

Поглощение медленных K^- -мезонов в ядерной фотоэмульсии

В. В. Дубинина, Н. П. Егоренкова, Е. А. Пожарова, В. А. Смирнитский

Институт теоретической и экспериментальной физики им. Алиханова, 117259 Москва, Россия

Поступила в редакцию 24 сентября 2013 г.

После переработки 12 ноября 2013 г.

Измерено поглощение в ядерной фотоэмульсии медленных K^- -мезонов по мезонному и безмезонному каналам. Показано, что K^- поглощаются в поверхностном (диффузном) слое ядра. Наблюдается качественное согласие с теоретическими расчетами с учетом мезонного и безмезонного потенциалов поглощения каонов легкими и тяжелыми ядрами фотоэмульсии.

DOI: 10.7868/S0370274X13230045

1. Введение. Поглощение (аннигиляция) остановившихся или медленных π^- -мезонов, антипротонов и K^- -мезонов в ядре позволяет изучать свойства ядерной материи в условиях, когда отсутствует передача ядру большого линейного и углового моментов. Остановка и захват ядрами медленных пионов, каонов и антипротонов сопровождаются различными процессами. Так, в работе [1] при изучении захвата (аннигиляции) медленных π^- -мезонов ядрами фотоэмульсии установлено, что в области испарительной энергии вторичных частиц экспериментальные данные лучше всего описываются полюсным механизмом поглощения π^- -мезонов ядром, если предположить, что виртуальной частицей является ${}^4\text{He}$.

Аннигиляция медленных антипротонов в ядерной фотоэмульсии рассмотрена в работе [2]. Там же приведена подробная библиография. При аннигиляции остановившихся антипротонов в ядре образуется локальное состояние ядерной материи с барионным числом, равным нулю, и выделяется энергия ~ 2 ГэВ. Эта энергия реализуется в основном в виде испускания ~ 5 пионов, из которых 2–3 поглощаются в ядре, а остальные вылетают и уносят из ядра часть энергии прежде, чем установится тепловое равновесие. Из возбужденного ядра испускается ~ 5 – 6 частиц: протоны, дейтроны, тритий и α -частицы. Около 2% антипротонов “проваливается” в глубь ядра. В результате возникшие при аннигиляции пионы взаимодействуют в том же ядре и разогревают его. Это вызывает испускание ~ 11 испарительных частиц.

Поглощение в ядре K^- должно происходить с сохранением странности и барионного заряда (сохранением числа барионов). Поэтому в данном процессе образуются гипероны, уносящие странность. Часть аннигиляционной энергии затрачивается на возбуждение ядра и испускание испарительных частиц. В

[3] рассмотрен процесс поглощения (аннигиляции) K^- -мезонов различными ядрами. В этой работе теоретически исследовался механизм поглощения K^- -мезонов ядерной материей. Для этого был рассчитан потенциал мезонной и безмезонной аннигиляции K^- одним или двумя нуклонами ядра в зависимости от плотности ядерной материи и энергии каонов. Поглощение K^- , в результате которого испускаются пион и гиперон, уносящий странность и барионный заряд, называется мезонным: $K^-N \rightarrow (\pi Y)$, где (πY) есть $\pi^+\Sigma^-$, $\pi^-\Sigma^+$, $\pi^-\Lambda$, $\pi^-\Sigma^0$, $\pi^0\Sigma^-$, $\pi^0\Sigma^0$, $\pi^0\Lambda$. Поглощение K^- двумя нуклонами ядра, при котором пион не испускается, называется безмезонным: $K^-NN \rightarrow (YN)$, где (YN) есть Λp , $\Sigma^0 p$, $\Sigma^+ n$, Λn , $\Sigma^0 n$, $\Sigma^- p$ или $\Sigma^- n$. Приведена оценка отношений $\pi^+\Sigma^-/\pi^-\Sigma^+$ для мезонного и $\Lambda p/\Sigma^0 p$, $\Lambda n/\Sigma^0 n$, $\Sigma^+ n/\Sigma^0 p$, $\Sigma^- p/\Sigma^0 n$ для безмезонного каналов поглощения K^- . Поглощение каонов изучалось в ранних работах (1960–1970 гг.) в ядерной фотоэмульсии [4], а также в пузырьковых камерах, наполненных водородом [5], дейтерием [6], гелием [7] и тяжелыми ядрами [8]. По результатам этих работ можно сделать оценку безмезонного канала поглощения каонов в гелии и тяжелых ядрах ($\sim 20\%$), в дейтерии ($\sim 1\%$) и мезонного канала в тяжелых ядрах ($\sim 70\%$). В нашей работе мы измерили вероятность поглощения K^- -мезонов по мезонному и безмезонному каналам и оценили эти процессы для легких (C, N, O) и тяжелых (Ag, Br) ядер фотоэмульсии.

