

СЗ46.6е

С/III-42

Т-529

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P1 - 6170

733/2-72



6170

К.Д.Толстов

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

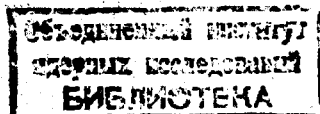
О ПОИСКЕ НОВЫХ КОРОТКОЖИВУЩИХ ЧАСТИЦ
И ОБНАРУЖЕНИИ ОДНОЙ С $\tau \sim 10^{-14}$ сек

1971

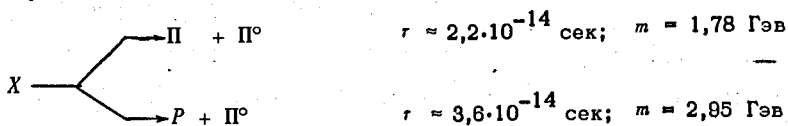
P1 - 6170

К.Д.Толстов

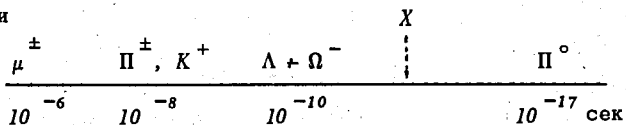
О ПОИСКЕ НОВЫХ КОРОТКОЖИВУЩИХ ЧАСТИЦ
И ОБНАРУЖЕНИИ ОДНОЙ С $\tau \sim 10^{-14}$ сек



Как известно, с помощью ядерных фотоэмульсий был открыт ряд частиц: π^\pm , K^\pm , Σ^\pm , Λ . Недавно в работе/1/ сообщены факты, указывающие на обнаружение (также с помощью фотоэмульсий) новой заряженной частицы, характеристики которой и схемы распада предполагаются следующими



Проиллюстрируем расположение известных частиц на шкале времени жизни



За исключением π^0 -мезона все эти частицы были открыты с помощью трековых приборов, а π^0 открыт с помощью электроники, так как теоретически был предсказан его распад на 2 γ -кванта.

Нередки высказывания, что в интервале времени жизни $10^{-10} + 10^{-17}$ сек частиц, возможно, и нет, однако, такой вывод не обоснован, т.к. не зная распадных свойств частиц, очень трудно обнаружить их методами электроники, а короткий пробег, измеряемый микронами, исключает возможность детектирования существующими трековыми приборами. Исключение составляют фотоэмульсии. В последних, практически, еще не было целенаправленных

поисков короткоживущих частиц и обнаружение /1/ новой частицы должно изменить это положение. В нашей работе /2/ обосновывалась перспективность фотоэмульсионного метода для поисковых работ и исследования генерации частиц с временем жизни 10^{-12} , 10^{-16} сек. Была сделана оценка вероятности детектирования короткоживущих частиц в зависимости от сечения генерации и времени жизни, согласно которой при $\tau \approx 10^{12}$ сек и $\sigma \approx 10^{-30}$ см² одно событие следует ожидать на $\approx 10^5$ звезд.

В настоящем сообщении излагаются более детальные расчёты, показывающие перспективность поиска и исследования генерации частиц X со свойствами в соответствии с работой /1/, причём предполагаемая масса X - частицы ≈ 2 Гэв вполне допускает их генерацию в области ускорительных энергий, т.к. свободная энергия в с.и.м. для pp столкновений при 70 Гэв равна 9,5 Гэв.

Основываясь на данных работы /1/, проведем оценку эффективности поиска частиц X при облучении фотоэмульсий на Серпуховском ускорителе, в случае, когда при ее распаде Π^0 непосредственно конвертирует в пару Далица - e^+ , e^- . Расчёт произведем, например, для случая, когда частица генерируется с энергией 10 Гэв и распадается на Π^+ и Π^0 .

Средний пробег частицы X до распада с учётом релятивистского увеличения τ равен:

$$\langle l \rangle = 3 \cdot 10^{14} \text{ мк/сек} \cdot 2,2 \cdot 10^{-14} \text{ сек} \frac{10}{1,78} \approx 37 \text{ мк}.$$

(В последующих расчётах примем, что $\langle l \rangle = 40$ мк).

Будем считать, что распад X происходит в направлении, перпендикулярном вектору скорости X - частицы, а массы Π^+ и Π^0 примем равными, тогда в лабораторной системе их энергии будут одинаковыми.

