

6
Б-90

ЛЯП 7.3

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лаборатория ядерных проблем

Ю.А. Будагов, С. Виктор, В.П. Желепов, П.Ф. Ермолов
В.И. Москалев

Р. 268

О НАБЛЮДЕНИИ

РАСПАДА $\pi^0 \rightarrow e^- e^+ e^- e^+$
ЖЭТФ, 1959, т 36, в 4, с 1080.

Дубна, 1959 год.

6
Б-90

Ю.А. Будагов, С.Виктор, В.П. Дзелепов, П.Ф. Ермолов
В.И. Москалев

Р. 268

О НАБЛЮДЕНИИ
РАСПАДА $\pi^0 \rightarrow e^- e^+ e^- e^+$

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

А н н о т а ц и я

При просмотре фотографий, полученных с помощью водородной диффузионной камеры, помещенной в магнитное поле и экспонированной в пучке Π^- -мезонов с энергией 160 Мэв, найден случай зарядо-обменного рассеяния $\Pi^+ p \rightarrow \Pi^0 + p$ с последующим распадом $\Pi^0 \rightarrow e^- + e^+ + e^- + e^+$. Этот распад наблюдается на 2500 распадов Π^0 -мезона по обычной схеме $\Pi^0 \rightarrow 2\gamma$. Оценка массы Π^0 -мезона дает величину 141 ± 8 Мэв. В системе покоя Π^0 -мезона углы разлета между электронами и позитронами пар равны 7° и 12° , а угол между плоскостями пар не превышает 37° . Другие возможные интерпретации наблюдаемого случая имеют чрезвычайно малую вероятность.

В в е д е н и е

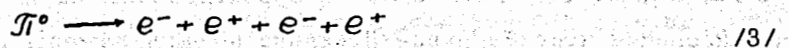
Как известно, помимо основного типа распада



примерно один Π^0 -мезон из 80 распадается по схеме, предложенной Далитцем ^{/1/}:



Такой распад можно интерпретировать как внутреннюю конверсию одного из гамма-квантов в поле другого гамма-кванта. Возможен также процесс двойной внутренней конверсии гамма-квантов, ведущий к распаду Π^0 -мезона на две электронно-позитронные пары:



По теоретическим оценкам ^{/2/} вероятность распада ^{/3/} по отношению к обычному распаду ^{/1/} составляет $3,47 \cdot 10^{-5}$ /если спин Π^0 -мезона равен 0/. Все частицы распада Π^0 -мезона по схеме ^{/3/} являются заряженными и, следовательно, легко доступными для регистрации их в приборе типа диффузионной или пузырьковой камеры. Поэтому наблюдение таких распадов в камере может дать ряд важных сведений о свойствах Π^0 -мезона. Так, измеряя импульсы всех четырех электронов по радиусам кривизны в магнитном поле, можно определить массу Π^0 -мезона, а изучение угловой корреляции между плоскостями обеих пар позволяет непосредственно от опыта найти спин и четность Π^0 -мезона ^{/2,3/}. Однако, ввиду чрезвычайно малой вероятности систематическое экспериментальное исследование процесса ^{/3/} встречает определенные трудности. Нам известен лишь один случай такого распада, описанный в литературе. Ходсон, Баллам, Арнольд и др. ^{/4/}, изучая с помощью управляемой камеры Вильсона рождение тяжелых нестабильных частиц в космических лучах, нашли случай, кинематика которого

согласуется с распадом $K^+ \rightarrow \pi^+(\mu^+) + \pi^0 + Q$, $\pi^0 \rightarrow e^- + e^+ + e^- + e^+$. Так как в этой работе было зарегистрировано всего 60 V^\pm - распадов, и к тому же только в части этих случаев образуются π^0 - мезоны, вероятность наблюдения распада /3/ была очень мала. Как отмечают сами авторы, появление распада /3/ в условиях их эксперимента, в котором не наблюдалось ни одного случая значительно более вероятного распада /2/, представляется необычной статистической флуктуацией. Углы между электронами и позитронами пар в случае /4/ оказались настолько малыми /0,5° и 1,7° в лабораторной системе/, что определить угол между плоскостями пар не представилось возможным.

