

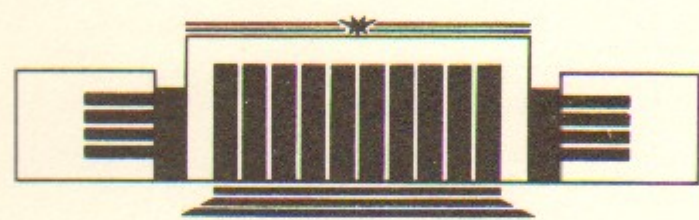


ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

П.К. Лебедев, С.В. Муравьев

**ВРЕМЕННОЕ РАЗРЕШЕНИЕ  
ПЛОСКОЙ ИОНИЗАЦИОННОЙ КАМЕРЫ  
НА ЖИДКОМ КСЕНОНЕ И КРИПТОНЕ**

ПРЕПРИНТ 88-119



НОВОСИБИРСК



Временное разрешение  
плоской ионизационной камеры  
на жидком ксеноне и крипто-  
не

*П.К. Лебедев, С.В. Муравьев*

Институт ядерной физики  
630090, Новосибирск 90, СССР

АННОТАЦИЯ

При работе на космике плоской ионизационной камеры на жидком ксеноне и крипто-  
не получено временное разрешение порядка десяти наносекунд. Обсуждаются вопросы выбора уровня дискриминации сигналов и их фильтрации.

© Институт ядерной физики СО АН СССР

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в ИЯФ СО АН СССР строится новый детектор КМД-2 [1], предназначенный для работы на модернизируемом накопителе ВЭПП-2М. Электромагнитный калориметр детектора предполагается выполнить на основе жидкого ксенона. Для первой очереди жидкого калориметра, до тех пор пока будет накоплено нужное количество ксенона рассматривается и калориметр на жидком крипто-  
не.

Электромагнитный калориметр на основе жидких ксенона или крипто-  
на представляет собой набор многослойных ионизационных камер с зазором между анодом и катодом, равным 1 см. На глубине калориметра 30 см укладывается 15 слоев двухзазорных ионизационных камер. Кроме измерения энергии гамма-кванта в калориметре будет измеряться также координата его точки конверсии по первой электрон-позитронной паре ливня. С этой целью в начальной от места встречи пучков части жидкоксенонового калориметра толщиной 5 рад. длин, или 7 слоев, катоды ионизационных камер выполнены в виде полосок, предназначенных для определения по наведенному на катод заряду координат точки конверсии [2] и измерения энергии начальной части электромагнитного ливня. Более глубокие слои калориметра служат для определения оставшейся части энергии электромагнитного ливня. В этой части электроды ионизационных камер будут представлять собой квадратные площадки размером примерно 10×10 см. Восемь слоев камер в этой части калориметра будут объединены по глубине по 3 и 5 слоев.



Заманчиво в таком мелкосегментированном калориметре определять не только координату и энергию гамма-кванта, но и время попадания его в калориметр. Это нужно, в частности, для организации «нейтрального» запуска детектора, который давал бы возможность выбора нужного процесса с рождением фотонов. При этом можно использовать как «координатные» слои калориметра, так и «энергетические».

К такого рода запуску в детекторе КМД-2 предъявляются следующие требования: время задержки выработки нейтрального триггера должно быть меньше времени сохранения информации о заряженных частицах события в электронике дрейфовой камеры детектора, равного 1 мкс [3], а временное разрешение должно быть меньше времени оборота пучка в накопителе ВЭПП-2М, равного 60 нс, так, чтобы можно было однозначно выбрать оборот пучка в накопителе, на котором произошло событие. Хорошее временное разрешение калориметра важно также для подавления фона от космики.

Как известно [4, 5], в случае, когда временное разрешение камеры определяется шумами тракта электроники, при большом отношении сигнала и шума разрешение можно определить по формуле

$$\sigma_t = \sigma_w / \frac{dA}{dt}, \quad (1)$$

где  $\sigma_w$  — среднеквадратичное значение шумов,  $\frac{dA}{dt}$  — производная сигнала в момент выработки временной отметки. Приблизительно формулу (1) можно переписать в другом виде:

$$\sigma_t = \frac{\sigma_w}{A_{\max}} \tau_{фр},$$

где  $A_{\max}$  — амплитуда импульса, а  $\tau_{фр}$  — длительность его фронта.

Таким образом, для получения лучшего временного разрешения, с одной стороны, нужно стремиться к уменьшению длины фронта, с другой стороны, — к уменьшению отношения шум к сигналу. Известно, что эти требования противоречивы [4].

Цель данной работы состояла в измерении временного разрешения в плоской ионизационной камере, заполненной жидкими ксеноном или криптоном. Была определена зависимость временного разрешения и задержки срабатывания плоской ионизационной камеры от уровня дискриминации сигнала и от постоянной време-

ни дифференцирования и интегрирования сигнала в формирующем усилителе. Результаты работы позволят выбрать в калориметре детектора КМД-2 режим работы при временных измерениях.

Измерения были выполнены на космических мюонах, энерговыделение от которых в камере (6—8 МэВ) примерно такое же, как в среднем от первой  $e^+e^-$ -пары электромагнитного ливня [2]. При большем энерговыделении, как это будет в последующих слоях калориметра, временное разрешение, в соответствии с формулой (1), будет лучше.

#### УСТАНОВКА И ПРОЦЕДУРА ИЗМЕРЕНИЙ

Для изучения временных характеристик плоской ионизационной камеры на сжиженных криптона и ксеноне был изготовлен небольшой криостат. Криостат (см. рис. 1) состоит из двух сосудов: внутреннего 1 и внешнего 2. Для теплоизоляции внутреннего рабочего объема из алюминия, в котором при измерениях находится жидкость, во внешнем объеме поддерживается вакуум на уровне  $10^{-3} - 10^{-4}$  мм.рт.столба. Теплопритоки к рабочему объему от внешнего сосуда воспринимаются медным экраном 3, охлаждаемым жидким азотом, который пропускается по трубчатому змеевику 4. Для быстрого охлаждения рабочего объема при сжижении ксенона или криптона на его крышке имеется змеевик 5, по которому также можно пропускать жидкий азот. После того как сжижение заканчивается, азот поступает только по змеевику на экране. Снаружи рабочего объема имеется обмотка подогрева 6, регулировкой тока в которой можно поддерживать температуру жидкости в рабочем объеме с точностью лучшей 0,1 градуса. Температура измеряется датчиками температуры 7.

Внутри рабочего объема емкостью около трех литров размещается четырехслойная плоская ионизационная камера 8 с двойными зазорами анод-катод. Расстояние между анодом и катодом равно 1 см. Electroды камеры имеют размер 10·10 см и изготовлены из фольгированного стеклотекстолита марки СФ-2. Измерения проводились при напряжении на аноде 1 и 2 кВ для ксенона и криптона, соответственно. При этих напряжениях дрейфовая скорость электронов практически выходит на плато [6, 7]. Сигнал снимался с катода так же, как предполагается и при измерениях координаты точки конверсии фотона.

