

ВЛИЯНИЕ МАССЫ МИШЕНИ НА ВЕРОЯТНОСТЬ ОБРАЗОВАНИЯ НЕЙТРОННО-ИЗБЫТОЧНЫХ ИЗОТОПОВ В ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЯХ ПРИ ЭНЕРГИЯХ ФЕРМИ

Т. И. Михайлова¹, Б. Эрдэмчимэг²

1 ЛИТ, ОИЯИ, 2 ЛЯР, ОИЯИ

- Мотивация
- Описание ядерных реакции в транспортно-статистическом подходе BNV-SMM:
решение уравнения переноса методом пробных частиц, программная реализация;
учет статистического распада первичных (горячих) фрагментов
- Моделирование изотопных распределений в подходе BNV-SMM, а также EPAX, AA, HIPSE и сравнение с экспериментальными данными в реакциях $^{18}\text{O}+^9\text{Be}$ и $^{18}\text{O}+^{181}\text{Ta}$ (35 МэВ/нуклон);
- Изучение отношения выходов изотопов в реакциях $^{18}\text{O}+^9\text{Be}$ и $^{18}\text{O}+^{181}\text{Ta}$ (35 МэВ/нуклон);
- Заключение

Варианты реакций при столкновении двух тяжелых ядер

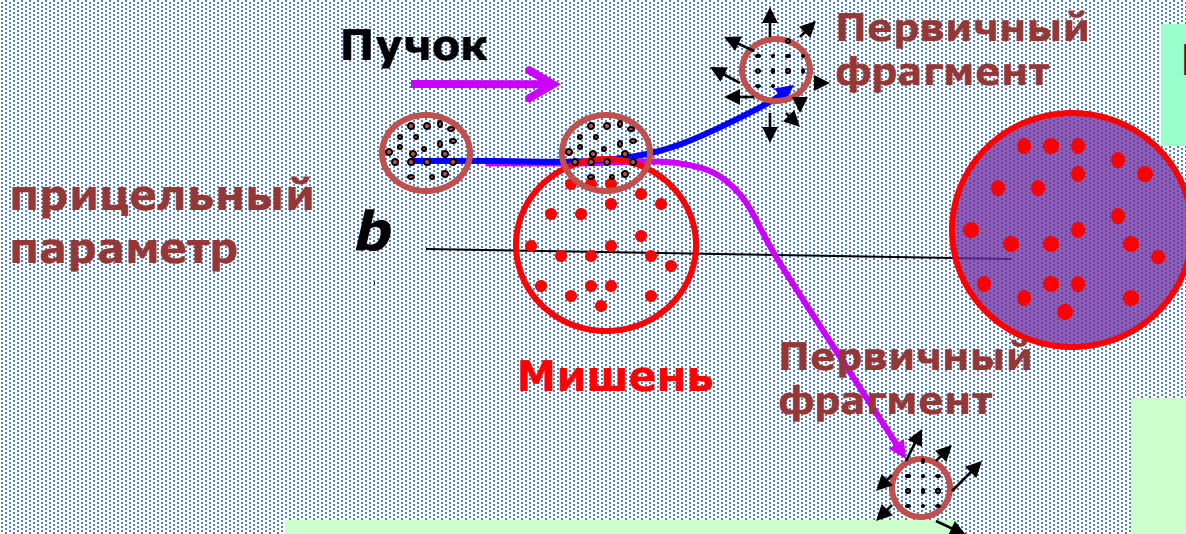
$E_{\text{пучка}} > 100$ Мэв на нуклон

Прямая реакция, модель Гольдхабера

$$\exp(-p^2 / \sigma^2)$$

$$\sigma^2 = \sigma_0^2 \frac{A_F (A_P - A_F)}{A_P - 1}$$

$$\sigma_0 \approx 90 \text{ MeV} / c$$

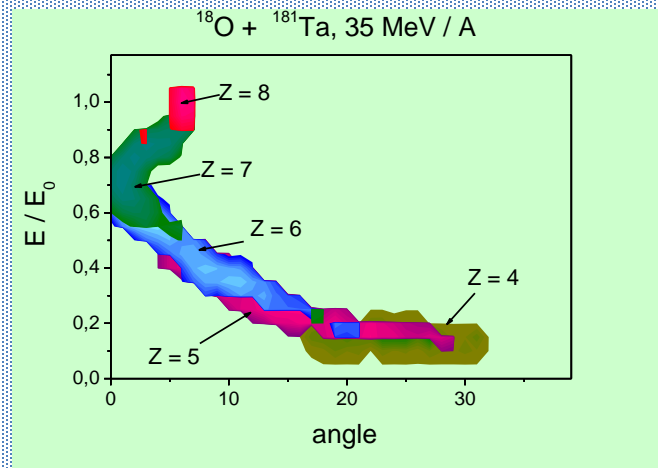


$E_{\text{пучка}} < 20$ Мэв на нуклон, маленькие значения b

Слияние
Компаунд ядро

Реакции глубоконеупругих передач, Q_{gg} систематика, График Вилчинского

$E_{\text{пучка}} < 20$ Мэв на нуклон, большие значения b



Как описать столкновение в диапазоне энергий

20 Мэв на нуклон $< E_{\text{пучка}} < 100$ Мэв на нуклон



Транспортное уравнение : уравнение Больцмана--Нордхайма-Власова (BNV)

