

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лаборатория ядерных проблем

P-370

В.Г.Вовченко, Г.Гельфер, А.С.Кузнецов, М.Г.Мещеряков,  
В.Святковский

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ  
ЗАРЯЖЕННЫХ П-МЕЗОНОВ,  
ОБРАЗОВАННЫХ В  $p\alpha$ -СОУДАРЕНИЯХ  
ПРИ 660 МЭВ

*Acta Physica Polonica, 1960, v19, n2,  
p.227-234.*

Дубна 1959 год

В.Г.Вовченко, Г.Гельфер, А.С.Кузнецов, М.Г.Мешеряков,  
В.Святковский

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ  
ЗАРЯЖЕННЫХ П-МЕЗОНОВ,  
ОБРАЗОВАННЫХ В  $pd$ -СОУДАРЕНИЯХ  
ПРИ 660 МЭВ

453/2

Институт физики  
и химии  
Уральского государственного  
университета  
Свердловск

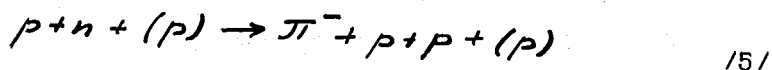
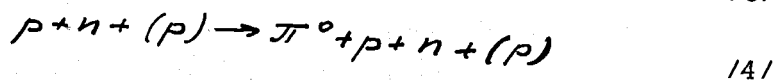
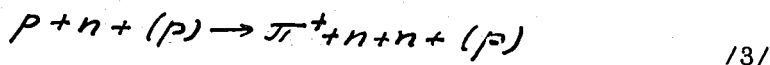
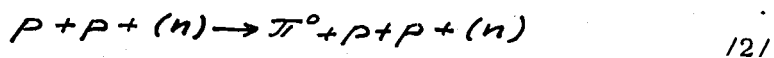
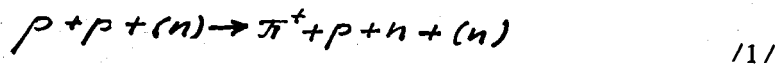
## А н н о т а ц и я

При помощи магнитного спектрометра измерены энергетические спектры заряженных  $\pi$ -мезонов, образованных в  $p d$ - и  $p p$ -соударениях. Для угла  $90^\circ$  в системе центра масс двух сталкивающихся нуклонов дифференциальные сечения процессов  $p+d \rightarrow \pi^+$ ,  $p+d \rightarrow \pi^-$  и  $p+p \rightarrow \pi^+$  найдены равными соответственно  $5,9 \pm 0,6 \cdot 10^{-28}$ ;  $0,57 \pm 0,08 \cdot 10^{-28}$  и  $6,7 \pm 0,7 \cdot 10^{-28}$  см<sup>2</sup>/стерад. Отношение эффективностей образования  $\pi^+$ -мезонов на протонах в дейтронах и на свободных протонах равно  $0,79 \pm 0,08$ .

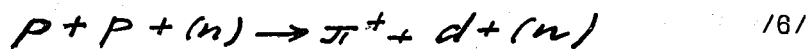


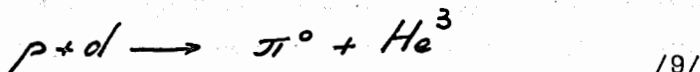
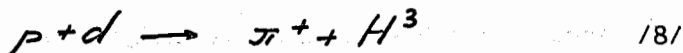
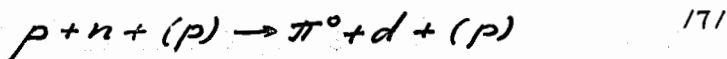
## 1. В в е д е н и е

Из экспериментальных данных, полученных в нашей лаборатории при 460 и 660 Мэв<sup>/1,2/</sup>, а также в Бирмингеме при 970 Мэв<sup>/3/</sup>, следует, что протон-дейтронные соударения без образования  $\pi$ -мезонов представляют собой, в основном, квазиупругое рассеяние налетающих протонов отдельными нуклонами в дейтронах, совпадающее в главных чертах с рассеянием протонов свободными нуклонами. Только в редких случаях налетающие протоны одновременно взаимодействуют с обоими нуклонами внутри дейтрона. Такие тройные соударения включают в себя и упругое  $pd$ -рассеяние, дифференциальные сечения которого при 460 и 660 Мэв в области больших углов рассеяния составляют  $\sim 10^{-29}$  см<sup>2</sup>/стерад. В силу протон-нуклонного характера высокоэнергичных  $pd$ -соударений возможными реакциями одиночного образования  $\pi$ -мезонов в таких соударениях являются:



