

ОБРАЗОВАНИЕ НЕЙТРАЛЬНЫХ СТРАННЫХ ЧАСТИЦ В $\bar{p}^4\text{He}$ -АННИГИЛЯЦИИ ПРИ 600 МэВ/с

Ю.А.Батусов, С.А.Бунятов, Д.Б.Понтекорво,
А.М.Рождественский, М.Г.Сапожников, В.И.Третьяк,
И.В.Фаломкин

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Ф.Балестра, С.Боссоласко, М.П.Бусса, Л.Буссо,
А.Грассо, Д.Панциери, Г.Пираджино, Ф.Тоселло,
Л.Ферреро, Е.Фиорамонти

Институт общей физики им.А.Авогадро,
Туринский университет, секция ИНФН в Турине, Италия

Р.Барбиери, Д.Бендишоли, А.Зенони, А.Ротонди,
П.Сальвини

Факультет ядерной физики и теории, Университет Павии,
секция ИНФН в Павии, Италия

К.Гуаральдо, А.Маджиора

Национальная лаборатория ИНФН во Фраскати, Италия

Э.Лоди-Риццини

Факультет промышленной автоматики, Университет Брешии,
секция ИНФН в Павии, Италия

К.Миклебост, Й.М.Олсен, А.Хаатуфт, А.Халштейнслид
Физический факультет, Университет Бергена, Норвегия

Ф.О.Брейвик, С.О.Соренсен, Т.Якобсен

Физический факультет, Университет Осло, Норвегия

Измерены сечения образования Λ -гиперонов и K_S^0 -мезонов
при аннигиляции антипротонов в ^4He при 600 МэВ/с:

$$\sigma(\Lambda) = (4,25 \pm 0,64) \text{ мб} \quad \sigma(K) = (4,51 \pm 0,60) \text{ мб}.$$

Было найдено, что отношение выходов Λ/K_S^0 составляет

$$R = \sigma(\Lambda) / \sigma(K) = 0,94 \pm 0,19.$$

Спектры быстрот и импульсов частиц удовлетворительно объясняются в предположении образования Λ во вторичных взаимодействиях K -мезонов (образовавшихся в $\bar{p}N$ -аннигиляции) внутри ядра.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Production of Neutral Strange Particles in $\bar{p}^4\text{He}$ Annihilation at 600 MeV/c

Yu.A. Batusov et al.

Cross sections of Λ -hyperons and K_S^0 -mesons production in antiproton annihilation in ^4He at 600 MeV/c have been measured:

$$\sigma(\Lambda) = (4.25 \pm 0.64) \text{ mb} \quad \text{and} \quad \sigma(K) = (4.51 \pm 0.60) \text{ mb}.$$

The Λ/K_S^0 yield ratio was found to be:

$$R = \sigma(\Lambda) / \sigma(K) = 0.94 \pm 0.19.$$

Rapidity and momentum spectra of particles are satisfactorily explained by the hypothesis about Λ production in secondary interactions of K -mesons (which appeared in $\bar{p}N$ -annihilation) inside the nucleus.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

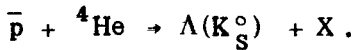
1. Введение

Недавние эксперименты^{/1-3/} по изучению образования странных частиц в аннигиляции антипротонов на ядрах привели к неожиданным, на первый взгляд, результатам. Так, в работе^{/1/}, где измерялось сечение образования Λ , $\bar{\Lambda}$ и K_S^0 -мезонов при аннигиляции антипротонов в тантале при 4 ГэВ/с, был обнаружен аномально высокий выход Λ -гиперонов, в два раза превышающий выход K_S^0 -мезонов. В то же время известно, что при аннигиляции антипротонов в водороде или на легком ядре — дейтерии^{/2/}, сечение рождения K_S^0 -мезонов в пять раз превосходит сечение образования Λ . Еще более удивительные результаты получены в эксперименте PS-179^{/3/}, где исследовалось рождение нейтральных странных частиц в аннигиляции антипротонов в неоне при 600 МэВ/с. При этой энергии невозможно образование Λ на одном нуклоне, поскольку порог реакции $\bar{p}p \rightarrow \Lambda\bar{\Lambda}$ составляет $p_0 = 1435$ МэВ/с (ассоциативное рождение Λ с K -мезонами типа $\bar{p}N \rightarrow \Lambda K$ также запрещено вследствие закона сохранения барионного числа). Тем не менее оказалось, что и в этом случае отношение R сечений рождения Λ и K_S^0 есть $R = 2,3 \pm 0,7$.

