

**СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА**

**P10-86-831**

**Б.Словинский, Э.Мулас, В.Н.Жмыров**

**ПРОСТОЙ МЕТОД РАЗДЕЛЕНИЯ  
РЕЛЯТИВИСТСКИХ ФРАГМЕНТОВ  
ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ  
ПО ЭЛЕКТРИЧЕСКОМУ ЗАРЯДУ**

**1986**

## 1. ВВЕДЕНИЕ

При экспериментальном исследовании взаимодействий релятивистских ядер с атомными ядрами естественным образом возникает вопрос о выделении среди вторичных частиц ядерных фрагментов с электрическим зарядом /далее - зарядом/  $Z > 1$ . Известно, что при использовании следовых детекторов для этой цели наряду с импульсом или энергией /определяемыми по кривизне траектории в магнитном поле и длине пробега соответственно/ измеряют, по мере возможности, плотность ионизации, многократное рассеяние или среднее число  $\delta$ -электронов /см., например, <sup>/1/</sup>. Когда же в качестве детектора релятивистских частиц применяется электронная установка, простое решение поставленной задачи состоит в использовании информации о величине потерь энергии частицы на ионизацию в сцинтилляционных счетчиках. Тем не менее для каждой конкретной установки требуется найти критерий обнаружения, как правило, слабых сигналов от двухзарядных релятивистских фрагментов, учитывая технические характеристики данного прибора и круг решаемых с его помощью задач. С практической точки зрения важно, чтобы критерии такого рода были достаточно простыми и достаточно устойчивыми относительно возможных изменений режима работы аппаратуры. В данном сообщении предложен критерий, удовлетворяющий названным условиям. Получены также конкретные численные результаты для магнитного спектрометра МАСПИК <sup>/2/</sup>, с помощью которого был выполнен в течение последних лет цикл экспериментов по исследованию инклюзивных спектров релятивистских протонов и дейтронов, испускаемых в столкновениях дейтронов и протонов с атомными ядрами <sup>/2-4/</sup>.

## 2. СВОЙСТВА АМПЛИТУДЫ СИГНАЛА ОТ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО СЧЕТЧИКА

Поскольку взаимодействие быстрой заряженной частицы с атомами, среды имеет вероятностный характер, суммарные потери  $E(d)$  ее энергии в слое вещества толщиной  $d$  являются случайной величиной, то есть

$$E^{(j)}(d) = \int_0^d \left(-\frac{dE}{dx}\right)_c^{(j)} dx. \quad /1/$$

Здесь и далее индекс  $j$  означает  $j$ -ю реализацию случайной переменной /то есть  $j$ -е событие/,  $\left(-\frac{dE}{dx}\right)_c$  - дифференциальные потери

энергии, среди которых доминируют, в области энергии  $E \geq 1$  ГэВ частиц тяжелее электрона, ионизационные потери /ИП/:

$(-\frac{dE}{dx})_e \approx (-\frac{dE}{dx})_{\text{ион.}} \sim z^2$ , где  $z$  - заряд частицы. Амплитуда  $A$  сигнала от сцинтилляционного счетчика /далее - амплитуда/ пропорциональна  $E(d)^{1/2}$ . Следовательно, для  $i$ -го счетчика ( $C_i$ ), находящегося в части спектрометра, анализирующей вторичные релятивистские частицы, имеем

$$A_i^{(j)} \approx E^{(j)}(d_i) \sim z^2, \quad /2/$$

где  $d_i$  - толщина сцинтиллятора  $C_i$ .

В реальных условиях эксперимента амплитуда  $A$  зависит также от места прохождения частицы через сцинтиллятор /см., например, <sup>5/</sup>. Однако путем соответствующего усреднения эту зависимость можно практически устранить <sup>8/</sup>. В дальнейшем под  $A$  будем понимать именно таким образом усредненную амплитуду. Итак, распределение  $P_z(A)$  амплитуд  $A_i^{(j)}$  соответствует распределению /флуктуациям/ ИП быстрой заряженной частицы в  $C_i$ . Оно имеет вид приблизительно нормального распределения для достаточно толстых сцинтилляторов и становится все более асимметричным с преобладанием высокоамплитудной части при уменьшении  $d_i$  <sup>7,8/</sup>.