Изменение во времени одночастичной функции распределения в фазовом пространстве $f(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t)$ под влиянием самосогласованного среднего поля $U[f]$:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\vec{p}}{m} \vec{\nabla} f - \vec{\nabla} U \vec{\nabla}_p f = I_{coll} [f, \sigma] \quad (1)$$

Потенциал $U(f)$ самосогласованного среднего поля представляется как сумма ядерного, кулоновского и потенциала, связанного с членом симметрии.

$$U(\rho) = A \left[\frac{\rho}{\rho_0} \right] + B \left[\frac{\rho}{\rho_0} \right]^d + C (-1)^k \frac{\rho_n - \rho_p}{\rho_n + \rho_p} + U_{coul}$$

$$A = -356 \text{ MeV}, B = 303 \text{ MeV},$$

$$d = 7/6, k = 1(p), 2(n), C = 36 \text{ MeV}$$

Интегро - дифференциальное уравнение в частных производных для $f(\vec{r}, \vec{p}; t)$ (1)

решается методом пробных частиц, где

N количество пробных частиц (ТР) на нуклон

$$f(\vec{r}, \vec{p}, t) = \frac{1}{N} \sum_i^{NA} g_r(\vec{r} - \vec{r}_i(t)) g_p(\vec{p} - \vec{p}_i(t)) \quad (2)$$

$$g_r = e^{-\frac{(\vec{r} - \vec{r}_i(t))^2}{\delta_r^2}}; \quad g_p = e^{-\frac{(\vec{p} - \vec{p}_i(t))^2}{\delta_p^2}}$$

$$\rho(r; t) = \int d\vec{p} f(\vec{r}, \vec{p}; t)$$

Подставляя (2) в (1) и интегрируя по r и p , получаем уравнения движения пробных частиц (уравнения Ньютона):

$$\frac{\partial \vec{p}_i(t)}{\partial t} = -\vec{\nabla}_r U(r_i, t) \quad \frac{\partial \vec{r}_i(t)}{\partial t} = \frac{\vec{p}_i(t)}{m} \quad (3)$$

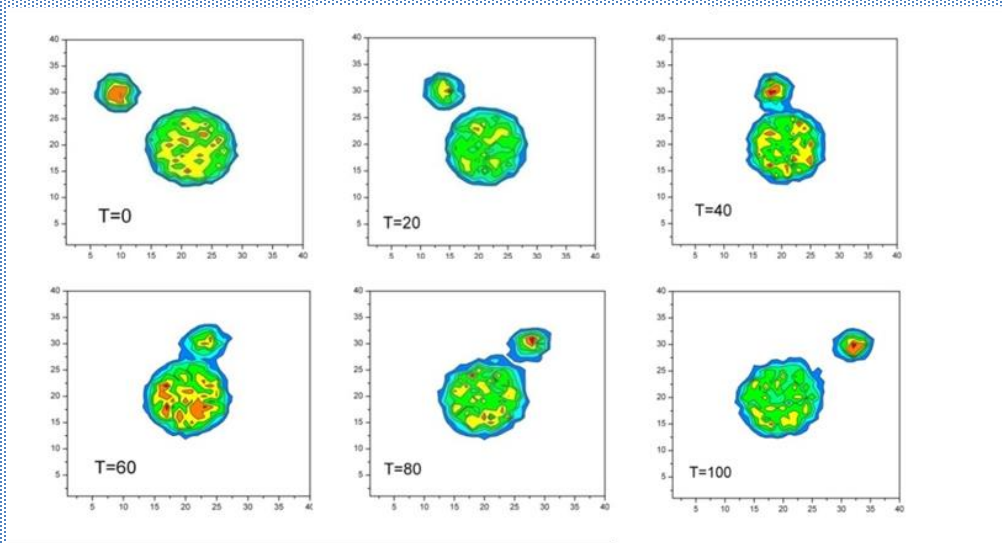
Для численного решения системы уравнений (3) используется метод предиктора-корректора (Leap-Frog) имеющий точность dt^2 :