Амплитуда сигнала с камеры зависит от длины пробега электронов до захвата электроотрицательными примесями, а значит от



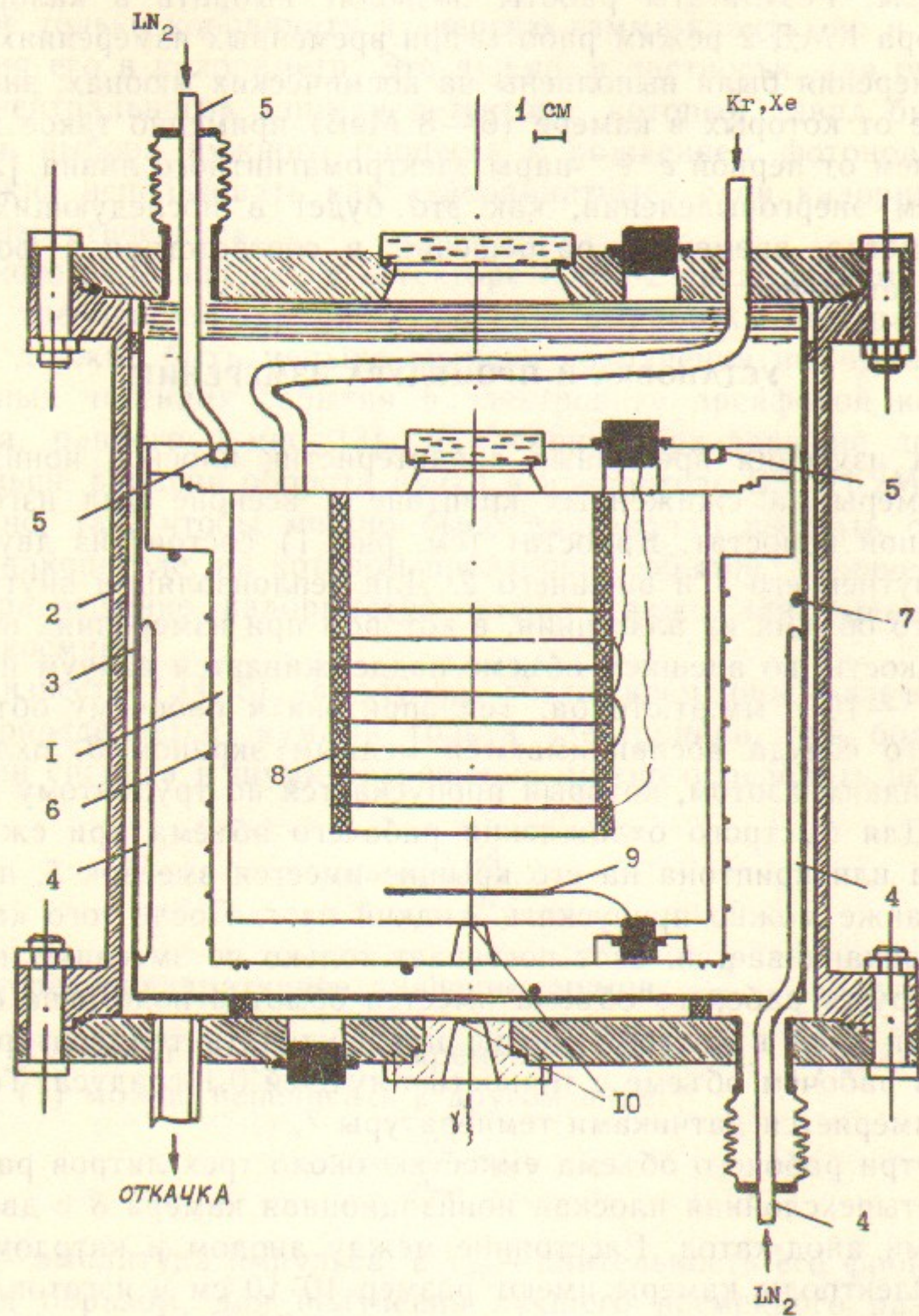


Рис. 1. Криостат для работы с жидкими ксеноном и криптоном: 1 — внутренний рабочий объем; 2 — внешний вакуумный объем; 3 — экран; 4 — змеевик для охлаждения экрана; 5 — змеевик для охлаждения рабочего объема; 6 — нагреватель; 7 — датчики температур; 8 — четырехслойная ионизационная камера; 9 — однозатворная ионизационная камера для контроля чистоты; 10 — алюминиевые окна.

чистоты жидкости. Для контроля содержания электроотрицательных примесей на дне рабочего объема имелась однозатворная плоская ионизационная камера 9 с расстоянием между анодом и катодом, равным 1 см. Контроль чистоты жидкости проводился, как описано в работе [8], по изучению формы импульса тока после впрыскивания в камеру порции рентгеновского излучения. Рентгеновское излучение попадало в рабочий объем через алюминиевые окна 10 толщиной 0,3 мм, расположенные на дне криостата.

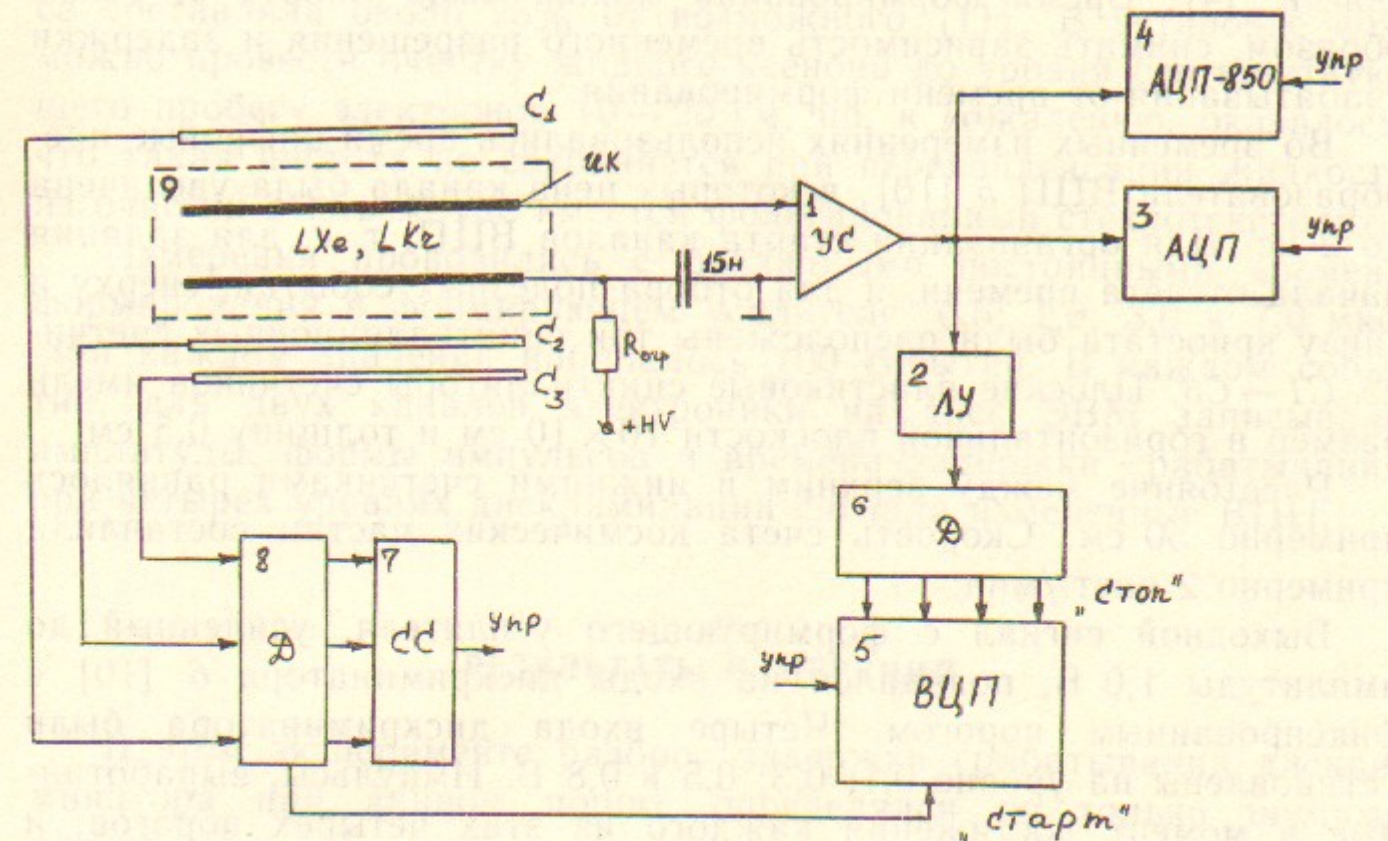


Рис. 2. Схема электроники:

