

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



СЗ43e2

T-529

1903/2-75

К.Д.Толстов

26/2-75

P1 - 8662

ЦЕНТРАЛЬНЫЙ УДАР РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЯДЕР

1975

P1 - 8662

К.Д.Толстов

ЦЕНТРАЛЬНЫЙ УДАР РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЯДЕР

**Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА**

В настоящее время все более возрастает интерес к исследованиям в области релятивистской ядерной физики, начатым в работах^{/1-6/}. В этих исследованиях, несомненно, поднимаются новые принципиальные вопросы и уже получены важные результаты, к которым в первую очередь следует отнести данные о рождении пионов и каонов с энергией, существенно превышающей величину, возможную при взаимодействии отдельных нуклонов сталкивающихся ядер /этот эффект был назван кумулятивным/^{/2,4/}.

Интересное сопоставление приводится в работе^{/7/}: в физике высоких энергий внимание до сих пор концентрировалось на сосредоточении все большей энергии в наименьшем пространстве, т.е. изучении столкновений элементарных частиц, - теперь же следует обратить внимание и на явления, когда высокая энергия сосредоточена в большом объеме. Согласно^{/1/} взаимодействие релятивистских ядер позволит проверить ряд представлений, используемых в теории элементарных частиц, например, ядро может служить "кварковой" моделью релятивистского протяженного объекта.

Целью настоящего сообщения является обсуждение некоторых явлений, которые возможны при центральном соударении релятивистских ядер, и исследование этих соударений с помощью ядерных фотоэмульсий. Перспективность этого метода обусловлена тем, что при столкновении релятивистских ядер мы будем иметь дело с очень большим числом генерированных частиц и релятивистскими фрагментами налетающего ядра с близкими углами разлета. Следовательно, необходимо высокое простран-

ственное разрешение, свойственное фотозмульсионному методу. С другой стороны, будем иметь очень большое число частиц от распада ядра мишени с широким спектром по энергии, массам и зарядам, в том числе частиц медленных. Ряд интересных результатов уже получен при использовании этого метода в исследованиях с космическими лучами /8-11/.

Центральный удар

В намеченных исследованиях центральный удар, т.е. столкновение ядер с полным перекрытием их поперечных сечений, очевидно, представляет наибольший интерес.

В экспериментальном отношении первой задачей является выделение из совокупности всех столкновений событий, которые относятся к центральному удару.

Обсуждая возможные эксперименты, остановимся в первую очередь на столкновении ядра кальция с ядром серебра в фотозмульсии. Центральное столкновение должно характеризоваться большим числом рожденных частиц и частиц от распада ядер по сравнению со средними значениями этих величин во всех столкновениях. Однако вследствие флуктуаций в числе вторичных частиц этот критерий не однозначен. С другой стороны, в случае периферических столкновений, т.е. при неполном перекрытии сечений сталкивающихся ядер, незатронутая часть налетающего ядра может сохранить свою энергию и заряд и вылететь в виде одного или нескольких релятивистских фрагментов в направлении, очень близком к направлению первичного пучка. Некоторую иллюстрацию изложенному можно дать на основе результатов по столкновениям α -частиц с импульсом 17 ГэВ/с и ядер фотозмульсии /6/.

Для всех взаимодействий $\langle n_s \rangle = 4,44 \pm 0,07$, $\langle n_h \rangle = 9,68 \pm 0,24$, а для взаимодействий с сохранением двухзарядной релятивистской частицы /т.е. ${}^3\text{He}$ или ${}^4\text{He}$ / $\langle n_s \rangle = 1,24 \pm 0,1$, $\langle n_h \rangle = 4,35 \pm 0,28$. Вторым признаком центрального удара может служить симметрия вылета вторичных частиц влево и вправо по отношению к пучку, т.к. в случае периферического столкновения частицы,

