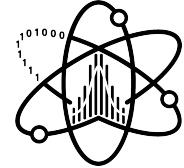




Национальный
исследовательский
Томский
государственный
университет



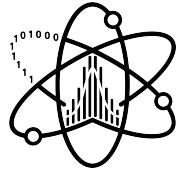
Статистическая модель мультифрагментации ядра (SMM)

Никита Чалый, аспирант ФФ ТГУ, мл. науч. сотр. ЛАДФВЭ ТГУ

11.12.2025

E-mail: nchalyi@mail.tsu.ru

Томск – 2025



Содержание

1. Введение

1.1. Энергия ядерных реакций

1.2. Понятие горячего ядра

1.3. Механизмы девозбуждения

2. Основные положения SMM

2.1. Выбор статистического ансамбля

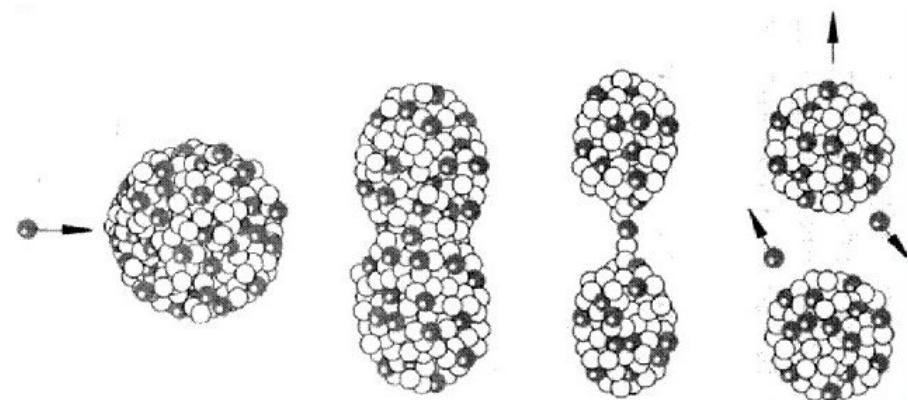
2.2. Физические величины (энтропия, средние)