$$\vec{p}_i(t + \frac{1}{2}\Delta t) = \vec{p}_i(t) - \frac{1}{2}\Delta t \vec{\nabla}_r U(r_i(t))$$

$$\vec{r}_i(t + \Delta t) = \vec{r}_i(t) + \Delta t \vec{p}_i(t + \frac{1}{2}\Delta t) / m$$

$$\vec{p}_i(t + \Delta t) = \vec{p}_i(t + \frac{1}{2}\Delta t) - \frac{1}{2}\Delta t \vec{\nabla}_r U(r_i(t + \Delta t))$$

Комбинированный транспортно-статистический подход



($t=0, 20, 40, 60, 80, 100$ fm/c (10 fm/c= $3.3 \cdot 10^{-23}$ с))

Эволюция во времени плотности распределения пробных частиц в реакции $^{18}\text{O}(35\text{A MeV}) + ^{181}\text{Ta}$

STEP 1:

Каждый фрагмент инициализируется путем стохастического распределения пробных частиц в потенциале Вудса—Саксона с учетом кулоновского поля и члена симметрии.

Затем частицам присваиваются координаты с учетом заданного прицельного параметра и к стохастическому движению частиц добавляется коллективное, исходя из заданной энергии реакции

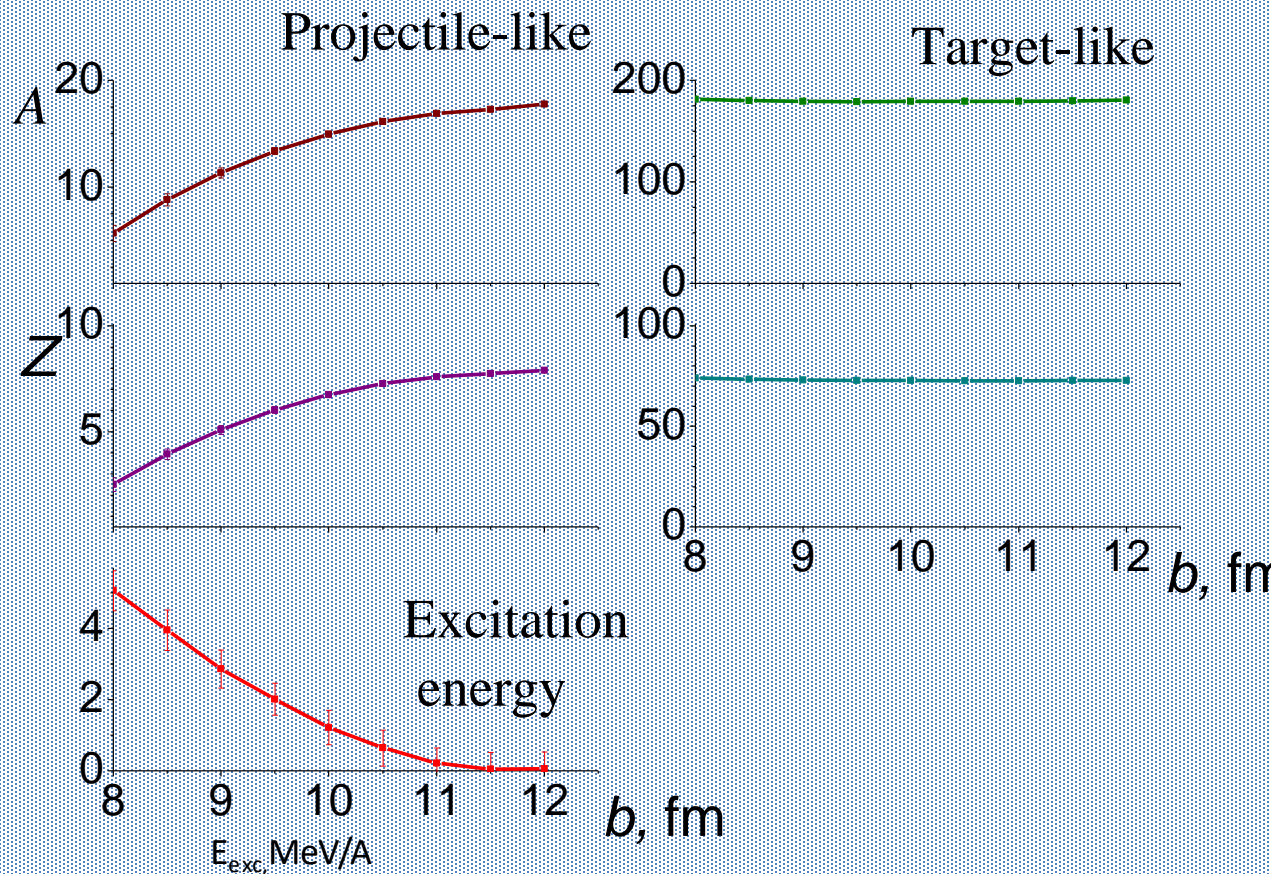
Комбинированный транспортно-статистический подход: результаты вычислений в транспортном подходе