В настоящей работе мы продолжили изучение образования нейтральных странных частиц в аннигиляции антипротонов с другой мишенью — ядром ^4He при 600 МэВ/с. Оказалось, что и в этом случае Λ -частицы образуются с заметной вероятностью: $R = 0,94 \pm 0,19$. Наблюдаемые характеристики Λ и K_S^0 хорошо согласуются с расчетами, выполненными в предположении образования Λ в процессах перерассеяния \bar{K} -мезонов, образовавшихся в $\bar{p}N$ -аннигиляции.

2. Процедура обработки событий

В работе исследуется образование нейтральных странных частиц в реакции аннигиляции медленных антипротонов с ядрами гелия:



Данные получены при облучении стримерной камеры ^{4/} пучком антипротонов с импульсом 607,7 МэВ/с на ускорителе LEAR в CERN. Антипротонный пучок LEAR характеризуется высоким разрешением по величине импульса $\Delta p/p \approx 10^{-3}$ и полным отсутствием примесей пионов и каонов. Диаметр пучка составляет примерно 1 см. Система триггера обеспечивала фотографирование рабочего объема камеры (90x70x18 см³) только в случае взаимодействия антипротона. Самошунтирующаяся стримерная камера в магнитном поле (0,8 Тл) была заполнена газом гелия (при атмосферном давлении). Малая толщина мишени (15 мг/см²) позволяет регистрировать низкоэнергетичные (например, протоны с энергией до 200 кэВ) частицы с короткими пробегами. Методика проведения обработки полученного материала подробно рассматривается в работе ^{5/}.

С целью поиска кандидатов на распад нейтральной странной частицы — вилок было просмотрено примерно 10^5 фотографий, из которых 40000 снимков — дважды для определения эффективности просмотра. Всего было зарегистрировано 139 вилок, связанных с вершиной $\bar{p}^4\text{He}$ -взаимодействия. Найденные события измерялись на полуавтоматах ПУОС и обрабатывались программой геометрической реконструкции и кинематического анализа HYDRA. После отбора событий, удовлетворяющих кинематике распада K_S^0 или Λ , осталось 113 V^0 -частиц (62 K_S^0 51 Λ), которые образовались в 108 взаимодействиях (в 5 случаях были зарегистрированы пары $K_S^0\bar{K}_S^0$ и ΛK_S^0). Сравнительно небольшие импульсы частиц (до 1 ГэВ/с) позволяли проводить идентификацию заряженных частиц по ионизации, что облегчало разделение Λ и K_S^0 в тех случаях, когда кинематический анализ давал неоднозначные результаты. Средние значения эффективных масс V^0 -частиц

$$M_\Lambda = (1120 \pm 7) \text{ МэВ}/c^2 \quad \text{и} \quad M_K = (489 \pm 15) \text{ МэВ}/c^2$$

хорошо согласуются с табличными.

Для дальнейшего анализа был проведен отбор событий, удовлетворяющих следующим критериям:

1) вершина взаимодействия антипротона должна располагаться не менее чем в 15 см от передней и задней (вдоль пучка) границ камеры;

2) вершина распада V° должна лежать в пределах эффективного объема — не менее 15 см от границ камеры вдоль оси пучка, не менее 10 см от боковых стенок камеры и не менее 4 см от верхнего и нижнего стекол камеры;

3) вершина распада V° должна отстоять от точки аннигиляции не менее чем на 1 см.

