

С 346.48

М-91С

ЯФ, 1967, т. 5, в. 5, с. 1072 3/xii-66

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P1 - 2996



М.А. Мусин, В.И. Петрухин, Ю.Д. Прокошкин

ИЗМЕРЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТЕЙ  
РЕАКЦИЙ  $\pi^- d \rightarrow nn$  И  $\pi^- d \rightarrow nny$

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

1966

P1 - 2996

М.А. Мусин, В.И. Петрухин, Ю.Д. Прокошкин

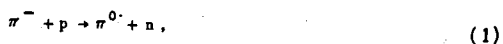
ИЗМЕРЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТЕЙ  
РЕАКЦИЙ  $\pi^- d \rightarrow pn$  И  $\pi^- d \rightarrow pny$

Направлено в ЯФ

4612/1 н.у.

Общественный доступ  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

Исследование реакций, протекающих при остановке  $\pi^-$ -мезонов в водороде



и в дейтерии



позволяет установить количественную связь между процессами образования и рассеяния  $\pi^-$ -мезонов. Как было показано Андерсоном и Ферми<sup>/1/</sup>, определение отношения вероятностей первых двух реакций (отношения Панофского)  $R = W(\pi^- p \rightarrow \pi^0 n) / W(\pi^- p \rightarrow \gamma n)$  дает возможность связать процессы рассеяния и фоторождения пионов на нуклонах и проверить согласие экспериментальных данных, полученных при исследовании этих процессов в околороговой области. Аналогичную роль играет отношение вероятностей реакций (3) и (4)  $S = W(\pi^- d \rightarrow nn) / W(\pi^- d \rightarrow nn \gamma)$  для процессов образования пионов в нуклон-нуклонных и фотон-нуклонных взаимодействиях (Бракнер, Сербер и Ватсон<sup>/2/</sup>).

Из указанных выше реакций особо тщательно были изучены реакции (1) и (2). Причиной этого явился тот факт, что определенное в первых экспериментальных работах значение  $R$  оказалось существенно меньшим, чем предсказанное теоретически на основании известных данных о фоторождении и рассеянии пионов. В результате вызванной этим противоречием серии работ были уточнены как экспериментальные, так и теоретические значения  $R$ . Полученные величины оказались одинаковыми:  $R_{\text{теор}} = 1,55 \pm 0,24$ <sup>/4/</sup>,  $R_{\text{эксп.}} = 1,53 \pm 0,02$ <sup>/3/</sup>.

Первые исследования<sup>/5-7/</sup> реакций (3) и (4) не дали повода к беспокойству: найденная в этих работах величина отношения  $S = 2,2 \pm 0,3$  оказалась совпадающей в пределах ошибок с величиной  $S = 1,6 \pm 0,4$ , вычисленной в импульсном приближении на основании данных об образовании мезонов  $\gamma$ -квантами и нуклонами. Однако позже Райаном<sup>/4/</sup> было получено существенно большее значение  $S = 3,16 \pm 0,12$ , которое резко расходится с вычисленной величиной. В работах, выполненных в Дубне<sup>/8/</sup> и Чикаго<sup>/8/</sup>, это расхождение было подтверждено. Таким образом, в мезонной физике низких энергий

сложилась сейчас столь же неопределенная ситуация, как это было несколько лет назад, когда обнаружилось неблагополучие с определением отношения Панофского. Наличие расхождения в величинах  $S$  требует как проведения дополнительных измерений  $S$ , так и проверки полученных ранее данных об образовании пионов и анализа точности импульсного приближения, используемого при вычислении  $S$ .

Целью настоящей работы являлось экспериментальное определение  $S$  относительно-ным методом путем сравнения потоков  $\gamma$ -квантов, испускаемых при остановке  $\pi^-$ -мезонов в водороде и дейтерии. Данные предварительной серии измерений были опубликованы ранее /8/.

## 2. Постановка эксперимента

Для регистрации  $\gamma$ -квантов, образующихся при остановке  $\pi^-$ -мезонов в водороде и дейтерии был использован телескоп счетчиков. Если число остановок  $\pi^-$ -мезонов в водороде и дейтерии одинаково, то величина  $S$  может быть определена путем сравнения скоростей счета телескопом  $\gamma$ -квантов  $N_H$  и  $N_D$ , испускаемых соответственно из водорода и дейтерии:

$$S = \frac{(1+P)\epsilon_4/\epsilon_2}{1+2P\epsilon_1/\epsilon_2} \left(\frac{N_H}{N_D}\right) - 1. \quad (5)$$

