

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ПЕТЕРБУРГСКИЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
им.Б. П. КОНСТАНТИНОВА

Сообщение 2797

Е. А. Котиков, Ф. Г. Лепехин

Угловые распределения
двухзарядных фрагментов
релятивистских ядер ^{32}S с энергией 200 А ГэВ

Гатчина-2009

**Angular distributions of
two-charge fragments
of the relativistic nuclei ^{32}S at an energy 200 A GeV**

E. A. Kotikov, F. G. Lepekhin

A b s t r a c t

In work the outcomes of measurements of angles of two-charge fragments of the relativistic nuclei ^{32}S at an energy 200 GeV on a nucleon are submitted. The events with two and more tracks with $Z = 2$ were used. The analysis of distribution of fragment angles by the method of maximum likelihood (MML) has shown, that a constant of their normal distribution $\sigma_F = 253 \pm 12 \mu\text{rad}$. It corresponds, that the projection of momentum of nucleon on the arbitrary direction in the nuclei ^{32}S , before of interaction them with the nuclei in emulsion, is equal $\sigma_0 = 106.5 \pm 5.0 \text{ MeV}/c$. It, practically, precisely coincides with its evaluation obtained from Fermi momentum for the nuclei ^{32}S . The fact of an independent emission of fragments in groups of events containing 2, 3 and 4-5 two-charge particles is confirmed.

А н н о т а ц и я

В работе представлены результаты измерений углов двухзарядных фрагментов релятивистского ядра ^{32}S с энергией 200 ГэВ на нуклон. Использовались события с двумя и более следами с $Z = 2$. Анализ распределения углов фрагментов методом максимума правдоподобия (ММП) показал, что константа их нормального распределения $\sigma_F = 253 \pm 12$ $\mu\text{рад}$. Это соответствует тому, что проекция поперечного импульса нуклонов на произвольное направление в ядре ^{32}S , до взаимодействия их с ядром в эмульсии, равна $\sigma_0 = 106.5 \pm 5.0$ МэВ/с. Полученная величина практически точно совпадает с ее оценкой из импульса Ферми для ядра ^{32}S . Подтвержден факт независимого испускания фрагментов в группах событий, содержащих 2, 3 и 4-5 двухзарядных частиц.

Введение

Фрагментация релятивистских ядер ^{32}S при энергии 200 ГэВ на нуклон изучалась во многих работах [1–3]. Прежде всего это обусловлено тем, что 200 ГэВ на нуклон есть самая большая энергия, доступная сегодня. А кроме того, ядро ^{32}S уже не принадлежит к легким ядрам, в которых набор фрагментов резко меняется при добавлении 1-2 нуклонов и где явно проявляется α -структура. Последнее обстоятельство наиболее резко проявляется в ядрах ^{12}C и ^{16}O . При их фрагментации около 30% взаимодействий идет через образование одного (^{12}C), или двух (^{16}O)

резонансов ${}^8\text{Be}$ [4]. Для ядра ${}^{32}\text{S}$ все это осталось позади. Конечно, из общих соображений можно предположить, что при фрагментации ядра ${}^{32}\text{S}$ канал ${}^{32}\text{S} \rightarrow 2{}^{16}\text{O}$ будет иметь большую вероятность, а образовавшиеся ядра ${}^{16}\text{O}$ будут с такой же вероятностью распадаться на α -частицы через канал с промежуточным состоянием ${}^8\text{Be}$. Но топология 775 событий, найденных по следу, приведенная в [2], ни одного события такого типа не обнаруживает. Скорее всего, все эти события при просмотре по следу пропускаются, так как угол между двумя фрагментами ${}^{16}\text{O}$ очень мал. Он зависит от массового числа фрагмента A_F , и при $A_F \sim 10$ будет около $100 \mu\text{рад}$. Следы на расстоянии ~ 1 см попросту не успеют разойтись так, чтобы можно было зарегистрировать два отдельных следа.