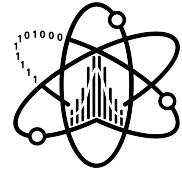
2.3. Алгоритм численных вычислений

2.4. Основные предсказания модели

3. Области применения

4. Заключение

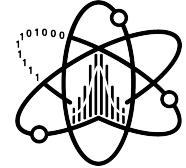




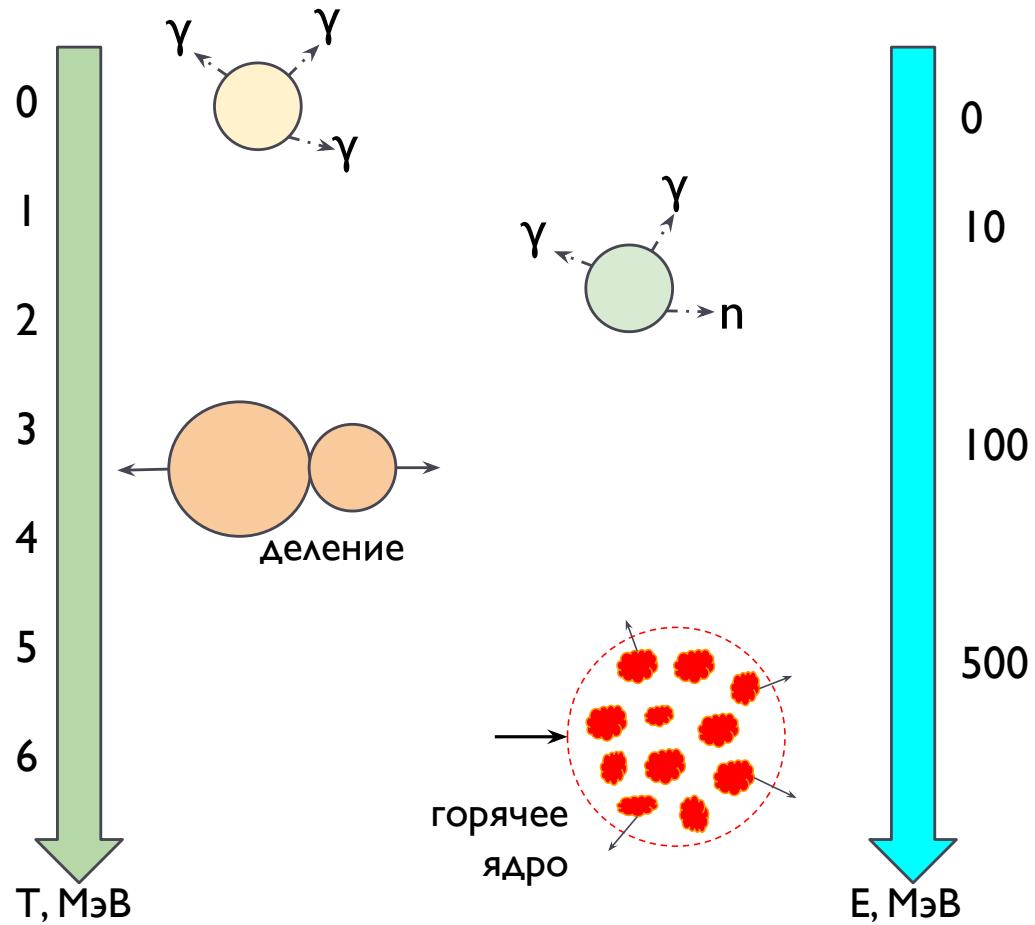
Энергия ядерных реакций

Энергия (МэВ/нуклон)	Физические процессы	Состояние ядерной материи
< 10 МэВ/нуклон	Упругое рассеяние, передача нуклонов, деление. Низкое возбуждение.	Ядро как холодная, несжимаемая капля.
~10-20 МэВ/нуклон	Переходная область. Начинается сильное сжатие и нагрев.	Формируется горячая и плотная зона.
~20-100 МэВ/нуклон	Мультифрагментация. Энергия возбуждения сравнима с энергией связи нуклонов. Система "вскипает".	Фазовый переход "жидкость-газ".
~100-1000 МэВ/нуклон	Рождение пионов и других мезонов. Начинают работать релятивистские эффекты.	Формирование и расширение горячей и плотной ядерной материи (возможно, смешанной фазы).
> 1 ГэВ/нуклон	Рождение странных частиц, кварк-глюонная плазма. Полностью релятивистская область.	Плотная барионная материя, переход к партонной (кварк-глюонной) стадии.

Комм.: МэВ/нуклон – энергия в сцм на один нуклон (протон/нейтрон). Например, ядро золота ($A=197$) с энергией 20 МэВ/нуклон будет иметь общую кинетическую энергию $197 \cdot 20 \sim 4$ ГэВ.



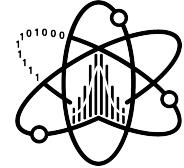
Понятие горячего ядра



Модель
ферми-газа

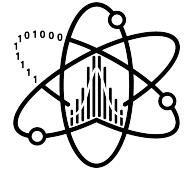
$$E = aT^2 \quad (1)$$
$$a \sim A/10$$

Аналогия:
закипание воды



Механизмы девозбуждения

Характеристика	Испарение (Evaporation)	Мультифрагментация (Multifragmentation)	Развал Ферми (Fermi Break-up)
Типичная энергия возбуждения	Низкая (1-3 МэВ/нуклон)	Промежуточная (3-10 МэВ/нуклон)	Высокая (> 10 МэВ/нуклон, для лёгких ядер)
Область энергий (лабораторная)	< 20 МэВ/нуклон	~20-100 МэВ/нуклон	~100-1000+ МэВ/нуклон (для лёгких ядер)
Механизм распада	Последовательное испарение легких частиц (n, p, d, α)	Почти одновременный распад на множество фрагментов сравнимой массы	Мгновенный развал на легчайшие частицы ($n, p, \alpha, d, t, {}^3\text{He}$)
Аналогия	Медленное испарение капли воды	Бурное вскипание с образованием множества пузырей	Взрывное дробление на мельчайшие брызги
Ключевой параметр	Энергия связи испаряемой частицы	Свободная энергия системы, температура	Плотность уровней
Область на фазовой диаграмме	«Жидкая» фаза (холодное/теплое ядро)	Критическая точка, фазовый переход «жидкость-газ»	Разреженный «газ» из нуклонов и лёгких кластеров
Основная модель	Статистическая модель Вайсскопфа (Weisskopf)	Статистическая модель мультифрагментации (SMM)	Статистическая модель Ферми
Типичные продукты	Лёгкие частицы + тяжелый остаток	Множество фрагментов средней массы ($\text{Li}, \text{Be}, \text{C}, \dots$) + лёгкие частицы	Только легчайшие частицы ($A \leq 4$)