В настоящей статье описывается случай зарядово - обменного рассеяния $\pi^- + p \rightarrow \pi^0 + n$ с последующим распадом $\pi^0 \rightarrow e^- + e^+ + e^- + e^+$, зарегистрированный в диффузионной камере /рис.1/.

Условия опыта

Фотография описываемого распада была получена при изучении рассеяния π^- - мезонов протонами с помощью диффузионной камеры, наполненной водородом до давления 25 атмосфер /5/. Внутренний диаметр камеры равен 380 мм, высота чувствительного объема при температурном градиенте 7 град/см составляла 6-7 см. Камера была помещена в постоянное магнитное поле 9000 гс с неоднородностью по высоте чувствительного объема не более $\pm 3,5\%$ и по радиусу не более $\pm 2,5\%$. Топография магнитного поля была снята с помощью магнитометра, принцип действия которого основан на эффекте Холла, и калиброванного методом протонного резонанса^{х/}. Фотографирование производилось стереофотоаппаратом с двумя объективами ГОИ "Гелиос-37", фокусное расстояние которых равно 62 мм, на 35 мм пленку ЦАНХРОМ-Х с чувствительностью 1000 ед. ГОСТ. Объективы "Гелиос-37" скорректированы на дисторсию, возникающую при фотографировании через верхние стеклянные окна камеры толщиной 25 мм, и имеют разрешение 50 линий/мм в центре поля зрения. База стереофотоаппарата равна 120 мм, расстояние съемки около 1 м.

Камера экспонировалась в пучке π^- -мезонов со средней энергией 160 Мэв от синхроциклотрона Объединенного института ядерных исследований, причем интенсивность пучка поддерживалась такой, что на каждой фотографии в среднем было 30-40 следов π^- - мезонов. Цикл работы камеры равен 8 сек. В серии экспозиций получено около 90000 стереофотографий, при просмотре которых наряду с 1400 случаями упругого рассеяния π^- - мезонов протонами и 26 случаями зарядовообменного рассеяния с последующим распадом $\pi^0 \rightarrow e^- + e^+ + \gamma$ был найден описываемый случай $\pi^- + p \rightarrow \pi^0 + n$, $\pi^0 \rightarrow e^- + e^+ + e^- + e^+$. Сообщение о результатах обработки 14 распадов $\pi^0 \rightarrow e^- + e^+ + \gamma$ опубликовано нами ранее^{6/}.

^{х/} Мы благодарны Д.П. Василевской и Ю.Н. Денисову за предоставленную возможность воспользоваться этим прибором.

Обработка и результаты

Как видно из рис.1, представляющего стерефотографию анализируемого случая, след одного из π^- - мезонов [1], проходящих через камеру, обрывается внутри чувствительного объема, и из точки обрыва в заднюю полусферу вылетают четыре частицы с ионизацией, близкой к минимальной, причем две из них заряжены положительно [3, 5], а две - отрицательно [2, 4].

Обработка этого случая производилась репроекционным методом. Конструкция и основные характеристики репроектора аналогичны описанным в статье [7]. Непосредственно на репроекторе были измерены: 1/ радиусы кривизны всех пяти треков; 2/ углы α между падающим π^- -мезоном и каждой частицей распада; 3/ азимутальные углы β каждой частицы распада; 4/ глубинные углы γ , т.е. углы между направлением движения частицы и горизонтальной плоскостью. На рис.2 схематически представлены углы α , β и γ для одной частицы распада.

Радиусы кривизны треков были измерены с помощью шаблонов, а также координатным методом на микроскопе УИМ-22. Оба метода измерения дали в пределах ошибок одинаковые результаты. Точность измерения радиуса кривизны каждого трека зависит от величины кривизны, длины и направления трека в пространстве. В величины импульсов частиц, определенные по измеренным радиусам и глубинным углам γ , вносились поправки на неоднородность магнитного поля / $\sim 2\%$ / и усадку пленки / $\sim 1\%$ /. Поправки, обусловленные дисторсией оптической системы и тем, что изображение на пленке является конической проекцией действительного трека, при измерениях координатным методом были малы и не учитывались. Произведенные оценки показали, что многократное рассеяние частиц в газе камеры и тормозное излучение также практически не влияют на результаты измерений.

