

СЗУБ.4В

Б - 287

14/6-7

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА



P1 - 6961

1694/2-73

Ю.А.Батусов, Ж.Ганзоринг, И.В.Дудова,  
Б.П.Осипенко, В.М.Сидоров, В.А.Халкин, Д.Чултэм

ДВОЙНАЯ ПЕРЕЗАРЯДКА  $\pi^+$ -МЕЗОНОВ  
НА ЯДРАХ  $^{209}\text{Bi}$

**1973**

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

P1 - 6961

Ю.А. Батусов, Ж.Ганзоринг, И.В. Дудова,  
Б.П. Осипенко, В.М. Сидоров, В.А. Халкин, Д. Чултэм

ДВОЙНАЯ ПЕРЕЗАРЯДКА  $\pi^+$ -МЕЗОНОВ  
НА ЯДРАХ  $^{209}\text{Bi}$

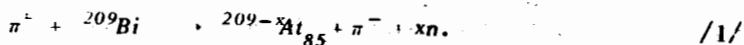
*Направлено в ЯФ*

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

В результате экспериментальных исследований двойной перезарядки пионов в энергетической области до 300 Мэв к настоящему времени установлен ряд особенностей этого процесса, таких как большое энерговыделение в ядре-мишени, разница в полных сечениях для пионов разных знаков заряда, зависимость сечения от массы ядер и первичной энергии пионов и другие [1-6]. Однако имеющиеся экспериментальные данные недостаточны для того, чтобы найти количественную связь этих особенностей реакции двойной перезарядки пионов со структурой атомных ядер. Все эксперименты до настоящего времени сводились, в основном, к измерению полного и дифференциального сечений реакции путем регистрации вторичных пионов. Анализ вторичных заряженных частиц, образованных при расщеплении ядра-мишени, проведен только для ядер фотоэмульсии [5-6]. Совершенно не идентифицировались конечные тяжелые ядра среди продуктов двойной перезарядки пионов.

Для выяснения влияния структуры ядра на вероятность двойной перезарядки пионов и для использования ее в исследованиях по ядерной физике, необходимо систематическое накопление данных о сечениях этой реакции для различных ядер. Особенно интересно изучение каналов упругой двойной перезарядки, при которой исходное ядро сохраняет число нуклонов неизменным.

Настоящая работа посвящена исследованию двойной перезарядки  $\pi^-$ -мезонов на ядрах висмута. Эксперименты были предприняты с целью изучения таких каналов реакции, в которых при двойной перезарядке  $\pi^-$ -мезона из ядра мишени не испускаются заряженные частицы и заряд исходного ядра увеличивается на две единицы:



Идентификация изотопов астата или дочернего продукта - полония производилась путем регистрации  $\alpha$ -частиц и измерения их энергии. Эксперименты выполнялись на синхротроне

ОИЯИ. Мишень из химически чистого препарата окиси висмута -  $Bi_2O_3$  толщиной  $\ell = 5 \text{ г/см}^2$ , весом 300 г облучалась в течение пяти часов в пучке  $\pi^+$ -мезонов с энергией 90 Мэв. Через 30 мин. после окончания облучения начиналось выделение астата. Выделение атомов астата, образованных в результате реакции, производилось специальным химическим методом, разработанным В.А.Халкиным и др. [7]. Продолжительность этой процедуры составляла 1,5 часа. Химический выход равнялся  $94 \pm 3\%$  и коэффициент очистки от полония и других элементов - порядка  $10^6$ .

Выделенный астат наносился на серебряный диск площадью  $1 \text{ см}^2$ , который одной стороной был припаян к стеклянной подложке. Спектр  $\alpha$ -частиц измерялся в течение 15 часов на полупроводниковом спектрометре с  $Au-Si$ -детектором и амплитудным анализатором на 512 каналов. В каждом эксперименте мезонами облучались последовательно две мишени. Суммирование  $\alpha$ -спектров, измеренных отдельно для каждого препарата, производилось в памяти анализатора.