Здесь через  $/n/$  и  $/p/$  обозначены нуклоны, не испытывающие прямых соударений с налетающими протонами, и поэтому освобождающиеся с низкой энергией. Согласно Батсону и др.<sup>/3/</sup>, вероятная энергия, с которой испускаются неударяемые протоны в  $pd$ -соударениях при 970 Мэв, составляет около 5 Мэв, причем их угловое распределение слабо коррелировано с направлением первичного удара. В  $pd$ -соударениях возможно также образование  $\pi$ -мезонов в реакциях, в которых два или все три нуклона в конечном состоянии оказываются связанными. Такими реакциями могут быть следующие:





В описываемых экспериментах изучалось образование заряженных  $\pi$  - мезонов в  $pd$ -соударениях путем измерения энергетических спектров положительных  $\pi$  -мезонов от реакций /1/, /3/, /6/ и отрицательных  $\pi$  -мезонов от реакции /5/. Производился также поиск пика, отвечающего  $\pi^+$ -мезонам от реакции /8/. Наряду с этим в условиях, строго идентичных условиям наблюдений  $\pi$  -мезонов от  $pd$ -соударений, измерялся энергетический спектр  $\pi^+$ -мезонов от свободных  $pp$ -соударений. Такое сравнительное изучение высокоэнергетических  $pd$  -  $pp$ -соударений может дать сведения о влиянии ядерной связи нуклонов в дейтроне на процесс образования  $\pi$  -мезонов.

## 2. Методика эксперимента

Настоящие эксперименты были выполнены на шестиметровом синхроциклотроне Объединенного института ядерных исследований. Использовался внешний сфокусированный квадрупольными линзами и прошедший через отклоняющий магнит пучок неполяризованных протонов. В месте расположения мишени, представляющей собой наполненный либо жидким дейтерием, либо жидким водородом тонкостенный цилиндрический сосуд диаметром 4 см и высотой 12 см, плотность потока протонов в пучке сечением 6 см<sup>2</sup> подбиралась равной  $\sim 2 \cdot 10^8$  протонов/см<sup>2</sup>сек. Сосуд находился в охлаждаемой жидким водородом вакуумной камере, наружная рубашка которой, в свою очередь, охлаждалась жидким азотом. Принималось, что в мишени жидкий дейтерий и жидкий водород находились при температуре кипения водорода; при этом их плотности равны 0,169 и 0,0708 г/см<sup>3</sup>, соответственно /4/. Эффект от пустого сосуда составлял менее 3% от выхода частиц в присутствии жидкого водорода или жидкого дейтерия. Энергия протонов в центре мишени равнялась  $654 \pm 5$  Мэв.

Энергетические спектры  $\pi$  -мезонов измерялись при помощи магнитного

спектрометра, подробно описанного ранее в работе Ажгирея и др. /5/. На рис.1 показана схема спектрометра и его положение относительно пучка протонов. Так же как и в /5/, в настоящих экспериментах два тонких сцинтилляционных счетчика  $C_1$  и  $C_2$  на входе спектрометра выделяли пучок частиц, испущенных под углом  $56^\circ$  к направлению первичного пучка протонов. Этому углу испускания  $\pi^+$ -мезонов от реакции  $p+p \rightarrow \pi^+ + d$  соответствует угол  $90^\circ$  в системе центра масс /с.ц.м./ двух сталкивающихся протонов. В горизонтальной плоскости угловая расходимость пучка анализируемых частиц составляла  $\sim \pm 2^\circ$ . Прошедшие через канал II спектрометра частицы регистрировались телескопом, составленным из четырех сцинтилляционных счетчиков. Относительная ширина  $\Delta P/P$  импульсного интервала, выделяемого сцинтилляторами спектрометра, составляла около  $\pm 3\%$  для всех измеряемых импульсов; вырезаемый телесный угол был около  $0,5 \cdot 10^{-4}$  стерад. Нижний порог регистрации  $\pi$ -мезонов находился при  $\sim 35$  Мэв. Зависимость среднего импульса проходящих через спектрометр частиц от тока магнита была определена в калибровочных измерениях, выполненных методом токонесущей нити.