Первые два критерия обеспечивают хорошие условия для регистрации вершин и измерения треков на длине, достаточной для определения импульсов и углов частиц. Введение последнего критерия обусловлено потерей части V° , распадающихся вблизи звезды. Этим критериям удовлетворяют 56 K_S° и 44 Λ .

Потери V° -частиц, распадающихся вне границ эффективного объема или недалеко от звезды, учитывались введением веса для каждого события — величины, обратной вероятности его регистрации. Для индивидуального события эта вероятность a определяется импульсом p и углом θ вылета V° относительно налетающей частицы. Значение a вычислялось с помощью моделирования. Разыгрывалось $N_0 (= 1000)$ случаев (p и θ фиксированы), в которых варьировались:

а) положение звезды (в пределах, ограниченных условием 1);

б) азимутальный угол вылета V° (из равномерного распределения в диапазоне $0-2\pi$);

в) его пробег L (из распределения $\exp(-L/L_0)$, где L_0 — среднее значение пробега, зависящее от величины импульса p). В каждом случае проверялось выполнение условий 3 ($L > 1$ см) и 2 (по вычисленному положению точки распада V°). Тогда для данного события вероятность регистрации есть $a = N/N_0$, где N — число случаев, удовлетворяющих этим условиям. Таким образом, вес события $W (= 1/a)$ учитывает потери V° с данными значениями p и θ . Среднее по событиям значение веса для Λ равно 1,93 и для K_S° — 1,81. В этом весе не учитывается распад V° на нейтральные частицы, так как вклад от этого одинаков для частиц одного типа и при вычислении сечения входит отдельным множителем.

3. Сечения и характеристики V° -частиц

Сечения образования Λ и K_S° в аннигиляции антипротонов на ядрах гелия, а также их отношение R приведены в табл.1 совместно с результатами других экспериментов (так как γ -кванты не регистрировались, в сечении образования Λ -гиперонов имеется вклад от процесса $\bar{p}^4\text{He} \rightarrow \Sigma^0 X, \Sigma^0 \rightarrow \Lambda \gamma$).

Как видно из табл.1, сечения образования Λ довольно значительны $\sigma(\Lambda) \approx \sigma(K)$ даже для такого легкого ядра, как ^4He . Поскольку при 600 МэВ/с образование Λ на одном нуклоне (порог

Таблица 1

	${}^2\text{H}$ /2/	${}^4\text{He}$	${}^{20}\text{Ne}$ /3/	Ta /1/
	600 МэВ/с	607,7 МэВ/с		4 ГэВ/с
$\sigma(\Lambda)$, мб	$0,42 \pm 0,09$	$4,25 \pm 0,64$	$12,3 \pm 2,8$	192 ± 12
$\sigma(K)$, мб	$2,6 \pm 0,4$	$4,51 \pm 0,60$	$5,4 \pm 1,1$	82 ± 6
$R = \sigma(\Lambda) / \sigma(K)$	$0,16 \pm 0,04$	$0,94 \pm 0,19$	$2,3 \pm 0,7$	$2,4 \pm 0,3$

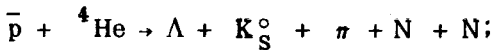
реакции $\bar{p}p \rightarrow \bar{\Lambda}\Lambda$ составляет $p_0 = 1435$ МэВ/с) запрещено, то объяснить обильное рождение Λ на ядрах можно только, предположив большую вероятность процессов, в которых принимают участие несколько нуклонов.