Спектрометр калибровался по стандартным источникам  $^{239}Pu$ ,  $^{241}Am$  и  $^{244}Cm$ . При геометрии, близкой к  $2\pi$ , разрешение в области энергий 5-6 Мэв было около 60 кэв /рис. 1а/. Неоднократно производились контрольные опыты с препаратом  $Bi_2O_3$ , не облученным  $\pi$ -мезонами, для определения возможного  $\alpha$ -загрязнения в химической лаборатории. Заметной  $\alpha$ -активности не наблюдалось ни в одном из них /рис. 1б/. Исследовался также фон спектрометра без источника. Было выяснено, что при энергиях выше 2 Мэв спектрометр не имеет собственного фона /рис. 1в/.

Результаты измерения спектра  $\alpha$ -частиц для препаратов астата, выделенных из висмута после облучения  $\pi^+$ -мезонами, показаны на рис. 2.

На том же рисунке представлен спектр  $\alpha$ -частиц для препаратов астата, выделенных из мишени после облучения  $\pi^-$ -мезонами. Поток мезонов, прошедших через мишени, в обоих случаях были одинаковы. Облучение  $\pi^-$ -мезонами является фоновым опытом, который позволяет в данном случае наиболее полно исключить возможные имитирующие эффекты.

На спектрограмме четко зарегистрированы четыре линии: 5,3; 5,76; 5,87 и 7,45 Мэв. Однако линия 5,3 Мэв зарегистрирована также и в фоновом опыте.

При расшифровке спектрограмм были использованы данные о параметрах  $\alpha$ -излучения долгоживущих изотопов астата и их дочерних изотопов полония, приведенные в таблице 1 [8]. Согласно этим данным, линии спектра отнесены, соответственно, к изотопам  $^{210}Po$  /5,3 Мэв/,  $^{207}At$  /5,76 Мэв/,  $^{211}At$  /5,87 Мэв/ и  $^{211}Po$  /7,45 Мэв/.

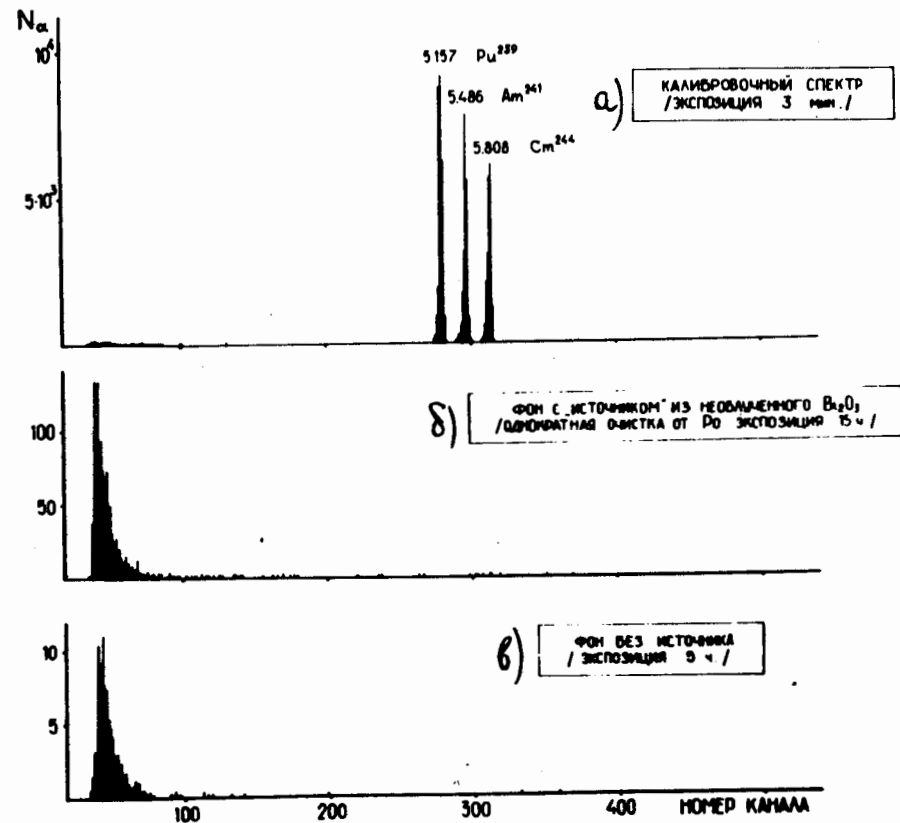


Рис. 1. Калибровочные и фоновые характеристики спектрометра. а/ калибровочные спектры  $^{239}Pu$ ,  $^{241}Am$  и  $^{244}Cm$ . б/ фоновый спектр из необлученного  $Bi_2O_3$ . в/ фоновый спектр без источника.