1 — зарядочувствительный усилитель со встроенным формирующим усилителем; 2 — линейный усилитель; 3 — пиковый амплитуда-цифровой преобразователь; 4 — цифровой осциллограф АЦП-850; 5 — время-цифровой преобразователь; 6 — дискриминатор с фиксированным порогом в стандарте КАМАК; 7 — схема совпадения; 8 — дискриминатор; 9 — ионизационная камера;  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  — сцинтилляционные счетчики.

Для измерения зависимости временного разрешения от энерговыделения 4-слойная ионизационная камера была разбита на две камеры. Первая из них состояла из одного нижнего слоя, вторая — из трех верхних. Таким образом, энерговыделение в камерах отличалось в три раза. Емкости камер и кабелей от них до предусилителей составляли 120 пФ для первой камеры и 220 пФ для второй.

Каждая из камер была подключена к отдельному каналу электроники. На рис. 2 представлена схема электроники для одно-



го из спектрометрических каналов. Сигналы с ионизационных камер поступают сначала на зарядочувствительный усилитель 1 со встроенным формирующим усилителем. В работе были использованы высококачественные зарядочувствительные усилители, предназначенные для работы на жидкокриптоновом калориметре детектора КЕДР [9]. Формирующий усилитель содержит однократный RC-CR фильтр с одинаковыми временами дифференцирования и интегрирования, выдающий однополярный сигнал квазигауссовой формы [4]. Время формирования можно было менять и, таким образом, снимать зависимость временного разрешения и задержки срабатывания от времени формирования.

Во временных измерениях использовались время-цифровые преобразователи ВЦП 5 [10], в которых цена канала была увеличена до 2 нс. Для организации старта каналов ВЦП, т. е. для задания начала отсчета времени, и для отбора полезных событий, сверху и снизу криостата были расположены три сцинтилляционных счетчика С1—С3. Плоские пластиковые сцинтилляторы счетчиков имели размер в горизонтальной плоскости  $10 \times 10$  см и толщину 0,5 см.

Расстояние между верхним и нижними счетчиками равнялось примерно 50 см. Скорость счета космических частиц составляла примерно 2 част./мин.

Выходной сигнал с формирующего усилителя, усиленный до амплитуды 1,0 В, подавался на входы дискриминатора 6 [10] с фиксированным порогом. Четыре входа дискриминатора были установлены на уровне 0,1; 0,3; 0,5 и 0,8 В. Импульсы, выработанные в момент достижения каждого из этих четырех порогов, и являлись «стопами» для четырех соответствующих каналов ВЦП. Таким образом измерялась зависимость временного разрешения и задержки от порога дискриминации.

Дискриминаторы с фиксированным порогом использовались из-за отсутствия в нашем распоряжении дискриминаторов с «плавающим» порогом, имеющих точность временной привязки порядка 1 нс на импульсах с фронтом около 10 мкс. В связи с этим для внесения поправок на разброс амплитуд импульсов с помощью пикового 12-разрядного АЦП 3 [10] измерялась их амплитуда, а также с помощью 8-разрядного цифрового осциллографа АЦП-850 4 [10] — форма.

Управлением блоков ВЦП и АЦП служил сигнал со схемы совпадения 7 трех счетчиков С1—С3. Таким образом, время задержки, амплитуда и форма импульса измерялись только для

частиц, прошедших через сцинтилляционные счетчики и, значит, через зазоры ионизационных камер.

Измерения временного разрешения были проведены при заполнении рабочего объема как жидким криптоном, так и ксеноном. При измерениях чистота жидкости была такова, что длина пробега электронов в жидком криптоме была равна 6,1 см, а в жидком ксеноне 0,12 см. При такой чистоте в жидком криптоме собираются практически все электроны, которые образуются на треке релятивистской частицы. В случае жидкого ксенона амплитуда импульса составляла около 25% от возможного [11]. В установке возможно провести очистку жидкого ксенона до уровня соответствующего пробегу электронов 10—20 см, но, к сожалению, оказалось, что такая чистота не сохраняется при переконденсации жидкости из очистки в объем, где имеется фольгированный стеклотекстолит.

Измерения проводились с различными постоянными времени формирования в формирующем усилителе: 0,5; 1,0; 3,0 и 7,0 мкс. При каждом значении набиралось 100 событий. В каждом событии, для двух каналов электроники на диск ЭВМ записывали амплитуды, формы импульсов и времена задержки срабатывания при четырех уровнях дискриминации сигнала измеренные ВЦП.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

В этом эксперименте разброс задержки срабатывания дискриминатора при данном пороге определялся не только шумами электроники, как для импульса фиксированной амплитуды, но и разбросом импульсов по амплитудам из-за флуктуации энерговыделения от частицы в зазорах камеры. Поправка на амплитуду вводилась по измеренной форме импульса. При этом меньшему амплитудному разбросу соответствовал и меньший разброс по времени срабатывания и, значит, с большей точностью можно ввести поправку на амплитуду. Для определения временного разрешения отбирались события с энерговыделением в пределах примерно  $\pm 10\%$  около наиболее вероятного значения.

Одна из полученных гистограмм временного разрешения приведена на рис. 3. Для наглядности гистограмма фитирована функцией Гаусса со стандартным отклонением  $\sigma = 19,7 \pm 2,8$  нс. Измерение выполнено на жидком криптоме при  $\tau_{\text{фор}} = 0,5$  мкс.

На рис. 4 приведены измеренные формы импульсов после формирующего усилителя при работе с ксеноном (а) и криптоном (б).



