

## КАНАЛЫ ФРАГМЕНТАЦИИ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЯДЕР ${}^7\text{Be}$ В ПЕРИФЕРИЧЕСКИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ

Н. Г. Пересадыко<sup>1)</sup>, Ю. А. Александров<sup>1)</sup>, В. Браднова<sup>2)</sup>, С. Вокал<sup>2)</sup>, С. Г. Герасимов<sup>1)</sup>, В. А. Дронов<sup>1)</sup>, П. И. Зарубин<sup>2)</sup>, И. Г. Зарубина<sup>2)</sup>, А. Д. Коваленко<sup>2)</sup>, В. Г. Ларионова<sup>†1)</sup>, А. И. Малахов<sup>2)</sup>,  
П. А. Рукояткин<sup>2)</sup>, В. В. Русакова<sup>2)</sup>, С. П. Харламов<sup>1)</sup>, В. Н. Фетисов<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия

<sup>2)</sup>Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, Россия, (ОИЯИ)

<sup>†)</sup>скончалась

На нуклотроне ЛВЭ ОИЯИ (г. Дубна) ускорены ядра  ${}^7\text{Li}$  и, после их перезарядки на внешней мишени, сформирован вторичный пучок ядер  ${}^7\text{Be}$  с энергией 1.23 ГэВ на нуклон. В пучке ядер  ${}^7\text{Be}$  облучены камеры ядерной фотоэмульсии. Средний пробег для неупругих взаимодействий ядер  ${}^7\text{Be}$  в фотоэмульсии  $\lambda_{\text{inel}}({}^7\text{Be}) = (14.0 \pm 0.8)$  см в пределах ошибок совпадает со средними пробегами для неупругих взаимодействий ядер  ${}^6\text{Li}$  и  ${}^7\text{Li}$ . Более 10% неупругих взаимодействий ядер  ${}^7\text{Be}$  составляют периферические взаимодействия, в которых сумма зарядов релятивистских фрагментов равна заряду ядра  ${}^7\text{Be}$  и где не образуются заряженные мезоны. В составе двухзарядных фрагментов ядер  ${}^7\text{Be}$  наблюдается необычное для стабильных ядер соотношение изотопов гелия – содержание фрагментов  ${}^3\text{He}$  вдвое превышает содержание фрагментов  ${}^4\text{He}$ . В 50% периферических взаимодействий содержится по два двухзарядных фрагмента. В работе приводятся каналы фрагментации ядер  ${}^7\text{Be}$  на заряженные фрагменты. В 50% фрагментация ядер  ${}^7\text{Be}$  происходит только на заряженные фрагменты без испускания нейтронов. Среди них доминирует канал ( ${}^4\text{He}+{}^3\text{He}$ ), по 10% составляют каналы ( ${}^4\text{He}+d+p$ ) и ( ${}^6\text{Li}+p$ ). Зарегистрировано два события без испускания нейтронов в трехчастичных каналах ( ${}^3\text{He}+t+p$ ) и ( ${}^3\text{He}+d+d$ ). Средний пробег для когерентной диссоциации релятивистских ядер  ${}^7\text{Be}$  на  ${}^3\text{He}+{}^4\text{He}$  равен  $7 \pm 1$  м. Основные особенности фрагментации релятивистских ядер  ${}^7\text{Be}$  в таких периферических взаимодействиях объясняются двухкластерной структурой  ${}^3\text{He}+{}^4\text{He}$  ядра  ${}^7\text{Be}$ .

PACS: 21.45.+v – Few-body systems, 23.60+e –  $\alpha$  Decay , 25.10.+s – Nuclear reactions involving few-body systems

## ОБЛУЧЕНИЕ ЭМУЛЬСИЙ В ПУЧКЕ ЯДЕР ${}^7\text{Be}$

Для формирования пучка ядер  ${}^7\text{Be}$  на нуклотроне ЛВЭ ОИЯИ ускорялись ядра  ${}^7\text{Li}$  до энергии  $2.87 Z$  ГэВ. Выведенный из ускорителя пучок ядер  ${}^7\text{Li}$  направлялся на мишень из оргстекла. Ядра  ${}^7\text{Be}$ , образованные в мишени в процессе перезарядки ядер  ${}^7\text{Li}$ , с помощью магнитных элементов фокусировались и формировались во вторичный пучок. Заряды частиц в сформированном пучке определялись по потерям энергии частиц в сцинтилляционном мониторе. По этим измерениям примесь частиц с зарядом  $Z = 3$  в пучке составляет 7% от числа частиц с зарядом  $Z = 4$ .

