

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

Препринт 2726

Ф. Г. Лепехин

Вторичные взаимодействия в струях фрагментов
ядер свинца с энергией 160 А ГэВ
в фотоэмульсии

Гатчина-2007

**Second interactions in jets of fragments
of the nuclei of Pb with an energy 160 A GeV
in photoemulsion**

F. G. Lepekhin

A b s t r a c t

The distribution of distances up to second stars, in jets of peripheral interactions of the relativistic nuclei of Pb with an energy 160 A GeV have an exponential distribution with a constant $\lambda = 12.15$ mm on an interval of observation equal 10.0 mm.

А н н о т а ц и я

Показано, что распределение расстояний до вторичных звезд в струях периферических взаимодействий релятивистских ядер свинца с энергией 160 ГэВ на нуклон согласуется с экспоненциальным распределением с константой $\lambda = 12.15$ мм на интервале наблюдения $L = 10.0$ мм.

Предмет обсуждения. В работе [1] из 1699 неупругих взаимодействий релятивистских ядер свинца, найденных просмотром по следу, отобрано 352 события их периферических взаимодействий с ядрами в фотоэмульсии. Они не содержали продуктов расщепления ядер мишеней. В работе [2] было установлено, что углы φ двухзарядных фрагментов ядер свинца с этой же энергией в плоскости эмульсии распределены нормально, с константой $\sigma_\varphi = (0.37 \pm 0.02)$ мрад. Более массивные фрагменты сосредоточены в более узком конусе. Это значит, что если вторичная звезда в струе образована заряженной частицей с углом $\varphi > 2.0$ мрад, то эта заряженная частица не фрагмент релятивистского ядра свинца. Вызванное ею взаимодействие должно быть исключено при анализе как фоновое.

Продольные скорости всех фрагментов в струе почти одинаковы [3]. Поэтому струя фрагментов релятивистского ядра свинца с энергией 160 А ГэВ, даже на расстоянии $L = 1$ см, представляет собой облако заряженных частиц и нейтронов размером не более 5 мкм в любом направлении. Конечно, это очень много по сравнению с размерами частиц и расстоянием, на котором они взаимодействуют сильно. Поэтому вероятность взаимодействия каждого

фрагмента струи с ядром в эмульсии не зависит от других фрагментов в струе. Но, как будет показано ниже, это расстояние сравнимо с точностью измерения расстояний между вторичными звездами от фрагментов струи в эмульсии. Когда один из n фрагментов струи, независимо от других, образует звезду в эмульсии, то остальные $(n - 1)$ фрагменты струи находятся, по нашим меркам, недалеко от нее.

С уменьшением энергии первичной частицы, или при фрагментации покоящегося в ЛС тяжелого ядра, бомбардируемого энергичными частицами, эффект образования таких локализованных в пространстве групп частиц уменьшается и исчезает. Никаких струй фрагментов, кроме пар α -частиц из процесса ${}^8\text{Be} \rightarrow 2\alpha$ [4, 5], не наблюдается. Частицы полностью независимы. И когда одна из них взаимодействует с ядром в эмульсии, остальные могут находиться где угодно. Наблюдаемые нами струи релятивистских ядер свинца имеют чисто кинематическое происхождение. Никаких динамических эффектов в струях фрагментов релятивистских ядер никто и никогда не наблюдал.

Экспериментально установлено [6, 7], что в эмульсии средние пробеги фрагментов релятивистских ядер до неупругого взаимодействия $\lambda \sim 1/\sigma_{in}$ с хорошей точностью равны этим же величинам для ускоренных релятивистских ионов. В нашем случае сумма зарядов фрагментов близка к заряду первичного ядра и число фрагментов n не мало. Создаются условия, когда на длине наблюдения $L = 1.0 - 1.5$ см одна струя будет давать $k = 0, 1, 2, 3 \dots$ вторичных звезд. А так как струи фрагментов в поле зрения микроскопа ~ 50 мкм очень узкие, то они часто выглядят как сплошной черный шнур. И все, кто получил

эмульсии, облученные в CERN ионами свинца с энергией 160 ГэВ на нуклон, уже при поиске событий по следу обратили внимание на цепочки связанных звезд в струях фрагментов на сравнительно малых расстояниях от первичной звезды. На это же было обращено внимание и в работе [1], где было высказано предположение о существовании неких нелинейных эффектов в цепочках таких звезд. Однако никаких количественных доказательств этого эффекта в работе [1] не приводится.

