

14  
П-83

2

468

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
Лаборатория ядерных проблем

А.Ф. Дунайцев, Ю.Д. Прокошкин, Тан Сяо-вэй

D-468

ЗВЕЗДНЫЙ ДЕТЕКТОР  
 $\pi^-$ -МЕЗОНОВ

*Nucl. Instr., 1960, v 8, n 1, p 11-18.  
Intern. Conf. on High Energy  
Acceleration and Instr. CERN, 1959,  
p 592.*

А.Ф. Дунайцев, Ю.Д. Прокошкин, Тан Сяо-вэй

ЗВЕЗДНЫЙ ДЕТЕКТОР  
 $\pi^-$ -МЕЗОНОВ<sup>х/</sup>

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

---

<sup>х/</sup> Краткое сообщение об этом приборе опубликовано в /1/.

552/5  
чч.

Описывается сцинтилляционный детектор, обладающий селективной чувствительностью к  $\pi^-$ -мезонам. Детектор регистрирует звезды, образующиеся при остановке  $\pi^-$ -мезонов.

## 1. Введение

Большая часть остановок  $\pi^-$ -мезонов в веществе сопровождается звездами-расщеплениями ядер, в которых выделяется значительная энергия, близкая по величине к массе  $\pi^-$ -мезона /140 Мэв/. Эта особенность существенно отличает  $\pi^-$ -мезоны как от легких частиц /  $\mu^-$ -мезоны, электроны/, не образующих высокоэнергичных звезд, так и от положительно заряженных ядерно-активных частиц /протоны,  $\pi^+$ -мезоны и др./, которые образуют звезды только на лету и с малой вероятностью. Используя сцинтиллятор сцинтилляционного счетчика в качестве вещества, в котором останавливаются частицы, и регистрируя этим счетчиком только импульсы, вызванные звездами, то есть соответствующие большому выделению энергии в сцинтилляторе, можно осуществить простой детектор, обладающий селективной чувствительностью к  $\pi^-$ -мезонам. Принципиальная возможность создания такого звездного детектора  $\pi^-$ -мезонов, не чувствительного к другим частицам, не вызывает сомнений, так как путем увеличения порога амплитудной дискриминации импульсов на выходе сцинтилляционного счетчика можно сделать сколь угодно малой эффективность регистрации частиц, не образующих высокоэнергичных звезд. Однако с увеличением порога дискриминации должна падать также, правда, не столь быстро, и эффективность регистрации звезд, так что априори не ясно, можно ли осуществить практически пригодный звездный детектор, эффективность которого была бы достаточно высока. Чтобы ответить на этот вопрос, необходимо исследовать амплитудные спектры импульсов, возникающих на выходе сцинтилляционного счетчика при остановке в сцинтилляторе как  $\pi^-$ -мезонов, так и частиц, не образующих звезд /например,  $\pi^+$ -мезонов/. Эффективный звездный детектор может быть осуществлен только в том случае, если эти спектры в значительной своей части окажутся неперекрывающимися.

## 2. Спектры импульсов

Для измерения спектров импульсов нами было использовано устройство, схематически представленное на рис. 1. Коллимированный пучок  $\pi^-$ -мезонов с энергией 170 Мэв, выведенный из камеры фазотрона Лаборатории ядерных

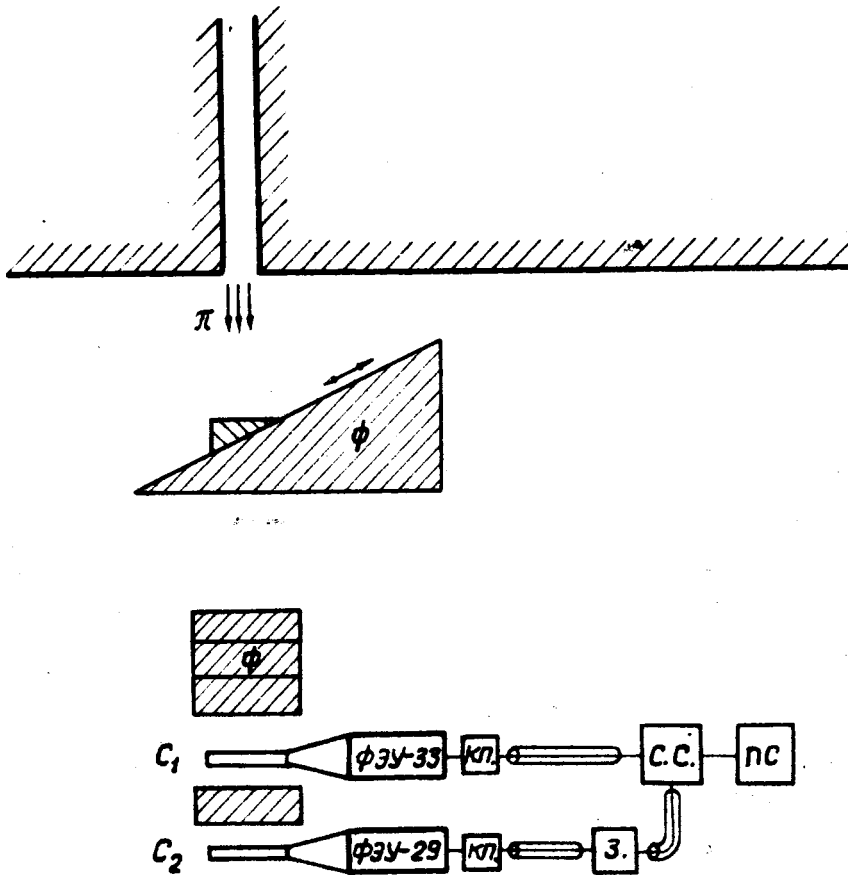


Рис. 1. Схема детектора.  $C_1$  и  $C_2$  - сцинтилляционные счетчики; к.п. - катодные повторители; с.с. - схема совпадений; п.с. - пересчетное устройство; з. - переменная задержка /до  $5 \cdot 10^{-8}$  сек/ для компенсации временного рассогласования счетчиков  $C_1$  и  $C_2$  при изменении величины  $V_2$ ; ф. - тормозящие фильтры.

проблем Объединенного института ядерных исследований, проходил через графитовый фильтр. Заторможенные  $\pi^-$ -мезоны регистрировались телескопом из двух сцинтилляционных счетчиков, включенных на совпадение. Пластические сцинтилляторы обоих счетчиков имели размеры  $6 \times 6 \times 1,5$  см<sup>3</sup>. Фотоумножитель первого счетчика ФЭУ-33 работал в режиме временного разрешения, фотоумножитель второго счетчика ФЭУ-29 - в спектрометрическом режиме. Схема совпадений мостового типа была собрана на полупроводниковых диодах Д-2А. Разре-

шающее время ее определялось длиной формирующих короткозамкнутых кабелей и составляло  $10^{-8}$  сек. С выхода схемы совпадений импульс подавался на схему управления амплитудного анализатора ААДО-1. Одновременно на вход этого анализатора поступал подлежащий анализу импульс с выхода счетчика  $C_2$ .

Амплитудные спектры импульсов были получены при различных толщинах тормозящего фильтра /рис. 2а/. Первый из измеренных спектров представляет собой сравнительно узкую линию, соответствующую прохождению через сцинтиллятор  $C_2$  частиц с релятивистскими ионизационными потерями. Следующий спектр был получен при фильтре, выбранном так, чтобы  $\pi^-$ -мезоны теряли в детекторе почти всю энергию, однако еще не останавливались в  $C_2$ . Наконец, третий спектр был измерен при толщине фильтра, соответствующей максимальному числу остановок  $\pi^-$ -мезонов в сцинтилляторе  $C_2$ . В последнем случае в сцинтилляторе останавливалось 20% всех падающих на него  $\pi^-$ -мезонов, остальные проходили сцинтиллятор насквозь. Спектр импульсов от этих проходящих  $\pi^-$ -мезонов должен иметь вид, аналогичный второму спектру на рис. 2а. Поэтому, вычитая второй спектр из третьего /после соответствующей нормировки/, можно выделить спектр импульсов, отвечающий только остановкам  $\pi^-$ -мезонов /рис. 2б/.