Выбор статистического ансамбля



$$\sum A \cdot N_{AZ} = A_0$$

$$\sum Z \cdot N_{AZ} = Z_0$$

$$\sum A \cdot N_{AZ} = A_0$$

$$\sum Z \cdot N_{AZ} = Z_0$$

$$\sum A \cdot \langle N_{AZ} \rangle = A_0$$

$$\sum Z \cdot \langle N_{AZ} \rangle = Z_0$$

(2)

$$E_f(N_{AZ}, T_f, V) = E_0$$

$$\langle E_f(N_{AZ}, T, V) \rangle = E_0$$

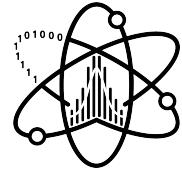
$$\langle E_f(\langle N_{AZ} \rangle, T, V) \rangle = E_0$$

$$W_f^{mic} \sim \exp S_f(E_0, V, A_0, Z_0)$$

$$W_f^{can} \sim \exp \left(-\frac{F_f(T, V, A_0, Z_0)}{T} \right)$$

$$W_f^{mac} \sim \exp \left(-\frac{F_f(T, V, A_0, Z_0) - \mu \sum A - \nu \sum Z}{T} \right)$$

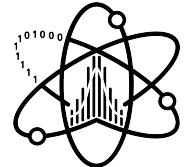
S - энтропия, F_f - свободная энергия, μ - химический потенциал, ν - барионное число



Выбор статистического ансамбля

Параметр	Микроканонический	Канонический	Макроканонический
Энергия E	Фиксирована	Флуктуирует	Флуктуирует
Масса A	Фиксирована	Фиксирована	Флуктуирует
Заряд Z	Фиксирован	Фиксирован	Флуктуирует
Температура T	Флуктуирует (разная для разных разбиений)	Фиксирована	Фиксирована
Другое	Фиксирован импульс ($P_\theta = 0$ в сцм)	-	Фиксированы хим. потенциалы по зарядам и барионному числу
Условие	Изолированная система	Тепловой контакт	Полный обмен (тепло + вещество)

Нужно выбрать наилучший ансамбль – для этого строим модель с выбранным ансамблем и сравниваем результаты каждого с экспериментальными данными.
Для SMM микроканонический оказывается наиболее подходящим.



Физические величины

Энтропия и полная энергия разбиения:

$$S_f = - \left(\frac{\partial F_f}{\partial T} \right)_{V, \{N_{AZ}\}}, \quad E_f = F_f + S_f T \quad (3)$$

Свободная энергия разбиения:

$$F_f(T, V) = -T \ln Z_f(T, V) = \dots = F_f^{\text{tr}} + \sum_{A,Z} F_{AZ}(T, V) N_{AZ} + E_0^C(V) \quad (4)$$

Хаотическое трансляционное
движение

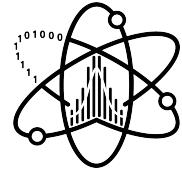
Кулоновская энергия

Внутренняя энергия
возбуждения и кулоновская
энергия фрагментов

$$F_{AZ} = F_{AZ}^B + F_{AZ}^{\text{sym}} + F_{AZ}^S + E_{AZ}^C$$

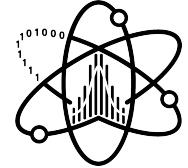
Средние значения множественности, числа разбиений, зарядов:

$$\langle M \rangle = \sum_{A,Z} \langle N_{AZ} \rangle \quad \quad \langle N_{AZ} \rangle = \frac{\sum_{\{f\}} (N_{AZ})_f \Delta \Gamma_f}{\sum_{\{f\}} \Delta \Gamma_f} \quad \quad \langle Z_A \rangle = \sum_{Z=0}^A Z \langle \frac{N_{AZ}}{N_A} \rangle \quad (5)$$



Алгоритм численных вычислений





Основные предсказания модели

I. Резкий переход от составного ядра к мультифрагментации.

При достижении критической энергии возбуждения $\varepsilon_c^* \approx 2-3$ МэВ/нуклон система перестаёт существовать как единое составное ядро и взрывным образом распадается на множество фрагментов.