В ходе эксперимента одновременно регистрировались как шестикратные совпадения импульсов от счетчиков на входе и выходе спектрометра, так и четырехкратные совпадения импульсов от счетчиков одного лишь выходного телескопа. Фон случайных совпадений находился путем включения линии задержек, сдвигавших импульсы от отдельных пар счетчиков  $C_1 C_2$ ,  $C_3 C_4$  и  $C_5 C_6$ . При выборе величины задержки учитывалась тонкая временная структура пучка протонов от синхроциклотрона. Эффективность регистрации сцинтилляций была близка к 100% во всем исследуемом диапазоне энергий частиц. Небольшая примесь вторичных протонов отделялась от  $\pi$ -мезонов при помощи фильтра, находившегося перед предпоследним сцинтиллятором выходного телескопа. Относительное содержание  $\mu$ -мезонов и электронов в прошедшем через спектрометр пучке частиц определялось посредством измерения кривых пробегов в меди. В результаты измерений вводились поправки, учитывающие распад  $\pi$ -мезонов на лету, а также их торможение и поглощение в мишени, сцинтилляторах и фильтре, отделявшем вторичные протоны от мезонов.

Абсолютные значения дифференциальных сечений в спектрах  $d^2\sigma/d\Omega dE$  были оценены с точностью  $\sim 7\%$  путем сравнения выходов положительных и отрицательных  $\pi$ -мезонов с выходом протонов отдачи от упругого  $pp$ -рас-

сеяния. Дифференциальное сечение упругого  $pp$ -рассеяния для 655 Мэв и угла  $56^\circ$  в л. с./ $120^\circ$  в с.д.м. / было принято / равным  $6,7 \pm 0,26 / 10^{-27}$  см<sup>2</sup>/стерад / в с.д.м.  $3,41 \pm 0,13 / 10^{-27}$  см<sup>2</sup>/стерад /

### 3. Результаты измерений и их обсуждение

Полученные энергетические спектры заряженных  $\pi$ -мезонов от  $pd$ -соударений приведены на рис. 2 и 3 вместе со статистическими ошибками измерений. Для сравнения на рис. 2 сплошной кривой без указания экспериментальных точек представлен спектр  $\pi^+$ -мезонов от свободных  $pp$ -соударений. Это спектр измерен с такой же точностью, как и спектр  $\pi^+$ -мезонов от  $pd$ -соударений. Все остальные погрешности, связанные с определением абсолютных значений  $d^2\sigma/d\Omega dE$  и оценкой величин вводимых поправок, учтены при вычислении дифференциальных сечений  $d\sigma/d\Omega$  рассматриваемых реакций образования  $\pi$ -мезонов. Ниже 70 Мэв достоверность экспериментальных данных о форме спектров невысока из-за больших трудностей, с которыми связано определение примеси  $\mu$ -мезонов в этой области энергий. Обычная трансформация наблюдаемых спектров в с.д.м. двух сталкивающихся нуклонов показала, что в этой системе углы испускания подавляющей части  $\pi$ -мезонов заключены в интервале от  $90^\circ$  до  $97^\circ$ .

Когда парное образование  $\pi$ -мезонов в одном акте нуклон-нуклонного взаимодействия маловероятно, достаточно считать, что образование  $\pi^-$ -мезонов протонами на дейтронах происходит только в  $pn$ -столкновениях, тогда как  $\pi^+$ -мезоны возникают как в  $pn$ -, так и в  $pp$ -столкновениях. В силу зарядовой симметрии дифференциальные сечения реакций  $p+n \rightarrow \pi^+n+n$  и  $p+n \rightarrow \pi^-p+p$  связаны соотношением

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} (p+n \rightarrow \pi^+n+n)_{\vartheta} = \frac{d\sigma}{d\Omega} (p+n \rightarrow \pi^-p+p)_{180^\circ-\vartheta}$$

где  $\vartheta$  - угол испускания  $\pi$ -мезона в с.д.м. При  $\vartheta = 90^\circ$  дифференциальные сечения рассматриваемых реакций должны быть равны друг другу, а спектры  $\pi^+$  и  $\pi^-$ -мезонов подобны по форме. Имея в виду это предсказание зарядовой симметрии, можно ожидать, что результат вычитания из наблюдаемого суммарного спектра  $\pi^+$ -мезонов от реакций /1/, /3/ и /6/ спектра  $\pi^-$ -мезонов от реакции /5/ должен представлять собой спектр  $\pi^+$ -мезонов только от  $pp$ -соударения в дейтронах. Полученный таким

