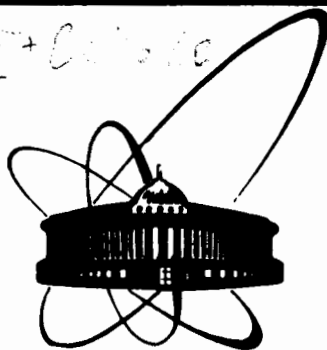


83-560



ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

5521/83

P4-83-560

Ф.Никитиу,<sup>1</sup> Г.Пираджино,<sup>2</sup> И.В.Фаломкин

АННИГИЛЯЦИЯ АНТИПРОТОНОВ  
В ДЕЙТЕРИИ С ИСПУСКАНИЕМ ОДНОГО ПИОНА  
И В ГЕЛИИ - С ИСПУСКАНИЕМ ДВУХ ПИОНОВ

Направлено в журнал "Ядерная физика"

---

<sup>1</sup> Институт ядерной физики и технологии,  
Бухарест, Румыния

<sup>2</sup> Институт физики Туринского университета,  
Туринская секция Национального института  
ядерных исследований, Италия.

1983

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В работе /1/ предлагается изучать аннигиляцию антипротонов на двух коррелированных нуклонах с последующим испусканием энергичного пиона и нуклона. Изучение этого процесса может оказаться хорошим способом исследования NN-корреляций на очень маленьких ( $\sim 0,2$  фм) расстояниях. В данной работе мы попытаемся установить некоторые соотношения между процессом аннигиляции антипротонов в дейтерии с испусканием одного пиона и кросс-симметричной реакцией поглощения пиона на двух нуклонах:

$$\bar{p}d \rightarrow p\pi^-, \quad /1/$$

$$\pi^+ d \rightarrow pp, \quad /2/$$

а также между процессом испускания двух  $\pi^-$ -мезонов при аннигиляции антипротонов в гелии и кросс-симметричной реакцией двойной перезарядки  $\pi^+$ -мезона на гелии:

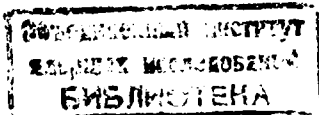
$$\bar{p} \ ^4\text{He} \rightarrow 2\pi^- \ ^3\text{p}, \quad /3/$$

$$\pi^+ \ ^4\text{He} \rightarrow \pi^- \ ^4\text{p}. \quad /4/$$

Параллельное исследование всех этих реакций важно для понимания поглощения частицы на коррелированных нуклонах. На таких малых расстояниях кварковая структура вещества ядра может привести к наблюдаемым эффектам. В этой работе мы выполнили вычисления сечений реакций /1/ и /3/, приняв во внимание информацию о реакциях /2/ и /4/ соответственно.

## 2. ПОГЛОЩЕНИЕ ПИОНА ДЕЙТРОНОМ И АННИГИЛЯЦИЯ АНТИПРОТОНОВ В ДЕЙТЕРИИ

В случае поглощения пиона на дейтерии /2/ в области энергий, далеких от резонанса, эту реакцию можно описать с помощью механизма, который характеризуется диаграммой, показанной на рис.1. Псион рассеивается на одном нуклоне и поглощается другим. Реакцию /1/ можно связать с реакцией /2/, реверсируя линию на диаграмме ( $\pi^+ \rightarrow p$ ), как это показано на рис.2. Первая попытка связать реакции /1/ и /2/ была предпринята в работе /2/, где использовалась



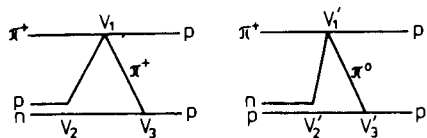


Рис.1. Диаграммы, описывающие механизм поглощения пиона дейтроном.

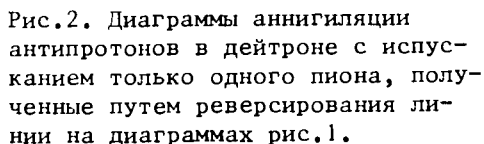


Рис.2. Диаграммы аннигиляции антипротонов в дейтроне с испусканием только одного пиона, полученные путем реверсирования линии на диаграммах рис.1.

