

A-391



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

1 - 6905

АКИМОВ

Юрий Константинович

ПРИМЕНЕНИЯ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ
И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ
В ИССЛЕДОВАНИЯХ НА УСКОРИТЕЛЯХ ЧАСТИЦ
ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Специальность 01.04.01 - экспериментальная физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

(Диссертация написана на русском языке)

Дубна 1973

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований.

Официальные оппоненты:

член-корреспондент АН Армянской ССР	Г.А. Вартапетян,
доктор физико-математических наук	Б.Б. Говорков,
доктор физико-математических наук	С.М. Поликанов.

Ведущее научно-исследовательское учреждение: Институт ядерной физики СО АН СССР.

Автореферат разослан " " 1973 года.

Защита диссертации состоится " " 1973 года на заседании Ученого совета Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь Совета
кандидат физико-математических наук

Ю.А. Батусов

1 - 6905

АКИМОВ
Юрий Константинович

ПРИМЕНЕНИЯ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ
И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ
В ИССЛЕДОВАНИЯХ НА УСКОРИТЕЛЯХ ЧАСТИЦ
ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Специальность 01.04.01 - экспериментальная физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

(Диссертация написана на русском языке)



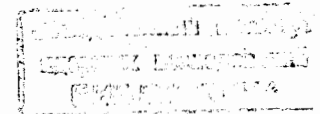
Развитие современных экспериментальных исследований с элементарными частицами и атомными ядрами привело в последние годы к широкому распространению сцинтилляционных и полупроводниковых детекторов ядерных частиц и излучений. Отличительной чертой сцинтилляционных детекторов, или счетчиков, является их высокое быстродействие. Полупроводниковые детекторы обеспечивают большую точность энергетических измерений и все более приближаются к сцинтилляционным счетчикам по быстродействию.

К ценным качествам сцинтилляционных счетчиков относится сравнительная простота в изготовлении сцинтилляторов практически любых размеров и конфигураций, что особенно важно в экспериментах с частицами высоких энергий.

Полупроводниковые детекторы имеют меньшие размеры и используются преимущественно для исследования процессов, в которых образуются короткопробежные частицы или мягкие гамма-кванты. Следует отметить, что благодаря прогрессу в совершенствовании характеристик полупроводниковых детекторов и замечательным успехам в ядерной электронике область таких исследований непрерывно расширяется.

Комплекс разнообразных вопросов, связанных с применениями сцинтилляционных и полупроводниковых детекторов в физических исследованиях, был рассмотрен в работах /II-38/, выполненных автором или с его участием, которые и явились основой настоящей диссертации.

Материал диссертации изложен в шести главах.



Глава I. Временное разрешение сцинтилляционного счетчика

Важнейшая характеристика сцинтилляционного счетчика — его разрешающее время — определяется целым рядом факторов и процессов, происходящих в сцинтилляторе и фотоумножителе. В теоретической работе^{/1/}, посвященной временному разрешению сцинтилляционного счетчика, рассматривалась статистика появления фотоэлектронов в начальные моменты световой вспышки, спадающей по экспоненте. При этом не учитывались статистические флуктуации суммарного количества фотоэлектронов R , относящегося к одному акту высвечивания. В некоторых последующих работах предпринимались попытки решить задачу в более полном виде — с учетом флуктуаций R и для любых Q фотоэлектронов, возникающих в течение вспышки, однако были допущены серьезные погрешности, что отмечено в нашей публикации^{/14/}, а также в^{/2/}. Выполненное нами корректное решение задачи^{/14, 13/} приводит к следующему выражению для $W(t)$ -плотности вероятности появления произвольно взятого Q -го фотоэлектрона:

$$W(t) = \sum_{R=Q}^{\infty} \frac{R_0^R e^{-R_0}}{(R-Q)!(Q-1)!} \varphi^{Q-1} (1-\varphi)^{R-Q} \frac{d\varphi}{dt}$$

Здесь R_0 — среднее значение R , $\varphi = (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$, а τ — постоянная времени высвечивания. Это же выражение было получено несколько позже другим методом в работе^{/2/}. Основываясь на данной формуле, можно определить среднее время появления Q -го фотоэлектрона и дисперсию этого времени. В главе приведены соответствующие формулы и графики, позволяющие найти разрешающее время сцинтилляционного счетчика, если влияние фотоумножителя

