

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

37/83

3/1-83

P7-82-630

Э.Бетак, В.Д.Тонеев

ОБРАЗОВАНИЕ ОЧЕНЬ ЛЕГКИХ ФРАГМЕНТОВ
В ГЛУБОКОНЕУПРУГИХ СТОЛКНОВЕНИЯХ

Направлено в "Journal of Physics G:
Nuclear Physics (Letters)"

1982

ВВЕДЕНИЕ

Теория линейного отклика, удачно сочетающая динамические и статистические черты процесса взаимодействия, стала в настоящее время стандартным средством для анализа глубоконеупругих столкновений тяжелых ионов^{/1-3/}. Относительное движение ионов описывается классическими уравнениями движения с учетом консервативных сил и сил трения. Для релаксации коллективных переменных типа, например, масс-асимметрии, получено уравнение Фоккера-Планка, которое решается в гауссовом приближении, что позволяет связать временную зависимость первых и вторых моментов коллективных переменных с динамикой столкновения. За счет включения коллективных переменных различного типа данный подход широко используется при анализе многомерных дифференциальных распределений продуктов ядерной реакции. Однако уравнение Фоккера-Планка выведено в предположении, что массовое и зарядовое числа фрагментов несильно отличаются от соответствующих величин для сталкивающихся ионов. Практически все сравнения теории и эксперимента выполнены именно в этих условиях. Тем не менее имеются экспериментальные указания на то, что данный механизм может быть распространен также и на очень легкие фрагменты: форма энергетических спектров продуктов глубоконеупругих столкновений, измеренных под различными углами, плавно меняется при переходе от бомбардирующего иона /скажем, Ag / до ядер Li^{/4,5/}, и выход изотопов удовлетворяет Q_{egg} -систематике вплоть до изотопов гелия^{/6/}. Цель настоящей работы - дать способ оценки характеристик таких экстремально далеких продуктов реакции глубоконеупругих переносов.

При попытке распространить теорию линейного отклика на описание фрагментов, далеко удаленных от сталкивающихся ионов, возникает много вопросов. Мы ограничимся обсуждением лишь двух приближений, обычно используемых в модельных расчетах; независимое рассмотрение массовой асимметрии фрагментов и радиальной компоненты относительного импульса и использование квадратичной аппроксимации для потенциала ядерной системы как функции заряда фрагмента Z в окрестности входной точки. Мы предлагаем некоторую модифицированную модель, которая эффективно учитывает корреляцию между массой и энергией фрагмента, а также влияние реалистического потенциала на сечение образования ядерного фрагмента.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СДВИГ

В рамках стандартного подхода различные дифференциальные распределения для продуктов глубокоэластичного столкновения тяжелых ионов выражаются через функцию распределения P , которая является решением соответствующего уравнения Фоккера-Планка. Так, например^{/1,7-9/}

$$\frac{d^3 \sigma}{d\theta dE dZ} = 2\pi \left(\frac{\mu}{2E}\right) \int_{b_{\min}}^{b_{\max}} b db P(\theta, p_r, Z, b, t \rightarrow \infty), \quad /1/$$

где b - параметр удара, μ - приведенная масса сталкивающихся ионов, E - энергия фрагмента с зарядом Z , испускаемого под углом θ в с.ц.и. Функция P уже проинтегрирована по ненаблюдаемым коллективным переменным.

Если относительное движение и передача нуклонов статистически независимы, то

$$P(\theta, p_r, Z, b, t) = P(Z, b, t) \cdot W(\theta, p_r, Z^c, b, t), \quad /2/$$

и передача нуклонов влияет на динамику движения лишь через среднее значение $Z^c = Z^c(b, t)$, что позволяет разделить задачи вычисления траектории ионов и расчета диффузии заряда. Гауссово решение уравнения Фоккера-Планка полностью определяется заданием первых двух моментов, в частности, для динамической части функции распределения имеем^{/1,9/}

$$W(\theta, p_r, Z^c(b, t), bt) = \frac{1}{4\pi\sqrt{\Delta}} \exp\left\{-\frac{1}{4\Delta} [(\theta - \theta^c)^2 \omega_{rr} - 2(\theta - \theta^c)(p_r - p_r^c)\psi_r^\theta + (p_r - p_r^c)^2 \chi^{\theta\theta}]\right\} \quad /3/$$

