

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

4561/82

27/9-82

P2-82-500

Н.С.Амелин, В.С.Барашенков, Н.В.Славин

РОЛЬ ФАЙРБОЛОВ В МЕХАНИЗМЕ
ВНУТРИЯДЕРНЫХ КАСКАДОВ

1982

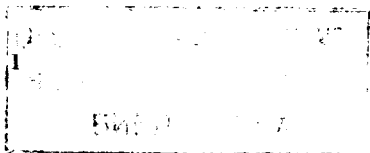
Механизм внутриядерных каскадов, когда взаимодействие налетающей частицы (или ядра) с ядром-мишенью рассматривают как ветвящуюся последовательность упругих и неупругих взаимодействий рождающихся и рассеивающихся частиц, хорошо объясняющий эксперимент в области $T \lesssim 10$ ГэВ, приводит к противоречиям с опытом при больших энергиях x . Сопоставление расчетных и экспериментальных данных позволяет сделать вывод о том, что теоретический каскад является слишком разветвленным ("мощным")^{/1,2/}. Такой же вывод следует из широко обсуждавшейся в последнее время "модели каскада лидера"^{/3,4/}, в которой "волевым образом" запрещаются внутриядерные столкновения всех частиц, кроме лидирующего нуклона, а столкновения последнего с нуклонами ядра рассматриваются как взаимодействия свободных частиц^{xx}. Рассчитанные с помощью такой "усеченной каскадной модели" множественность, угловые распределения, корреляционные характеристики α - и g -частиц оказываются довольно близкими к экспериментальным.

Возникает вопрос, какие физические причины могут приводить к уменьшению разветвленности внутриядерного каскада при очень высоких энергиях?

x Здесь и везде ниже T - кинетическая энергия налетающей частицы в лабораторной системе координат, \mathcal{T} - кинетическая энергия каскадной частицы.

Индексами α , g и b далее будут отмечаться величины, относящиеся соответственно к частицам с тонкими, серыми и черными фотоэмульсионными следами. Индексом h будем отмечать суммарные данные для g - и b - частиц.

xx В стандартной каскадной модели часть внутриядерных столкновений запрещена принципом Паули, поэтому эффективное сечение взаимодействий каскадных частиц в ядре заметно меньше сечения взаимодействия свободных адронов.



Одной из таких причин могло бы быть резкое уменьшение сечений взаимодействия частиц, которые претерпели внутриядерное столкновение и еще не успели восстановить свое адронное поле^{/5/}. Такое поведение частиц (в том числе и лидирующего нуклона) подсказывается партонно-кварковыми моделями, однако в полной мере оно должно проявляться лишь при очень высоких энергиях. Как показано в^{/6/}, выводы работы^{/5/} о том, что этот эффект уже заметен в эксперименте, нельзя считать обоснованным.

Другой причиной уменьшения разветвленности каскадного "дерева" являются многочастичные взаимодействия, когда с внутриядерным нуклоном сталкиваются сразу несколько каскадных частиц^{/7/}. Последовательный учет таких взаимодействий очень сложен технически и, кроме того, зависит от ряда неизвестных величин - вероятностей взаимодействия, множественности рождающихся частиц и т.д. В выполненных до настоящего времени расчетах эти величины рассматривались как подгоночные параметры, определяемые из предположения, что расхождение каскадной модели с опытом целиком обусловлено многочастичными взаимодействиями^х.

Можно получить определенную оценку вклада многочастичных взаимодействий в развитие внутриядерного каскада, если заметить, что при неупругом столкновении высокоэнергетических адронов в системе центра масс, кроме резко выделенных по энергии, обособленных лидирующих частиц, образуются два противоположно направленных (в системе центра масс) узко коллимированных пучка, внутри которых взаимодействие настолько велико, что в течение некоторого времени ("время формирования") их можно рассматривать как единые образования - многокварковые системы - файрболы. Внутри ядра (т.е. в лабораторной системе координат) одна из таких систем сразу же распадается, образуя внешний диффузный конус частиц; время жизни другой системы благодаря эффекту релятивистского сжатия времени, наоборот, возрастает и прежде, чем распасться, она может успеть провзаимодействовать с одним или с несколькими внутриядерными нуклонами. Многочастичное взаимодействие в этом случае становится обычным двухчастичным столкновением частицы-файрбола с нуклоном, эффективное сечение которого можно оценивать с помощью релятивистского обобщения теории Глаубера^{/9/xx}.

