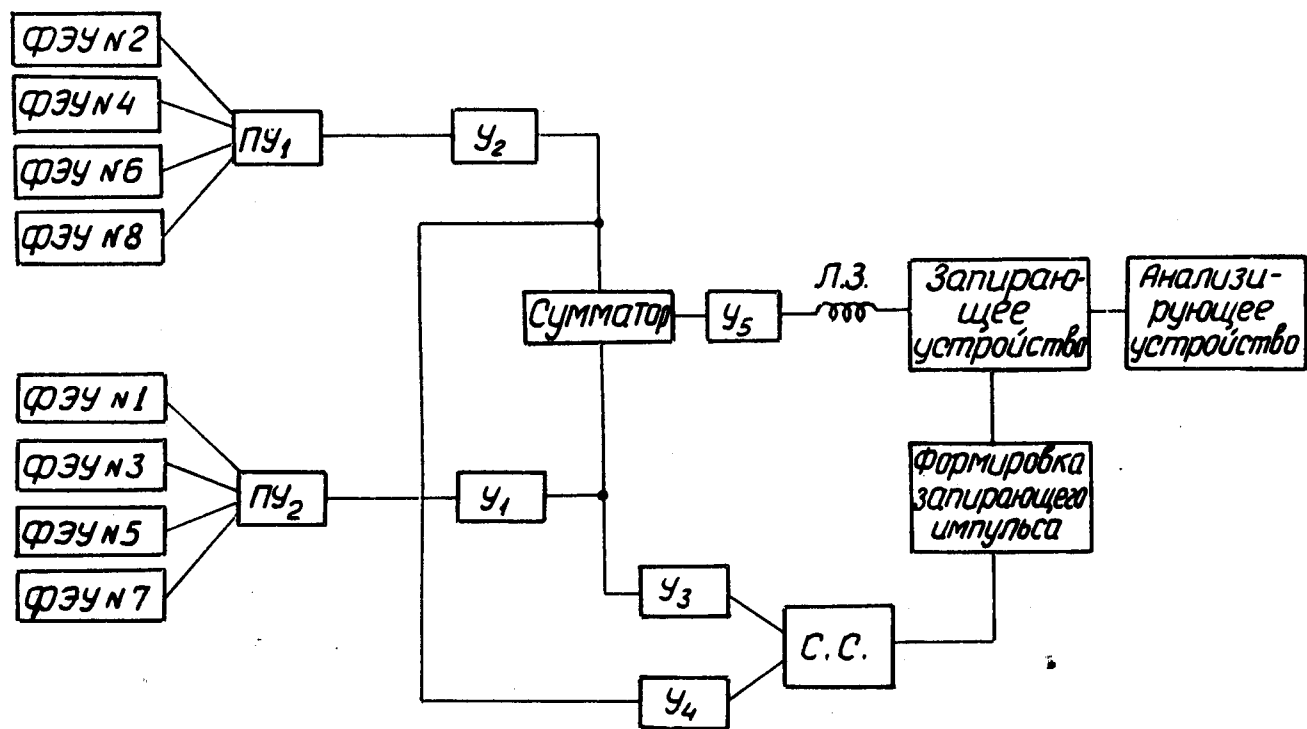


Рис. 2. Блок-схема электроники детектора.

ПУ1, ПУ2 - предусилители;  $У_1$ ,  $У_2$ ,  $У_3$ ,  $У_4$ ,  $У_5$  - усилители;  
 СС - схема совпадений; Л.З. - линия задержки.