Только значительно позднее, в работе [8], в этих же событиях, были приведены экспериментальные данные о распределении расстояний до тех же вторичных взаимодействий, что и в работе [1]. Было заявлено о существовании немонотонного изменения вероятности взаимодействия фрагментов релятивистского ядра свинца с ядрами в фотоэмульсии. Речь идет о каком-то новом, ранее неизвестном, физическом явлении, которое, как оказывается, обнаруживается легко и просто всего-то на сотнях струй и сотнях вторичных звезд в них. Все экспериментаторы, работавшие годами с этими эмульсиями, облученными в CERN, по мнению авторов [8], этого просто не видели. Рассматривать достоинства и ошибки работы [8] здесь мы не будем. Но авторы [8] и некоторые из тех, кто с ней ознакомился, особенно сильно были поражены резким расхождением вида распределения расстояний до вторичных звезд, полученных в эксперименте, с предсказанием, сделанным авторами. По их предсказанию, распределение это должно было бы быть равномерным. А оно, по утверждению авторов работы [8], на длине $L = 1.5$ см вообще обращается в ноль. Неупругие взаимодействия фрагментов струи свинца с ядрами в эмульсии на больших расстояниях уже

не происходят.

Но хорошо бы обосновать утверждение о том, что распределение расстояний до вторичных звезд в данном эксперименте должно быть равномерным, при каких условиях, и выполняются ли они в этой редакции эксперимента. Этого ни авторы работы [8], ни участники ее обсуждения [9] не сделали. А любые расчеты вероятности наблюдения звезд в струях фрагментов могут быть сделаны только на основании некоторых предположений. Все расчеты вероятностей эксперимента всегда условны [10]. Если обнаруживается расхождение расчета вероятности наблюдения по теории вероятностей с экспериментом, то это не всегда означает, что обнаружено какое-то новое физическое явление. Чаще всего это свидетельствует о том, что предположения и условия, заложенные в расчет, не выполняются в данной методике эксперимента. Все эти детали обсуждаются в [9] и здесь повторяться не будут. В этой работе будут только описаны методика и результаты повторных измерений расстояний до вторичных звезд в струях фрагментов свинца в той же самой выборке событий, что и в работе [8]. Будет проверена надежность самих экспериментальных данных, на основании которых сделан вывод об открытии нового физического явления, состоящего в немонотонном изменении вероятности взаимодействия фрагментов релятивистских ядер с ядрами в фотоэмульсии.

Процедура измерений. Измерение координат точек на следах заряженных частиц в ядерной фотоэмульсии в ПИЯФ РАН ведется на микроскопе МПЭ-11 с датчиками координаты X , которая возрастает по направлению импульса первичной частицы, координаты Z вдоль оптиче-

ской оси микроскопа и координаты Y в поле зрения окуляра. Для калибровки цены младшего разряда датчиков по осям X и Y используется объект микрометр. Это стеклянная пластинка с нанесенными на ней штрихами через 10 микрон, изготавливаемая по техническим условиям Государственного оптического института (ГОИ). Результаты калибровок содержатся в [11, 12].

Стол микроскопа имеет люфт. И расстояния меньше 10 мкм его перемещением измерять нельзя. При расстояниях порядка миллиметра ошибка измерения по оси X равна 0.5 %. Этого достаточно для представления плотности распределения в виде гистограммы с шагом в 1 мм. Чтобы гистограмма отражала функцию плотности вероятности наблюдения величины, ошибка гистограммируемой величины должна быть существенно меньше шага гистограммы.

В процессе измерений координат точек оператор работает в диалоговом режиме с ПЭВМ, которая предписывает ему последовательность действий по процедуре [13] в соответствии с инструкцией [14]. Список событий, в которых следует вести измерения, и число вторичных звезд в них были предоставлены авторами работы [8].

