

Поділ Ядра

В. Ю. ДЕНИСОВ

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Інститут ядерних досліджень, Київ, Україна

План

1. Вступ
2. Індукований поділ
3. Краплина модель
4. Спонтанний поділ
5. Основні особливості поділу
6. Висновки

1. Вступ

1932 - відкриття Нейтрона Джеймсом Чадвіком.

1932 - моделі ядра, у яких ядра складаються з протонів та нейтронів, були швидко розроблені Дмитром Іваненком [*The neutron hypothesis*, Nature. 129, 798 (1932)] та Werner Heisenberg [*Über den Bau der Atomkerne*, Z. Phys. 77, 1-11 (1932)].

1932 - Розпад ядра (Lithium+p(600 keV) \rightarrow He + X) прискореними протонами - John Douglas Cockcroft та Ernest Walton, *Disintegration of Lithium by Swift Protons*, Nature 129, 649 (30 April 1932). (Відметимо, що розпад ядра у подібної реакції зроблено (10 жовтня 1932) у Харкові А. Валтером, Г. Латишевим, А. Лейпунським, К. Синельниковим).

1934 - відкриття індукованої радіоактивності Ірен Жоліо-Кюрі та Жаном Фредеріком Жоліо-Кюрі. (Опромінення альфа-частинками В та Al).

Основний напрям експериментів: індукована протонами або альфа-частинками радіоактивність.

Однак Е. Фермі використовує опромінення нейтронами.

Фермі - в реакції $n + U$ новий вид радіоактивності, пов'язаний з трансураном - висновок Фермі.

Радіохімія: помилковий результат А. фон Гросса: він виявив Ра в реакції $n + U$.

Отто Хан та Ліза Мейтнер починають перевіряти ці результати.

Вони вважають у 1938 році, що в реакції $n + U$ утворився трансураний.

1938 рік: Ірен Жоліо-Кюрі та Петро Савич практично були дуже близькими до відкриття поділу, але не можуть зробити правильного висновку щодо продукту поділу [через близькість хімічних властивостей лантану (продукту поділу) та актинія].

1939: Otto Hahn та Fritz Strassmann знайшли у реакції $n+U \Rightarrow Ba$.

ОТТО ГАН (1879-1968)



В 1905 году получил радиоторий.

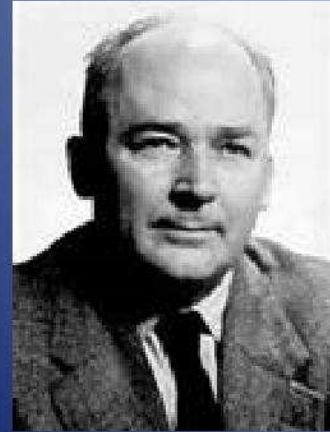
В 1906 году открыл актиний.

В 1906-1907гг. – мезоторий.

В 1917 году – протактиний. В 1938 году открыл явление деления ядер урана (расщепление атомного ядра).

С 1946 года по 1960 год являлся президентом Общества Макса Планка.

