

Н.П. Богачев, С.А. Бунятов, И.М. Граменицкий, В.Б. Любимов,  
Ю.П. Мерехов, М.И. Подгорецкий, В.М. Сидоров, Д. Тувдендорж

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПРОТОНОВ  
С ЭНЕРГИЕЙ 9 БЭВ  
СО СВОБОДНЫМИ И КВАЗИСВОБОДНЫМИ  
НУКЛОНАМИ В ФОТОЭМУЛЬСИИ  
*ЖЭТФ, 1959, т 37, в 5, с. 1225-1231.*

Н.П. Богачев, С.А. Бунятов, И.М. Граменицкий, В.Б. Любимов,  
Ю.П. Мереков, М.И. Подгорецкий, В.М. Сидоров, Д. Тувдендорж

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПРОТОНОВ  
С ЭНЕРГИЙ 9 БЭВ  
СО СВОБОДНЫМИ И КВАЗИСВОБОДНЫМИ  
НУКЛОНАМИ В ФОТОЭМУЛЬСИИ<sup>х/</sup>

Ученый центр  
научных исследований  
СИБИРО

---

<sup>х/</sup> Некоторые результаты этой работы изложены в докладе  
В.И. Векслера на Международной конференции по мирно-  
му использованию атомной энергии в Женеве в августе  
1958 года <sup>1</sup> .

## А н н о т а ц и я

Рассматривается вопрос об угловых и энергетических характеристиках вторичных частиц, образующихся при столкновениях протонов с нуклонами.



Для изучения взаимодействия протонов с нуклонами использовалась эмульсионная камера, составленная из слоев эмульсии НИКФИ тип "Р" и облученная внутренним пучком протонов на синхрофазотроне Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований /см. также <sup>1,2,3/</sup>. Просмотр слоев проводился вдоль следов первичных протонов при увеличении 600 х. Регистрировались все звезды и рассеяния на угол больше  $5^\circ$ . На длине 978 м было найдено 2623 случая ядерных взаимодействий такого типа. Средний свободный пробег оказался равным  $37,3 \pm 0,3$  см. Это значение совпадает с результатом, полученным ранее в работе <sup>1,2/</sup>.

1. Для выделения взаимодействий протон-протон /р-р/ и протон-нейтрон /р-п/ отбирались случаи, имеющие не более двух медленных протонов /с ионизацией  $I \geq 1,4 I_{\text{плато}}$ /. Требовалось отсутствие ядра отдачи, а в случаях с четным числом лучей - и  $\beta$ -электрона.

Последующий отбор проводился по критериям:

1/ Медленный протон должен иметь пробег  $l \geq 4$  мм /  $E_p \geq 31$  Мэв/. Это позволяет исключить случаи взаимодействия протон-ядро с испарением одного протона.

2/ При данной энергии протона угол его вылета не должен быть больше чем при упругом рассеянии протон-протон.

3/ При данной множественности  $n$  угол вылета протона не должен превышать некоторого  $\vartheta_{\text{max}}(n)$ , соответствующего кинематике столкновения протон-нуклон /р- $N$ /.  
 $\vartheta_{\text{max}}(n)$

4/ Должно выполняться неравенство <sup>4/</sup>

$$\sum (E_i - p_i \cos \vartheta_i) \leq M + E_0 - p_0$$

где  $E_i$ ,  $p_i$  и  $\vartheta_i$  - энергия, импульс и угол вылета  $i$ -той вторичной заряженной частицы в лабораторной системе координат /л.с./,  $M$  - масса протона,  $E_0$  и  $p_0$  - энергия и импульс налетающего протона в л.с. Ввиду того что измерение импульсов быстрых частиц не производилось, при применении этого критерия частицы, имеющие плотность сгустков  $\beta \leq 1,4 \beta_{\text{плато}}$ , считались  $\pi$ -мезонами. В качестве нижнего предела энергии и импульса для них принимались значения 196 Мэв и 137 Мэв/с соответственно.