При остановке  $\pi^-$ -мезонов в сцинтилляторе энергия выделяется за счет двух последовательно протекающих процессов. Во-первых,  $\pi^-$ -мезон тормозится, теряя на ионизацию окружающей среды довольно большую энергию / $\approx 10$  Мэв в нашем случае/. Затем он производит ядерное расщепление, и разлетающиеся частицы звезды оставляют в сцинтилляторе часть своей энергии. Спектр, приведенный на рис. 2б, представляет собой, таким образом, результат наложения двух распределений, "спектра остановок" и "спектра звезд", соответствующих указанным выше процессам. Последнее из этих распределений является характерным только для  $\pi^-$ -мезонов. Что же касается "спектра остановок", то он должен быть одинаковым для  $\pi^-$ - и  $\pi^+$ -мезонов, а для  $\mu$ -мезонов - немного сдвинут в сторону малых импульсов.

Экспериментальное сопоставление спектров импульсов, образующихся при остановке  $\pi^-$ - и  $\pi^+$ -мезонов в сцинтилляторе, было проведено нами на пучках  $\pi^-$ - и  $\pi^+$ -мезонов с одинаковыми средними энергиями /70 Мэв/

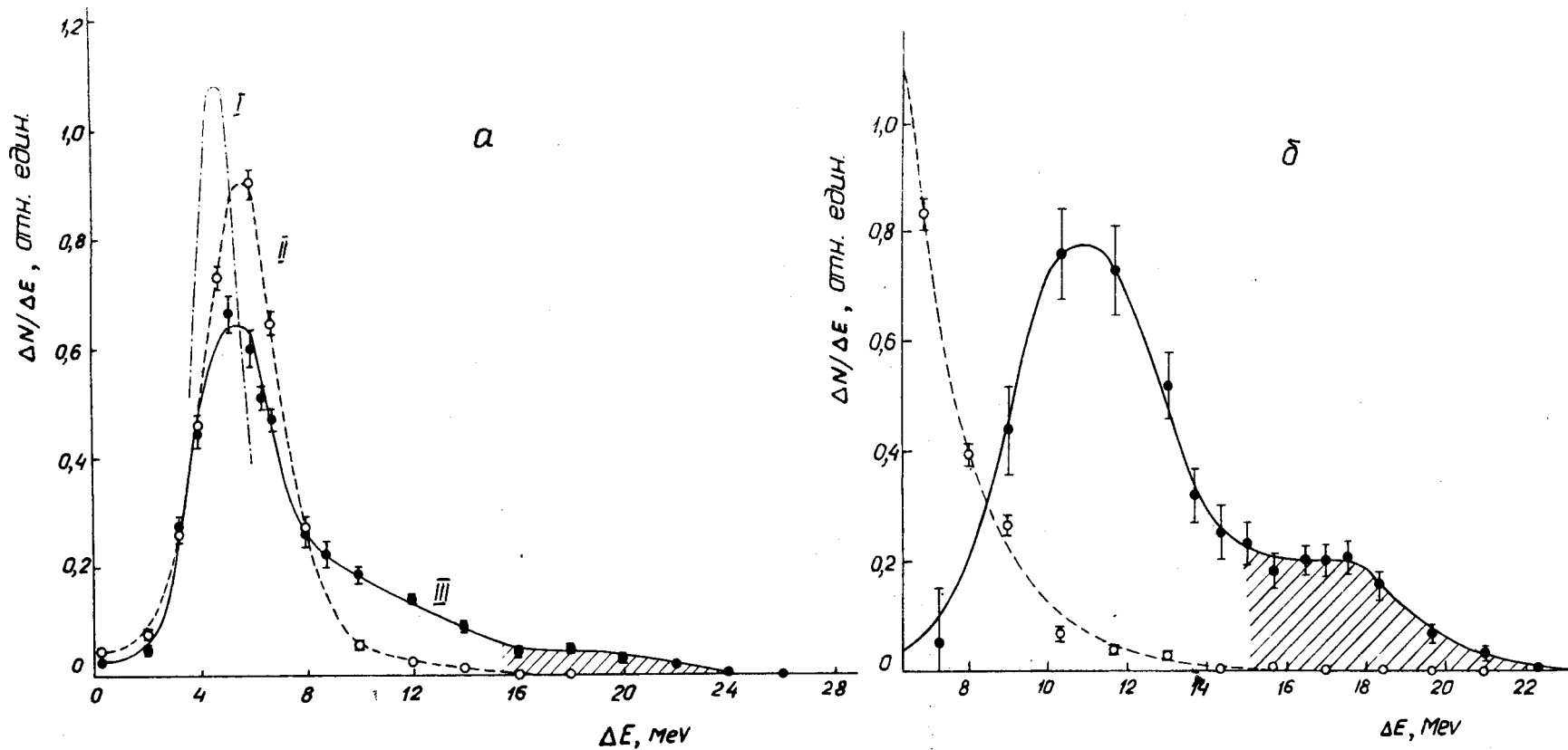


Рис. 2. Спектры импульсов в счетчике  $S_2$ . По оси абсцисс отложена величина энергии, выделенной  $\pi^-$ -мезоном в сцинтиляторе. Спектры нормированы на одинаковую площадь. Заштрихована область спектра, не перекрывающаяся со "спектром остановок".

- а/ 1 - спектр импульсов от проходящих релятивистских  $\pi^-$ -мезонов с остаточным пробегом  $50 \text{ г/см}^2$  углерода и разбросом пробегов  $\pm 4 \text{ г/см}^2$ ; 11 - спектр при остаточном пробеге  $10 \text{ г/см}^2$ ; 111 - спектр, соответствующий нулевому остаточному пробегу.
- б/  $\text{I}$  - спектр импульсов от  $\pi^-$ -мезонов, остановившихся в сцинтиляторе;  $\text{II}$  - часть спектра 11.

и разбросами пробегов. Сопоставление показало, что примерно третья часть останавливающихся  $\pi^-$ -мезонов дает импульсы, превышающие максимальный импульс в "спектре остановок". Эта часть спектра, выделенная на рис. 2 штриховкой, и может быть использована для работы телескопа в режиме звездного детектора. Из сказанного выше следует, что ожидаемая эффективность регистрации этим детектором останавливающихся  $\pi^-$ -мезонов должна быть довольно высокой  $\approx 30\%$ .