### 3. АМПЛИТУДНАЯ ДИСКРИМИНАЦИЯ

Если известно распределение  $P_{z=1}(A_i)$  амплитуд  $A_i^{(j)}$ , вызываемых в  $C_i$  быстрой частицей с зарядом  $z = 1$ , и аналогичное распределение  $P_{z=2}(A_i)$  для частиц с  $z = 2$ , то, в принципе, легко найти условие разделения по заряду  $z$  этих частиц /под  $P_z(A)$  понимается распределение плотности вероятности амплитуды  $A$ /. С этой целью надо выбрать квантиль  $K_\ell$   $A_i^{(j)}$ -распределения, являющийся по своему физическому смыслу порогом дискриминации, и вычислить /или оценить по выборке/ уровень значимости

$$\alpha_i^{(\ell)} = \sum_{j: (A_i^{(j)} > K_\ell)} P_{z=1}(A_i = A_i^{(j)}) \quad /3/$$

правостороннего критерия  $K_\ell$  для гипотезы  $z = 1$ , а также вероятность

$$\beta_i^{(\ell)} = \sum_{j: (A_i^{(j)} < K_\ell)} P_{z=2}(A_i = A_i^{(j)}) \quad /4/$$

принять гипотезу  $z = 1$ , когда верна гипотеза  $z = 2$  /левосторонний критерий  $K_\ell$  для гипотезы  $z = 2$ / /см., например, <sup>9/</sup>. При выборе квантиля  $K_\ell$  /или, что то же самое, значения критической статистики  $K_\ell$ , или порога дискриминации/ необходимо учитывать отношение  $\gamma = \sigma(z=2) / \sigma(z=1)$  сечений образования двухзарядных частиц к однозарядным.

Распределения  $P_{z=1}(A_i)$  и  $P_{z=2}(A_i)$  можно, в принципе, получить экспериментально на пучках соответствующих частиц <sup>5/</sup>. Но если известно только экспериментальное распределение  $P_{z=1}(A_i)$  и нет возможности провести калибровочных измерений в пучке двухзарядных частиц, то распределение  $P_{z=2}(A_i)$  можно воспроизвести по методу Монте-Карло из  $P_{z=1}(A_i)$ , учитывая <sup>2/</sup>. При этом некоторое возможное несовпадение энергетических спектров одно- и двухзарядных частиц в интервале энергии в несколько ГэВ практически не скажется на численных оценках величин  $\alpha_i$  и  $\beta_i$ . Дело в том, что оно может привести лишь к незначительному изменению амплитудного спектра  $P_{z=2}(A_i)$ , главным образом, в области больших значений  $A_i$ , что при левостороннем критерии <sup>4/</sup> несущественно. Более проблематичным, особенно для достаточно тонких сцинтилляторов, кажется путь получения информации о  $P_{z=1}(A_i)$  и  $P_{z=2}(A_i)$  из существующих теоретических приближений <sup>7,8,10/</sup>, которые не точны в области больших флуктуаций ИП. Последнее обстоятельство очень важно в том случае, когда  $\gamma$  мало.

### 4. КРИТЕРИЙ УСРЕДНЕННОЙ АМПЛИТУДЫ

Дополнительной трудностью в рассматриваемой задаче о разделении частиц по заряду является зависимость распределения  $P_{z=1}(A_i)$  от изменяющегося со временем режима работы счетчика. Эту зависимость можно записать в виде условной вероятности  $P_{z=1}(A_i | x_i)$ , где параметр  $x_i$  целесообразно представить в виде коэффициента вариации:

$$x_i = \frac{\Delta A_i}{\bar{A}_i} \quad /5/$$

Здесь  $\Delta A_i$  - среднеквадратичный разброс,  $\bar{A}_i$  - среднее значение амплитуды  $A_i$ . Очевидно, что от  $x_i$  будут также зависеть уровень значимости  $\alpha_i^{(\ell)}(x_i)$  и  $\beta_i^{(\ell)}(x_i)$ . Следовательно, дискриминация быстрых частиц по их электрическому заряду, проводимая с помощью только одного сцинтилляционного счетчика, предъявляет к эксперименту весьма жесткие требования и далеко не всегда достаточно эффективна. Так, в <sup>5/</sup> для одного счетчика толщиной 10 мм достигнуто подавление частиц с зарядом  $z = 2$  в 250 раз.