Рис. 2. Результаты измерения спектров  $\alpha$ -частиц для препа-  
ратор астага, выделенных после облучения  $\alpha/\pi^+$ -мезонами,  
 $6/\pi^-$ -мезонами.

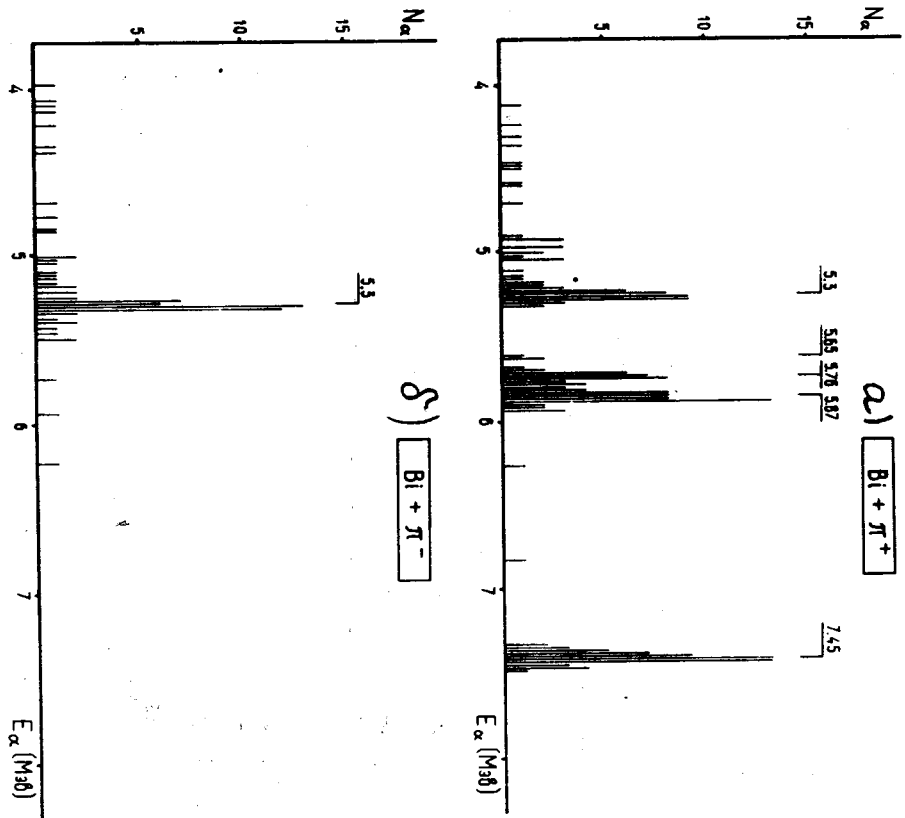


Таблица 1

A	At				Po			
	$T_{1/2}$	$\alpha_1$	$E_\alpha$ [MeV]	$\Lambda_1$ [сек]	$T_{1/2}$	$\alpha_2$	$E_\alpha$ [MeV]	$\Lambda_2$ [сек]
205	26 мин	0.18	5.90	15.0	1.8 час	$7 \cdot 10^{-4}$	5.25	$5 \cdot 10^{-2}$
206	32 мин	0.88	5.70	209.9	8.8 дн	$5 \cdot 10^{-2}$	5.22	$6 \cdot 10^{-2}$
207	1.8 час	0,10,	5.76	355.2	5.7 час	$10^{-4}$	5.11	0.2
208	1.6 час	$5 \cdot 10^{-3}$	5.65	15.0	2.93 г.	0.99	5.11	2.0
209	5.5 час	$5 \cdot 10^{-2}$	5.648	463.5	103 г.	0.99	4.88	0.05
		$6 \cdot 10^{-4}$	5.36	4.1				
210	8.3 час	$7 \cdot 10^{-4}$	5.44	4.1	138.4 дн	1.0	5.30	21.0
		$5 \cdot 10^{-4}$	5.52	4.9				
211	7.21 час	0.409	5.868	3936.0	0.52 сек	0.99	7.45	6013.0

Здесь  $T_{1/2}$  - период полураспада изотопа с массовым числом  $A$ ;  $a_1$  и  $a_2$  - относительные вероятности  $\alpha$ -распада изотопов астата и полония;  $E_\alpha$  - энергия  $\alpha$ -частиц.