В пучке ядер  ${}^7\text{Be}$  были облучены фотоэмульсионные камеры, собранные из слоев ядерной фотоэмульсии толщиной 550 мкм и размером 10 x 20 см [1]. При облучении слои фотоэмульсии располагались параллельно пучку ядер  ${}^7\text{Be}$  длинной стороной вдоль направления пучка так, чтобы пучковые частицы входили в торец слоя фотоэмульсии. В работе использовалась стандартная фотоэмульсия БР-2, в которой визуально легко идентифицируются однозарядные и двухзарядные релятивистские частицы. Треки релятивистских частиц с зарядом больше двух определялись по плотности просветов в следах частиц, что достигалось компьютерным анализом оцифрованного изображения поля зрения на микроскопе с автоматическим слежением по следу. По результатам измерения зарядов частиц в фотоэмульсии доля трехзарядных частиц в пучке составляет примерно 15% от частиц с зарядом, равным четырем. Для поиска взаимодействий ядер  ${}^7\text{Be}$  в фотоэмульсии на микроскопе визуально выбирались следы с наибольшей плотностью ионизации.

СРЕДНИЙ ПРОБЕГ ДЛЯ НЕУПРУГИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ЯДЕР  ${}^7\text{Be}$  В  
ФОТОЭМУЛЬСИИ

Поиск неупругих ядро-ядерных взаимодействий в слоях фотоэмульсии проводился прослеживанием на микроскопе при увеличении  $\times 900$  следов пучковых частиц от входа частиц в фотоэмульсию. Для определения среднего свободного пробега неупругих взаимодействий ядер  ${}^7\text{Be}$  в фотоэмульсии  $\lambda({}^7\text{Be})$  использован массив из 294 неупругих взаимодействий, зарегистрированных на длине 41.222 м в одной эмульсионной камере. В табл. 1 вместе с результатом, полученным для ядра  ${}^7\text{Be}$ , приведены значения средних свободных пробегов неупругих взаимодействий ядер  ${}^6\text{Li}$  и  ${}^7\text{Li}$  в фотоэмульсии, определенные в работах [2-7]. Измеренные значения для всех этих ядер в пределах ошибок практически совпадают. В табл. 1 приводятся также значения, вычисленные по геометрической модели с наборами параметров, использованных в работах [2-7] для описания средних свободных пробегов неупругих взаимодействий в ядерной фотоэмульсии ядер с однородной плотностью. Меньшие значения экспериментальных значений пробегов относительно вычисленных для всех этих ядер объясняются дополнительным вкладом периферических неупругих взаимодействий ядер, имеющих слабосвязанную кластерную структуру.

#### ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ ФРАГМЕНТОВ И КАНАЛЫ ФРАГМЕНТАЦИИ ЯДЕР ${}^7\text{Be}$ В ПЕРИФЕРИЧЕСКИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ В ЭМУЛЬСИИ

Среди 1400 зарегистрированных неупругих ядро-ядерных взаимодействий содержится более 200 периферических взаимодействий, в которых суммарный заряд  $Q$  релятивистских частиц с углами вылета внутри конуса  $15^\circ$  равен заряду первичного ядра  ${}^7\text{Be}$ . Примерно в 150 периферических взаимодействиях не наблюдается образования заряженных мезонов. В таких взаимодействиях структурные особенности ядра наиболее сильно сказываются на характере фрагментации ядра, в первую очередь, на зарядовом и массовом составе фрагментов. В табл. 2 приведена зарядовая топология таких событий. Отмечены отдельно числа событий, не содержащих фрагментов мишени ( $n_b = 0$ ), и событий, содержащих один или несколько фрагментов ядра мишени ( $n_b > 0$ ). В половине взаимодействий содержится по два двухзарядных фрагмента, столько же событий содержат по одному гелиевому и по два однозарядных фрагмента. В 10% событий содержится релятивистское ядро  $\text{Li}$  в сопровождении однозарядного фрагмента. Большая доля событий, представляющих собой диссоциацию ядер  ${}^7\text{Be}$  на два гелиевых фрагмента, указывает на высокую вероятность такого типа кластеризации в структуре ядра  ${}^7\text{Be}$ .