С другой стороны, надежные данные об углах двухзарядных фрагментов ядра ${}^{32}\text{S}$ при энергии 200 ГэВ на нуклон позволяют перевести явление фрагментации релятивистских ядер из объекта исследования в разряд инструмента исследования свойств этого ядра. Действительно, как показано в [5], исходя из совокупности простых данных об этом ядре, импульс Ферми ядра ${}^{32}\text{S}$ должен быть равен $P_{Fermi} = 236 \text{ МэВ/с}$, а проекция импульса нуклона на произвольное направление должна быть равна $\sigma_0 = 105.5 \text{ МэВ/с}$. Это не совпадает с интерполяцией $P_{Fermi} = 245 \text{ МэВ/с}$, сделанной в [1] на основе измерений этой величины для соседних ядер в экспериментах по рассеянию электронов на ядрах [6].

По оценке [5], константа нормального распределения углов φ двухзарядных фрагментов ядра ${}^{32}\text{S}$ при энергии 200 ГэВ должна быть равна $\sigma_\varphi = 250 \mu\text{рад}$. Возникает проблема точного измерения столь малых углов. Этому будет

посвящен следующий раздел работы. Пока же отметим, что в [2] были измерены углы в плоскости эмульсии 402 двухзарядных фрагмента в 217 событиях. Измерения проводились относительно соседней первичной частицы. Полученный в этой работе результат $\sigma_\varphi = 260.1 \pm 13.0 \mu\text{рад}$ говорит о высоком качестве измерений. К сожалению, мы не смогли воспользоваться этим методом из-за сильных его ограничений. Рядом, и достаточно близко к событию, должен быть след первичной частицы. Кроме того, отсутствует и описание этого метода. Нам пришлось разрабатывать свой метод измерения малых углов релятивистских фрагментов.

Измерение углов

Основная трудность получения достоверной оценки угла вылета частицы, относительно начального направления вектора импульса первичной частицы, состоит в том, что это направление определяется до взаимодействия, на расстоянии ~ 1 см. А угол вылета частицы измеряется на этом же расстоянии после взаимодействия, где следа первичной частицы уже нет. Приходится предполагать, что следы остаются прямыми на длине около 2 см. А это не так. Хорошо известно, что есть ложное рассеяние, природа которого до сих пор неизвестна. Поэтому любые оценки углов относительно направления импульса первичной частицы будут смещены в сторону больших углов. Дисперсия распределения их будет всегда больше истинной величины нормального разброса частиц, обусловленного распределением импульсов нуклонов в ядре ^{32}S до взаимодействия его с ядрами эмульсии.

Напомним, что углы вылета фрагментов при импульсе на нуклон 2–4 ГэВ/с оценивались на длине 1 мм, где следы с хорошей точностью остаются прямыми. Для увеличения точности направления этой прямой использовались координаты 11 точек через 100 мк, по которым методом наименьших квадратов (МНК) и проводилась прямая [7]. При энергии на нуклон 200 ГэВ все это работать уже не будет.

Но можно получить оценку дисперсии истинного нормального распределения частиц и не измеряя направления импульса первичной частицы. Если есть событие, содержащее $n \geq 2$ частиц, распределенных нормально относительно некоего направления с дисперсией σ^2 , то дисперсия измеренного парного угла $\varphi_{i,j}$, между всеми возможными парами частиц i, j , будет в два раза больше σ^2 . Число всех возможных пар в событии, содержащем n частиц, будет равно $n(n - 1)/2$, т. е. может быть и больше n .

Но измерить малый угол между двумя частицами, когда они от места своего рождения расположены на расстоянии ~ 1 – 2 микрона друг от друга, значительно проще, чем измерить угол каждой из них относительно направления вектора импульса первичной частицы. Отношение расстояния между всеми возможными парами частиц к расстоянию до центра события и будет оценкой угла $\varphi_{i,j}$. При этом полностью исключаются любые искажения следов, в том числе и ложное рассеяние. Направление вектора импульса первичной частицы вообще не используется в этих измерениях, в то время как дисперсия всех частиц относительно этого направления будет получена. Нет нужды и ставить много точек на следе, чтобы провести потом прямую по ним по МНК. Конечно, гипотеза о том, что все

углы в событии распределены нормально, является очень сильной гипотезой и нуждается в доказательстве. Оно будет представлено.

Все это хорошо известно, и давно используется при измерении относительного кулоновского рассеяния частиц [8, 9]. Оценка величины σ с направлением вектора импульса первичной частицы по измерениям парных углов между частицами $\varphi_{i,j}$ использовалась в работе [10].