вылетающие в сторону не затронутой столкновением части налетающего ядра, встретят, очевидно, на своем пути меньше нуклонов ядра мишени. Следовательно, в этом направлении мультипликация частиц ожидается менее выраженной, чем в противоположном. Третьим признаком центрального удара при столкновении ядер кальция и серебра может явиться наличие как бы тора из незатронутых непосредственно столкновением нуклонов ядра серебра. Ширина этого тора $\sim 1/3$ радиуса ядра серебра. Можно ожидать, что разлет нуклонов, заключенных в этом торе, будет происходить преимущественно на отдельные нуклоны и с энергетическим спектром, отличным /более мягким/ от спектра частиц из перекрывающихся частей ядер. Если же происходит не центральный удар, то незатронутая часть ядра серебра может сохраниться в виде медленного фрагмента со значительным зарядом. Совокупность описанных критериев: множественность вторичных частиц, симметрия их вылета относительно оси пучка и спектр медленных частиц - позволяет, как можно полагать, выделить центральные столкновения.

Модели взаимодействия

Перейдем к рассмотрению моделей, которые могут иметь место при описании взаимодействия налетающего ядра с частью ядра мишени, находящейся на его пути при центральном ударе. Обсудим три существенно различные модели: каскад парных столкновений налетающих нуклонов с нуклонами ядра мишени; суперпозицию на основе модели ударной волны /12/ процессов, начинающихся в различных частях сталкивающихся ядер; коллективное взаимодействие нуклонов в ядре, обусловленное большой энергией и плотностью материи в объеме столкновения. В численных оценках примем, что налетающее ядро кальция имеет энергию 10 ГэВ/нуклон , а встречающееся на его пути число нуклонов ядра серебра равно числу нуклонов в ядре кальция - этим мы учитываем неполное совпадение центров сталкивающихся ядер.

Каскадный процесс

Число парных нуклон-нуклонных столкновений будет равно 40. Вследствие сохранения значительной доли энергии у налетающих нуклонов после упругих и неупругих столкновений и равной вероятности перезарядки протона в нейтрон или обратной мы получим ~20 релятивистских протонов. Число заряженных пионов, по данным^{/13/}, в среднем для pp- и pn-соударений равно $2,1 \pm 0,1$. Следовательно, всего будет $20 + 40 \times 2,1 = 104$ релятивистских вторичных частиц.

Среднее число g-протонов /с энергией $30 \leq E \leq 40$ МэВ/ в отдельном нуклон-нуклонном столкновении ~0,4. Следовательно, всего будем иметь ~16 g-протонов.

Суперпозиция ударных волн

В работах^{/12/} предполагается, что в результате неупругого взаимодействия быстрого нуклона с одним из нуклонов ядра рождается кластер адронов, который, пересекая ядро, замедляется, увеличивает свою массу и расширяется. За счет этого в ядре возникает ударная волна. С помощью этой модели в работах^{/12/} удалось описать ряд экспериментальных фактов. Поэтому предположим, что центральное столкновение ядер вызывает серию ударных волн от нуклон-нуклонных соударений в нескольких точках ядра. Более вероятно, что эти волны не когерентны, т.к. время и место возникновения каждой волны случайно. Следовательно, результирующая интенсивность получится от сложения парциальных интенсивностей. /Отметим, что в работе^{/15/} авторы, развивая свою модель^{/12/}, для случая столкновения ядер предполагают слияние части кластеров, образованных в отдельных нуклонных столкновениях/.

В первую очередь, нас интересуют величины $\langle n_s \rangle$ и $\langle n_g \rangle$. В сугубо приближенной оценке этих величин используем опытные данные при 10 ГэВ/с из^{/14/} и зависимость $\langle n_s \rangle$ от n_g при 70 ГэВ/с из^{/16/}. Согласно^{/14/} в столкновениях протонов с ядрами Ag, Br $\langle n_s \rangle = 3,5 \pm 0,3$,

$\langle n_g \rangle = 4,1 \pm 0,5$, а согласно^{/16/} для ядер Ag, Br график зависимости n_s от n_g дает $n_s = 4$ при $\langle n_g \rangle = 3$. Следовательно, приближенно можно принять при 10 ГэВ/с $\langle n_g \rangle \approx \langle n_s \rangle \approx 3$. С учетом вылета нейтронов $\langle n_g \rangle + 0 = 3,2, 3 \approx 7$. Следовательно, если центральное столкновение вызывает серию ударных волн, то максимальное количество независимых волн m , получаемое делением числа нуклонов в ядре серебра на 7, будет 15. Откуда суммарное число s частиц $n_s < 45$. Заряд серебра - 47, следовательно, число $\langle n_g \rangle < 47$, а число "b" частиц $\langle n_b \rangle < 47 - \langle n_g \rangle$.