х В обзоре^{/8/} отмечено, что модель многочастичных взаимодействий применима, если вторичные частицы во внутриядерном адрон-нуклонном столкновении вылетают строго из одной точки. В действительности такого условия нет, хотя его можно ввести дополнительно в целях упрощения математических расчетов. На результатах каскадных вычислений такое упрощение сказывается слабо.

xx В общем случае, когда с нуклоном сталкиваются несколько частиц с произвольными (не коллинеарными) направлениями импульсов, однозначного понятия "сечение взаимодействия" ввести нельзя; вместо этого следует использовать "вероятность взаимодействия"/10/.

Качественно картина внутриядерного каскада с участием файрболов выглядит следующим образом. При небольших энергиях T роль файрболов играют обычные мезонные и барионные резонансы, большинство из которых распадается на π -мезоны, не успев провзаимодействовать ни с одним из нуклонов ядра. Влияние этих резонансов на характеристики адрон-ядерного взаимодействия проявляется лишь при весьма специфических условиях - например, при изучении вылета быстрых протонов в заднюю полусферу^{/11/}. С увеличением энергии T возрастают масса файрболов и вероятность их взаимодействия внутри ядра, их вклад начинает заметно сказываться даже на средних характеристиках адрон-ядерного взаимодействия. Наконец, при энергиях $T \gg 10$ ГэВ тяжелые многокварковые файрболы становятся определяющими, существенно уменьшая число независимых столкновений каскадных частиц.

Для того чтобы приблизить условия каскадных расчетов к модели, обсуждавшейся в работах^{/3,4/}, мы будем рассматривать ядро-мишень как непрерывную среду с диффузным (вудс-саксоновским) распределением плотности. В этом случае, приравняв к нулю сечения ядерных взаимодействий файрболов и образующихся при их распаде высокоэнергетических мезонов (при $T > T_0 \approx 5-10$ ГэВ), получим модель, которая отличается от рассмотренной в работах^{/3,4/} лишь дополнительным учетом внутриядерных взаимодействий нуклонов отдачи, образующихся при столкновениях лидирующего нуклона с нуклонами ядра, и вкладом π -N взаимодействий с энергиями $T < T_0$ ^х.

Соответствующие поправки к рассчитанным в работах^{/3,4/} характеристикам ν - и g -частиц невелики при $T > 100$ ГэВ (см. рис.1 и 2), однако они становятся весьма существенными в области меньших энергий. Так, если при $T=200$ ГэВ увеличение числа ν -частиц, рождающихся в столкновениях протонов с легкими и тяжелыми ядрами фотоэмульсии, составляет приблизительно 5 и 15%, то при $T=70$ ГэВ это увеличение равно уже 10 и 45%. К особенно заметным расхождениям с экспериментом, в том числе и в области $T \gg 100$ ГэВ, модель каскада лидера приводит для b -частиц, рождающихся при взаимодействиях с тяжелыми ядрами. В этом случае модель не воспроизводит основного экспериментального факта - практически постоянное, не зависящее от первичной энергии значение множественности низкоэнергетических частиц при энергиях $T \gg 10$ ГэВ (рис.1). Расчетная множественность достигает насыщения лишь при $T \gg 100$ ГэВ.

х Согласно с опытом каскадного механизма в области $T < 10$ ГэВ указывает на то, что эти взаимодействия происходят обычным образом, поэтому их следует принимать во внимание при вычислениях.

