

Теоретические исследования деления ядер и ядерных реакций

**Руководитель: доц., д. ф.-м. н.
Барabanов Алексей Леонидович**
Студент: МИКО Сотер

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

27 мая 2024 г.

- 1 Введение
- 2 Модель BROSA
- 3 Поверхностная энергия ядра
- 4 Заключение

Барьер деления - Энергия активации, необходимая для того, чтобы ядро атома подверглось делению

MM-RNRM: Multi-Mode Random Neck-rupture Model

процесс первого шанса, и процесс с несколькими шансами

- Если энергия возбуждения ядра мала, и оно делится на два осколка, то это деление первого шанса. Образуются два возбужденных фрагмента F_1, F_2 . Осколки теряют свою энергию, испуская нейтроны и гамма-кванты. [1] В конце концов остаются два продукта деления P_1, P_2 .
- Если энергия возбуждения ядра достаточно высока, то ядро может испустить n нейтронов на первой стадии реакции, m нейтронов в процессе деления, и образуются два возбужденных фрагмента F'_1, F'_2 . $\xrightarrow{\text{испускание частиц}} P_1, P_2$

процесс первого шанса, и процесс с несколькими шансами

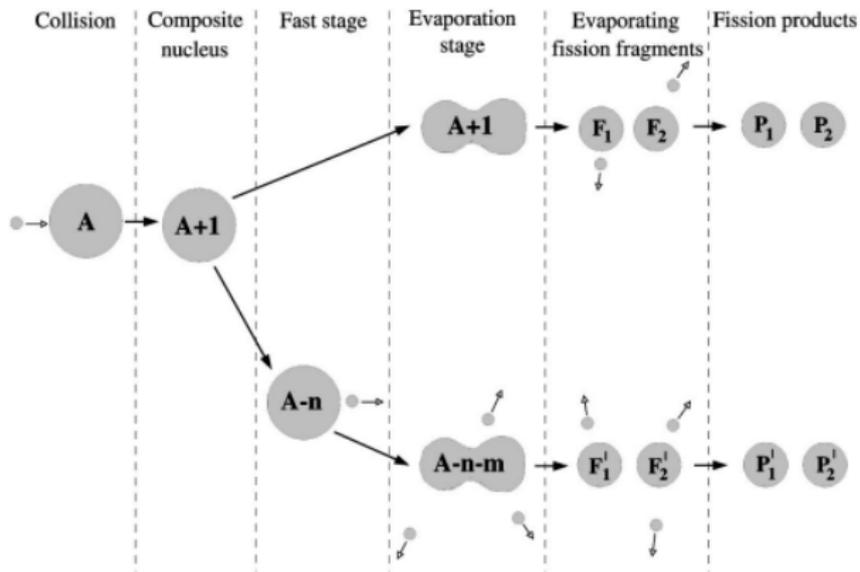


Рис.: Схематический рисунок, иллюстрирующий процесс деления.

- Модель BROSA состоит из двух элементов[2]: многоканальной эволюции к этапу разрыва ядра на осколки и модели случайного разрыва шейки между осколками.
- На этапе разрыва вытянутое ядро состоит из двух предварительно сформированных фрагментов, соединенных шейкой.
- Согласно модели RNRМ (Random Neck Rupture Model) разрыв шейки происходит в случайном месте. В результате образуются два фрагмента деления

Обобщенные формы Лоуренса

Модель BROSA использует обобщенные формы Лоуренса для параметризации деформирующегося ядра[3]:

$$\rho^2(\xi) = (l^2 - \xi^2) \sum_{n=0}^N a_n (\xi - z)^n \quad (1)$$

Форма ядра задается формулой, определяющей зависимость параметра ρ от параметра ξ и пятью параметрами[4, 3]:

l - мера удлинения ядра

r - радиус шейки

z - положение самого тонкого места на шейке или самого толстого места, если шейки нет

c - кривизна шейки

s - положение центра масс.