Здесь  $P$  - отношение Панофского,  $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_4$  - эффективности регистрации  $\gamma$ -квантов, образующихся в реакциях (1), (2), (4). Энергетические спектры  $\gamma$ -квантов в этих реакциях неодинаковы: в реакции (2) испускаются моноэнергичные  $\gamma$ -кванты с энергией 129 Мэв, а в случае реакции (4) спектр имеет форму узкого пика при энергии около 130 Мэв с "хвостом" в области меньших энергий. Так как эти спектры близки, отношение  $\epsilon_4/\epsilon_2$  мало отличается от единицы. Существенно больше различие в спектрах  $\gamma$ -квантов между реакциями (2) и (1). В последнем случае энергии  $\gamma$ -квантов заключены в интервале 55-83 Мэв. Поэтому отношение  $\epsilon_4/\epsilon_2$  значительно отличается от единицы ( $\approx 0,7$  в нашем случае).

Прежде чем переходить к описанию методики измерений, рассмотрим, какие точности могут быть реализованы в принятой постановке эксперимента. Погрешность определения  $S$ , связанная с неопределенностью величины отношения Панофского, составляет  $\frac{\Delta S}{S}|_P \approx -0,2 \frac{\Delta P}{P}$ . Поскольку  $P$  известно с точностью, лучшей 1,5% (см. выше), указанная погрешность  $\Delta S/S$  не превышает 0,3%. Отношение эффективностей  $\epsilon_4/\epsilon_2$  отличается от единицы всего на 1-2% и может быть определено с погрешностью, составляющей малую часть этой величины ( $\approx 0,2\%$ ). Так как

$$\frac{\Delta S}{S} \Big|_{\epsilon_4/\epsilon_2} \approx 1,3 \frac{\Delta(\epsilon_4/\epsilon_2)}{\epsilon_4/\epsilon_2}.$$

то погрешность  $\Delta S/S$  не превышает 0,3%. Точность экспериментального определения отношения  $\epsilon_1/\epsilon_2$  составляет около 2%. Такова же погрешность в величине  $S$ :

$$\frac{\Delta S}{S} \Big|_{\epsilon_1/\epsilon_2} \approx - \frac{\Delta(\epsilon_1/\epsilon_2)}{\epsilon_1/\epsilon_2}.$$

Наконец, укажем погрешность, возникающую из-за неточности определения отношения  $N_H/N_D$ :

$$\frac{\Delta S}{S} \Big|_{N_H/N_D} \approx 1,3 \frac{\Delta(N_H/N_D)}{N_H/N_D}.$$

В условиях описываемого эксперимента статистическая погрешность, с которой отношение  $N_H/N_D$  могло быть определено за 100-200 часов работы ускорителя, составляла 3-4%. Таким образом, эта погрешность в основном определяет точность измерения  $S$ .

## 3. Методика измерений

Эксперименты были выполнены на синхротроне Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ. Выведенный из камеры ускорителя пучок  $\pi^-$ -мезонов с импульсом 170 Мэв/с фокусировался квадрупольными линзами и рассеянным магнитным полем ускорителя и формировался системой свинцовых диафрагм и 4-метровым коллиматором в защитной стене.  $\pi^-$ -мезоны проходили через три сцинтилляционных счетчика (1,2,3) тормозящий фильтр и останавливались в газовой мишени высокого давления, которая заполнялась водородом или дейтерием (рис. 1). Толщина фильтра подбиралась так, чтобы  $\pi^-$ -мезоны эффективно останавливались в мишени. Интенсивность пучка измерялась при помощи счетчиков 1 и 2, включенных в мониторинговую схему совпадений /10/.

Образующиеся при захвате  $\pi^-$ -мезонов  $\gamma$ -кванты проходили через свинцовые диафрагмы и конвертировались в свинцовом конверторе в электронно-позитронные пары, которые регистрировались телескопом, состоящим из сцинтилляционного счетчика (4) и спектрометра полного поглощения (5) /11/. Скорости счета  $\gamma$ -квантов  $N_H$  и  $N_D$  определялись при помощи наносекундной схемы совпадений /10/, в которую были включены счетчики 3,4 и 5. Перед конвертором был помещен включенный на антисовпадение сцинтилляционный счетчик (6), исключавший фон, связанный с регистрацией заряженных частиц. На первой стадии эксперимента использовался еще один включенный на антисовпадение сцинтилляционный счетчик (7), помещенный за мишенью. Применение этого счетчика не привело к сколько-нибудь заметному снижению уровня фона, и в основных измерениях он не использовался.

Схема совпадений \*3+4+5-6\* запускала развертку скоростного пятилучевого осциллографа /12/, на входы которого были поданы импульсы от всех счетчиков. При помощи полученных осциллограмм производился временной и амплитудный анализ зарегистрированных событий.