Результаты. Всего было измерено 280 событий, содержащих 548 вторичных звезд. Первичные данные процедуры [13] находятся в [15]. Они обработаны процедурой [16]. В ней исключены расстояния больше 10 мм и вторичные звезды от заряженных частиц с углом $\varphi > 2.0$ мрад. Упорядоченные по возрастанию расстояния в миллиметрах и находятся в [17]. Это основные данные, полученные в результате повторных измерений. Они представляют эмпирическую функцию распределения, которая, в соответ-

ствии с основной теоремой математической статистики, при увеличении объема выборки, с вероятностью единица, равномерно стремится к истинной функции распределения. Если, конечно, она существует, что в данном эксперименте вовсе не очевидно по причинам, которые здесь не обсуждаются. Просто это надо иметь в виду при обсуждении наших результатов повторных измерений.

Анализ результатов. Если предположить, что расстояния до вторичных звезд на интервале в 10 мм распределены по экспоненте, то из данных [15] можно получить ее константу λ , наилучшим образом описывающую эксперимент. Такая гипотеза в этом эксперименте представляется естественной, т. к. струя состоит из фрагментов с разными зарядами, но поток фрагментов с одним и тем же зарядом ослабевает в эмульсии по экспоненте.

В процедуре [16] оценка константы λ из N расстояний массива [17] получается нахождением минимума величины

$$\omega^2 = \sum_{i=1}^{i=N} \left[\frac{1 - \exp(-x_i/\lambda)}{1 - \exp(-L/\lambda)} - \frac{2i - 1}{2N} \right]^2, \quad (1)$$

где x_i – элемент массива [17]. Это критерий согласия Крамерса–Мизеса [18] предполагаемой теоретической функции распределения с эмпирической функцией распределения, наблюдаемой в эксперименте на интервале L . В нашем случае минимум критерия согласия достигается при $\omega^2 = 0.055$ с $\lambda = 12.15$ мм. Результаты проверки согласия полученного экспериментального распределения расстояний до вторичных звезд, с экспоненциальным распределением с константой $\lambda = 12.15$, приведены в таблице. Это согласие не отвергается ни одним из критериев, что видно и из рис. 1.

Проверка гипотезы согласия эксперимента
с экспоненциальным распределением
по трем непараметрическим критериям

Критерий согласия	Его критическая величина	Эксперимент
Колмогоров [18]	1.63	0.683
ω^2 [18]	0.743	0.055
Куипер [19]	2.001	1.147

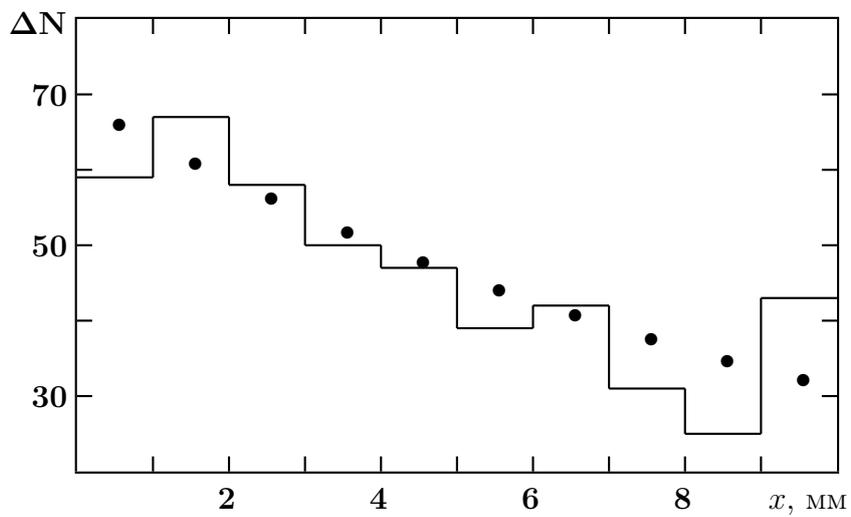


Рис. 1. Число вторичных звезд ΔN на интервал по x в один мм. Гистограмма – эксперимент, точки \bullet – экспонента с константой $\lambda = 12.15$ мм