- Ниже порога: Доминирует канал $M=1$ (составное ядро) затем переходит в последующее испарение/деление.
- Выше порога: Резко возрастает вероятность каналов с $M=2,3,4,\dots$

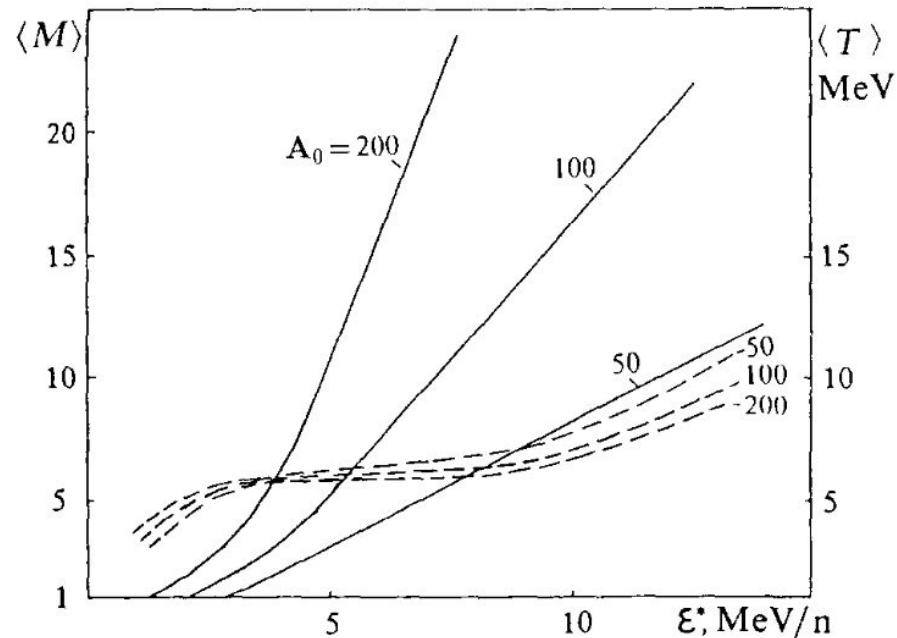
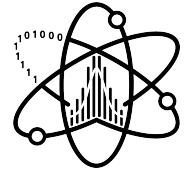
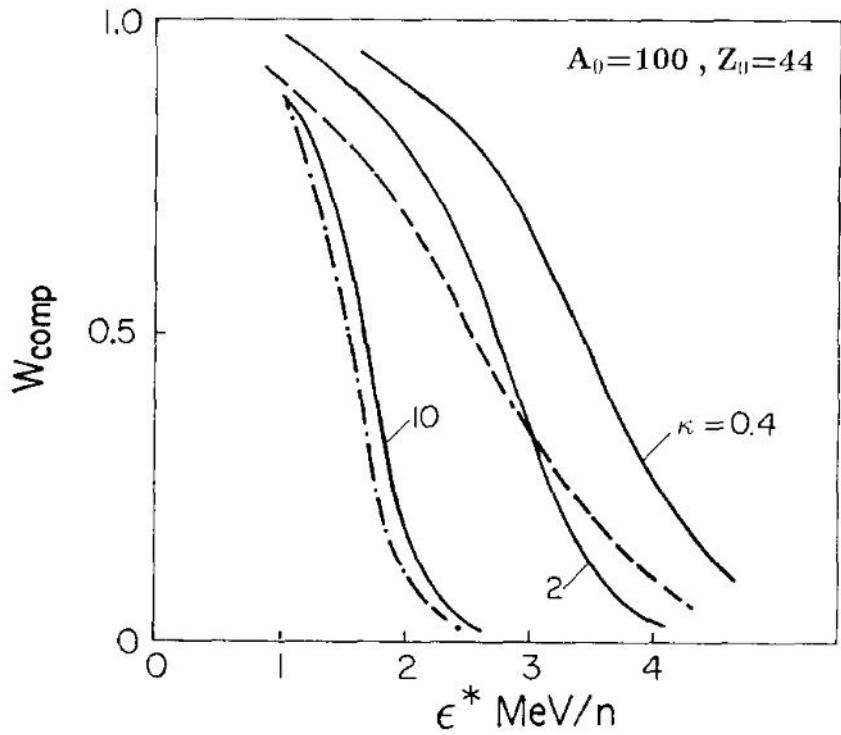


Рис. I. Микроканонические вычисления средней множественности фрагментов (сплошные линии) и средней температуры (штрих) от энергии возбуждения



Основные предсказания модели



Вероятность канала $M=1$ (составное ядро)
резко падает при $\epsilon^* \approx 2-3$ МэВ/нуклон.