Для измерения координат точек на следах частиц использовался микроскоп МПЭ-11 со считыванием координат в память ЭВМ [11]. Цена младшего разряда датчика Y-координаты определена по объект-микрометру путем многократных измерений интервала в 10 микрон. Результаты этой градуировки прибора приведены в [12]. Все измерения выполнялись в оконной процедуре, написанной на языке DELPHI-7, которую можно посмотреть в [13].

Всего было измерено 427 событий с числом двухзарядных частиц $n \geq 2$, выбранных из общего числа 1438 событий, найденных просмотром вдоль следа на длине 191.259 метра.

Результаты

Все координаты точек на следах в 427 событиях находятся в [13]. Эти данные обрабатывались процедурой [14], и результаты находятся в [15]. Всего вычислено 1134 угла φ с первичным следом и 1098 парных угла $\varphi_{i,j}$. Распределения модулей углов φ , и парных углов $\varphi_{i,j}/\sqrt{2}$, приведено на рис. 1. Плавные кривые на этом рисунке соответствуют нормальному распределению с предсказанной величиной $\sigma = 250$ μ рад для парных углов, и с $\sigma = 290$ μ рад для экспериментально полученной величины модулей углов φ .

На рис. 2 приведено распределение углов φ . По всем непараметрическим критериям нулевая гипотеза о том, что экспериментальное распределение является выборкой из нормального распределения, не отвергается. Да и на глаз видно, что лучшего согласия не бывает. Таким образом, основное допущение, что все углы в событии распределены нормально, подтверждается. Следовательно, действительно $\sigma = \sigma_{i,j}/\sqrt{2}$.

Для экспериментальной оценки σ из распределения углов $\varphi_{i,j}$ можно использовать соотношение, согласно которому для нормального распределения

$$\sigma = \langle \varphi_{i,j} \rangle / \sqrt{2/\pi}.$$

Из [15] следует, что $\langle \varphi_{i,j} \rangle = 197 \mu\text{рад}$. Откуда получаем, что экспериментальная величина $\sigma = 246.9 \pm 8 \mu\text{рад}$.

Более строго эту же оценку можно получить и ММП. Функцию правдоподобия для парного угла записываем в виде

$$L = \prod_{k=1}^{k=N} (1/\sigma) \exp(-\varphi_{i,j,k}^2/2\sigma^2), \quad (1)$$

где $N=1098$ есть число парных углов.

Максимум $\ln(L)$ достигается при $\sigma = 253 \mu\text{рад}$. Что практически совпадает с оценкой этой же величины, полученной из среднего $\varphi_{i,j}$.

Аналогичным образом оценка величины σ по ММП при $N = 1134$ углов φ_k получается равной $\sigma = 290 \mu\text{рад}$. Очевидно, что эта величина содержит ошибку, связанную с направлением вектора импульса первичного следа. Доверительные интервалы полученных по ММП оценок стан-

дартных отклонения приведены на рис. 3. Видно, что эти интервалы не перекрываются.

В трех группах событий, содержащих $n=2, 3$ и $4-5$ двухзарядных фрагмента, по ММП оценены константы нормального распределения σ . Результаты приведены в Таблице. Видно, что гипотеза равенства $\sigma = 250 \mu\text{рад}$ не отвергается для любой из трех групп. Это означает, что двухзарядные фрагменты разлетаются независимо друг от друга при любом n фрагментов в событии. Ранее этот факт наблюдался при фрагментации ядер ^{10}B , ^{11}B , ^{22}Ne и ^{24}Mg при меньших энергиях на нуклон [16].

Заключение

Все до сих пор полученные оценки дисперсии углового распределения фрагментов содержат дополнительную ошибку, связанную с ошибкой направления первичного следа. Ее невозможно исключить. Она равна, приблизительно, $100-150 \mu\text{рад}$. Для меньших энергий это было несущественно, а при энергии 200 ГэВ на нуклон это приводит к существенному искажению дисперсии угла.

В работе показано, что при правильной оценке дисперсии угла относительно вектора импульса первичной частицы эта оценка не отличается от предсказанной величины. Это означает, что импульс Ферми для ядра ^{32}S близок к величине 236 МэВ/с , так как проекция импульса нуклона этого ядра на произвольное направление равна $\sigma_0 = 106.5 \pm 5.0 \text{ МэВ/с}$. Это важная характеристика ядра.

