

Лаборатория теоретической физики
и ядерных исследований.

Физических наук,
И. Н. КАЛИЖКИН.

Физических наук,
И. Л. ФЕЛДБЕРГ.

Физических наук,
В. Г. ГРИШИН.

Административное учреждение:
при Московском государственном уни-

1975 г.
1975 г. на

Лаборатория высоких энергий Объеди-
ненного института ядерных исследований (г. Дубна, Московской
области, конференц-зал).

Справки в библиотеке ОИЯИ.

М. Ф. ДИХАЧЕВ

2 - 8841

ШМОНИН Виктор Львович

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЕ РАЗВИТИЕ
ПРОЦЕССА МНОЖЕСТВЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ
И ГИПОТЕЗА АДРОННЫХ КЛАСТЕРОВ

Специальность 01.04.02 - теоретическая
и математическая физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

(Диссертация написана на русском языке)

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

2 - 8841

1-748

ШМОНИН Виктор Львович

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЕ РАЗВИТИЕ
ПРОЦЕССА МНОЖЕСТВЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ
И ГИПОТЕЗА АДРОННЫХ КЛАСТЕРОВ

Специальность 01.04.02 - теоретическая
и математическая физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

(Диссертация написана на русском языке)

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики
Объединённого института ядерных исследований.

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник - Б.Н.КАЛИНИН .

Официальные оппоненты:
член-корреспондент АН СССР,
Доктор физико-математических наук,
профессор - Е.Л.ФЕЛДБЕРГ,

кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник - В.Г.ГРИШИН .

Ведущее научно-исследовательское учреждение:
Институт ядерной физики при Московском государственном уни-
верситете им. Ломоносова.

Автореферат разослан " ____ " _____ 1975 г.

Защита диссертации состоится " ____ " _____ 1975 г. на
заседании Учёного совета Лаборатории высоких энергий Объеди-
ненного института ядерных исследований (г.Дубна, Московской
области, Лаборатория высоких энергий, конференц-зал).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Учёный секретарь Совета
кандидат физико-математических
наук

М.Ф.Лихачев

М.Ф.ЛИХАЧЕВ

Динамика процесса множественной генерации адронов чрезвычайно сложна. Ее интерпретация затруднена отсутствием последовательной теории сильного взаимодействия, а также существенной многочастичностью акта рождения. Поэтому исследование этого очень важного и интересного явления развивалось до настоящего времени по пути формулировки различных моделей.

Эти модели можно грубо разбить на два класса. Первый включает модели, описывающие множественную генерацию как процесс, происходящий в одну стадию, в результате которой рождающиеся адроны возникают мгновенно. Второй класс содержит модели, согласно которым множественная генерация протекает в две стадии.

На первой стадии в результате столкновения первичных частиц возникает сильно возбужденная адронная система, которую чаще всего называют кластером. Вторая стадия — распад этой системы на частицы, т.е. собственно множественное рождение. В большей части работ этого направления стадия распада рассматривается как статистический процесс.

В итоге возникла ситуация, требующая тщательного анализа, цель которого должна заключаться в отборе реалистических моделей, удовлетворяющих наибольшему объему информации о множественном рождении. Провести такую программу, ограничившись данными, полученными бомбардировкой водородных мишеней, трудно, так как в этом случае мы имеем дело с конечным результатом акта взаимодействия. Модели же описывают различным образом процесс именно в его начальной фазе, т.е. на пространственно-временных интервалах порядка ядерного. Очевидно, необходимо привлечь дополнительные аргументы.

В настоящее время немалые надежды на получение новых сведений связывают с изучением множественной генерации в плотной ядерной среде. Эти надежды следует признать обоснованными. Решающим и качественно новым фактом в этом случае оказывается пространственно-временная близость между актами генерации и перерасеяния рожденной системы на нуклонах ядра. В этом смысле ядро как материальная среда представляет собой уникальный объект.

Трудности каскадно-испарительной модели адрон-ядерных взаимодействий, предполагающей мгновенное рождение вторичных ядер, указывают на необходимость учета развития множественного процесса во времени. Целью настоящей диссертационной работы является построение метода, позволяющего эффективно выполнить такой учет. При этом наибольшее внимание уделяется вопросу извлечения из адрон-ядерных взаимодействий дополнительной информации о характере элементарного акта, в частности, о свойствах промежуточных кластерных состояний адронной материи.