еще невелико, например при использовании сравнительно медленных неорганических кристаллов. Однако в случае применения органических сцинтилляторов возникает необходимость учитывать временные флуктуации, обусловленные процессами собирания электронов в фотоумножителе, а также конечную скорость нарастания сцинтилляционной вспышки. В работе^{/15/} вышеуказанное выражение для $W(t)$ мы отнесли к плотности вероятности появления на аноде фотоумножителя Q -го одноэлектронного импульса, приняв за R сумму одноэлектронных импульсов, составляющих сигнал, и определив функцию φ как вероятность образования за время t отдельно взятого одноэлектронного импульса. Эта функция была найдена, как и в^{3, 4/}, с помощью часто используемого в радиотехнике интеграла типа

$$U_{\text{вых}}(t) = \int_0^t U'_{\text{вх}}(\tau) h(t-\tau) d\tau,$$

где $U_{\text{вх}}$ и $U_{\text{вых}}$ — соответственно входной и выходной сигналы, а h — переходная функция. В нашем случае $U'_{\text{вх}} = I(t)$ — функция высвечивания сцинтиллятора с постоянной времени спада τ_1 и нарастания τ_2 , $h = f(t)$ — функция, описывающая временной разброс одноэлектронных импульсов в промежутке фотокатод — первый диод и далее в диодной системе. Мы нашли, что экспериментальным данным хорошо соответствует функция типа

$$f(t) = \frac{1}{8\tau_3} \left(\frac{t}{\tau_3}\right)^8 e^{-\frac{t}{\tau_3}},$$

где τ_3 — постоянная времени, зависящая от типа фотоумножителя.

Ширина на полувысоте Δ_W распределения $W(t)$ является основной величиной, определяющей разрешающее время сцинтилляционного счетчика. Дополнительные временные флуктуации, также учтенные в диссертации, возникают из-за протяженности одноэлек-

тронных импульсов и разброса коэффициента вторичной эмиссии с динодов.

Результаты вычислений представлены графически для различных параметров сцинтилляционного счетчика и разных интенсивностей световых вспышек. В качестве примера на рис. I приведена зависимость разрешающего времени при $R_0 = 500$ от порога h , измеряемого в долях амплитуды импульсов тока на выходе фотомножителя XP1020, сочлененного со сцинтиллятором типа "Натон-136". Расчетная кривая I лежит между двумя экспериментальными кривыми 2 и 3, полученными на разных экземплярах фотомножителей^{/5/}. В области самых малых порогов кривая I совпадает с кривой 4 из другого эксперимента^{/6/}. Видно хорошее согласие расчетных значений с экспериментальными данными, которое оказалось значительно лучше, чем в работах, выполненных другими авторами. Примечательно, что кривые имеют минимум. В диссертации анализируются причины появления минимума, а также зависимость его глубины и положения от различных параметров сцинтилляционного счетчика.

Глава 2. Сцинтилляционные методы регистрации частиц высоких энергий

Практически ни один эксперимент с частицами высоких энергий не обходится без отбора актов совпадений. Регистрация частиц исследуемой ядерной реакции на большом фоне различных излучений от ускорителя и сопутствующих процессов требует обычно применения схем совпадений с высоким разрешением. Рассмотренное в первой главе временное разрешение сцинтилляционного счетчика определяет

лишь принципиальные возможности, на пути к реализации которых возникают вопросы, связанные с регистрирующей электроникой. Во второй главе описывается влияние различных факторов на разрешающее время схемы совпадений, таких как длительность и форма импульсов, уровень и стабильность порогов и т.д. Предлагается способ улучшения временного разрешения и рассматриваются отдельные особенности, характерные для экспериментов на ускорителях, приводящие к увеличению числа ложных отсчетов. Анализируются "аппаратурные" и "физические" причины, обуславливающие потери отсчетов при регистрации совпадений и неэффективность антисовпадений. Приводятся полученные с участием автора результаты одного из первых исследований эффекта ослабления конверсионной эффективности пластического сцинтиллятора с ростом удельной ионизации^{/16/}. Рассматриваются методы идентификации частиц по величине ионизации, пробегу, импульсу и скорости, которые нашли применения в наших исследованиях, описанных в следующей, третьей главе. Содержание второй главы диссертации, основанное преимущественно на работах автора, является сокращенным изложением монографии^{/II/}, изданной как в СССР, так и за рубежом (США).

Глава 3. Экспериментальные устройства со сцинтилляционными счетчиками

Исследование редких или запрещенных процессов с участием элементарных частиц и атомных ядер при высоких энергиях представляет значительный научный интерес с точки зрения экспериментальной проверки принципов симметрии микромира. Обычно изучение таких

процессов затруднено из-за большого уровня фона от ускорителя и сопутствующих реакций и часто оказывается возможным только при идентификации частиц одновременно по многим их параметрам, доступным для измерений. Например, процессы $d+d \rightarrow \pi^0 + He^4$ и $d+d \rightarrow \gamma + He^4$, сечения которых не превышают 10^{-8} от полного сечения (d,d)-взаимодействий, исследовались нами^{/17/} путем идентификации α -частиц по их пробегу, скорости, импульсу и величине ионизации. При этом для улучшения амплитудного разрешения был разработан и применен метод, в котором из импульсов, поступавших с нескольких спектрометрических счетчиков, включенных на совпадения, отбирался путем амплитудной дискриминации сигнал с наименьшей амплитудой^{/16/}.

