

ЗАРЯЖЕННЫЕ ЧАСТИЦЫ С ЭНЕРГИЕЙ БОЛЬШЕ ИСПАРИТЕЛЬНОЙ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ПРИ ПОГЛОЩЕНИИ K^- -МЕЗОНОВ ЯДРАМИ

© 2019 г. В. В. Дубинина, Н. П. Егоренкова, Е. А. Пожарова, В. А. Смирнитский*

НИЦ “Курчатовский институт” — ИТЭФ, Москва, Россия

Поступила в редакцию 31.10.2018 г.; после доработки 31.10.2018 г.; принята к публикации 31.10.2018 г.

Показано, что при остановке и поглощении ядром K^- -мезона возникают частицы, появление которых невозможно согласовать с термодинамической теорией испарения. Отождествление этих частиц различными методами позволило оценить практически одинаковые выходы ${}^3\text{H}$ и ${}^3\text{He}$. Этот результат может служить указанием на то, что при поглощении K^- -мезонов в ядре наблюдаются прямые реакции взаимодействия с ${}^4\text{He}$.

DOI: 10.1134/S0044002719020053

1. ВВЕДЕНИЕ

В результате ядерных реакций при поглощении медленных K^- -мезонов возникает возбуждение ядра-мишени, при котором испускаются различные частицы и многонуклонные образования. Теория испарительного процесса подробно изучена и опубликована в цикле работ [1, 2]. Экспериментальные результаты изучения испарения при поглощении ядрами медленных или остановившихся μ^- , π^- , K^- -мезонов представлены в [3–5]. В этих работах описаны эксперименты и приведена подробная библиография.

Механизм поглощения остановившихся K^- -мезонов изучался во многих экспериментах. Так, в пузырьковой камере, наполненной дейтерием, исследовалось двухнуклонное поглощение медленных K^- -мезонов по различным каналам [6]. Аналогичное исследование проведено в гелиевой пузырьковой камере [7]. В этой работе частицы, возникающие при поглощении K^- -мезонов, определялись восстановлением различных каналов аннигиляции путем кинематического анализа. Непосредственного отождествления заряженных частиц в этой работе не проводилось. Поглощение остановившихся K^- -мезонов в пузырьковой камере, наполненной тяжелой жидкостью, изучалось в работе [8] с целью наблюдения нейтронного гало. Мезонная и безмезонная аннигиляция K^- -мезонов измерена и изучена в работах [9, 5].

При поглощении K^- -мезонов ядрами выделяется энергия ~ 500 МэВ, а сам процесс должен проходить с сохранением “странности” и “барионного заряда” (числа барионов), поэтому в этом взаимодействии часто образуются гипероны, уносящие странность и сохраняющие барионный заряд. При поглощении K^- -мезонов из ядра, кроме испарительных частиц, испускаются частицы, количество и энергию которых невозможно согласовать с термодинамической картиной испарения. По расчетам работы [1] вероятность испускания заряженной частицы (протона или более тяжелой частицы с энергией > 500 – 600 МэВ) составляет $w_p \sim 10^{-4}$ (при энергетическом распределении испарительных частиц в соответствии с уравнением Максвелла). Эти быстрые частицы могут являться продуктом своеобразной прямой реакции [10], когда энергия при поглощении K^- -мезона передается небольшой группе нуклонов ядра.

В нашей работе мы попытались наблюдать поглощение K^- -мезонов кластерами ${}^4\text{He}$ в ядрах фотоэмульсии. Для этого ${}^3\text{H}$ и ${}^3\text{He}$, возникающие в этом процессе, отождествлялись с энергией, превышающей энергию испарительных частиц, с целью возможного наблюдения прямой реакции. Этому соответствуют наблюдавшиеся в гелиевой пузырьковой камере [7] ядерные реакции.