В первой главе дан краткий обзор основных представлений о характере адрон-ядерных взаимодействий; приводятся аргументы, указывающие на предпочтительность двухстадийных моделей множественной генерации. Здесь же даны качественные оценки, свидетельствующие о необходимости учета растяжки элементарного акта во времени. На основе этих оценок показано, что область применимости обычной каскадной схемы ограничена весьма узким энергетическим интервалом.

Во второй главе обсуждаются основные предположения разрабатываемого подхода и формируется математический аппарат для опи-

сания движения адронного кластера в плотной ядерной среде.

В элементарном акте множественной генерации большое количество энергии первоначально выделяется в объеме, не превышающем лоренцовски сжатый объем нуклона. Образованная адронная система (кластер), являясь абсолютно нестабильной, сначала расширяется с околосветовой скоростью и, лишь достигнув определенной плотности энергии, распадается на отдельные частицы. Вероятнее всего, на фазе расширения из-за наличия сильного взаимодействия в системе эти частицы выделить нельзя. Поэтому на стадии расширения ее следует рассматривать как единое целое. В лабораторной системе расширение кластера в поперечном направлении замедлено на его γ - фактор. В среднем акте адрон-адронного взаимодействия наблюдается лидирующая частица, уносящая около половины первичной энергии. Предположение с тем, что эта частица сразу же после взаимодействия способна участвовать в множественном процессе с тем же сечением, противоречит эксперименту. Поэтому следует предположить, что остаток пути в ядре лидирующий адрон проходит в таком состоянии, когда он слабо реагирует в последующих столкновениях. Имея в виду такое состояние, в литературе используют термины "голый", "обрубленный". Предполагается, что это состояние является, вообще говоря, возбужденным.

Предположение об относительной пассивности лидирующей частицы сводит проблему адрон-ядерных взаимодействий к описанию движения кластера в ядерной среде.

Поскольку рассматриваются некогерентные процессы с большой передачей энергии среде (до 3,5 - 4,0 Гэв), взаимодействие

кластер-нуклон описывается в терминах сечений, а не амплитуд. Можно ожидать, что, как и в столкновениях известных адронов, средний поперечный импульс, переданный в кластер-нуклонном взаимодействии, много меньше начального импульса. Поэтому движение центра массы кластера можно считать прямолинейным. Поскольку же дебройлевская длина волны кластера много меньше межнуклонных расстояний, то это движение можно задать классическими уравнениями. Более того, в рассматриваемом диапазоне энергий ($E_p \gg 10$ Гэв) длина волны нуклона в системе покоя кластера также очень мала $\lambda_N \ll r_0$. Следовательно, для приближенного вычисления сечения взаимодействия кластер-нуклон можно также пользоваться классическими соображениями. Для описания движения кластера в ядерной среде в работе предложена следующая система уравнений:

$$\frac{dE}{dz} = -\bar{E} \rho \sigma_{KN} = -\bar{E} \rho \int_{z_0}^z \frac{dz'}{\sqrt{\gamma^2(z') - 1}} \quad (1a)$$

$$\frac{dE_0}{dz} = \left(\langle K \rangle \frac{\sigma^{in}}{\sigma^{tot}} \right)_{KN} T_{KN}(z) \rho \int_{z_0}^z \frac{dz'}{\sqrt{\gamma^2(z') - 1}} \quad (1b)$$

при этом

$$E(z) = E_0(z) \gamma(z) \quad (2)$$

В (1-2) E - полная, а E_0 - внутренняя энергия кластера,

γ - лоренц-фактор его движения в лабораторной системе,

z_0 - точка, в которой произошел акт рождения, z - координата вдоль пути движения кластера. Через ρ обозначена плотность ядерного вещества, \bar{E} - средняя энергия нуклона отдачи, а r_0 - радиус действия ядерных сил в системе нуклон-кластер в момент рождения последнего.

Уравнение (1a) связывает потерю энергии кластером на единицу пути с сечением σ_{KN} его взаимодействия с нуклоном. Второй член в скобке отражает изменение поперечных размеров кластера в результате его расширения с учётом релятивистского эффекта замедления.

Во втором уравнении $\langle K \rangle$, σ^{in} , σ^{tot} - среднее значение коэффициента неупругости, неупругое и полное сечения, соответственно, для взаимодействия кластер-нуклон. T_{KN} - кинетическая энергия столкновения кластера с нуклоном в системе их центра масс. Таким образом, второе уравнение описывает изменение внутренней энергии кластера на единицу пути, обусловленное его последовательными неупругими соударениями с нуклонами.

