

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4-2002-100

На правах рукописи
УДК 539.172.17; 531.19; 519.1

ПАРВАН
Александрю

**ЯДЕРНАЯ МУЛЬТИФРАГМЕНТАЦИЯ
В СТАТИСТИЧЕСКОМ ПОДХОДЕ**

Специальность: 01.04.16 — физика ядра
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 2002

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики им.Н.Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований.

Научные руководители:

доктор физико-математических наук,
профессор
кандидат физико-математических наук

В.Д. ТОНЕЕВ

К.К. ГУДИМА (ИПФ, АНРМ)

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук

В.В. УЖИНСКИЙ (ЛИТ ОИЯИ)

доктор физико-математических наук

Ю.Б. ИВАНОВ (Институт общей и ядерной физики,
РНЦ "Курчатовский институт")

Ведущая организация:

Физико - энергетический институт, ГНЦ РФ, г. Обнинск

Защита диссертации состоится " ____ " _____ 2002 г. в 15⁰⁰
на заседании диссертационного совета К 720.001.01 при Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного института ядерных исследований.

Автореферат разослан " ____ "
_____ 2002 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



С.И. ФЕДОТОВ

Общая характеристика диссертации

Актуальность темы Исследование свойств конечных ядерных систем в экстремальных условиях, предельно далеких от основного состояния, занимает важное место в современной ядерной физике. Сильно возбужденные состояния ядер достигаются в адрон-ядерных реакциях и в столкновениях тяжелых ионов промежуточных и высоких энергий. Современные экспериментальные возможности стимулируют большой теоретический интерес к свойствам ядер и механизмов распада при высоких энергиях возбуждения. Экспериментально установлено, что при энергиях возбуждения ядра, сравнимых с энергией связи, $E^* \simeq 5 - 10$ МэВ/нуклон, существенный вклад в механизм девозбуждения ядер дает процесс ядерной мультифрагментации. Этот процесс носит взрывной характер и сопровождается полной дезинтеграцией ядра на большое число фрагментов промежуточной массы (фрагменты с зарядом $3 \leq l \leq 20$). Явление ядерной мультифрагментации часто интерпретируют как фазовый переход типа жидкость-газ, так как реализуется в области сосуществования двух основных фаз ядерной материи: фазы, состоящей преимущественно из фрагментов промежуточной массы, и фазы легких фрагментов и свободных нуклонов. Измеренная зависимость температуры от энергии возбуждения (калорическая кривая) рассматривается как экспериментальное подтверждение того факта, что ядерная мультифрагментация является критическим явлением в конечной возбужденной ядерной системе.

До настоящего времени не существует законченного и убедительного теоретического объяснения явлению ядерной мультифрагментации как из-за неясности относительной роли динамических и равновесных эффектов, так и в силу общей сложности решения многочастичной проблемы. Эти неопределенности дают повод множеству приближений, используемых для описания ядерной мультифрагментации: от последовательного испарения частиц и простых перколяционных моделей до статистического описания взрывного процесса и сложных

динамических моделей. Статистическая модель, предполагающая образование в результате реакции равновесной системы, и кинетическая модель, сводящая взаимодействие двух систем к последовательным двух-частичным столкновениям, представляют предельными случаями описания, имеющими свои достоинства и недостатки.

Ядерная мультифрагментация в столкновениях тяжелых ионов является заведомо динамическим процессом. Для описания этого явления необходимо решить неравновесную проблему многих тел с переменным числом частиц каждого сорта. Эта задача очень сложная и практически нерешенная. Однако при применении статистического подхода задача мультифрагментации сильно упрощается. В этом случае от динамики столкновения остаются лишь эффективные термодинамические параметры распадающейся равновесной системы: число нуклонов в системе, их электрический заряд, энергия возбуждения. Основная идея статистического подхода заключается в том, чтобы каждому каналу распада конечной ядерной системы поставить в соответствие определенное микросостояние системы с заданной вероятностью из микроканонического, канонического или большого канонического распределений по микросостояниям системы, т.е. каждое конечное состояние системы реализуется с определенной вероятностью, зависящей только от термодинамических параметров системы и энергий этих состояний. Статистический подход позволяет выявить основные статистические особенности ядерной мультифрагментации на примере распада идеализированного возбужденного ядра, когда неважно каким образом оно образовалось. Такая рассматриваемая имеет ряд преимуществ перед другими подходами, поскольку учитывает все каналы распада ядерной системы, допускает вероятностную интерпретацию и дает возможность единого описания множественных характеристик и термодинамических средних. Статистическая теория учитывает коллективный характер взаимодействий и позволяет описывать ядерную мультифрагментацию как критическое явление, фазовый переход. Недостатком статистической теории является предположение о термодинамическом рав-

новесии и неспособность описывать корреляционные эффекты, сопутствующие процессу мультифрагментации.