Фриц Штрассман



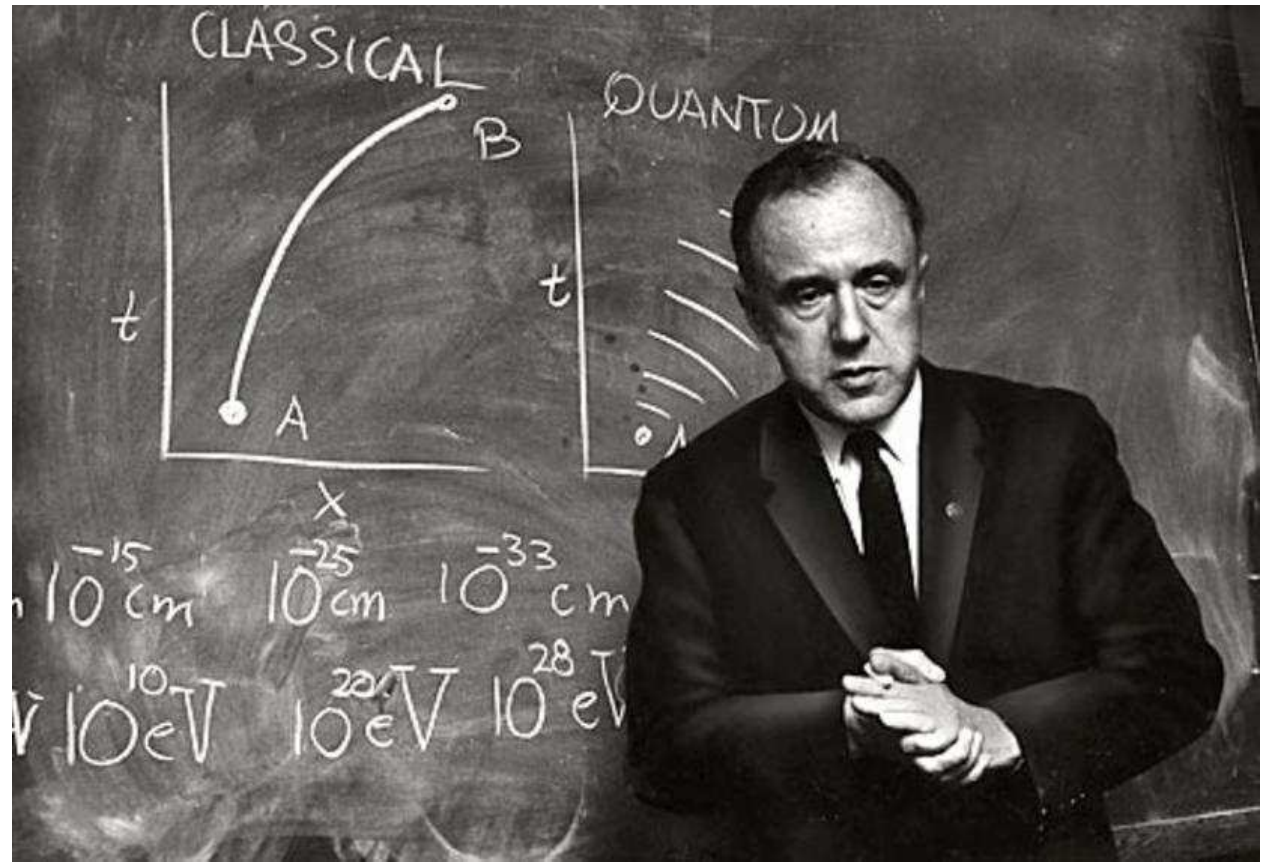
- Дата рождения 22 февраля 1902 — немецкий химик и физик. Изучал процессы ядерного деления, свойства радиоактивных изотопов урана и тория. В 1938 совместно с О. Ганом открыл деление ядер урана при бомбардировке их нейтронами, химическими методами доказал факт деления.

Назад на «Физики второй половины 20 века»

Lisa Meitner та Otto Frisch пояснили поділ 1939.



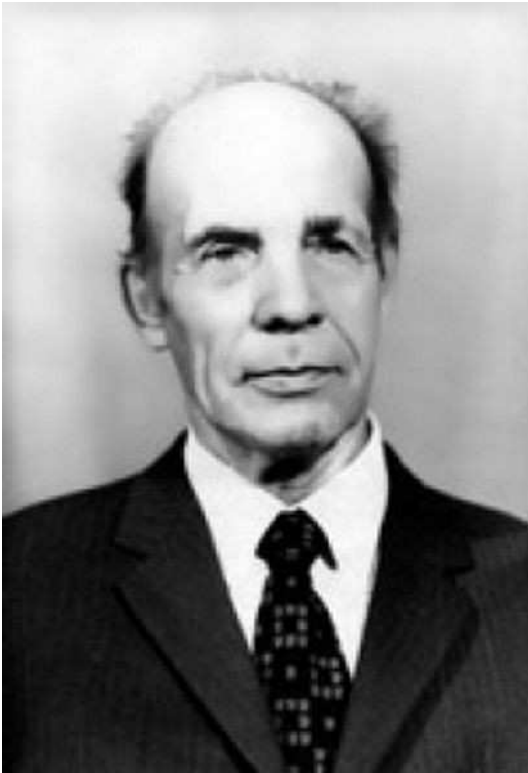
О. Frisch розказав про поділ ядер Нільсу Бору у гавані Копенгагену перед від'їздом Бора до США.



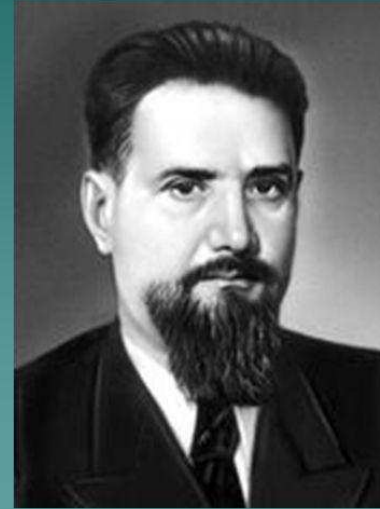
Теорія поділу ядра 1939: dropet model (крапельна модель)

- N. Bohr and J. Wheeler;
- Я. Б. Френкель;
- S. Flugge, G. Droste.