#### 4. Измерения. Результаты

Наладка и калибровка аппаратуры были выполнены в предварительных экспериментах, где в качестве мишени использовался жидкий водород, залитый в тонкостенный сосуд Дьюара. В основных измерениях использовалась газовая мишень высокого давления. Мишень наполнялась водородом или дейтерием до давления около 25 атм. Количество газа в мишени определялось путем взвешивания с точностью, лучшей 0,3%, и выбиралось так, чтобы число остановок  $\pi^-$ -мезонов в водороде и дейтерии было одинаковым в пределах нескольких процентов (тормозные способности водорода и дейтерия, выраженные в Мэв см<sup>2</sup>/г, отличаются в 2 раза). Поправка, учитывающая небольшое отличие веса газа от расчетного, вносилась в результат измерений. Предварительно было показано, что скорость счета  $\gamma$ -квантов линейно растет с увеличением плотности газа (см. рис. 2).

Отношение скоростей счета  $N_H/N_D$  было определено в двух сериях измерений, продолжавшихся около 100 часов каждая. В процессе измерений мишень попеременно наполнялась водородом и дейтерием. Скорости счета  $N_H$  и  $N_D$  были измерены при различных толщинах свинцового конвертора. Аналогичные измерения были выполнены и с пустой мишенью. Газовая мишень периодически заменялась мишенью из гидрида лития (LiH), по выходу  $\gamma$ -квантов из которой осуществлялся контроль за стабильностью аппаратуры. Кроме того, установка была прокалбирована несколько раз в течение измерений при помощи наносекундных источников света [13]. В отдельных экспериментах была определена поправка, учитывающая перезарядку  $\pi^-$ -мезонов на лету. Эта поправка, связанная в основном с перезарядкой в боковых стенках мишени, оказалась небольшой (несколько процентов от скорости счета в случае пустой мишени) и одинаковой для пустой и наполненной газом мишени. Фон случайных совпадений составлял во всех случаях меньше 1%.

Результаты измерений приведены в таблице 1. Величины  $N_H$  и  $N_D$  были получены из этих данных как разности скоростей счета "с конвертором - без конвертора" и "мишень с газом - пустая мишень". Величины отношений  $N_H/N_D$ , определенные в первой и второй сериях, оказались одинаковыми в пределах погрешностей измерений: для конвертора толщиной 5 мм  $N_H/N_D = 4,42 \pm 0,27$  и  $4,36 \pm 0,25$  (среднее по двум сериям -  $4,39 \pm 0,18$ ) и для конвертера толщиной 2 мм  $N_H/N_D = 6,1 \pm 0,9$  и  $4,9 \pm 0,7$  (среднее -  $5,4 \pm 0,8$ ).

В полученные величины была внесена поправка, которая учитывала различие в эффективности регистрации  $\gamma$ -квантов, связанное с наличием порога у схемы совпадений. Для определения этой поправки были измерены на осциллограммах амплитуды импульсов черенковского спектрометра  $A_3$  и найдены величины отношений  $N_H/N_D$  при различных уровнях обрезания амплитудного спектра  $A_{5min}$  (рис. 3). Одновременно по известным спектрам  $\gamma$ -квантов в реакциях (1), (2) и (4) была вычислена зависи-

Таблица 1  
Измерение скорости счета N (на 10<sup>8</sup> отсчетов монитора)

Мишень, конвертор, мм	Толщина конвертора, мм	Скорость счета телескопа		Разность "мишень с газом-пустая мишень"		Разность "с конвертором - без конвертора"		Разность "мишень с газом - пустая мишень", "с конвертором - без конвертора"	
		I серия		II серия		I серия		II серия	
		I серия	II серия	I серия	II серия	I серия	II серия	I серия	II серия
H <sub>2</sub>	5	554 ± 12	576 ± 13	516 ± 13	526 ± 13	498 ± 13	503 ± 14	482 ± 14	484 ± 15
	2	366 ± 14	387 ± 8	332 ± 14	294 ± 8	310 ± 15	264 ± 10	298 ± 16	252 ± 11
	0	56 ± 5	78 ± 6	34 ± 6	42 ± 7	-	-	-	-
D <sub>2</sub>	5	153 ± 4	166 ± 4	115 ± 6	116 ± 5	125 ± 5	130 ± 5	109 ± 5	111 ± 7
	2	89 ± 3	99 ± 3	55 ± 4	56 ± 4	61 ± 4	63 ± 4	49 ± 7	51 ± 7
	0	28 ± 2	36 ± 2	6 ± 4	5 ± 4	-	-	-	-
пустая мишень	5	38 ± 4	50 ± 3	-	-	16 ± 5	19 ± 5	-	-
	2	34 ± 4	43 ± 3	-	-	12 ± 5	12 ± 5	-	-
	0	22 ± 4	31 ± 4	-	-	-	-	-	-