В ряде случаев сцинтилляционному детектору можно придать дополнительные качества, составив сцинтиллятор из отдельных слоев. В частности, чередование слоев сцинтиллятора и плотного вещества - конвертора позволяет получить большую эффективность при регистрации нейтронов или гамма-квантов (используется также в калориметрах). Одним из первых, а возможно и первым детектором такого типа, был предложенный нами в 1955 г. для регистрации быстрых нейтронов детектор^{/18/}, применявшийся затем в исследованиях квазиупругого (p,n)-рассеяния. Еще раньше, в 1953 г., автор предложил регистрировать короткопробежные частицы на большом фоне от проходящих высокоэнергетических частиц пучка с помощью детектора, составленного из сцинтилляционных пластин и двух фотоумножителей, регистрирующих световые вспышки отдельно с четных и нечетных слоев и включенных на антисовпадения^{/11/}. Впоследствии детектор аналогичной конструкции успешно применялся для регистрации нейтронов с энергией в несколько Мэв с эффективным подавлением фона от постороннего

гамма-излучения^{/17/}. В главе рассматривается способ подсоединения двух фотоумножителей к слоистому сцинтиллятору, который при построении сцинтилляционного годоскопа может позволить сократить на порядок число фотоумножителей, если энергия, теряемая частицей в сцинтилляторе, составляет около 10 Мэв или более.

В ряде экспериментов интенсивность световой вспышки на фотокатоде умножителя оказывается небольшой, поэтому необходимо знать амплитуду сигнала, соответствующего одному фотоэлектрону.

Одноэлектронные импульсы измерялись нами с помощью световых источников, позволявших освещать фотокатод отдельными фотонами^{/19/}. При этом зависимость скорости счета от напряжения питания фотоумножителя, работающего в линейном режиме, имела плато. Отсюда следовал простой способ определения средней амплитуды одноэлектронных импульсов. Такой амплитуде должен соответствовать порог дискриминатора, который при фиксированном напряжении питания на фотоумножителе уменьшает число отсчетов вдвое по сравнению с имеющимся в области плато. В главе приводятся также результаты измерений шумов отдельных экземпляров фотоумножителей типа ФЭУ-30 и ФЭУ-36.

Современные исследования на ускорителях и других физических установках предъявляют серьезные требования к электронной аппаратуре, которая с появлением транзисторов стала изготавливаться в виде отдельных блоков, легко заменяемых в ходе эксперимента. Из таких функциональных блоков, как схемы совпадений и антисовпадений, усилители, дискриминаторы, линейные ворота и т.д., была создана экспериментальная установка^{/20-23/}, позволившая наблюдать на пионном пучке от синхротрона Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ редкий процесс типа $\pi^- + p \rightarrow e^- + e^+ + n$ при энергии

275 Мэв. Сечение этого процесса в выбранной геометрии опыта (углы вылета электронов и позитронов — около 90° относительно пучка пионов) составило $d\sigma/d\Omega_1 d\Omega_2 = (3,0 \pm 0,8) \cdot 10^{-23} \text{ см}^2/\text{стерад}^2$.

При разработке аппаратуры особое внимание было уделено получению высокоэффективных антисовпадений на интенсивном пучке частиц, и выполненная нами схема успешно действовала в условиях больших загрузок счетчиков ($\sim 6 \cdot 10^6$ имп/сек).

Аналогичные функциональные блоки были применены нами также при построении спектрометра для измерения угловых гамма-гамма корреляций, действующего в настоящее время в Физическом институте АН НРБ/24/. Отличительной особенностью спектрометра является высокое качество стабилизации амплитудных показаний, получаемых со сцинтилляционных детекторов на кристаллах $\text{NaI}(\text{Te})$, которое было достигнуто введением в усилители обратной связи с использованием источников света.

Глава 4. Формирование импульсов в полупроводниковых детекторах

В книге по полупроводниковым детекторам/12/ нами был проведен анализ процессов сбора заряда в плоских $p-i-n$ - и $p-n$ -переходах. Этот материал изложен в данной главе. Ниже приводятся полученные выражения, позволяющие оценить форму и амплитуду импульсов в детекторах толщиной W с электрическим полем \mathcal{E} при подвижности носителей μ , длине трека d и полном заряде освобожденных носителей Q .

Если частица входит со стороны отрицательного потенциала $p-i-n$ -перехода, то на его электродах электроны наводят следующий заряд:

$$Q_n = \frac{\mu_n \mathcal{E}}{W} Q t \quad \text{при } t=0-t_1,$$

где $t_1 = \frac{W-d}{\mu_n \mathcal{E}}$ — время, через которое колонка из электронов подойдет к положительному электроду,

$$\text{и } Q_n = Q \left[\frac{W-d}{W} + \frac{(t-t_1)\mu_n \mathcal{E}}{W} - \frac{(t-t_1)^2(\mu_n \mathcal{E})^2}{2Wd} \right]$$

для $\frac{W-d}{\mu_n \mathcal{E}} \leq t \leq \frac{W}{\mu_n \mathcal{E}}$ — время полного собирания электронов.