Статистические модели ядерной мультифрагментации различаются между собой по выбору ансамбля (микрканонический, канонический или большой канонический ансамбли), по степени детализации описания свойств фрагментов и по методу вычисления (метод Монте-Карло, точные и приближенные решения). Микрканонический ансамбль с физической точки зрения наиболее полно соответствует описанию конечной ядерной системы, так как в этом ансамбле сохраняются барионный и электрический заряды и полная энергия системы. Однако в рамках микрканонического ансамбля получать точные решения не удается и для расчета средних характеристик обычно используется численный метод Монте-Карло. Применение канонического ансамбля позволяет сохранять барионный и электрический заряды системы, но энергия сохраняется в среднем за счет введения температуры системы. В последнее время в рамках канонического ансамбля для термодинамических средних и физических характеристик системы удалось получать точные результаты с помощью рекуррентных уравнений. В большом каноническом ансамбле получают точные аналитические результаты ценой сохранения барионного, электрического зарядов, и энергии системы лишь в среднем. Такой ансамбль менее всего соответствует точному описанию свойств конечной ядерной системы, однако привлекателен сравнительно простым методом вычисления.

В данной работе мы развиваем статистический подход к описанию продуктов мультифрагментационного распада возбужденной ядерной системы. В рамках равновесной статистической механики в каноническом ансамбле построена точно решаемая статистическая модель ядерной мультифрагментации с сохранением барионного и электрического зарядов со статистикой фрагментов Бозе-Эйнштейна, Ферми-Дирака и Максвелла-Больцмана с учетом возбуждения внутренних степеней свободы ядерных фрагментов. Квантовое статистическое описание применялось ранее к процессу мультифрагментации только в

рамках большого канонического ансамбля, обеспечивающего сохранение числа протонов и нейтронов в среднем. Канонический метод, который более удобен для описания мультифрагментации конечной системы, соответствует точному сохранению барионного и электрического зарядов. Однако до сих пор он использовался только для случая классических больцмановских фрагментов. Таким образом, по сравнению с другими статистическими моделями ядерной мультифрагментации, преимущества нашей модели сводится к трем пунктам: в используемом каноническом ансамбле точно учтены сохранение барионного и электрического зарядов, модель обобщается на случай квантовой статистики фрагментов и развитая модель допускает точное решение проблемы. По сравнению с численным методом Монте – Карло точный метод рекуррентных уравнений позволяет более аккуратно учесть вклады всех (особенно редких) каналов распада. При решении рекуррентных уравнений, показано, что статистическая сумма квантово-статистической модели мультифрагментации приводится к групповому разложению Майера с групповыми интегралами, зависящими от статистики фрагментов. Для модели мультифрагментации с сохранением барионного и электрического зарядов статистическая сумма приводится к обобщенному групповому разложению Майера.

Неэкстенсивная статистическая механика Цаллиса в каноническом ансамбле впервые применена к изучению характеристик мультифрагментации ядер. Предложенная модель позволяет учесть минимальным образом возможные отклонения от равновесного канонического распределения Гиббса в зависимости от значений параметра неэкстенсивности q . Сравнение характеристик модели с экспериментальными данными позволяет оценить, насколько реалистично описание ядерной мультифрагментации в рамках канонического распределения Гиббса.

Целью работы является исследование явления мультифрагментации возбужденных ядер, образованных в результате столкновения тяжелых ионов, на основе статистического подхода. Эта цель включает нахождение точных значе-

ний статистической суммы и средних по ансамблю в рамках статистических моделей ядерной мультифрагментации с точным сохранением барионного и электрического зарядов; анализ термодинамического поведения системы; применение обобщенной неэкстенсивной статистической механики Цаллиса к изучению процесса мультифрагментации.