Исследование изотопного состава фрагментов проводилось путем измерения многократного кулоновского рассеяния частиц в фотоэмульсии. Определялись значения  $p\beta c$ , где  $p$  – импульс, а  $p\beta c$  – скорость частицы. Были измерены импульсы однозарядных и двухзарядных частиц в 240 взаимодействиях ядер  ${}^7\text{Be}$  с ядрами фотоэмульсии. Экспериментальное распределение релятивистских

двухзарядных частиц, в зависимости от  $p\beta c$  удовлетворительно описывается двумя функциями Гаусса с максимумами при значениях  $p\beta c$  4.5 ГэВ и при 6.3 ГэВ. Относительное содержание  ${}^3\text{He}$  и  ${}^4\text{He}$  фрагментов, оцениваемое по площадям под аппроксимирующими кривыми, составляет 70% и 30%. При взаимодействиях всех других релятивистских ядер, ранее исследованных в фотоэмульсии, содержание  ${}^4\text{He}$  превышает содержание  ${}^3\text{He}$  фрагментов. Такое необычное соотношение содержания гелиевых изотопов, наблюдаемое во взаимодействиях ядер  ${}^7\text{Be}$ , объясняется двухкластерной структурой ядра  ${}^7\text{Be}$ , в которой не входящие в  $\alpha$ -частичный остов ядра нуклоны образуют кластер  ${}^3\text{He}$ . Распределение однозарядных релятивистских частиц по величине  $p\beta c$  в интервале до  $p\beta c = 5$  ГэВ удовлетворительно описывается двумя функциями Гаусса с максимумами при  $p\beta c = 1.5$  ГэВ и 3.2 ГэВ. Соотношение числа протонов к числу дейтронов оценивается равным 3:1. Число частиц с импульсами более 5 ГэВ/с составляет около 2% полного числа однозарядных фрагментов. По этим результатам измерений в каждом событии были определены массы фрагментов и идентифицированы каналы фрагментации ядра  ${}^7\text{Be}$ .

В табл. 3 приведены числа событий, зарегистрированных в различных каналах фрагментации ядер  ${}^7\text{Be}$ . Примерно в 50% реакция происходит без испускания нейтральных частиц. Среди них заметно доминирует канал  $({}^4\text{He}+{}^3\text{He})$ , по 10% составляют каналы  $({}^4\text{He}+d+p)$  и  $({}^6\text{Li}+p)$ . Зарегистрировано два события без испускания нейтронов в трехчастичных каналах  $({}^3\text{He}+t+p)$  и  $({}^3\text{He}+d+d)$ . Реакции перезарядки ядер  ${}^7\text{Be}$  в ядра  ${}^7\text{Li}$  среди событий без сопровождения других вторичных заряженных частиц не было зарегистрировано.

События, содержащие только два гелиевых фрагмента, представлены на рис. 1 в виде точек, координатами которых служат измеренные значения  $p\beta c$  фрагментов. За абсциссу принято большее значение  $p\beta c_{\text{max}}$  в событии и за ординату принято меньшее значение  $p\beta c_{\text{min}}$ . Практически все события по оси ординат располагаются ниже значения 5 ГэВ. Это значение принято за нижнюю границу  $p\beta c$  для ядер  ${}^4\text{He}$ . На рис. 1 события  $({}^3\text{He}+{}^3\text{He})$  располагаются слева от границы  $p\beta c_{\text{max}} = 5$  ГэВ, а события  $({}^4\text{He}+{}^3\text{He})$  справа от границы. Доля канала  $({}^4\text{He}+{}^3\text{He})$  относительно всех событий диссоциации ядер  ${}^7\text{Be}$ , составляющая около 30%, может рассматриваться как оценка нижнего значения вероятности такой конфигурации в ядре  ${}^7\text{Be}$ . Средний пробег для когерентной диссоциации релятивистских ядер  ${}^7\text{Be}$  на  $({}^4\text{He}+{}^3\text{He})$  в ядерной фотоэмульсии равен  $7 \pm 1$  м. Средние пробеги ядер  ${}^6\text{Li}$ ,  ${}^7\text{Li}$  и  ${}^7\text{Be}$  для двухчастичных каналов когерентной диссоциации без испускания нейтронов имеют близкие значения. Прямые оценки вероятности состояния ядра  ${}^6\text{Li}$  в виде  $\alpha$ -частичного остова и квазисвободного дейтронного кластера путем зондирования  $\pi^-$ -мезонами с энергией около 1 ГэВ мишени из ядер  ${}^6\text{Li}$  в эксперименте [8] превышают 0.75. На рис. 2 приведено распределение событий для канала  $({}^4\text{He}+{}^3\text{He})$  в зависимости от величины  $E = 1.59 + E_t$ , где  $E_t$  равно поперечной кинетической энергии фрагментов, а слагаемое 1,59 МэВ равно пороговой энергии канала. Более чем в 80% событий значения  $E$  не