6

STEP 2: Следующий шаг состоит в расчете временного развития реакции (изменения координат пробных частиц под действием среднего поля), до некоторого момента времени, называемого «точкой вымерзания»

$$t = t_{\text{freeze-out.}}$$

Для идентификации фрагментов использовался критерий коалесценции: граница фрагмента определялась из условия значения плотности на границе $\rho \geq 0.1\rho_0$



Зависимость от прицельного параметра массы, заряда и энергии возбуждения продуктов реакции в столкновении $^{18}\text{O}(35 \text{ A MeV}) + ^{181}\text{Ta}$, вычисления с 200 проб. част.

50 вычислений для каждого значения b_i , с интервалом $db=0.5$ fm
 $b_{\text{min}}=0$, $b_{\text{max}}=1.2 \cdot (R_{\text{proj}} + R_{\text{tag}})$

Результаты вычислений в транспортном подходе:

Транспортные вычисления дают **не целые** значения Z и N фрагментов!
Необходимо преобразовать действительные значения в целые числа

Пусть $A = [A] + \{A\}$
Частота в SMM вычислениях $[A] = 1 - \{A\}$
Частота в SMM вычислениях $[A] + 1 = \{A\}$

Фрагменты возбуждены!
Транспортный подход – полуклассический, он не может описать де-возбуждение, поэтому

STEP 3: Для расчета де-возбуждению фрагментов мы используем метод

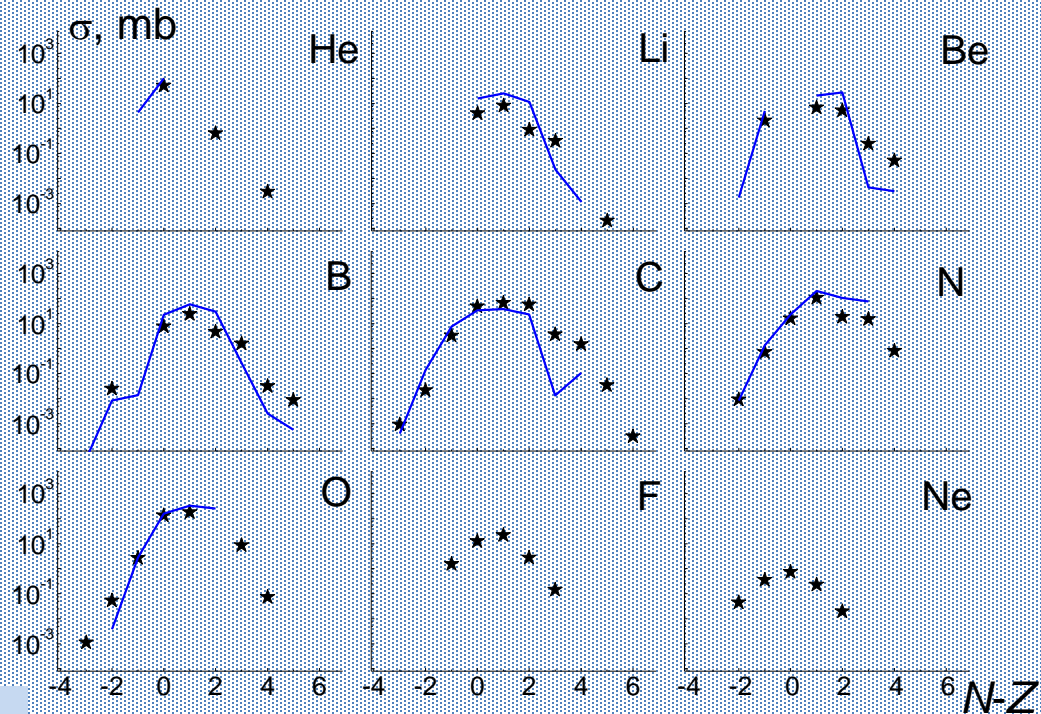
Статистической Мультифрагментации, а именно :