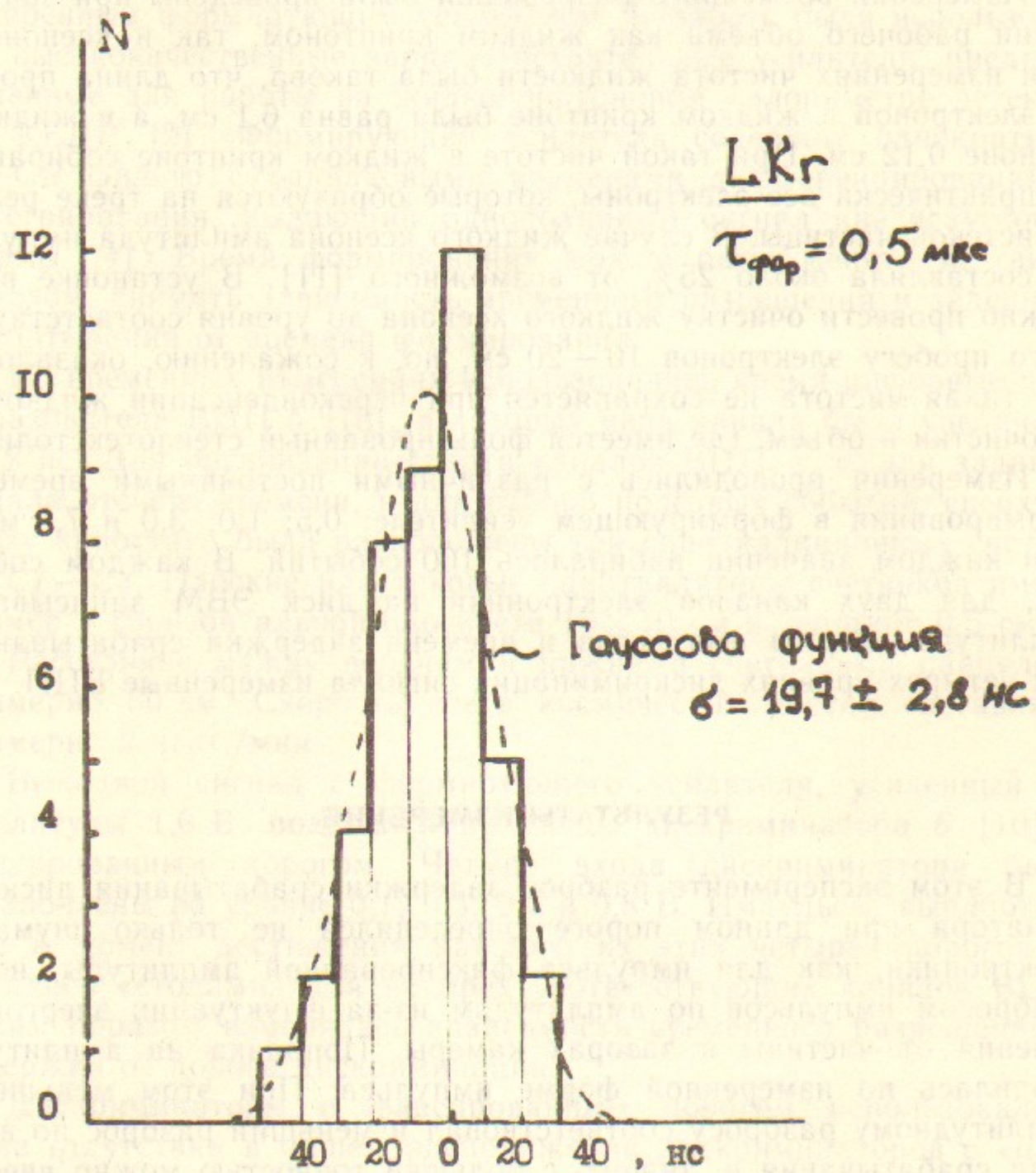


Рис. 3. Гистограмма временного разрешения при работе на криптоне: постоянная времени формирования  $\tau_{\text{фop}} = 0,5 \text{ мкс}$ , первая камера, порог 0,3 от амплитуды.

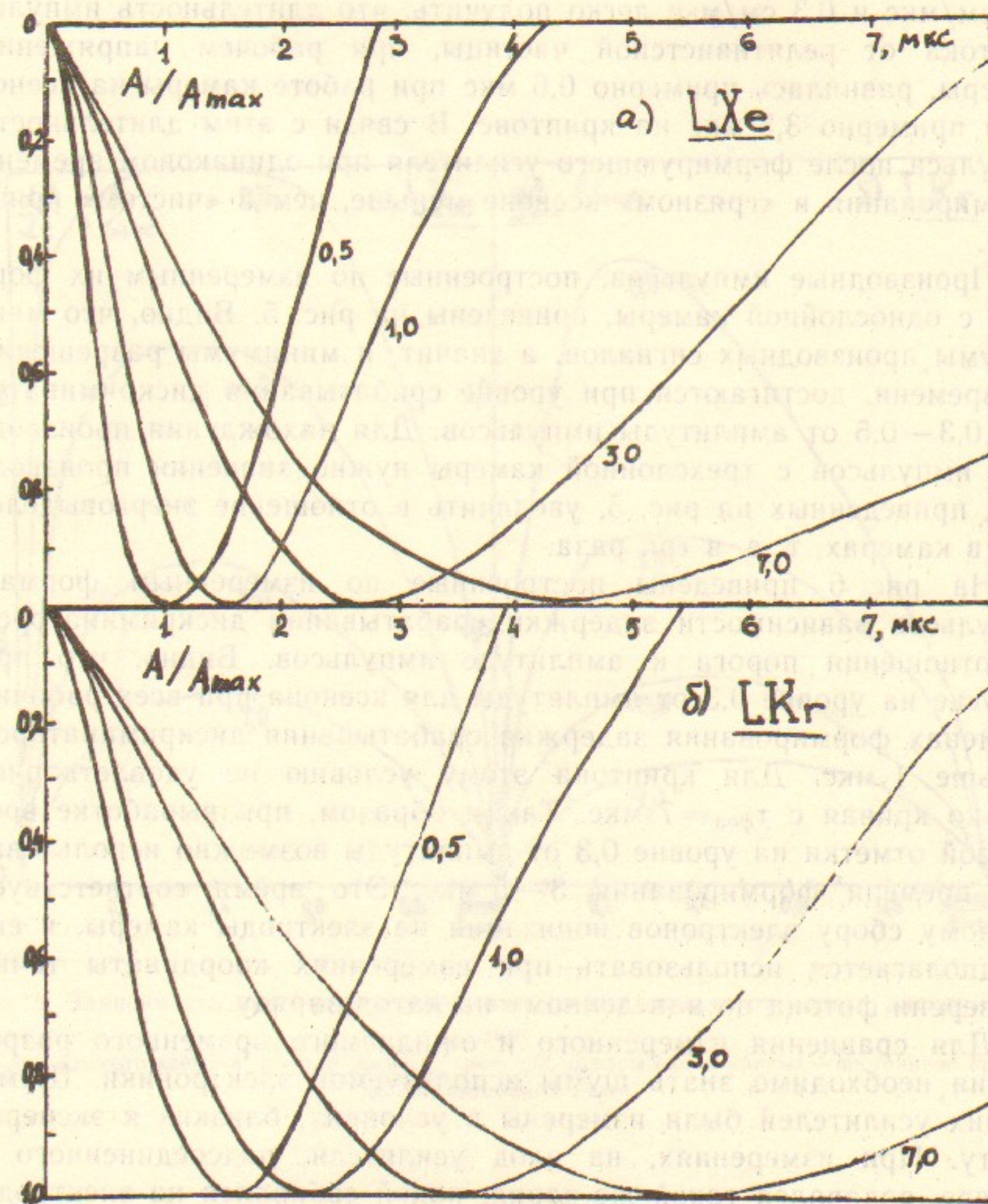


Рис. 4. Форма импульсов после формирующего усилителя: а — для жидкого ксенона; б — для жидкого криптона. Цифры около кривых — постоянная времени формирования (мкс).