превышают 10 МэВ. В этой же области энергий располагаются и уровни возбуждения ядра  ${}^7\text{Be}$ , значение которых на рисунке указаны стрелками. Разделения отдельных уровней в экспериментальном распределении не наблюдается. Энергию системы фрагментов можно характеризовать также поперечными импульсами фрагментов в системе координат, связанной с фрагментирующим ядром. Различие в средних значениях импульсов фрагментов для зеркальных ядер может рассматриваться как проявление влияния кулоновского взаимодействия заряженных кластеров в ядрах и процессе фрагментации этих ядер. Среднее значение поперечных импульсов фрагментов в канале ( ${}^4\text{He}+{}^3\text{He}$ ) в системе их центра масс равно  $147 \pm 5$  МэВ/с. Заметное превышение этого значения относительно среднего значения поперечных импульсов фрагментов в канале фрагментации  ${}^7\text{Li} \rightarrow {}^4\text{He}+{}^3\text{H}$ , равное  $108 \pm 2$  МэВ/с, можно рассматривать как влияние кулоновского взаимодействия кластеров в этих ядрах. На рис. 3 представлено распределение углов  $\psi$  между фрагментами  ${}^4\text{He}$  и  ${}^3\text{He}$  в азимутальной плоскости в событиях ( ${}^4\text{He}+{}^3\text{He}$ ). В распределении преобладают большие углы между фрагментами. Это распределение в значительной степени определяется переданными импульсами фрагментирующим ядрам. Углы  $\psi$ , близкие к  $180^\circ$ , имеют корреляцию с малыми значениями импульсов переданных ядру  ${}^7\text{Be}$ . Относительно большое число событий с углами  $\psi$  в области  $180^\circ$  и имеющих малые значения импульсов, переданных ядру, может быть связано с вкладом кулоновской диссоциации ядер  ${}^7\text{Be}$  на тяжелых ядрах фотоэмульсии.

## ВЫВОДЫ

Основные характеристики фрагментации релятивистских ядер  ${}^7\text{Be}$  определяются двухгелиевой кластерной конфигурацией ядра  ${}^7\text{Be}$ . Наблюдаемое превышение среднего значения поперечных импульсов фрагментов  $147 \pm 5$  МэВ/с в канале когерентной фрагментации ядер  ${}^7\text{Be}$  на ( ${}^4\text{He}+{}^3\text{He}$ ) над значением  $108 \pm 2$  МэВ/с для канала диссоциации  ${}^7\text{Li}$  на ( ${}^4\text{He}+{}^3\text{H}$ ), возможно, связано с кулоновским взаимодействием фрагментов в этих процессах. Относительно большое число событий с углами  $\psi$  в области  $180^\circ$  и имеющих малые значения переданных ядру импульсов может быть связано с вкладом кулоновской диссоциации ядер  ${}^7\text{Be}$  на тяжелых ядрах фотоэмульсии.