В таблице 1 приведены значения радиусов кривизны, полученные как средние значения измерений на двух кадрах стереопары репроекционным и координатным методом, и соответствующие им импульсы частиц. Ошибки, указанные для радиусов, представляют собой максимальные ошибки измерений. Для импульсов приведены суммарные ошибки, учитывающие как неточность измерений радиусов кривизны и глубинных углов, так и неопределенности, связанные с введением поправок.

Таблица 1.

№№ трека	Частица	Радиус кривизны /см/	Импульс /Мэв/с/
1	π^-	105 ± 5	272 ± 16
2	e^-	20 ± 4	72 ± 18
3	e^+	$3,75 \pm 0,15$	$13,9 \pm 0,7$
4	e^-	$4,2 \pm 0,1$	$15,8 \pm 0,5$
5	e^+	29 ± 3	100 ± 13

Плотность ионизации, производимая частицами в камере, оценивалась визуально и для всех частиц не превышала более чем в полтора раза минимальную. Сопоставление полученных импульсов частиц с их ионизацией показывает, что все частицы распада являются электронами.

В таблице 11 приведены измеренные величины углов α , β и γ . Точность измерения углов $\pm 1^\circ$. Поправки к углам, обусловленные усадкой пленки, пренебрежимо малы.

Таблица 11.

№№ трека	Частица	α	β	γ
2	e^-	138°	84°	42°
3	e^+	138°	94°	42°
4	e^-	127°	-56°	-41°
5	e^+	128°	-48°	-36°

По измеренным импульсам электронов и углам α и β легко вычислить направление и величину суммарного импульса всех четырех электронов: $P_e = 147 \pm 26$ Мэв/с; $\alpha_e = 153^\circ \pm 2^\circ$, причем полная энергия всех электронов равна 202 ± 32 Мэв. Из кинематики процесса $\pi^- + p \rightarrow \pi^0 + n$ при кинетической энергии π^- -мезона 166 ± 14 Мэв /что соответствует измеренному импульсу π^- -мезона 272 ± 16 Мэв/с/ следует, что π^0 -мезон, вылетающий под углом $153^\circ \pm 2^\circ$, должен иметь импульс 163 ± 7 Мэв/с и полную энергию 212 ± 6 Мэв. Таким образом, кинематически четыре электрона эквивалентны π^0 -мезону от реакции $\pi^- + p \rightarrow \pi^0 + n$, вылетающему под углом $153 \pm 2^\circ$.

Относительно большие ошибки в величине полной энергии и суммарного импульса четырех электронов позволяют лишь грубо оценить массу π^0 -мезона. Однако, принимая во внимание некоторые кинематические соотношения, связывающие массу π^0 -мезона с измеренными величинами импульсов и углов, можно уточнить значение массы π^0 -мезона, которая при этом оказывается равной 141 ± 8 Мэв. Эта величина в пределах ошибок измерений согласуется с общепринятым в настоящее время значением массы 135 Мэв.

В таблице 111 приведены углы между частицами и плоскостями пар, рассчитанные в лабораторной системе и системе покоя π^0 -мезона, а также импульсы электронов в системе покоя π^0 -мезона. Для вычисления этих величин были приняты такие пределы изменений импульсов частиц внутри экспериментальных ошибок, указанных в таблице 1, которые кинематически соответствуют массе π^0 -мезона 135 Мэв.

Таблица 111

№ № трека	Частица	Лабораторная система		Система покоя π^0 -мезона		
		Угол между частицами	Угол между плоскостями	Импульс /Мэв/с/	Угол между част.	Угол между плоск.
2	e^-	$\theta_{23}^{\wedge} = 6,5^{\circ} \pm 1^{\circ}$	$\psi^{\wedge} = 75^{\circ} \pm 10^{\circ}$	56,1	$\theta_{25} = 7^{\circ} \pm 2^{\circ}$	$\psi < 37^{\circ}$
3	e^+			11,9		
4	e^-	$\theta_{45}^{\wedge} = 6,5^{\circ} \pm 1,5^{\circ}$		9,0	$\theta_{45} = 12^{\circ} \pm 4^{\circ}$	
5	e^+			58,7		

В системе покоя π^0 -мезона частицы распада образуют две электронно-позитронные пары с малыми углами между электроном и позитроном /таблица 111/ и с равными и противоположно направленными импульсами, причем баланс суммы проекций импульсов на координатные оси выполняется с высокой степенью точности. /В принципе, можно рассматривать анализируемый случай, как распад π^0 -мезона на две электронно-позитронные пары с углами разлета, близкими к 180° , однако согласно /1/ появление двух таких широкоугольных пар в результате внутренней конверсии примерно в 400 раз менее вероятно, чем пар с углами 10° /.