Средние значения быстрот (в лабораторной системе) составляют $\langle u \rangle_\Lambda = 0,07 \pm 0,03$ и $\langle u \rangle_K = 0,33 \pm 0,11$. Как видно, они сильно отличаются друг от друга. Если считать, что Λ (K_S^0) рождаются в первичном акте аннигиляции налетающего антипротона, то такое различие в быстротах служит указанием на то, что Λ -частицы и K_S^0 -мезоны образуются как бы от разных источников. Так, для того чтобы определить систему покоя источника "испарения" Λ -частиц (в которой $\langle u \rangle \approx 0$), надо предположить, что они рождаются на многонуклонном кластере. В случае же K_S^0 -мезонов сдвиг по скорости соответствует образованию K на одном нуклоне. Аналогичное различие между значениями быстрот в спектрах Λ и K -мезонов наблюдалось и в экспериментах /1,3/.

В литературе обсуждалось по крайней мере два механизма рождения Λ на ядрах: а) образование Λ в перерасеянии аннигиляционных мезонов /6/ и б) испарение файерболов с отличным от нуля барионным зарядом /7/. Рассмотрим обе возможности.

Перерасеяние аннигиляционных мезонов дает альтернативное объяснение малого значения быстроты для Λ -гиперонов. Последовательный анализ рождения Λ за счет таких процессов затруднен, поскольку помимо \bar{K} - и π -мезонов (которые могут образовывать Λ в реакциях ассоциативного рождения типа $\pi N \rightarrow K \Lambda$) необходимо учитывать также вклад от η - и ω -мезонов. Поэтому мы ограничились расчетом основных характеристик странных частиц (импульсов и быстрот) в следующих простых предположениях:

1) предполагалось, что распределения вторичных частиц имеют чисто кинематический характер, определяемый фазовым объемом реакции аннигиляции (модель 1):



2) предполагалось, что Λ рождаются при рассеянии \bar{K} -мезонов, образующихся в аннигиляции налетающего антипротона с одним из нуклонов ядра (модель 2):



При проведении расчетов по модели 2 учитывалось ферми-движение нуклонов ядра, участвующих в реакциях (*) и (**). Характеристики вторичных π - и K -мезонов определялись фазовым объемом реакции (*). Характеристики же Λ -гиперонов были получены с учетом энергетической зависимости реакции (**). Считалось, что вероятность вторичного взаимодействия W , как функция импульса вторичного \bar{K} -мезона p_K , пропорциональна сечению реакции (**):

$$W(p_K) = \text{const } \sigma(\bar{K}N \rightarrow \Lambda\pi).$$

Параметризация энергетической зависимости сечения $\sigma(\bar{K}N \rightarrow \Lambda\pi)$ бралась, как и в работе ^{12'}, в виде

$$\sigma(\bar{K}N \rightarrow \Lambda\pi) = 8,5 (0,6 / p_K)^{1,41} \text{ мб}$$

при $0,1 < p_K < 0,6$ ГэВ/с. Вне этого диапазона брались значения сечения, соответствующие крайним значениям p_K .

С помощью моделирования были получены распределения Λ , K_S^0 и π -мезонов по импульсу p , его продольной и поперечной компонентам (p_L , p_T) и скорости u (в лабораторной системе). В табл.2 их средние значения сравниваются с экспериментальными. Для сравнения π -мезонов в табл.2 включены экспериментальные значения характеристик отрицательных частиц, которые в подавляющем большинстве должны быть π^- -мезонами, образующимися совместно с нейтральными странными частицами.

Для модели 2 приведены характеристики Λ , полученные не только с учетом энергетической зависимости реакции $\bar{K}N \rightarrow \Lambda\pi$ (I), но и без него (II). Кроме того, если вернуться к ассоциативному рождению Λ и K вторичными π -мезонами (образующимися в $\bar{p}N$ -аннигиляции), то в нашей области энергий оно возможно только за счет ферми-движения нуклонов ядра. Канал $\bar{p}N \rightarrow \pi\pi$, дающий π -мезоны достаточной энергии (порог реакции $\pi N \rightarrow \Lambda K$ равен $p_\pi \approx 900$ МэВ/с), сильно подавлен. Ясно, что при таких больших значениях импульса налетающего