Авторы благодарят коллектив нуклотрона ОИЯИ проведение сеанса облучения фотоэмульсий в пучке ядер  ${}^7\text{Be}$ , и группу обработки ядерных фотоэмульсий ЛВЭ ОИЯИ за проявку фотоэмульсий, сотрудников ФИАН А. Б. Антипову, А.В. Писецкую и Л.Н. Шестеркину за поиск и измерения ядро-ядерных взаимодействий. Авторы благодарны Ф.Г. Лепехину (ПИЯФ РАН, г. Гатчина) и М.М.Чернявскому (ФИАН) за обсуждения работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The BECQUEREL Project, Web-site <http://becquerel.jinr.ru>
2. S. El-Sharkawy et al., Phys. Scripta **47**, 512(1993).
3. **Ф.Г. Лепехин, Д.М. Селиверстов, Б.Б. Симонов, Письма в ЖЭТФ 59 312(1994).**
4. **F.G. Lepikhin, D.M. Seliverstov, V.V. Simonov, Eur. Phys. J. 1, 137(1998).**
5. М.И. Адамович и др., ЯФ **62**, 1461(1999)[M. I. Adamovich et al., Phys. At. Nucl. **62**, 1378(1999)].
6. M.L-Nady et al., Nuovo Cimento**111**, 1243(1998).
7. M.I. Adamovich et al., J. of Phys. G **30**, 1479(2004).
8. Б.М. Абрамов и др., ЯФ **68**, 503(2005).

ТАБЛИЦЫ

**Таблица 1.** Средние пробеги ядер  ${}^6\text{Li}$ ,  ${}^7\text{Li}$  и  ${}^7\text{Be}$  для неупругих взаимодействий в фотоэмульсии

Ядро	$\lambda_{\text{экср}}, \text{см}$	$\lambda_{\text{расч}}, \text{см}$	Энергия ядра (ГэВ)	Работа
${}^6\text{Li}$	$14.1 \pm 0.4$	16.5-17.2	27	[2-6]
${}^7\text{Li}$	$14.3 \pm 0.4$	16.0-16.3	21	[3-5]
${}^7\text{Be}$	$14.0 \pm 0.8$	16.0-16.3	8.6	данная

**Таблица 2.** Зарядовый состав фрагментов в событиях с  $Q = 4$

Релятивистские фрагменты	Фрагменты мишени	Число событий
2He	$n_b = 0$	41
	$n_b > 0$	18
He + 2H	$n_b = 0$	42
	$n_b > 0$	33
4H	$n_b = 0$	2
	$n_b = 1$	1
Li + H	$n_b = 0$	9
	$n_b > 1$	3
Всего		149

Таблица 3. Каналы фрагментации ядер  ${}^7\text{Be}$

Каналы фрагментации	2He		He + 2H		4H		Li + H		Сумма
	$n_b=0$	$n_b>0$	$n_b=0$	$n_b>0$	$n_b=0$	$n_b>0$	$nb=0$	$n_b>0$	
${}^4\text{He} + {}^3\text{He}$	30	11							41
${}^3\text{He} + {}^3\text{He}$	11	7							18
${}^4\text{He} + 2p$			13	9					22
${}^4\text{He} + d + p$			10	5					15
${}^3\text{He} + 2p$			9	9					18
${}^3\text{He} + d + p$			8	10					18
${}^3\text{He} + 2d$			1						1
${}^3\text{He} + t + p$			1						1
$3p + d$					2				2
$2d + 2p$						1			1
${}^6\text{Li} + p$							9	3	12
Сумма	41	18	42	33	2	1	9	3	149



## ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

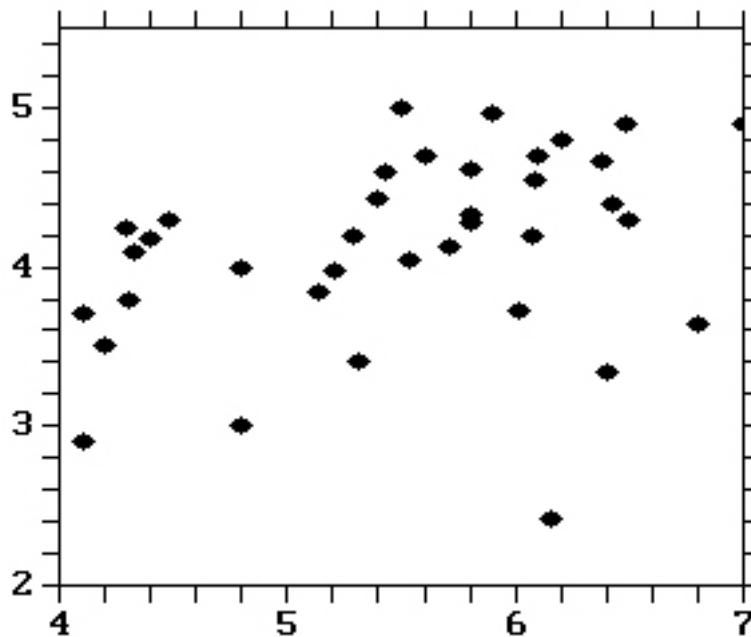
**Рис. 1.** Распределение событий  $2\text{He}$  на плоскости импульсов фрагментов. Точки – координаты измеренных значений  $p\beta c$  фрагментов. Абсцисса – большее значение  $p\beta c$  в событии, ордината – меньшее значение  $p\beta c$ .