2. Эксперимент и результаты измерений. В настоящей работе представлен результат поиска и анализа поглощения в ядерной фотоэмульсии остановившихся K^- -мезонов. Эмульсионная камера, собранная из слоев фотоэмульсии Pford G.5, облучалась пучком K^- -мезонов с импульсом 400 МэВ/с на ускорителе в Беркли. При просмотре по площади

для дальнейшего анализа и измерений было отображено ~ 500 остановок K^- , из них 480 – с наблюдаемым взаимодействием. В каждой такой остановке измерялись и вычислялись пространственные углы вылетающих частиц (в системе координат измерительного микроскопа, направленной таким образом, чтобы ось X совпадала с направлением пучка каонов). Затем проводилась их классификация: испарительные b -частицы, имеющие пробег от 5 мкм (меньше 5 мкм возможен след ядра отдачи) до 3.5 мм; g -частицы с пробегом > 3.5 мм и скоростью $\leq 0.7\beta$ (относительная ионизация $I/I_0 \geq 1.4$, где I_0 – ионизация релятивистских частиц); s -частицы, скорость которых $> 0.7\beta$ ($I/I_0 < 1.4$).

Асимметрия вылета испарительных частиц относительно направления пучка позволяет определить энергию (или скорость) каонов в момент их поглощения ядром. На рис. 1 показано распределение b -

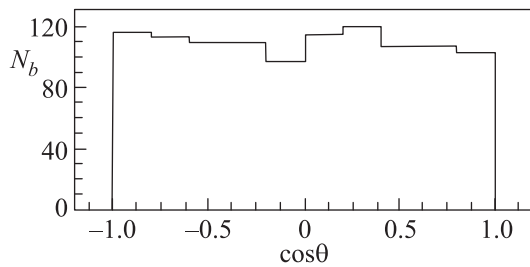


Рис. 1. Распределение по $\cos \theta$ b -частиц, возникающих при поглощении K^- -мезонов ядрами фотоэмульсии (θ – угол с направлением пучка каонов)

частиц по $\cos \theta$ (где θ – угол с направлением пучка). Видно, что это распределение является равномерным с хорошей точностью (в гистограмме содержится более 1000 b -частиц). Это позволяет считать, что мы наблюдаем захват ядрами фотоэмульсии практически остановившихся K^- .

В работе [3] при расчете процесса поглощения каонов учитывались образование K -мезоатомов и изменение плотности ядерной материи в соответствии с распределением Ферми (Вуда–Саксона):

$$\rho(r) = \rho_0 / \{1 + \exp[(r - R)/d]\}, \quad (1)$$

где ρ_0 – плотность насыщения (плотность в центре ядра), R – радиус ядра, на котором плотность падает в два раза, d – параметр, определяющий спад плотности (диффузность поверхностного слоя ядра). Для всех ядер наблюдается насыщение плотности до примерно одного и того же значения $\rho_0 \sim 0.17$ нуклон/фм³. При поглощении каонов важную роль играет распределение плотности ядерной материи в поверхностном слое. Если оценить спад

плотности от $0.9\rho_0$ до $0.1\rho_0$ (поверхностный слой), то окажется, что у всех ядер он практически одинаков (≈ 2.4 Фм).