простая обменная модель и была выведена формула "квазидетального баланса"

$$\frac{d\sigma}{dt}(\pi^- p \rightarrow \bar{p} d) = 2 \left( \frac{k_{pp}}{k_{\pi^- p}} \right)^2 \frac{d\sigma}{d\Omega}(pp \rightarrow \pi^+ d), \quad /5/$$

где сечения рассматриваются при одной и той же энергии в системе центра масс и одинаковой передаче импульса. Уравнение /5/ приводит к слишком большим значениям сечений, большим, чем экспериментальные значения /2/.

Для того, чтобы оценить сечение процесса /1/, можно предположить, что разница между реакциями /1/ и /2/ обусловлена только верхней частью диаграмм на рис.1 и 2. Другими словами, первая гипотеза, которая используется здесь, заключается в том, что реакция /1/ при низкой энергии описывается механизмом, подобным механизму реакции /2/ при высокой энергии. В этих областях энергий не существует никаких проблем с резонансами для обеих реакций.

Вторая гипотеза, которая используется здесь, состоит в факторизации квадрата модуля амплитуды, которая соответствует верхней части диаграмм на рис.1 и 2. Эта гипотеза факторизации является наиболее дискуссионным пунктом нашего подхода /обсуждение вопроса факторизации сечения на таких диаграммах проводится в работе /9/ /, однако в нашем случае она, по-видимому, работает. Это означает, что сечение процесса /1/ или /2/ пропорционально сечению процесса  $\bar{p}N \rightarrow \pi\pi^-$  или  $\pi^+N \rightarrow \pi p$  соответственно:

$$\sigma(\sqrt{s}) = \sigma_{V_1}(\sqrt{s'}) R(\sqrt{s}), \quad /6/$$

где  $\sigma_{V_1}(\sqrt{s'})$  - сечение реакции в вершине  $V_1$ , а  $R(\sqrt{s})$  - вклад ост-

тальной части диаграммы. Величина  $R(\sqrt{s})$  зависит от энергии в системе центра масс  $\bar{p}d$  и  $\pi^+d$  соответственно/ и должна быть одинаковой для реакций /1/ и /2/. Сечения процессов в вершине  $V_1$  следует вычислять при энергии /для  $\bar{p}N$  и  $\pi^+N$  соответственно/ в системе центра масс:

$$\sqrt{s'} = \sqrt{s} \frac{1}{pp} = \sqrt{s} \frac{1}{pd} - m_N,$$

где второй нуклон является наблюдателем.

При наличии указанных гипотез и принятии во внимание спиновые и кинематические факторы, можно получить сечение процесса /1/ из отношения сечений реакций /1/ и /2/:

$$\frac{\sigma(\bar{p}d \rightarrow p\pi^-)}{\sigma(\pi^+d \rightarrow pp)} \Big|_{\sqrt{s}} = \frac{1}{2} \left( \frac{k_{pd}}{k_{\pi^- p}} \right)^2 F(\sqrt{s} - m_N), \quad /7/$$

где фактор F определяется отношением сечений реакций  $\bar{p}N \rightarrow \pi^- \pi$  и  $\pi^+N \rightarrow \pi p$ :

$$F = \frac{\sigma(\bar{p}p \rightarrow \pi^- \pi^+) + \sigma(\bar{p}n \rightarrow \pi^- \pi^0)}{\sigma(\pi^+p \rightarrow \pi^+ p) + \sigma(\pi^+n \rightarrow \pi^0 p)} \quad /8/$$

При энергиях антипротонов в интервале  $T_{\bar{p}} = 60 \div 140$  МэВ /в экспериментах с антипротонами низких энергий на ускорителе LEAR в ЦЕРНе /3/ следует поглощение пионов на дейтерии рассматривать при импульсах в лабораторной системе координат в интервале  $p_{\pi} = 1463 \div 1578$  МэВ/с, а аннигиляцию антипротона на нуклоне /канал с испусканием двух пионов/ - при импульсах в лабораторной системе координат в интервале  $p_{\bar{p}} = 380 \div 620$  МэВ/с. При таких энергиях сечение поглощения пиона почти постоянно и равно  $\sim 30$  мкб. Зависимость от энергии сечения обратной реакции  $pp \rightarrow \pi^+ d$  показана на рис.3 /8/. Интересно отметить, что плавное убывание этого сечения прерывается небольшим "плато", которое начинается как раз при энергии в системе центра масс, равной массе покоя  $(\bar{N}NN)$  - системы /стрелка на рис.3/, т.е. на пороге  $\bar{p}d$ -взаимодействия.