Реакции (в %):

$$K^- + {}^4\text{He} \rightarrow (\Lambda^0 \pi^-) + {}^3\text{He} \quad 11.2 \pm 2.7, \quad (1a)$$

$$\rightarrow (\Sigma^- \pi^0) + {}^3\text{He} \quad 1.0 \pm 0.5, \quad (1b)$$

*E-mail: vladimir@itep.ru

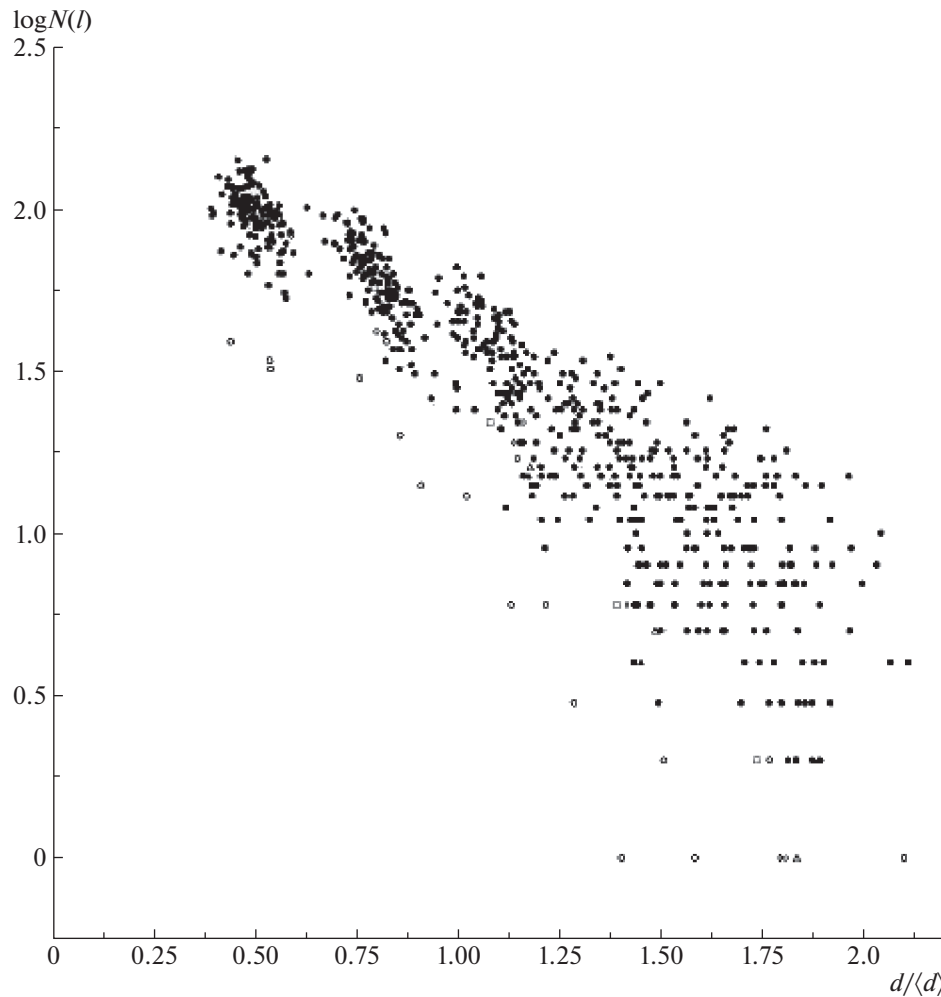


Рис. 1. Зависимость количества просветов $N(l)$ с длиной, больше заданной, от отношения $d/\langle d \rangle$.

$$\rightarrow (\Sigma^0 \pi^-) + {}^3\text{He} \quad 0.9 \pm 0.6, \quad (1в)$$

$$K^- + {}^4\text{He} \rightarrow (\Sigma^+ \pi^-) + {}^3\text{H} \quad 9.3 \pm 2.3, \quad (2а)$$

$$\rightarrow (\Sigma^- \pi^+) + {}^3\text{H} \quad 4.2 \pm 2.3. \quad (2б)$$

Вместо реакций (2а) и (2б) могут иногда наблюдаться и безмезонные реакции:

$$\begin{aligned} K^- + {}^4\text{He} &\rightarrow (\Lambda^0) + {}^3\text{H}, \\ &\rightarrow (\Sigma^0) + {}^3\text{H}. \end{aligned} \quad (3)$$

В этих реакциях фрагменты ${}^3\text{H}$ и ${}^3\text{He}$ могут получить энергию, значительно превышающую энергию в испарительном процессе, и соответственно имеют пробег в ядерной фотоэмульсии больше, чем испарительные частицы.