Таким образом было отобрано 170 случаев с четным и 110 - с нечетным числом лучей. Случаи с четным числом лучей считались взаимодействиями со свободными протонами или с квазисвободными протонами в ядрах фотоэмульсии<sup>x/</sup>, случаи с нечетным числом лучей - взаимодействиями с квазисвободными нейтронами. Кроме того было найдено 20 случаев упругого /р-р/-рассеяния. Критерии отбора таких случаев и величина эффективности их регистрации были взяты из работы<sup>/2/</sup>. Полное сечение упругого /р-р/-рассеяния оказалось равным  $\sigma_{pp}^{упр} = 10 \pm 3$  мб и совпадает с величиной, найденной в работах<sup>/2,5/</sup>.

2. При выделении случаев неупругого взаимодействия нуклонов с нуклонами в фотоэмульсии возникает вопрос о чистоте отобранного материала, так как указанные выше критерии являются необходимыми, но не достаточными.

Прежде всего следует убедиться в том, что случаи, отброшенные по критерию /1/, практически не содержат (р-N) - взаимодействий. Если бы среди случаев с одним медленным протоном  $l \leq 4$  мм/ имелись /р - N / - взаимодействия, то следовало бы ожидать для этих протонов асимметрию вперед-назад. В таблице 1 приведены данные по числу медленных протонов, испущенных в переднюю и заднюю полусферу в л.с., для случаев, отброшенных только по критерию /1/.

Т а б л и ц а 1

	Число медленных протонов	
	Вперед	Назад
Случаи с четным числом лучей	26	27
Случаи с нечетным числом лучей	28	26
Всего	54	53

Из таблицы 1 видно, что число медленных протонов, испущенных в переднюю и заднюю полусферу, одинаково. Это свидетельствует о том, что подав-

<sup>x/</sup> Из числа двухлучевых событий исключались квазиупругие /р-р/-взаимодействия.

ляющая часть медленных протонов появляется в результате испарения.

При взаимодействиях с квазисвободными нуклонами возможен вылет нейтронов из остаточного ядра. Для оценки влияния этого факта рассмотрим  $p-n$ -взаимодействия. При вылете одного нейтрона из ядер фотоэмульсии более чем в 75% случаев должен наблюдаться  $\beta$ -электрон. В отобранных  $p-n$  случаях  $\beta$ -электроны наблюдались в 43%. Это указывает на возможность вылета двух нейтронов из ядер эмульсии, при котором остаточные ядра стабильны. Экспериментальные данные <sup>18/</sup> о сечениях реакций  $p, pn$  и  $p, p2n$  не противоречат сделанному предположению. По-видимому, вылет второго нейтрона связан, в основном, с испарением. Это подтверждается сравнением характеристик взаимодействий с  $\beta$ -электроном и без  $\beta$ -электрона. Средняя множественность этих двух типов взаимодействий  $2,54 \pm 0,15$  и  $2,67 \pm 0,22$  соответственно/ и их угловые распределения, приведенные на рис.1, не отличаются.

Отношение числа  $p-p$  и  $p-n$  - взаимодействий равно  $1,55 \pm 0,12$ . Сечение неупругого  $p-p$ -взаимодействия оказалось примерно равным 21 мб, а отношение  $\sigma_{pp}^{упр} / \sigma_{pp}^{неупр} \sim 0,5$ . При оценке сечения неупругого  $p-p$ -взаимодействия предполагалось, что взаимодействия с квазисвободными протонами и квазисвободными нейтронами происходят одинаково часто. Это подтверждается равенством числа случаев с четным и нечетным количеством лучей, имеющих один протон испарения. Значение  $\sigma_{pp}^{неупр}$  согласуется с экспериментальными данными, полученными в работах <sup>12,7/</sup> и теоретическими оценками <sup>18,9/</sup>.

Все вышеуказанные факты свидетельствуют о сравнительной чистоте отобранного материала. Однако следует подчеркнуть, что при работе с фотоэмульсиями всегда остается некоторая неопределенность в выборе неупругих взаимодействий протон-нуклон. В частности, за счет вторичных взаимодействий внутри ядра столкновение типа  $p-p$  может быть иногда принято за  $p-n$  и наоборот.

3. Для  $p-p$  и  $p-n$  - взаимодействий были получены распределения по числу заряженных вторичных частиц, приведенные в таблицах II и III. В нижней графе таблиц приведены результаты расчета, выполненного по статистической теории с учетом изобарных состояний<sup>x/</sup>. Среднее значение числа

<sup>x/</sup> Авторы благодарят В.С. Барашенкова и В.М. Максименко за ознакомление с результатами их расчетов.