### 3. Эффективность

Для того, чтобы телескоп, приведенный на рис. 1, мог регистрировать только звезды от  $\pi^-$ -мезонов, достаточно установить на выходе счетчика  $S_2$  дискриминатор, не пропускающий малые импульсы на схему совпадений. Аналогичный результат, но еще более простым путем, может быть получен, если уменьшить напряжение  $V_2$ , которое подается на фотоумножитель этого счетчика. На рис. 3 показано как изменяются характеристики детектора при уменьшении напряжения  $V_2$ . Следует, конечно, иметь в виду относительный характер всех приводимых здесь и ниже значений  $V_2$ . На этом рисунке приведены результаты измерения зависимости скорости счета  $\pi^-$ -мезонов детектором от толщины проходимого ими вещества  $R$  /фильтр и сцинтилляторы/. Средний пробег  $\pi^-$ -мезонов составлял  $82,5 \text{ г/см}^2$  углерода, что соответствовало энергии  $170 \text{ Мэв}$ ; разброс пробегов, обусловленный немонотонностью пучка и страглингом, был равен  $\pm 4 \text{ г/см}^2$ . В области больших напряжений  $V_2 \geq 1400 \text{ в}$ , где эффективности регистрации проходящих и останавливающихся  $\pi^-$ -мезонов близки к единице и не изменяются поэтому при изменении  $V_2$ , зависимость  $N(R)$  представляет собой интегральную функцию распределения пробегов. При напряжениях  $V_2 < 1400$  в форма кривой  $N(R)$  претерпевает существенные изменения. Скорость счета в области толщин  $R \leq 50 \text{ г/см}^2$ , где телескоп регистрирует только проходящие  $\pi^-$ -мезоны, падает с уменьшением  $V_2$  значительно быстрее, чем при  $58 \leq R \leq 86 \text{ г/см}^2$ , где наряду с проходящими  $\pi^-$ -мезонами регистрируются и  $\pi^-$ -мезоны, остановившиеся в сцинтилляторе  $S_2$ . Изменение формы кривой  $N(R)$  с уменьшением  $V_2$  продолжается вплоть до  $V_2 = 1100 \text{ в}$ . При дальнейшем понижении напряжения форма "пика" уже не



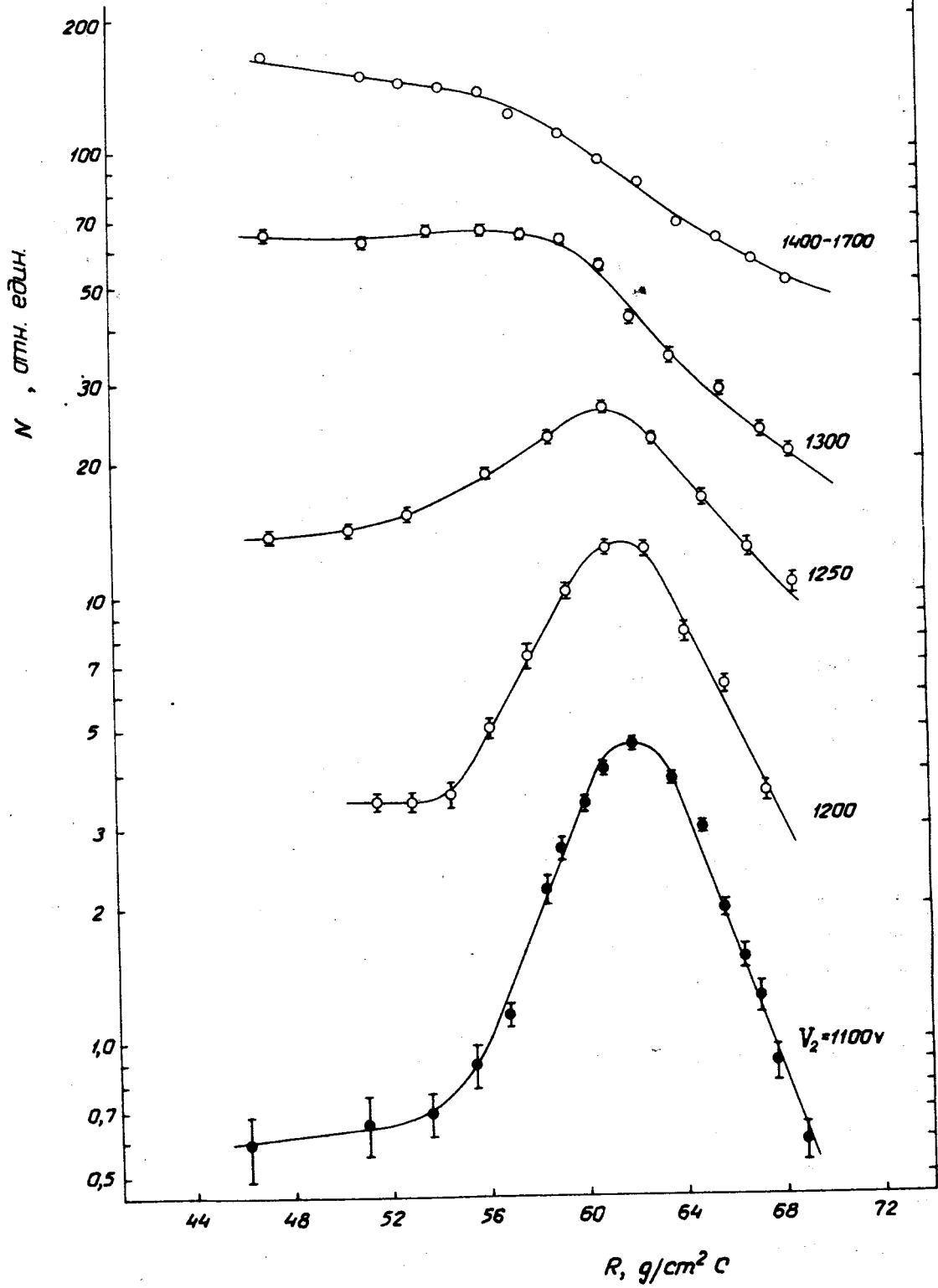


Рис. 3. Зависимость  $N(R)$  при разных напряжениях  $V_2$ .

меняется, и происходит лишь одинаковое уменьшение величин  $N$  для всех значений  $R$ . В этой области напряжений кривая  $N(R)$  практически совпадает с дифференциальной функцией распределения пробегов.

Зная функцию распределения пробегов  $\pi^-$ -мезонов, из найденных зависимостей  $N(R)$  нетрудно получить величины эффективностей регистрации проходящих ( $\epsilon_0$ ) и останавливающихся ( $\epsilon_{st}$ )  $\pi^-$ -мезонов. При вычислении этих эффективностей /рис.4/ были использованы как зависимости, приведенные