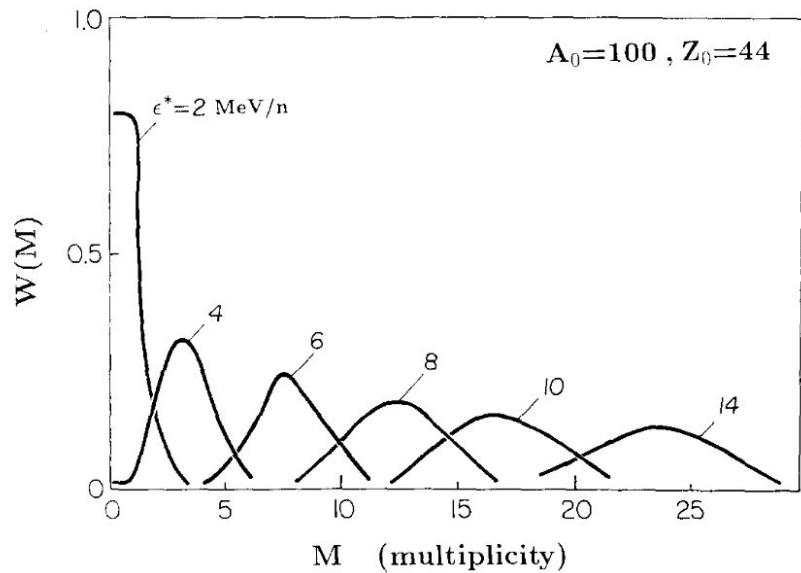
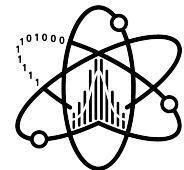


Рис. 2. Вероятность выживания составного ядра
(не обращаем внимание на κ)

Рис. 3. Зависимость вероятности от
множественности фрагментов для разных
энергий возбуждения



Основные предсказания модели

2. Постоянство температуры

В области перехода $\varepsilon^* \approx 3-10$ МэВ/нуклон
температура системы почти постоянна
 $T \approx 3-10$ МэВ, несмотря на рост возбуждения.

Дополнительная энергия идёт не на нагрев, а на:

1. Увеличение числа фрагментов
2. Разрушение нуклон-нуклонных связей
3. Преодоление кулоновского расталкивания

Это типично для фазового перехода I-го рода
(скрытая теплота плавления/испарения).

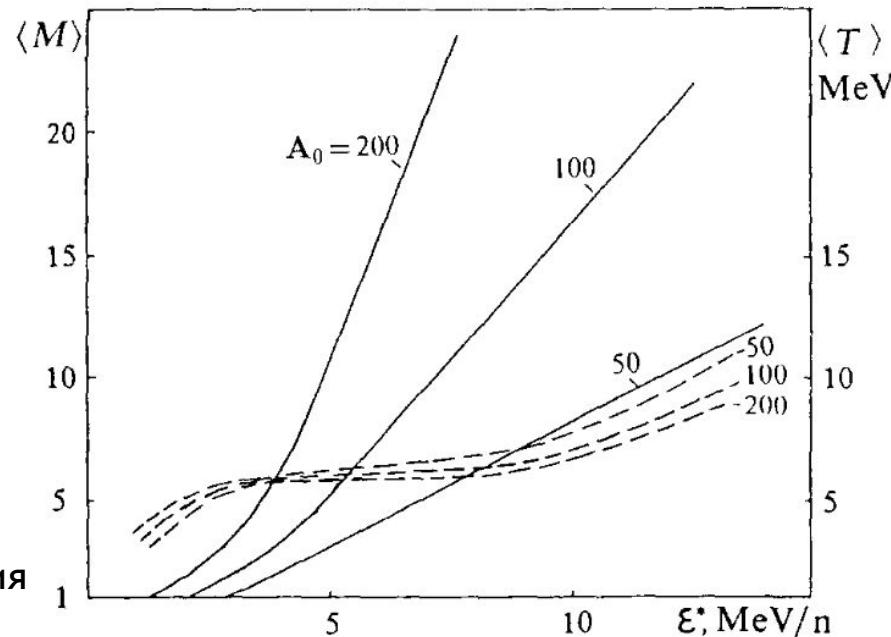
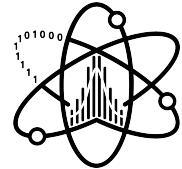