заряженных частиц для /p-p/ - взаимодействий равно  $3,22 \pm 0,12$  и для /p- $\pi$ /- взаимодействий -  $2,62 \pm 0,13$ . Соответствующие теоретические значения равны  $3,53$  и  $3,25$  <sup>x/</sup>.

Т а б л и ц а 11

Распределение /p-p/ - взаимодействий по числу заряженных частиц

Число взаимодействий %	2	4	6	8
эксп.	$45,8 \pm 5,2$	$44,7 \pm 5,1$	$8,8 \pm 2,3$	$1,2 \pm 0,8$
теор.	32,8	58,5	8,6	0,1

Т а б л и ц а 111

Распределение /p- $\pi$ / - взаимодействий по числу заряженных частиц

Число взаимодействий %	1	3	5	7
эксп.	$33,6 \pm 5,5$	$52,7 \pm 7,9$	$12,7 \pm 3,4$	$0,9 \pm 0,9$
теор.	14,5	59,4	25,0	1,1

4. Отождествление частиц и измерение их энергии производилось только для медленных частиц /  $v \geq 1,4 v_{\text{плато}}$  /. Для остановившихся частиц энергия определялась по кривым пробег-энергия. На следах частиц, не остановившихся в камере, проводились измерения ионизации. При этом для частиц с  $v \leq 2 v_{\text{плато}}$  ионизация определялась по плотности сгустков <sup>/10/</sup>, а для частиц с  $v > 2 v_{\text{плато}}$  - по методу, предложенному в работе <sup>/11/</sup>. Таким образом была определена энергия для 53 протонов и 9  $\pi$  - мезонов в /p-p/ -

<sup>x/</sup> Некоторое разногласие экспериментальных и теоретических данных может быть связано с возможной дискриминацией при отборе случаев взаимодействий с квазисвободными нуклонами при большей множественности.

взаимодействиях и 22 протонов и 5  $\pi$  -мезонов в /р-п/-взаимодействиях<sup>х/</sup>.

Из этих данных можно получить некоторые сведения об угловом распределении вторичных протонов в системе центра инерции /с.ц.и./ и о потерях энергии первичными протонами на образование  $\pi$  -мезонов.

Для (р-р) взаимодействий внутри угла  $155^\circ - 180^\circ$  в с.ц.и. летит 53 протона. Если предположить, что протоны в с.ц.и. имеют изотропное угловое распределение, то нужно ожидать, что на 170 взаимодействий будет

$$\frac{53}{\frac{1}{2} \int_{155^\circ}^{180^\circ} \sin \vartheta d\vartheta} = \frac{53}{0,047} = 1230 \text{ протонов.}$$

Полученная оценка показывает, что угловое распределение протонов в с.ц.и. резко анизотропно. При предположениях, что в одном взаимодействии образуется 1 или 2 вторичных протона, половинный угол для протонов летящих в заднюю /или переднюю/ полусферу равен  $20^\circ$  или  $30^\circ$  соответственно.

Средний импульс в с.ц.и. выделенных протонов в /р-р/ и /р-п/- взаимодействиях равен:

$$(P_c)_{pp} = /1380 \pm 40/ \text{ Мэв/с}$$

$$(P_c)_{pn} = /1250 \pm 50/ \text{ Мэв/с}$$

Зная энергию протонов, летящих в интервале углов  $180^\circ - 155^\circ$  в с.ц.и., и предполагая симметрию разлета нуклонов, можно оценить нижний предел потерь энергии. Энергия, передаваемая  $\pi$  -мезонам в л.с.

$$E_{\pi\pi} = 2\gamma_c (E_{oc} - \bar{E}_{pc}),$$

где  $E_{oc}$  - энергия протонов в с.ц.и. до взаимодействия,  $\bar{E}_{pc}$  - средняя энергия протонов после взаимодействия. Доля энергии, передаваемая  $\pi$  -мезонам в /р-р/ - взаимодействиях, равна

$$\frac{E_{\pi\pi}}{E_o} \approx 30\%$$

<sup>х/</sup> В том случае, когда частица не останавливалась в камере и определение импульса по многократному рассеянию не проводилось, она считалась протоном со скоростью, вычисленной по ионизации. Возможная примесь  $\pi$  -мезонов и дейтронов в этих случаях, вероятно, мала, т.к. из 22 отождествленных частиц /рассеяние-ионизация/ только одна оказалась  $\pi$  -мезоном и не наблюдалось ни одного дейтона.