≈ 5 Гэв. Импульсы π - мезонов в системе покоя X равны:

$$P^* = \left[\left(\frac{m}{2} \right)^2 - m_{\pi}^2 \right]^{1/2} \approx 0,9 \text{ Гэв/с},$$

а углы вылета в лабораторной системе с направлением движения X составляют:

$$\psi_{\pi} = \arcsin \left(\frac{0,9 \text{ ГэВ/с}}{5 \text{ ГэВ/с}} \right) = 10^{\circ} 20'.$$

Если при распаде Π^0 на e^+ , e^- , γ электрон и позитрон вылетают перпендикулярно к направлению движения Π^0 и уносят всю энергию, то в лабораторной системе их энергии одинаковы и равны $E_e \approx 2,5$ ГэВ, а углы вылета в л.с. по отношению к направлению движения Π^0 в приближениях:

$P_e \approx E_e$, $P_{\perp} \approx \frac{m_{\pi}}{2}$ находятся из условия: $E_e \cdot \sin \psi = \frac{m_{\pi}}{2}$. В соответствии с этим получим, что угол разлета пары e^+ , e^- в л.с.

$$2\psi \approx 3^{\circ} 10'.$$

Таким образом, распад X -частицы в этом случае будет выглядеть как 3-лучевая звезда с узким углом разлета двух частиц, биссектриса которого составляет с направлением полета X угол, близкий к углу излома первичного трека X -частицы.

Оценим вероятность фоновых событий, которые могут имитировать распады X -частиц с ожидаемыми признаками. Фоновые события в основном могут быть обусловлены следующими тремя процессами: 1) образование 3-лучевой звезды из релятивистских частиц при взаимодействии с ядрами фотоэмульсии одной из быстрых частиц, вылетающей из первичной звезды; 2) распад K^{\pm} -мезонов на $\Pi^{\pm} + \Pi^0$; 3) образование e^+ , e^- -пары электроном или позитроном (так называемый процесс "fridents"), вылетающими из первичной звезды за счёт распада Π^0 на пару Далица.

Для оценки фона в первом случае, который мы обозначим F_1 , в неупругих столкновениях Π^- -мезонов с $E = 60$ ГэВ и протонов с $E = 70$ ГэВ, на основе работ^{/3-5/} можно считать, что среднее число релятивистских частиц в звездах, образованных на ядрах фотоэмульсии: $\langle n \rangle = 9$. Следовательно, суммарная потенциальная длина для их взаимодействия с ядрами L , если мы ограничиваемся наблюдениями на расстоянии $\langle l \rangle$, будет равна: $L = 9 \langle l \rangle = 360$ мк. Вероятность неупругого взаимодействия этих частиц с ядрами фотоэмульсии $\omega_1 = L / \langle \lambda \rangle$, где $\langle \lambda \rangle$ - средний пробег взаимодействия с ядрами фотоэмульсии для Π^- -мезонов в диапазоне энергии 5-60 ГэВ. Можно приближенно считать постоянным $\langle \lambda \rangle = 42$ см и, следовательно, $\omega_1 = 8,5 \cdot 10^{-4}$. Далее, вероятность ω_2 , что звезда

будет иметь нечётное число только релятивистских частиц (столкновение с квазисвободным нейтроном) по данным многих работ: $\omega_2 \approx 0,1$.

Вероятность ω_3 того, что в этих звездах число лучей равно трем, зависит от энергетического спектра частиц, генерированных в первичных звездах. Если усреднить спектр, принимая для средней энергии Π -мезонов величину ≈ 7 Гэв, то по данным^{/6,7/} $\omega_3 = 0,6$.

В соответствии с этим получим:

$$\mathcal{F}_1 = \omega_1 \cdot \omega_2 \cdot \omega_3 \approx 4 \cdot 10^{-5}$$

Легко показать, что фон \mathcal{F}'_1 в случае образования звезды с одной заряженной частицей и парой e^+ , e^- от распада π^0 — много меньше чем \mathcal{F}_1 . Действительно, в этом случае вместо ω_3 мы имеем по данным^{/6,7/} $\omega'_3 \approx 0,25$ и дополнительно нужно ввести $\omega \approx 1/85$.