Научная новизна и практическая ценность

В рамках равновесной статистической механики Гиббса в каноническом ансамбле построена точно решаемая статистическая модель ядерной мультифрагментации с учетом законов сохранения барионного и электрического зарядов. Найдена система рекуррентных уравнений для точного расчета статистической суммы со статистикой фрагментов Бозе-Эйнштейна и Ферми-Дирака. Показано, что статистическая сумма модели дается суммой мультиномиальных коэффициентов с групповыми интегралами Майера, зависящими от типа статистики. Получены точные результаты для статистической суммы и средних по ансамблю для копенгагенской параметризации равновесных свойств жидкой капли (фрагментов). В рамках обобщенной неэкстенсивной статистической механики Цаллиса в каноническом ансамбле впервые построена статистическая модель ядерной мультифрагментации с учетом законов сохранения барионного и электрического зарядов для статистики фрагментов Максвелла-Больцмана. Полученные результаты могут быть использованы для анализа экспериментальных данных по мультифрагментации ядер.

Апробация работы

Результаты, представленные в диссертации, докладывались и обсуждались на научных семинарах Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова Объединенного Института Ядерных Исследований, рабочем совещании коллаборации INDRA, на семинарах ГСИ (Дармштат), а также на международной конференции "Nuclear structure and related topics" (Дубна, 2000).

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 4 работы.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из трех глав и трех приложений общим объемом 158 страницы, 28 рисунков и списка цитированной литературы из 91 наименования.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования и кратко изложено содержание диссертации.

В первой главе в рамках равновесной статистической механики в каноническом ансамбле в представление чисел заполнения сформулирована статистическая модель ядерной мультифрагментации с учетом законов сохранения барионного и электрического зарядов со статистикой фрагментов Максвелла-Больцмана. Учтены спиновые и внутренние степени свободы ядерных фрагментов, их электрический заряд и взаимодействие фрагментов в приближении среднего поля. Дан метод точного вычисления статистической суммы и средних по ансамблю на основе рекуррентных уравнений. Полная статистическая сумма $Q_{A,Z}$ системы из A – нуклонов и Z – протонов сведена к зависимости от статистических сумм фрагментов меньшей массы в форме

$$\begin{aligned} Q_{A,Z} &= \sum_{\{N_{kl}\}} \delta\left(\sum_{kl} kN_{kl} - A\right) \delta\left(\sum_{kl} lN_{kl} - Z\right) \prod_{kl} \frac{\omega_{kl}^{N_{kl}}}{N_{kl}!} \\ &= \frac{1}{A} \sum_{l=0}^Z \sum_{k=l, k \neq 0}^{A-Z+l} k \omega_{kl} Q_{A-k, Z-l}, \\ \omega_{kl} &= \sum_{\underline{a}} e^{-\beta E_{kl\underline{a}}}, \end{aligned}$$

где $Q_{0,0} = 1$, ω_{kl} – статистическая сумма фрагмента из k – нуклонов, l – протонов, $\underline{a} = \{\xi \vec{I}_z\}$, ξ – номер уровня внутреннего возбуждения фрагмента, \vec{p} – импульс, I_z – проекция спина фрагмента на ось z , $E_{kl\underline{a}} = \frac{\vec{p}^2}{2m_{kl}} + B_{kl} + E_{kl\xi}^* + \Delta E_{kl}$ – одночастичные энергии фрагментов, B_{kl} – энергия связи, $E_{kl\xi}^*$ – энергия внутреннего возбуждения фрагмента, ΔE_{kl} – энергия взаимодействия фрагмента со средним полем. Получены аналитические формулы для термодинамических средних и средних множественностей фрагментов, выраженные алгебраически

через статистические суммы $Q_{A,Z}$ меньших размеров, которые вычисляются посредством рекуррентных уравнений.

Во втором параграфе получены аналитические выражения для некоторых распределений по множественности. Распределение по полной множественности фрагментов t выражается через статистическую сумму $Q_{A,Z,t}$, распределение по множественности M Фрагментов Промежуточных Масс (ФПМ) выражается через статистическую сумму $Q_{A,Z,M}$, совместное распределение по множественностям t и M выражается через статистическую сумму $Q_{A,Z,t,M}$ и распределение по множественности фрагментов N_{kl} данного сорта (k, l) выражается через статистическую сумму $Q_{A,Z,N_{kl}}$. Для вычисления перечисленных статистических сумм получены соответствующие рекуррентные уравнения.