По известным значениям дрейфовой скорости электронов в жидком ксеноне [6] и криптоне [7], равных, соответственно, 0,2 см/мкс и 0,3 см/мкс легко получить, что длительность импульса тока от релятивистской частицы, при рабочем напряжении камеры, равнялась примерно 0,6 мкс при работе камеры на ксеноне и примерно 3,5 мкс на криптоне. В связи с этим длительность импульса после формирующего усилителя при одинаковом времени формирования в «грязном» ксеноне меньше, чем в «чистом» криптоне.

Производные импульсов, построенные по измеренным их формам с однослойной камеры, приведены на рис. 5. Видно, что максимумы производных сигналов, а значит, и минимумы разрешения по времени, достигаются при уровне срабатывания дискриминаторов 0,3—0,5 от амплитуды импульсов. Для нахождения производных импульсов с трехслойной камеры нужно значения производных, приведенных на рис. 5, увеличить в отношении энерговыделений в камерах, т. е. в три раза.

На рис. 6 приведены построенные по измеренным формам импульсов зависимости задержки срабатывания дискриминаторов от отношения порога к амплитуде импульсов. Видно, что при запуске на уровне 0,3 от амплитуды для ксенона при всех рабочих временах формирования задержка срабатывания дискриминаторов меньше 1 мкс. Для криптона этому условию не удовлетворяет только кривая с  $\tau_{\text{фор}} = 7$  мкс. Таким образом, при выработке временной отметки на уровне 0,3 от амплитуды возможно использование времени формирования 3—5 мкс. Это время соответствует полному сбору электронов ионизации на электроды камеры, и его предполагается использовать при измерениях координаты точки конверсии фотона по наведенному на катод заряду.

Для сравнения измеренного и ожидаемого временного разрешения необходимо знать шумы используемой электроники. Шумы наших усилителей были измерены в условиях, близких к эксперименту. При измерениях, на вход усилителя, подсоединенного к камере, подавался такой же заряд, какой собирался на электроды камеры в жидкости в измерениях на космических частицах. На рис. 7 приведены измеренные шумы зарядочувствительных усилителей для обоих спектрметрических каналов. При работе с жидким ксеноном шумы электроники являются основными и определяют временное разрешение.

Иначе обстоит дело с шумами при работе с жидким криптоном. Как известно, криптон за счет примеси  $\text{Kr}^{85}$  с периодом полу-

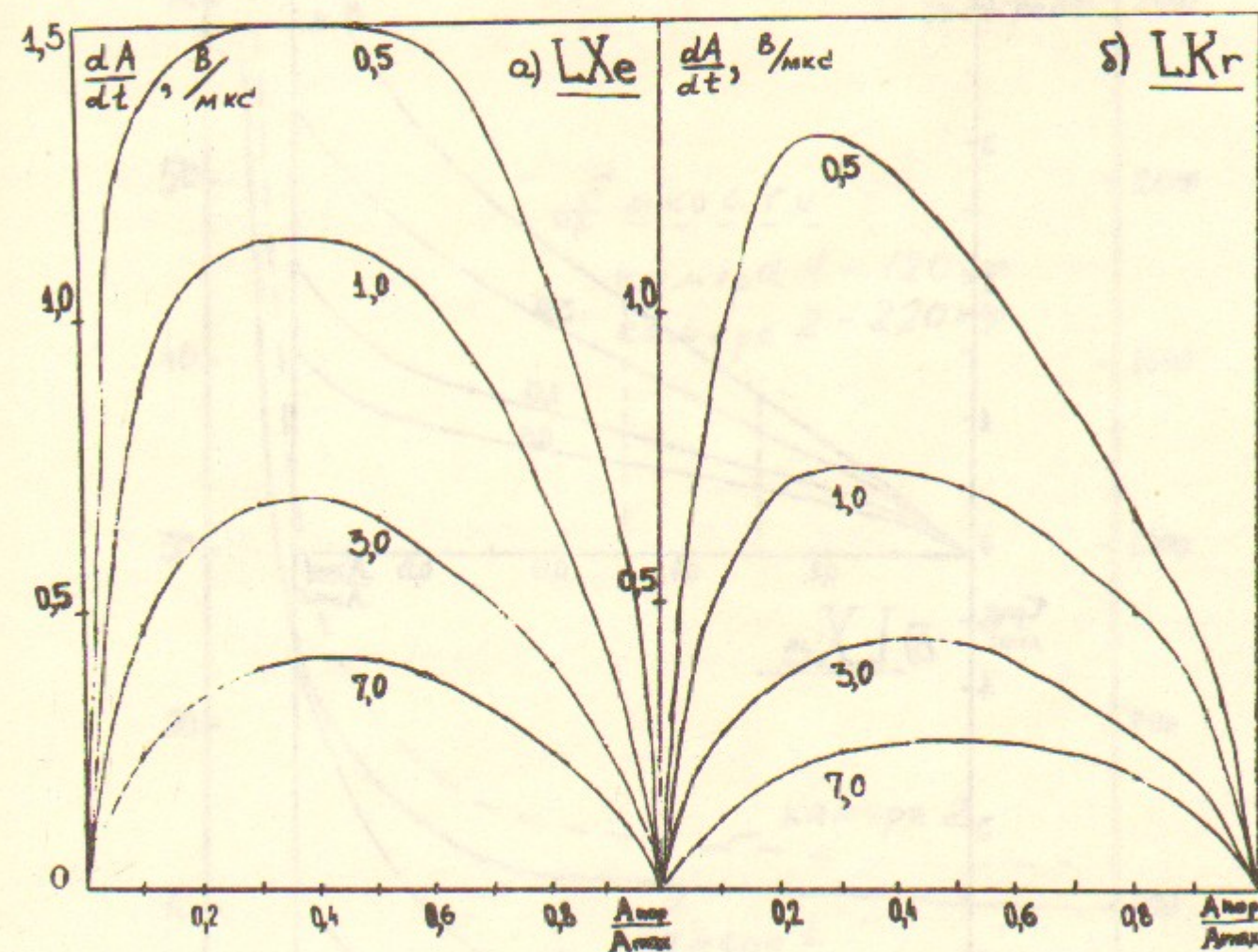


Рис. 5. Зависимость производной сформированного сигнала от порога дискриминации:  
а — для жидкого ксенона; б — для жидкого криптона. Цифры около кривых — постоянная времени формирования (мкс).



