

А. А. ТЯПКИН, М. С. КОЗОДАЕВ и Ю. Д. ПРОКОШКИН

ОБРАЗОВАНИЕ π^0 -МЕЗОНОВ ПРОТОНАМИ С ЭНЕРГИЕЙ 670 МэВ НА ЯДРАХ РАЗЛИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

(Представлено академиком Л. А. Арцимовичем 22 XII 1954)

В работе, проведенной нами на ускорителе Института ядерных проблем Академии наук СССР, были измерены сечения образования π^0 -мезонов протонами с энергией 670 МэВ в элементарном акте $p-p$ -соударения, а также в соударениях протонов с ядрами D, Li, Be, B, C, Al, Cu, Cd, Sn и Pb. Сечение определялось по измеренным под углами 0 и 180° к направлению движения протонов потокам γ -квантов, образующихся при распаде π^0 -мезонов.

Гамма-кванты, образующиеся на внутренней мишени ускорителя, регистрировались телескопом счетчиков. Телескоп, состоящий из двух счетчиков черенковского излучения и одного сцинтилляционного счетчика, эффективно регистрировал релятивистские заряженные частицы, скорость которых β превышала 0,8. Телескоп был выполнен в виде двух отдельных блоков. Путем раздвигания блоков и помещения между ними медных поглотителей энергетический порог регистрации γ -квантов мог быть неограниченно увеличен («жесткий детектор»). В контрольных измерениях было установлено, что фон от нейтронов, попадавших через коллиматор в телескоп, составлял 3%; фон случайных совпадений практически отсутствовал. Эффективность γ -детектора определялась в специальных измерениях путем последовательного отключения узлов телескопа и оказалась равной $(80 \pm 6)\%$.

Абсолютный поток протонов через внутреннюю мишень определялся калориметрическим методом путем измерения разности температур на концах калиброванного медного теплопровода, являющегося одновременно держателем мишени. Тепловое сопротивление теплопровода выбиралось таким, чтобы мишень нагревалась на несколько десятков градусов и, следовательно, потери тепла на излучение были несущественны. При определении абсолютного потока протонов учитывался добавочный нагрев мишени за счет звездообразования. Для применявшейся углеродной мишени этот эффект, согласно оценке, составлял 15% от величины ионизационных потерь.

Сечение образования π^0 -мезонов в $p-p$ -соударениях измерялось разностным способом путем облучения мишеней из полиэтилена $(CH_2)_n$ и графита. Применявшиеся полиэтилен и графит практически не содержали тяжелых примесей. Для определения потока протонов измерялась позитронная активность облученных мишеней. Этот метод, так же как и калориметрический, позволяет исключить влияние формы и плотности мишеней.

При измерении отношения выходов γ -квантов под углами 0 и 180° учитывалось изменение чувствительности γ -детектора, обусловленное различием спектров γ -квантов. В экспериментах, проведенных нами в 1952 г. ⁽¹⁾, при измерениях с помощью 12-канального парного

спектрометра энергетических спектров γ -квантов от распада π^0 -мезонов, образующихся в столкновениях протонов с энергией 480 Мэв с ядрами углерода, было показано, что максимумы спектров γ -квантов находятся при значениях энергии 90 ± 5 Мэв (для угла наблюдения 180°) и 190 ± 10 Мэв (для угла 0°). Если с увеличением энергии прото-