1940: К.А. Петржак and Г.Н. Флеров - відкриття спонтанного поділу ядра. Ділення природного U.



Курчатов Игорь Васильевич (1903 - 1960)



- ✦ Открыл изомерию искусственных атомных ядер.
- ✦ Создатель первой советской атомной бомбы
- ✦ Разработал проект первой в мире АЭС 1946 г , г.Обнинск

Енергетичні умови для спонтанного поділу:

$$\delta E = Mc^2 - M_1c^2 - M_2c^2 > 0 \quad (1)$$

Маса ядра з N нейтронами Z протонами є

$$Mc^2 = M_N Nc^2 + M_P Zc^2 + BE(N, Z), \quad (2)$$

де $BE(N, Z) < 0$ енергія зв'язку.

Тому

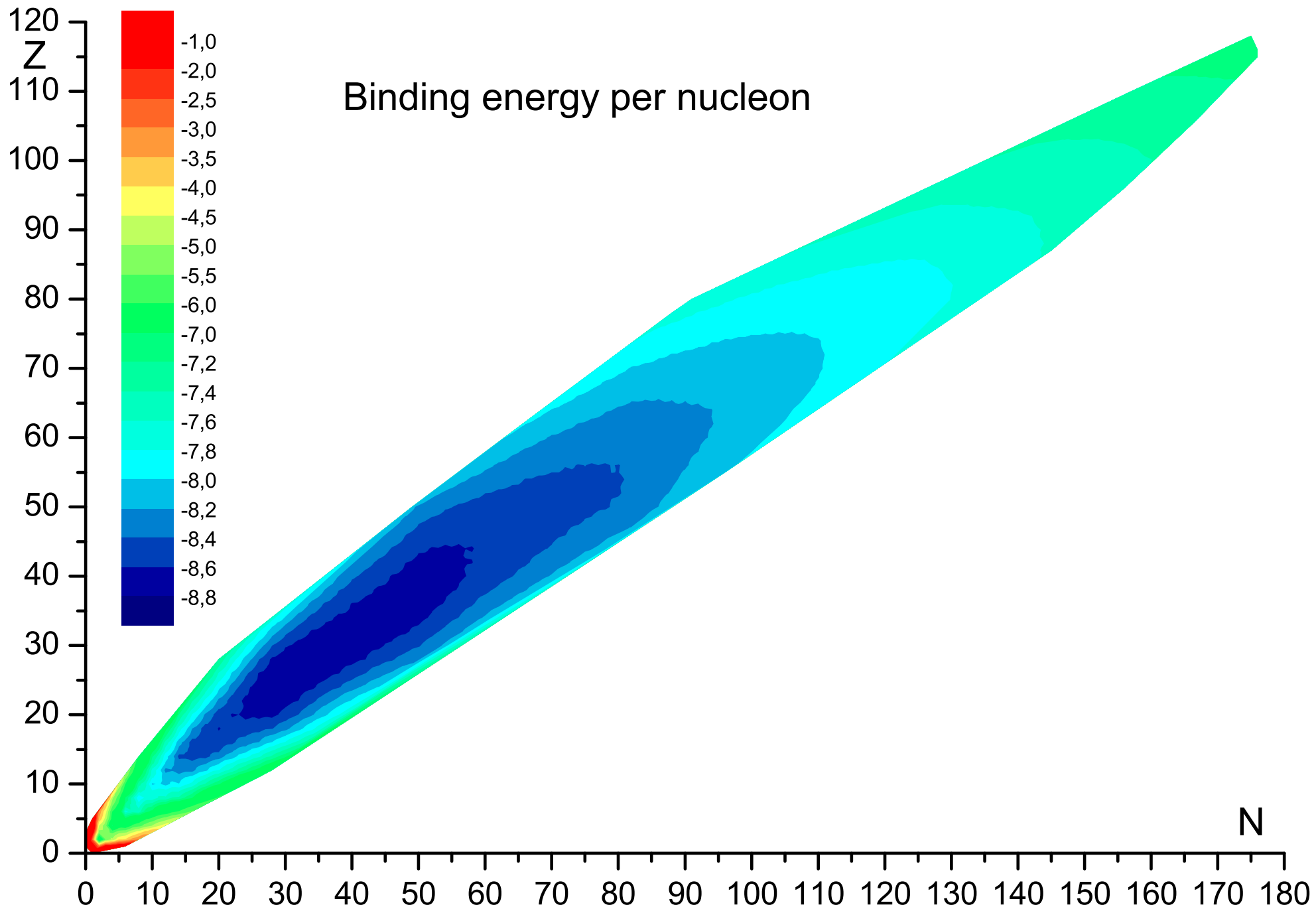
$$\delta E = BE(N, Z) - BE(N_1, Z_1) - BE(N - N_1, Z - Z_1) > 0 \quad (3)$$