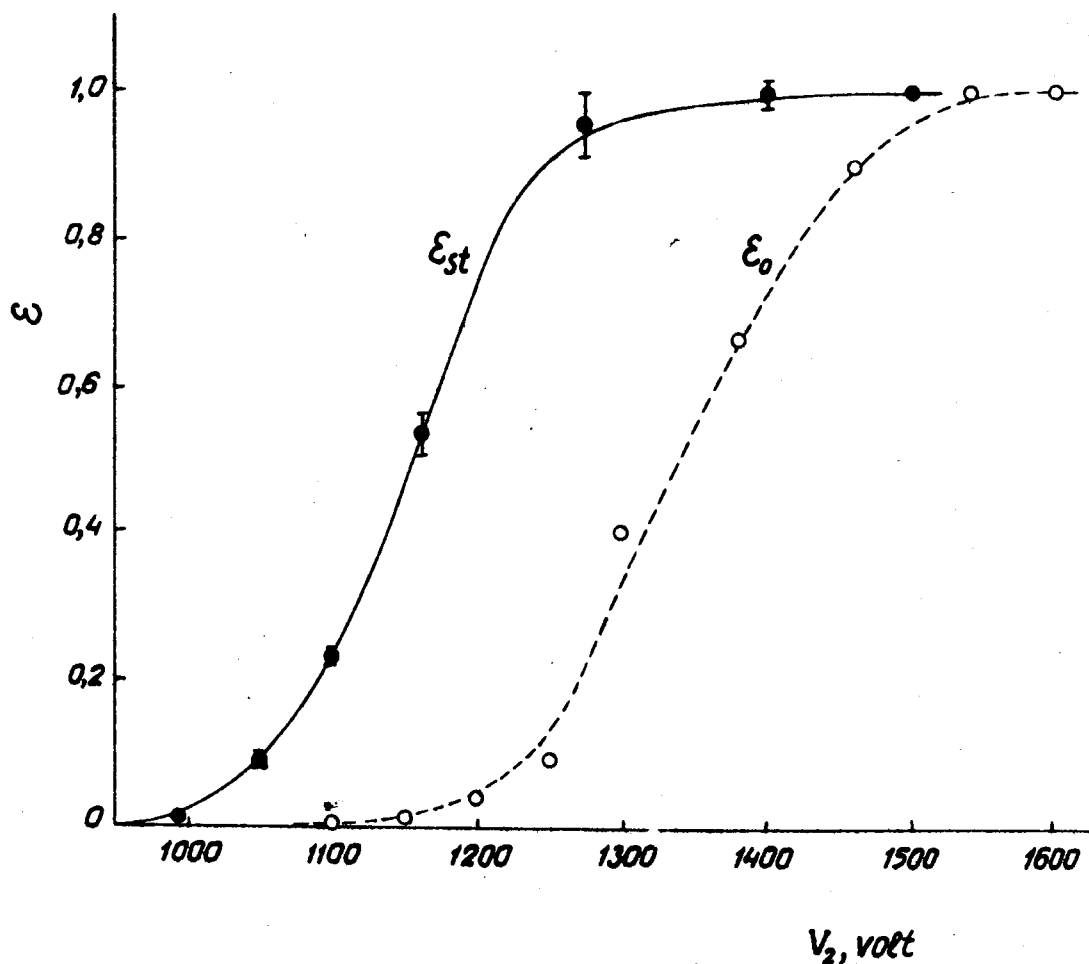


Рис. 4. Эффективность детектора.  $\bullet$  -  $\epsilon_{st}$  ;  $\circ$  -  $\epsilon_0$ . Эффективность  $\epsilon_0$  измерена для  $\pi^-$ -мезонов с остаточным пробегом, равным  $10 \text{ г/см}^2 \text{ С.}$

на рис. 3, так и аналогичные кривые, измеренные на пучке  $\pi^-$ -мезонов с энергией 67 Мэв. Как видно из рис. 4, сначала эффективность  $\epsilon_0$  падает с уменьшением напряжения значительно быстрее, чем  $\epsilon_{st}$ , в согласии со спектрами, приведенными на рис. 2. Однако, при малых напряжениях рост отношения  $\epsilon_{st}/\epsilon_0$  замедляется, и в области  $V_2 \approx 1100$  в величина этого отношения уже не зависит от  $V_2$ /рис. 5/. Подобное поведение величины  $\epsilon_{st}/\epsilon_0$  легко понять, если учесть, что  $\pi^-$ -мезоны образуют звезды как при остановке в веществе, так и на лету. Отношение вероятностей этих двух процессов для применявшегося сцинтиллятора равно примерно 50, что близко к величине  $\epsilon_{st}/\epsilon_0$ , полученной при малых напряжениях, где детектор регистрирует только звезды.

По-иному изменяется отношение  $\epsilon_{st}/\epsilon_0$  с уменьшением  $V_2$  в случае, когда детектор регистрирует  $\pi^+$ -мезоны /рис.5/. В отличие от  $\pi^-$ -мезонов  $\pi^+$ -мезоны образуют звезды только на лету. Поэтому величины  $\epsilon_{st}/\epsilon_0$  для  $\pi^+$ - и  $\pi^-$ -мезонов совпадают лишь в области больших значений  $V_2$ , где детектор эффективно регистрирует импульсы, принадлежащие "спектру остановок". При вступлении же в область напряжений, где детектор чувствителен только к звездам, эффективность  $\epsilon_{st}$  для  $\pi^+$ -мезонов падает, и в соответствии с этим отношение  $\epsilon_{st}/\epsilon_0$  быстро уменьшается.

Сопоставление кривых, приведенных на рис. 5, показывает, что телескоп начинает работать в режиме звездного детектора при напряжениях  $V_2 \approx 1100$  в. Соответствующая этому напряжению эффективность  $\epsilon_{st}$  равна примерно 30%, что близко к оценке, сделанной ранее на основании анализа спектров. Эффективность регистрации остановившихся в сцинтилляторе  $\pi^-$ -мезонов  $\epsilon_{st}$  следует, естественно, отличать от эффективности регистрации  $\pi^-$ -мезонов, попадающих на вход детектора /  $w$  /. В нашем случае  $w$  значительно меньше, чем  $\epsilon_{st}$ , как вследствие выбывания мезонов при прохождении их через фильтр детектора, так и из-за сравнительно малой толщины сцинтиллятора. Если использовать толстый сцинтиллятор, то есть близкий по толщине к величине разброса пробега  $\pi^-$ -мезонов, то последний из указанных выше факторов отпадает. В этом оптимальном случае отношение  $w/\epsilon_{st}$  оказывается равным 70% при энергии  $\pi^-$ -мезонов 65 Мэв и 40% - при 170 Мэв.