с

$$\Delta = \omega_{rr} \chi^{\theta\theta} - (\psi_r^\theta)^2.$$

Здесь индексом с обозначены средние значения, зависящие от b , t и Z^c , которые находятся из решения уравнений ньютоновского типа с трением, а вторые моменты определяются системой уравнений, полученной в теории линейного отклика^{/1,9/}:

$$\begin{aligned} \omega_{rr} &= \frac{1}{2} \langle (p_r - p_r^c)^2 \rangle, \\ \chi^{\theta\theta} &= \frac{1}{2} \langle (\theta - \theta^c)^2 \rangle, \\ \psi_r^\theta &= \frac{1}{2} \langle (p_r - p_r^c)(\theta - \theta^c) \rangle. \end{aligned} \quad /4/$$

Как следует из соотношений /3/-/4/, влияние массовой координаты на динамику столкновения проявляется весьма интересным образом: фрагменты стремятся сохранить импульс p_r достаточно близким к среднему значению p_r^c , характерному для фрагмента со средним массовым числом A_{out}^c . В случае, когда средний дрейф вдоль массовой координаты невелик, $A_{out} \approx A_{out}^c$. Но для выхода далеких продуктов реакции отношение A_{out}^c/A_{out} может заметно отличаться от единицы, что приводит к нарушению закона сохранения энергии. Отсутствие явной зависимости p_r^c от A_{out} противоречит экспериментальным данным, которые указывают на то, что положение пика в энергетическом спектре фрагментов движется к меньшим значениям E по мере уменьшения заряда фрагмента, а ширина пика не зависит от типа фрагмента^{/4,5/}. Это противоречие является следствием предположения о статистической независимости массового обмена и динамики относительного движения ионов /2//. Более последовательный учет эффектов массовой асимметрии требует определения неизвестной матрицы корреляций этой переменной с другими обобщенными координатами, что приведет к расширению системы уравнений в частных производных для вторых моментов /4/ и существенному увеличению времени счета. Вместо этого усложнения мы попытаемся феноменологически учесть эффекты корреляции между массой и энергией фрагмента путем замены в соотношении /2/ разности между импульсом фрагмента и его средним значением на величину $(p_r - p_r^c) \cdot A_{out}^c/A_{out}$, сохранив всю остальную схему расчета. Следует подчеркнуть, что в области максимального сечения выхода продуктов реакции глубокоэластичных передач, где как раз и применяется теория линейного отклика, наша модель сводится к обычным вариантам^{/1-3/}, поскольку $A_{out} \approx A_{out}^c$.

НОРМИРОВКА СПЕКТРА

Второй недостаток уравнения Фоккера-Планка для больших удалений от входной точки заключается в использовании осцилляторного приближения для потенциала взаимодействия. Это приближение существенно влияет на абсолютную величину выхода изотопов. Поскольку включение произвольного потенциала в уравнения Фоккера-Планка для масс-обменной части функции распределения $P(Z, b, t)$ встречает серьезные трудности, мы находим ее из решения мастер-уравнений^{/11/}

$$\frac{dP(Z, b, t)}{dt} = \sum_{Z'} [\Lambda_{ZZ'} P(Z', b, t) - \Lambda_{Z, Z'} P(Z, b, t)], \quad /5/$$

где макроскопическая вероятность перехода $\Lambda_{ZZ'}$ может быть представлена в факторизованном виде

$$\Lambda_{ZZ} = \lambda_{ZZ} \rho_Z$$

как произведение микроскопической вероятности λ_{ZZ} и соответствующего статистического веса макроскопической конфигурации /плотности уровней/ ρ_Z . Плотность уровней ρ_Z зависит от полной энергии системы, ее потенциальной энергии, энергии возбуждения /температуры/ и т.п.^{/11/}. Следует заметить, что при $(Z-Z')/Z \ll 1$ мастер-уравнения /5/ сводятся к уравнению Фоккера-Планка, если потенциал является достаточно гладкой функцией Z и $\Lambda_{ZZ} = \Lambda_{ZZ'}$.

Вид решения мастер-уравнений существенно зависит от формы потенциальной энергии взаимодействующей системы и времени взаимодействия^{/12/}. Жидкокапельный потенциал без учета оболочечных поправок способен описать лишь основные тенденции, для лучшего понимания необходимо учесть эффекты оболочечной структуры ядер. С другой стороны, эти эффекты существенно "вымываются" при высоких возбуждениях, как было показано в работах Моретто и сотрудников^{/13/}.

В соответствии с соотношением /2/ связь мастер-уравнения /5/ с динамикой столкновения осуществляется через время взаимодействия $t = \tau_{int}(l)$, до которого интегрируется система /5/. Время взаимодействия рассчитывалось в рамках теории линейного отклика, реализованного с помощью программы TRAJEC^{/15/}. Для упрощения последующих вычислений были рассчитаны времена взаимодействия для широкой группы реакций, инициируемых ионами Ne и Ar в интервале энергии 5-10 МэВ/нуклон, и результаты аппроксимированы формулой, предложенной Гобби и Норенбергом^{/13/}

$$\tau_{int}(l) = \tau_0 \exp[-k \cdot l / l_{gr}], \quad /7/$$

где l_{gr} - угловой момент, отвечающий грейзинг-столкновению ионов. Формула /7/ хорошо описывает эти времена, если положить $\tau_0 = 8 \cdot 10^{-19}$ с и $k=9,9$.