Коллективное взаимодействие

Возможность коллективного взаимодействия обуславливается большой энергией и плотностью ядерной материи в объеме столкновения. Легко показать, что плотность ядерной материи будет близка к удвоенному значению по сравнению с обычной. Действительно, по данным^{/14/}, при столкновении протонов 10 ГэВ/с с ядрами серебра $\langle n_g \rangle = 4,1$; $\langle n_b \rangle = 6,1$; $\langle \beta_g \rangle = 0,45$; $\langle \beta_b \rangle = 0,3$, а составляющие скорости, перпендикулярные к оси пучка, равны $\langle \beta_g \rangle_{\perp} = 0,3$; $\langle \beta_b \rangle_{\perp} = 0,2$. Следовательно, за время сближения ядер от соприкосновения до совпадения их центров только меньшая часть нуклонов ядра мишени может выйти за границы объема налетающего ядра, и поэтому плотность ядерной материи в этом объеме внутри ядра мишени будет близка к удвоенной. Эта плотность может еще увеличиться за счет пионов, рожденных от столкновений нуклонов задней половины налетающего ядра, т.к. они вылетают вперед.

Очевидно, что возможность реализации на опыте удвоенной плотности нуклонов по сравнению с обычной ядерной представляет особый интерес. В этом случае ядерная материя есть как бы один гигантский файербол, несущий большой барионный заряд, который затем распадается на барионы и пионы. Значение γ_c "файербол" совпадает с его величиной для pp-соударения при 10 ГэВ 2,38, а полная энергия в с.с. $E = 175$ ГэВ. Если предпо-

ложить, что число рожденных частиц зависит от свободной энергии /108 ГэВ/ аналогично случаю pp-столкновений, то, экстраполируя результаты на встречных пучках/17/ к этой энергии, получим число рожденных частиц, равное ~20. В лабораторной системе вследствие большой скорости "файрбола" частицы будут вылетать в узком конусе вперед, т.е. будет наблюдаться ливень релятивистских частиц без вылета b -частиц - в противоположность тому, что обычно наблюдается при столкновении адронов с ядрами. Число заряженных барионов в этом ливне будет приближенно равно атомному весу кальция. Следовательно, общее число s - и g -частиц после распада "файрбола" будет равно $\sim 40 + \dots 20 = 60$.

Тор из незатронутых столкновением нуклонов ядра мишени с $\langle z \rangle \approx 25$, как ранее предполагалось, распадется на медленные частицы. В совокупности мы получим коллимированный вперед пучок релятивистских частиц и широкое угловое распределение медленных частиц, в основном протонов. С ростом энергии, приходящейся на один нуклон, у налетающего ядра следует ожидать более сильного проявления обсужденных эффектов.

Некоторые предварительные заключения, возможно, удастся получить и при достижимой в настоящее время величине 5 ГэВ на нуклон на синхрофазотроне ОИЯИ.

В заключение интересно привести некоторые известные данные по экспериментам, выполненным в космических лучах. Сейчас эти разрозненные данные относятся к области небольших зарядов и энергий, приходящихся на нуклон в падающих ядрах, и имеют малую статистическую обеспеченность.