Если считать, что в среднем на взаимодействие имеется 1 вторичный протон<sup>x/</sup>, то для /р-р/ - взаимодействий идентифицировано 2/3 всех протонов, летящих в заднюю полусферу. Предполагая, что в остальных случаях протоны передают всю свою кинетическую энергию в с.ц.и. на образование  $\pi^-$ -мезонов, можно оценить верхнюю границу потерь энергии, которая оказывается равной 45%. Однако это сильно завышенное значение. Действительно, внутри интервала  $180^\circ - 155^\circ$  в с.ц.и. нет резкого изменения величины среднего импульса с углом /см.таблицу 1У/ и, следовательно, можно думать, что при углах, меньших  $155^\circ$ , импульс не будет сильно отличаться от приведенного выше значения. Поэтому средние потери, по-видимому, близки к 30%.

Таблица 1У

Интервал углов	$P_c$ , Мэв/с
$180^\circ - 169^\circ$	$1380 \pm 60$
$169^\circ - 155^\circ$	$1380 \pm 60$

Это соответствует средней энергии  $\pi^-$ -мезонов /в предположении, что на одно взаимодействие имеется один вторичный протон/ в л.с.  $\bar{E}_{\pi\pi} \sim 800$  Мэв и в с.ц.и.  $\bar{E}_{\pi c} \sim 340$  Мэв.

5. Для получения угловых распределений вторичных частиц в с.ц.и. необходимо знать импульсы всех частиц. Импульсы быстрых частиц не измерялись; полагалось, что их скорость в с.ц.и.  $\beta_{ic}$  равна скорости с.ц.и.  $\beta_c$ . Преобразование углов вылета тех частиц, импульс которых был измерен, проводилось по соотношению

$$\operatorname{tg} \vartheta_{ic} = \frac{1}{\gamma_c} \frac{\sin \vartheta_{iR}}{\cos \vartheta_{iR} - \beta_c / \beta_{iR}}$$

<sup>x/</sup> Это следует, например, из статистической теории. Во всяком случае среднее число протонов на взаимодействие меньше, чем 1,7 /см. примечание на стр. 9/.

Угловые распределения вторичных частиц для /р-р/ - взаимодействий приведены на рис. 2. Полученные распределения оказываются примерно симметричными. За меру асимметрии можно принять величину  $\Delta = \frac{\sum (n_{вп} - n_{н})}{N}$ , где  $n_{вп}$  и  $n_{н}$  - число частиц, летящих вперед и назад в с.ц.и. в одном взаимодействии, а  $N$  - число взаимодействий. Для всех /р-р/-взаимодействий  $\Delta_{pp} = 0,16 \pm 0,13$ , т.е. практически не отличается от нуля. Это свидетельствует о том, что предположение  $\beta_{ic} = \beta_c$  в нашем случае является достаточно хорошим приближением. Из рис. 2 видно, что при малой множественности / $n = 2$ / угловое распределение резко анизотропно. С увеличением множественности степень анизотропии уменьшается, и при  $n = 6 - 8$  распределение практически изотропно. Можно показать, что наблюдаемая анизотропия не может быть получена вследствие неправильности перехода в с.ц.и., если исходное распределение в с.ц.и. изотропно.

Ранее было показано, что протоны имеют резко анизотропное распределение. Кажется естественным связать с ними анизотропию, полученную для всех вторичных частиц. Тогда  $\bar{\pi}$ -мезоны должны быть распределены значительно шире, чем протоны. Это подтверждается следующими соображениями. Внутри угла  $180^\circ - 155^\circ$  в с.ц.и. летят 53 протона. В симметричном углу  $0^\circ - 25^\circ$  должно быть в среднем такое же количество протонов; фактически наблюдается 72 частицы. Избыток, равный  $72 - 53 = 19 \pm 11$ , является верхней оценкой числа  $\bar{\pi}$ -мезонов в интервале углов  $0^\circ - 25^\circ$  x/.