Поглощение K^- -мезонов подробно исследовано в гелиевой (${}^4\text{He}$) пузырьковой камере. В этой работе [7] измерено отношение выходов $W({}^3\text{H})$ и $W({}^3\text{He})$: $W({}^3\text{H})/W({}^3\text{He}) \approx 1$. Надеемся, что, измерив это отношение в нашем опыте, мы получим

указание на возможные прямые ядерные реакции при поглощении K^- -мезонов ядрами фотоэмульсии. Для этого при поглощении K^- -мезонов отбирались gb -частицы, энергия которых превышает энергию испарительных частиц, с целью отождествления среди них ${}^3\text{H}$ и ${}^3\text{He}$ (gb -частицы имеют пробег в эмульсии $R > 3.5$ мм и $\beta \leq 0.7$). При определении ${}^3\text{H}$ и ${}^3\text{He}$ мы применили все известные [11] и доступные нам методы идентификации частиц: измерение длин просветов на треках, ионизацию и пробег (метод g, R), рассеяние и пробег (метод $p\beta, R$), ионизацию и рассеяние (метод $g, p\beta$).

2. ЭКСПЕРИМЕНТ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Мы использовали эмульсионную камеру, собранную из слоев фотоэмульсии Ilford G5 и облученную на ускорителе в Беркли пучком K^- -мезонов с импульсом 400 МэВ/с. При просмотре было отобрано для измерений ~ 1700 остано-

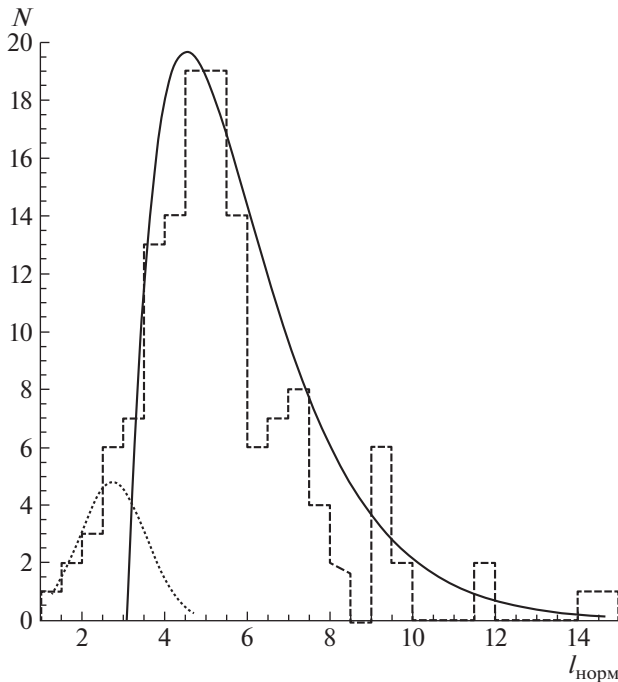


Рис. 2. Распределение количества событий N в зависимости от среднего просвета $\langle d \rangle$, нормированного на измерительную длину $R_{\text{изм}}$ ($l_{\text{норм}} = (\langle d \rangle / R_{\text{изм}}) \times 100$). Гистограмма — экспериментальный результат, сплошная кривая — распределение Максвелла, штриховая — нормальное распределение.

вок K^- -мезонов. В каждом взаимодействии проводилась классификация частиц: испарительные b -частицы, имеющие пробег $5 < R \leq 3500$ мкм; $g(gb)$ -частицы с $R > 3500$ мкм и $\beta \leq 0.7$ (относительная ионизация $I/I_0 \geq 1.4$, где I_0 — ионизация релятивистских частиц); s -частицы с $\beta > 0.7$ ($I/I_0 < 1.4$).

В [11] было показано, что наилучшая идентификация частиц по их массам получается при измерении $N(l)$ — количества просветов (d) — с длиной, больше заданной (l), нормированного на их среднюю величину $\langle d \rangle$. Распределение этой величины подчиняется экспоненциальному закону:

$$N(l) = N_0 \exp(-d/\langle d \rangle). \quad (4)$$

Здесь $\langle d \rangle$ — среднее значение d на той длине траектории частицы ($R_{\text{изм}}$), на которой проводились измерения просветов. В работе [11] подробно описаны преимущества такого метода идентификации частиц. Из них главные — это независимость параметра $d/\langle d \rangle$ от наклона их траектории в плоскости эмульсии и слабая, но все же заметная, зависимость от длин участков траекторий, где проведены измерения, если для всех частиц они начинаются от их остановки.