Таблица 2

		$\langle p \rangle$	$\langle p_T \rangle$	$\langle p_L \rangle$	$\langle y \rangle$
Эксперимент: $\bar{p}^4\text{He} \rightarrow \Lambda X$	Λ	405 ± 35	332 ± 31	87 ± 36	$0,07 \pm 0,03$
	π^-	341 ± 34	237 ± 27	138 ± 39	$0,36 \pm 0,11$
$\bar{p}^4\text{He} \rightarrow K^0 X$	K^0	571 ± 37	410 ± 32	217 ± 44	$0,31 \pm 0,06$
	π^-	392 ± 31	256 ± 22	158 ± 42	$0,39 \pm 0,10$
Модель 1:					
$\bar{p}^4\text{He} \rightarrow \Lambda K_S^0 \pi^- NN$	Λ	688	528	161	0,12
	K_S^0	543	416	96	0,13
	π^-	401	312	57	0,13
Модель 2:					
$\bar{p}N \rightarrow \bar{K} K_S^0 \pi^- \pi$ $\bar{K}N \rightarrow \Lambda \pi$	(I) Λ	398	307	76	0,06
	(II) Λ	463	353	136	0,11
	K_S^0	445	317	203	0,31
	π^-	320	238	107	0,31
$\bar{p}N \rightarrow \pi \pi \pi \pi$ $\pi N \rightarrow \Lambda K$	Λ	653	381	489	0,40
	π	488	366	153	0,31

π -мезона образующиеся Λ -гипероны должны вылетать вперед и обладать большой энергией. Это иллюстрируется включением в табл.2 характеристик Λ , полученных в расчетах, аналогичных модели 2 с заменой K на π -мезоны.

Из результатов, приведенных в табл.2, видно:

1) учет только фазового объема (модель 1) не воспроизводит наблюдаемые в эксперименте закономерности;

2) включение перерассеяния \bar{K} -мезонов без учета энергетической зависимости сечения $\sigma(\bar{K}N \rightarrow \Lambda \pi)$ (модель 2, расчет II) не воспроизводит среднее значение быстроты Λ -гиперонов;

3) перерассеяние π -мезонов, по-видимому, не может быть источником Λ , так как должно приводить к образованию "быстрых" Λ -частиц;

4) только вариант с перерассеянием \bar{K} -мезонов с учетом энергетической зависимости сечения $\sigma(\bar{K}N \rightarrow \Lambda \pi)$ (модель 2,

расчет I) приводит к вполне удовлетворительному описанию всех распределений как для Λ , так и для $K_S^0(\pi)$ -мезонов.

Обращает на себя внимание тот факт, что экспериментально наблюдаемое малое значение быстроты для Λ -гиперонов воспроизводится при учете перерасеяния \bar{K} -мезонов, то есть не требуется введения понятия о каких-либо многонуклонных кластерах, на которых возникали бы Λ .

Альтернативой модели перерасеяния аннигиляционных \bar{K} -мезонов, как источника подпороговых Λ -частиц, является механизм испарения фибрилов с барионным числом $B=1$. Он предсказывает, что если такой фибрилообразовался, то среди продуктов его испарения должна быть заметная доля Λ -гиперонов (включая и Λ от распада Σ^0), которая может достигать ^{7/} $Br(f \rightarrow \Lambda X) = 9,9\%$. Однако в этой модели неопределенной остается сама вероятность образования подобных фибрилов в антипротон-ядерной аннигиляции. Если предположить, что все Λ -частицы в нашем эксперименте образовались только за счет испарения подобных фибрилов, то можно получить ограничение на верхний предел вероятности W_f образования фибрилов в $\bar{p}^4\text{He}$ -аннигиляции:

$$W_f = W(\Lambda) / Br(f \rightarrow \Lambda X) = 0,18 ,$$

где $W(\Lambda) = \sigma(\Lambda) / \sigma_R = 0,0177$ — выход Λ -гиперонов в аннигиляции антипротонов на ядрах гелия при 600 МэВ/с.