мость  $N_H/N_D$  от  $A_{\text{вmin}}$  с учетом разрешения спектрометра (28% при энергии 130 Мэв) для случая, когда порог регистрации равен нулю. Путем сравнения вычисленной и полученной экспериментально зависимостей (рис. 3) были определены поправки: для конвертора толщиной 5 мм -  $(8+3)\%$  и для конвертора толщиной 2 мм -  $(5+2)\%$ . После введения этих поправок отношения  $N_H/N_D$  получены равными  $4,75 \pm 0,20$  и  $5,8 \pm 0,7$  для конверторов толщиной 5 мм и 2 мм соответственно.

Эффективность регистрации  $\gamma$ -квантов телескопом была определена в экспериментах, выполненных на пучке электронов <sup>/14/</sup>. Измерения были проведены при разных энергиях электронов и различных толщинах конвертора. На основании полученных данных были вычислены эффективности  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$  и  $\epsilon_4$ . Точность определения эффективности этим методом была оценена путем сравнения найденных на пучке электронов значений эффективностей с результатами прямых измерений эффективности телескопа на пучке  $\gamma$ -квантов <sup>/15/</sup> и оказалась равной  $2 \pm 4\%$ . Погрешность величин, используемых при определении  $S$ , еще меньше, так как в формулу (5) входят не значения эффективностей, а только их отношения. Эти отношения получены равными:  $\epsilon_4/\epsilon_2 = 0,987 \pm 0,004$ ;  $\epsilon_1/\epsilon_2 = 0,78 \pm 0,02$  для конвертора толщиной 2 мм и  $\epsilon_4/\epsilon_2 = 0,978 \pm 0,007$ ;  $\epsilon_1/\epsilon_2 = 0,66 \pm 0,02$  для конвертора толщиной 5 мм. Были вычислены также отношения скоростей счета  $N_H$  и  $N_D$  для телескопов с 5-миллиметровым и 2-миллиметровым конвертором. Полученные величины  $1,74 \pm 0,05$  (водород) и  $1,97 \pm 0,04$  (дейтерий) в пределах погрешностей совпали с данными прямых измерений:  $1,85 \pm 0,10$  и  $2,2 \pm 0,2$ .

Подставив найденные значения отношений скоростей счета и эффективностей в формулу (5), получаем  $S = 2,90 \pm 0,18$  по данным измерений с 5-миллиметровым конвертором. Результаты измерений с 2-миллиметровым конвертором менее точны:  $S = 3,1 \pm 0,5$ .

Для проверки использованной процедуры определения  $S$  была проведена также серия измерений при повышенном напряжении на фотозлектронном умножителе черенковского спектрометра (коэффициент усиления умножителя был увеличен в 1,5 раза). Эти измерения дали результат, совпавший с полученным в основных измерениях:  $S = 3,2 \pm 0,3$ .

Наряду с описанным выше амплитудным анализом при помощи осциллограмм был проведен также временной анализ зарегистрированных событий. Распределение событий, зарегистрированных в случае наполненной газом мишени по времени  $t$  между моментом останова  $\pi^-$ -мезона (сигнал от счетчика 3) и прохождением  $\gamma$ -кванта через телескоп (сигнал от счетчика 4) оказалось более узким, чем в случае регистрации фона (удаление газа из мишени, удаление конвертора). Это позволило несколько уменьшить погрешность определения  $S$  путем отбора событий в более узком временном интервале  $\Delta t$ , чем это позволяла сделать схема совпадений. Как видно из рис. 4, где приведены результаты такого отбора, при уменьшении  $\Delta t$  погрешность  $\Delta S/S$  уменьшается за счет снижения фона до 5% при  $\Delta t = 3$  нсек. При дальнейшем сужении интервала  $\Delta t$  уровень фона продолжает быстро падать, однако начинает уменьшаться и число "полезных" событий, что приводит к возрастанию погрешности  $\Delta S/S$ .

Значения  $S$ , полученные при различных  $\Delta t$  оказались одинаковыми (рис. 4). Это свидетельствует о том, что использованная в настоящей работе процедура вычитания фона свободна от влияния систематических погрешностей. Окончательная величина  $S$  была определена при  $\Delta t = 3$  нсек. Она получена равной

$$S = 2,94 \pm 0,15.$$

Как видно из таблицы, полученное в настоящей работе значение совпадает с результатами последних измерений  $S$  и подтверждает существование значительного различия между действительной величиной  $S$  и ее значением, найденным на основании экспериментальных данных об образовании  $\pi^-$ -мезонов.