Заряд, наводимый дырками в течение времени их вхождения в отрицательный электрод от $t=0$ до $t = \frac{d}{\mu_p \mathcal{E}}$, составляет

$$Q_p = Q \left[\frac{t\mu_p \mathcal{E}}{W} - \frac{t^2(\mu_p \mathcal{E})^2}{2Wd} \right].$$

В $p-n$ -переходах заряд, обусловленный электронами, равен

$$Q(t) = Q \left(1 - \frac{d}{2W} \right) (1 - e^{-t/\tau}),$$

где численно τ [нсек] $\approx \rho$ [ком]; здесь ρ — удельное сопротивление материала. Заряд от дырок существенно ниже, если регистрируются короткопробежные частицы, пробег которых заметно меньше толщины чувствительного слоя детектора, что чаще всего и бывает на практике.

В конце главы рассмотрены процессы, вызывающие флуктуации заряда, снимаемого с детектора.

Глава 5. Применения полупроводниковых детекторов в экспериментальной физике

В главе проанализированы причины, определяющие энергетическое и временное разрешение устройств с полупроводниковыми детекторами^{/12, 13/}. Рассмотрена специфика их применения в исследованиях с частицами высоких энергий и приведены результаты одного из первых исследований^{/25/}, в котором нами экспериментально было показано, что удельные ионизационные потери высокоэнергетических частиц в полупроводниковом детекторе описываются распределением Ландау и данный тип детектора может быть использован как $\frac{dE}{dx}$ - счетчик в опытах на ускорителях.

В ряде экспериментов можно воспользоваться фотоэлектрическими свойствами полупроводникового детектора, отличающегося компактностью, стабильностью и слабой чувствительностью к магнитному полю. Наши исследования^{/26, 27/} показали, что квантовый выход фоточувствительного полупроводникового детектора в видимой и начальной инфракрасной области близок к единице и что такой прибор является весьма совершенным быстродействующим фотодиодом, линейно преобразующим световые сигналы в электрические с амплитудой вплоть до сотни вольт. С помощью полупроводниковых детекторов - фотодиодов нами проводились измерения макроструктуры пучков синхротрона на Лаборатории ядерных проблем^{/28/}.

Реализация возможностей, которые дает такой замечательный прибор, как полупроводниковый детектор, зависит прежде всего от характеристик регистрирующей электроники. В главе описаны отдельные электронные схемы^{/29, 30/} и значительное место отведено весьма актуальной в настоящее время проблеме создания прецизионных спектрометрических систем с одновременным использованием энергетической и временной информации. Рассмотрены особенности, возникающие при временных измерениях с германиевыми детекторами, и представлены электронные системы^{/31, 32/}, обеспечивающие высокое временное и энергетическое разрешение. Рис. 2 демонстрирует результаты, полученные при измерении совпадений между импульсами полупроводникового детектора ($V \approx 2 \text{ см}^3$) и сцинтилляционного счетчика, составленного из стильбена и фотоумножителя XP1021^{/32/}. В случае регистрации гамма-квантов в энергетическом диапазоне более чем 100:1 (10+1330 кэв - кривая D) разрешающее время системы равнялось 2 нсек. При этом положение максимумов временных пиков, соответствовавших отдельным линиям, сдвигалось в данном диапазоне всего на 1,2 нсек. Разрешающее время на линиях 50 кэв (A), 511 кэв (B) и 1330 кэв (C) составило соответственно 15,6 нсек, 2,7 нсек и 1,1 нсек. Примечательной и важной особенностью приведенных временных спектров является очень низкий уровень фона, который даже на линии 50 кэв лежит ниже 0,01 высоты пика. Это на порядок лучше соответствующих результатов других авторов. В настоящее время серия таких систем для прецизионных временных и энергетических измерений с успехом применяется в экспериментах на пучках мюонов синхротрона ЛЯП ОИЯИ.

В отдельных исследованиях возникает необходимость использовать мозаику из полупроводниковых детекторов, которые для сокраще-

ния количества элементов электронной аппаратуры могут быть включенными в линию задержки, выполняя в ней функции конденсаторов. В главе рассматривается способ улучшения временного разрешения такого устройства^{/33/}.

Глава 6. Методы исследования процессов упругого рассеяния частиц в области малых передаваемых импульсов

Наиболее яркая роль полупроводниковых детекторов в физике высоких энергий связана, пожалуй, с исследованиями процессов рассеяния частиц на малые углы. Первое предложение изучать такие процессы путем регистрации частиц отдачи и измерения их энергии было сделано автором еще в 1953 году, и для этой цели на пучке протонов с энергией 660 Мэв применялся^{/II/} слоистый детектор, описанный в главе 3. Однако успешная реализация электронного метода исследований процессов рассеяния частиц вышеуказанным путем относится к 1964 году, когда нами был введен в камеру синхрофазотрона ОИЯИ полупроводниковый детектор и измерены энергетические спектры вторичных частиц, вылетающих под определенными углами из пленочной полиэтиленовой мишени^{/34, 35/}. Типичный вид спектра показан на рис. 3. На некотором уровне фона отчетливо выделяется пик от протонов отдачи. По сравнению с фотоэмульсионной техникой, применявшейся ранее для определения углов вылета и импульсов протонов отдачи^{/8/}, электронный метод регистрации отличается несравненно большей скоростью набора статистики и позволяет проводить измерения с более короткопробежными частицами отдачи. С помощью данного метода регистрации при участии автора были измерены^{/36/}