Значения  $\Lambda_1$  и  $\Lambda_2$ , приведенные в таблице, вычислены по формулам:

$$\Lambda_1 = a_1 \cdot \frac{1}{\lambda_1} (1 - e^{-\lambda_1 t_1}) e^{-\lambda_1 t_2} (1 - e^{-\lambda_1 t_3})$$

$$\Lambda_2 = (1 - a_1) a_2 \cdot \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} (1 - e^{-\lambda_1 t_1}) e^{-\lambda_1 t_2} \left[ \frac{1}{\lambda_1} (1 - e^{-\lambda_1 t_3}) - \frac{1}{\lambda_2} (1 - e^{-\lambda_2 t_3}) \right],$$

где  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  - константы распада изотопа астата и полония;  $t_1$  - продолжительность облучения,  $t_2$  - интервал времени от момента окончания облучения до начала измерения,  $t_3$  - время измерения.

По данным этой таблицы можно было также заключить, что эффект от реакции /1/ ожидается на спектрограмме в интервале энергий  $\alpha$ -частиц 5,648 - 5,90 Мэв для изотопов астата -  $^{209-205}At$  и в интервале 4,88 - 5,25 Мэв - для соответствующих им дочерних изотопов полония. Данный эксперимент особенно чувствителен к регистрации изотопов астата - 209, 207 и 206, для которых значения  $\Lambda_1$  велики.

Для изотопов астата в ожидаемом интервале зарегистрировано две линии:  $^{211}At$  /5,87 Мэв/ и  $^{207}At$  /5,76 Мэв/. Изотоп астата - 211 строго идентифицирован по  $\alpha$ -линии 5,87 Мэв и сопряженной с ней линии 7,45 Мэв, относящейся к дочернему продукту -  $^{211}Po$ . Фон при энергиях в опыте с  $\pi^-$ -мезонами отсутствует, поэтому образование  $^{211}At$  является результатом облучения висмута  $\pi^+$ -мезонами. Однако этот изотоп не может быть образован в реакциях двойной перезарядки. Его появление есть результат вторичных реакций  $\alpha$ -частиц с ядрами висмута.

Энергия  $\alpha$ -линии  $^{207}At$  /5,76 Мэв/ хорошо определяется по ее верхней границе. Однако размытие этой линии в низкоэнергетической части, возможно, маскирует линию  $^{206}At$  /5,70 Мэв/. Для изотопов полония в ожидаемом интервале энергий интенсивных  $\alpha$ -линий не обнаружено. При энергии 5,3 Мэв, близкой к этому интервалу, зафиксирована линия

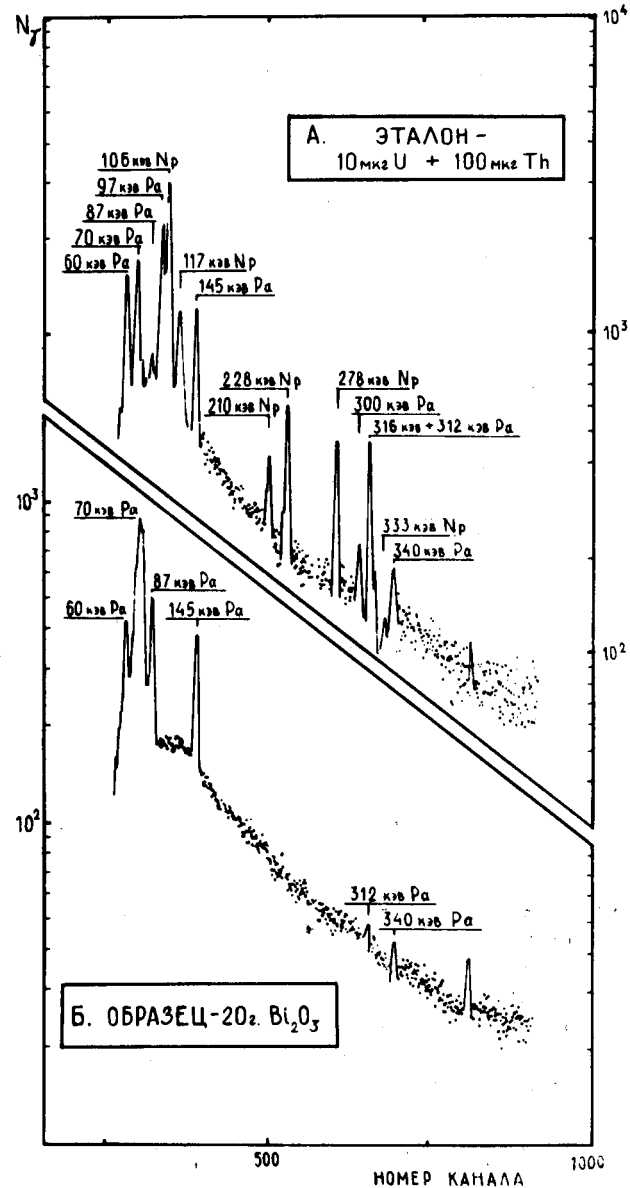
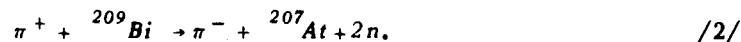