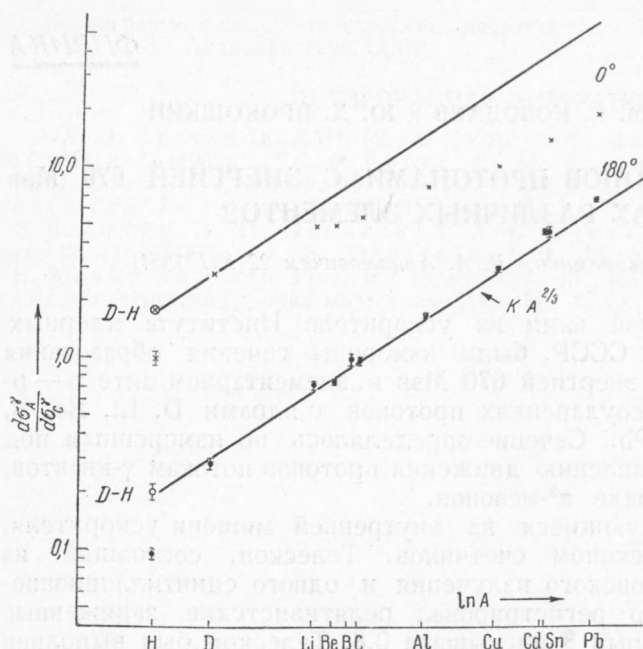


Рис. 1. Выход γ -квантов на различных элементах

деленные в настоящей работе методом поглощения, оказались равными 125 ± 5 Мэв под углом 0° и 80 ± 5 Мэв под углом 180° . Последняя величина хорошо согласуется с результатами измерений при помощи спектрометра энергетического спектра γ -квантов под углом 180° для углерода, выполненных в 1954 г. Ю. Баюковым, М. Козодаевым и А. Тяпкиным. Эти измерения показали, что максимум спектра сдвинут в область малых энергий (~ 70 Мэв), а в области энергий, больших, чем 150 Мэв, содержится незначительная доля γ -квантов. Таким образом, при энергии протонов 670 Мэв в основном образуются π^0 -мезоны, обладающие относительно малой энергией. Резкое уменьшение количества π^0 -мезонов, рождающихся с энергией, близкой к максимальной возможной, может быть связано с тем, что при увеличении энергии столкновения нуклоны в конечном состоянии перестают сильно взаимодействовать и обладают большой относительной кинетической энергией. Одна из причин смягчения спектра рождающихся π^0 -мезонов может заключаться в возрастании взаимодействия мезона с нуклоном при переходе от энергии протонов 480 к 670 Мэв. Другое возможное объяснение наблюдаемого явления заключается в том, что при этих энергиях π -мезоны преимущественно образуются парами. Однако подобное предположение трудно совместить с результатами опытов ⁽²⁾ по множественному рождению π -мезонов в $p-p$ -соударениях при энергии столкновения значительно большей, чем в нашем случае.

На рис. 1 приведены результаты измерений выходов γ -квантов для различных элементов под углами 0 и 180° ; сплошные прямые линии соответствуют закону $A^{1/3}$, который должен представлять зависимость сечения образования π^0 -мезонов от атомного веса в том случае,

нов до 670 Мэв характер процесса рождения π^0 -мезонов не претерпевает коренных изменений, то благодаря возрастанию энергии столкновения средняя энергия γ -квантов должна бы возрасти до 120 Мэв под углом 180° и до 280 Мэв под углом 0° . Однако в проведенных нами измерениях обнаружено неожиданно резкое смягчение спектров γ -квантов, а следовательно, и спектров π^0 -мезонов, образующихся в $p-C$ -столкновениях при энергии протонов 670 Мэв. Средние энергии γ -квантов, опре-