В третьем параграфе формализм статистической модели ядерной мультифрагментации применяется к точному вычислению статистической суммы и средних по ансамблю для копенгагенской параметризации свойств фрагментов в приближение жидкой-капли. Проведены конкретные вычисления термодинамических средних системы и средних множественностей фрагментов. Поведение термодинамических средних в зависимости от термодинамических параметров системы указывает на возможный фазовый переход типа жидкость – газ. Обсуждается калорическая кривая, характеризующая этот фазовый переход. На рис. 1 вычисленная изотоническая температура сравнивается с экспериментальными данными. Изотопическая температура отличается от температуры канонического ансамбля, поэтому для экспериментального определения температуры канонического ансамбля предложена формула, выражающая температуру через моменты импульсного распределения фрагментов заданного сорта. Эффективный параметр τ распределения фрагментов по заряду находится в разумном согласии с экспериментальными данными, полученными в реакциях столкновения тяжелых ионов.

Вторая глава является центральной. Метод, разработанный в первой главе, обобщается на случай квантовой статистики. В рамках равновесной статисти-

ческой механики в каноническом ансамбле построена квантово - статистическая модель ядерной мультифрагментации с законами сохранения барионного и электрического зарядов со статистикой фрагментов Бозе - Эйнштейна и Ферми - Дирака.

В первом параграфе рассмотрен идеальный газ N тождественных частиц (бозонов или фермионов) в каноническом ансамбле в представлении чисел заполнения. Предложен метод нахождения рекуррентных уравнений для статистической суммы системы со статистикой частиц Бозе - Эйнштейна и Ферми - Дирака. Показано, что статистическая сумма сводится к групповому разложению Майера. В больцмановском пределе восстанавливается аналитическое выражение для статистической суммы идеального больцмановского газа N частиц в каноническом ансамбле. Найдены аналитические формулы для флуктуаций средних чисел заполнения.

Во втором параграфе в рамках канонического ансамбля рассмотрен многокомпонентный идеальный газ (N_1, \dots, N_A) ядерных фрагментов со статистикой Бозе - Эйнштейна или Ферми - Дирака. Фрагменты отличаются между собой только по числу нуклонов, спектром возбуждения фрагментов пренебрегается. Для точного вычисления статистической суммы найдена система рекуррентных уравнений. Термодинамические средние выражаются через статистические суммы подсистем N_k тождественных фрагментов, которые вычислялись в предыдущем параграфе с помощью рекуррентных уравнений. Показано, что в классическом пределе эти выражения переходят в известные аналитические выражения для статистической суммы и термодинамических средних больцмановской системы фрагментов.

В третьем параграфе в рамках канонического ансамбля сформулирована квантово - статистическая модель ядерной мультифрагментации с сохранением только барионного заряда, где учтены энергия связи фрагмента и его энергия взаимодействия со средним полем, спектром возбуждения фрагментов пренебрегается. Впервые для такой системы найдены рекуррентные уравнения с

помощью которых значения статистической суммы вычисляются точно. Статистическая сумма приведена к групповому разложению Майера следующего вида

$$\mathcal{Q}_A = \sum_{\{N_k\}} \delta \left(\sum_{k=1}^A k N_k - A \right) \prod_{k=1}^A \frac{\omega_k^{N_k}}{k^{N_k} N_k!} = \frac{1}{A} \sum_{k=1}^A \omega_k \mathcal{Q}_{A-k},$$

$$\omega_k = \sum_{l=1}^k \sum_{\mu=1}^k \delta_{k,l\mu} l (\mp 1)^{\mu+1} \sum_{\vec{p}} e^{-\beta \mu E_{l\vec{p}}},$$

где $\mathcal{Q}_0 = 1$, ω_k – групповые интегралы Майера, $E_{k\vec{p}}$ – одночастичные энергии фрагментов, верхний знак соответствует статистике Ферми-Дирака, а нижний знак статистике Бозе-Эйнштейна. Показано, что в больцмановском пределе эти уравнения приводятся к рекуррентным уравнениям статистической модели мультифрагментации со статистикой Максвелла-Больцмана, рассмотренными в Главе 1. Получены аналитические формулы для средних чисел заполнения, их моментов, различных флуктуационных характеристик, термодинамических средних и множественных распределений в случае квантовой и классической статистики. Показано, что система претерпевает фазовый переход первого рода. Квантово - статистические эффекты четко видны на микроскопическом уровне чисел заполнения, но почти исчезают на уровне глобальных термодинамических переменных и распределений по множественности. В последнем случае отмечены характерные изменения в поведении множественных распределений в узкой области температуры вблизи фазового перехода.