Особенно интересным оказался вопрос о величине доверительного интервала параметра усеченного экспоненциального распределения, которое наблюдалось в эксперименте. Ведь о том, есть увеличение сечения образования вторичных звезд фрагментами струи или его нет, мы можем судить, только сравнивая средний пробег струи до звездообразования в одном и в другом процессе. Отдельных следов фрагментов в струе мы не видим. Поэтому решение вопроса о том, больше или меньше средний пробег, зависит от величины доверительного интервала константы усеченного экспоненциального распределения. Это сейчас подробнее и рассмотрим.

Оценка величины доверительного интервала. Хорошо известно, что состоятельную и эффективную оценку параметра по экспериментальным данным дает только метод максимального правдоподобия (ММП). Достоверно, что только эта оценка, с возрастанием объема выборки, стремится к истинной величине параметра, и она использует всю имеющуюся информацию. Точнее уже не получить ни при каком другом способе оценки параметра.

А кроме этого, ММП дает простой способ оценить величину доверительного интервала даже и тогда, когда середина его не совпадает с наиболее правдоподобной его величиной. Функция правдоподобия в нашем случае имеет вид

$$L = \prod_{i=1}^{i=N} \frac{\exp(-x_i/\lambda)}{\lambda (1 - \exp(-L/\lambda))}. \quad (2)$$

Обозначения те же, что и в формуле (1). Стандартный путь оценки параметра и доверительного его интервала состоит в следующем. Приравниваем нулю производную

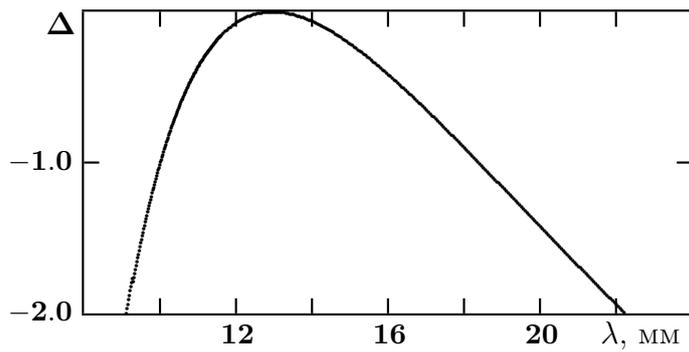


Рис. 2. Распределение величины Δ , равной разности логарифмов функции правдоподобия L в максимуме и при данной величине λ . Доверительный интервал величины λ есть расстояние по оси X между точками, в которые упирается парабола на оси X при $\Delta = -2.0$

от логарифма функции правдоподобия L по параметру λ и решаем относительно его полученное нелинейное уравнение. В нашем случае максимум функции правдоподобия достигается при величине параметра 12.854 мм. Для оценки его доверительного интервала строим зависимость величины $\Delta = \ln(L) - \ln(L_0)$ от параметра λ , где L_0 — это максимальная величина функции правдоподобия. Чаще всего эта зависимость похожа на параболу, но из рис. 2 видно, что в нашем случае это не так. Доверительный интервал растянут в область больших величин λ .

Качественно этот результат предсказуем и хорошо известен. Увеличение вероятности наблюдения больших величин параметра λ в формуле (2) связано с нормирую-

щим множителем, который и учитывает тот факт, что в эксперименте наблюдаются звезды только на интервале наблюдения L , сравнимом с величиной λ . Оценка параметра ММП в этом случае является смещенной, что тоже хорошо известно. Но в нашем случае это означает, что если даже в двух подобных экспериментах мы бы получили отношение средних пробегов струй равным двум, то и тогда утверждать, что истинные величины в этих экспериментах существенно различаются, было бы нельзя. Очевидно, что редакция данного эксперимента для решения этого вопроса вообще мало пригодна – она неэффективна.