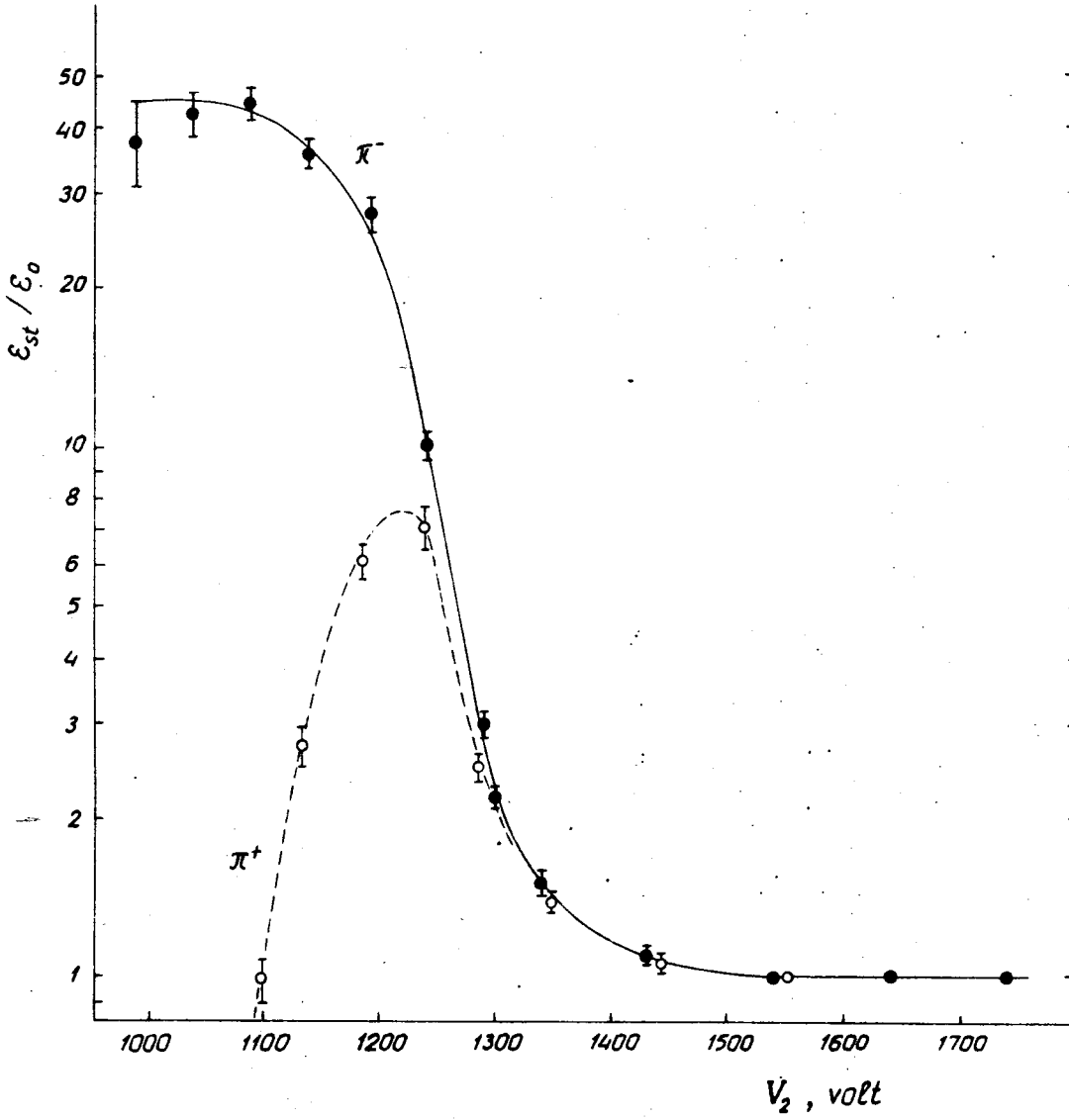


Рис. 5. Отношение  $\epsilon_{st}/\epsilon_0$  .  $\bullet$  - для  $\pi^-$ -мезонов;  $\circ$  - для  $\pi^+$ -мезонов.

Звездный детектор с толстым сцинтиллятором может быть использован в опытах, где требуется большая эффективность регистрации  $\pi^-$ -мезонов. Если не нужно измерить кривую пробегов  $\pi^-$ -мезонов, то толщину сцинтиллятора следует брать малой по сравнению с разбросом пробегов. Типичные кривые пробегов, которые получаются при работе телескопа в режиме звездного детектора, приведены на рис. 6. Эти кривые измерены на двух различных пучках  $\pi^-$ -мезонов со средними энергиями 67 и 170 Мэв.

#### 4. Селективные свойства детектора

Так как звездный детектор регистрирует только высокоэнергичные звезды, образующиеся при остановке  $\pi^-$ -мезонов, он мало чувствителен к другим частицам, не образующим таких звезд. Селективную способность звездного детектора удобно характеризовать величиной коэффициента отбора  $K$ , представляющего собой отношение эффективности регистрации остановок  $\pi^-$ -мезонов к эффективности регистрации других частиц, как останавливающихся в сцинтилляторе /  $K_{st}$  /, так и проходящих через детектор /  $K_0$  /.

Мю-мезоны и электроны не образуют высокоэнергичных звезд ни на лету, ни при остановке. Отрицательные  $\mu^-$ -мезоны при остановке в веществе с большим атомным весом могут образовывать звезды, но с малым энерговыделением. Поэтому коэффициенты отбора  $K_{st}$  и  $K_0$  для легких частиц могут быть сделаны сколь угодно большими путем уменьшения напряжения  $V_2$ , причем  $K_0 \gg K_{st}$ . На рис. 7 приведена часть измеренной звездным детектором кривой пробегов  $\pi^-$ -мезонов с энергией 170 Мэв и  $\mu^-$ -мезонов, содержащихся в этом же пучке. Если бы эффективность регистрации  $\mu^-$ -мезонов была бы такой же, как и для  $\pi^-$ -мезонов, то есть  $K_{st} = 1$ , то измеренная кривая пробегов  $N(R)$  в области больших толщин следовала бы пунктирной кривой, показанной на рисунке. Как видно из рисунка, в этом районе не обнаруживается никакого максимума, а  $K_{st} \approx 30$ . Таким образом, уже при напряжении  $V_2 = 1100$  в, то есть вблизи границы звездного детектора, отбор в случае  $\mu^-$ -мезонов характеризуется большой величиной  $K$ . Этот результат может быть отнесен, очевидно, и к  $\mu^+$ -мезонам. Величина  $K$  для

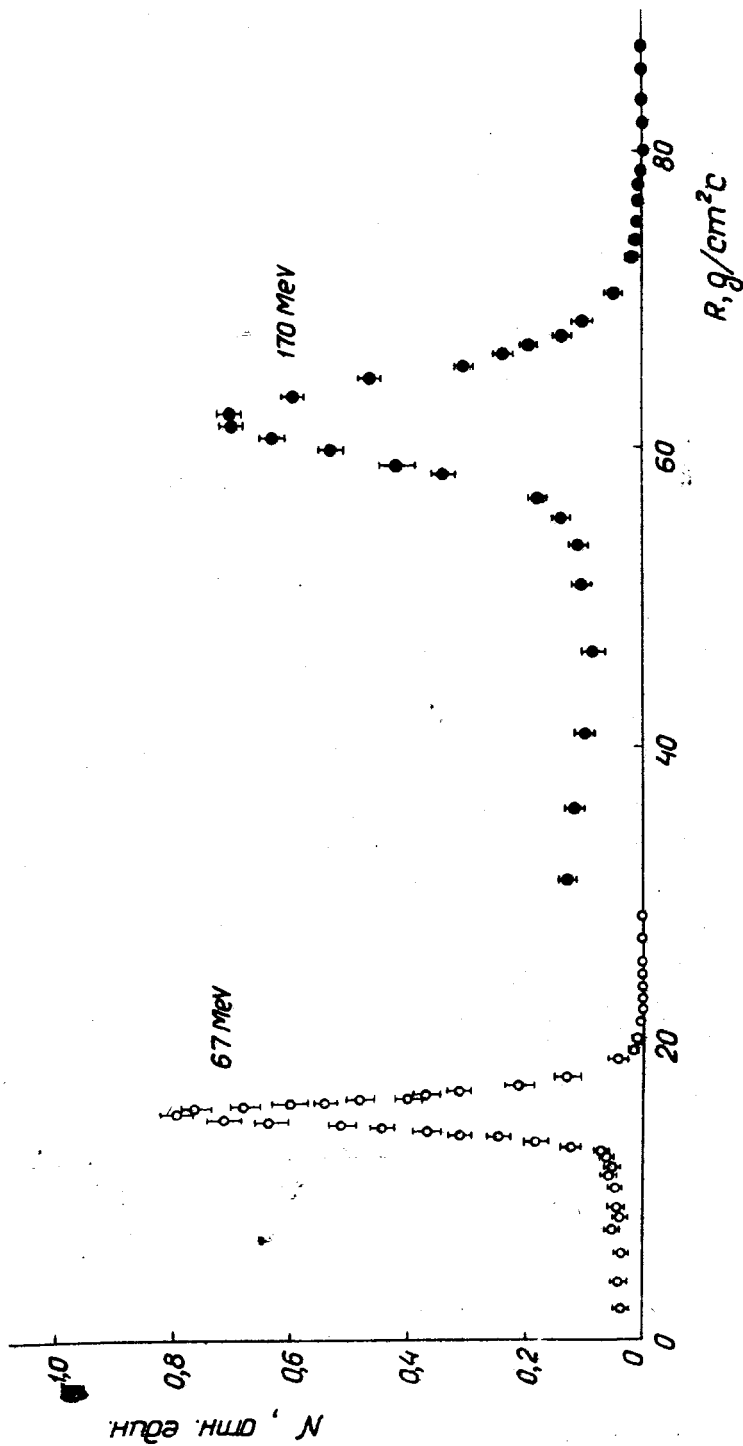


Рис. 6. Кривые пробегов для пучков  $\mu^-$ -мезонов с энергией 67 Мэв /  $\circ$  / и 170 Мэв /  $\bullet$  /.  $V_1 = 1100$  в.