Авторы благодарят Г. М. Орлову (ФИАН), и П. И. Зарубина (ОИЯИ) за предоставление возможности выполнения этой работы на камере, облученной в CERN. Мы

благодарны Л. Н. Ткач за поиск событий и все измерения углов частиц, которые здесь обсуждались.

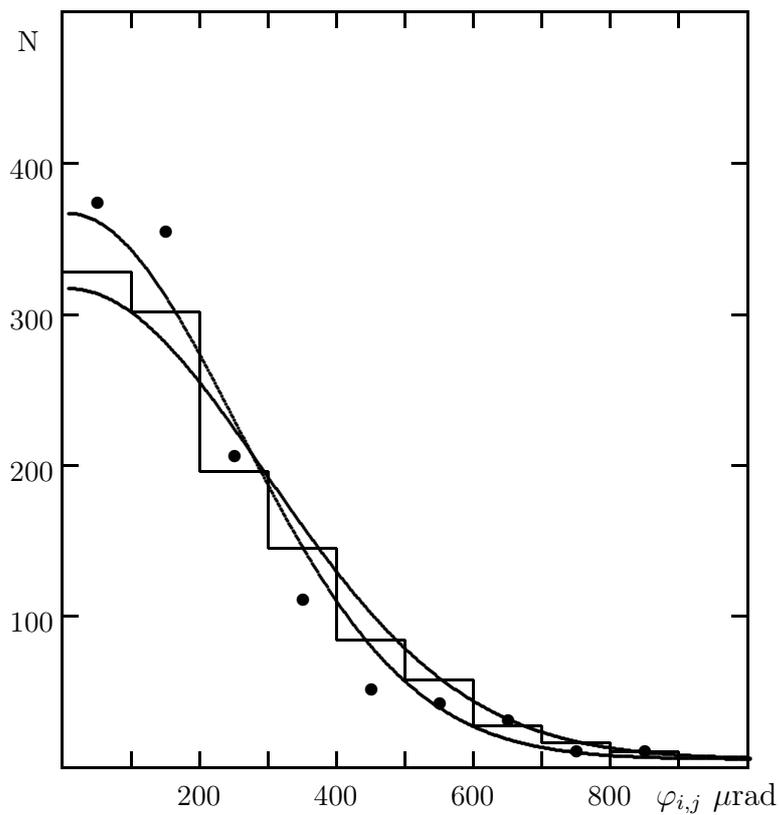


Рис. 1. Распределение модулей углов с направлением первичной частицы – гистограмма и нижняя плавная кривая. Распределение парных углов – черные точки и верхняя кривая в области малых величин по оси абсцисс