пять степени свободы

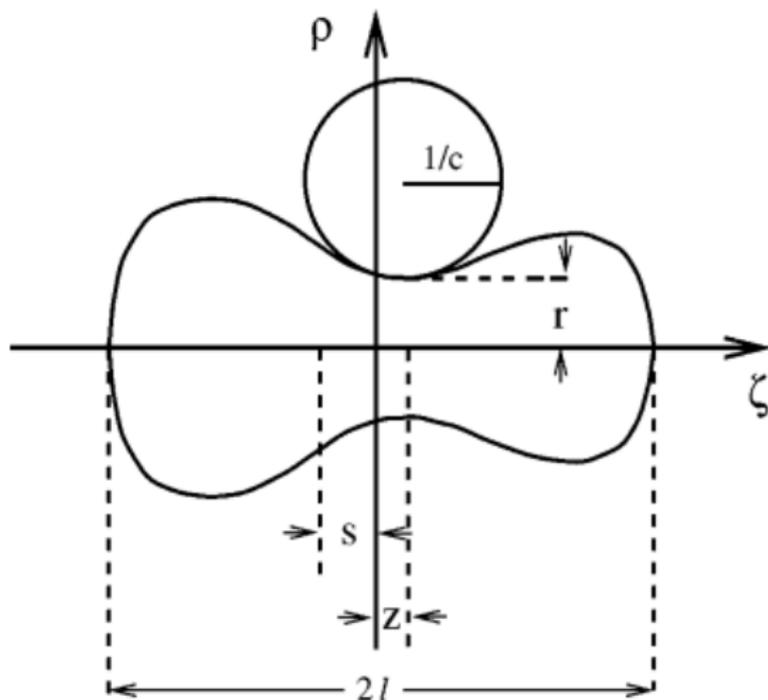


Рис.: Геометрический смысл пяти степеней свободы l , r , z , s , and c .

пять степени свободы

Пять коэффициентов выражены через пять параметров определяющих форму деформированного ядра.

$$a_0 = \frac{r^2}{(l^2 - z^2)}; \quad a_1 = \frac{2za_0}{(l^2 - z^2)}$$
$$a_2 = \frac{rc}{(l^2 - z^2)} + \frac{l^2 + 3z^2}{(l^2 - z^2)^2} a_0$$

При делении ядра остаются постоянными положение центра масс (s) и объем ядра (V)

$$V = \sum_i \pi \rho_i^2 \Delta \xi = \int_{-l}^l \pi \rho^2(\xi) d\xi \quad (2)$$

$$R_c = \frac{\sum_i \eta \pi \rho_i^2 \Delta \xi \xi_i}{\sum_i \eta \pi \rho_i^2 \Delta \xi} = \frac{\int_{-l}^l \rho^2(\xi) \xi d\xi}{\int_{-l}^l \rho^2(\xi) d\xi} = s \quad (3)$$

Решая систему уравнений (2) и (3) получается:

$$V = \frac{4}{3} \pi l^3 (a_0 - z a_1) + \frac{4}{15} \pi l^3 [(l^2 + 5z^2) a_2 - z(3l^2 + 5z^2) a_3] + \frac{4}{105} \pi l^3 (3l^4 + 56l^2 z^2 + 140z^4) a_4 \quad (4)$$

$$\frac{sV}{\pi} = \frac{4}{15} l^5 (a_1 - 2z a_2) + \frac{4}{35} l^5 [(l^2 + 7z^2) a_3 - 12z(3l^2 + 7z^2) a_4] \quad (5)$$