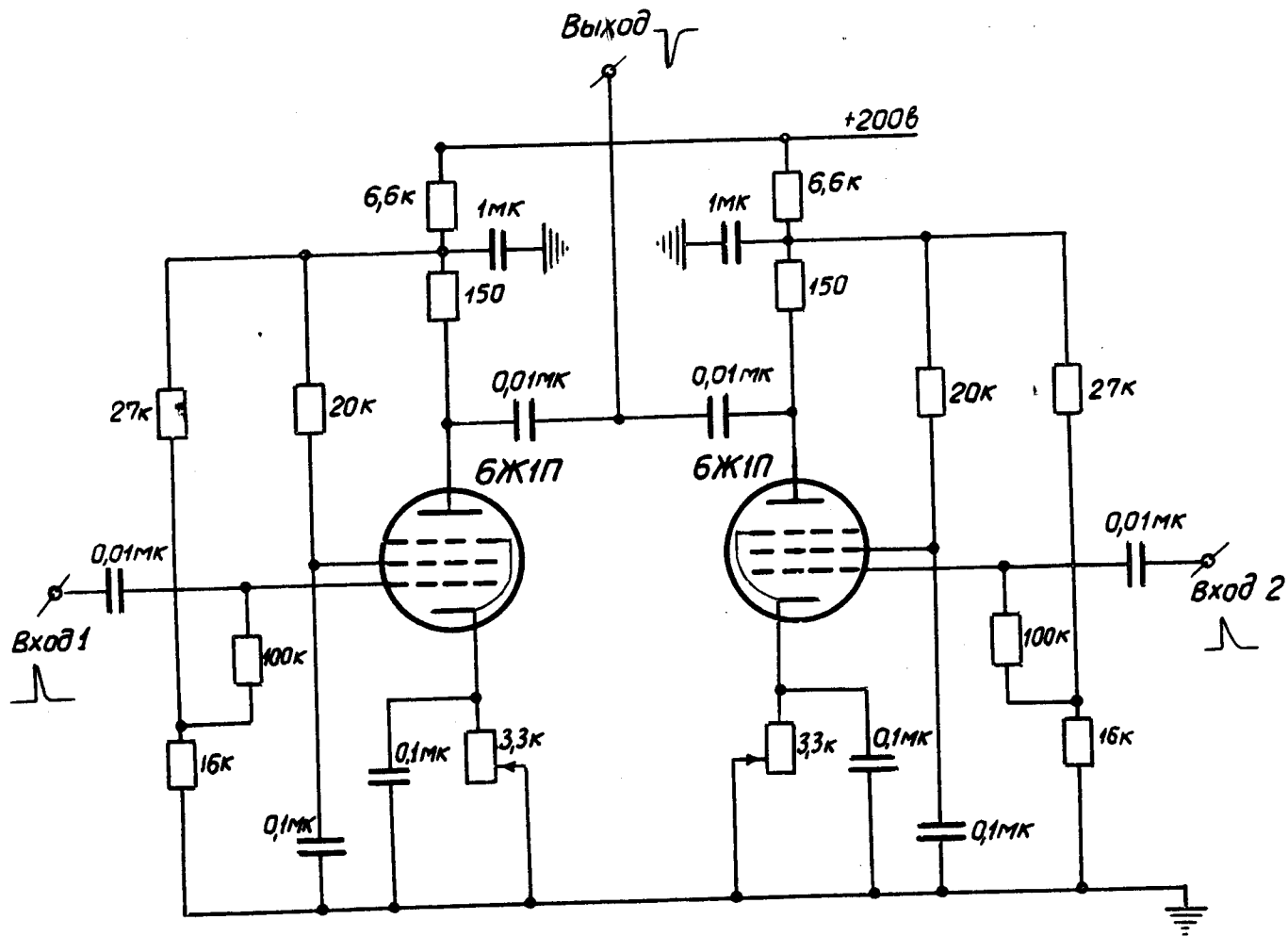


Рис. 3. Принципиальная схема сумматора.  
 $S = 0,97$ , коэффициент усиления  $K = 0,4$  для амплитуды импульса  
 $A \leq 0,6$  вольта.