2.1. Измерение просветов

Измерение длин просветов проводилось на микроскопе KSM, связанном в линию с ЭВМ. Программа сопровождения позволяла контролировать результаты измерений. В каждом поглощении K^- -мезона выбирались для измерения gb -частицы. Величина просвета в треке определялась путем измерения трех координат (x, y, z) его начала и конца. По этим измерениям вычислялись: распределения по длинам d , $\langle d \rangle$ и длина трека ($R_{\text{изм}}$), на которой проводились эти измерения. Просветы измерялись не на полной длине траектории, а от остановки частицы до набора примерно равного числа измерений d для всех частиц. На рис. 1 приведены результаты наших измерений в соответствии с зависимостью (4). Как видно из данных этого рисунка, выделяются две группы частиц — одна обозначена темным кружком, а другая — светлым. Первая (многочисленная) — это в основном протоны, и $\sim 20\%$ — дейтроны [8, 7]. Вторая группа (светлые кружки) — это более тяжелые частицы, которые по ионизации заметно отличаются от протонов и дейтронов. Всего были измерены просветы на 155 траекториях частиц. Для трека каждой частицы проверялось (визуально), что пять значений величины $d/\langle d \rangle$ соответствуют зависимости (4). Таким образом, на рис. 1 показано распределение 775 значений нормированных просветов. Этот первый отбор частиц показал, что при поглощении K^- -мезонов возникают частицы тяжелее протонов и дейтронов, среди которых, возможно, находятся ^3H и ^3He .

2.2. Метод g, R

Ионизация всех этих отобранных частиц измерена на близких, но разных (по длине) участках траектории, поэтому для их сравнения необходимо нормировать ионизационные измерения на “измерительную длину” $R_{\text{изм}}$ следа частицы. Чтобы не потерять ^3H и ^3He , методом g , $R_{\text{изм}}$ были обработаны все данные (те же, что и в разд. 2.1). На рис. 2 показаны результаты этих измерений. Гистограммой показан экспериментальный результат — зависимость количества событий от отношения $l_{\text{норм}} = (\langle d \rangle / R_{\text{изм}}) \times 100$. Сплошная кривая — результат фитирования в соответствии с уравнением Максвелла $N(l_{\text{норм}}) = p_1((l_{\text{норм}} - p_2)/p_3^{**2}) \exp(-(l_{\text{норм}} - p_2)/p_3)$ [1], где p_i — параметры фитирования, а штриховая — нормальное распределение. Оказалось, что все события, обозначенные на рис. 1 светлым кружком, находятся в части гистограммы, описанной Гауссом. Экспериментальные данные невозможно описать (с разумным χ^2) только одним распределением —