программу SMM. [A. S. Botvina et al. Nucl. Phys. A, 475:663, 1987]

Входные параметры : A_{fr} , Z_{fr} , E_{exc} , R и P (результат вычислений в BNV подходе)

Единственный (полу)свободный параметр в наших расчетах:

$$(E_{exc})_{SMM} = 1.5 * (E_{exc})_{BNV}$$



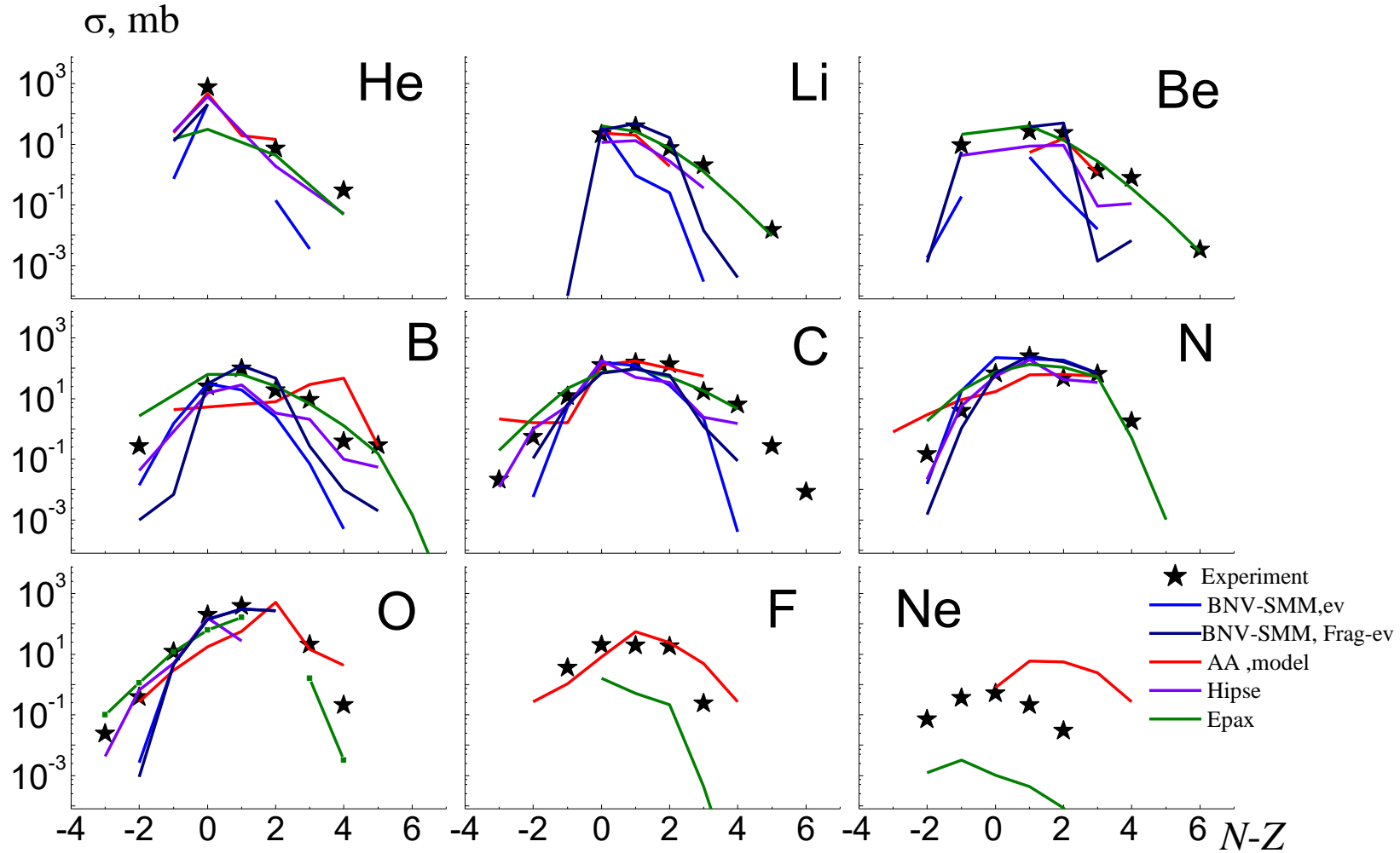
Изотопные распределения в реакции с ^{18}O (35 МэВ/нуклон)+Be, линии - модель, экспериментальными данные - звездочки