дифференциальные сечения упругого pp - и pd -рассеяния на малые углы и получены следующие значения параметров наклона:

$$\theta_{pp} = (7,9 \pm 0,7) (\text{Гэв}/c)^{-2} \text{ и } \theta_{pd} = (36 \pm 0,7) (\text{Гэв}/c)^{-2}.$$

Аналогичный метод регистрации частиц отдачи полупроводниковыми детекторами нашел затем успешное применение в экспериментах на других ускорителях: в ИФВЭ^{/9/}, Батавии (США)^{/10/} и в Ереванском физическом институте, где на электронном ускорителе с нашим участием было исследовано упругое ep -рассеяние при энергии 4,4 Гэв^{/37/}. При этом в отличие от предыдущих экспериментов спектры протонов отдачи измерялись отдельным детектором сразу в широком интервале кинематических углов (см. рис. 4), что достигалось применением длинных детекторов (площадью $40 \times 10 \text{ мм}^2$). После вычета фона, который измерялся на углеродной мишени, спектры давали информацию о ходе дифференциального сечения в зависимости от величины переданного импульса q^2 . На основе этих данных было определено поведение электрического фактора протона вблизи нулевых передаваемых импульсов, что позволило найти электрический радиус протона непосредственно, без каких-либо модельных предположений, которые делались ранее при обработке результатов, полученных в области больших q^2 . Значение электрического радиуса протона оказалось равным $(0,79 \pm 0,04) \phi$.

Серьезная трудность при постановке экспериментов на внутренних пучках частиц ускорителей была связана с недостаточной радиационной стойкостью полиэтиленовой пленочной мишени. Под действием интенсивного потока частиц пленка в месте прохождения пучка довольно быстро темнела и разрушалась. Эту трудность нам удалось преодолеть, создав мишень в виде вращающегося диска^{/38/}, что в десятки раз увеличило срок службы мишени и позволило проводить

непрерывные сеансы измерений в течение нескольких суток. Мишень аналогичной конструкции используется в настоящее время также в экспериментах на ускорителе в Батавии^{10/}.

В конце главы рассматривается дальнейшее развитие методов регистрации процессов рассеяния частиц с помощью полупроводниковых и сцинтилляционных детекторов и связанные с этим перспективы новых исследований. Показывается, что измерение энергетических спектров частиц отдачи и использование соответствующей информации, которую дают рассеянные частицы, позволяют поставить целый ряд интересных экспериментов на пучках пионов, гиперонов, гамма-квантов и протонов сверхвысоких энергий. Рассматривается возможность прецизионных измерений малых углов рассеяния релятивистских частиц и координат их входа в мишень с помощью полупроводниковых детекторов.

З а к л ю ч е н и е

Итоги исследований, на которых основана настоящая диссертация, кратко сводятся к следующему:

I. Предложен и развит электронный метод исследования процессов упругого рассеяния частиц на малые углы путем регистрации частиц отдачи и измерения их энергии полупроводниковыми или сцинтилляционными детекторами. Появление такого метода и разработка с участием автора соответствующей электронной аппаратуры обеспечило развитие целого направления исследований на ускорителях частиц высоких энергий.

2. Выполнен при участии автора с применением развитого им метода ряд новых физических экспериментов:

а) Измерены дифференциальные сечения протон-протонного и протон-дейтронного рассеяний в области малых переданных импульсов при энергии частиц первичного пучка, равной 4 Гэв.

б) На внутреннем пучке ускорителя электронов с энергией 4,4 Гэв исследовано упругое электрон-протонное рассеяние в ранее не изученной области малых переданных импульсов

$q^2 = 0,005 + 0,02 (\text{Гэв}/c)^2$. Результаты измерений приводят к значению электрического радиуса протона, равному $(0,79 \pm 0,04)\phi$.

Для проведения таких исследований с регистрацией полупроводниковыми детекторами частиц отдачи предложена и разработана пленочная мишень новой конструкции, обеспечивающей резкое увеличение срока работы в пучках частиц высокой интенсивности.

3. В процессе исследования свойств полупроводниковых детекторов и для использования их в физических экспериментах выполнены следующие работы:

а) Проведен анализ процессов собирания электронно-дырочных пар, образующихся в полупроводниковых детекторах при регистрации излучений, и получены выражения, описывающие форму импульсов на выходе плоских детекторов.

б) Рассмотрены всевозможные причины, определяющие энергетическое и временное разрешение устройств с полупроводниковыми детекторами.

в) Разработан ряд электронных устройств, в том числе система для временных измерений с германиевыми детекторами, разрешающее время которой при 1,3 Мэв составляет около одной наносекунды, а

положение временного пика в динамическом диапазоне энергий гамма-квантов 100:1 смещается всего на 1,2 нсек. Система позволяет работать при очень низких энергиях, начиная с 10 кэв, и по динамическому диапазону энергий, а также по отношению высоты временного пика к фону от радиоактивных источников значительно превосходит другие устройства аналогичного назначения, известные в мировой практике.