При определении числа мезонных и безмезонных поглощений K^- необходимо учитывать образование гиперфрагментов (hf) – вылетающих фрагментов ядра, в которых нуклон замещен гипероном. Мы наблюдали 18 вторичных “звезд”, образовавшихся в результате остановки фрагмента и распада гиперона в hf . Доля таких процессов составляет $N_{hf} = 3 \pm 1\%$ от числа остановок K^- . Средний пробег до вторичных звезд $\langle R \rangle = 41.0 \pm 10.0$ мкм, что соответствует среднему времени жизни гиперона в hf (τ) $\sim (1.5 \pm 0.5) \cdot 10^{-10}$ с.

Каждое поглощение K^- в ядре должно сопровождаться сохранением странности и барионного заряда (числа барионов). В случае поглощения K^- освобождаящаяся энергия (разность масс K^-N и πY) достаточна для того, чтобы возникший пион имел скорость $V_\pi \geq 0.4\beta$. В ядерной фотоэмульсии это g - и s -частицы. Для определения количества мезонных поглощений необходимо учесть количество событий, когда при поглощении K^- возникают π^0 -мезоны, которые в ядерной фотоэмульсии непосредственно не наблюдаются. Поправка на число поглощений K^- с вылетом π^0 -мезона определена нами по работам [7] и [8]. В них наблюдалось поглощение каонов в пузырьковых камерах, наполненных гелием и тяжелыми смесями газов на основе фреона. Согласно этим работам отношение числа поглощений K^- с испусканием пионов ($K^-(\pi^+) + K^-(\pi^-)$)/ $2K^-(\pi^0) = 0.96 \pm 0.17$, что согласуется с предсказанием спин-изотопической инвариантности: $([\pi^+] + [\pi^-])/2[\pi^0] = 1$. Мы наблюдали 247 поглощений K^- с испусканием заряженных пионов. После внесения поправки на события с испусканием π^0 получается 371 событие поглощения ядрами фотоэмульсии K^- , в которых испускаются π^+ -, π^- - и π^0 -мезоны, и 91 безмезонное поглощение. Доли мезонных и безмезонных событий составляют $N_\lambda = 0.80 \pm 0.04$ и $N_0 = 0.20 \pm 0.02$ от общего числа K^- -поглощений соответственно.

Ядерная фотоэмульсия позволяет выделить взаимодействия на легких (C, N, O) и тяжелых (Ag, Br) ядрах. Взаимодействия на легком ядре определяются потенциальным барьером, который могут преодолеть испарительные b -частицы. Этот барьер задается минимальным пробегом в эмульсии b -частиц $R_{\min} = 15$ мкм (энергия протона ~ 1 МэВ). События на тяжелом ядре идентифицируются по наличию во взаимодействии оже-электронов, которые с большей вероятностью возникают при разрушении тяжелых ядер. Кроме того, к таким событиям от-

носятся взаимодействия, в которых число b -частиц $N_b \geq 7$ (и при этом нет ни одной частицы с пробегом $R \leq 15$ мкм). По этим критериям мы выделили из всего массива данных (462 поглощения K^-) 95 событий на тяжелых ядрах и 105 на легких. И для легких, и для тяжелых ядер был проведен аналогичный анализ выделения мезонного и безмезонного поглощения K^- . В результате было получено для легких ядер $N_\lambda = 0.79 \pm 0.11$ и $N_0 = 0.21 \pm 0.04$, а для тяжелых ядер $N_\lambda = 0.76 \pm 0.09$ и $N_0 = 0.24 \pm 0.05$.