образом спектр  $\pi^+$ -мезонов, изображенный на рис. 2 пунктирной линией, простирается в сторону высоких энергий дальше, чем спектр  $\pi^+$ -мезонов от свободных  $pp$ -соударений. Это, очевидно, вызвано движением ударяемых протонов в дейтронах. Той же причиной, можно объяснить отсутствие в спектре  $\pi^+$ -мезонов от  $p$ - $p$ -соударений в дейтронах пика от реакции  $p+p \rightarrow \pi^+ + d$ , отчетливо наблюдаемого при 196 Мэв в случае свободных  $pp$ -соударений. Тем не менее, если нормировать к одинаковой площади спектры  $\pi^+$ -мезонов, образованных на протонах в дейтронах и на свободных протонах, и затем вычлест из спектра  $\pi^+$ -мезонов от свободных  $pp$ -соударений вклад реакции  $p+p \rightarrow \pi^+ + d$ , то окажется, что в области пика, отвечающего реакции  $p+p \rightarrow \pi^+ + d$ , значения  $\frac{d^2\sigma}{d\Omega dE}(p+p \rightarrow \pi^+ + \dots)_D$  превышают значения  $\frac{d^2\sigma}{d\Omega dE}(p+p \rightarrow \pi^+ + \dots)_H$ . Этот факт служит некоторым указанием на то, что в  $pd$ -соударениях реакция /6/ все же дает вклад в выход  $\pi^+$ -мезонов,

Отсутствие в спектре  $\pi^+$ -мезонов от  $pd$ -соударений пика, отвечающего реакции /8/, не является неожиданностью, поскольку уже при 340 Мэв<sup>/7/</sup> полное сечение этой реакции составляет около  $10^{-29}$  см<sup>2</sup>. По выходу  $\pi^+$ -мезонов близ верхней границы спектра  $(E_\pi = 310 \text{ Мэв})$ , где должен был бы наблюдаться пик  $\pi^+$ -мезонов от реакции /8/, можно заключить, что если при 660 Мэв реакция /8/ происходит, то дифференциальное сечение ее для испускания  $\pi^+$ -мезонов в направлении  $56^\circ$  к пучку протонов не превышает  $\sim 5 \cdot 10^{-30}$  см<sup>2</sup>/стерад.

Сравнивая спектры  $\pi^+$  и  $\pi^-$ -мезонов, образованных в  $pp$ - и  $pN$ -столкновениях в дейтронах, можно видеть, что вправо от максимума спектр  $\pi^-$ -мезонов убывает быстрее, чем спектр  $\pi^+$ -мезонов. Это различие, выходящее за пределы экспериментальных ошибок, может быть объяснено тем, что в реакциях  $p+p \rightarrow \pi^+ + p + n$  и  $p+n \rightarrow \pi^- + p + p$  в неодинаковой степени сказывается эффект взаимодействия нуклона с нуклоном в конечном состоянии. Действительно, в первой реакции преобладающую роль играет переход  $T=1 \rightarrow T=0$  по изотопическому спину начального и конечного состояний двунуклонной системы, оставляющей нейтрон и протон в  $^3S$ -состоянии. Благодаря наличию сильного взаимодействия между нуклонами в этом состоянии, они испускаются преимущественно с малыми энергиями относительного движения, вследствие чего возрастает доля энергии, уносимой  $\pi^-$ -мезоном. В противоположность этому, в реакции  $p+n \rightarrow \pi^- + p + p$  значительный



вклад дает переход  $T=1 \rightarrow T=1$ , оставляющий протоны в  ${}^3P$ -состоянии, когда эффект взаимодействия между ними выражен более слабо.

Максимумы у всех спектров /для свободных  $pp$ -соударений имеется в виду только непрерывный спектр от реакции  $p+p \rightarrow \pi^+ + p + n$  /обнаруживаются практически при одной энергии, как это видно из таблицы, в которой приведены также значения средней энергии  $\pi$ -мезонов в спектрах. Как и следовало ожидать, полученные спектры  $\pi$ -мезонов по форме отличаются от спектра, вычисленного с учетом одного лишь статистического веса конечных состояний. Существенно, что максимумы в спектрах,

Реакция	Энергия в максимуме /л.с./ Мэв	Энергия в максимуме /с.ц.м./ Мэв	Средняя энергия мезонов /л.с./ Мэв	Средняя энергия $\pi$ мезонов /с.ц.м./ Мэв
$p+p \rightarrow \pi^+ + p + n$	143 $\pm$ 5	106 $\pm$ 5	-	-
$p+d \rightarrow \pi^+ + \text{нукл.}$	145 $\pm$ 8	109 $\pm$ 8	151	116
$p+d \rightarrow \pi^- + \text{нукл.}$	143 $\pm$ 5	107 $\pm$ 5	144	108

трансформированных в с.ц.м., обнаруживаются в области энергий, близко соответствующей положению максимума сечения  $\pi^+ + p$ -рассеяния. Этот факт указывает на то, что в процессах образования  $\pi$ -мезонов в  $pd$ -столкновениях важную роль играет наличие резонансного взаимодействия между  $\pi$ -мезоном и нуклоном в состоянии с  $J = T = 3/2$ .