Следовательно, $\mathcal{F}'_1 = \omega_1 \cdot \omega_2 \cdot \omega'_3 \cdot \omega_4 \approx 2,5 \cdot 10^{-7}$. Оценим фон \mathcal{F}_2 во втором случае: распад $K^\pm \rightarrow \Pi^\pm + \Pi^0$. Сечение генерации странных частиц в ΠR столкновениях при 25 Гэв/с по данным^{/8/} составляет ≈ 4 мб, т.е. $\approx 0,2$ неупругого сечения, а рост сечения замедляется. Далее приблизительно в половине событий происходит генерация заряженных K -мезонов. Если принять, что к 70 Гэв сечение K -мезонов составляет $\approx 0,3$ неупругого сечения, и в половине случаев происходит генерация заряженных K -мезонов, то эффективная вероятность их генерации $\omega_1 \approx 0,15$.

Вероятность распада K^\pm на $\Pi^\pm + \Pi^0$ $\omega_2 \approx 0,25$. На длине $\langle l \rangle$ вероятность распада K^\pm -мезона даже с невысокой энергией, т.е. без учёта релятивистского увеличения времени жизни, составит:

$$\omega_3 \approx \frac{40 \text{ мк}}{3 \cdot 10^{-14} \text{ мк/сек} \cdot 1,2 \cdot 10^{-8} \text{ сек}} \approx 1,1 \cdot 10^{-5}$$

Вероятность распада Π^0 на $e^+ + e^- + \gamma$ $\omega_4 = 1/85$. Следовательно: $\mathcal{F}_2 = \omega_1 \cdot \omega_2 \cdot \omega_3 \cdot \omega_4 \approx 5 \cdot 10^{-9}$. В третьем случае фон \mathcal{F}_3 оценим в следующих предположениях. Среднее число Π^0 -мезонов, генерируемых в первичных звездах, составляет половину числа заряженных и, если $\langle n_p \rangle = 9$, как ранее принято, то $\langle n_{\Pi^0} \rangle = 4,5$. Следовательно, средняя вероятность вылета из первичной звезды электрона или позитрона за счёт распада на пару Далица будет равна:

$$\omega_1 = 4,5 \cdot 2 \cdot \frac{1}{85} 0,11.$$

Вероятность ω_2 образования "тройки", т.е. генерации электроном пары $e^+ + e^-$ на пути $\langle l \rangle$ в фотоэмульсии, можно оценить по данным^{/9/}. Согласно последним, средняя расчётная длина для "тройки" в фотоэмульсии составляет при энергии 1 Гэв ≈ 90 см, при 10 Гэв ≈ 50 см, а по данным^{/10/} наблюдается согласие расчётных и опытных данных при генерации "троек" в пропане, поэтому можно принять, что

$$\omega_2 \approx \frac{40 \text{ мк}}{\frac{1}{2} (90 + 50) \text{ см}} = 6 \cdot 10^{-5}.$$

$$\text{Следовательно, } \mathcal{F}_3 = \omega_1 \cdot \omega_2 = 7 \cdot 10^{-6}.$$

Кроме этого "тройки" могут быть быстро отделены от ожидаемых распадов X -частиц, так как они характеризуются очень узким угловым распределением. Действительно, по данным^{/11/}, если электрон имеет энергию 1 Гэв, то угол разлета θ образуемой им пары: $\theta \approx 7'$, а при энергии электрона 10 Гэв, $\theta \approx 1'$.

Оценим ожидаемую частоту детектирования новых частиц с предполагаемыми свойствами в зависимости от величин сечений генерации. Попытаемся получить заключение о порядке величины для сечения генерации X -частиц по данным работы^{/1/}. Как указано в этой работе, взаимодействие вызывалось первичной частицей с энергией больше 10^{12} эв.

По данным^{/12/} поток частиц с энергией, равной или выше этого значения, на границе атмосферы составляет $3,5 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1} \text{ стер}^{-1}$.

Эмульсионные стопки в опытах^{/1/} имели размер $20 \times 25 \text{ см}^2$ и облучались ≈ 500 часов на высоте, соответствующей остаточной толщине атмосферы 260 г / см^2 . В соответствии с этим, если даже пренебречь ослаблением потока быстрых частиц (вследствие малого коэффициента неупругости сохранится значительная доля первичной энергии у большей доли частиц), то суммарный поток с энергией $\geq 10^{12} \text{ эв}$ на стопке составлял $\approx 10^5$. В опытах использовались эмульсии толщиной 50 мв, нанесенные с двух сторон на 49 пленок.

В соответствии с этим, и принимая, что средний пробег неупругого взаимодействия в эмульсии такой же как и при 10-70 Гэв, т.е. ≈ 37 см, получим для общего числа взаимодействий в эмульсии величину $1,3 \cdot 10^3$.