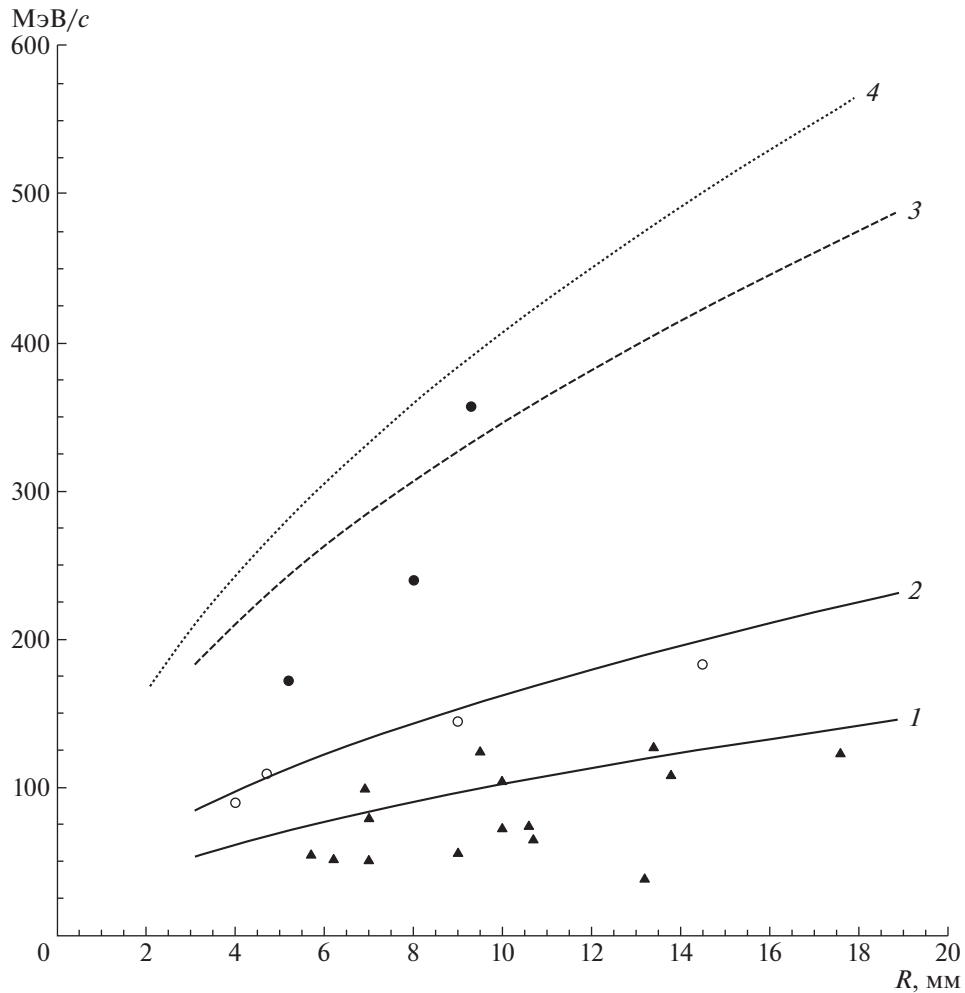


Рис. 3. Зависимость многократного рассеяния частицы $p\beta$ от пробега R до остановки. Расчетные кривые: 1 — протоны и дейтроны (точки \blacktriangle — прошедшие проверку (см. разд. 2.2)), 2 — тритий ${}^3\text{H}$, 3 — ${}^3\text{He}$, 4 — ${}^4\text{He}$.

Максвелла или Гаусса. В результате этого отбора для дальнейших измерений остались траектории 22 частиц ($l_{\text{норм}} \leq 3.5$).

2.3. Метод $p\beta, R$

Все события, которые на рис. 2 имеют $l_{\text{норм}} \leq 3.5$, были измерены по программе $p\beta, R$. Эмульсионная камера имела цифровую маркировку, которая позволяла переходить из слоя в слой, прослеживая траекторию частицы до ее остановки. Пробег R в эмульсии частиц, отобранных для дальнейшего измерения, имел величину от 4 до ~ 30 мм. Измерения многократного рассеяния проводились от места поглощения K^- -мезона и до заметного изменения ионизационных потерь. По этим измерениям вычислялась величина $p\beta$. На рис. 3 показаны результаты измерения для отобранных (предыдущим методом) 22 частиц зависимости $p\beta$ от пробега R . В результате этих трех отборов у нас

осталось из 155 частиц семь частиц (светлые и темные кружки) — кандидаты на ${}^3\text{H}$ и ${}^3\text{He}$, к которым был применен четвертый способ отождествления.

2.4. Метод $g^*, p\beta$

Для того чтобы использовать метод $g^*, p\beta$, необходимо оценить величину плотности зерен на треке частицы (ионизационные потери $g^* \sim dE/dx$). Известно, что трек заряженной частицы имеет просветы, а остальная часть трека — это сплошные зерна или отдельные блобы (сгусток из “слипшихся” зерен). Для оценки величины g^* мы из “измерительной длины” $R_{\text{изм}}$ трека частицы исключили суммарную длину просветов (Σd_i). Тогда $g^* = ((R_{\text{изм}} - \Sigma d_i)/r)/R_{\text{изм}}$ является оценкой величины ионизационных потерь частицы (здесь $r = 0.8$ мкм — средний размер зерна). Значение же $p\beta$ было измерено нами в предыдущем разд. 2.3. Результат зависимости g^* (в относительных единицах) от $p\beta$ для семи частиц показан на рис. 4.