г) Изучены оптические характеристики полупроводниковых детекторов и впервые экспериментально показано, что вероятность образования электронно-дырочной пары фотоном, вошедшим в $p-n$ -переход, равна единице.

д) Исследованы фотоэлектрические характеристики кремниевых $p-n$ -переходов, позволивших получать быстрые сигналы с амплитудой до 100 в.

е) Измерена с помощью фоточувствительных полупроводниковых детекторов временная макроструктура пучков частиц синхротрона Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

ж) Экспериментально показано хорошее соответствие между спектрами ионизационных потерь протонов больших энергий в полупроводниковом детекторе и расчетными спектрами Ландау.

4. Для постановки соответствующих экспериментов с помощью сцинтилляционных счетчиков:

а) разработан метод разделения частиц по величине ионизации в нескольких счетчиках и исследованы с применением этого метода редкие процессы типа $d + d \rightarrow \pi^0 + He^+$ и $d + d \rightarrow \gamma + He^+$;

б) разработана электронная аппаратура, позволяющая наблюдать редкий процесс обратного электророжения пионов $\pi^- + p \rightarrow e^- + e^+ + n$ при энергии 275 Мэв;

в) предложен и реализован эффективный детектор быстрых нейтронов с чередующимися слоями плотного вещества и сцинтиллятора;

г) разработан спектрометр для измерения угловых гамма-гамма корреляций с высоким качеством стабилизации тракта от сцинтилляционных счетчиков с кристаллами $NaI(Tl)$;

д) развита методика измерения одноэлектронного уровня импульсов и шумов в фотоумножителях;

е) проанализированы возможности и особенности метода совпадений и других сцинтилляционных методов регистрации частиц высоких энергий;

ж) изучен эффект ослабления конверсионной эффективности пластического сцинтиллятора при увеличении удельной ионизации частиц;

з) рассмотрен способ вывода света из слоистого сцинтиллятора, который при достаточно интенсивных сцинтилляциях может позволить выполнять годоскоп с существенно уменьшенным количеством фотоумножителей.

5. Развита теория разрешающего времени сцинтилляционного счетчика:

а) Решена задача о распределении фотоэлектронов во времени в строгой аналитической форме с учетом статистических флуктуаций общего количества фотоэлектронов, образующихся за время спадающей по экспоненте сцинтилляционной вспышки. Результаты расчетов могут быть использованы для определения разрешающего времени счетчика, если влияние фотоумножителя еще невелико, например, при работе со сравнительно медленными неорганическими сцинтилляторами.

б) Проведен анализ и корректный учет различных факторов, влияющих на разрешение быстрого сцинтилляционного счетчика, таких

как конечная скорость нарастания и спада световых вспышек органических сцинтилляторов, флуктуации в числе электронов на фотокатоде и в диодной системе, разброс во времени пролета электронов и т.д. Получены аналитические выражения и приведены графические результаты, наглядно демонстрирующие, в какой мере разрешающее время сцинтилляционного счетчика зависит от тех или иных причин.

6. Внесены предложения по дальнейшему развитию методов изучения процессов упругого рассеяния частиц с помощью полупроводниковых и сцинтилляционных детекторов и в связи с этим рассмотрены перспективы проведения новых исследований на пучках гиперонов, протонов сверхвысоких энергий, пионов и гамма-квантов.

Показана возможность создания на базе полупроводникового счетчика такого важного для физики высоких энергий прибора, как координатный детектор, обеспечивающий при работе в довольно интенсивных пучках релятивистских частиц высокое пространственное разрешение.

Основной материал диссертации содержится в книгах /II, I2, I3/ и работах /I4-38/, опубликованных в отечественной и зарубежной печати, а также доложенных на международных конференциях и симпозиумах по физике элементарных частиц (Киев, 1970 и 1956), электронным и фотонным взаимодействиям (Итака, 1971), сцинтилляционным и полупроводниковым счетчикам - в Вашингтоне (1972), Дубне (1962) и Россендорфе (1963), по ядерной электронике - в Париже (1968), Дубне (1967) и Варне (1969), на 6-ой Всесоюзной конференции по ядерной электронике в Москве (1964).

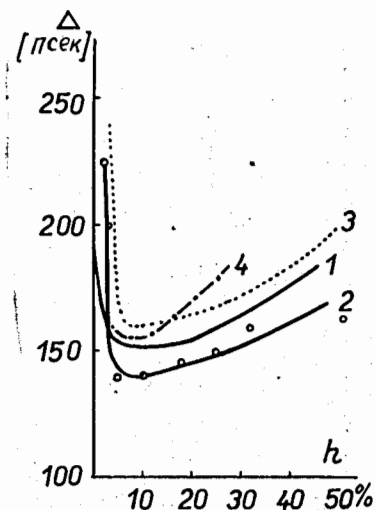


Рис. 1. Зависимость разрешающего времени сцинтилляционного счетчика от порога дискриминации.