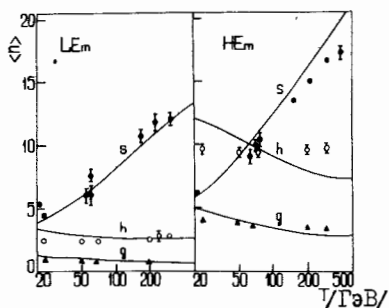


Рис.1. Среднее число s -, g - и h - частиц, рождающихся в неупругом столкновении протона с легким (LE_m) и тяжелым (HE_m) ядрами фотоэмульсии при энергии T . Кривые - монте-карловский расчет каскада без учета ядерных взаимодействий фэйрбола и каскадных мезонов с энергиями $T < T_0$. Статистические погрешности расчета - 3%. Значками \bullet , \circ , \blacktriangle нанесены экспериментальные значения множественности s -, g - и h - частиц. (Библиографию экспериментальных работ см. в обзорах ^{/12,13/}).

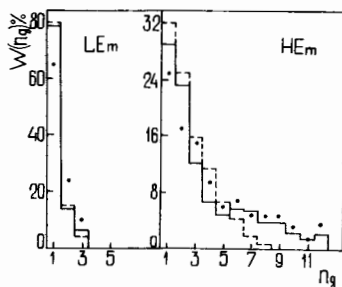


Рис.2. Распределение множественности серых следов при неупругих столкновениях протонов с легкими и тяжелыми ядрами фотоэмульсии при $T=200$ ГэВ. Сплошные гистограммы - наш расчет без учета взаимодействий фэйрбола в ядре. Статистическая погрешность около 3%. Пунктир-расчет по модели каскада лидера ^{/4/}. Точки - экспериментальные данные ^{/14,15/}.

Таким образом, из анализа каскада лидера в рамках монте-карловской теории внутриядерных каскадов следует, что если не пользоваться приближенным аналитическим методом работ ^{/3,4/}, учесть особенности низкоэнергетических взаимодействий частиц в ядрах и применить более детальное моделирование высокоэнергетических π -N и N-N взаимодействий ^{/16/}, то в целом согласие с опытом оказывается не столь хорошим, как это получено в работах ^{/3,4/}.

На основе кинематических соображений, следующих из оценок среднего угла вылета рождающихся мезонов и времени пролета ими среднего межнуклонного расстояния в ядре, можно считать, что фэйрболы образуются в неупругих столкновениях каскадных частиц с энергиями $T > 5 + 10$ ГэВ. Для нуклон-ядерных взаимодействий при очень высоких начальных энергиях $T \gg 10$ ГэВ, когда энергия каскадных мезонов, как правило, также велика, точный выбор этой границы практически не сказывается на результатах расчетов.

Массу и импульс фэйрбола можно определить, если известны множественность N_F и импульсы P_i возникающих при его распаде мезонов. Значения N_F и P_i для каждого отдельного π -N и N-N взаимодействия рассчитываются методом Монте-Карло по известным экспериментальным распределениям ^{/16/}. Вылетев из ядра, фэйрбол распадается на N_F составляющих его π -мезонов. Если фэйрбол испытал перед этим упругое рассеяние и его импульс изменился, то значения P_i должны быть соответствующим образом пересчитаны с помощью лоренцевских преобразований.

Рассчитанные в рамках релятивистского обобщения теории Глаубера сечения рассеяния и неупругого взаимодействия фэйрбола с внутриядерным нуклоном зависят от числа содержащихся в фэйрболе кварков и антикварков ^{/9/}. Поскольку эксперимент показывает, что в высокоэнергетических π -N столкновениях вторичные π -мезоны рождаются в основном через резонансы ρ, ω и т.п., мы будем считать, что это имеет место и при столкновении фэйрбола с нуклоном, и положим

$N_q \approx 2N_T \approx N_\pi$, где $N_T \approx N_\pi/2$ - число образующихся вторичных резонансов. Будем также предполагать, что в системе центра масс импульсные распределения π -мезонов, рождающихся при столкновении фэйрбола с нуклоном $w(p)$, и их множественность N такие же, как в π -N взаимодействии с равной энергией $\mathcal{E} = \left\{ \left(\sum_{i=1}^N P_i \right)^2 + \left[\sum_{i=1}^N (P_i^2 + m_\pi^2) \right] \right\}^{1/2}$.