**Рис. 2.** Распределение событий ( ${}^4\text{He}+{}^3\text{He}$ ) по величине  $E$ . Стрелками указаны значения уровней возбуждения ядра  ${}^7\text{Be}$  в МэВ.

**Рис. 3.** Распределение углов  $\psi$  между фрагментами  ${}^4\text{He}$  и  ${}^3\text{He}$  в азимутальной плоскости в событиях ( ${}^4\text{He}+{}^3\text{He}$ ).

Рисунок 1.

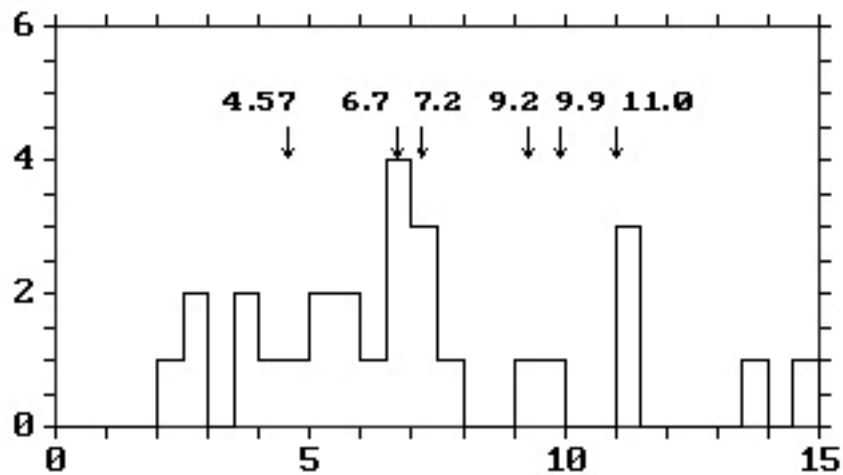
$p\beta c_{\text{мин}}$ , ГэВ



$p\beta c_{\text{мак}}$ , ГэВ

Рисунок 2.

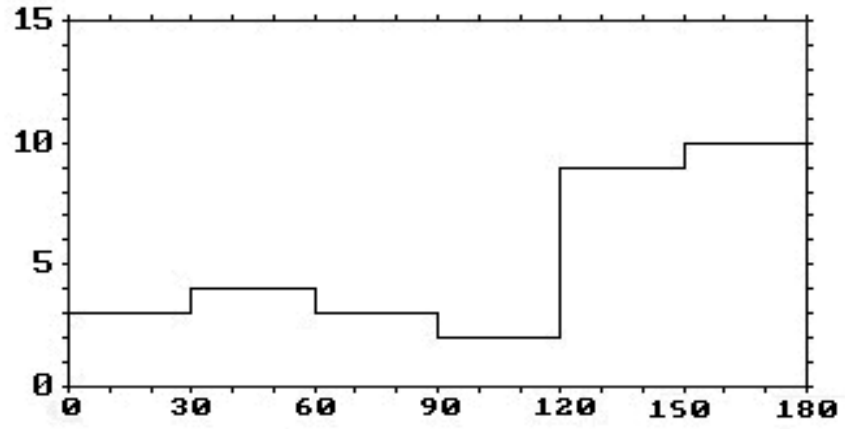
Число  
событий



$E$ , МэВ

Рисунок 3.

Число  
событий



Ψ, град.