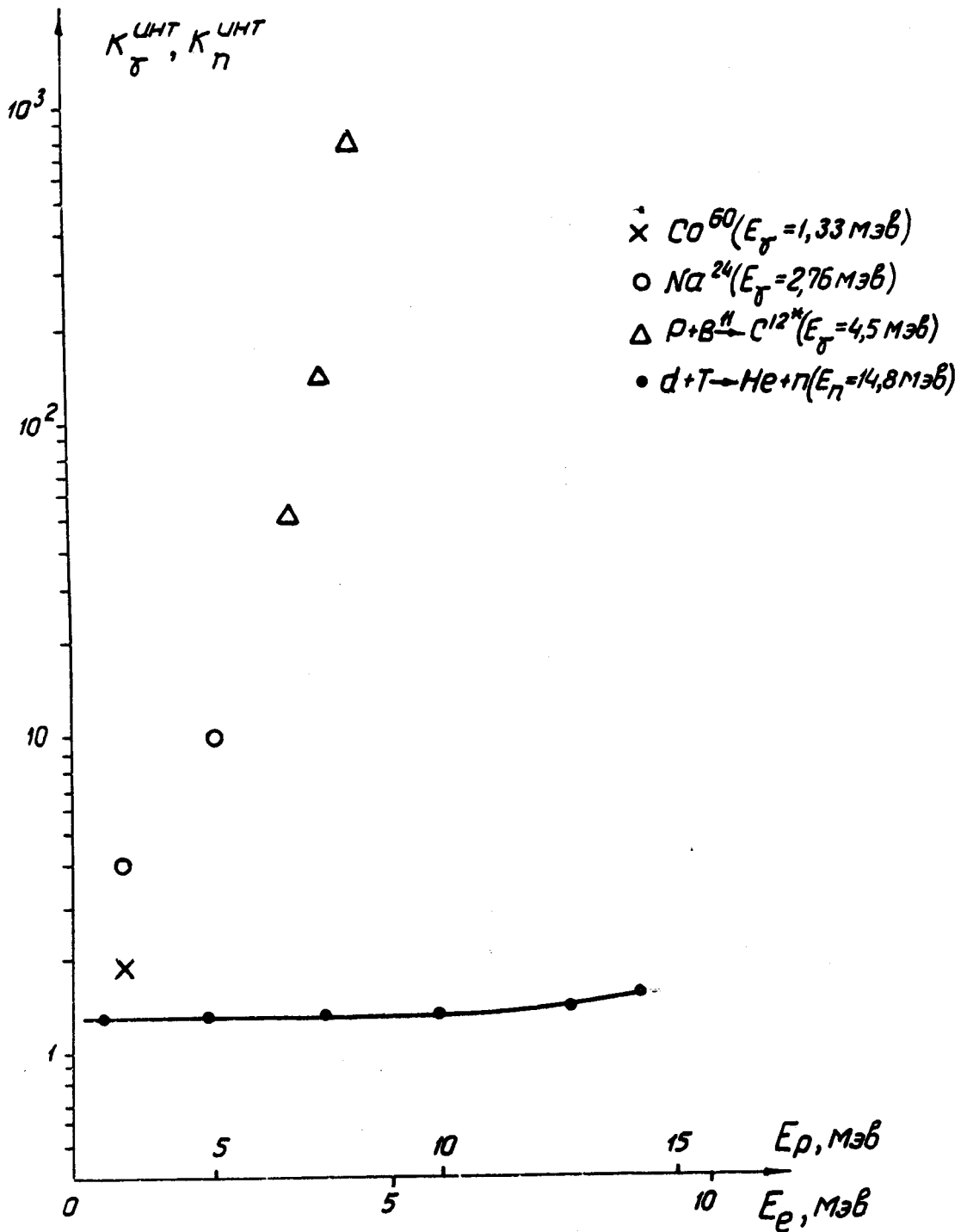


Рис. 4. Коэффициенты отбрасывания  $K_{\gamma}^{count}, K_n^{count}$  для разных  $E_{\gamma}, E_n$   
 $E_p$  - порог регистрации протонов отдачи;  $E_e$  - порог регистрации электронов.