Кроме того в тех случаях, когда в /р- $N$ /-взаимодействии имеется медленный протон, по кинематическим соображениям<sup>/4/</sup> можно оценить предельный угол в л.с. внутри которого может лететь второй нуклон<sup>xx/</sup>. Все частицы, летя-

x/ Как уже отмечалось, для быстрых частиц переход в с.ц.и. осуществляется в предположении  $\beta_{ic} = \beta_c$ . Однако для частиц, вылетевших под малыми углами в с.ц.и., истинное значение  $\beta_{ic}$  почти не влияет на переход из л.с. в с.ц.и. Переброс же медленных частиц из заднего ко- нуса в рассматриваемый интервал углов за счет неправильности перехо- да достаточно мал.

xx/ Это позволяет оценить верхнюю границу среднего числа протонов в /р-р/-взаимодействии. В 36 из 53 взаимодействий с медленным протоном, внутри предельного угла летит, по крайней мере, одна быстрая заряженная частица, которая может быть протоном. Тогда

$$\bar{n}_p \leq \frac{53 + 36}{53} \sim 1,7.$$

щие вне этого угла, являются  $\pi$ -мезонами. Так как вычисленные предельные углы в л.с. равны примерно  $15-20^\circ$ , то можно построить угловое распределение для  $\pi$ -мезонов, летящих в с.ц.и. только в заднюю полусферу. В таблице У приведено указанное угловое распределение при двух предположениях о величине  $\beta_{ic}$

Таблица У

$\cos \vartheta_c$	$0 \pm 0,5$	$-0,5 \pm -1,0$
Число частиц $\beta_{ic} = \beta_c$	18	32
$\beta_{ic} = 1$	24	20

Таким образом можно сделать вывод о том, что  $\pi$ -мезоны в с.ц.и. распределены более широко, чем протоны. Полученные данные не противоречат также изотропному распределению  $\pi$ -мезонов в с.ц.и.

6. Угловые распределения вторичных частиц в с.ц.и. для /р- $n$ / - взаимодействий, построенные таким же образом как и для /р-р/-взаимодействий, приведены на рис. 3. Для /р- $n$ / - взаимодействий наблюдается заметная асимметрия вперед-назад<sup>х/</sup>. Значение  $\Delta_{pn}$  для всех /р- $n$ /-взаимодействий равно  $\Delta_{pn} = 0,60 \pm 0,15$ .

Прежде всего следует убедиться в том, что наблюдаемая асимметрия не может возникнуть в результате неправильности перехода в с.ц.и.

Распределение заряженных  $\pi$ -мезонов в с.ц.и. должно быть симметричным вследствие симметрии начального состояния по изотопическому спину /сколько  $\pi^+$ -мезонов летит в переднюю полусферу, столько же  $\pi^-$ -мезонов должно лететь в заднюю полусферу и наоборот/. Тогда появление асимметрии для  $\pi$ -мезонов могло быть связано с тем, что их скорость в с.ц.и.  $\beta_{\pi c}$  много меньше, чем  $\beta_c$ , а при переходе предполагалось  $\beta_{\pi c} = \beta_c$ . Это указывало бы на резкое различие энергетических спектров вторичных частиц для /р-р/

<sup>х/</sup> Для случаев с  $n = 1$  имеет место существенная дискриминация, так как рассматривались рассеяния на угол, больший  $5^\circ$ . Поэтому угловое распределение в с.ц.и. сильно искажено в области малых углов.

и /р- $n$ / взаимодействий. Выше было показано, что среднее значение импульса в с.ц.и. /рассчитанное по медленным протонам в л.с./ и, следовательно, нижняя граница потерь энергии для /р-р/ и /р- $n$ / - взаимодействий примерно одинаковы. Поэтому трудно предполагать наличие разницы энергетических спектров вторичных частиц в этих взаимодействиях. Наиболее отчетливо асимметрия выражена в /р- $n$ / взаимодействия с тремя вторичными заряженными частицами / $\Delta_3 = 0,83 \pm 0,23$ /. Целесообразно сравнить угловое распределение трехлучевых событий с суммарным угловым распределением двух- и четырехлучевых событий / $\Delta_{2;4} = 0,12 \pm 0,14$ /, так как энергетические характеристики двух этих групп взаимодействий, по-видимому, не различаются. Угловое распределение при  $n = 2-4$  для всех частиц и, следовательно, для  $\pi$ -мезонов симметрично. Поэтому угловое распределение  $\pi$ -мезонов при  $n = 3$  должно быть также симметричным. Тогда наблюдаемая асимметрия может быть связана только с протонами. Однако средняя энергия вторичных нуклонов в /р-р/ и /р- $n$ / - взаимодействиях в с.ц.и. одинакова. Поэтому, следует считать, что асимметрия в /р- $n$ / - взаимодействиях возникает в результате того, что протоны в с.ц.и. действительно летят преимущественно вперед, а нейтроны - назад.