В работе /8/ описано 5 столкновений ядер с зарядом 20 ± 26 с характеристиками центральных столкновений, т.к. в трех случаях нет релятивистских частиц с зарядом больше единицы, а в двух случаях заряд релятивистских фрагментов равен 3 и 4. Средний заряд налетающих ядер за вычетом заряда релятивистских фрагментов равен 22; $\langle n_s \rangle = 54$; $\langle n_g \rangle = 13$; $\langle n_b \rangle = 12$. Интересные результаты получены в работе /11/. Для группы взаимодействий, в которой средний заряд первичных ядер $\langle z \rangle = 17,7$; средний заряд фрагментов налетающего ядра $\langle z_{fr} \rangle = 1,6$;

происходит полное разрушение ядра мишени, т.е. $n_h \geq 28$, получено: $\langle n_\pi \rangle = 30,3$; $\langle n_s \rangle = 40$; $\langle n_g \rangle = 17,7$; $\langle \theta_s \rangle \approx 29$.

Для взаимодействий, вызванных ядрами с $z > 12$ со средней энергией на нуклон 2,4 ГэВ, наблюдается хорошо выраженный пик вперед g -протонов, что не имеет места в протон-ядерных столкновениях, а энергетический спектр этих протонов спадает более медленно по сравнению со спектром в протон-ядерных столкновениях. Далее авторы делают вывод, что взаимодействия с большой множественностью пионов не могут быть аппроксимированы суперпозицией независимых нуклон-нуклонных или нуклон-ядерных столкновений. В таблице приведены ранее сделанные оценки для различных моделей взаимодействия и цитированные выше экспериментальные данные.

Таблица

	$\langle n_s \rangle$	$\langle n_g \rangle$	$\langle n_b \rangle$	$\langle \theta_s \rangle$	$\langle \theta_g \rangle$
Каскад нуклон- нуклонных столкновений	100	16	30		$\sim 60^\circ$
Суперпозиция ударных волн	<45	<47	$<(47 - \langle n_g \rangle)$		$\sim 60^{/12/}$
Коллективные взаимодействия			20	20	$\ll 60$
5 взаимодейд. $\langle z \rangle = 22^{/8/}$	54	13	12	-	~ 55
$\langle z \rangle = 17,7^{/11/}$ $n_h \geq 28$	40	18	17	29	-

Литература

1. А.М.Балдин. Сообщение ОИЯИ, P7-5808, Дубна, 1971.
2. А.М.Балдин. Сообщение ОИЯИ, P1-5819, Дубна, 1971.
3. D.A.Galsteau et al. Nucl.Phys., A208, 626 /1973/.
4. H.H.Heckman. High Energy Phys. and Nuclear Struc-

- ture. North Holland Pub., HO, 1974, Amsterdam-London.
5. А.М.Балдин и др. Сообщение ОИЯИ, 1-8249, Дубна, 1974.
 6. К.Д.Толстов и др. Сообщение ОИЯИ, P1-8313, Дубна, 1974.
 7. T.D.Lee. *Abnormal Nuclear States and Vacuum Excitation*. CO-2271-27, New-York, 1974.
 8. B.Andersson, J.Otterlund, K.Kristiansson. *Arkiv for Fysik*, 31, 527 /1966/.
 9. Ю.Ф.Гагарин, Н.С.Иванова, В.Н.Куликов. *ЯФ*, 11, 1255 /1970/.
 10. B.Jakobsson, R.Kullberg, J.Otterlund. *Z.Physic*, 268, 1 /1974/.
 11. B.Jakobsson, R.Kullberg, J.Otterlund. *LUJP-CR-74-14*, /1974/.
 12. Б.Н.Калинкин, В.Л.Шмонин. *Сообщения ОИЯИ*, P2-7869; P2-7870; P2-7871, Дубна, 1974.
 13. Н.П.Богачев, Е.Л.Григорьев, Ю.П.Мереков. *ДАН*, 148, 793 /1963/.
 14. V.S.Barashenkov, V.A.Belyakov et al. *Nucl.Phys.*, 14, 522 /1959/60/.
 15. Б.Н.Калинкин, В.Л.Шмонин. *Препринт ОИЯИ*, 8309, стр. 24, Дубна, 1974.
 16. K.M.Abdo et al. *Prepr. JINR*, E1-8021, Dubna, 1974.
 17. M.Antinucci et al. *L.N.C.*, 6, 121 /1973/.

Рукопись поступила в издательский отдел
5 марта 1975 года.