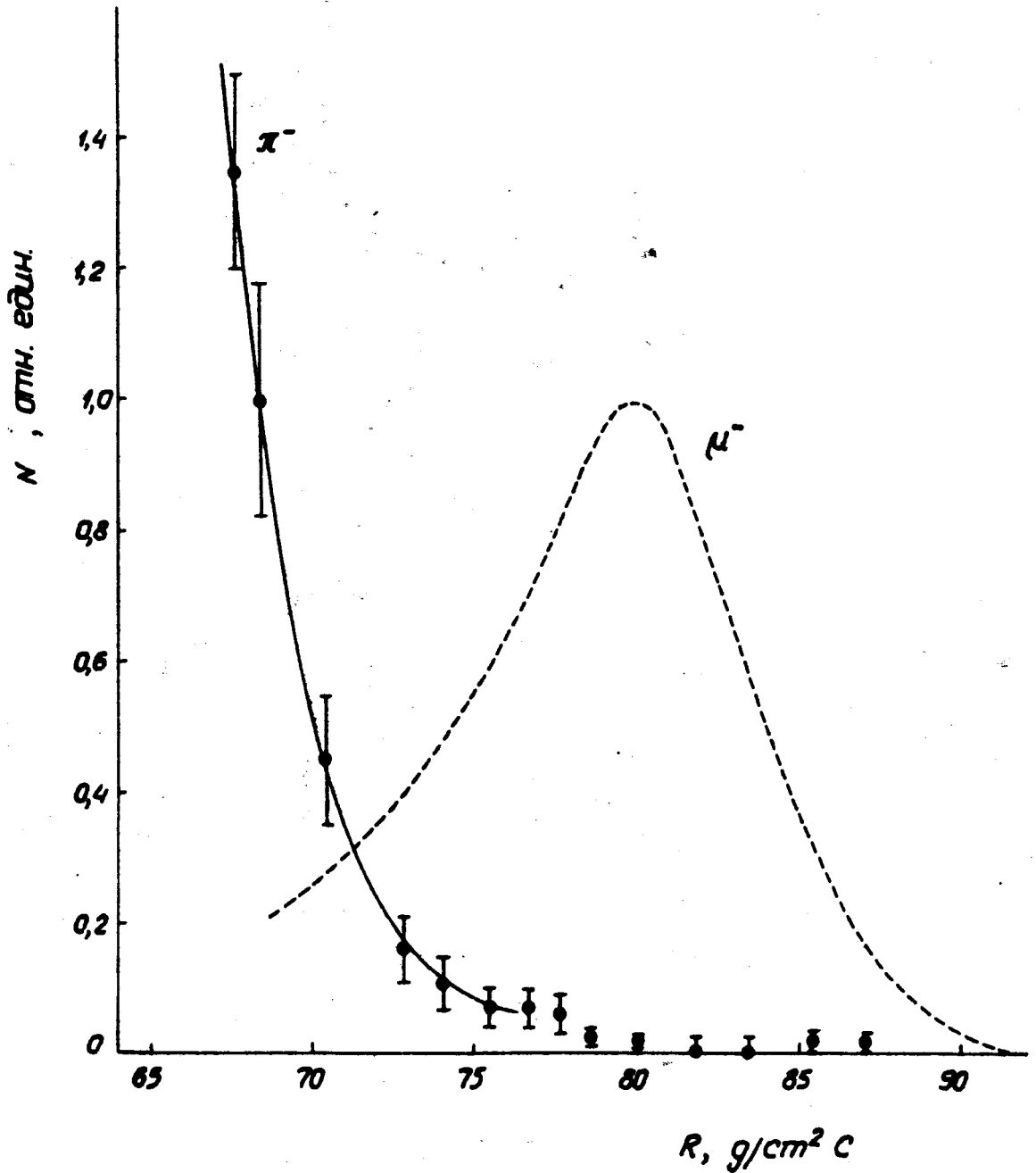


Рис. 7. Неэффективность звездного детектора к  $\mu^-$ -мезонам.  $\bullet$  - измеренная кривая пробегов. Действительная кривая пробегов  $\mu^-$ -мезонов показана пунктиром.  $V_2 = 1100$  в.

электронов должна быть еще большей, чем для  $\mu$ -мезонов, ввиду сравнительно малого выделения энергии при прохождении электронов через сцинтиллятор.

Отбор в случае проходящих  $\pi^+$ -мезонов характеризуется, как показали измерения, той же величиной  $K_0 \approx 50$ , что и для  $\pi^-$ -мезонов. Заметим, что аналогичной должна быть величина  $K_0$  и для других ядерно-активных частиц, поскольку все они образуют на лету звезды с примерно одинаковой вероятностью. Величина же  $K_{ст}$  для  $\pi^+$ -мезонов оказалась близкой к полученной для  $\mu$ -мезонов /см. рис.8/ и так же, как и в случае  $\mu$ -мезонов, может быть сделана очень большой путем уменьшения  $V_2$ .

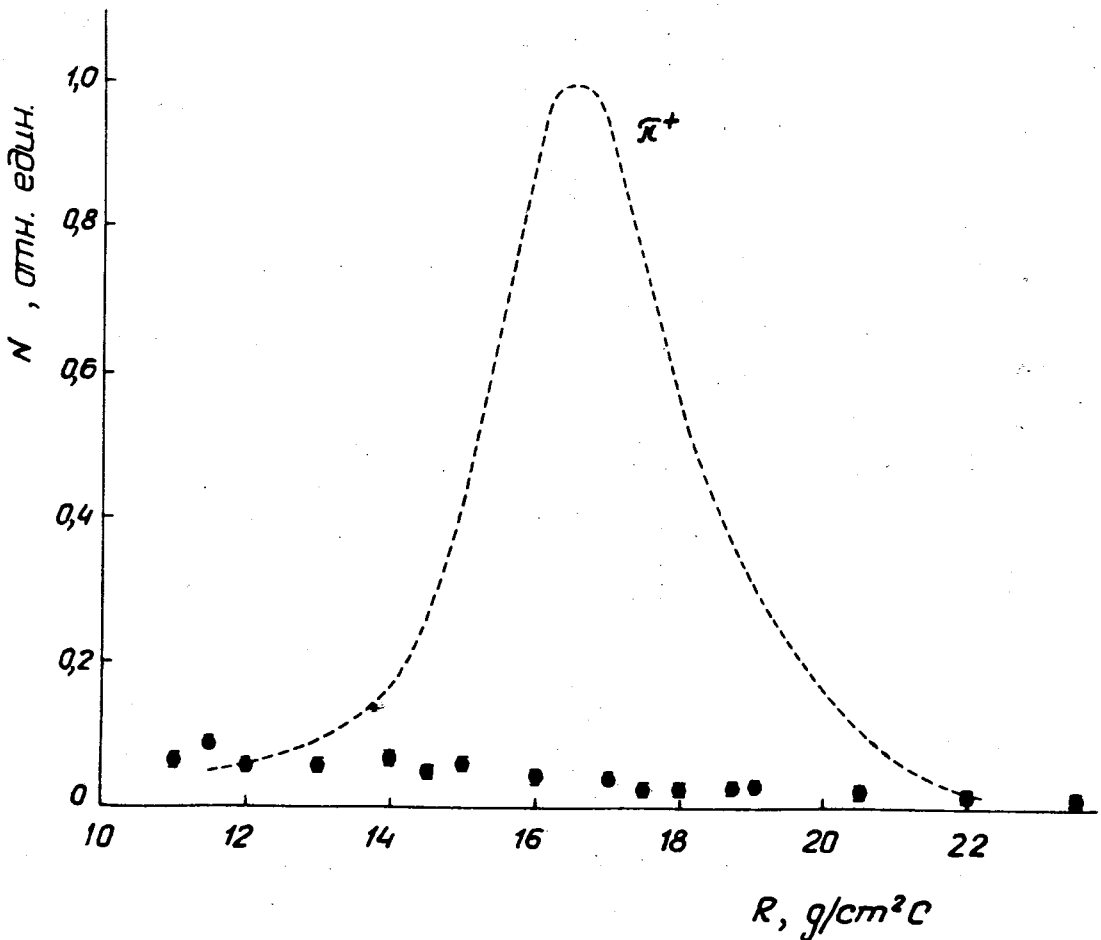


Рис. 8. То же, что и на рис. 7, но для  $\pi^+$ -мезонов со средней энергией 67 Мэв.