Ввиду того, что углы разлета θ между частицами пар сравнительно малы, угол между плоскостями пар может быть определен только с большой погрешностью. Вычисления показывают, что в системе покоя π^0 -мезона величина его не превышает 37° , хотя для псевдоскалярного мезона более вероятными являются углы, близкие к 90° .

Возможные примеры другой интерпретации

Рассмотрим несколько других возможных объяснений наблюдаемого случая.

а/ Пусть π^0 -мезон, образовавшийся в результате перезарядки, распадается по обычной схеме /1/ на два γ -кванта, которые затем конвертируют в электронно-позитронные пары на таком близком расстоянии от точки распада π^0 -мезона, что это расстояние не может быть разрешено на фотографии. Вероятность того, что оба γ -кванта от распада π^0 -мезона конвертируют в водороде камеры на расстоянии не больше 1 мм /ширина трека $\sim 0,5$ мм/ составляет $2,2 \cdot 10^{-12}$. Так как на всех просмотренных пленках было зарегистрировано около 1400 случаев упругого π -p-рассеяния, а отношение сечений зарядово-обменного и упругого π -p-рассеяния для этих энергий рав-

но $1,8^{/6/}$, то полное число Π^0 -мезонов, распавшихся в камере, равно 2500. Таким образом, вероятность наблюдения в нашем эксперименте конверсии обоих γ -квантов на расстоянии < 1 мм равна $5,5 \cdot 10^{-9}$.

б/ Если Π^0 -мезон распадается по схеме /2/ и затем γ -квант конвертирует на расстоянии < 1 мм от точки распада Π^0 -мезона, то вероятность наблюдения такого случая в нашем эксперименте составляет $4,7 \cdot 10^{-5}$.

в/ Кинетическая энергия Π^- -мезона 166 ± 14 Мэв несколько превышает порог реакции $\bar{K}^- + p \rightarrow \bar{K}^0 + \bar{K}^0 + n$, который равен 160 Мэв. Поэтому при распаде обоих Π^0 -мезонов, образовавшихся в этой реакции, по схеме /2/, мы можем наблюдать случай, аналогичный рассматриваемому. По грубой оценке, в которой было использовано сечение указанной выше реакции $7 \cdot 10^{-30}$ см², рассчитанное для энергии Π^- -мезона 260 Мэв^{/8/}, вероятность наблюдения такого случая много меньше $9 \cdot 10^{-5}$. Против такой интерпретации говорит и чрезвычайно хорошее согласие кинематики наблюдаемого случая с кинематикой распада /3/.

г/ Согласно оценкам^{/2/} только один Π^0 -мезон из 29000 распадается по схеме /3/. Следовательно, вероятность наблюдения такого распада среди полученного нами опытного материала составляет около 0,09. Сопоставление этой величины с оценками а/, б/, в/, а также хорошее согласие с кинематикой не составляют сомнения в достоверности наблюдения распада $\Pi^0 \rightarrow e^- + e^+ + e^- + e^+$.

Заключение

Как отмечалось выше, при распаде Π^0 -мезона на две электронно-позитронные пары между плоскостями пар существует определенная угловая корреляция, изучение которой позволяет непосредственно установить спин и четность Π^0 -мезона. Корреляционная функция имеет вид

$$w(\psi) \sim 1 + \lambda \cos 2\psi,$$

где ψ - угол между плоскостями пар. Кролл и Вада^{/2/} нашли, что для спина Π^0 -мезона коэффициент корреляции λ равен $\pm 0,19$, причем знак плюс относится к четному Π^0 -мезону, знак минус к нечетному. Корреляция здесь значительно более сильная, чем корреляция между плоскостями пар, образованных γ -квантами от распада $\Pi^0 \rightarrow 2\gamma$ ^{/9,10/}. В работе Джозефа^{/3/х/} анализировалась угловая корреляция

х/ Мы признательны доктору Д.В.Джозефу за его работу, присланную нам до ее опубликования.