^x Результаты расчетов слабо зависят от конкретного вида функций $w(p)$, т.к. определяющим является кинематический фактор релятивистского преобразования к лабораторной системе координат. Следует также заметить, что при одинаковой энергии \mathcal{E} множественность рождающихся частиц, как это видно из опытов, очень слабо зависит от типа сталкивающихся частиц.

На рис.3 сравниваются результаты каскадных расчетов средней множественности g - и h -частиц, выполненных с учетом и без учета фибролов. Включение в расчет фибролов и их взаимодействий в ядре значительно уменьшает число внутриядерных столкновений и приближает множественность рождающихся низкоэнергетических частиц к экспериментальной. Например, разность расчетной и экспериментальной множественности $\langle n_h \rangle$ уменьшается почти вдвое. В то же время число ливневых частиц остается практически неизменным, т.к. снижение числа внутриядерных столкновений компенсируется возрастанием средней множественности частиц, рождающихся в каждом происшедшем столкновении благодаря большей энергии E .

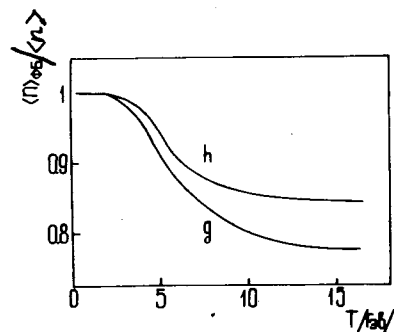


Рис.3. Отношение множественностей низкоэнергетических частиц, рассчитанных в каскадных моделях без учета и с учетом фибролов. Взаимодействие протонов с тяжелыми ядрами фотоэмульсии.

Дальнейшее усовершенствование теории, без которого нельзя рассчитывать на хорошее согласие с опытом, особенно в области $T \gg 10$ ГэВ, требует прежде всего учета времени ядерного взаимодействия τ , в течение которого столкновение фиброла и других каскадных частиц с нуклоном ядра можно считать единым актом взаимодействия. Запоздавающие частицы при $t > \tau$ будут встречать соответственно меньшую ядерную плотность (так называемый эффект трейлинга^[1]). В области высоких энергий следует также принимать во внимание уменьшение сечений взаимодействия частиц (в первую очередь лидирующих) вблизи точки их рождения.

В заключение пользуемся случаем выразить благодарность А.М.Задорожному, Б.Ф.Костенко и С.Ю.Шмакову за многократные обсуждения.

Литература

1. Barashenkov V.S. et al. Nucl.Phys, 1980, v. A338, p.413 .
2. Барашенков В.С. и др. ОИЯИ, P2-I2933, Дубна, 1979.
3. Алавердян Г.Б. и др. ОИЯИ, P2-I2536, P2-I2537, Дубна, 1979.
4. Alaverdyan G.B. et al. JINR, E2-12825, Dubna, 1979 .
5. Мурзин В.С. и др. ЯФ, 1976, т.23, с.383.
6. Алавердян Г.Б. и др. ЯФ, 1980, т.31, с.776.
7. Artykov I.Z. et al. Nucl. Phys., 1968, v. B6, p. 11 .
8. Николаев Н.Н. ЭЧАЯ, 1981, т.12, с.177.
9. Амелин Н.С. и др. ОИЯИ, P2-81-615, P2-81-709, Дубна, 1981.
10. Pancheri G. et al. Lett. Nuovo Cimento, 1972, v. 18, p. 743.
11. Амелин Н.С. и др. ЭЧАЯ, 1982, т.13, с.88.
12. Гуламов К.Г. и др. ЭЧАЯ, 1978, т.8, с.554.
13. Niemieneu M. et al. Phys. Scr., 1979, v. 19, p. 307 .
14. Азимов С.А. и др. ЯФ, 1977, т.26, с.346.
15. Боос Э.Г. и др. ЯФ, 1975, т.22, с.736; 1978, т.28, с.697.
16. Barashenkov V.S. et al. Acta Phys. Polonica, 1969, v. 36, p. 457; 1981, v. B12, p. 563, 951, 959 .