Сечение упругого  $\pi^+p$ -рассеяния меняется в пределах  $18,7 \div 15$  мб, сечение реакции  $\bar{p}p \rightarrow \pi^+ \pi^-$  - в пределах  $0,70 \div 0,30$  мб и сечение реакции  $\pi^-p \rightarrow \pi^0 p$  /а также реакции  $\pi^+p \rightarrow \pi^0 p$  - в пределах  $2,4 \div 2,0$  мб /4,5/ внутри выбранного энергетического интервала. Сечение реакции  $\bar{p}n \rightarrow \pi^- \pi^0$  было принято равным половине сечения реакции  $\bar{p}p \rightarrow \pi^+ \pi^-$  /результат измерения при лабораторном импульсе антипротона  $p_{\bar{p}} = 1,3$  ГэВ/с /4/]. Низкое значение сечения обусловлено фактором F, который очень мал. В случае реакции /1/ в интервале энергий  $T_{\bar{p}} = 60 \div 140$  МэВ значения фактора F находятся в интервале  $0,050 \div 0,028$ . Значения сечений этой реакции при энергиях антипротонов 60, 100 и 140 МэВ оказываются равными 11,5; 5,0 и 3,0 мкб соответственно. Эти значения находятся в очень хорошем согласии с существующими экспериментальными данными /1,4/.

### 3. АННИГИЛЯЦИЯ АНТИПРОТОНОВ В ГЕЛИИ И ДВОЙНАЯ ПЕРЕЗАРЯДКА ПИОНА НА ЯДРЕ ГЕЛИЯ

Сечение испускания двух  $\pi^-$ -мезонов при аннигиляции антипротонов в  ${}^4\text{He}$  было вычислено исходя из сечения кросс-симметричной

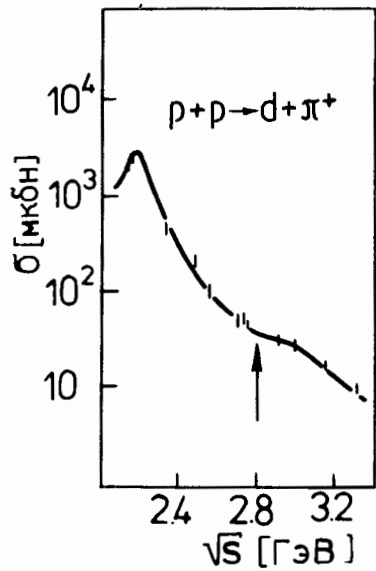


Рис.3. Полное сечение реакции  $p + p \rightarrow d + \pi^+$  в зависимости от энергии в системе центра масс. Проведенная кривая просто показывает тенденцию экспериментальных данных <sup>/8/</sup>.

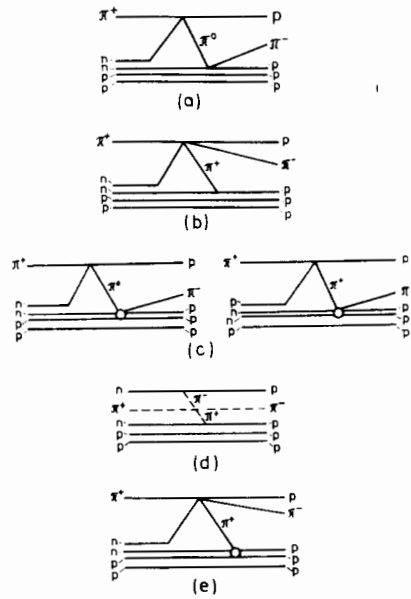


Рис.4. Диаграммы, описывающие различные механизмы двойной перезарядки пиона на  ${}^4\text{He}$ .