если мезоны излучаются только с поверхности ядра. На рис. 2 представлен график зависимости отношения $\eta_A = d\tau_\gamma(0^\circ)/d\tau_\gamma(180^\circ)$ от атомного веса A . Из рис. 1 видно, что зависимость выхода γ -квантов под углом 0° резко отличается от закона $A^{1/2}$. Этот результат находится в согласии с измерениями, выполненными в 1952 г.* при энергии протонов 480 Мэв (3). Кривая зависимости от атомного веса выхода γ -квантов под углом 180° удовлетворительно согласуется с законом $A^{1/2}$. Это, в частности, означает, что отступление хода сечений под углом 0° от закона $A^{1/2}$ не может быть объяснено неравномерностью распределения нейтронов и протонов в ядре. Значительное уменьшение выхода γ -квантов под углом 0° на тяжелых элементах может быть обусловлено рядом причин. Так например, вследствие рассеяния π^0 -мезонов на нуклонах ядра угловое распределение γ -квантов должно становиться более изотропным с увеличением атомного веса. Уменьшение выхода γ -квантов под углом 0° на тяжелых элементах может быть связано также с частичной непрозрачностью ядер для бомбардирующих протонов при наличии сильного поглощения π^0 -мезонов в ядерном веществе. Большая часть регистрируемого γ -излучения обусловлена распадом π^0 -мезонов, движущихся в направлении γ -детектора, что связано с преобразованием телесных углов при переходе из системы координат π^0 -мезонов в лабораторную. При измерениях под углом 180° основная доля таких мезонов излучается с поверхности ядра, обращенной к пучку протонов. При измерении же потока γ -квантов под углом 0° эффективно регистрируются π^0 -мезоны, рождающиеся на поверхности ядра, экранированной от бомбардирующих протонов остальными нуклонами ядра. С увеличением атомного номера ядра эффект экранирования возрастает, и вследствие этого отношение η_A должно уменьшаться. Все перечисленные процессы должны приводить также и к изменению спектра γ -квантов при переходе от легких к тяжелым элементам.

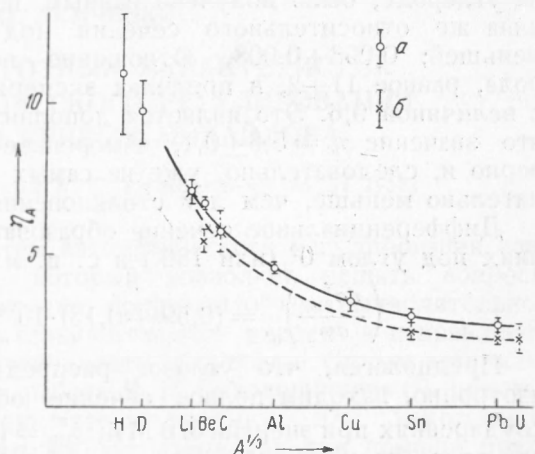


Рис. 2. Зависимость отношения выходов γ -квантов под углами 0 и 180° от атомного веса элемента. a — измерение полных потоков. $б$ — измерение с «жестким» детектором

Нами были измерены выходы γ -квантов на различных элементах при помощи детектора с высоким энергетическим порогом. Регистрировались только «жесткие» γ -кванты, составляющие приблизительно $1/5$ часть полного потока γ -лучей. Измерения отношений потоков γ -квантов «вперед/назад» для различных элементов, выполненные с «жестким» детектором, не дали ожидаемого отличия от результатов, полученных при измерении полных потоков γ -квантов (рис. 2). Не было обнаружено существенного различия в спектрах для легких и тяжелых элементов также и в работе (1).

Если в системе центра масс сталкивающихся нуклонов процесс рождения π^0 -мезонов симметричен в направлениях «вперед — назад», то

* Измерение выхода γ -квантов под углом 180° в 1952 г. было проведено только для бериллия.

отношение выхода γ -квантов под углами 0 и 180° в лабораторной системе определяется только доплеровским эффектом и равно $\eta = (1 + \beta_c)^2 / (1 - \beta_c)^2$, где β_c — скорость центра масс. В случае столкновения протона с кинетической энергией 670 Мэв с покоящимся протоном $\eta = 9,6$. В сложном ядре необходимо учитывать внутриядерное движение нуклонов. Усредненное в импульсном приближении значение η равно для сложного ядра $\sim 8,2$.