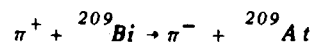
Рис. 3. Спектрограммы примесей тория и урана в мишени  $Bi_2O_3$ , определяемых методами активационного анализа на резонансных нейтронах. А/ Эталон 10 мкг U + 100 мкг Th; Б/ Образец - 20 г  $Bi_2O_3$ .

$\alpha$ -излучения  $^{210}\text{Po}$ . Появление полония-210 в рабочем и фоновом облучении отнесено за счет реакций  $^{209}\text{Bi}(n, \gamma)^{210}\text{Bi}$ ,  $\beta$ ,  $^{210}\text{Po}$ , которые могли быть вызваны нейтронами, возникающими при работе ускорителя или вторичными нейтронами, образованными в мишени.

Итак, эффектом реакций двойной перезарядки  $\pi^+$ -мезонов на ядрах висмута в данном эксперименте является образование астата-207, который зарегистрирован по  $\alpha$ -излучению,  $E_\alpha = 5,76$  Мэв. Интегральная интенсивность  $\alpha$ -линии позволяет определить сечение реакции:



Для реакции упругой перезарядки:



может быть произведена лишь оценка верхней границы величины сечения по трем отсчетам, соответствующим  $\alpha$ -частицам с энергией 5,65 Мэв.

Сечения реакций  $^{209}\text{Bi}(\pi^+, \pi^- xn)^{209-x}\text{At}$  определялись из соотношения:

$$S_1 = n \cdot N \cdot f \cdot \sigma_x \cdot \Lambda_1 \cdot Y \cdot G \cdot \epsilon, \quad /1/$$

- $S_1$  - интенсивность  $\alpha$ -линии,
- $N$  - число ядер висмута в мишени,
- $f$  - поток  $\pi^+$ -мезонов,
- $Y$  - химический выход астата,
- $G$  - геометрический фактор,
- $\epsilon$  - эффективность регистрации  $\alpha$ -частиц,
- $n$  - число циклов эксперимента.

Величина сечения реакции /2/ получена равной

$$\sigma_{207}(\pi^+, \pi^- 2n) = (12 \pm 3) 10^{-29} \text{см}^2.$$

Здесь указана лишь статистическая ошибка измерений и не учитывался возможный вклад астата-206. Оценка верхней гра-

ницы сечения упругой перезарядки  $\pi^+$ -мезонов на ядрах висмута дает значение

$$\sigma_{209}(\pi^+, \pi^-) \leq 1 \cdot 10^{-29} \text{см}^2.$$

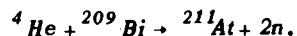
Таким образом, при двойной перезарядке  $\pi^+$ -мезонов на ядрах висмута в реакциях без испускания заряженных частиц преобладающую роль имеют каналы с вылетом двух или нескольких нейтронов. В работе /4/ было получено, что суммарное сечение всех каналов реакций двойной перезарядки  $\pi^+$ -мезонов без испускания заряженных частиц на ядрах серебра и брома составляет примерно 5% от полного сечения двойной перезарядки. Учитывая, что полное сечение двойной перезарядки  $\pi^+$ -мезонов на ядрах висмута составляет несколько миллибарн /по результатам измерений на свинце /3,6/ /, можно отметить, что результат данного эксперимента находится в согласии с полученными ранее.