Интегрированием спектров в с.ц.м. по энергии были получены следующие значения дифференциальных сечений рассматриваемых реакций:

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma}{d\Omega}(p+p \rightarrow \pi^+ + \text{нуклоны}) &= /6,7 \pm 0,7/ \cdot 10^{-28} \text{ см}^2/\text{стерад} \\ \frac{d\sigma}{d\Omega}(p+d \rightarrow \pi^+ + \text{нуклоны}) &= /5,9 \pm 0,6/ \cdot 10^{-28} \text{ см}^2/\text{стерад} \\ \frac{d\sigma}{d\Omega}(p+d \rightarrow \pi^- + \text{нуклоны}) &= /0,57 \pm 0,08/ \cdot 10^{-28} \text{ см}^2/\text{стерад}. \end{aligned}$$

Найденное здесь для угла  $90^\circ$  в с.ц.м. дифференциальное сечение образования  $\pi^+$ -мезонов в  $pp$ -соударениях при 660 Мэв близко к величине

$16,8 \pm 1,5 \cdot 10^{-28}$  см<sup>2</sup>/стерад, полученной Чегановым и Савченко<sup>18/</sup>, но заметно меньше значения  $19,3 \pm 0,7 \cdot 10^{-28}$  см<sup>2</sup>/стерад, сообщенного Мешковским и др.<sup>19/</sup>.

Суммарному выходу  $\pi^+$ -мезонов от реакций 1/ и 6/ соответствует сечение  $\frac{d\sigma}{d\Omega} (p+p \rightarrow \pi^+ + \text{нуклоны})_D = \frac{d\sigma}{d\Omega} (p+d \rightarrow \pi^+ + \text{нуклоны}) - \frac{d\sigma}{d\Omega} (p+d \rightarrow \pi^- + \text{нуклоны}) = 15,30 \pm 0,7 \cdot 10^{-28}$  см<sup>2</sup>/стерад. Отсюда отношение вероятностей образования  $\pi^+$ -мезонов в соударениях протонов со свободными и связанными протонами получается равным

$$\frac{\frac{d\sigma}{d\Omega} (p+p \rightarrow \pi^+ + \text{нуклоны})_D}{\frac{d\sigma}{d\Omega} (p+p \rightarrow \pi^+ + \text{нуклоны})_H} = 0,79 \pm 0,08.$$

Так как спектры  $\pi^-$ -мезонов от  $pd$ - и  $pp$ -соударений измерялись в строго идентичных геометрических условиях, точность определения величины этого отношения обусловлена только статистическими ошибками измерений выходов  $\pi^-$ -мезонов и примесей  $\mu^-$ -мезонов.

То, что протоны в дейтронах менее эффективны в отношении образования мезонов, чем свободные протоны, может быть обусловлено: а/ внутриядерным движением нуклонов и их взаимным "затенением" в дейтронах<sup>x/</sup>; б/ большей реабсорбцией мезонов нуклонами отдачи в случае  $pd$ -соударений; в/ влиянием запрета Паули для нуклонов отдачи в  $pd$ -соударениях. Отношение  $\frac{d\sigma}{d\Omega} (p+p \rightarrow \pi^+ + \text{нуклоны})_D : \frac{d\sigma}{d\Omega} (p+p \rightarrow \pi^+ + \text{нуклоны})_H$  вообще может отличаться от единицы, если только в процессах  $(p+p \rightarrow \pi^+ + \text{нуклоны})_D$  и  $(p+p \rightarrow \pi^+ + \text{нуклоны})_H$  по разному происходит интерференция между амплитудами возможных мезон-нуклонных состояний.

Из полученных данных следует, что для угла  $90^\circ$  в с.ц.м. отношение числа  $\pi^+$ -мезонов к числу  $\pi^-$ -мезонов от дейтерия равно  $10,3 \pm 1,3$ . Если бы в нуклон-нуклонных соударениях образование  $\pi^-$ -мезонов происходило только через резонансное состояние  $1/2 = T = 3/2$ , то отношение полных сечений образования  $\pi^+$  и  $\pi^-$ -мезонов в  $pd$ -соударениях было бы равно  $11^{H/}$ .