Чувствительность звездного детектора к частицам, более тяжелым, чем  $\pi$ -мезоны, не исследовалась, и мы ограничимся здесь лишь замечанием, что величина  $K_{st}$  должна уменьшаться с ростом массы частицы.

### 5. Модификации детектора

Как уже отмечалось, верхней границей области напряжений, где телескоп работает в режиме звездного детектора, является значение  $V_2 = 1100-1150$  в. Если увеличить напряжение еще на 50-100 вольт, то детектор начинает регистрировать импульсы, принадлежащие "спектру остановок". При этом, как видно из рис. 4 и 5, эффективность регистрации остановок  $\epsilon_{st}$  может быть получена близкой к единице, в то время как отношение  $\epsilon_{st}/\epsilon_0$  еще остается большим. Работающий в таком режиме телескоп /мы будем называть его детектором остановок/ в отличие от звездного детектора в равной мере чувствителен как к  $\pi^-$ -мезонам, так и к  $\pi^+$ -,  $\mu^-$ - и  $\mu^+$ -мезонам /рис.9/.

При интенсивности пучка  $\pi$ -мезонов  $\approx 10^4$  сек<sup>-1</sup> скорость счета детектора остановок достигает нескольких сотен отсчетов в секунду. Столь большая скорость счета позволяет автоматизировать процедуру измерения кривой пробегов  $N(R)$ , что дает значительные преимущества в случае, когда в течение эксперимента нужно часто без большой потери времени контролировать величину энергии пучка. Для записи кривой пробегов к выходу схемы совпадений подключается самопишущий интегратор, мотор которого вращается синхронно с мотором, движущим фильтр-клин /рис. 1/. Типичная кривая пробегов, измеренная таким способом, приведена на рис. 10. Вся процедура измерения прога занимает несколько минут.

Регистрируемые в режиме звездного детектора импульсы в счетчике  $C_2$  настолько велики, что они существенно превышают все посторонние импульсы, связанные с фоном в экспериментальном зале ускорителя при работе на пучках  $\pi^-$ -мезонов. Это обстоятельство позволяет упростить схему звездного детектора, исключив из нее счетчик  $C_1$  и соединив вход пересчетной схемы непосредственно с выходом счетчика  $C_2$ . Кривая пробегов  $\pi^-$ -мезонов с энергией 70 Мэв, измеренная при помощи такого упрощенного детектора, со-

552/5 мр.

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

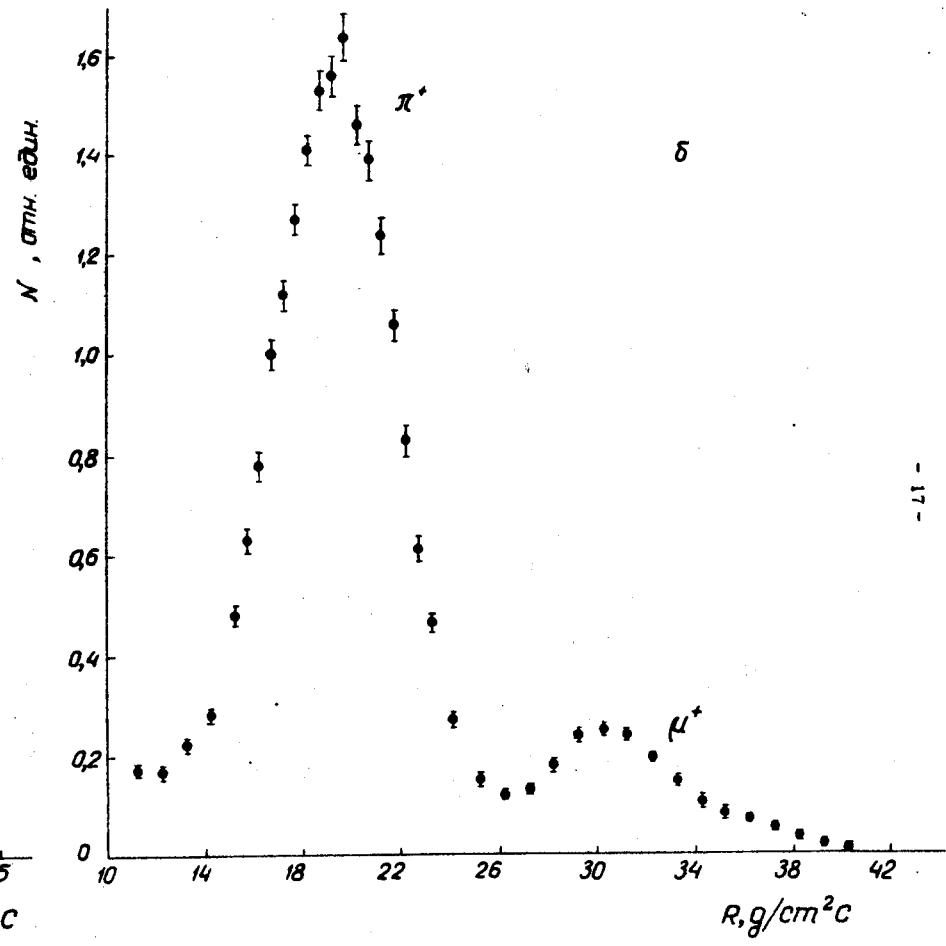
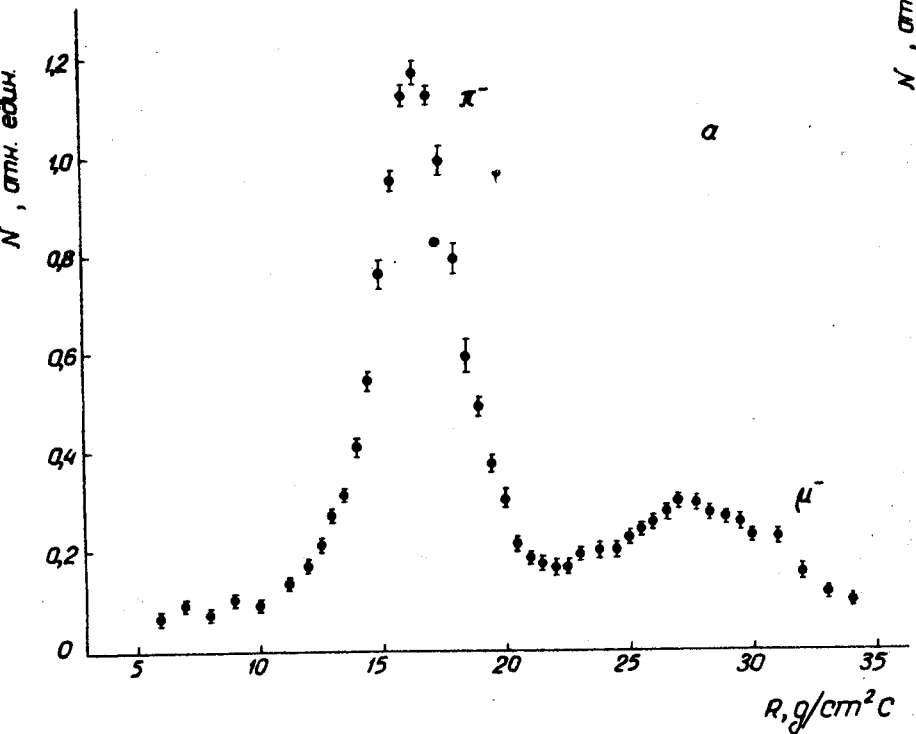


Рис. 8. Кривые пробегов, измеренные при помощи детектора остановок.  
 а/ измерено для пучка, содержащего  $\pi^-$ - и  $\mu^-$ -мезоны с импульсом 150 Мэв/с /энергия  $\pi^-$ -мезонов равна 67 Мэв/;  
 б/ измерено для пучка  $\pi^+$ - и  $\mu^+$ -мезонов с импульсом 163 Мэв/с.  $V_2 = 1250$  в.