Представляет интерес измерение и других парциальных сечений каналов реакции двойной перезарядки  $\pi^+$ -мезонов, в результате которых образуется ядро с определенными значениями  $A$  и  $Z$ .

При увеличении интенсивности мезонных пучков и разрешающей способности спектрометра метод, использованный в настоящей работе, позволяет определить относительные вероятности каналов с испусканием одного или нескольких нейтронов. Заметим, что в исследуемых реакциях вторичные нейтроны могут быть образованы лишь в результате возбуждения остаточного ядра и не являются продуктом прямого выбивания. Поэтому в данном случае исследуется процесс, при котором  $\pi$ -мезон взаимодействует с ядром так, что часть его энергии успевает распределиться по многим нуклонам, вызывая возбуждение ядра в целом с последующим испусканием вторичных нейтронов. Изучение таких процессов является важным для выяснения механизма двойной перезарядки  $\pi$ -мезонов и для исследования возбужденных состояний ядер, образованных в результате этих реакций.

Появление астата-211 при облучении препарата окиси висмута  $\pi^+$ -мезонами с энергией 90 Мэв, т.е. появление изотопа с атомным весом более высоким, чем исходное ядро мишени, потребовало специального рассмотрения возможных реакций, в которых он может быть образован. Влияние примесей более тяжелых элементов было полностью исключено, поэтому наблю-

даемый эффект был отнесен за счет вторичных реакций\*. Принимая во внимание, что сечение ( $\alpha, 2n$ )-реакции в висмуте очень велико  $\sim 1$  барн/ $10^9$  можно заключить, что образование астата-211 происходит в реакции



Энергия вторичных  $\alpha$ -частиц, которые могут вызывать такую реакцию в висмуте, должна быть достаточно высока /25-35 Мэв/. Механизм образования их  $\pi^+$ -мезонами сравнительно низкой энергии требует дальнейших исследований. Однако из того факта, что эффект отсутствует при облучении  $\pi^-$ -мезонами, следует, что реакции поглощения или рассеяния мезонов в данном случае несущественны. Единственным процессом, который может привести к столь значительной разности в облучениях  $\pi^+$  и  $\pi^-$ -мезонами, является процесс двойной перезарядки. Мы попытались определить сечение образования  $\alpha$ -частиц по интенсивности  $\alpha$ -линий астата и полония. Оно оказалось равным:

$$\sigma(\pi^+ + \text{Bi} \rightarrow \alpha + \dots) \sim 6 \cdot 10^{-27} \text{ см}^2.$$

Полученная величина примерно равна полному сечению двойной перезарядки  $\pi^+$ -мезонов. Это не противоречит данным работы<sup>3/</sup>, в которой показано, что в основных каналах реакции двойной перезарядки  $\pi^+$ -мезонов вылетают из ядра 1-2 заряженные частицы. Спектр заряженных частиц в однолучевых "звездах", образованных в фотозмультисин при двойной перезарядке  $\pi^+$  и  $\pi^-$ -мезонов, показан на рис. 4. Из этих данных видно, что при двойной перезарядке  $\pi^+$ -мезонов в спектре преобладают тяжелые частицы с пробегами, превышающими 250 мкм. Для  $\alpha$ -частиц такие пробеги соответствовали бы энергиям  $E_\alpha > 25$  Мэв.

В связи с этим была высказана гипотеза о том, что в тяжелых ядрах двойная перезарядка  $\pi^+$ -мезонов интенсивно происходит на нуклонных кластерах, в данном случае на кластерах ( $4n$ ) по реакции  $\pi^+ + (4n) \rightarrow \pi^- + \alpha$ . Для проверки такой ги-