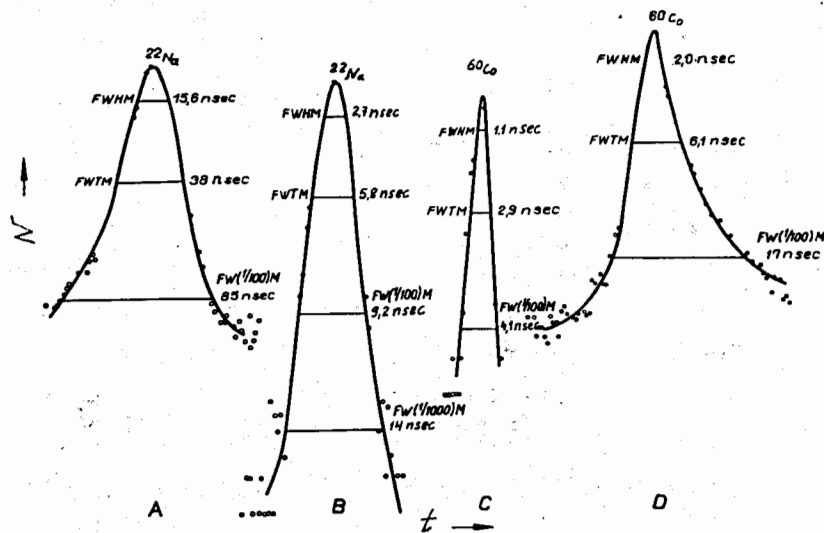


Рис. 2. Временные спектры, полученные с германиевым детектором при разных энергиях гамма-квантов.

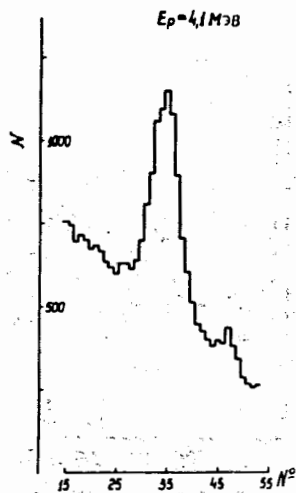


Рис. 3. Энергетический спектр частиц отдачи при p-p-рассеянии.

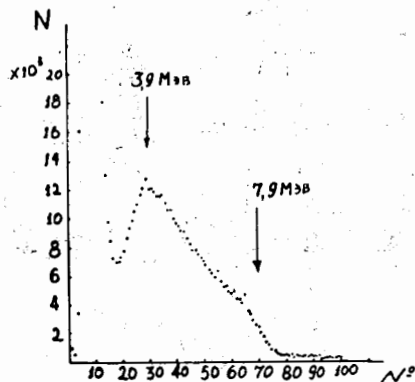


Рис. 4. Энергетический спектр частиц отдачи при ep-рассеянии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Post. R.F., Schiff L.T. Phys.Rev., 80, 1113 (1950).
2. Донсков С.В., Рыкалин В.И., Шувалов Р.С. ПТЭ № I, 177 (1970).
3. Human L.G., Schwroz R.M., Schalter R.A.
Rev. Sci. Instr., 35, 393 (1964).
4. Gatti E., Svelto V.. Nucl. Instr. Meth., 30, 213 (1964).
5. Bertolini G. et.al. Nucl. Instr. Meth., 43, 109 (1966).
6. Present G. et. al. Nucl. Instr. Meth., 31, 71 (1964).
7. Евсеев В.С., Комаров В.И., Куш В.З. и др. ПТЭ, № I, 68 (1961).
8. Никитин В.А., Номофилов А.А., Свиридов В.А. и др.
ПТЭ, № 6, 18 (1963).
9. Безногих Г.Г., Буюк А., Жидков Н.К., Заячки В.И. и др.
ЯФ, 10, 1212 (1969).
10. Bartenev V., Kuznetsov A., Morozov B., Nikitin V. et.al.
Phys. Rev. Lett., 29, 1755 (1972).
11. Акимов Ю.К. Сцинтилляционные методы регистрации частиц
больших энергий. М., МГУ, 1963.
Акимов Ю.К. Scintillation Counters in High Energy Physics
Academic Press, New York and London, 1965.
12. Акимов Ю.К., Калинин А.И., Кушнирук В.Ф., Юнгклауссен Х.
Полупроводниковые детекторы ядерных частиц и их применение.
Под научной редакцией Ю.К.Акимова. М., Атомиздат, 1967.
Главы 3, 6, 7, 8 и 10.
13. Акимов Ю.К., Дражев М.Н., Колпаков И.Ф., Рыкалин В.И.,
Быстродействующая электроника для регистрации ядерных частиц.
Под научной редакцией Ю.К.Акимова. М., Атомиздат, 1970 г.,
Главы I и 6.