Т а б л и ц а 2

Данные о величине  $S$ , полученные к середине 1966 г.

А в т о р ы	М е т о д и з м е р е н и я	S
Panofsky, Aamodt, Hadley <sup>/5/</sup>	Парный спектрометр	$2,36 \pm 0,74$
Chinowsky, Steinberger <sup>/6/</sup>	Сцинтилляционные счетчики	$1,5 \pm 0,8$
Khuehner, Merrison, Tornabene <sup>/7/</sup>	Парный спектрометр	$2,36 \pm 0,38$
Ryan <sup>/4/</sup>	Парный спектрометр	$3,16 \pm 0,12$
Мусин, Путрухин, Прокошкин <sup>/8/</sup>	Черенковский детектор полного поглощения и сцинтилляционные счетчики	$2,8 \pm 0,3$
Kloepfel <sup>/9/</sup>	Жидкодейтериевая пузырьковая камера	$2,89 \pm 0,09$
Настоящая работа	Черенковский детектор полного поглощения и сцинтилляционные счетчики	$2,94 \pm 0,15$
Среднее взвешенное		$2,93 \pm 0,06$

Причины этого расхождения неясны, однако следует отметить, что реакция  $p+p \rightarrow d+\pi^+$  вблизи порога была исследована всего лишь в одной работе <sup>/16/</sup> более десяти лет назад. Было бы весьма желательно уточнить эти данные, используя сегодняшнюю, более совершенную экспериментальную технику.

В заключение пользуемся случаем поблагодарить А.Ф. Дунайцева и В.И. Рыкалина за помощь в разработке аппаратуры, Б.В. Анисовича, А.М. Балдина и С.С. Герштейна за обсуждение результатов и М. Сгонову и Л.И. Полубояринову за помощь в обработке осциллограмм.

Л и т е р а т у р а

1. H.L. Anderson, E. Fermi. Phys. Rev., 86, 794 (1952).
2. K.A. Brueckner, R. Serber, K.M. Watson. Phys. Rev., 81, 575 (1951).
3. V.T. Cocconi, T. Fazzini, G. Fidicaro, M. Legros, N.H. Lipman, A.W. Merrison. Nuovo Cim., 22, 494 (1961).
4. J.W. Ryan. Phys. Rev., 130, 1554 (1963). Здесь же см. подробную библиографию по этому вопросу.
5. W.K. Panofsky, R.L. Aamodt, I. Hadley. Phys. Rev., 91, 565 (1951).
6. W. Chinowsky, J. Steinberger. Phys. Rev., 95, 1561 (1954).
7. I.A. Kuchner, A.W. Merrison, S. Tornabene. Proc. Phys. Soc., 73, 551 (1958).
8. М.А. Мусин, В.И. Петрухин, Ю.Д. Прокошкин. Препринт ОИЯИ, Р-1768, Дубна, 1964.
9. P.K. Kloeppel. Nuovo Cim., 34, 11 (1964).
10. А.Ф. Дунайцев. ПТЭ, 9, 77 (1964).
11. А.Ф. Дунайцев, В.И. Петрухин, Ю.Д. Прокошкин, В.И. Рыкалин. Nuovo Cim., 24, 405 (1962).
12. А.Ф. Дунайцев, В.И. Петрухин, Ю.Д. Прокошкин, В.И. Рыкалин. ПТЭ, 2, 144 (1965).
13. В.И. Рыкалин, Т.Г. Кмита, И.Е. Рыжиков, И.А. Новоселова. Препринт ОИЯИ, 2466, Дубна, 1965.
14. Ю.Д. Прокошкин. ОИЯИ, Диссертация, 1960.
15. А.А. Тяпкин, Ю.Д. Прокошкин. Всесоюзная конф. по физике частиц высоких энергий, 30, Изд. АН СССР, Москва, 1956; Ю.Д. Прокошкин, А.А. Тяпкин. ЖЭТФ, 32, 750 (1957).
16. F.S. Crawford, M.L. Stevenson. Phys. Rev., 97, 1305 (1955).

Рукопись поступила в издательский отдел  
27 октября 1966 г.