7. Таким образом анализ /р-р/ и /р- $n$ / - взаимодействий позволяет сделать следующие выводы:

а/ Угловое распределение нуклонов в /р-р/- взаимодействиях резко анизотропно в с.ц.и. Угловое распределение всех частиц в /р-р/ - взаимодействиях, анизотропно при малой множественности и приближается к изотропному с увеличением множественности.

б/ Доля энергии первичного протона, передаваемая  $\pi$ -мезонам, в л.с. составляет примерно 30%.

в/ Наблюдаемая асимметрия в угловом распределении вторичных частиц в /р- $n$ / - взаимодействиях связана с тем, что протоны в с.ц.и. летят преимущественно в переднюю, а нейтроны - в заднюю полусферу.

Экспериментальные данные по /р-р/- взаимодействиям при меньших энергиях<sup>/12/</sup>, также указывают на анизотропию нуклонов в с.ц.и. Некоторая асимметрия протонов в / $n$ -р/- взаимодействиях наблюдалась при энергии 1,7 Бэв<sup>/13/</sup>. В недавно появившихся работах<sup>/14, 15/</sup> исследованы /р-р/-взаимодействия при 6,2 Бэв. Авторы приходят к выводам, подтверждающим наши результаты.

Вся совокупность данных указывает, по-видимому, на существенную роль периферических соударений нуклон-нуклон<sup>х/</sup>. В качестве одной из возможных теоретических моделей таких соударений можно привести схему, рассмотренную И.Е.Таммом<sup>xx/</sup>, в которой предполагается, что взаимодействие осуществляется путем обмена одним  $\bar{\pi}$ -мезоном, с образованием двух изобар. Такая модель позволяет качественно объяснить как анизотропию нуклонов в /p-p/ - взаимодействиях, так и асимметрию протонов в /p-n/- взаимодействиях в с.ц.и.

Более детальный анализ экспериментальных данных и сравнение с теорией возможны лишь при существенном увеличении статистического материала.

Авторы рады поблагодарить академика В.И.Векслера и профессора В.П.Джелепова за постоянное содействие в проведении работы и плодотворную дискуссию. Мы благодарим Н.Г.Биргер за существенную помощь при проведении кинематического анализа материала, проф. М.Я.Даныша, Г.И.Копылова и Д.С.Чернавского за участие в обсуждениях.

Авторы благодарны также коллективу лаборантов, проводивших просмотр и измерения.

Рукопись поступила в издательский отдел  
18 мая 1959 года.

---

х/ Это обстоятельство было подчеркнуто академиком В.И.Векслером в связи с обсуждением результатов настоящей работы. Аналогичные соображения приведены в работах<sup>16,17/</sup>.

xx/ Мы весьма признательны академику И.Е.Тамму за подробную информацию о расчетах, связанных с различными моделями периферических соударений.