14. Акимов Ю.К. Препринт ОИЯИ, I3-3734, Дубна, 1968.
Intern. Simp. Nucl. Electronics V I. (Versailles, 1968), p. 6.
15. Akimov Yu.K. and S.V.Medved. Nucl. Instr. and Meth.,
78, 151 (1970);
Материалы Международного семинара по ядерной электронике.
(Варна, 1969), ОИЯИ, I3-4720, стр. II, Дубна, 1969.
16. Акимов Ю.К., Комаров В.И., Савченко О.В., Сороко Л.М.
Препринт ОИЯИ, P-380, 1959. ПТЭ, № 4, 71 (1960);
Nucl. Instr. Meth., 45, 173 (1966).
17. Акимов Ю.К., Савченко О.В., Сороко Л.М. ЖЭТФ, 41, 708 (1961).
18. Акимов Ю.К., Кузнецов А.С., Лексин Г.А. ПТЭ, № 2, 70 (1956).
19. Акимов Ю.К., Цигelman К. Материалы Международного симпозиума
по наносекундной электронике. (Дубна, 1967);
Препринт ОИЯИ, I3-3700, Дубна, 1968, стр. 39.
20. Акимов Ю.К., Купцов А.В. Препринт ОИЯИ, 2434, Дубна, 1965.
21. Акимов Ю.К., Басиладзе С.Г. Препринт ОИЯИ 2803, Дубна, 1966.
22. Акимов Ю.К., Борейко В.Ф., Дорчман Д., Калинин А.И.,
Омельяненко М.Н., Саву В., Шонова Н.Т. Там же, что и п. 19,
стр. 79.
23. Акимов Ю.К., Вертоградов Л.С., Демьянов А.В., Купцов А.П.,
Неменов Л.Л., Хазинс Д.М., Чиркин Ю.М., Прокошкин Ю.Д.,
Агабабян Н.М., Керапян И.А., Мкртчян Г.Г., Березнев С.Ф.,
Куликов А.В., Смирнов Г.И. Препринт ОИЯИ, P1-5398, Дубна, 1970.
24. Акимов Ю.К., Винаров Н.Г., Гаджиков В.И., Краснобородов Б.С.
Омельяненко М.Н., Тумбев Г.Х. Материалы Международного семинара
по ядерной электронике (Варна, 1969) .
ОИЯИ, 4720, Дубна, 1969, стр. I71.

25. Акимов Ю.К., Бабенко Л.П., Ван Чжень-ва, Головин Б.М.,
Калинин А.И., Осипенко Б.П., Сидоров А.И. Материалы совеща-
ния по полупроводниковым детекторам, ОИЯИ, Дубна, 1962, с. 69.
26. Акимов Ю.К., Ван Чжень-ва, Сидоров А.И., Эпштейн М.И.
ПТЭ, № 2, 60 (1966).
27. Акимов Ю.К., Калинин А.И., Сидоров А.И. Препринт ОИЯИ, P-1526,
Дубна, 1964. Труды 6-ой Всесоюзной конференции по ядерной
электронике. М., Атомиздат, 1966, стр. 7.
28. Акимов Ю.К., Калинин А.И., Розанов Е.И., Сидоров А.И.,
Препринт ОИЯИ, P-1695, Дубна, 1964.
29. Акимов Ю.К., Калинин А.И., Материалы совещания по полупро-
водниковым детекторам. ОИЯИ, Дубна, 1962, стр. 84.
30. Акимов Ю.К., Банифатов А.Е., Калинин А.И., Чумин В.Г.
Препринт ОИЯИ, I3-3885, Дубна, 1968.
31. Акимов Ю.К., Андерт К., Калинин А.И., Чурин И.Н., Шуравин В.Н.
ПТЭ, № 6, 51 (1971).
32. Akimov Yu.K., Andert K., Kalinin A.I., Ortlepp X.G.,
Nucl. Instr. Meth., 104, 581 (1972).
33. Akimov Yu.K. Internationale Arbeitstaquang, Herstellung
und Anwendung von Halbleiterdetektoren
(Rossendorf, DDR, 1963) Zfk-PhA₁₂, s. 196.
34. Акимов Ю.К., Калинин А.И., Никитин В.А., Пантуев В.С.,
Свиридов В.А., Сидоров А.И., Хачатурян М.Н. ЖЭТФ, 48, 767 (1965)
35. Akimov Yu.K. Nucl. Instr. Meth., 45, 173 (1966).
36. Акимов Ю.К., Золин Л.С., Калинин А.И., Никитин В.А.,
Пантуев В.С., Роб Л., Свиридов В.А., Хачатурян М.Н.
ЯФ, 4, 88 (1966).

37. Акимов Ю.К., Андерт К., Казаринов Ю.М., Калинин А.И., Киселев В.С., Лapidус Л.И., Осипенко Б.П., Петров М.М., Шуравин В.Н., Арванов А.Н., Бадалян Г.В., Бегларян Д.М., Коваленко В.И. Маркарян А.А., Меликов Г.И., Петросян Ж.В., Погосов В.С., Чатрчян А.М., Борчеа К., Буца А., Дорчоман Д., Петрашку М. ЖЭТФ 62, 1231 (1972).

38. Акимов Ю.К., Селиванов Г.И. Сообщения ОИЯИ, Е13-5621, Дубна, 1971.

Рукопись поступила в издательский отдел
24 января 1973 года.