реакции /4/, которая является двойной перезарядкой пиона на гелии. Диаграммы, соответствующие различным моделям этой реакции двойной перезарядки, показаны на рис.4. Сечение реакции /3/ определяется соотношением, подобным уравнению /7/:

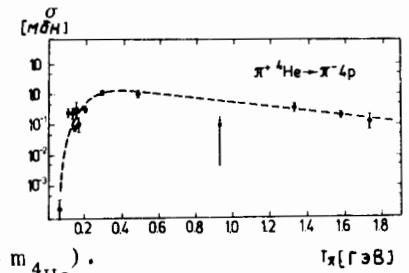
$$\sigma(\bar{p} + {}^4\text{He} \rightarrow 2\pi^- 3p) = \frac{1}{2} \left( \frac{k_{\pi^+ {}^4\text{He}}}{k_{\bar{p} {}^4\text{He}}} \right)^2 \sigma(\pi^+ + {}^4\text{He} \rightarrow \pi^- 4p) F(\sqrt{s} - 3m_N), \quad /9/$$

где вершинный фактор  $F(\sqrt{s} - 3m_N)$  определяется отношением сечений реакции, идущей по верхней линии диаграммы, и реакции, идущей по этой же, но реверсированной линии, т.е.

$$F(\sqrt{s} - 3m_N) = \frac{\sigma(\bar{p} a \rightarrow \pi^- b)}{\sigma(\pi^+ a \rightarrow p b)},$$

где  $a$  и  $b$  обозначают соответствующие нуклон и пион. Сечения реакции  $\pi^+ + {}^4\text{He} \rightarrow \pi^- 4p$  берутся при тех же самых значениях  $\sqrt{s}$ , что и для сечения реакции  $\bar{p} + {}^4\text{He} \rightarrow 2\pi^- 3p$ . На рис.4а показана диаграмма для простой двукратной перезарядки. Используемый здесь фактор  $F$

Рис.5. Полное сечение двойной перезарядки пионов на  ${}^4\text{He}$  в зависимости от кинетической энергии пиона. Проведенная кривая показывает поведение экспериментальных данных в зависимости от энергии, а стрелка указывает на лабораторную кинетическую энергию, соответствующую значению  $\sqrt{s} = (m_{\bar{p}} + m_{{}^4\text{He}})$ .



является отношением сечений реакции  $\bar{p}n \rightarrow \pi^-\pi^0$  и  $\pi^+n \rightarrow \pi^0p$ . Интервалу энергий антипротонов  $T_{\bar{p}} = 60 \div 140$  МэВ соответствуют энергии в системе центра масс  $\sqrt{s} = 4,714 \div 4,776$  ГэВ, и сечение двойной перезарядки пионов попадает в интервал  $0,6 \div 0,5$  мб <sup>/6/</sup>.

На рис.5 показана энергетическая зависимость сечения двойной перезарядки. Стрелкой отмечена кинетическая энергия пиона, соответствующая порогу реакции  $\bar{p} + {}^4\text{He}$ . При кинетических энергиях антипротона  $T_{\bar{p}} = 60, 100$  и  $140$  МэВ сечение двухпионной аннигиляции антипротонов в гелии будет составлять  $0,60; 0,30$  и  $0,10$  мб соответственно.

Диаграмма /b/ на рис.4 описывает рождение вне массовой поверхности и поглощение  $\pi^+$ -мезона. В качестве фактора  $F$  мы использовали отношение сечений реакции  $\bar{p}n \rightarrow \pi^-\pi^-\pi^+$  и  $\pi^+n \rightarrow p\pi^+\pi^-$ . В случае этой диаграммы возможно вычислить сечение двухпионной аннигиляции антипротонов в гелии только при энергии антипротона  $T_{\bar{p}} = 140$  МэВ, при этом  $\sigma = 0,05$  мб. /Экспериментальные значения сечения реакции  $\pi^+n \rightarrow p\pi^+\pi^-$  имеются только при энергиях, превышающих значение  $\sqrt{s} = 2$  ГэВ, соответствующее в нашем подходе энергии антипротона  $T_{\bar{p}} \approx 140$  МэВ/.

Диаграмма /c/ на рис.4 описывает упругое рассеяние пиона на протоне, которое сопровождается двойной перезарядкой на  $pn$ -паре, и однократную перезарядку на нейтроне, которая сопровождается перезарядкой на  $np$ -паре. При энергиях антипротона  $T_{\bar{p}} = 60, 100$  и  $140$  МэВ вычисленные сечения двухпионной аннигиляции антипротонов в гелии оказываются равными  $0,2; 0,1$  и  $0,04$  мб соответственно.