Другой пункт, где проявляется связь массового обмена и относительного движения ионов, - вычисление временной зависимости энергии возбуждения системы и, следовательно, ее температуры, которая управляет "подавлением" эффектов оболочечной структуры в энергиях основных состояний ядер. Для упрощения мы допустили использование одной температуры для описания системы, независимо от временного поведения.

В качестве примера приведем реакцию $^{22}\text{Ne} + ^{232}\text{Th}$. Выход элементов, рассмотренный указанным способом, сравнивается с экспериментальными данными на рис.1. Видна важность введения оболочечных поправок для вычисления выхода изотопов и учета их температурной зависимости.

Энергетические спектры для четырех изотопов, измеренные под углом $\theta = 12^\circ$, показаны на рис.2. Четко прослеживается важность обоих пунктов модификации модели. Хотя данная модификация представляет собой лишь грубую оценку характеристик продуктов глу-

Рис.1. Выход элементов для реакции $^{22}\text{Ne} + ^{232}\text{Th}$ при энергии 17,5 МэВ. Точки - экспериментальные данные из работы /4/, линии - результаты решения мастер-уравнений с учетом оболочечных эффектов при нулевой /пунктир/ и отличной от нуля /сплошная кривая/ температуре.

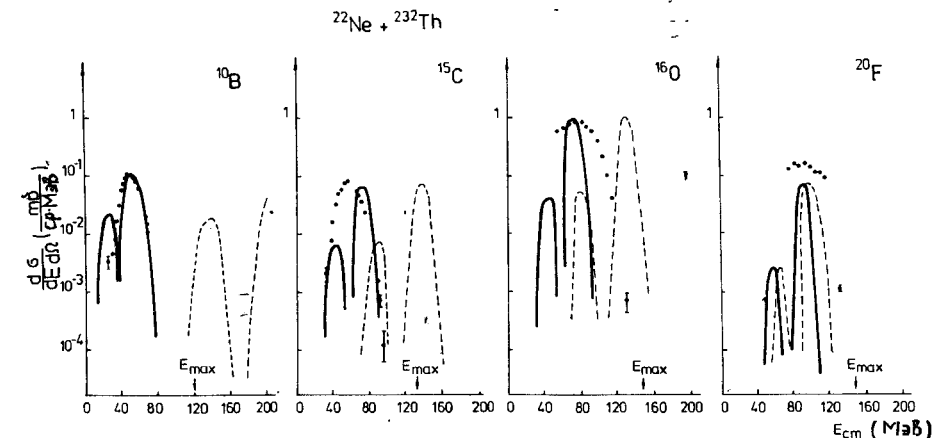
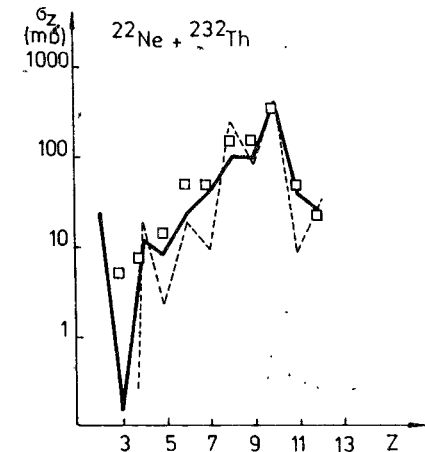


Рис.2. Спектры ядер ^{10}B , ^{15}C , ^{16}O и ^{20}F под углом $\theta_{LAB} = 12^\circ$ из реакции $^{22}\text{Ne} + ^{232}\text{Th}$ при энергии 17,5 МэВ. Экспериментальные точки взяты из работы /5/. Пунктиром нанесены результаты вычислений по теории линейного отклика в предположении статистической независимости массовой и энергетической переменных, сплошные линии - с учетом обоих предложенных модификаций. Расчеты выполнены с использованием вычислительного кода TRAJEC для стандартного набора параметров /15/.

боконеупругих столкновений ядер, далеко удаленных от входной точки, модель позволяет достичь разумного согласия с экспериментальными данными.