В четвертом параграфе подход, развитый в предыдущем параграфе, обобщается на случай одновременного учета законов сохранения барионного и электрического зарядов. Для точного вычисления статистической суммы найдена система рекуррентных уравнений. Статистическая сумма ядерной системы A нуклонов и Z протонов может быть представлена в следующем виде

$$\mathcal{Q}_{A,Z} = \sum_{\{N_{k\mathbf{1}\underline{a}}\}} \delta \left(\sum_{k\mathbf{1}\underline{a}} k N_{k\mathbf{1}\underline{a}} - A \right) \delta \left(\sum_{k\mathbf{1}\underline{a}} l N_{k\mathbf{1}\underline{a}} - Z \right) G(\{N_{k\mathbf{1}\underline{a}}\}) e^{-\beta \sum_{k\mathbf{1}\underline{a}} E_{k\mathbf{1}\underline{a}} N_{k\mathbf{1}\underline{a}}}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{1}{A} \sum_{l=0}^Z \sum_{k=l, k \neq 0}^{A-Z+l} \sum_{\mu=1}^{\tilde{N}_{kl}} k \omega_{kl\mu} \mathcal{Q}_{A-k\mu, Z-l\mu} \\
&= \sum_{\{N_{kl}\}} \delta \left(\sum_{kl} k N_{kl} - A \right) \delta \left(\sum_{kl} l N_{kl} - Z \right) \prod_{kl} \frac{\omega_{kl}^{N_{kl}}}{N_{kl}!} \\
&= \frac{1}{A} \sum_{l=0}^Z \sum_{k=l, k \neq 0}^{A-Z+l} k \omega_{kl} \mathcal{Q}_{A-k, Z-l}, \\
\omega_{kl\mu} &= \sum_{\mathbf{a}} y_{kl\mathbf{a}\mu} e^{-\beta \mu E_{kl\mathbf{a}}}, \\
\omega_{kl} &= \sum_{i=1}^k \sum_{j=0}^l \sum_{\mu=1}^k \delta_{k,i\mu} \delta_{l,j\mu} \left(\frac{i}{k} \right) \sum_{\mathbf{a}} y_{ij\mathbf{a}\mu} e^{-\beta \mu E_{ij\mathbf{a}}},
\end{aligned}$$

где $\mathcal{Q}_{0,0} = 1$, ω_{kl} – групповой интеграл Майера приведенный к числу нуклонов k фрагмента, \tilde{N}_{kl} – максимально возможное число фрагментов сорта (k, l) в системе (A, Z) и $\delta_{i,j}$ – символ Кронекера. Для статистики фрагментов Ферми - Дирака и Бозе - Эйнштейна переменная $G(\{N_{kl\mathbf{a}}\}) = 1$, а величина $y_{kl\mathbf{a}\mu} = (\mp 1)^{\mu+1}$. В случае классической статистике фрагментов Максвелла-Больцмана переменная $G(\{N_{kl\mathbf{a}}\}) = (1/A!) A! / \prod_{kl\mathbf{a}} N_{kl\mathbf{a}}!$, а величина $y_{kl\mathbf{a}\mu} = \delta_{\mu,1}$. Средние множественности фрагментов и термодинамические средние выражаются через статистические суммы $\mathcal{Q}_{A,Z}$ для меньших систем, которые могут быть вычислены точно с помощью рекуррентных уравнений.

В третьей главе впервые неэкстенсивная статистическая механика Цаллиса применяется для описания ядерной мультифрагментации. В рамках канонического ансамбля построена обобщенная статистическая модель для статистики фрагментов Максвелла-Больцмана с точным учетом законов сохранения барионного и электрического зарядов. Рассматриваются основные положения обобщенной статистической механики Цаллиса, где неэкстенсивная энтропия выражается через вероятности микросостояний p_i системы в виде

$$S_q^{(2)} = k \frac{1 - \sum_{i=1}^W p_i^q}{q-1}, \quad \left(\sum_{i=1}^W p_i = 1; q \in \mathcal{R}, \right)$$

Здесь k – положительная константа, W – полное число микросостояний си-

стемы, а параметр неэкстенсивности $q > 0$. В предельном случае $q \rightarrow 1$ обобщенная энтропия приобретает вид обычной энтропии Больцмана-Гиббса, $S_1 = -k \sum_i p_i \ln p_i$.