Следовательно, если бы были проанализированы все события взаимодействия частиц с энергией $\geq 10^{12}$ эв и найдено одно, которое содержит частицу X , то сечение ее генерации будет $\approx 10^3$ раз меньше сечения генерации Π -мезонов (конечно, эти рассуждения для 1-го случая условны). Однако анализу, приведенному в^{1/}, могла быть подвергнута только небольшая часть событий, т.к. и в свинцовых прокладках и пленках, на которые наносилась эмульсия, генерировалось приблизительно в восемь раз больше звезд и, следовательно, общее их число составляло $\approx 10^4$. Из этого скорее следует, что сечение генерации X -частиц не уменьшается в 10^3 раз по сравнению с сечением генерации Π -мезонов. Если считать это уменьшение равным 300 (т.е. сечение генерации частиц в области энергий ≈ 70 Гэв составляет 10^{-28} см²), то появление частицы X следует ожидать на ≈ 330 звезд.

Следовательно, с учётом доли распадов Π^0 на пару $e^+ + e^-$ одно событие можно ожидать на $\approx 2,6 \cdot 10^4$ звезд, то есть вероятность детектирования X -частицы составит: $W \approx 4 \cdot 10^{-5}$. Сравнивая эту величину с вычисленными ранее вероятностями фоновых событий $\mathcal{F}_1 \approx 4 \cdot 10^{-5}$; $\mathcal{F}_2 \approx 5 \cdot 10^{-9}$; $\mathcal{F}_3 \approx 7 \cdot 10^{-6}$, следует заключить, что величинами \mathcal{F}_2 и \mathcal{F}_3 можно пренебречь и главным является фон \mathcal{F}_1 . Однако его величина не является столь большой, чтобы существенно помешать поиску X -частиц, отделение которых от фона может быть надежно произведено по кинематическим характеристикам двухчастичного распада X -частицы. Так, например, в случае распада X -частицы должна соблюдаться компланарность первичного ее следа, следа Π^\pm (или протона) и результирующего вектора импульса пары e^+, e^- . Поэтому поиск распада на пару Далица, несмотря на малую вероятность, имеет преимущество в смысле наглядности события и отделения его от фона. В работе^{13/} были проведены успешные опыты в фотоэмульсиях, облученных Π -мезонами 60 Гэв, по сопоставлению e^+, e^- пар от конверсии γ -квантов с родительской звездой, поэтому можно ожидать, что возможен поиск распадов X частиц, аналогичный осуществленному в^{1/}, т.е. без образования пары Далица.

Обсудим, наконец, возможность поиска нейтральных X^0 -частиц с распадом $X^0 \rightarrow \Pi^+ + \Pi^-$. Преимуществом в поисках этого распада, по сравнению с ранее рассмотренным, является то, что отсутствует коэффициент $1/85$, как в случае распада на пару Далица, следовательно, величина $W \approx 3 \cdot 10^{-3}$.

Фоновыми событиями в случае распада X^0 частицы на $\Pi^+ + \Pi^-$ (или барион $+ \Pi^\pm$ -мезон) будут распады K^0 -мезонов и λ . Оценим уровень этого фона.

Вероятности рождения K^0 или Λ в первичных звездах можно принять равными ранее вычисленной вероятности ω_1 при определении \mathcal{F}_2 , $\omega_1 \approx 0,2$.

Вероятность распада K_1^0 на $\Pi^+ + \Pi^-$; $\omega_2 \approx 0,68$. Время жизни K_1^0 - $\tau = 0,88 \cdot 10^{-10}$ сек, следовательно, вероятность распада без учёта релятивистского увеличения τ на пути $\langle l \rangle$ будет равна:

$$\omega_3 = 40 \text{ мк} / 3 \cdot 10^{14} \text{ мк/сек} \cdot 0,88 \cdot 10^{-10} \text{ сек} \approx 1,5 \cdot 10^{-3}$$

В соответствии с этим фон \mathcal{F}_{K^0} равен:

$$\mathcal{F}_{K^0} = \omega_1 \cdot \omega_2 \cdot \omega_3 = 2 \cdot 10^{-4}$$

Для распадов λ на протон и Π^- будем иметь $\omega_2 = 0,66$ и $\omega_3 = 5 \cdot 10^{-4}$. Следовательно, $\mathcal{F}_\lambda = 7 \cdot 10^{-5}$. Таким образом, вероятности фоновых событий меньше, чем $W \approx 3 \cdot 10^{-3}$. Угловые характеристики распадов K_1^0 и λ в зависимости от их энергии и направления вылета вторичных частиц в собственной системе, очевидно, могут и совпадать с распадом X^0 , однако, после измерения кинематических характеристик распады K_1^0 и λ могут быть надежно отделены от распадов X^0 .