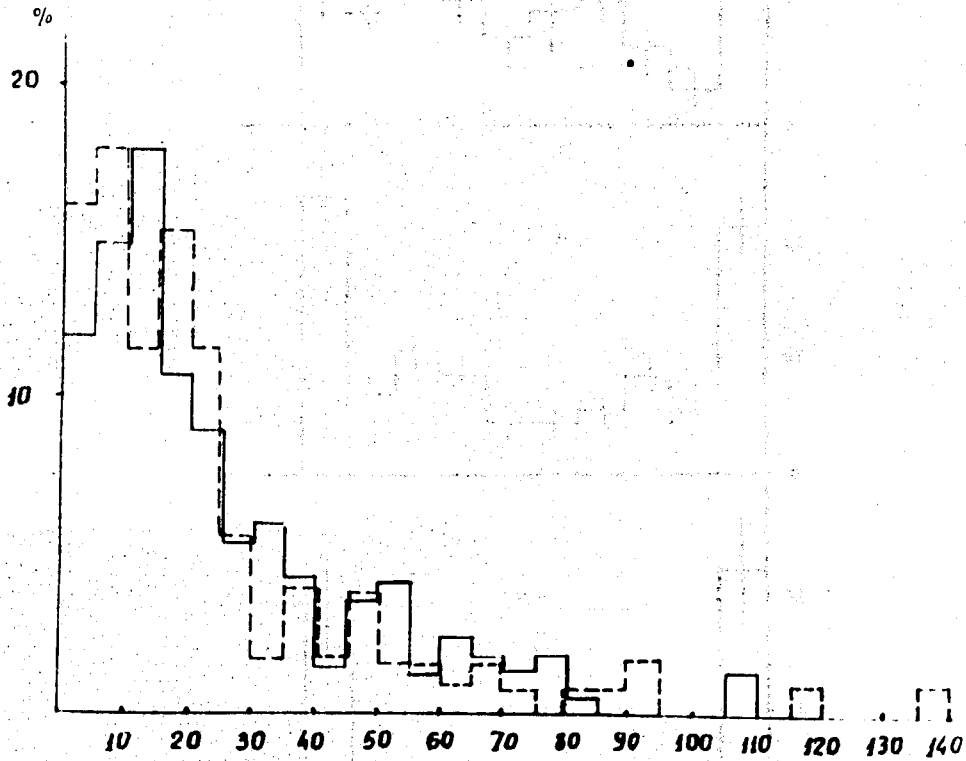


Рис. 1. Угловые распределения вторичных частиц в л.с. для /  $p-n$  /- взаимодействий с  $\beta$ -электроном / пунктирная линия/ и без  $\beta$ -электрона /сплошная линия/.

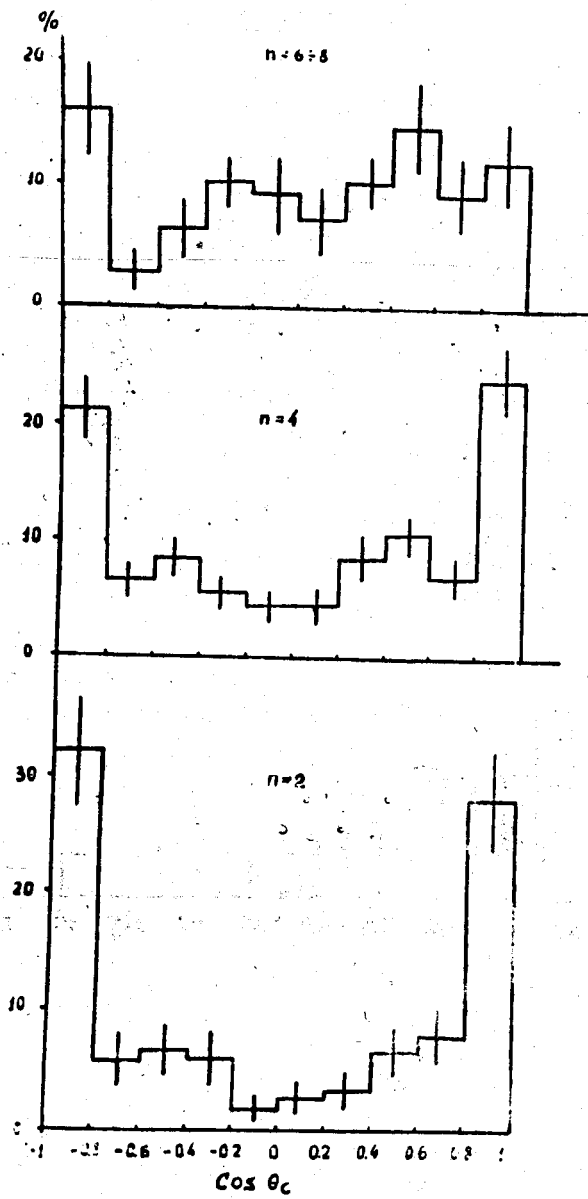


Рис. 2. Угловые распределения вторичных частиц в с.и. для /p-p/- взаимодействий при разной множественности.