Рукопись поступила в издательский отдел  
20 июня 1959 года.

<sup>x/</sup> По оценке Прокошкина /частное сообщение/ при 660 Мэв в результате внутриядерного движения сечения процессов образования мезонов в нуклон-нуклонных соударениях в дейтронах должны быть примерно на 4% меньше по сравнению с сечениями на свободных нуклонах.

Л и т е р а т у р а

1. M.G.Mescheryakov, H.P.Bogachev, G.A.Leksin, B.S.Neganov, E.V.Piskarev. Proc. CERN Symposium 2, I24, 1956.
2. Лексин. ЖЭТФ, 32, 445, 1957.
3. A.P.Batson, B.B.Culwick, H.B.Klepp, L.Riddiford, Proc.Roy. Soc.A. 251, 233, 1959.
4. D.B.Chelton, D.B.Mann, Cryogente Data Book, UCRL-342I, 1956.
5. Л.С.Ажгирей, И.К.Взоров, В.П.Зрелов, М.Г.Мещеряков, В.И.Петрухин. ЖЭТФ, 34, 1957, 1958.
6. Н.П.Богачев, И.К.Взоров, ДАН СССР, 99, 931, 1954.
7. W.Frank, K.Bandtel, R.Madey, B.Moyer. Phys.Rev. 94, I7I6, 1954.
8. Б.С.Неганов, О.В.Савченко. ЖЭТФ, 32, вып. 6, 1265, 1957.
9. А.Мешковский, Ю.П.Лигин, Я.Шаламов, В.Шебанов. ЖЭТФ, 35, 64, 1958.
10. D.Peaslee, Phys.Rev. 94, I085, 1954; 95, I580, 1954.