Модели, использованные для моделирования изотопных и скоростных распределений продуктов реакций

- ❑ Модель параметризации **EPAX** (Универсальная Эмпирическая Параметризация), [K. Summerer and B. Blank, *Phys. Rev. C.* 61, 034607 (2000).] реализованная в LISE++

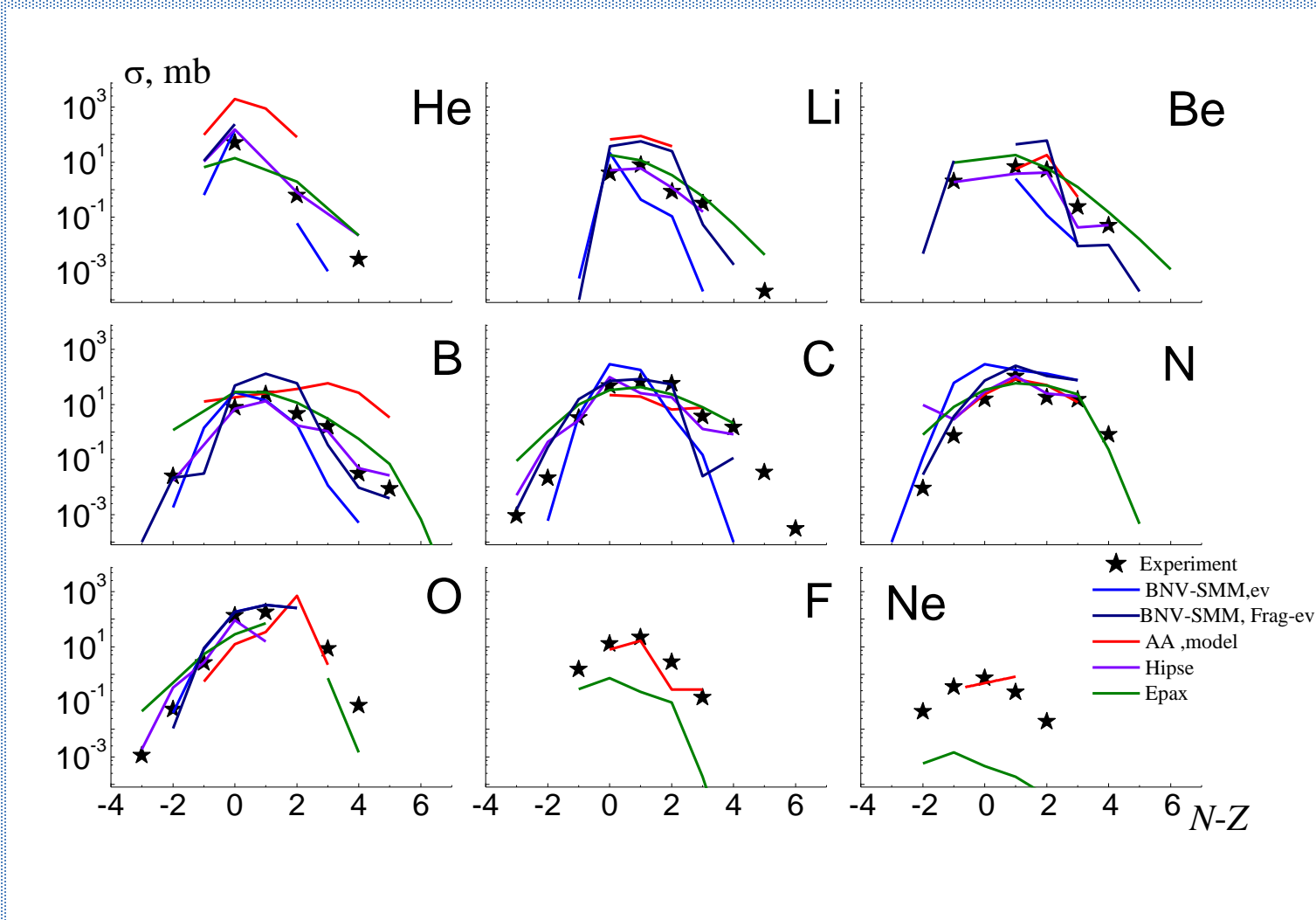
Эмпирическая модель, созданная для расчета сечения продуктов реакций при релятивистских энергиях. Содержит больше 30 параметров. Регулярно улучшается. Хорошо описывает экспериментальные данные, кроме сильно нейтронно- и протонно избыточных изотопов и продуктов реакции подхвата.
- ❑ Геометрическая модель abrasion и макроскопическая модель ablation, описывающие две стадии реакции. (**AA** модель) Первый шаг модель: участник—наблюдатель, второй шаг: статистический распад получившегося фрагмента. [Bowman J.D.// *LBL Report.* 1973. *LBL-2908.*]
- ❑ **HIPSE**- феноменологический подход для расчета сечений образования фрагментов в реакциях с промежуточными энергиями налетающего иона. Состоит из трех шагов: сближение, перекрывание, де-возбуждение. [Lacroix D., Lauwe A.V., Durand D. // *Phys. Rev. C.* 2004. V. 69. P. 054604.]
- ❑ **BNV** модель -микроскопический подход, основанный на решении кинетического уравнения для функции распределения ядерной материи. V. Baran, M. Colonna, M. Di Toro, *Phys. Rep.*, v **410**, 2005, p.335
- ⊕ Для де- возбуждения фрагментов, генерируемых BNV с помощью модели Статистической мультифрагментации (**SMM**) [A. S. Botvina et al. *Nucl. Phys. A*, 475:663, 1987]