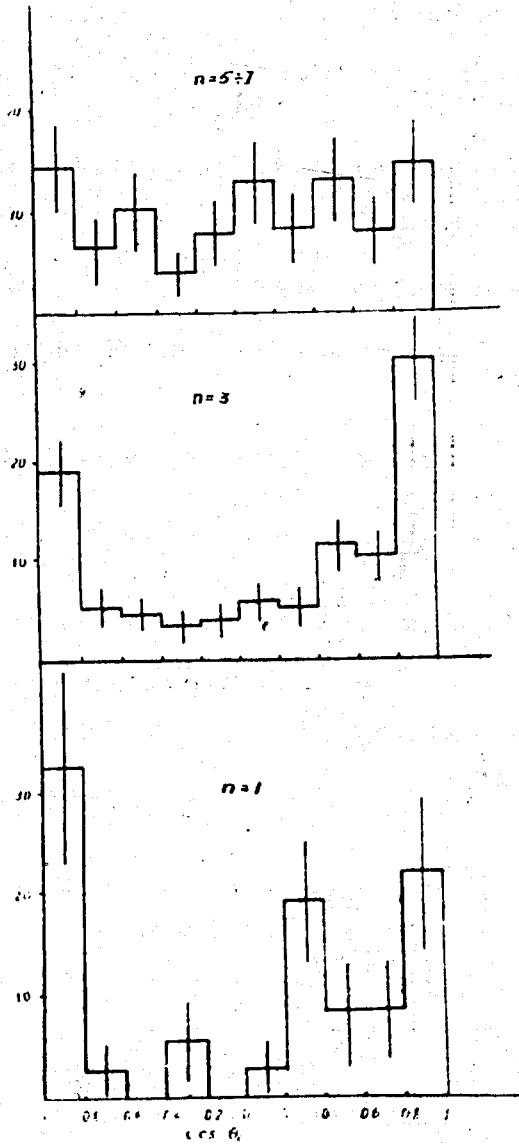


Рис. 3. Угловые распределения вторичных частиц в с.п.и. для /p-n /- взаимодействий при разной множественности.

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

Л и т е р а т у р а

1. Труды 2-й Международной конференции по мирному использованию атомной энергии. Доклады советских ученых, т.1, стр.260, М.1959.
2. Н.П.Богачев, С.А.Бунятов, Ю.П.Мереков, В.М.Сидоров, ДАН, 121, 617 /1958/.
3. В.С.Барашенков, В.А.Беляков, Э.Г.Бубелев, Ван Шу-фень, В.М.Мальцев, Тен Гыи, К.Д.Толстов. Nuclear Physics, 9, 74, 1958.
4. Н.Г.Биргер, Ю.А.Сморозин, ЖЭТФ, 36, 1159 /1959/.
5. В.Б.Любимов, П.К.Марков, Э.Н.Цыганов, Чжен Пу-ин, М.Г.Шафранова, ЖЭТФ /в печати/.
6. М.Я.Кузнецова, В.Н.Мехедов, В.А.Халкин, ЖЭТФ, 34, 1096 /1958/.
7. W. Wright, G. Saphir, W.M. Powell, G. Maenchen, W.B. Fowler, Phys.Rev. 100, 1802, (1955).
8. В.Г.Гришин, И.С.Саитов, ЖЭТФ, 33, 1051 /1957/.
9. В.С.Барашенков, Хуан Нянь-нин, ЖЭТФ, 36, 1319 /1959/.
10. Н.М.Вирысов, Л.П.Писарева, ПТЭ, 2, 17 /1958/.
11. P.H. Fowler, D.H. Perkins, Phil.Mag. 46, 587, (1955).
12. W.B. Fowler, R.P. Shutt, A.M. Thorndike, W.L. Whittemore, V.T. Cocconi, E. Hart, M.M. Block, E.M. Harth, E.C. Fowler, J.D. Garrison, T.W. Morris, Phys. Rev. 103, 1489. 1956.
13. W.B. Fowler, R.P. Shutt, A.M. Thorndike, W.L. Whittemore, Phys.Rev. 95, 1026, 1954.
14. R.M. Kalbach, J.J. Lord, C.H. Tsao, Phys.Rev. 113, 325, 1959
15. R.M. Kalbach, J.J. Lord, C.H. Tsao, Phys.Rev. 113, 330, 1959
16. Д.И.Блохинцев CERN, Symposium, v. 2, page 155 (1956).
17. Д.И.Блохинцев, В.С.Барашенков, Б.М.Барбашов, УФН /в печати/.