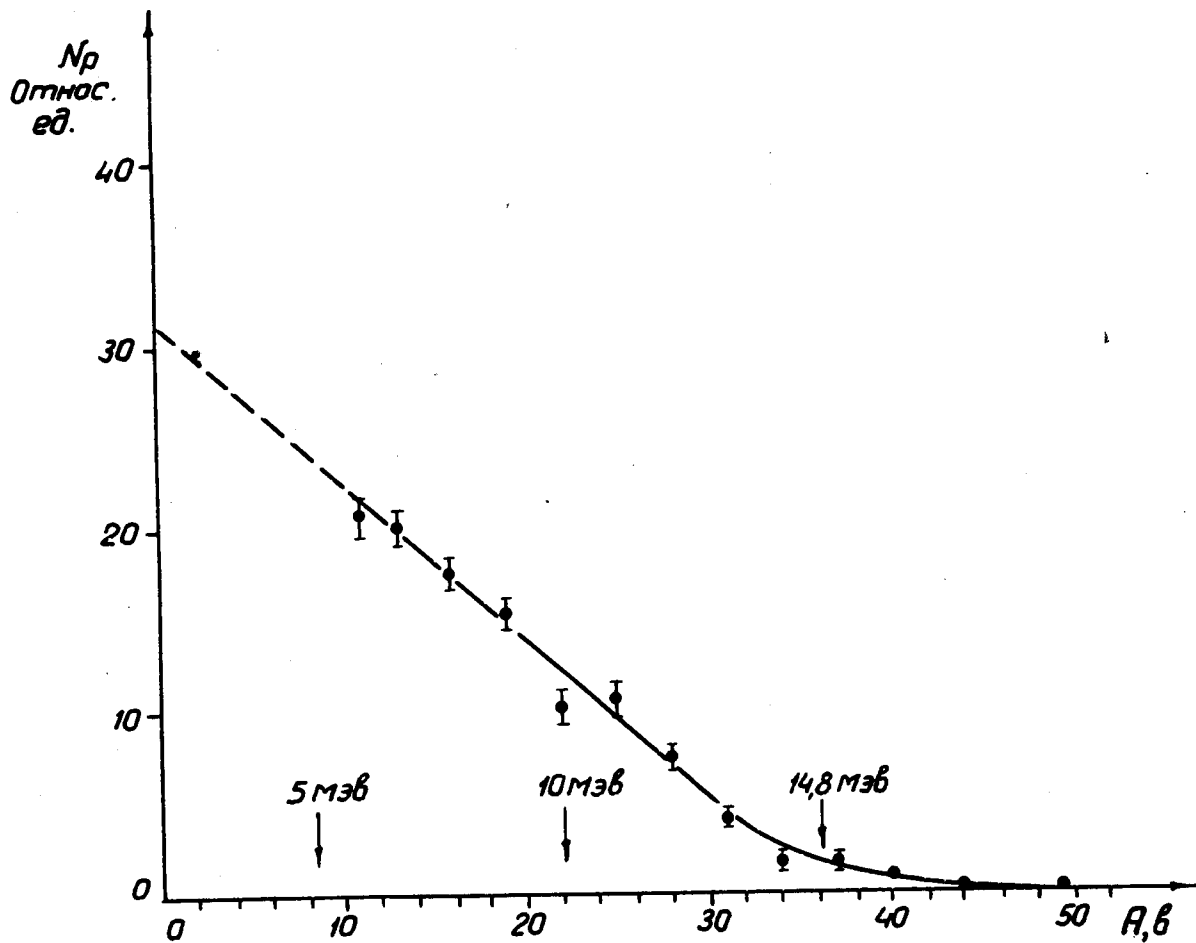


Рис. 5. Интегральный спектр протонов отдачи, образованный нейтронами с энергией 14,8 Мэв. Стрелками указаны энергии протонов отдачи.



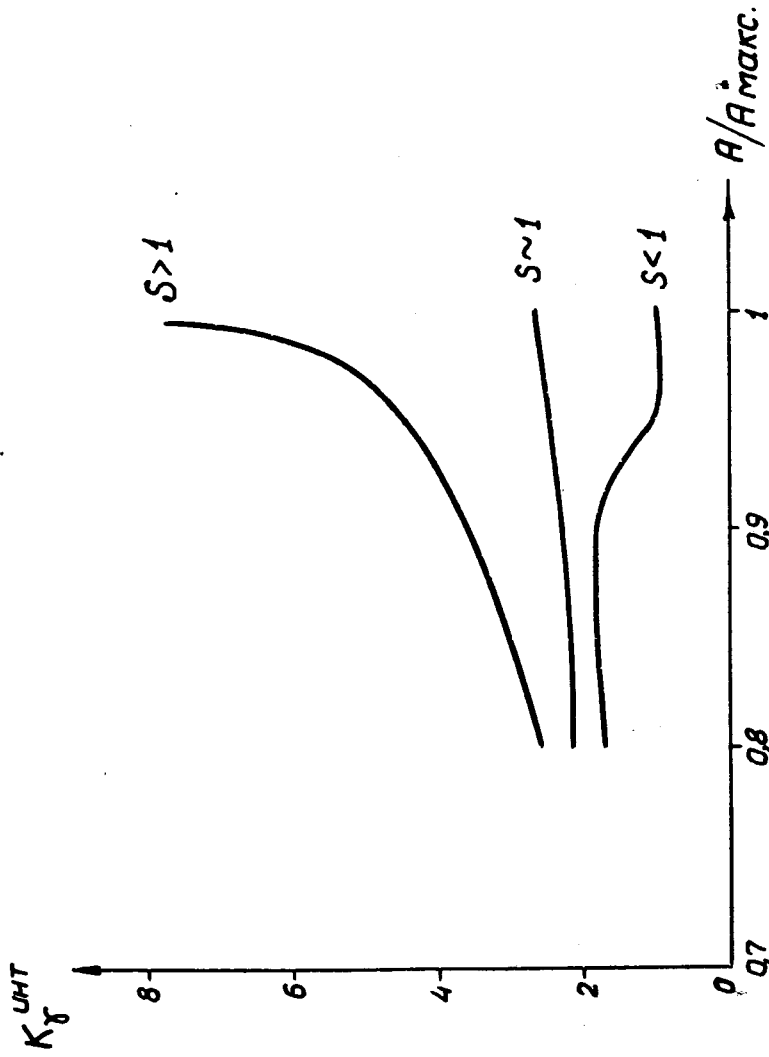


Рис. 6. Зависимость  $K_{\delta}^{сум}$  от коэффициента суммирования  $S$