Но обычно в спектрометрических установках применяется система из нескольких счетчиков, обладающих близкими характеристиками <sup>5,6/</sup>. Естественно ожидать, что распределение усредненной по всем счетчикам амплитуды  $\bar{A}^{(j)}$  будет обладать значительно большей устойчивостью в обсуждаемом выше смысле, чем для каждого счетчика в отдельности. Действительно, согласно центральной предельной теореме /см., например, <sup>9/</sup> / чем больше число  $n$  счетчиков, тем ближе к нормальному будет  $\bar{A}^{(j)}$ -распределение. Его среднее значение будет близко к  $\bar{A} = \sum_i \bar{A}_i / n$ , а дисперсия - к величине

$\sum_i \frac{(\Delta A_i)^2}{n^2}$ . Таким образом,  $\bar{A}^{(j)}$  - распределение даже для системы,

состоящей из нескольких счетчиков, существенно уже, чем для каждого из них в отдельности. Это создает возможность быстрой и эффективной дискриминации релятивистских частиц по их заряду, особенно в том важном случае, когда  $u$  мало.

## 5. РЕЗУЛЬТАТЫ

Как уже упоминалось во введении, численные расчеты, касающиеся оценок величин  $K_\ell$ ,  $\alpha$  и  $\beta$ , выполнены для системы из пяти сцинтилляционных счетчиков магнитного спектрометра МАСПИК <sup>12/</sup>. Исходные экспериментальные данные состояли из 76 тысяч событий, зарегистрированных при облучении легких ядер ионами  $^4\text{He}$  с импульсом 4,5 ГэВ/с/Н.

На рис. 1 показаны два распределения величины  $\bar{A}^{(j)} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 A_i^{(j)}$ , полученные экспериментально для однозарядных релятивистских частиц\* в условиях значительно различающихся режимов работы счетчиков: в первом случае  $\bar{x} = \left(\frac{\Delta A_i}{A}\right) = (30 \pm 3)\%$ , во втором -  $\bar{x} =$

$(53 \pm 6)\%$ . Соответствующие этим амплитудным спектрам  $\bar{A}^{(j)}$  - распределения для двухзарядных частиц, которые также изображены на рис. 1, были воспроизведены по методу Монте-Карло с учетом <sup>12/</sup>.

В качестве квантилей  $K_\ell$  рассматривались три значения:  $K_1 = 2\bar{A}_{z=1}$ ,  $K_2 = 2,25\bar{A}_{z=1}$  и  $K_3 = 2,5\bar{A}_{z=1}$ . Два первых из них указаны стрелками на рис. 1 для обеих выборок экспериментальных данных. Численные значения уровня значимости  $\alpha^{(\ell)}$  критерия  $K_\ell$ , а также значения вероятности  $\beta^{(\ell)}$  принять двухзарядную частицу за одноза-

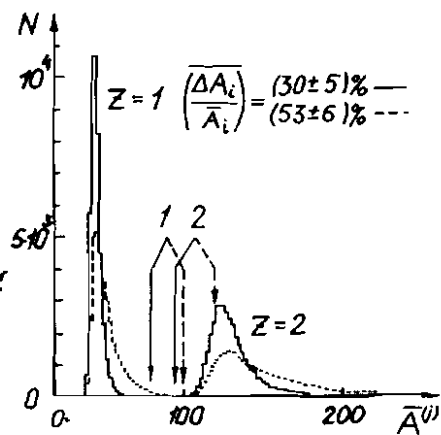


Рис. 1. Распределение усредненных амплитуд  $\bar{A}^{(j)}$  для двух выборок экспериментальных данных с коэффициентом вариации  $\left(\frac{\Delta A_i}{A_i}\right)$ . Стрелками указаны значения порога дискриминации /см. табл. 1/.

Рис. 1. Распределение усредненных амплитуд  $\bar{A}^{(j)}$  для двух выборок экспериментальных данных с коэффициентом вариации  $\left(\frac{\Delta A_i}{A_i}\right)$ . Стрелками указаны значения порога дискриминации /см. табл. 1/.

рядную при данном пороге дискриминации  $K_\ell$  помещены в табл. 1. Для сравнения в табл. 2 приведены аналогичные данные, относящиеся только к одному счетчику.