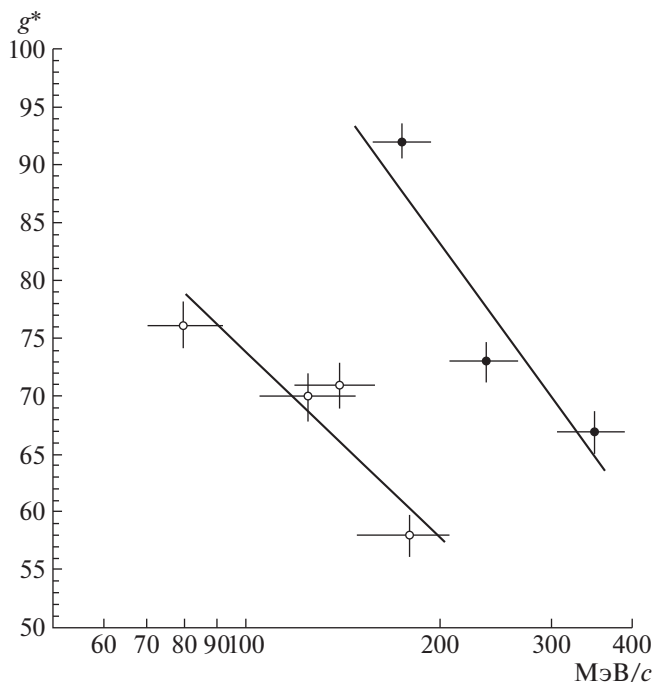


Рис. 4. Зависимость ионизационных потерь g^* (в отн. ед.) от многократного рассеяния $p\beta$ -частиц, идентифицированных как ${}^3\text{H}$ (\circ) и ${}^3\text{He}$ (\bullet).

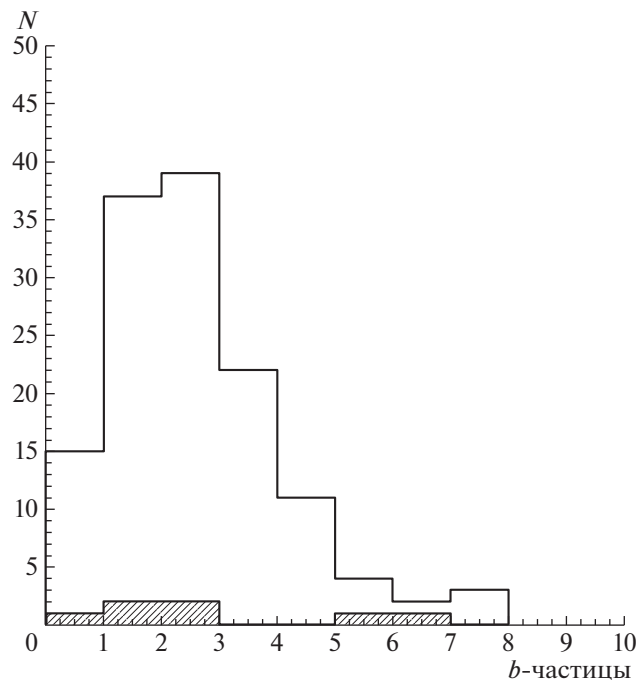


Рис. 5. Распределение количества событий поглощения K^- -мезонов в зависимости от множественности испарительных b -частиц. Заштрихованная часть гистограммы — события, в которых содержатся отождествленные ${}^3\text{H}$ и ${}^3\text{He}$.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Окончательный результат тестирования траекторий частиц четырьмя измерительными методами показан на рис. 4. Из оставшихся после 2-го метода отбора 22 частиц 15 были отфильтрованы третьим методом отождествления. Семь прошедших фильтрацию и оставшихся частиц отождествляются как ${}^3\text{H}$ (светлые кружки) и ${}^3\text{He}$ (темные). Прямые линии на рис. 4 соответствуют линейной зависимости g^* от $p\beta$ для ${}^3\text{H}$ и ${}^3\text{He}$ ([11], стр. 119). Использовать пятый метод для уточнения массы частиц (метод “постоянной саггиты”) невозможно из-за практического равенства масс: $M({}^3\text{H}) = 3.16997$, а $M({}^3\text{He}) = 3.16977$ (относительно ${}^{16}\text{O}$ [12]).