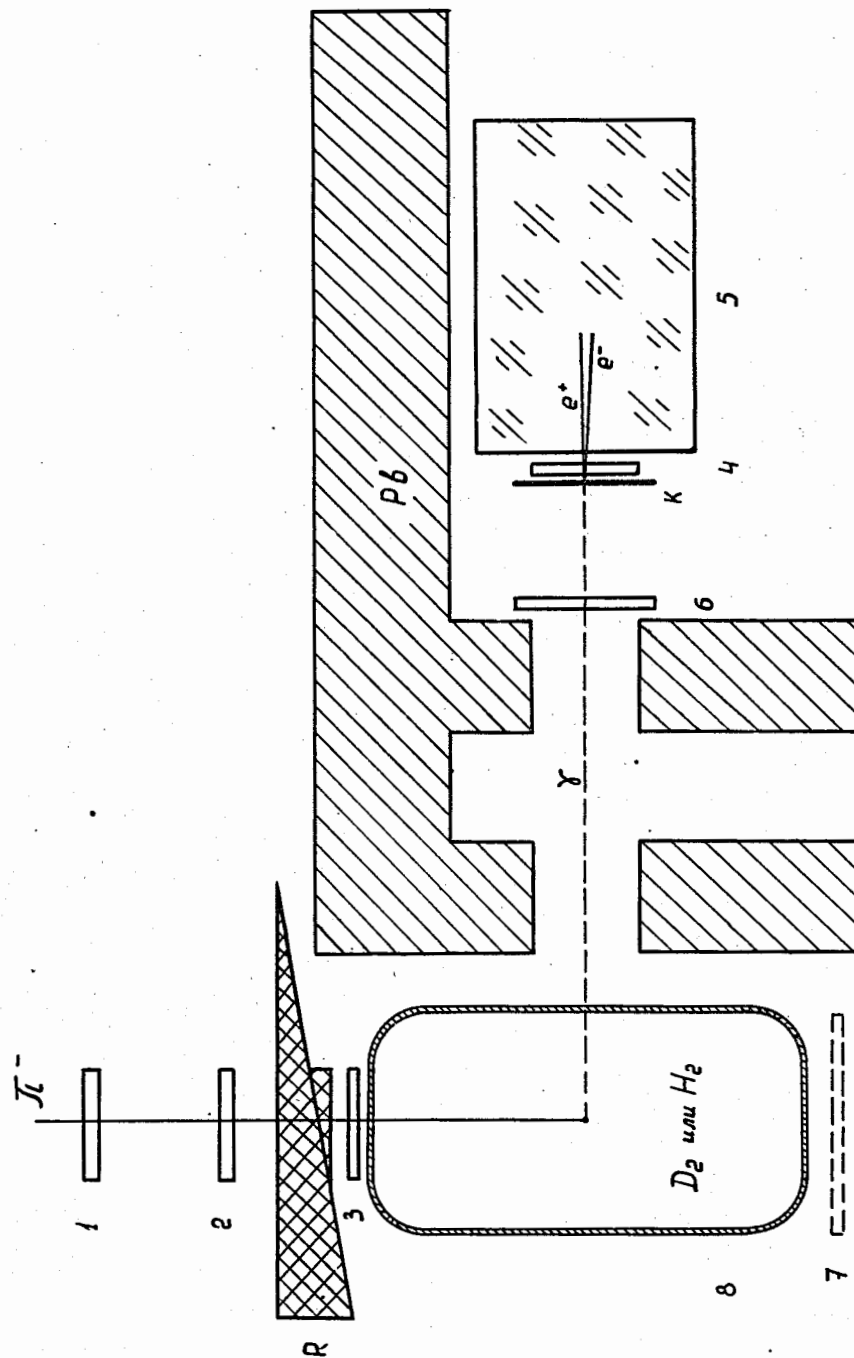


Рис. 1. Схема эксперимента. 1-4, 6, 7 - сингильциновые счетчики с фотоэлектронными умножителями 56 А V P; 5 - черенковский спектрометр полного поглощения с 58 А V P; 8 - газовая мишень;  $\pi^-$  - лучок  $\pi^-$ -мезонов; R - тормозящий фильтр; K - свинцовый конвертор; Pb - свинцовые диафрагмы и защита.