3. Обсуждение результатов измерений. На рис. 2 (рис. 13 из работы [3]) приведены результаты

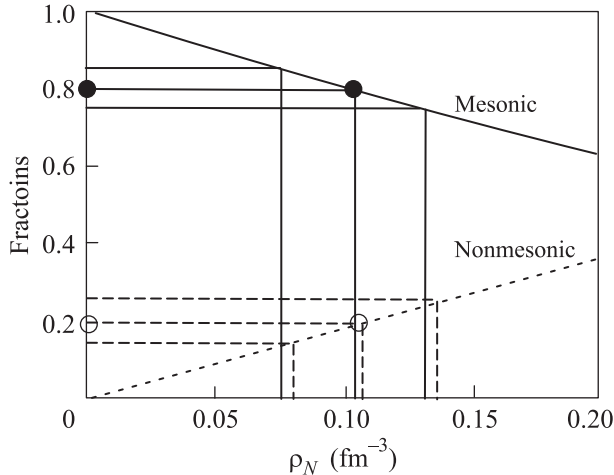


Рис. 2. Зависимость мезонного (λ) и безмезонного (0) поглощения K^- от плотности ядерной материи

наших измерений N_λ и N_0 поглощений K^- в ядерной фотоэмульсии. Можно определить, что мезонное и безмезонное поглощения происходят при средней ядерной плотности $\langle \rho \rangle \sim (0.60 \pm 0.15)\rho_0$, что соответствует поглощению K^- в поверхностном слое ядра $(0.9 \pm 0.1)\rho_0$.

На рис. 3 (рис. 14 из работы [3]) показан результат нашего измерения безмезонного поглощения K^- на легких и тяжелых ядрах. Наблюдается качественное согласие с теоретическими расчетами.

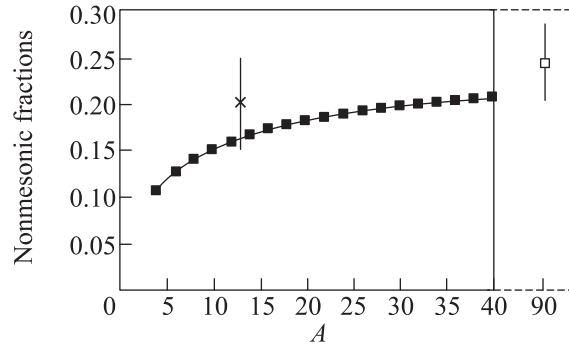


Рис. 3. Зависимость безмезонного поглощения K^- от атомного номера ядра: крестик – легкие ядра (C, N, O), светлые квадраты – тяжелые ядра (Ag, Br)

Таким образом, наши экспериментальные данные согласуются с расчетами работы [3], выполненными в учет мезонного и безмезонного потенциалов поглощения K^- -мезонов ядрами.

Авторы благодарят В.В. Шаманова за помощь в обработке результатов измерений.

1. А. А. Вайсенберг, Э. Д. Колганов, Н. В. Рабин, ЖЭТФ **47**(4), 1262 (1964).
2. В. В. Дубинина, Н. П. Егоренкова, Е. А. Пожарова, В. А. Смирнитский, Письма в ЖЭТФ **93**(5), 283 (2011).
3. T. Sekihara, J. Yamagata-Sekihara, D. Jido, and Y. Kanada-En'yo, arXiv:1204.3978v2 [nucl-th] (2012)
4. D. H. Davis, S. P. Lovell, M. Csejthey-Barth, J. Sacton, G. Schorochoff, and M. O'Reilly, Nucl. Phys. B **1**, 434, (1967).
5. R. J. Nowak, J. Armstrong, D. H. Davis, D. J. Miller, D. N. Tovee, D. Bertrand, M. Goossens, and G. Vanhomwegen, Nucl. Phys. B **139**, 61 (1978).
6. V. R. Veirs and R. A. Burnstein, Pys. Rev. D **1**, 1883 (1970).
7. P. A. Katz, K. Bunnell, M. Derrick, T. Fields, L. G. Hyman, and G. Keves, Phys. Rev. D **1**, 1267 (1970).
8. C. Vander Vilde-Wilquet, J. Sacton, and J. H. Wickens, Nuovo Cim. A **30**, 538 (1977).