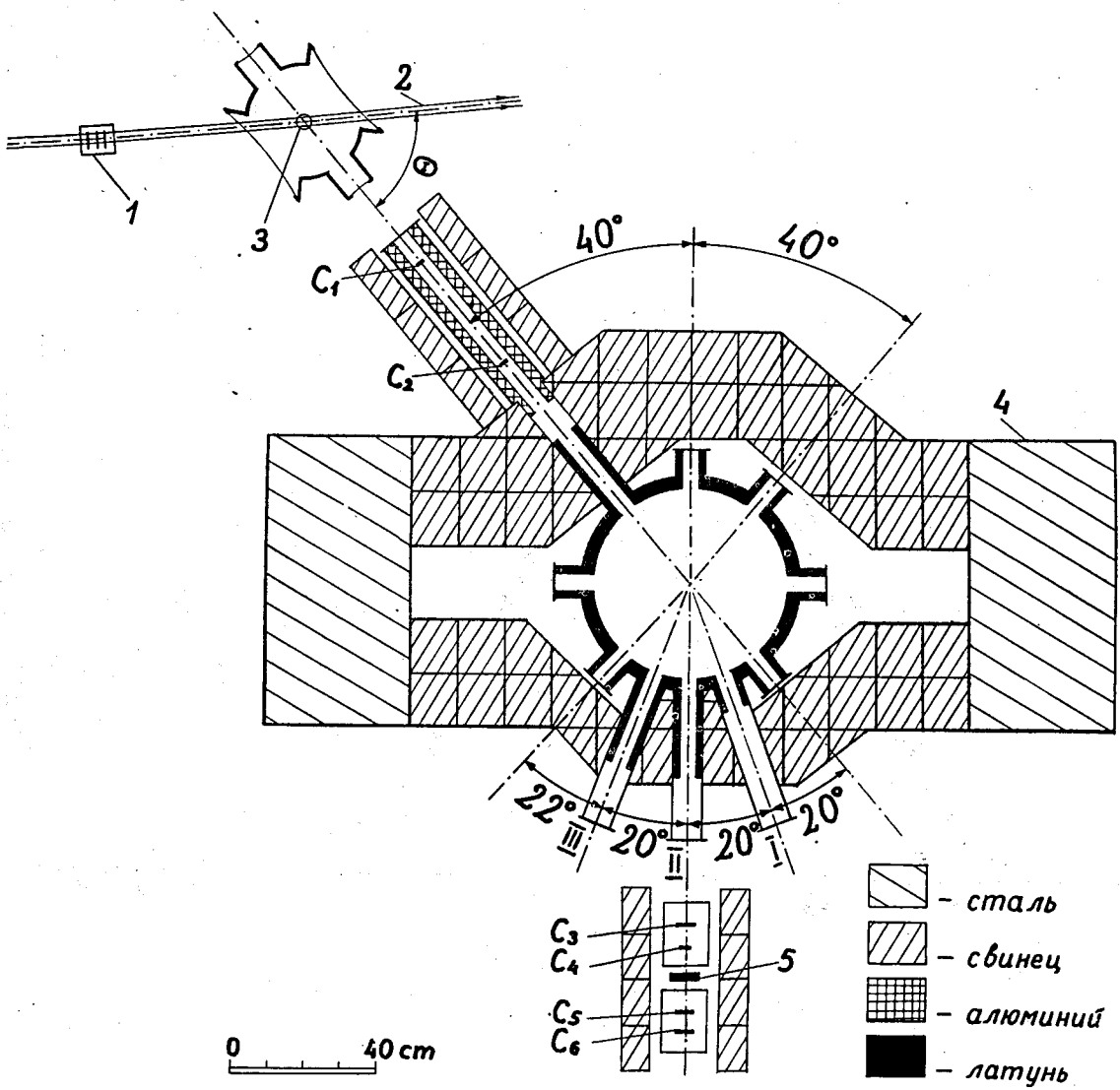


Рис. 1. Схема спектрометра: 1 - монитор, 2 - пучок протонов, 3 - мишень, 4 - магнит, 5 - фильтр, C<sub>I</sub>-C<sub>6</sub> - сцинтилляторы.

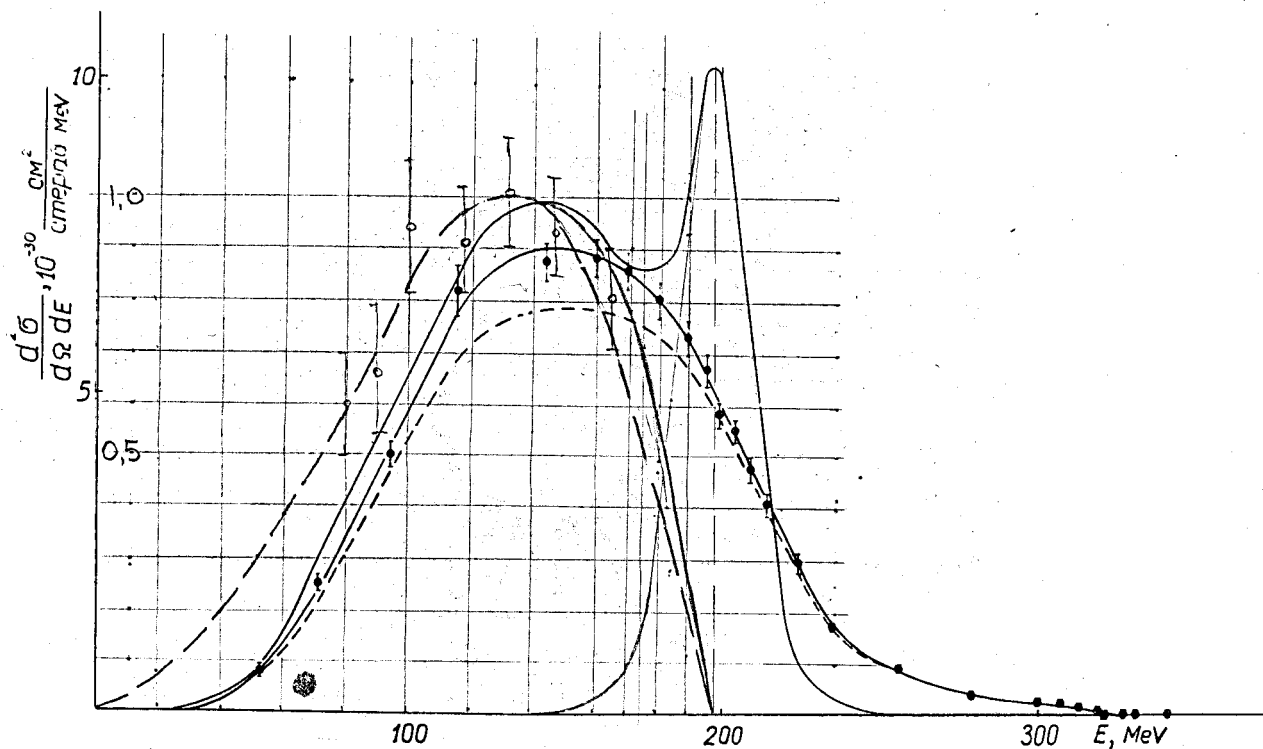


Рис. 2. Энергетические спектры положительных  $\pi^+$ -мезонов в лабораторной системе: верхняя кривая - от свободных  $pp$ -соударений; кривая, проведенная по экспериментальным точкам - от  $pd$ -соударений; пунктирная кривая - от  $pp$ -соударений в дейтронах.