Помимо рассмотренных примеров поиска распадов X^0 -частиц изложенная процедура этих поисков, очевидно, рациональна для обнаружения и других возможно существующих короткоживущих частиц. В этих поисках наблюдатель вначале должен найти звезды, вызванные взаимодействием первичных быстрых частиц, затем для обнаружения событий производить поиск среди конуса вторичных релятивистских частиц на расстоянии ≈ 100 мк от звезды, т.е. когда весь этот конус находится еще в поле зрения.

В заключение приведем таблицы, в которых рассмотрены другие примеры распадов $X \rightarrow \Pi^{\pm} + \Pi^{\circ}$ и $X \rightarrow P + \Pi^{\circ}$.

Литература

1. K.Niu, E.Mikumo. 12th International Conf. on Cosmic Rays, vol. 7, Hobart 1971.
2. К.Д. Толстов. Препринт ОИЯИ, 3501, стр. 32 (1967).
3. З.В. Анзон и др. Препринт ОИЯИ, P1-5072, Дубна, 1970.
4. M.G.Antonova et al. The Amsterdam Conf. on Elem. Particles (1971) (to be published Phys. Letters).
5. З.В. Анзон, Ж.С. Такибаев, И.Я. Часников. Письма ЖЭТФ, 14, 405 (1970).
6. В.А. Беляков и др. ЖЭТФ, 39, 937 (1960).
7. C.Grote et al. Nuovo Cim., 34, 676 (1962).
8. J.Elbert et al. Nucl. Phys., B17, 445 (1970).
9. J.E.Nauble, P.S. Freier. Phys. Rev., 104, 804 (1956).
10. В.Г. Гришин и др. Ядерная физика, 9, 580 (1969).
11. M.Koshiba, M.F.Karlon. Phys.Rev., 100, 327 (1955).
12. Физика космических лучей под редакцией И. Вильсона, стр. 336, М., (1960).
13. G.I.Orlova, M.I. Tretyakova. 12th International Conf. on Cosmic Rays, vol. 6, Hobart 1971.

Рукопись поступила в издательский отдел
15 декабря 1971 года.

ТАБЛИЦА I

Распад $\chi \rightarrow \pi^{\pm} + \pi^{\circ} \rightarrow \pi^{\pm} + e^{+} + e^{-} + \gamma$

Энергия χ частицы в лабораторной системе	Угол вылета π° мезона в системе χ -частицы		Угол вылета π^{\pm} -мезона в лабораторной системе		Импульс π° в лабораторной системе Гэв/с	Угол разлета e^{+}, e^{-} пары в лабораторной системе в зависимости от распада в системе Π°			
	0	45	0	14		Перпендикулярно к движению Π°		Под углами 45° и 135° к движению Π°	
Полная 10 Гэв	0		0		9,97	1 ⁰	34	2 ⁰	17
	45		10	14	8,5	1 ⁰	48	2	41
	90		10	20	5	3	10	3	57
	135		23	30	1,5	10	30	14	30
Кинетическая I Гэв	0		0		2,4	6	40	9	17
	45		10	10	2,15	7	20	9	40
	90		36	30	1,38	11	30	16	10
	135		81	50	0,63	24	40	33	37

ТАБЛИЦА 2

Распад $\chi \rightarrow \rho + \pi^{\circ} \rightarrow \rho + e^{+} + e^{-} + \gamma$

Энергия χ в лаб.сис-теме	Угол вылета в системе χ -частицы		Угол вылета в лабораторной системе		Импульс в лабораторной системе Гэв/с		Угол разлета e^{+}, e^{-} пары в лабораторной системе в зависимости от распада в системе Π°			
	P	Π°	P	Π°	P	Π°	Перпендикулярно к движению Π°		Под углами 45° и 135° к движению Π°	
10 Гэв	180	0	0	0	0,76	8,8	1 ⁰	52	2 ⁰	37
	135	45	24	25	2,27	7,5	2	6	3	5
	90	90	14	10	5,41	4,47	3	30	4	48
	45	135	6	20	8,49	1,44	11		14	41