для спина и четности Π° -мезона 2^{+} , и показано, что в этом случае $|\lambda| < 0,19$.

Таким образом, даже в наиболее благоприятном случае $|\lambda|=0,19$. необходимо наблюдать довольно большое число распадов по схеме /3/ /порядка нескольких сотен/ для того, чтобы непосредственно на основании опытных данных можно было сделать какие-либо определенные заключения о спине и четности Π° -мезона. Хотя подобный эксперимент и является чрезвычайно трудоемким, однако повышение эффективности регистрации таких распадов путем наблюдения остановок медленных Π° -мезонов в жидководородной пузырьковой камере делает его реально осуществимым.

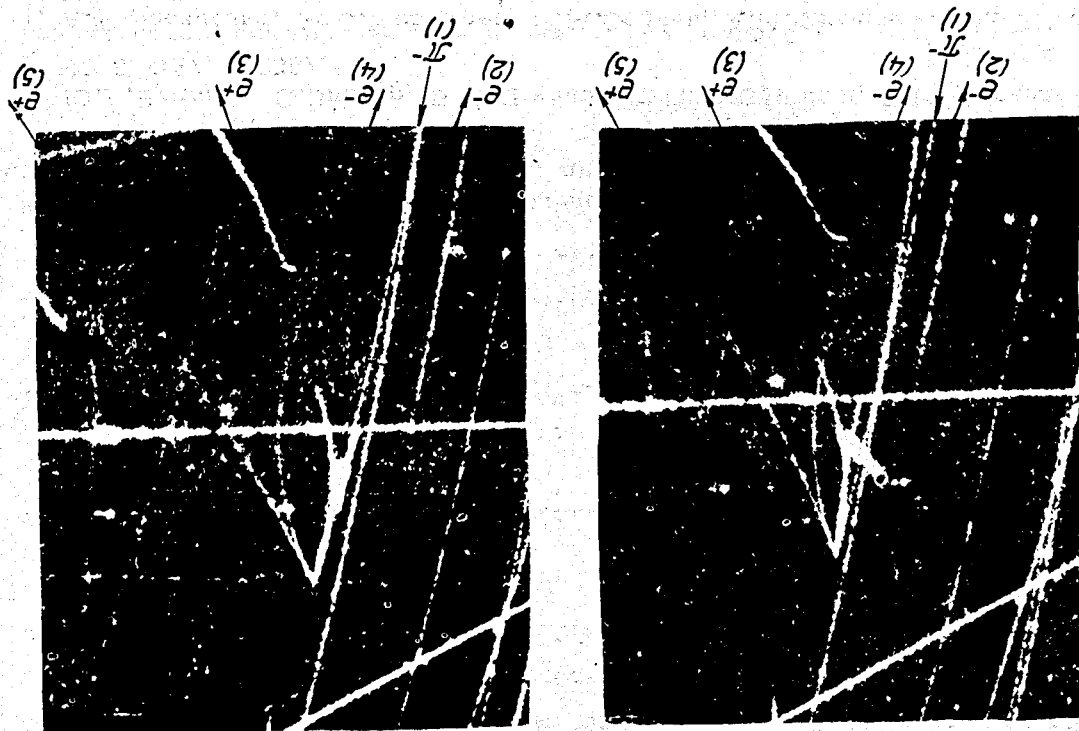
В заключение авторы выражают благодарность Д.В.Ширкову за обсуждение ряда вопросов, связанных с настоящей работой, а также Л.И.Краснослободцевой, Т.С.Сажневой и Ю.Л.Сайкиной за просмотр пленки.