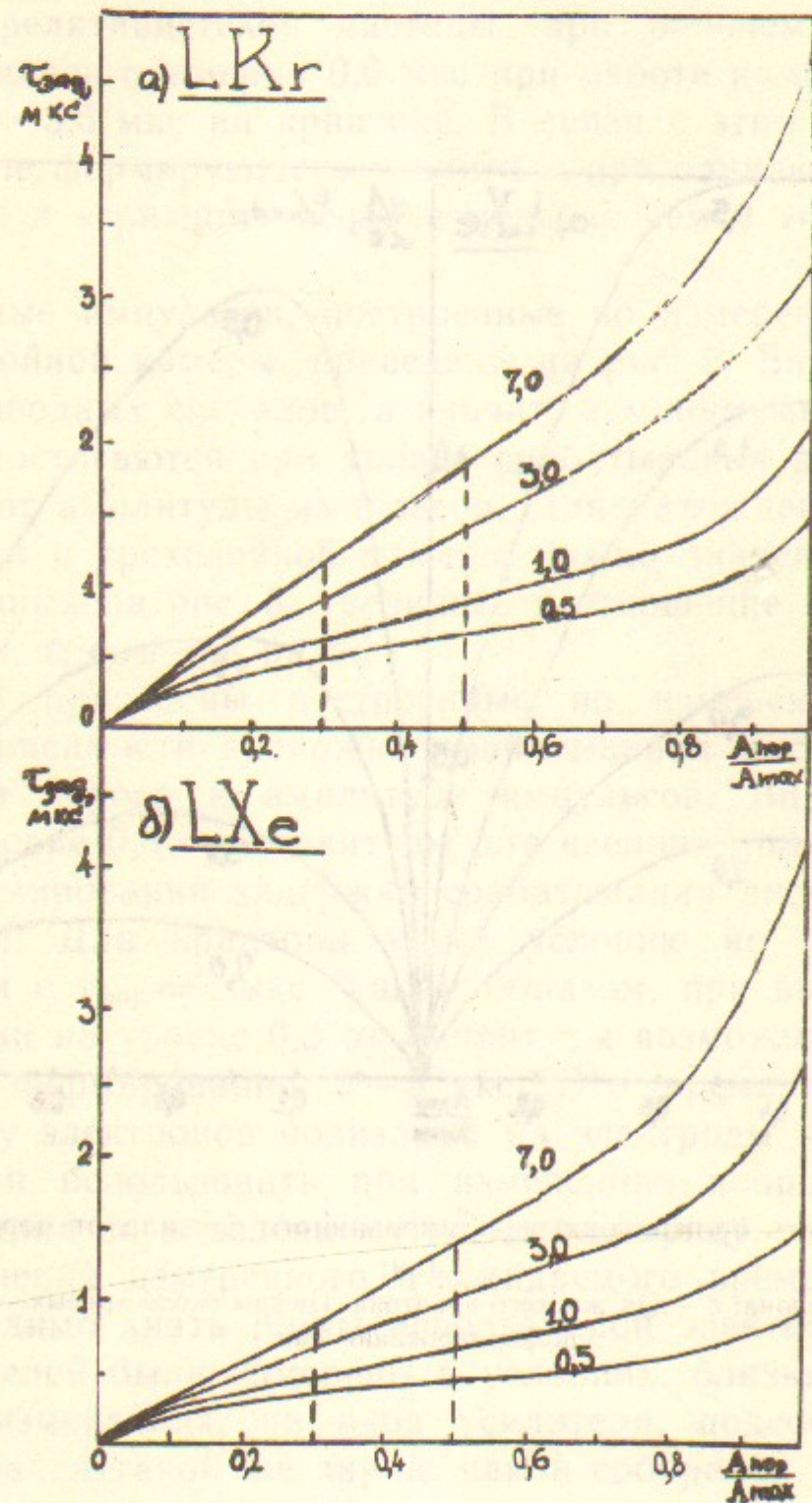


Рис. 6. Зависимость задержки срабатывания дискриминатора от порога дискриминации:  
 а — для жидкого криптона; б — для жидкого ксенона. Цифры около кривых — постоянная времени формирования (мкс).

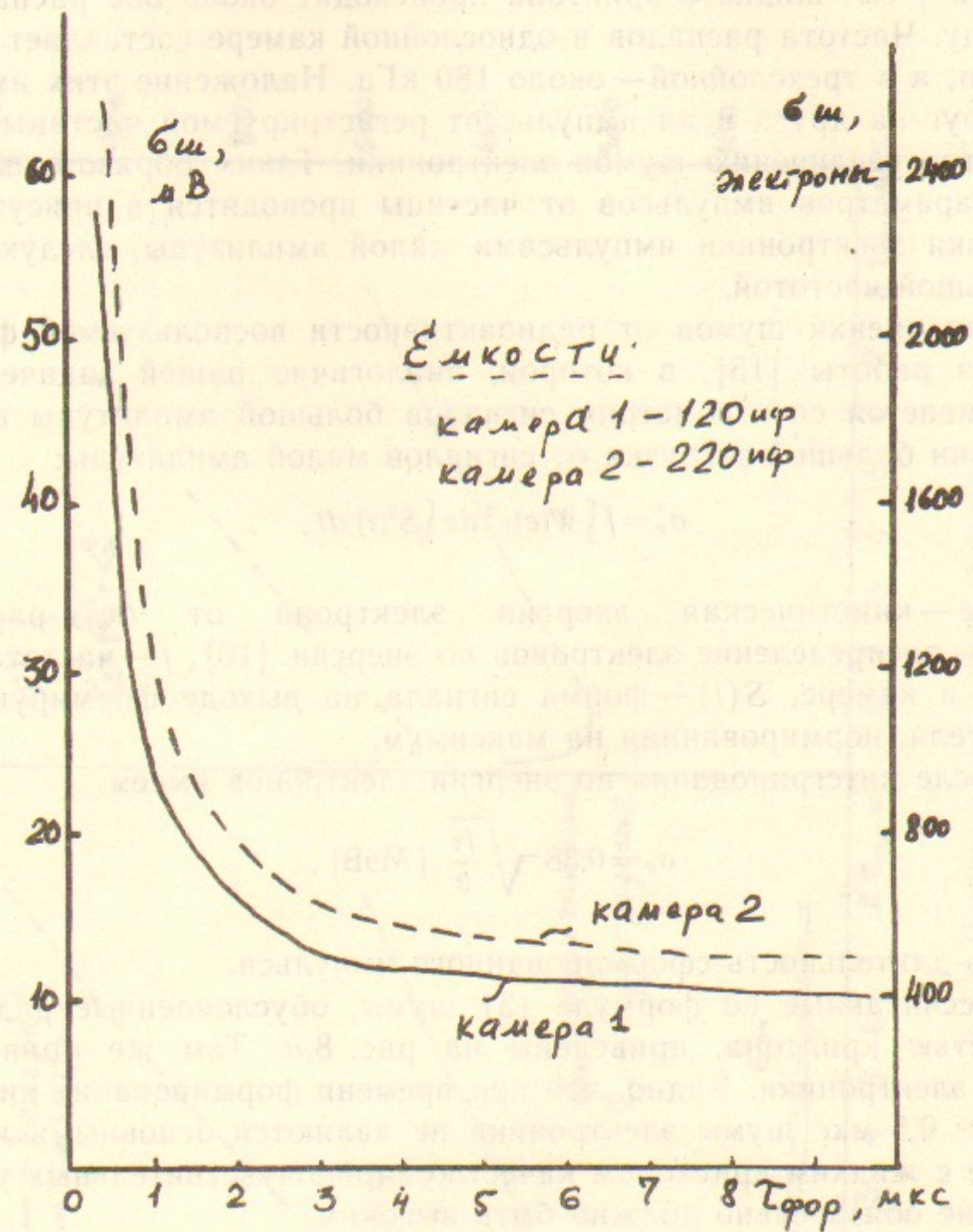


Рис. 7. Зависимость шумов электроники от постоянной времени формирования:  
 сплошная линия — первая камера; пунктирная линия — вторая камера.



распада 10,8 лет бета-активен [13]. Максимальная энергия вылетающих электронов равна 0,67 МэВ [14]. Согласно измерениям [13], в 1 см<sup>3</sup> жидкого криптона происходит около 300 распадов в секунду. Частота распадов в однослойной камере составляет около 60 кГц, а в трехслойной — около 180 кГц. Наложение этих импульсов друг на друга и на импульс от регистрируемой частицы эквивалентно увеличению шумов электроники. Таким образом, измерения параметров импульсов от частицы проводятся в присутствии загрузки электроники импульсами малой амплитуды, следующими с большой частотой.