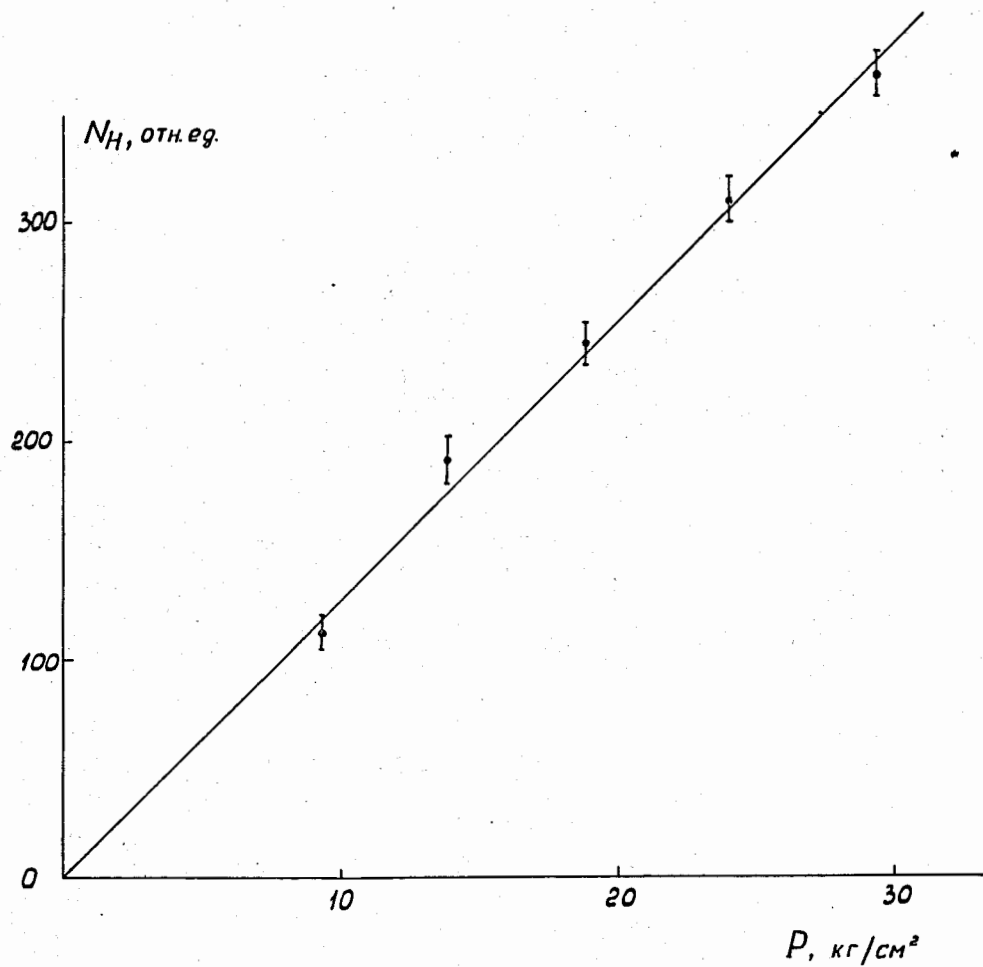


Рис. 2. Зависимость скорости счета  $\gamma$ -квантов  $N_H$  от давления  $p$  водорода в мишени. Величины  $N_H$  измерены телескопом с 5-миллиметровым конвертором.