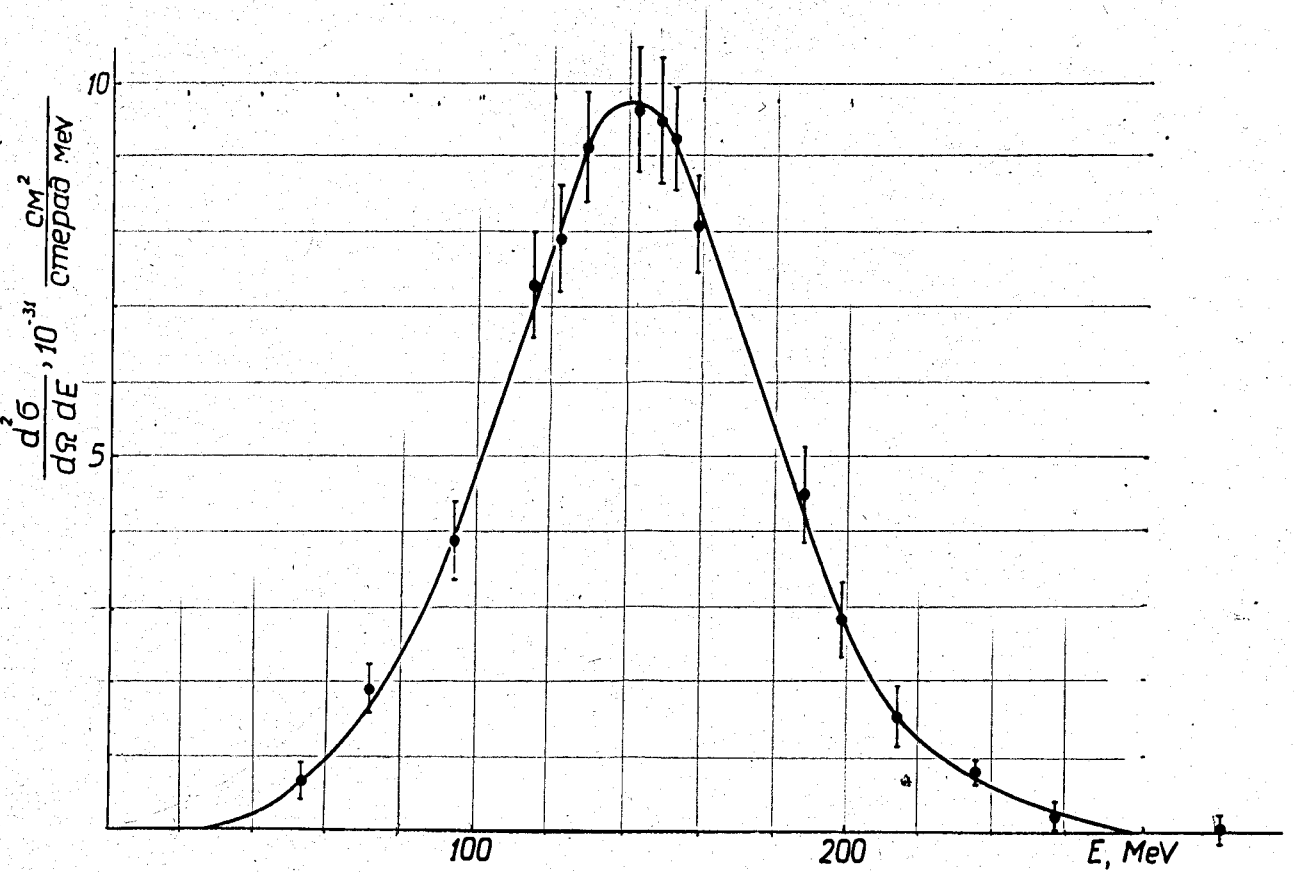


Рис. 3. Энергетический спектр отрицательных  $\pi^-$ -мезонов от  $\pi p$ -соударений в дейтронах.

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА