

ПЕРИФЕРИЧЕСКАЯ ФРАГМЕНТАЦИЯ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЯДЕР ^{11}B В ЯДЕРНОЙ ЭМУЛЬСИИ

М. Карабова¹⁾, Д. А. Артеменков²⁾, В. Браднова²⁾, С. Вокал^{1,2)}, А. Вокалова²⁾, Я. Врлакова^{1,2)}, П. И. Зарубин^{2)*}, И. Г. Зарубина²⁾, А. Д. Коваленко²⁾, А. И. Малахов²⁾, Г. И. Орлова³⁾, П. А. Рукояткин²⁾, В. В. Русакова²⁾, С. П. Харламов⁴⁾, Т. В. Щедрина²⁾

¹⁾Университет имени П. Й. Шафарика, Кошице, Словакия.

²⁾Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия (ОИЯИ).

³⁾Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия (ФИАН).

*E-mail: zarubin@lhe.jinr.ru

Представлены результаты полученные в ядерной фотоэмульсии, облученной на в пучке ядер ^{11}B с импульсом 2.75A ГэВ/с. Для изучения кластеризации ядра B^{11} анализируются периферические взаимодействия, в которых суммарный заряд частиц, вылетающих в пределах конуса релятивистской фрагментации, равен заряду налетающего ядра. Сделан вывод, что 3-тельный развал с зарядовой конфигурацией $2 + 2 + 1$ является лидирующим. Проявляется существенная роль тритонов в наиболее периферических взаимодействиях такого типа. Впервые наблюдались события, интерпретируемые как перезарядка ядра ^{11}B в возбужденные состояния ядра $^{11}\text{C}^*$, расположенные над порогом нуклонной связи. Обсуждаются перспективы исследования ядра ^{11}C .

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

ВВЕДЕНИЕ

Изучение периферических взаимодействий релятивистских ядер ^7Li и ^{11}B в ядерной эмульсии может дать основания для включения тритонов в качестве кластеров при множественной фрагментации ядер, начиная с наиболее легких [1,2]. Ранее было установлено, что в наиболее периферических событиях диссоциации ядер ^7Li в ядерной эмульсии без образования фрагментов мишени и заряженных мезонов (или «белых» звездах), доля канала $^7\text{Li} \rightarrow \alpha + t$ достигает 50% [3]. Таким образом, выявилась роль тритона как нуклонного кластера с наименьшим порогом отделения (2.47 МэВ).

Настоящий эксперимент по фрагментации более тяжелого ядра ^{11}B является логическим продолжением исследования ядра ^7Li . Он нацелен на то, чтобы выявить относительную роль каналов с низкими порогами отделения фрагментов, а именно, $^7\text{Li} + \alpha$ (8.67 МэВ), $t + 2\alpha$ (11.22 МэВ) и $^{10}\text{Be} + p$ (11.23 МэВ).

ОБЛУЧЕНИЕ ЭМУЛЬСИИ В ПУЧКЕ ЯДЕР ^{11}B

Стопка, состоящая из слоев ядерной фотоэмульсии *BP-2*, была облучена на нуклотроне ОИЯИ в пучке ядер ^{11}B с импульсом 2.75А ГэВ/с. Слои эмульсии имели размер 10×20 см² и толщину около 600 мкм. При облучении пучок был направлен параллельно плоскости эмульсии вдоль длинной стороны.

Поиск событий проводился методом просмотра по первичным следам. На суммарной длине просмотренных следов 7141.5 см было зарегистрировано 542 взаимодействия ядер ^{11}B , что приводит к значению среднего пробега $\lambda = (13.2 \pm 0.6)$ см. Эта величина согласуется с вычислениями по геометрической модели.

Для определения зарядов релятивистских фрагментов, рожденных во взаимодействиях ядер ^{11}B , был использован метод подсчета плотности δ -электронов. Результат его использования для периферических взаимодействий ядер ^{11}B (рис. 1), анализируемых в настоящей работе, демонстрирует его надежность в определении зарядов релятивистских фрагментов $Z_{fr} = 3, 4$ и 5 .

На рис. 2 показаны распределения измеренных углов вылета релятивистских фрагментов ядер ^{11}B с различными зарядами Z_{fr} . Значения углов для фрагментов с $Z_{fr} > 2$ ограничены пределом $\theta < 3^\circ$, для двухзарядных фрагментов ($Z_{fr} = 2$) - $< 5^\circ$. Для однозарядных частиц $Z_{fr} = 1$ углы были измерены вплоть до значения $\theta < 15^\circ$. Угловое распределение для $Z_{fr} = 1$ изменяет свой вид примерно при $\theta = 6^\circ$. Его форма определяется как изотопами водорода $^{1,2,3}\text{H}$ от фрагментации ядер ^{11}B , так и сильно рассеявшимися протонами и рожденными мезонами, угловые распределения для которых сильно разнятся. На основе измерений импульсов условие отбора на углы анализируемых фрагментов с $Z_{fr} = 1$ было выбрано равным $\leq 6^\circ$, что соответствует традиционному определению конуса фрагментации.

КЛАСТЕРИЗАЦИЯ ПРИ ДИССОЦИАЦИИ ^{11}B

Для изучения кластеризации ядра ^{11}B были отобраны периферические взаимодействия, в которых суммарный заряд частиц, вылетающих в пределах конуса релятивистской фрагментации, равен заряду налетающего ядра, т. е. $\sum Z_{fr} = 5$. В этих

событиях является допустимым рождение частиц с углами вылета $\theta \approx 15^\circ$ и фрагментов мишени. В Таблице I представлены их статистика, включая «белые» звезды, в различных зарядовых каналах. Можно заключить, что 3-тельный развал с зарядовой конфигурацией $2 + 2 + 1$ лидирует, несмотря на его более высокий порог по сравнению с каналом $Li + He$. Схожая картина уже была установлена для ядра ^{10}B [4]. Важную роль в периферической фрагментации этих изотопов бора играет α -частичная кластеризация как и в случае ядра ^{12}C [5], а также ядер 6Li [6] и 7Li [3].

ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ ФРАГМЕНТОВ ^{11}B

Для изучения основного канала фрагментации $SZ_{fr} = 2 + 2 + 1$ были проведены измерения импульсов pbc однозарядных фрагментов методом многократного кулоновского рассеяния. Эти измерения позволяют разделять однозарядные фрагменты на протоны, дейтроны и тритоны, так как спектаторные фрагменты ядра-снаряда приблизительно сохраняют первичное значение импульса на нуклон. Данный метод позволил разделить однозарядные фрагменты и в настоящем исследовании (рис. 3).

Измеренные значения импульсов для однозарядных фрагментов ^{11}B удовлетворительно аппроксимируются суммой трех гауссианов, максимумы которых расположены при 2.7 ГэВ, 5.2 ГэВ и 7.5 ГэВ. Положение максимумов соответствует значениям, ожидавшимся для спектаторных протонов, дейтронов и тритонам. Область значений pbc в районе до 1 ГэВ соответствует рожденным p -мезонам. Соотношение между числами протонов, дейтронов и тритонов, образующихся в периферических взаимодействиях ядра B^{11} составляет $19 : 9 : 5$, а для «белых» звезд - $1 : 1 : 1$. Даже на малой статистике можно отметить рост доли дейтронов и тритонов в «белых» звездах к периферическим взаимодействиям. Большая доля тритонов в «белых» звездах ^{11}B говорит в пользу его существования в качестве кластера со слабой связью в B^{11} , которая легко разрушается во взаимодействии. Эти наблюдения указывают на необходимость дальнейшего накопления статистики в канале $SZ_{fr} = 2 + 2 + 1$ путем ускоренного просмотра по площади эмульсионных слоев.

НАБЛЮДЕНИЕ СОБЫТИЙ ПЕРЕЗАРЯДКИ $^{11}B \rightarrow ^{11}C^*$

В данном эксперименте наблюдались события, в которых заряд первичного трека был определен как $Z_{pr} = 5$, а суммарный заряд в конусе фрагментации оказался равным $SZ_{fr} = 6$. Их появление может интерпретироваться как неупругая перезарядка ядра ^{11}B в

возбужденные состояния ядра $^{11}\text{C}^*$, расположенные над порогом нуклонной связи. Статистика этих событий представлена в Таблице 3.

Было обнаружено 10 событий $^{11}\text{B} \rightarrow ^{11}\text{C}^*$ с развалом на два фрагмента с зарядами $Z_{fr} = 4$ и $Z_{fr} = 2$. Эти события указывают на перезарядку основы в виде кластера ^7Li в ^7Be . Во избежание ошибки заряды на следах в этих событиях определялись несколько раз. Доля таких событий перезарядки составляет $\approx 1,5\%$ от всех найденных при первичном просмотре взаимодействий, что дает значение среднего пробега $\lambda_{\text{CE}} = (0,89 \pm 0,32)$ м.

Таблица 2 демонстрирует проявление предпочтительного из каналов взаимодействия с перезарядкой наиболее периферического типа – это 8 «белых» звезд $^{11}\text{B} \rightarrow \text{Be} + \text{He}$, идентифицируемых как $^7\text{Be} + ^4\text{He}$. Одно из таких событий представлено на рис. 4, который иллюстрирует надежность измерения. Среди «белых» звезд события перезарядки ядра ^{11}B в другие каналы не наблюдались. Даже на такой ограниченной статистике можно отметить очевидное отличие от картины развала ядер ^{10}B и ^{11}B , в которой где лидировал 3-хтельный канал. Наоборот, для предполагаемых состояний $^{11}\text{C}^*$ доминируют 2-хтельные развалы, а 3-хтельные не наблюдались. В основе различия может лежать несколько более высокое значение кулоновского барьера для ядра ^{11}C . Это обстоятельство может указывать на замечательную чувствительность релятивистского механизма диссоциации к структурным особенностям столь похожих ядер. С другой стороны, возможно, именно в нем проявляется дополнительный вклад электромагнитного взаимодействия.

На рис. 5 для «белых» звезд $^7\text{Be} + ^4\text{He}$ представлено распределение по энергии возбуждения Q для пар релятивистских фрагментов ^4He и ^7Be , образованных в «белых» звездах ^{11}B , относительно основного состояния ядра ^{11}C . Величина Q определяется через инвариантную массу системы M^* и массу ядра ^{11}C , т. е.

$$Q = M^* - M,$$

$$M^2 = (\sum P_j)^2 = \sum (P_i \cdot P_k),$$

где P – 4-импульсы фрагментов, определенные в предположении сохранения импульса на нуклон первичного ядра. Величины Q находятся в области низколежащих возбужденных состояний ядра ^{11}C . Средние значения поперечных импульсов фрагментов ^7Be и ^4He в лабораторной системе равны $\langle P_T(^7\text{Be}) \rangle = (185 \pm 27)$ МэВ/с и $\langle P_T(^4\text{He}) \rangle = (190 \pm 33)$ МэВ/с, а в их с. ц. м. $\langle P_T^*(^7\text{Be}) \rangle = \langle P_T^*(^4\text{He}) \rangle = (145 \pm 21)$ МэВ/с. Среднее значение суммарного поперечного импульса пар $^7\text{Be} + ^4\text{He}$ равно $\langle P_T(^{11}\text{C}^*) \rangle = (250 \pm 32)$ МэВ/с. Такие кинематические характеристики являются ожидаемыми значениями для процессов дифракционной диссоциации.

Ядро ^{11}C является зеркальным для ^{11}B и имеет весьма схожую структуру возбуждений. Настоящая работа создает основу для изучения релятивистской диссоциации ядра ^{11}C в каналах с низкими порогами отделения нуклонных кластеров - $^7\text{Be} + \alpha$ (7.54 МэВ), $^{10}\text{B} + p$ (8.69 МэВ) и $^3\text{He} + 2\alpha$ (9.22 МэВ). В этом случае ядро ^3He может иметь тоже значение как кластер, как и тритон в ядре ^{11}B . В событиях наиболее периферической диссоциации можно будет сравнить с ядром ^{11}B влияние кулоновского барьера на картину диссоциации ядра ^{11}C . Ранее лидирующая роль ядра ^3He уже была установлена в релятивистской диссоциации ядра ^7Be [7], являющегося зеркальным для ^7Li . В этой связи, переход к исследованию ядра ^{11}C методом ядерных эмульсий представляется столь же последовательным шагом, как и переход от ядра ^7Li к ^{11}B .

Фундаментальный интерес представляет поиск проявления эффектов нарушения изотопической инвариантности в образовании «белых» звезд релятивистскими ядрами ^{11}B и ^{11}C . Такой анализ может быть осуществлен путем сравнения распределений по заселенности схожих каналов, их кинематическим характеристикам. Ядерные дифракционные процессы должны вести к сходству распределений, а электромагнитные взаимодействия могут вести к их различию в важных деталях.

Представленные наблюдения заслуживают более детального изучения на существенно большей статистике событий диссоциации ядер ^{11}B и ^{11}C . В последнем случае возникает необходимость специальном облучении эмульсии во вторичном пучке, наилучшим вариантом формирования которого является отбор продуктов перезарядки $^{11}\text{B} \rightarrow ^{11}\text{C}$.

Эта работа была поддержана грантом Научного агентства Министерства образования Словацкой республики и Словацкой академии наук VEGA N1/2007/05, грантом Российского фонда фундаментальных исследований 04-02-16593, а также грантами Полномочных представителей в ОИЯИ Болгарии, Словацкой республики, Чешской республики и Румынии в 2002-2005 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The BECQUEREL Project, Web-sites <http://becquerel.jinr.ru/>, <http://becquerel.lhe.jinr.ru/>.
2. М. И. Адамович и др., ЯФ **68**, 484(2005) [M. I. Adamovich *et al.*, Phys. At. Nucl. **68**, 455(2005)]; arXiv:nucl-ex/0605015.
3. M. I. Adamovich et al. J. Phys. G **30**, 1479(2004).

4. М. И. Адамович и др., ЯФ **67**, 533(2004) [M. I. Adamovich *et al.*, Phys. At. Nucl. **67**, 514(2004)].
5. В. В. Белага и др., ЯФ **58**, 2014(1995); V. V. Belaga *et al.*, Phys. At. Nucl. **58**, 1905(1995).
6. М. И. Адамович и др., ЯФ **62**, 1461(1999) [M. I. Adamovich *et al.*, Phys. At. Nucl. **62**, 1378(1999)].
7. Н. Г. Пересадько и др., ЯФ, **70**, 1266(2007) [M. I. Adamovich *et al.*, Phys. At. Nucl. **70**, 1226(2007)]; arXiv:nucl-ex/0605014.

ТАБЛИЦЫ

Таблица 1. Распределение диссоциации релятивистских ядер ^{11}B по зарядовым состояниям фрагментов $\sum Z_{fr} = 5$. Здесь N_Z - число фрагментов в событии с зарядом Z_{fr} . Статистика “белых” звезд приведена в скобках.

N_5	N_4	N_3	N_2	N_1	Σ
1	-	-	-	-	2
-	1	-	-	1	11
-	-	1	1	-	3
-	-	1	-	2	5
-	-	-	1	3	17 (1)
-	-	-	2	1	43 (6)
-	-	-	-	5	0

Таблица 2. Статистика событий перезарядки ядра ^{11}B в зарядовые состояния $\sum Z_{fr} = 6$. Здесь N_Z - число фрагментов с данным Z . «Белым» звездам соответствуют числа в скобках.

N_5	N_4	N_3	N_2	N_1	Σ
1	-	-	-	1	1
-	1	-	1	-	10(8)
-	1	-	-	2	7
-	-	1	-	3	2
-	-	-	2	2	3

РИСУНКИ

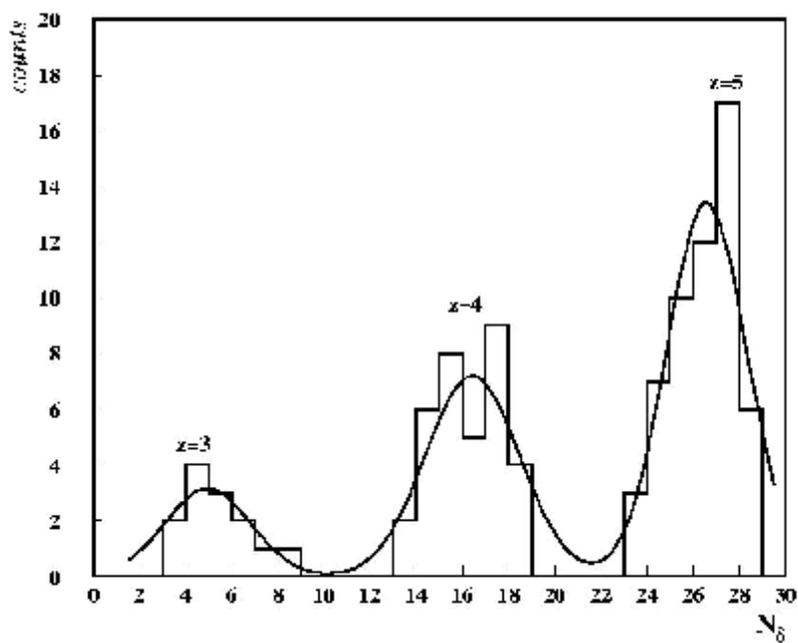


Рис. 1. Распределение релятивистских фрагментов $Z_{fr}=3, 4$ и 5 , рожденных во взаимодействиях ядер ^{11}B , по среднему числу δ -электронов на 100 мкм длины следа. Кривая результат аппроксимации суммой 3-х функций Гаусса.

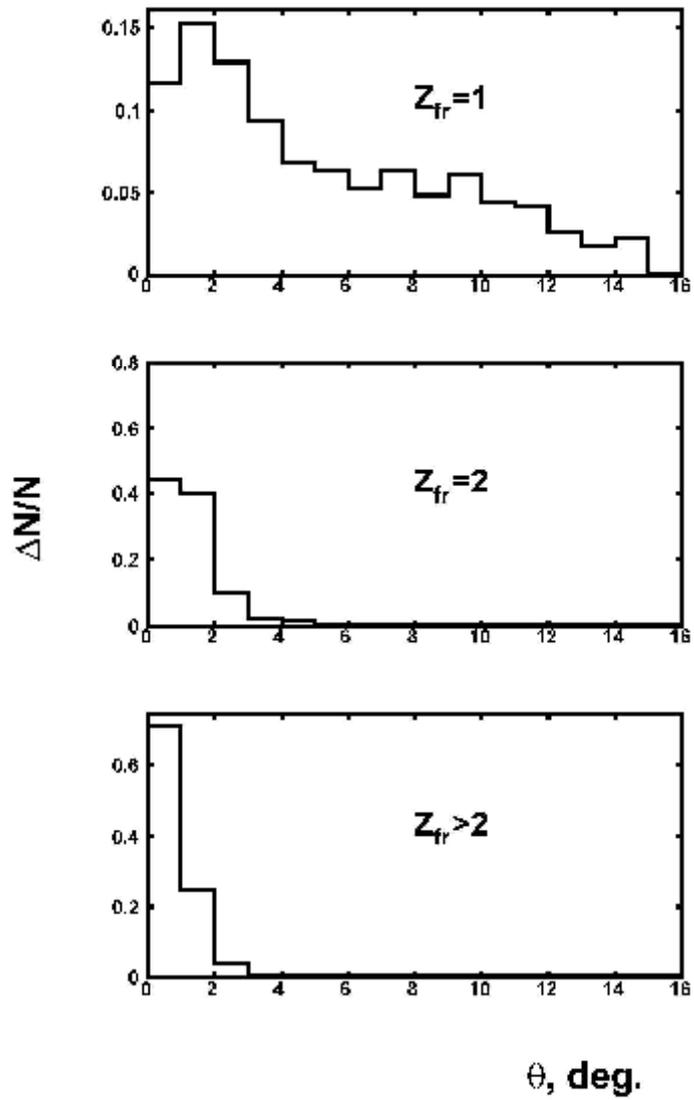


Рис. 2. Распределения релятивистских фрагментов, рожденных во взаимодействиях ядер ^{11}B , по углам вылета для фрагментов с зарядами $Z_{fr} = 1$ (сверху), $Z_{fr} = 2$ (середина), $Z_{fr} > 2$ (внизу); распределения нормированы на число фрагментов с зарядом Z_{fr} .

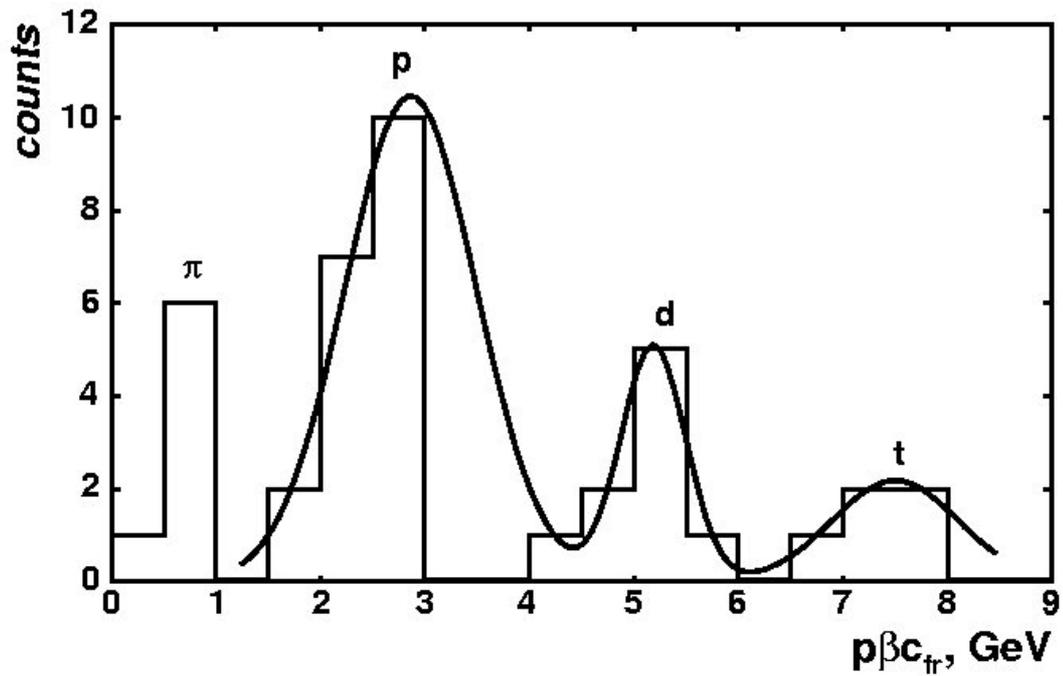


Рис. 3. Распределение релятивистских однозарядных фрагментов ядра ^{11}B по измеренным значениям $p\beta c$. Сплошная линия соответствует аппроксимации описание гауссианами по методу наименьших квадратов.

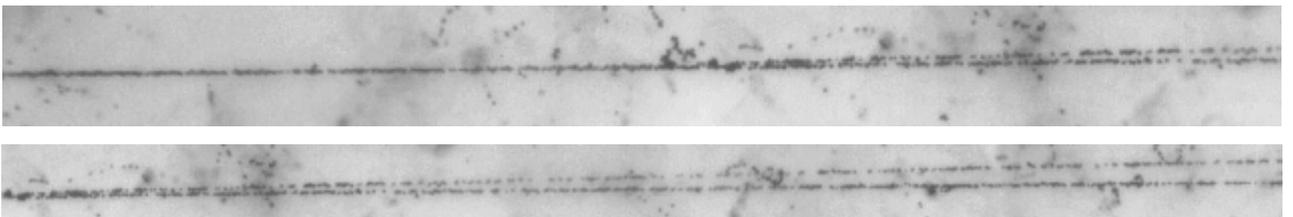


Рис. 4. Микрофотография фрагментации с перезарядкой $^{11}\text{B} \rightarrow ^4\text{He} + ^7\text{Be}$. На верхней фотографии видна вершина взаимодействия с парой релятивистских фрагментов в узком угловом конусе. При смещении по направлению вылета фрагментов (нижняя фотография) можно различить фрагмент He (верхний след) и 1 фрагмент Be .

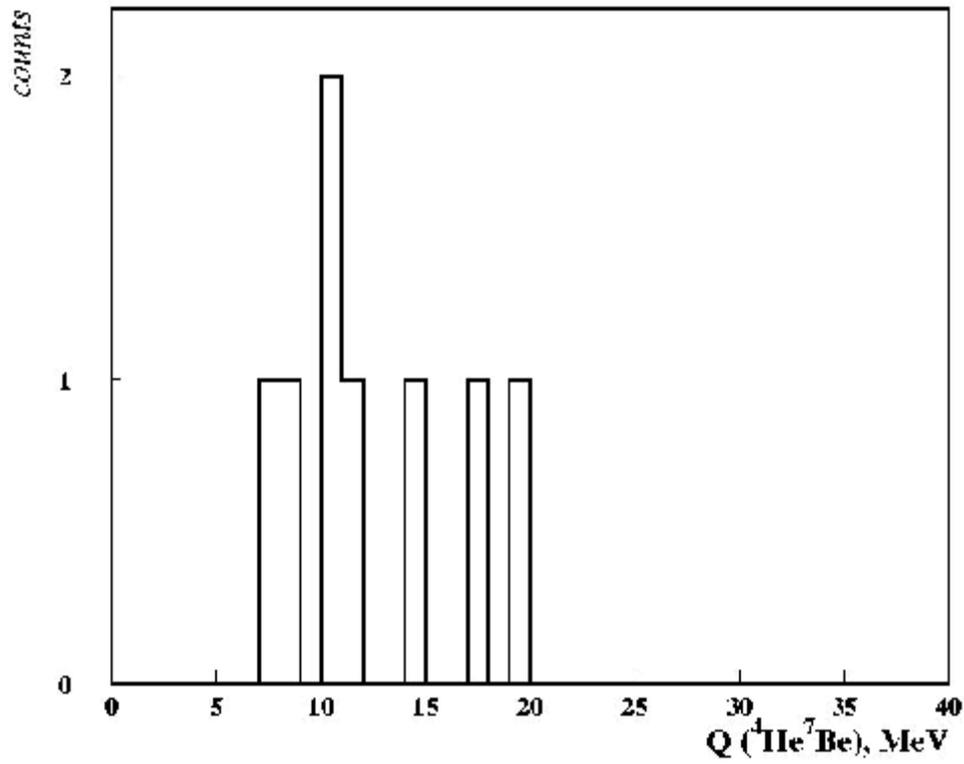


Рис. 5. Распределение по энергии возбуждения Q для пар релятивистских фрагментов ${}^7\text{Be} + {}^4\text{He}$, образованных в «белых» звездах ${}^{11}\text{B}$, относительно основного состояния ядра ${}^{11}\text{C}$.