Таблица 1

Уровни значимости  $\alpha^{(\ell)}$   $\bar{A}^{(j)}$  - распределения и вероятности  $\beta^{(\ell)}$  принять двухзарядную частицу за однозарядную при трех значениях порога дискриминации  $K_\ell$ . Данные соответствуют двум выборкам экспериментальных данных /I и II/, значительно различающимся условиями работы счетчиков

	$K_\ell$	$K_1 = 2\bar{A}_{z=1}$	$K_2 = 2,25\bar{A}_{z=1}$	$K_3 = 2,5\bar{A}_{z=1}$
$\alpha^{(\ell)}$	I	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$5,8 \cdot 10^{-5}$	$< 2,9 \cdot 10^{-5}$
	II	$4,7 \cdot 10^{-4}$	$0,9 \cdot 10^{-4}$	$3,1 \cdot 10^{-5}$
$\beta^{(\ell)}$	I	$< 2,9 \cdot 10^{-5}$	$2,9 \cdot 10^{-5}$	$5,4 \cdot 10^{-5}$
	II	$5,3 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$9,4 \cdot 10^{-2}$

Таблица 2

То же, что в табл. 1, но для одного из пяти счетчиков.  $\bar{A}_{z=1}$  - среднее значение амплитуды для этого счетчика при гипотезе  $z = 1$

	$K_\ell$	$K_1 = 2\bar{A}_{z=1}$	$K_2 = 2,5\bar{A}_{z=1}$	$K_3 = 3\bar{A}_{z=1}$
$\alpha^{(\ell)}$	I	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$
	II	$5,3 \cdot 10^{-2}$	$3,0 \cdot 10^{-2}$	$1,8 \cdot 10^{-2}$
$\beta^{(\ell)}$	I	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$1,7 \cdot 10^{-2}$	$0,4 \cdot 10^{-1}$
	II	$1,7 \cdot 10^{-2}$	$7,4 \cdot 10^{-2}$	$3,9 \cdot 10^{-1}$

Из таблиц и рис. 1 видно, что существует интервал оптимальных значений  $K_\ell$ , который шире для меньших значений параметра  $\bar{x}$  и сужается, главным образом, со стороны меньших значений  $K_\ell$ , когда ухудшается режим работы счетчиков /то есть коэффициент вариации  $\bar{x}$  растет/.

Наглядной проверкой эффективности разделения релятивистских фрагментов по их заряду на основании критической статистики  $K_\ell$  является спектр масс этих частиц. На рис. 2 показан такой спектр

\* Это, в основном, протоны и дейтроны.

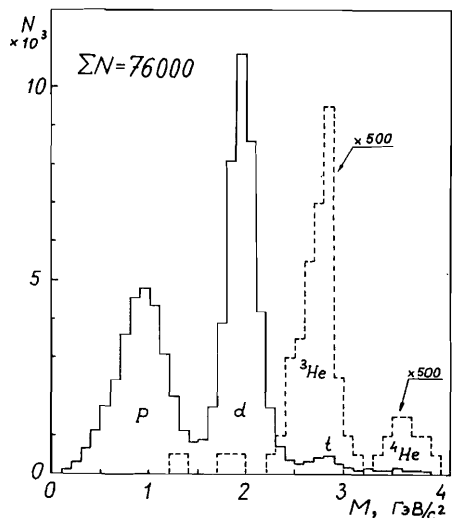


Рис.2. Спектр масс быстрых фрагментов, испускаемых в инклюзивных взаимодействиях  $\alpha$ -частиц с легкими ядрами при 4,5 ГэВ/с/N. Сплошная линия иллюстрирует распределение по массам, полученное в предположении, что все частицы однозарядные, штриховая – спектр масс двухзарядных частиц, выделенных по критерию усредненной амплитуды.

в двух случаях. Сплошной линией изображен спектр масс в предположении, что это однозарядные частицы. Пунктиром показано распределение по массам тех частиц,

которые по критерию  $\bar{K}_\ell$  считаются двухзарядными. В гистограммах не учтены поправки на флуктуацию амплитуд импульсов от ФЭУ <sup>16/</sup>, что для данной задачи несущественно. В качестве  $\bar{K}_\ell$  рассматривались два значения: 100 и 112 /рис.1/. В обоих случаях спектр масс двухзарядных частиц практически один и тот же. Такой результат неудивителен, так как значение критической статистики  $\bar{K}_\ell$  определено по двум выборкам экспериментальных данных, характеризующимся крайними /минимальными и максимальными/ значениями коэффициента вариации /рис.1/.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований найден простой и достаточно эффективный критерий разделения по заряду релятивистских частиц, регистрируемых системой из нескольких сцинтилляционных счетчиков. При его помощи можно практически сепарировать частицы на уровне значимости  $\bar{\alpha} \approx 10^{-4} \div 10^{-5}$  с вероятностью ошибки принять двухзарядную частицу за однозарядную, равной  $\beta \approx 10^{-2} \div 10^{-4}$ . Этот критерий относительно малочувствителен к изменению режима работы счетчиков, характеризующему коэффициентом вариации соответствующих амплитудных спектров. Он дает возможность изучать инклюзивные спектры двухзарядных частиц, сечение образования которых под данным углом составляет  $\sim 10^{-4} \div 10^{-5}$  сечения рождения однозарядных частиц в данной реакции.