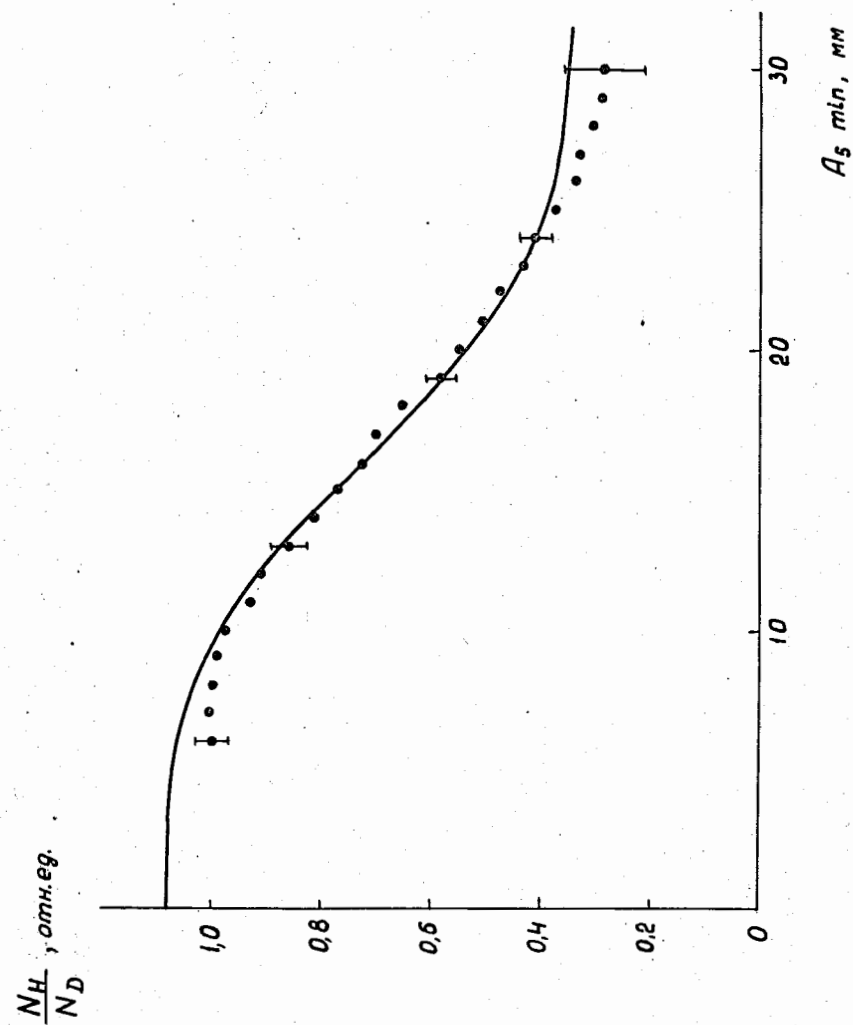


Рис. 3. Зависимость отношения  $N_H/N_D$  от уровня обреза  $A_{5min}$  амплитуд импульсов от черенковского спектрометра. Отношения  $N_H/N_D$  определены для соотношений  $A_5 \geq A_{5min}$ , где  $A_5$  - величина амплитуды импульса на экране измерительного проектора.



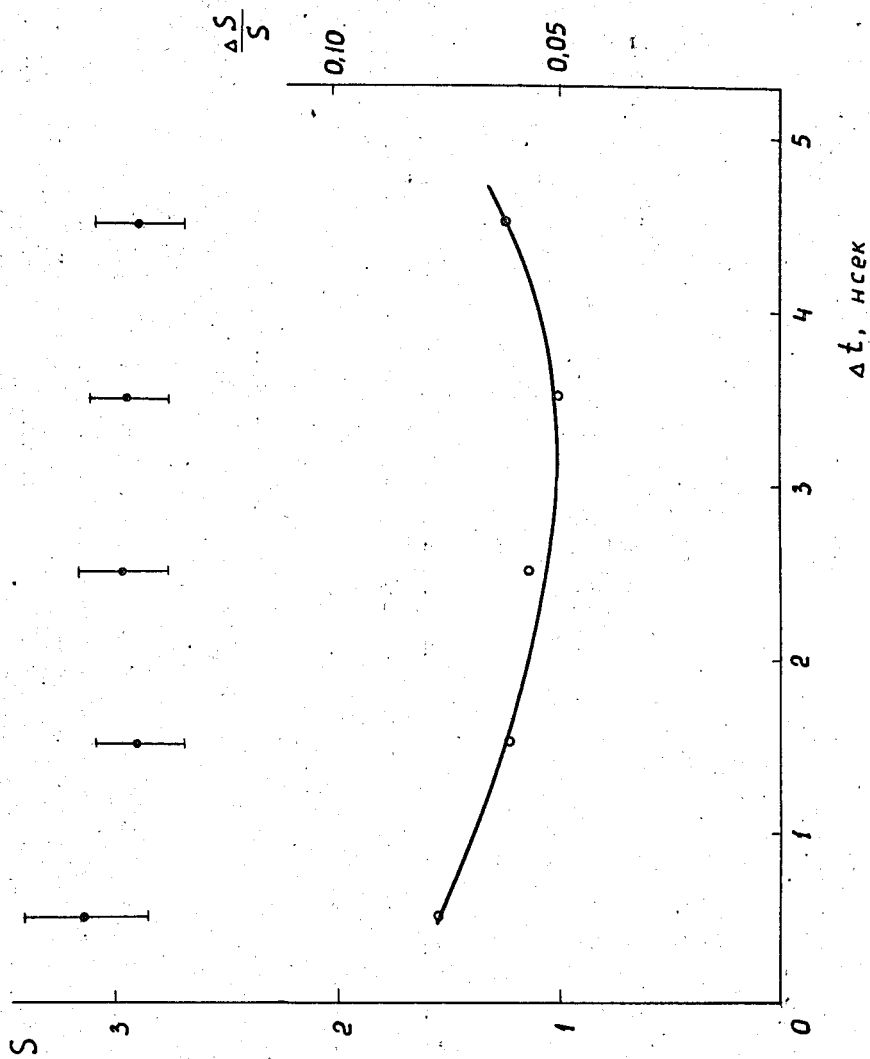


Рис. 4. Величины  $S$ , найденные при различных интервалах отбора событий  $\Delta t$  (черные точки), и зависимость погрешности  $\Delta S/S$  от  $\Delta t$  (светлые точки).