Рукопись поступила в издательский отдел
29 июня 1982 года.

НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

D13-11182	Труды IX Международного симпозиума по ядерной электронике. Варна, 1977.	5 р. 00 к.
D17-11490	Труды Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1977.	6 р. 00 к.
D6-11574	Сборник аннотаций XV совещания по ядерной спектроскопии и теории ядра. Дубна, 1978.	2 р. 50 к.
D3-11787	Труды III Международной школы по нейтронной физике. Алушта, 1978.	3 р. 00 к.
D13-11807	Труды III Международного совещания по пропорциональным и дрейфовым камерам. Дубна, 1978.	6 р. 00 к.
	Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1978 /2 тома/	7 р. 40 к.
D1,2-12036	Труды V Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1978.	5 р. 00 к.
D1,2-12450	Труды XII Международной школы молодых ученых по физике высоких энергий. Приморско, НРБ, 1978.	3 р. 00 к.
	Труды VII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1980 /2 тома/	8 р. 00 к.
D11-80-13	Труды рабочего совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике, Дубна, 1979	3 р. 50 к.
D4-80-271	Труды Международной конференции по проблемам нескольких тел в ядерной физике. Дубна, 1979.	3 р. 00 к.
D4-80-385	Труды Международной школы по структуре ядра. Алушта, 1980.	5 р. 00 к.
D2-81-543	Труды VI Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1981	2 р. 50 к.
D10,11-81-622	Труды Международного совещания по проблемам математического моделирования в ядерно-физических исследованиях. Дубна, 1980	2 р. 50 к.
D1,2-81-728	Труды VI Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1981.	3 р. 60 к.
D17-81-758	Труды II Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1981.	5 р. 40 к.
D1,2-82-27	Труды Международного симпозиума по поляризационным явлениям в физике высоких энергий. Дубна, 1981.	3 р. 20 к.
P18-82-117	Труды IV совещания по использованию новых ядерно-физических методов для решения научно-технических и народнохозяйственных задач. Дубна, 1981.	3 р. 80 к.

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу:
101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79
Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

Амелин Н.С., Барашенков В.С., Славин Н.В. P2-82-500
Роль фэйрболов в механизме внутриядерных каскадов

Известно, что часть мезонов, рождающихся при неупругих столкновениях высокоэнергетических адронов с нуклонами ядра, вылетает в узкий телесный конус. Благодаря их сильному взаимодействию эти мезоны могут некоторое время существовать в виде единой многокварковой системы - фэйрбола, которая далее может испытать упругое или неупругое столкновение с ядерным нуклоном. Показано, что учет таких фэйрболов в развитии внутриядерного каскада существенно улучшает согласие каскадных расчетов с опытом. В предельном случае, когда сечение взаимодействия фэйрбола в ядре мало, теория близка к известной "модели каскада лидера". Использование более точного метода расчета приводит к выводу, что согласие этой весьма приближенной модели с опытом несколько переоценивается.

Работа выполнена в Лаборатории вычислительной техники и автоматизации ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1982

Amelin N.S., Barashenkov V.S., Slavin N.V. P2-82-500
Role of Fireballs in Intranuclear Cascade Mechanism

It is known that essential part of mesons produced by initial hadron at high energy collision with intranuclear nucleon flies off into a narrow cone. Due to their interaction these mesons can exist as multiquark systems - "fireballs". Elastic or inelastic collision of fireballs with nucleons inside nuclei is possible. It is shown that the consideration of fireball within the development of intranuclear cascade significantly improves the agreement between the experiment and theory. If the interaction cross section of fireballs is small, our approach is close to the known "hadron leading model". More accurate calculation leads to the conclusion that the agreement of this model with experiment is somewhat overestimated.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1982

Перевод О.С.Виноградовой.