Ядерная фотоэмульсия имеет сложный ядерный состав [12]: $\sim 56\%$ — легкие ядра (${}^{12}\text{C}$, ${}^{14}\text{N}$, ${}^{16}\text{O}$) и $\sim 44\%$ — тяжелые ядра (${}^{108}\text{Ag}$, ${}^{80}\text{Br}$). По данным работы [2] при захвате ядром K^- -мезонов (энергия возбуждения ~ 500 мэВ), помимо пионов и гиперонов, испускаются испарительные частицы. Причем, до $\leq (3-4)$ b -частиц преимущественно из легких ядер, а $\geq (6-8)$ — из тяжелых [1]. На рис. 5 показано распределение количества событий поглощения K^- -мезонов в зависимости от множественности испарительных b -частиц. На гистограмме штриховкой показаны семь событий, отождествленных как ${}^3\text{H}$ и ${}^3\text{He}$. Утверждать, что в опыте наблюдается предпочтительное поглощение на легких ядрах при столь незначительной статистике, нет оснований. Взаимодействия K^- -мезонов с испусканием ${}^3\text{H}$ и ${}^3\text{He}$ происходят как на легких, так и на тяжелых ядрах.

Наблюдаемое нами практически одинаковое количество испускания ядер ${}^3\text{H}$ и ${}^3\text{He}$ ($W({}^3\text{H})/W({}^3\text{He}) \sim 1$) может служить указанием на то, что при поглощении K^- -мезонов в ядре наблюдается прямая реакция взаимодействия K^- с ${}^4\text{He}$.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. I. Dostrovsky, P. Rabinowitz, and R. Bivins, Phys. Rev. **111**, 1659 (1958); I. Dostrovsky, Z. Fraenkel, and G. Friedlander, Phys. Rev. **116**, 683 (1959).
2. R. Chasman, Phys. Rev. **122**, 902 (1961).
3. А. О. Вайсенберг, *Мю-мезон* (Наука, Москва, 1964); Н. Morinaga and W. F. Fry, Nuovo Cimento **10**, 308 (1953).
4. А. О. Вайсенберг, Э. Д. Колганова, Н. В. Рабин, ЖЭТФ **47**, 1262 (1964) [Sov. Phys. JETP **20**, 854 (1965)].

5. В. В. Дубинина, Н. П. Егоренкова, Е. А. Пожарова, В. А. Смирнитский, Письма в ЖЭТФ **98**, 752 (2013) [JETP Lett. **98**, 661 (2013)]; В. В. Дубинина, Н. П. Егоренкова, Е. А. Пожарова, В. А. Смирнитский, ЯФ **78**, 69 (2015) [Phys. Atom. Nucl. **78**, 65 (2015)]; В. М. Колыбасов, ЯФ **3**, 965 (1966).
6. V. R. Veirs and R. A. Burnstein, Phys. Rev. D **1**, 1883 (1970).
7. P. A. Katz, K. Bunnell, M. Derrick, T. Fields, L. G. Hyman, and G. Keyes, Phys. Rev. D **1**, 1267 (1970).
8. H. Davis, F. Oppenheimer, W. L. Knight, F. R. Stannard, and O. Treutler, Nuovo Cimento A **53**, 313 (1968); C. Vander Velde-Wilquet, J. Sacton, J. H. Wickens, D. N. Tovee, and D. H. Davis, Nuovo Cimento A **39**, 538 (1977).
9. T. Sekihara, J. Yamagata-Sekihara, D. Jido, and Y. Kanada-En'yo, arXiv: 1204.3978v2 [nucl-th].
10. И. С. Шапиро, В. М. Колыбасов, ЖЭТФ **44**, 270 (1963) [Sov. Phys. JETP **17**, 185 (1963)].
11. С. Пауэлл, П. Фаулер, Д. Перкинс, *Исследование элементарных частиц фотографическим методом* (Изд-во иностр. лит., Москва, 1962).
12. *Справочник по ядерной физике* (Физматгиз, Москва, 1963).

CHARGED PARTICLES WITH AN ENERGY GREATER THAN EVAPORATION ENERGY, ARISING FROM THE ABSORPTION OF K^- MESONS BY NUCLEI

V. V. Dubinina, N. P. Egorenkova, E. A. Pozharova, V. A. Smirnitsky

National Research Center Kurchatov Institute — ITEP, Moscow, Russia

It is shown, that during stopping and absorption of K^- meson by nuclei there arise particles appearance of which is impossible to reconcile with the thermodynamic theory of evaporation. The identification of these particles by various methods made it possible to estimate, practically identical, the yields of ^3H and ^3He . This result may serve as an indication that during the absorption of K^- mesons, direct reactions with ^4He are observed in the nucleus.