Для оценки шумов от радиоактивности воспользуемся формулой из работы [15], в которой, аналогично нашей задаче, рассматривается спектрометрия сигналов большой амплитуды в присутствии большой загрузки от сигналов малой амплитуды:

$$\sigma_p^2 = f \int W(e) e^2 de \int S^2(t) dt, \quad (2)$$

где  $e$  — кинетическая энергия электрона от бета-распада,  $W(e)$  — распределение электронов по энергии [16],  $f$  — частота распадов в камере,  $S(t)$  — форма сигнала на выходе формирующего усилителя, нормированная на максимум.

После интегрирования по энергии электронов имеем

$$\sigma_p = 0,38 \sqrt{\frac{f\tau}{3}} \text{ [МэВ]}, \quad (3)$$

где  $\tau$  — длительность сформированного импульса.

Рассчитанные по формуле (3) шумы, обусловленные радиоактивностью криптона, приведены на рис. 8,а. Там же приведены шумы электроники. Видно, что при времени формирования сигнала больше 0,5 мкс шумы электроники не являются основными и, при работе с жидким криптоном качество зарядочувствительных усилителей не обязательно должно быть высоким.

На рис. 8,б приведены суммарные шумы в обоих каналах электроники при работе с жидким криптоном. Видно, что в зависимости от времени формирования имеется минимум, который для нашего случая, находится в районе 0,5 — 1,0 мкс.

На рис. 9,а приведены результаты измерений временного разрешения ионизационной камеры при заполнении ее жидким ксеноном (а) и криптоном (б), как функция от времени формирования сигнала. На рисунке приведены данные, полученные для уровня дискриминации 0,3 от амплитуды сигнала. Ошибки эксперимен-

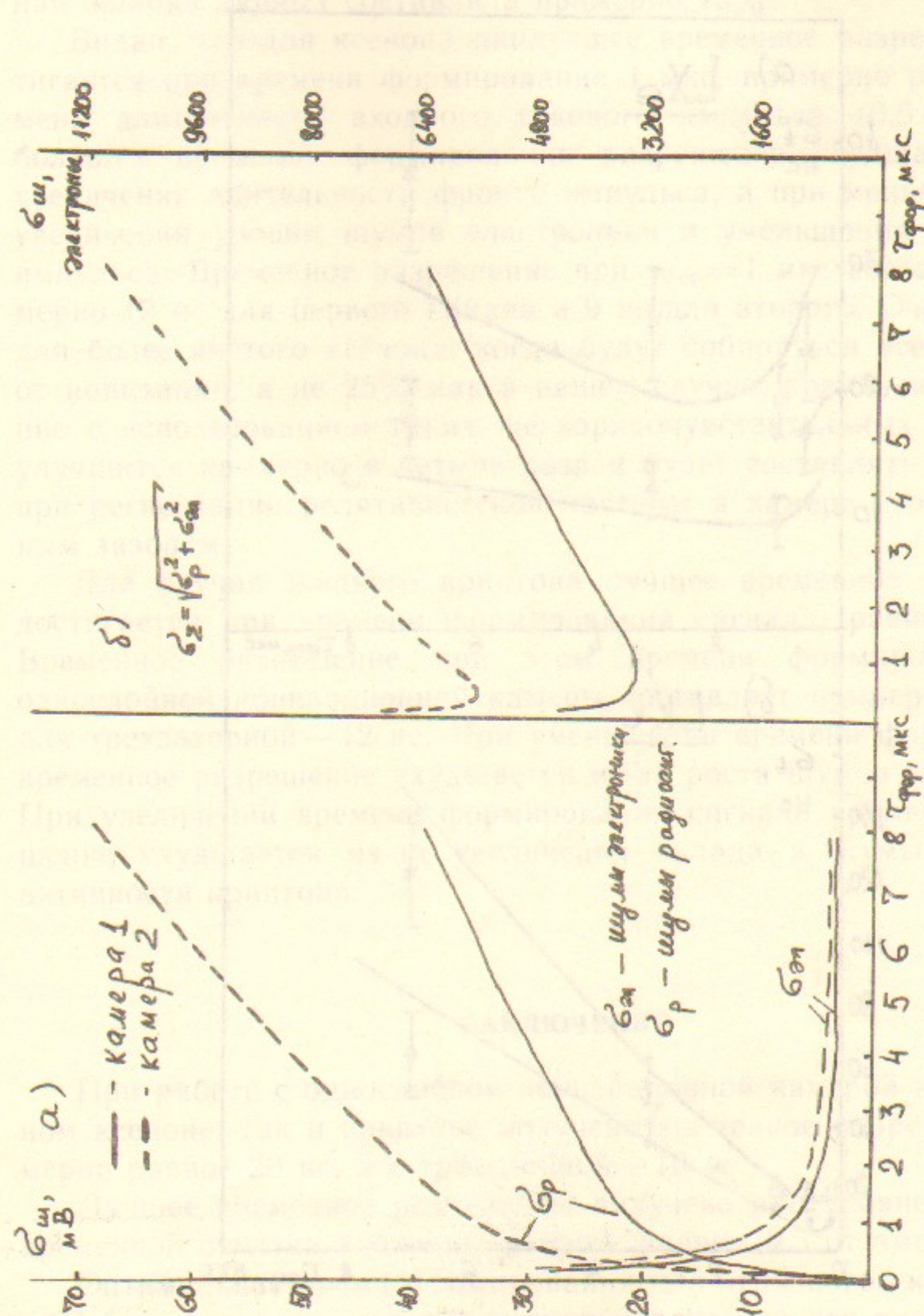


Рис. 8. Полные шумы в жидком криптоне:

$\sigma_p$  — шумы радиоактивности,  $\sigma_{эл}$  — шумы электроники; сплошная линия — первая камера, пунктирная линия — вторая камера.