Диаграмма /d/ на рис.4 описывает рассеяние пиона на пионе, которым обмениваются два нуклона <sup>/7/</sup>. Реакция с реверсированной на этой диаграмме линией, соответствующая модели обменных токов, подобна по своему механизму реакции с реверсированной линией на диаграмме /b/. Фактор  $F$  описывается здесь отношением сечений упругого  $\pi^+\pi^-$ -рассеяния и реакции  $\bar{p}n \rightarrow \pi^-\pi^-\pi^+$ . При энергии антипротона  $T_{\bar{p}} = 140$  МэВ сечение двухпионной аннигиляции в гелии оказывается равным  $\sigma = 0,14$  мб.

Диаграмма /e/ на рис.4 описывает рождение на массовой поверхности и поглощение  $\pi^+$ -мезона протон-нейтронной парой <sup>/8/</sup>. Этот

механизм дает правильный порядок величины для сечения двойной перезарядки пионов на гелии при высоких энергиях, т.е. при тех энергиях, которые при аннигиляции антипротонов в гелии относятся к низкоэнергетическому интервалу. Диаграмма с реверсированной линией подобна аналогичной диаграмме на рис. 4b, а сечение двухпионной аннигиляции антипротонов в гелии при энергии антипротона  $T_{\bar{p}} = 140$  МэВ оказывается равным 0,05 мб.

Выполненные вычисления сечений двухпионной аннигиляции антипротонов в гелии суммированы в таблице. Сечения этой реакции оказываются того же порядка величины, что и сечения двойной перезарядки пионов на гелии.

Таблица

Сечения двухпионной аннигиляции антипротонов в  ${}^4\text{He}$  в мб

$T_{\bar{p}}$ , МэВ	Диаграммы рис.4				
	a	b	c	d	e
60	0,6		0,2		
100	0,3		0,1		
140	0,1	0,05	0,04	0,14	0,05

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментальные данные по двойной перезарядке пионов на гелии указывают на то, что в этой реакции только один протон может быть наблюдателем  ${}^8/$ , а это означает, что более предпочтительными диаграммами для двойной перезарядки пионов на гелии при высоких энергиях являются диаграммы /с/ и /е/ на рис.4.

Сравнительное изучение обеих реакций, прямой и кросс-симметричной, может привести к более глубокому пониманию процесса многократного рассеяния, важности учета пионных обменных токов и короткодействующих корреляций в ядрах.

Может быть наблюдаена также реакция аннигиляции антипротонов на двух коррелированных нуклонах внутри ядра гелия ( $\bar{p} {}^4\text{He} \rightarrow \pi^- 2pn$ ), а ее сечение будет в 2÷3 раза больше, чем сечение элементарного акта аннигиляции антипротона на двух коррелированных нуклонах /реакция /1//.

В заключение следует сказать, что предложена простая модель реакции с испусканием одного пиона в процессе  $\bar{p}d$ -аннигиляции и испусканием  $2\pi^-$ -мезонов при  $\bar{p} {}^4\text{He}$ -аннигиляции с учетом связи

этих процессов с кросс-симметричными реакциями: поглощением пиона на дейтерии и двойной перезарядкой пиона на ядре гелия.

Можно предположить, что обе реакции /прямая и кросс-симметричная/ идут через двухступенчатый механизм и наша модель основывается на эффекте подобия между этими реакциями /1/ и /2/, а также /3/ и /4/ в той части, которая относится к первой ступени этого механизма. В случае реакции  $\bar{p}d \rightarrow p\pi^-$  получено хорошее согласие вычисленных сечений с существующими экспериментальными данными.

Важность вклада в сечение двухпионной аннигиляции антипротонов в гелии различных диаграмм остается в значительной степени открытым вопросом. Будущее экспериментальное исследование этого процесса поможет, по-видимому, прояснить этот вопрос.