В этой же главе устанавливаются величины, входящие в уравнения движения двух параметров: $\bar{E} = 0,13$ Гэв $\left(\langle K \rangle \frac{\sigma^{in}}{\sigma^{tot}} \right)_{KN} \approx 0,20 - 0,25$. Предполагается, что эти величины не зависят от энергии первичной частицы.

Непосредственный анализ роли фазы расширения кластерного состояния позволяет сделать нетривиальные заключения относительно корректности описания множественной генерации в рамках определенных термодинамических моделей. Показано, что кластерные модели, игнорирующие фазу расширения (например, модель Хедгорна) не согласуются с наблюдениями.

В третьей главе результаты развитого подхода сравниваются с широким кругом экспериментальных данных по множественным процессам в адрон-ядерных взаимодействиях. Предварительно устанавливается связь между решениями уравнений движения и наблюдаемыми величинами. Рассматриваются следующие характеристики адрон-ядерных взаимодействий.

а) Зависимость числа релятивистских (n_s) и серых (n_g) следов от энергии первичной частицы и атомного веса ядра-мишени.

б) Распределение по множественности релятивистских частиц.

в) Средний половинный угол для релятивистских частиц.

г) Распределение релятивистских частиц по θ_y, θ_z .

д) Распределение релятивистских частиц по P_T .

е) Корреляции между числами релятивистских и серых частиц.

В рамках развиваемого подхода поведение перечисленных характеристик получает удовлетворительное объяснение с единой точки зрения.

Особое внимание уделяется распределению по θ_y, θ_z в области малых углов, поскольку именно здесь разумно ожидать проявление характера взаимодействия лидирующей частицы с нуклонами ядра. На основе произведенного анализа делается вывод о необходимости дальнейшего совершенствования эксперимента для получения информации о свойствах обрубленного состояния адрона.

Четвертая глава посвящена весьма интересному предельному

случаю адрон-ядерных взаимодействий - "полному развалу" ядра релятивистской частицей.

Этот эффект наблюдался в экспериментах по облучению фотоэмульсии протонами с энергией $E_p = 9,3$ и 69 Гэв и π^- -мезонами с энергией 60 Гэв.

В работе предполагается, что это явление обусловлено возбуждением в ядерном веществе коллективного движения типа ударной волны.

Очевидно, что для инициирования ударной волны необходимо выполнение определенных условий.

а) Потеря энергии частицей-инициатором должна быть велика и должна непосредственно распределяться между достаточно большим числом нуклонов.

б) Переданный каждому нуклону импульс должен быть приблизительно одинаков (тогда возникнет коллективное движение, соответствующее волне изменения плотности).

в) Скорость движения частицы-инициатора должна превышать скорость звука в ядерном веществе.

г) Ширина ударной волны должна быть значительно меньше характерных размеров ядра.

Показано, что при движении кластера в ядерном веществе возникает ситуация, в которой перечисленные условия выполняются. Таким образом, интенсивный разогрев ядра за время порядка ядерного обусловлен диссипацией проходящей в нем ударной волны.

Применение развитого в работе подхода позволяет в этом предельном случае получить хорошее согласие с измеренными характеристиками процесса. На основании полученной связи между

сечением полного развала ядра и сечением рождения кластера в элементарном акте приводится оценка последнего. Эта оценка не противоречит результатам, вытекающим из анализа данных по $P-P$ -взаимодействию.

На стадии расширения ядра-остатка, сопровождающегося интенсивным взаимодействием нуклонов, число столкновений на нуклон-около 10. Поэтому к моменту распада распределение нуклонов по энергиям должно практически установиться, т.е. быть максвелловским. Этот вывод также не противоречит наблюдениям.

В пятой главе обсуждается возможное направление поисков решения вопроса об уравнении состояния сильно сжатого и возбуждённого адронного вещества.

Вид уравнения состояния, по крайней мере, в ультрарелятивистском пределе известен лишь в случае систем с электромагнитным взаимодействием: $\rho = \frac{\epsilon}{3}$. Что же касается систем с произвольным μ , в частности, сильным взаимодействием, то отсутствует и эта доля определенности.

Крайне желательно отыскать путь, следуя которому можно определить вид уравнения состояния, минуя огромные трудности, возникающие при прямом подходе к задаче (убедительные методы расчетов для систем из многих сильно взаимодействующих частиц отсутствуют).

По нашему мнению, одна из возможностей получения информации об увеличении состояния адронной материи представлена особенностями движения кластера в ядерной среде.