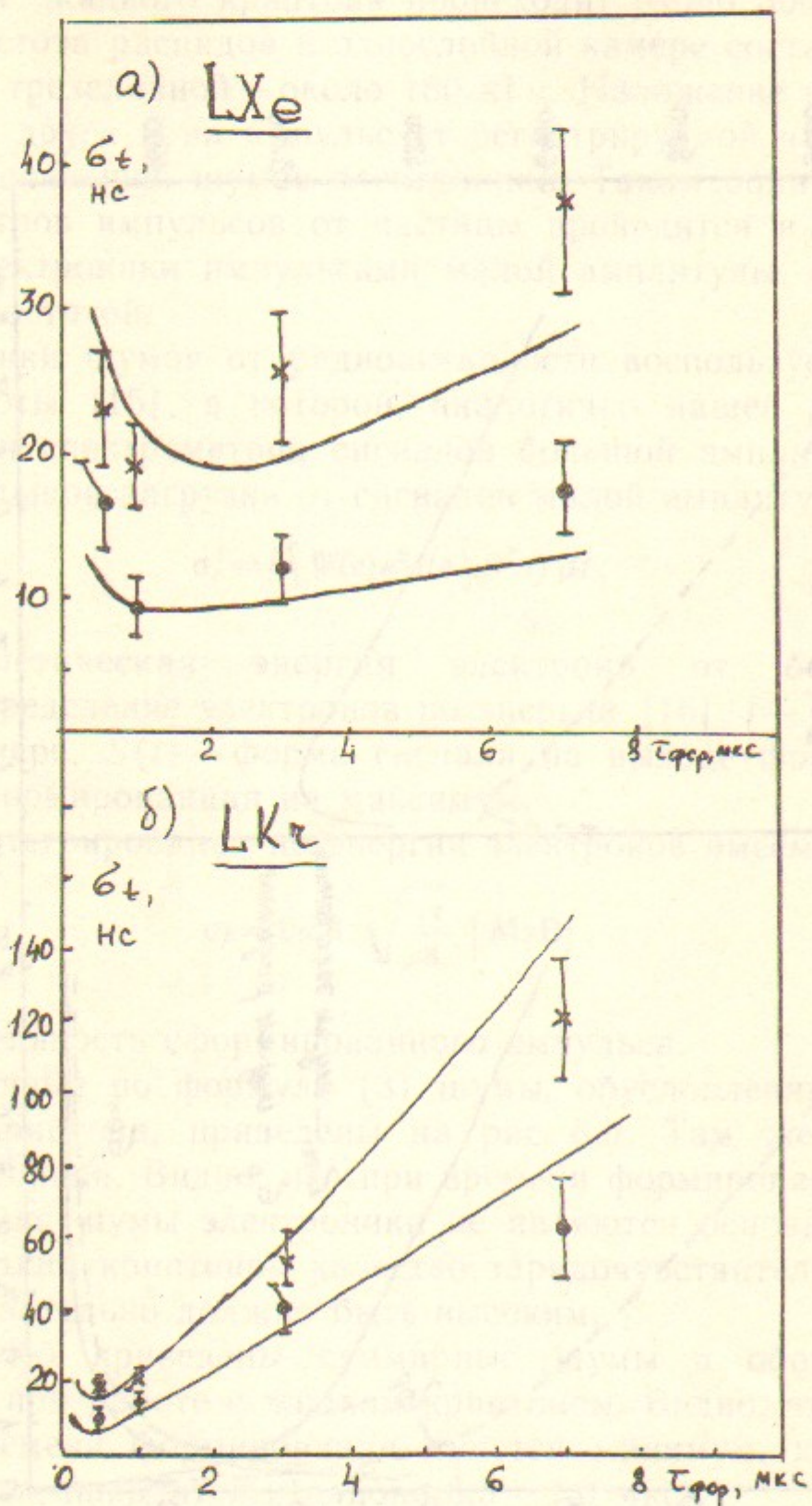


Рис. 9. Результаты измерения временного разрешения:  
 а—для жидкого ксенона; б—для жидкого криптона. Сплошная кривая—расчет по формуле (1).

тальных точек определялись в предположении о нормальной форме кривой временного разрешения. Для нашей статистики относительная ошибка данных составляла примерно 15%.

Видно, что для ксенона наилучшее временное разрешение достигается при времени формирования 1 мкс, примерно равном времени длительности входного токового импульса (0,6 мкс). При больших временах формирования разрешение ухудшается из-за увеличения длительности фронта импульса, а при меньших—из-за увеличения уровня шумов электроники и уменьшения амплитуды импульса. Временное разрешение при  $\tau_{\text{фор}}=1$  мкс составляет примерно 19 нс для первого канала и 9 нс для второго. Очевидно, что для более чистого ксенона, когда будут собираться все электроны от ионизации, а не 25% как в нашем случае, временное разрешение с использованием таких же зарядочувствительных усилителей улучшится примерно в четыре раза и будет составлять около 5 нс при регистрации релятивистской частицы в камере с одним двойным зазором.

Для случая жидкого криптона лучшее временное разрешение достигается при времени формирования сигнала, равном 0,5 мкс. Временное разрешение при этом времени формирования для однослойной ионизационной камеры составляет примерно 20 нс, а для трехззорной—12 нс. При уменьшении времени формирования временное разрешение ухудшается из-за роста шумов электроники. При увеличении времени формирования сигнала временное разрешение ухудшается из-за увеличения вклада в шумы от радиоактивности криптона.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При работе с однослойной ионизационной камерой как на жидком ксеноне, так и криптоне получено временное разрешение, примерно равное 20 нс, а с трехслойной—10 нс.

Лучшее временное разрешение получено при уровне выработки временной отметки дискриминатором, равном 0,3 от амплитуды.

Оптимальное время формирования для «грязного» ксенона равно 1 мкс, что соответствует примерно длительности входного токового импульса. Для чистого ксенона ожидаемое временное разрешение равно примерно 5 нс. Такое разрешение будет достигаться при времени формирования около 4—5 мкс, равном времени дрей-



фа электронов в камере с зазором 1 см. В этом случае возможно использование одних и тех же формирующих усилителей для координатных и временных измерений.

На криптоне временное разрешение, несмотря на то, что длительность токового импульса составляет примерно 3,5 мкс, имеет минимум в узком интервале времен формирования 0,5—1,0 мкс, и быстро растет с ростом  $t_{\text{фор}}$  из-за роста вклада шумов от радиоактивности. Ясно, что при работе на жидком криптоне для временных и координатных измерений нужны формирующие усилители с разными временами дифференцирования и интегрирования.

В заключение авторы благодарят Л.М. Баркова за внимание к работе, И.В. Донца, А.В. Максимова, М.К. Тимофеева за помощь при проведении работы, В.С. Панина и Ю.А. Тихонова за предоставление зарядочувствительных усилителей, В.М. Аульченко, Д.К. Весновского и Л.А. Леонтьева за наладку усилителей и полезные обсуждения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Аксенов Г.А. и др. Препринт ИЯФ СО АН СССР 85-118. Новосибирск, 1985.
2. Максимов А.В. Дипломная работа, ИЯФ СО АН СССР, 1988.
3. Аульченко В.М. и др. Препринт ИЯФ СО АН СССР 88-22. Новосибирск, 1988.
4. Цитович А.П. Ядерная электроника. М.: Энергоатомиздат, 1984.
5. Краснокутский Р.Н. и др. Препринты ИФВЭ, 83-113, 1983; 84-124, 1984.
6. Duke T. Portugal Phys., 1981, v.12, p.9.
7. Анисимов С.Н. и др. Препринт ИТЭФ, М. 16, 1984.
8. Гавриленко И.Л. и др. Препринт ФИАН, 252, 1984.
9. Онучин А.П. и др. Межд. симпозиум по коор. детекторам в физ. выс. энергий, Дубна, 1987.
10. ИЯФ СО АН СССР, Информационный материал. Блоки выполненные в стандарте КАМАК.
11. Brassard C. et al. NIM, 1979, v.162, p.29.
12. Ритсон Д. Экспериментальные методы в физике высоких энергий, 1964.
13. Болоздыня А.И. и др. Препринт ИТЭФ, 113, 1981.
14. Немец О.Ф. и др. Справочник по ядерной физике, Киев, 1975.
15. Radeka V. NIM, 1988, v.A263, p.288.
16. Мухин К.Н. Экспериментальная ядерная физика. М.: Энергоатомиздат, 1983.

*П.К. Лебедев, С.В. Муравьев*

#### Временное разрешение плоской ионизационной камеры на жидком ксеноне и криптоне

Ответственный за выпуск С.Г.Попов

---

Работа поступила 7 июля 1988 г.  
Подписано в печать 02.09.88 г. МН 08461  
Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 1,7 печ.л., 1,4 уч.-изд.л.  
Тираж 200 экз. Бесплатно. Заказ № 119

---

*Набрано в автоматизированной системе на базе фото-наборного автомата ФА1000 и ЭВМ «Электроника» и отпечатано на ротапинтере Института ядерной физики СО АН СССР,  
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.*