Л и т е р а т у р а

1. R.H.Dalitz, Proc.Phys.Soc., A, 64, 667(1951)
2. N.M.Kroll, W.Wada, Phys.Rev. 98, 1355(1955)
3. D.W.Joseph, препринт, 1958.
4. A.L.Hodson, J.Ballam, W.H.Arnold, D.R.Harris, R.R.Rau, G.T.Reynolds, S.B.Treiman, Phys.Rev. 96, 1089(1954)
5. Ю.А.Будагов, С.Виктор, В.П.Джелепов, П.Ф.Ермолов, В.И.Москалев. Материалы совещания по камерам Вильсона, диффузионным и пузырьковым камерам, ОИЯИ, Дубна, 1958 г.
6. Ю.А.Будагов, С.Виктор, В.П.Джелепов, П.Ф.Ермолов, В.И.Москалев, ЖЭТФ, 35, № 6 /12/, /1958/.
7. А.Т.Василенко, М.С.Козодаев, Р.М.Суляев, А.И.Филиппов, Ю.А.Шербаков, ПТЭ, № 6 /1957/.
8. J.Franclin, Phys.Rev. 105, 1101(1957)
9. C.N.Yang, Phys.Rev. 77, 722(1950)
10. E.Karlson, Arkiv för Fysik, 13, 1(1958)

Работа поступила в издательский отдел 20.XI.58 года.

Рис. 1. Стереодиаграмма сличная зарядово-обменного рассеяния $f_1 + p \rightarrow f_1 + n$ с последующим распадом $f_1 \rightarrow e^+ + e^- + e^+ + e^-$ полученная с помощью волоконной диффузионной камеры.



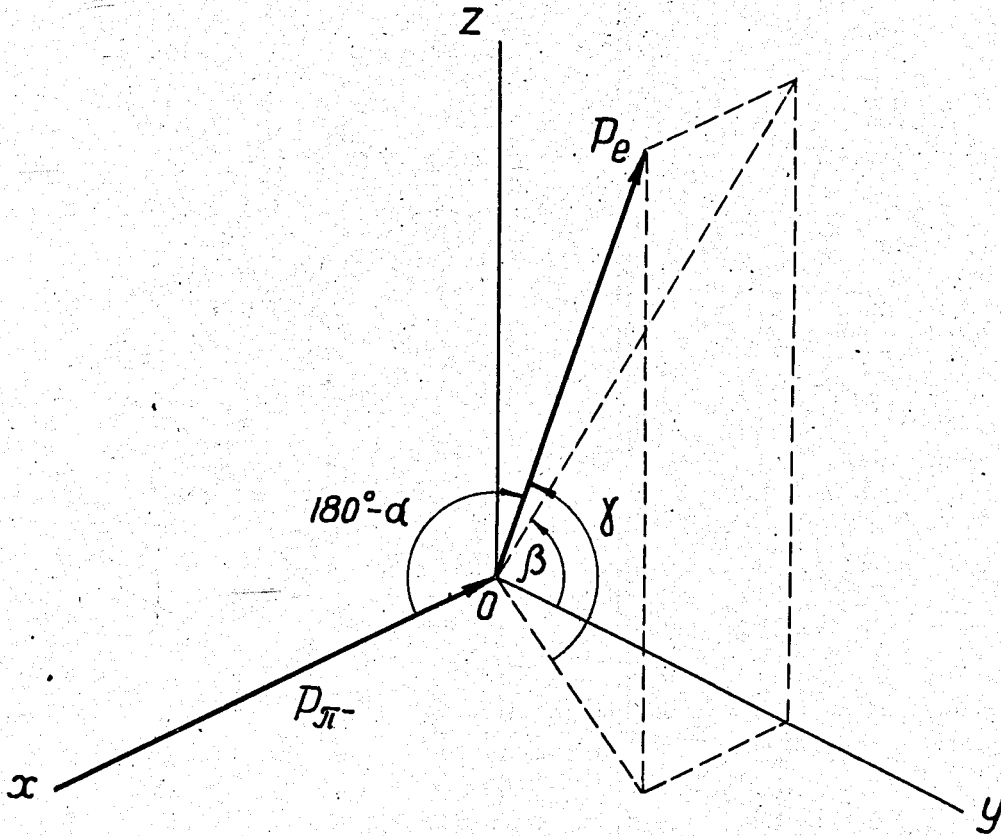


Рис. 2. Углы α , β и γ для одной частицы распада.