Авторы благодарны В.Б.Беляеву, Л.И.Лапидусу, Б.З.Копелиовичу и М.Г.Сапожникову за весьма полезные обсуждения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ильинов А.С., Матушко В.Л. Краткие сообщения по физике, 1983, № 5, с.7.
2. Pawlick A.J. et al. Phys.Rev.Lett., 1973, 31, p.665.
3. Balestra F. et al. Preprint CERN EP/82-87, Geneva, 1982.
4. Flaminio V. et al. CERN-HERA, 79-03, Geneva, 1979.
5. Flaminio V. et al. CERN-HERA, 79-01, Geneva, 1979.
6. Jeannevet J.B. et al. Nucl.Phys., 1980, A350, p.345.
7. Germond J.F., Wilkin C. Nuovo Cim., 1975, 13, p.605.
8. Heinz R.M. et al. Phys.Rev., 1968, 165, p.1232.
9. Колыбасов В.В. и др. УФН, 1974, 113, с.239.

Рукопись поступила в издательский отдел  
29 июля 1983 года.

## НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

ДЗ-11787	Труды III Международной школы по нейтронной физике. Алушта, 1978.	3 р. 00 к.
Д13-11807	Труды III Международного совещания по пропорциональным и дрейфовым камерам. Дубна, 1978.	6 р. 00 к.
	Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1978 /2 тома/	7 р. 40 к.
Д1,2-12036	Труды V Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1978	5 р. 00 к.
Д1,2-12450	Труды XII Международной школы молодых ученых по физике высоких энергий. Приморско, НРБ, 1978.	3 р. 00 к.
	Труды VII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1980 /2 тома/	8 р. 00 к.
Д11-80-13	Труды рабочего совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике, Дубна, 1979	3 р. 50 к.
Д4-80-271	Труды Международной конференции по проблемам нескольких тел в ядерной физике. Дубна, 1979.	3 р. 00 к.
Д4-80-385	Труды Международной школы по структуре ядра. Алушта, 1980.	5 р. 00 к.
Д2-81-543	Труды VI Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1981	2 р. 50 к.
Д10,11-81-622	Труды Международного совещания по проблемам математического моделирования в ядерно-физических исследованиях. Дубна, 1980	2 р. 50 к.
Д1,2-81-728	Труды VI Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1981.	3 р. 60 к.
Д17-81-758	Труды II Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1981.	5 р. 40 к.
Д1,2-82-27	Труды Международного симпозиума по поляризационным явлениям в физике высоких энергий. Дубна, 1981.	3 р. 20 к.
Р18-82-117	Труды IV совещания по использованию новых ядерно-физических методов для решения научно-технических и народнохозяйственных задач. Дубна, 1981.	3 р. 80 к.
Д2-82-568	Труды совещания по исследованиям в области релятивистской ядерной физики. Дубна, 1982.	1 р. 75 к.
Д9-82-664	Труды совещания по коллективным методам ускорения. Дубна, 1982.	3 р. 30 к.
Д3,4-82-704	Труды IV Международной школы по нейтронной физике. Дубна, 1982.	5 р. 00 к.

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу:  
101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79  
Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

Никитиу Ф., Пираджино Г., Фаломкин И.В. P4-83-560  
Аннигиляция антипротонов в дейтерии с испусканием одного пиона и в гелии - с испусканием двух пионов

Предложена простая модель реакции с испусканием одного пиона при  $\bar{p}d$ -аннигиляции и с испусканием  $2\pi^-$ -мезонов при  $\bar{p}^4\text{He}$ -аннигиляции с учетом связи этих процессов с кросс-симметричными реакциями: поглощением пиона на дейтерии и двойной перезарядкой пиона на ядре гелия. Параллельное исследование этих прямых и кросс-симметричных реакций важно для понимания поглощения частиц на коррелированных нуклонах.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1983

Nikitiiu F., Piragino G., Falomkin I.V. P4-83-560  
Annihilation of Antiprotons in Deuterium with the Emission of Single Pions and in Helium with the Emission of Two Pions

A simple model is proposed for the description of reactions involving the emission of a single pion in  $\bar{p}d$ -annihilation, and the emission of two negative pions in  $\bar{p}^4\text{He}$ -annihilation. In the model account is taken of the connection between the above processes and the respective cross-symmetric reactions: pion absorption by deuterium and double charge exchange of a pion on the helium nucleus. Parallel investigation of the mentioned direct and cross-symmetric reactions is important for the understanding of particle absorption by correlated nuclei.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1983

Перевод О.С.Виноградовой