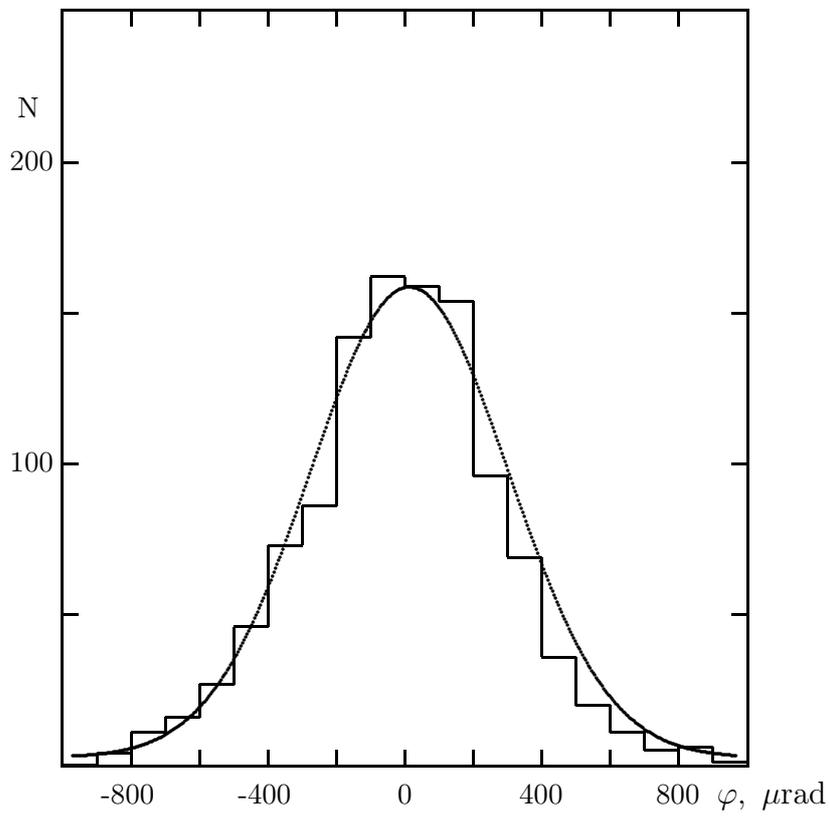


Рис. 2. Распределение углов, измеренное относительно направления первичной частицы. Плавная кривая – нормальное распределение с $\sigma = 290 \mu\text{рад}$

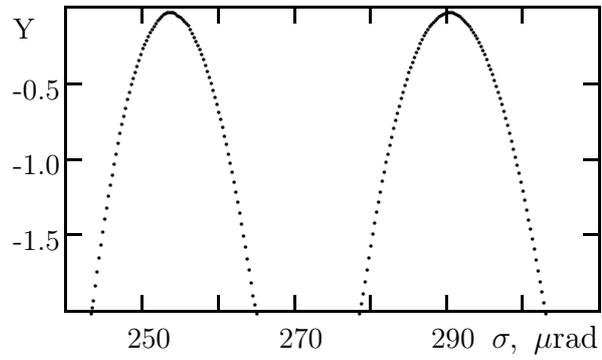


Рис. 3. Оценка константы нормального распределения методом максимума правдоподобия. По оси ординат отложена величина $Y = \ln L - \ln L_0$, где L_0 соответствует максимуму вероятности данной константы σ . Левая часть рисунка приведена для парных углов, а правая часть для углов с первичной частицей. Доверительный интервал в обоих случаях отсчитывается при $Y = -2.0$ по оси абсцисс

Таблица

Стандартные отклонения σ , полученные ММП для трех групп частиц

фрагм. с $Z=2$	события	N углов	σ μ рад
все соб.	427	1086	253 ± 8
n=2	220	220	271 ± 18
n=3	141	423	249 ± 12
n=4 и 5	66	451	248 ± 12

Литература

1. М. I. Adamovich at al., Mod. Phys. Lett. **A8**(1993) 21.
2. М. I. Adamovich at al., Z. Phys. **A351**(1995) 311.
3. Н. Sengupta, G. Singh, P.L. Jain, Phys.Lett. **B222**(1989) 301; Phys. Rev. Lett. **61**(1998) 1073.
4. Ф. Г. Лепехин, Письма в ЭЧАЯ N 3 [112] (2002) 25.
5. Ф. Г. Лепехин, <http://hepd.pnpi.spb.ru/ofve/nni/ares.pdf>
6. С. J. Monitz at al., Phys. Rev. Lett. **26**(1971) 445.
7. Ф. Г. Лепехин, Б. Б. Симонов, ЯФ **68**(2005) 2101.
8. В. Г. Воинов, И. Я. Часников, Многократное рассеяние частиц в ядерных фотоэмульсиях, изд. Наука, Каз. ССР, Алма-Ата, 1969, с. 130.
9. Ф. Г. Лепехин, О. В. Левицкая, Б. Б. Симонов, Препринт ПИЯФ–2492, Гатчина, 2002, с. 14.
10. М. I. Adamovich at al., Eur. Phys. J. **A6**(1999) 421.
11. В. В. Добырн, Е. А. Котиков, Ф. Г. Лепехин, Препринт ПИЯФ–2784, Гатчина, 2008, с.11.
12. Ф. Г. Лепехин, <http://hepd.pnpi.spb.ru/ofve/nni/ydel.pdf>

13. Ф. Г. Лепехин, <http://hepd.pnpi.spb.ru/ofve/nni/ini77.txt>
14. Ф. Г. Лепехин, <http://hepd.pnpi.spb.ru/ofve/nni/atxt.txt>
15. Ф. Г. Лепехин, <http://hepd.pnpi.spb.ru/ofve/nni/rtxt.txt>
16. Ф. Г. Лепехин, ЯФ **72**(2009) 270.