Рис. I. Микроканонические вычисления средней множественности фрагментов (сплошные линии) и средней температуры (штрих) от энергии возбуждения



Основные предсказания модели

3. Эволюция распределений масс

$$A_0=100, Z_0=44$$

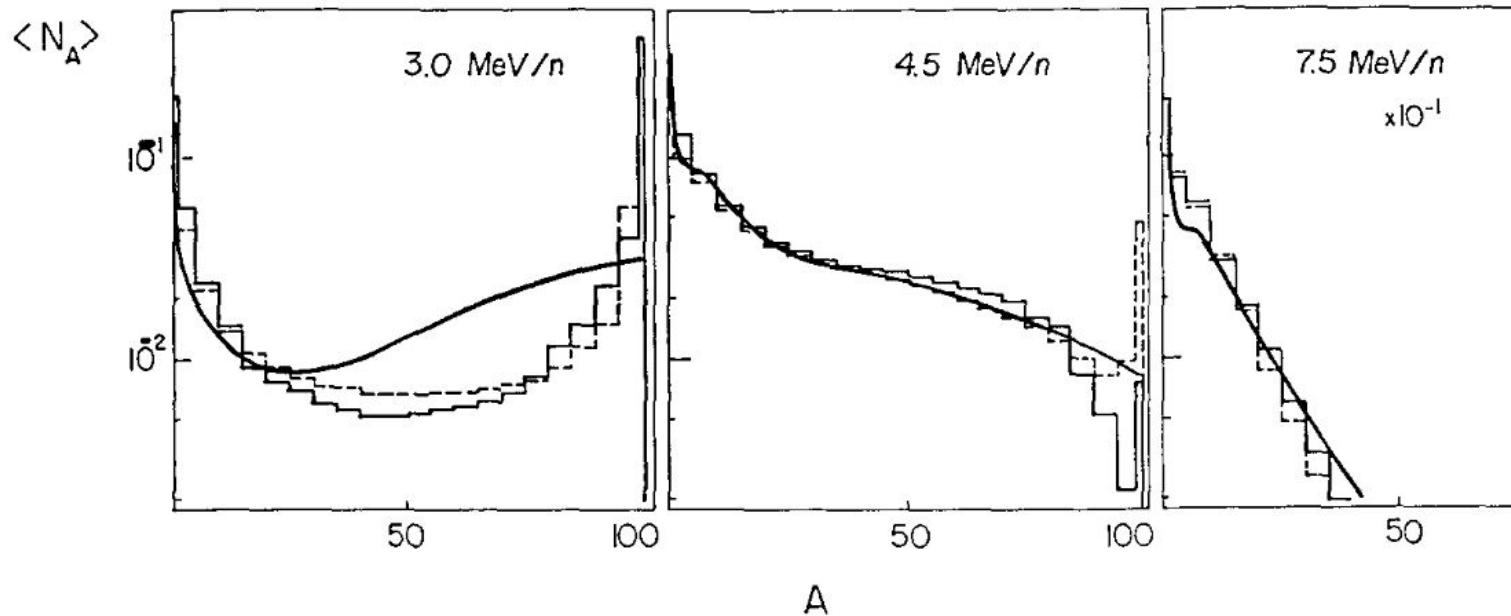
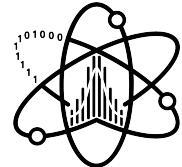


Рис. 3. Зависимость средней множественности фрагментов от массы A для трёх разных энергий возбуждения.

Эволюция от U-формы → степенной закон → экспоненциальный спад.



Основные предсказания модели

4. Фазовый переход

Аргументы за:

- **Фазовая диаграмма:** Поведение $\langle M \rangle(\varepsilon^*)$ и $T(\varepsilon^*)$ аналогично изотермам Ван-дер-Ваальса.
- **Критическое поведение:** Степенной закон около ε_c^* .
- **Скрытая теплота:** Постоянство T при поглощении энергии (плато на рис. I).