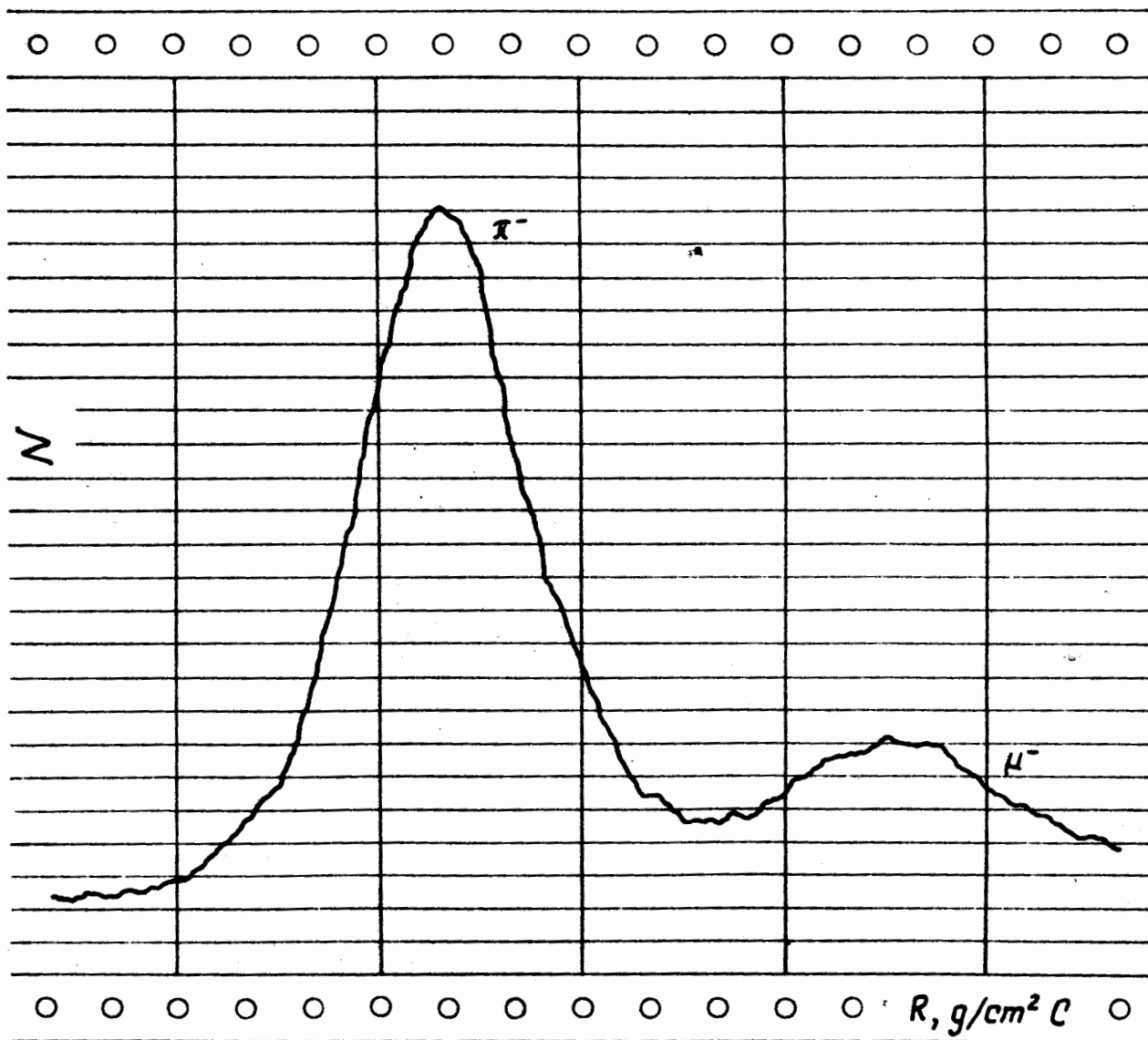


Рис. 10. Кривая пробегов, записанная на ленте самопишущего интегратора.  
 $V_2 = 1250$ .

держашего всего один счетчик, оказалась мало отличающейся от действительной кривой пробегов. Однако звездный детектор с одним счетчиком вряд ли может быть использован для работы в более тяжелых, чем в нашем случае, фоновых условиях /например, на выведенном протонном или нейтронном пучке/.

Наконец, укажем на еще одну модификацию схемы звездного детектора. Эта модификация заключается в замене счетчика  $C_2$  на счетчик, аналогичный  $C_1$ , то есть с хорошим временным разрешением, но со сравнительно плохими спектрметрическими характеристиками. При этом, естественно, не удастся уже получить столь большой величины отношения  $\epsilon_{st}/\epsilon_0$ , как на рис. 5; оно оказывается равным 10-20. Однако звездный детектор в таком упрощенном виде обладает тем практическим преимуществом, что ничем не отличается от "обычных" сцинтилляционных телескопов, так что последние могут быть использованы в режиме звездного детектора для грубого измерения кривой пробегов  $\pi^-$ -мезонов без внесения в них каких-либо существенных изменений.

### 6. Заключение

Проведенное исследование характеристик детектора показывает, что область его рабочих напряжений разделяется на три существенно различающиеся части. При малых напряжениях телескоп работает в режиме звездного детектора, хорошо отличая останавливающиеся в сцинтилляторе отрицательные  $\pi^-$ -мезоны от других останавливающихся и проходящих частиц. Интервал напряжений, отвечающих этому режиму, равен 150-200 в для выбранного нами типа фотоумножителя. Более высокие напряжения /1200 - 1270/ в соответствуют режиму детектора установок. В этом случае детектор одинаково хорошо регистрирует остановки  $\pi^-$ - и  $\mu^-$ -мезонов обоих знаков. Наконец, в области еще более высоких напряжений /  $V_2 > 1400$  в / детектор работает, как "обычный" телескоп, не обладающий никакими селективными свойствами.

Описанный детектор может быть использован как спектрометр, позволяющий измерять спектры  $\pi^-$ -мезонов в условиях значительного фона постороннего излучения. Наиболее целесообразно применять его для исследования спектров в области малых энергий  $\pi^-$ -мезонов /  $< 50$  Мэв /, где использование магнитных спектрометров обычно затруднено из-за наличия большого  $\mu^-$ -мезонного фона.

В заключение следует отметить, что благодаря своей простоте звездный детектор обладает хорошими эксплуатационными качествами. Он прост в налад-

ке и стабилен в работе; за время эксплуатации звездного детектора /около года/ его параметры не претерпели заметных изменений.

Л и т е р а т у р а

1. А.Ф. Дунайцев, Ю.Д. Прокошкин, Тан Сяо-вэй. ПТЭ, 1960 /в печати/;  
*A.F. Dunaitzev, Yu.D. Prokoshkin, Tang Syao-wei. Proceedings of the International conference on high energy accelerators and instrumentation. p. 592, 1959, CERN, Geneva.*

Рукопись поступила в издательский отдел  
25 января 1960 года.