Во втором параграфе в рамках этого формализма рассмотрен классический идеальный газ N тождественных частиц. Для основных термодинамических средних и статистической суммы системы получены точные аналитические выражения методом прямого интегрирования и методом гамма-функций. С помощью метода факторизации найдены соответствующие приближенные результаты, которые сравниваются с точными формулами.

В третьем параграфе представлена конкретная реализация статистической модели ядерной мультифрагментации в рамках обобщенной статистической механики Цаллиса с неэкстенсивной энтропией. С помощью рекуррентных уравнений в приближении факторизации найдены значения статистической суммы и термодинамических средних. Исследованы глобальные термодинамические свойства ядерной системы. Как пример, на рис. 2 приведено сравнение расчетной калорической кривой с экспериментальными данными группы ALADIN.

В заключении сформулированы результаты диссертации, выдвигаемые на защиту.

В приложении А найдено рекуррентное соотношение между числами заполнения и статистической суммой системы идеального квантового газа N тождественных частиц в каноническом ансамбле. На основе этого уравнения получены рекуррентные уравнения для статистической суммы системы.

В приложении В дано доказательство рекуррентного соотношения для статистической суммы идеального газа N тождественных частиц в каноническом ансамбле. Приведено также доказательство рекуррентного соотношения для статистической суммы в рамках квантово - статистической модели ядерной мультифрагментации с сохранением барионного заряда.

В приложении С приведен метод суммирования по импульсу и сформулировано условие, при выполнении которого возможен переход от суммирования

к интегрированию. Даны необходимые формулы для суммирования и интегрирования импульсных выражений.

На защиту вынесены следующие результаты

1. В рамках равновесной статистической механики Гиббса в каноническом ансамбле построена точно решаемая статистическая модель ядерной мультифрагментации с учетом законов сохранения барионного и электрического зарядов.
2. Найдена система рекуррентных уравнений для точного расчета статистической суммы со статистикой фрагментов Бозе-Эйнштейна и Ферми-Дирака.
3. Показано, что статистическая сумма модели дается суммой мультиномиальных коэффициентов с групповыми интегралами Майера, зависящими от типа статистики.
4. Установлено слабое влияние квантовой статистики фрагментов на термодинамические свойства и характеристики мультифрагментации конечной ядерной системы, в частности на свойства возможного фазового перехода.
5. Получены точные результаты для статистической суммы и средних по ансамблю в рамках копенгагенской параметризации статистических свойств фрагментов на основе модели жидкой - капли.
6. В рамках обобщенной неэкстенсивной статистической механики Цаллиса в каноническом ансамбле впервые построена статистическая модель ядерной мультифрагментации с учетом законов сохранения барионного и электрического зарядов для статистики фрагментов Максвелла - Больцмана. Установлено сильное влияние параметра неэкстенсивности q на термодинамические средние вблизи критической точки системы.