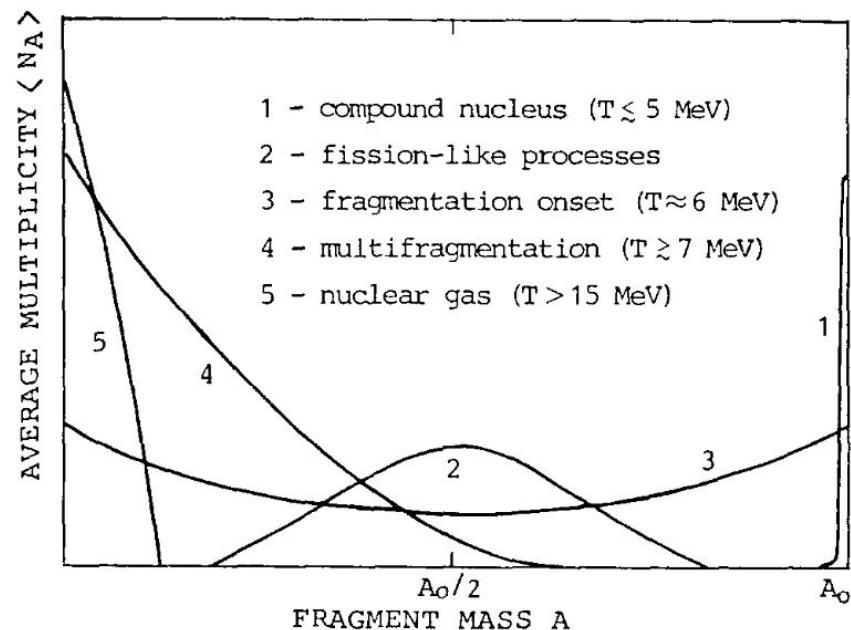
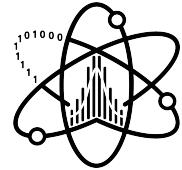


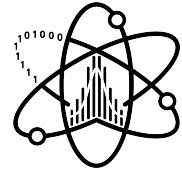
Рис. 4. Схематическое изображение эволюции распределений с температурой



Применение

1. Изучение ядер с экстремальными соотношениями N/Z (анализ мультифрагментации нестабильных ядер)
2. Изучение фазовых диаграмм ядерной материи
3. Разогрев и фрагментация ядерной материи в нейтронных звёздах
4. Моделирование атмосферных ливней, индуцированных ядрами космических лучей (с этого когда-то началось изучение мультифрагментации)
5. Протонная и ионная терапия. Фрагментация пучков кислорода, углерода в тканях
6. Защита от космической радиации. Фрагментация тяжелых ядер на защитных материалах

SMM имплементирована, но не используется в Geant4 – самом крупном пакете для моделирования взаимодействия частиц с веществом. Мы хотим “включить” мультифрагментацию снова, чтобы эффективно моделировать процессы на средне-низких энергиях (а это полезно для 5 и 6 пунктов).



Заключение

SMM предсказывает не просто количественные зависимости, а целостную картину эволюции механизмов распада:

1. **Низкие энергии** ($T \sim 1-2$ МэВ):

Детерминированная эволюция (испарение, деление)

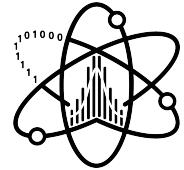
2. **Средние энергии** ($T \sim 5-7$ МэВ):

Критическое поведение (фазовый переход, степенные законы)

3. **Высокие энергии** ($T > 10$ МэВ):

Статистический газ (экспоненциальные распределения)

Именно эта универсальность и связь с фундаментальными понятиями статистической физики (фазовые переходы, критические явления) сделали SMM краеугольным камнем в понимании мультифрагментации.



Литература

- J.P. Bondorf, A.S. Botvina, et al. "Statistical multifragmentation of nuclei" (Physics Reports, 2011)
- B.V. Carlson et al. Fermi breakup and the Statistical Multifragmentation Model (2011) J. Phys.: Conf. Ser. 312 082017
- В.А.Карнаухов. Горячие ядра и фазовый переход жидкость-газ в ядерном веществе.
<http://nuclphys.sinp.msu.ru/mirrors/hn.htm?ysclid=mj115401y13283959>

Спасибо за внимание!

С вопросами можно обращаться по почте:
nchalyi@mail.tsu.ru (Никита)