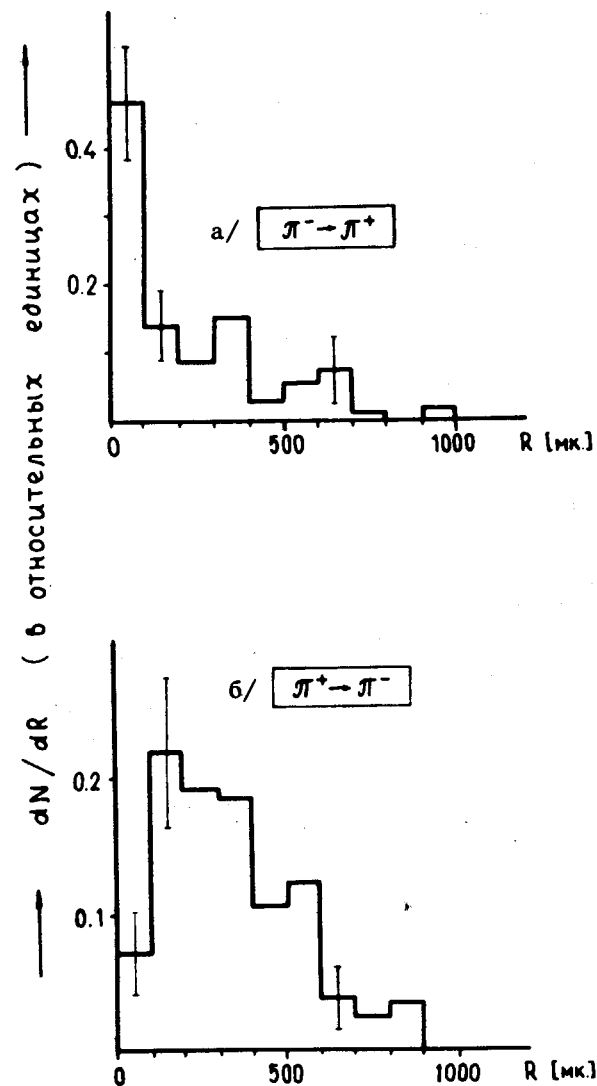


Рис. 4. Распределение событий двойной перезарядки а/  $\pi^-$  и б/  $\pi^+$ -мезонов по пробегу тяжелой частицы в однолучевых "звездах" в фотозмультисин.

\* Содержание примесей более тяжелых элементов - тория и урана в мишени  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  определялось методом активационного анализа на резонансных нейтронах. Было найдено, что их содержание относительно висмута составляет примерно  $10^{-6}$  а/а для ядер тория и менее, чем  $10^{-7}$  а/а - для ядер урана. Сечение образования  ${}^{211}\text{At}$  в реакциях скалывания  $\text{U}$  и  $\text{Th}$  не превышает  $10^{-27}$  см $^2$ / $9$ , поэтому фон от таких реакций пренебрежимо мал и составляет  $10^{-4}$  % /см. рис. 3/.



потезы большой интерес представляют эксперименты, в которых регистрируются совпадения высокоэнергетических  $\alpha$ -частиц и актов двойной перезарядки  $\pi^+$ -мезонов на тяжелых ядрах, таких как  $^{208}\text{Pb}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{238}\text{U}$ .

Авторы благодарны проф. В.П. Джелепову за интерес и внимание к работе, а также проф. Л.И. Лалидусу и С.М. Поликанову за полезные обсуждения и советы.

#### Литература

1. Ю.А. Батусов, С.А. Бунятов, В.М. Сидоров, В.А. Ярба. ЖЭТФ, 46, 817 /1964/.
2. Ю.А. Батусов, С.А. Бунятов, В.М. Сидоров, В.А. Ярба, ЯФ, 1, 383 /1965/.
3. Ю.А. Батусов, С.А. Бунятов, В.М. Сидоров, В.А. Ярба. ЯФ, 3, 309 /1966/.
4. Ю.А. Батусов, С.А. Бунятов, В.М. Сидоров, В.А. Ярба, ЯФ, 6, 998 /1967/.
5. Ю.А. Батусов, Б.Ж. Залиханов, В.М. Сидоров, Д. Туwendендорж, В.А. Ярба. ЯФ, XI, 736 /1970/.
6. F.Becker, Yu.A.Batusov. Rivista del Nouv. Cim., 1, 309 (1971).
7. М. Бочварова, До Ким Тюнг, И. Дудова, Ю.В. Норсеев, В.А. Халкин. Радиохимия, 14, 858 /1972/.
8. С.М. Lederer. "Table of Isotopes", N.Y., 1967.
9. G.Rudstam. Zeitschrift fur Naturforschung 21a, 1027 (1966).  
А.К. Лаврухина, Р.И. Кузнецова. Препринт ОИЯИ, 6-3699, 127, Дубна, /1968/.
10. W.J.Ramler, J.Wing, D.J.Henderson and J.R.Huizenga. Phys.Rev., 114, 154 (1954).

Рукопись поступила в издательский отдел  
22 февраля 1973 года.