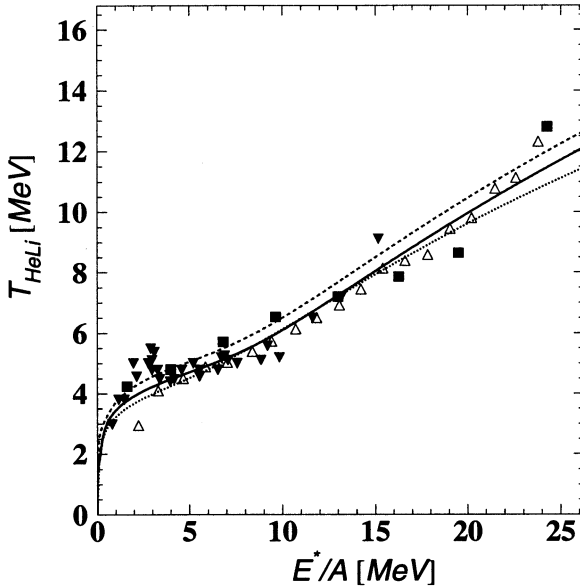


Рис. 1: Зависимость изотопической температуры T_{HeLi} от энергии возбуждения системы на нуклон. Вычисления проводились в приближение холодных фрагментов для ядерной системы из $A = 197$ нуклонов и $Z = 79$ протонов, заключенных в объем $V/V_0 = 4$ (пунктирная кривая) и в объем $V/V_0 = 6$ (сплошная кривая), а также для ядерной системы из $A = 36$ нуклонов и $Z = 18$ протонов в объеме $V/V_0 = 6$ (точечная кривая). Темные треугольники – экспериментальные данные группы ALADIN от распада ядра снаряда из реакции $^{197}Au + ^{197}Au$ при энергии 600 МэВ/нуклон [J. Pochodzalla et al., Phys. Rev. Lett. 75 (1995) 1040], квадраты – данные от распада ядра мишени той же реакции при энергии 1000 МэВ/нуклон [W. Trautmann, GSI-Preprint-98-20, 1998], открытые треугольники – данные коллаборации INDRA от распада налетающего ядра из реакции $^{36}Ar + ^{58}Ni$ при энергии 95 МэВ/нуклон [Y-G. Ma et al., Phys. Lett. B390 (1997) 41].

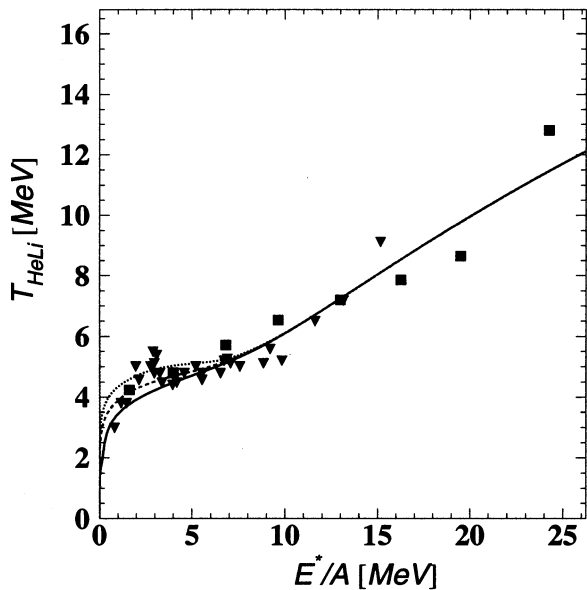


Рис. 2: Зависимость изотопической температуры T_{HeLi} от энергии возбуждения системы на нуклон для ядерной системы из $A = 197$ нуклонов и $Z = 79$ протонов в объеме $V/V_0 = 6$ при различных значениях параметра неэкстенсивности q : 1 (сплошная кривая), 1.0005 (прерывная кривая) и 1.001 (точечная кривая). Вычисления проводились в приближение холодных фрагментов. Обозначения экспериментальных точек те же, что и на рис.1.

Результаты диссертации опубликованы в работах:

1. A.S. Parvan, V.D. Toneev, M. Płoszajczak
Quantum statistical model of nuclear multifragmentation in the canonical ensemble method
Nucl. Phys. A **676** (2000) 409-451; Preprint GANIL-P-99-35, 1999. 38pp.; nucl-th/9912036.
2. K.K. Gudima, A.S. Parvan, M. Płoszajczak, and V.D. Toneev
Nuclear Multifragmentation in the Non-extensive Statistics - Canonical Formulation
Phys. Rev. Lett. **85** (2000) 4691-4694; Preprint GANIL-P-00-16, 2000. 4pp; nucl-th/0003025.
3. А.С. Парван, В.Д. Тонеев, К.К. Гудима
Калорическая кривая и мультифрагментация в столкновениях тяжелых ионов промежуточных энергий
Ядерная Физика, 1999, т. **62**, N.9, стр. 1593-1604; Препринт ОИЯИ Р7-98-33, Дубна, 1998.
4. A.S. Parvan, M. Płoszajczak and V.D. Toneev
Exactly solvable quantum statistical model of nuclear multifragmentation
Proc. of the Intern. Conf. "Nuclear structure and related topics", Dubna, Russia, June 6-10, 2000.

Получено 25 апреля 2002 года.

Макет *Н. А. Киселевой*

ЛР № 020579 от 23.06.97.

Подписано в печать 26.04.2002.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,1. Уч.-изд. л. 1,05. Тираж 100 экз. Заказ № 53261.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.