Если принять на веру, что действительно в $\approx 20\%$ случаев аннигиляции антипротонов на ^4He образуются подобные фибрилы, то можно получить интересное следствие, касающееся вероятности редкого канала аннигиляции с вылетом только одного π -мезона. Как предсказывается в ^{8/}, вероятность испарения фибрилообразователя по каналу $f \rightarrow \pi N$ составляет 0,07%, тогда можно получить, что

$$W(\bar{p}^4\text{He} \rightarrow \pi + 3N) = W_f * Br(f \rightarrow \pi N) = 1,33 \cdot 10^{-4} .$$

Это следствие из наших экспериментальных данных (полученное в предположении справедливости модели фибрилов) может быть проверено в экспериментах на установке OBELIX ^{8/}. Отметим, что это значение на порядок превосходит величину вероятности одномезонной аннигиляции в дейтерии, измеренной недавно в эксперименте на LEAR ^{9/}, $W(\bar{p}d \rightarrow \pi^- p) = (2,8 \pm 0,3) \cdot 10^{-5}$.

4. Заключение

В настоящей работе определены сечения образования Λ -гиперонов и K_S^0 -мезонов при аннигиляции антипротонов в ^4He

при 600 МэВ/с. Обнаружен аномально высокий выход Λ -гиперонов, сравнимый с выходом K_S^0 -мезонов:

$$R = \sigma(\Lambda)/\sigma(K) = 0,94 \pm 0,19.$$

Спектры быстрот и импульсов частиц удовлетворительно объясняются в предположении образования Λ при перерассеянии аннигиляционных K -мезонов. В то же время для получения сравнимого с экспериментальным сечения образования Λ в процессах перерассеяния необходимо, как показывают расчеты, учитывать вклад η - и ω -мезонов.

Если же предположить, что все Λ -частицы, возникшие в \bar{p}^4 Не-аннигиляции, образовались только за счет испарения файерболов с $B=1$, то можно получить ограничение на верхний предел вероятности образования файерболов в этом процессе: $W_f = 18\%$. Это, в свою очередь, дает оценку вероятности реакций одномезонной аннигиляции антипротонов на ^4He при 600 МэВ/с, которая по сравнению с аннигиляцией на дейтерии оказывается на порядок большей:

$$W(\bar{p}^4\text{He} \rightarrow \pi + 3N) = 1,33 \cdot 10^{-4}.$$

Считаем приятным долгом поблагодарить сотрудников группы пучков LEAR, обеспечивших максимально благоприятные условия для проведения настоящего эксперимента. Мы также выражаем благодарность Л.А.Кондратьюку, Д.Э.Харзееву за обсуждение результатов. Особую признательность хотим выразить Л.А.Василенко, М.Н.Шелаевой, Г.А.Кульковой и В.В.Богдановой за работу по просмотру и измерениям.

Литература

1. Miyano K. et al. KEK Preprint 87-160, Tokyo, 1988.
2. Parkin S.J.H. et al. — Nucl. Phys., 1986, v.B277, p.634.
3. Balestra F. et al. — Phys.Lett., 1987, v.B194, p.192.
4. Balestra F. et al. — Nucl. Instr. and Meth., 1985, v.A234, p.30.
5. Balestra F. et al. — Nucl. Instr. and Meth., 1987, v.A257, p.114.
6. Che Ming Ko, Ruixi Yuan. — Phys. Lett., 1987, v.B192, p.31.
7. Cugnon J., Vandermeulen J. — Phys.Rev., 1987, v.C36, p.2726.
8. Armenteros R. et al. CERN Proposal CERN/PSCC/86-4, PSSC/P95, Geneva, 1986.
9. Smith G.A. et al. Preprint of Pennsylvania State University PSU/HEP 87-03, 1987.

Рукопись поступила 28 ноября 1988 года.