ВЫВОДЫ

Мы предложили две модификации стандартной процедуры вычисления многомерных дифференциальных сечений для легких фрагментов, образованных в реакции глубокоупругих столкновений тяжелых ионов. Они состоят в сдвиге средних значений импульсов, эффективно учитывающем влияние обмена нуклонами на кинетическую энергию фрагментов, и ренормализации абсолютного выхода изотопов путем решения мастер-уравнений с реалистическим потенциалом взаимодействия. Предложенные модификации оказываются весьма существенными для продуктов, удаленных от входной точки реакции.

Авторы благодарны А.Г.Артюху и В.В.Волкову за предоставление экспериментальных данных, Р.Шмидту - за обсуждения и консультации по использованию программы TRAJECT, И.Бондорфу - за полезные замечания, сделанные при обсуждении результатов данной работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ng^o C. In: Proc. Braşov Int. School 1980 on Critical Phenomena in Heavy Ion Physics (eds. A.A.Răduţă and G.Stratan). Central Int.Phys., Bucharest, 1981, p.395.
2. Weidenmüller H.A. Prog.Part.Nucl.Phys., 1980, 3, p.49.
3. Gobbi A., Nörenberg W. In: Heavy Ion Collisions (ed. R.Bock). North Holland, Amsterdam, 1981, vol.2, ch.3.
4. Artukh A.G. et al. Nucl.Phys., 1973, A211, p.299; Артук А.Г. и др. ЯФ, 1973, 17, с.1126.
5. Artukh A.G. et al. Nucl.Phys., 1977, A283, p.350.
6. Artukh A.G. et al. In: Proc. Predeal Int. School 1978 on Heavy Ion Physics (eds. A.Berinde, V.Ceaşescu, I.A.Dorobantu). Central Int. Phys., Bucharest, 1979, p.805.
7. Ng^o C., Hofmann H. Z.Phys., 1977, A282, p.83.
8. Berlinger M. et al. Z.Phys., 1978, A286, p.207.
9. Berlinger M. et al. Z.Phys., 1978, A284, p.61.
10. Hofmann H., Siemens P.J. Nucl.Phys., 1976, A257, p.165; Hofmann H., Siemens P.J. Nucl.Phys., 1977, A275, p.464.
11. Moretto L.G., Schmitt R. J. de Phys., 1976, 37, p.C5-109.
12. Mikheev V.L. et al. In: Proc. EPS Top.Conf.Large Amplitude Coll.Nucl.Motions, Keszthely 1979 (eds. A.Kiss, J.Németh, J.Zimányi). Budapest, 1979, vol.2, p.676.
13. Sobotka L.G., Mathews G.J., Moretto L.G. Z.Phys., 1979, A292, p.191.
14. Schmidt R., Toneev V.D., Wolschin G. Nucl.Phys., 1978, A311, p.247.
15. Schmidt R., Teichert J. JINR, E4-80-527 and E4-80-735, Dubna, 1980.

Рукопись поступила в издательский отдел
17 августа 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 электроронике. 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 XII Международной школы по нейтронной физике. Алушта, 1978.	3 р. 00 к.
D13-11807	Труды XII 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 XIII 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.
D1,2-81-720	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

**ТЕМАТИЧЕСКИЕ КАТЕГОРИИ ПУБЛИКАЦИЙ
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ**

Индекс	Тематика
1.	Экспериментальная физика высоких энергий
2.	Теоретическая физика высоких энергий
3.	Экспериментальная нейтронная физика
4.	Теоретическая физика низких энергий
5.	Математика
6.	Ядерная спектроскопия и радиохимия
7.	Физика тяжелых ионов
8.	Криогеника
9.	Ускорители
10.	Автоматизация обработки экспериментальных данных
11.	Вычислительная математика и техника
12.	Химия
13.	Техника физического эксперимента
14.	Исследования твердых тел и жидкостей ядерными методами
15.	Экспериментальная физика ядерных реакций при низких энергиях
16.	Дозиметрия и физика защиты
17.	Теория конденсированного состояния
18.	Использование результатов и методов фундаментальных физических исследований в смежных областях науки и техники
19.	Биофизика

Ботак Э., Тонев В.Д.

P7-82-630

Образование очень легких фрагментов в глубоконеупругих столкновениях

Предложена модифицированная модель глубоконеупругих столкновений тяжелых ионов, которая эффективно учитывает корреляции между массой и кинетической энергией фрагмента, а также влияние реалистического потенциала на сечение образования ядерных фрагментов.

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1982

Boták E., Toneev V.D.

P7-82-630

Vary Light Fragments from Deep-Inelastic Collisions

A modified model of deep-inelastic collisions is suggested, which effectively allows for correlations between the mass and the energy of the fragment, as well as for the influence of a realistic potential on the absolute value of fragment cross section.

The investigation has been performed at the Laboratory of Theoretical Physics, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1982

Парапод О.С.Виноградовой.