В заключение авторы выражают благодарность директору ЛВТА члену-корреспонденту АН СССР М.Г.Мещерякову за постоянный интерес к работе и поддержку, а также сотрудникам научно-экспериментального сектора ЛВТА за полезные дискуссии.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамов А.И. и др. Основы экспериментальных методов ядерной физики. М.: Энергоатомиздат, 1985.
2. Ажгирей Л.С. и др. В кн.: Труды Совещания по исследованиям в области релятивистской ядерной физики. ОИЯИ, Д2-82-568, Дубна, 1982, с.83.
3. Мещеряков М.Г. В кн.: Мультикварковые взаимодействия и квантовая хромодинамика. VI Международный семинар по проблемам физики высоких энергий. ОИЯИ, Д1,2-81-728, Дубна, 1981, с.260.
4. Ажгирей Л.С., Словинский Б. В кн.: Научное сотрудничество социалистических стран в ядерной физике. М.: Энергоатомиздат, 1986, с.157.
5. Аблеев В.Г. и др. ОИЯИ, 13-10568, Дубна, 1977.
6. Ажгирей Л.С. и др. ОИЯИ, Р1-85-749, Дубна, 1985.
7. Moyal J.E. - Phil.Mag., 1955, v.46, No.374, p.263.
8. Ahlen S.P. - Rev.Mod.Phys., 1980, v.52, No.1, p.121.
9. Идье В. и др. Статистические методы в экспериментальной физике. М.: Атомиздат, 1976.
10. Ремизович В.С. и др. - ЭЧАЯ, 1986, т.17, вып.5, с.929.

Рукопись поступила в издательский отдел  
23 декабря 1986 года.

**ТЕМАТИЧЕСКИЕ КАТЕГОРИИ ПУБЛИКАЦИЙ  
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ**

Индекс	Тематика
1.	Экспериментальная физика высоких энергий
2.	Теоретическая физика высоких энергий
3.	Экспериментальная нейтронная физика
4.	Теоретическая физика низких энергий
5.	Математика
6.	Ядерная спектроскопия и радиохимия
7.	Физика тяжелых ионов
8.	Криогеника
9.	Ускорители
10.	Автоматизация обработки экспериментальных данных
11.	Вычислительная математика и техника
12.	Химия
13.	Техника физического эксперимента
14.	Исследования твердых тел и жидкостей ядерными методами
15.	Экспериментальная физика ядерных реакций при низких энергиях
16.	Дозиметрия и физика защиты
17.	Теория конденсированного состояния
18.	Использование результатов и методов фундаментальных физических исследований в смежных областях науки и техники
19.	Биофизика

Словинский Б., Мулас Э., Жмыров В.Н. P10-86-831  
 Простой метод разделения релятивистских  
 фрагментов ядерных реакций по электрическому заряду

Предложен простой и эффективный критерий разделения по электрическому заряду релятивистских частиц, регистрируемых системой из нескольких сцинтилляционных счетчиков. Это критерий усредненной амплитуды. Он малочувствителен к изменению режима работы счетчиков и позволяет сепарировать частицы на уровне значимости  $10^{-4} \div 10^{-5}$ . Действие критерия проиллюстрировано на примере экспериментальных данных по инклюзивным спектрам релятивистских фрагментов из реакции  $\alpha$ -частиц с легкими ядрами, полученных на магнитном спектрометре МАСПИК.

Работа выполнена в Лаборатории вычислительной техники и автоматизации ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1986

Перевод О.С.Виноградовой

Stowinski B., Mulas E., Zhmyrov V.N. P10-86-831  
 Simple Method of Separation of Relativistic  
 Nuclear Reaction Fragments on the Basis of Their  
 Electrical Charge

Simple and effective criterion based on the electrical charge of relativistic particles registered by a set of scintillation counters is proposed. This criterion of averaged amplitude is weakly sensitive to change of counter mode of operation and gives a possibility to separate particles on the significance level of about  $10^{-4} \div 10^{-5}$ . The effect of the criterion is illustrated using inclusive spectra of relativistic fragments from the reaction of  $\alpha$ -particles with light atomic nuclei obtained by means of the MASPIK magnetic spectrometer.

The investigation has been performed at the Laboratory of Computing Techniques and Automation, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1986