Действительно, возможна ситуация, когда внутреннее давление в кластере, вызывающее его расширение в поперечном направлении, уравновешивается потоком импульса от сталкивающихся с ним ядерных нуклонов. В этом случае сечение взаимодействия

кластер-нуклон (и, следовательно, все наблюдаемые характеристики) определяется условием равенства внутреннего и внешнего давлений на поверхность кластера. В работе рассмотрена зависимость вида корреляционных кривых $\bar{n}_g(n_g)$ и $\bar{n}_3(n_g)$ от величины параметра α в предположении, что уравнение состояния имеет вид $\rho = \alpha \epsilon$. Из сопоставления результатов с экспериментальными данными показано, что удовлетворительное согласие имеет место при $\alpha \approx 1/5$.

Этот результат следует рассматривать как предварительный. Для более строгих заключений необходимо дальнейшее уточнение как эксперимента, так и теории. Тем не менее, возможность извлечения такого рода информации при изучении множественного процесса на ядрах представляется вполне реальной.

В заключении формулируются основные результаты и выводы данной работы.

1. Разлит подход, основные элементы которого построены на явном учёте пространственно-временного развития процесса множественной генерации. На большом количестве примеров продемонстрирована его "работа". Показано, что широкий круг качественно различных проявлений процесса (интегральных, дифференциальных, включая и реакцию ядерной среды), характеризующих его с разных сторон, находит себе весьма простое объяснение.

2. Гипотеза об образовании адронных кластеров в качестве промежуточного звена в процессе множественного рождения не противоречит фактам. Современный уровень экспериментальных данных позволяет считать ее справедливой.

Отсюда непосредственно следует, что модели элементарного акта, предполагающие развитие процесса в две стадии, обладают явным преимуществом перед одностадийными.

3. Не противоречит наблюдениям и предположение, что при большом энерговыделении в канал множественной генерации лидирующая частица оказывается в "обрубленном" (а может быть и "голом") состоянии.

По своему духу этот вывод тесно коррелирует с заключениями, которые можно было бы сделать, опираясь на композитные модели протяженного адрона. Более того, имея в виду эти модели, трудно представить себе, почему состояния не могут возникать.

4. Исследование адрон-ядерного взаимодействия позволяет установить приближенные значения средних параметров взаимодействия кластер-нуклон, которые оказываются весьма близкими к своим аналогам в случае взаимодействия обычных адронов.

5. Изучение множественной генерации на ядрах указывает на наличие расширительной стадии развития кластеров. Это позволяет внутри класса двухстадийных моделей признать несостоятельными модели, явно не учитывающие данную стадию.

6. Адрон-ядерное взаимодействие с учётом реакции ядра на развитие в нем процесса множественного рождения в принципе может дать полезные сведения об уравнении состояния сильно сжатой возбужденной адронной материи.

Таким образом, гипотеза о реализации кластерных состояний адронного вещества в качестве промежуточной стадии множественного рождения не лишена серьезных оснований, а исследование этого процесса в плотной ядерной среде играет не последнюю роль в выяснении его динамики.

Результаты работы неоднократно докладывались на семинарах в Лаборатории теоретической физики и Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований, в теорети-

ческом отделе и Лаборатории космических лучей физического института им. П.Н. Лебедева, в Центральном институте ядерных исследований ГДР (Россендорф), в университете Лейпцига, представлены на IV Международной семинар по проблемам физики высоких энергий и опубликованы в работах /1-8/.

Литература

1. Б.Н. Калинин, В.Л. Шмонин. Препринт ОИЯИ Р2-7869, Дубна, (1974). Ядерная физика 21,628 (1975).
2. Б.Н. Калинин, В.Л. Шмонин. Препринт ОИЯИ Р2-7870, Дубна, 1974. Ядерная физика 21,628 (1975).
3. Б.Н. Калинин, В.Л. Шмонин. Сообщение ОИЯИ Р2-7871, Дубна, (1974).
4. В.Л. Шмонин. Сб. "Прикладная и теоретическая физика", вып. 6, Алма-Ата (1974).
5. В.Л. Шмонин. Препринт ЛВКЛ Каз. ГУ № 9, Алма-Ата (1974).
6. Т.Я. Иногамова, Б.Н. Калинин, В.Б. Любимов, Д. Тувендорж, В.Л. Шмонин, Препринт ОИЯИ Р1-8464, Дубна, (1974).
7. Б.Н. Калинин, В.Л. Шмонин. Сб. Нуклотрон и релятивистская ядерная физика, 8309, Дубна (1974).
8. Б.Н. Калинин, В.Л. Шмонин. Препринт ОИЯИ Р2-8559, Дубна, (1975).

Рукопись поступила в издательский отдел
30 апреля 1975 г.