Сечение образования γ -квантов на водороде, отнесенное к сечению на углероде, было получено равным под углом 0° : $0,18 \pm 0,01$. Величина же относительного сечения под углом 180° оказалась вдвое меньшей: $0,093 \pm 0,008$. Отношение потоков γ -квантов η_n для водорода, равное 11 ± 2 , в пределах экспериментальных ошибок совпадает с величиной 9,6. Это является дополнительным доказательством того, что значение $\eta_c = 5,8 \pm 0,1$, измеренное в настоящей работе, достоверно и, следовательно, уже на самых легких ядрах величина η значительно меньше, чем для столкновения свободных протонов.

Дифференциальное сечение образования γ -квантов в $p-p$ -соударениях под углом 0° (или 180°) в с. ц. м. получено равным:

$$\left(\frac{d\sigma_{pp}^\gamma}{d\omega} \right)_{0^\circ} = (0,59 \pm 0,13) \cdot 10^{-27} \text{ см}^2 / \text{стерадиан}.$$

Предполагая, что угловое распределение π^0 -мезонов в с. ц. м. изотропно, находим полное сечение образования π^0 -мезонов в $p-p$ -соударениях при энергии 670 Мэв: $\sigma_{pp}^{\pi^0} = (3,7 \pm 0,8) \cdot 10^{-27} \text{ см}^2$. Сопоставление этого результата с данными об образовании π^0 -мезонов в $p-p$ -соударениях при энергии 480 Мэв ⁽¹⁾ позволяет сделать заключение, что сечение образования π^0 -мезонов в интервале энергии 480—670 Мэв растет пропорционально $p^{4,5 \pm 0,5}$, где p — импульс π^0 -мезона в с. ц. м. Измеренное разностным способом (LiD—Li) сечение образования γ -квантов на дейтроне равно:

$$\left(\frac{d\sigma_{pD}^\gamma}{d\omega} \right)_{0^\circ} = (1,8 \pm 0,3) \cdot 10^{-27} \text{ см}^2 / \text{стерадиан}.$$

Как видно из рис. 1, наблюдается систематическое отступление зависимости относительных сечений под углом 180° от закона $A^{1/3}$. Если предположить, что рождение наблюдаемых π -мезонов происходит в поверхностном слое ядра, то сечение должно быть пропорционально величине $(A - kZ) A^{-1/3}$; здесь $(1 - k) = \sigma_{pp}^{\pi^0} / \sigma_{pn}^{\pi^0}$. Наилучшее согласие с экспериментальными результатами имеет место при $\sigma_{pn}^{\pi^0} / \sigma_{pp}^{\pi^0} = 2,0 \pm 0,5$. По измеренным выходам γ -квантов в $p-p$ - и $p-D$ -столкновениях в пренебрежении связью нуклонов в дейтроне величина этого отношения была найдена равной $2,1 \pm 0,3$. Сопоставление полученной нами величины сечения $\sigma_{pn}^{\pi^0}(670) = (7,8 \pm 1,6) \cdot 10^{-27} \text{ см}^2$ с данными работ ^(4,5), выполненных при энергии протонов 340 Мэв позволяет следующим образом связать отношение сечений с отношением максимальных импульсов мезонов: $\sigma_{pn}^{\pi^0}(670) / \sigma_{pn}^{\pi^0}(340) = (p_{670} / p_{340})^{3,2 \pm 0,4}$.

В заключение авторы выражают благодарность М. М. Кулюкину за большую помощь в разработке электронной аппаратуры.

Институт ядерных проблем
Академии наук СССР

Поступило
22 XII 1954

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ М. С. Козодаев, А. А. Тяпкин, А. А. Марков и Ю. Д. Баюков, Отчет Инст. ядерных проблем АН СССР за 1952 г. ² W. Fowler, R. Shutt et al., Phys. Rev., 95, 1026 (1954). ³ М. С. Козодаев, А. А. Тяпкин и Р. А. Ванициан, Отчет Инст. ядерных проблем АН СССР за 1952 г. ⁴ R. Hales, B. Moyer, Phys. Rev., 89, 1047 (1953). ⁵ I. Mather, E. Martineilli, Phys. Rev., 92, 780 (1953).