Заключение. Итак, повторные измерения тех же событий, что были использованы и в работе [8], показали, что распределение расстояний до вторичных звезд в струях фрагментов ядер свинца с энергией 160 А ГэВ на интервале $L = 10$ мм хорошо согласуется с экспоненциальным распределением с константой λ , равной 12.15 мм. Распределение является гладким и никаких немонотонностей не имеет. Конечно, оно может быть описано так же хорошо многими другими гладкими функциями. Краткий отчет об этой работе, с рисунком 1, имеется в [20].

При увеличении статистики и увеличении интервала наблюдения L обнаружение отклонения от экспоненциальной зависимости возможно. Но на больших интервалах наблюдения L уменьшится и эффективность регистрации вторичных звезд, так что возникнут новые проблемы.

Наверное, мало кто верит, что после $L = 15.0$ мм вторичные звезды оставшимися фрагментами струи больше не образуются. Это было бы действительно новым физическим явлением. Но при увеличении статистики почти линейная зависимость числа событий на интервал на рис. 1,

которая сейчас, действительно, при ее продолжении упирается в ноль на расстояниях около 1.5 см, на интервале 1 см сохранится, событий станет больше, и ее продолжение пересечет ось X уже при больших расстояниях от первичной звезды. Таким образом, отсутствие событий после расстояний больше 1.5 см, обнаруженное в работе [8], вовсе не доказывает, что существует какое-то новое физическое явление.

Все первичные данные, приведенные в этой работе, могут быть использованы в любых публикациях. В том числе и в тех, которые будут по-прежнему настаивать на результатах работы [8]. Со ссылкой на данную работу, где они опубликованы впервые.

Автор благодарен Л. Н. Ткач за высокое качество всех измерений на микроскопе МПЭ-11 в ПИЯФ, использованных в этой работе.

Литература

1. F. G. Lepekhin, O. V. Levitskaya, V. V. Rusakova, Abstract. International Symposium on Nuclear Physics, Bhabha Atomic Research Centre, Mumbai, India, **43b** (2000) 428; <http://hepd.pnpi.spb.ru/ofve/nni/bom.pdf>
2. F. G. Lepekhin, D. M. Seliverstov, B. B. Simonov, Eur. Phys. J. **A1** (1998) 137.
3. <http://hepd.pnpi.spb.ru/ofve/nni/see.doc>
4. С. Пауэлл, П. Фаулер, Д. Перкинс, Исследования элементарных частиц фотографическим методом, М.: ИЛ, 1962, 420 с.
5. Ф. Г. Лепехин, ЭЧАЯ **36** (2005) 36.
6. B. P. Vannik et al., Z. Phys. A - Atoms and Nuclei **321** (1985) 249.

7. J. D. Stevenson et al., Phys. Rev. Lett. **52** (1984) 515.
8. О. В. Левицкая, Г. М. Амальский, Препринт ПИЯФ 2683, Гатчина, 2006, 30 с.;
<http://hepd.pnpi.spb.ru/ofve/nni/pr2683.pdf>
9. <http://hepd.pnpi.spb.ru/ofve/nni/sfrnuc.htm>
10. Л. Яноши, Теория и практика обработки результатов измерений, М.: "Мир", 1966, 447 с.
11. <http://hepd.pnpi.spb.ru/ofve/nni/ydel.doc>
12. <http://hepd.pnpi.spb.ru/ofve/nni/cdelz.doc>
13. <http://hepd.pnpi.spb.ru/ofve/nni/rvtfor.doc>
14. <http://hepd.pnpi.spb.ru/ofve/nni/mvrt.doc>
15. <http://hepd.pnpi.spb.ru/ofve/nni/rvt1pb.txt>
16. <http://hepd.pnpi.spb.ru/ofve/nni/vtpb.txt>
17. <http://hepd.pnpi.spb.ru/ofve/nni/vtpb.prn>
18. Статистические методы в экспериментальной физике, пер. с англ. под ред. А. А. Тяпкина, М.: Атомиздат, 1976, 326 с.
19. К. Мардиа, Статистический анализ угловых наблюдений, М.: "Наука", 1978, 236 с.
20. <http://hepd.pnpi.spb.ru/ofve/nni/otchpb.doc>