Сравнение расчетов изотопных распределений выполненных в различных моделях с экспериментальными данными для реакции $[^{18}\text{O} (35 \text{ МэВ /нуклон}) + ^{181}\text{Ta}]^*$.



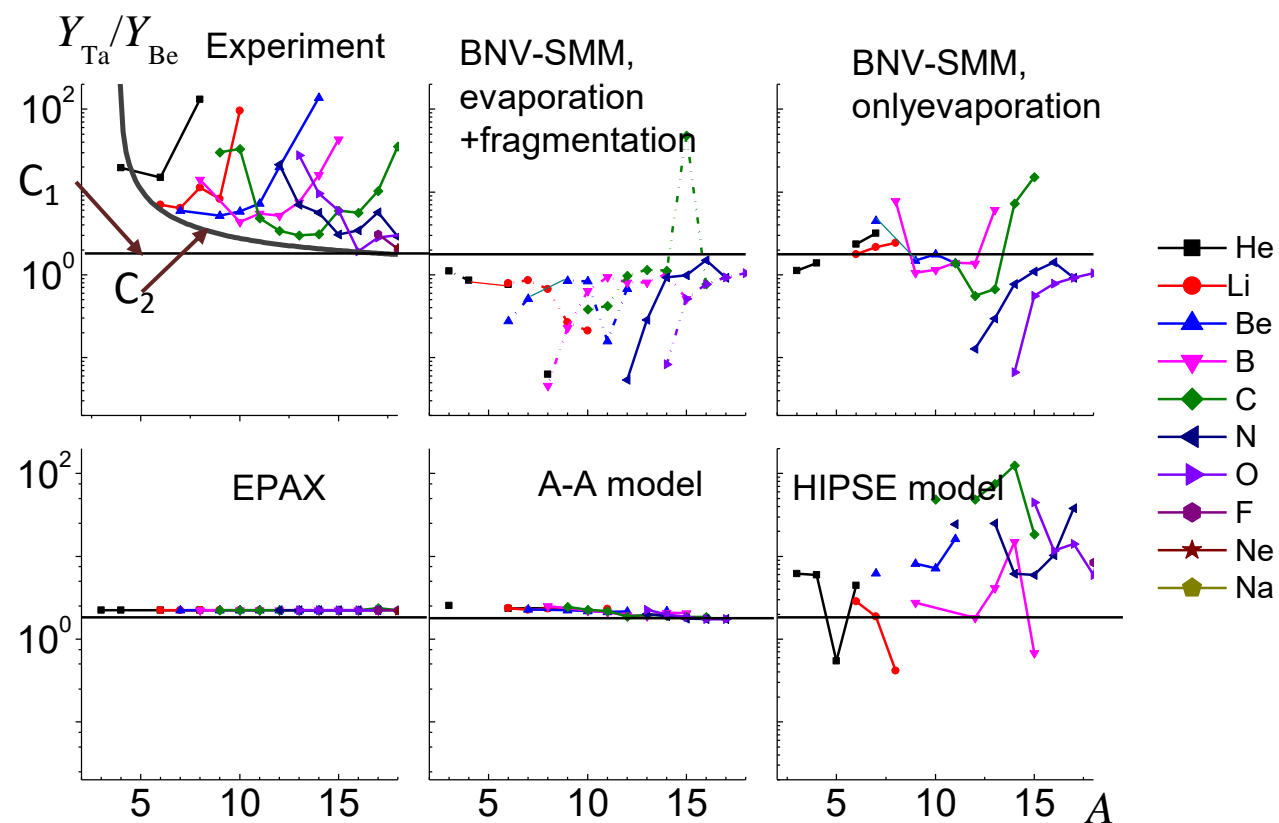
* -- А. Г. Артюх, Б. Эрдэмчимэг Письма в ЭЧАЯ. 2021. Т. 18, №1(233). С. 14–23

Сравнение расчетов изотопных распределений в различных моделях с экспериментальными данными для реакции ^{18}O (35 МэВ /нуклон) + ^9Be .



Наилучшей предсказательной силой обладает модель EРAX, но и эта модель недооценивает выходы изотопов, полученных в реакциях подхвата.

Отношение выходов изотопов в реакциях ^{18}O (35 МэВ/ нуклон) на мишенях ^{181}Ta и ^9Be



$$C_1 = \frac{R_O + R_{\text{Ta}}}{R_O + R_{\text{Be}}}$$

$$C_2 = \frac{R_O + R_{\text{Ta}} - k(18 - x)}{R_O + R_{\text{Be}} - k(18 - x)}$$

$$k \approx 0.33$$

В экспериментах наблюдается резкое превышение выхода нейтронно-избыточных изотопов на тяжелых мишенях, не учитываемое в модельном описании

Заключение

- В докладе сравнивается экспериментальное отношение сечений, полученных в реакциях на ^{181}Ta и легкой ^9Be мишенях в столкновениях с ионом ^{18}O при энергии 35 MeV на нуклон с предсказаниями транспортно-статистической модели BNV-SMM и нескольких других известных моделей. Обсуждается разница в модельных результатов.
- Для описания процесса реакции мы использовали транспортно-статистическую модель, BNV-SMM. Сравнение с экспериментальными данными, показывает, что данный подход достаточно хорошо предсказывает сечения образования фрагментов, близких к линии $Z = N$. При учете статистического распада расчеты проведены с фрагментацией (Frag) и без неё, только испарение (Ev). Хотя включение опции (Frag) делает изотопные распределения шире, что лучше согласуется с экспериментальными данными, но оно вносит хаотическое поведение в отношении выходов на тяжелой и легкой мишенях
- Приведено сравнение результатов расчета в транспортно-статистической модели с расчетами наиболее известных моделей, таких как EPAX, обновленная версия EPAX, Abrasion-Ablation и HIPSE модели. Дано сравнение с экспериментальными данными и результатами полученными в нашей модели.
- Показано, что многопараметрическая модель EPAX точнее описывают сечения образования наиболее многочисленных изотопов в периферических реакциях, но недооценивает выходы изотопов с $Z = Z_{\text{пучка}}$

**Благодарю
за
внимание**