пять степени свободы

Из (4) и (5) получается:

$$a_3 = \frac{1680\pi l^7 z a_0 + 3920\pi l^5 z^3 a_0}{-36\pi l^{11} + 252\pi l^9 z^2 + 84\pi l^7 z^4 + 980\pi l^5 z^6} +$$
$$+ \frac{84\pi l^9 a_1 + 2856\pi l^7 z^2 a_1 + 4900\pi l^5 z^4 a_1}{-36\pi l^{11} + 252\pi l^9 z^2 + 84\pi l^7 z^4 + 980\pi l^5 z^6} -$$
$$- \frac{315sVl^4 + 1260zVl^4 + 4410sz^2Vl^2 + 2940z^3l^2V + 3675sz^4V}{-36\pi l^{11} + 252\pi l^9 z^2 + 84\pi l^7 z^4 + 980\pi l^5 z^6}$$
$$a_4 = \frac{420\pi l^7 a_0 + 2940\pi l^5 z^2 a_0 + 1008\pi l^7 z a_1 + 3920\pi l^5 z^3 a_1}{-36\pi l^{11} + 252\pi l^9 z^2 + 84\pi l^7 z^4 + 980\pi l^5 z^6} -$$
$$- \frac{84\pi l^9 a_2 + 2184\pi l^7 z^2 a_2 + 4900\pi l^5 z^4 a_2}{-36\pi l^{11} + 252\pi l^9 z^2 + 84\pi l^7 z^4 + 980\pi l^5 z^6} -$$
$$- \frac{315l^4V + 2205l^2szV + 2205l^2z^2V + 3675sz^3V}{-36\pi l^{11} + 252\pi l^9 z^2 + 84\pi l^7 z^4 + 980\pi l^5 z^6}$$

Примеры

Вот несколько примеров, иллюстрирующих изменение формы ядра при различных значениях параметров степеней свободы.

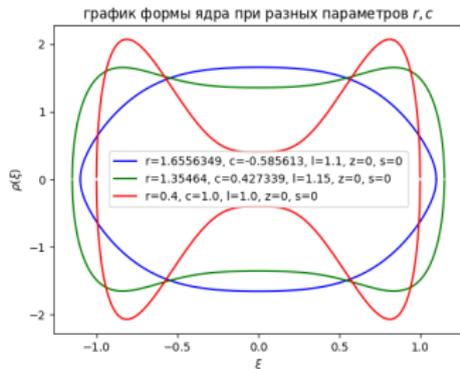


Рис.: Различные формы ядра на пути к делению

Поверхностная энергия ядра

Потенциальная энергия ядра также может быть получена непосредственно с помощью капельной модели. В этой модели ядро рассматривается капля несжимаемой жидкости. Поверхностная потенциальная энергия может быть получена используя формулу:

$$W = \sigma S \quad (6)$$

где: σ – коэффициент поверхностного натяжения, S – Площадь поверхность ядра как капля в капельной модели. Её можно вычислить по формуле:

$$S = \int_{-l}^l 2\pi\rho(\xi)\sqrt{1 + \rho'^2(x)}d\xi \quad (7)$$

Заключение

- Изучена макроскопическая модель, в которой поверхность жидкой капли задаётся пятью параметрами (5 степеней свободы).
- Выведены формулы для коэффициентов a_0 — a_4 , входящие в формулу Лоуренса. Эти коэффициенты выражены через 5 параметров, задающих форму деформированного ядра.
- Для некоторых значений параметров, описывающих деформацию ядра, построены формы ядер.
- Получено выражение для площади поверхности деформированного ядра в зависимости от пяти параметров.
- Планируется вычислить энергию кулоновского отталкивания в зависимости от удлинения ядра и воспроизвести барьер деления в капельной модели.

Список литературы

- [1] Peter Möller и др. “Nuclear fission modes and fragment mass asymmetries in a five-dimensional deformation space”. В: *Nature* 409 (2001), с. 785—790.
- [2] Tieshuan Fan и др. “Study of five-dimensional potential-energy surfaces for actinide isotopes by the macroscopic-microscopic method”. В: *EPJ Web Conf.* 146 (2017), с. 04033.
- [3] Peter Möller и др. “Heavy-element fission barriers”. В: *Phys. Rev. C* 79 (6 июнь 2009), с. 064304.
- [4] M. Duijvestijn и Franz-Josef Hamsch. “Mass distributions in nucleon-induced fission at intermediate energies”. В: *Phys. Rev. C* 64 (июнь 2001).

СПАСИБО!!!