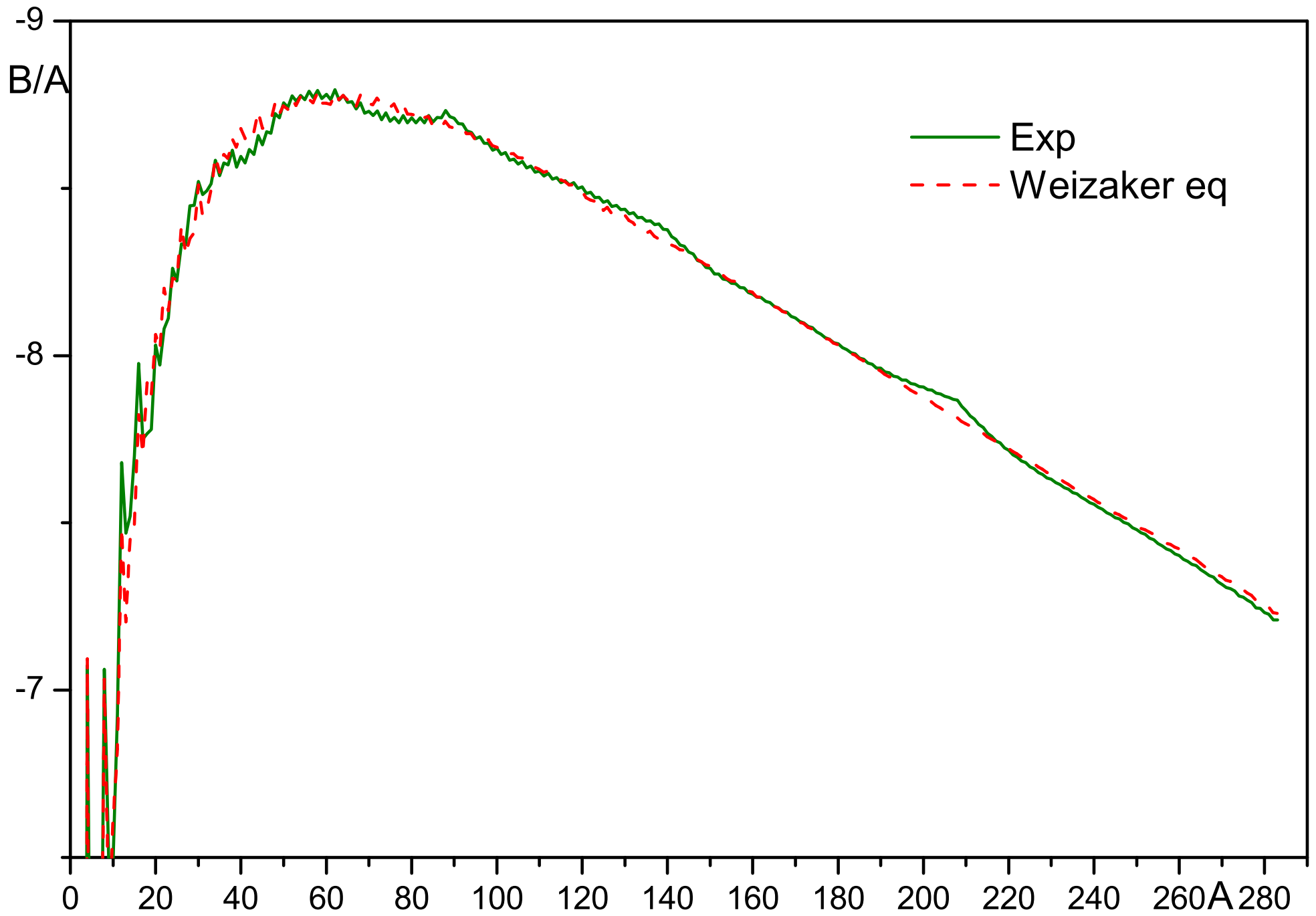
Приклад: вимушений поділ нейтронами $n + {}^{235}\text{U} \Rightarrow {}^{142}\text{Xe} + {}^{94}\text{Sr}$:

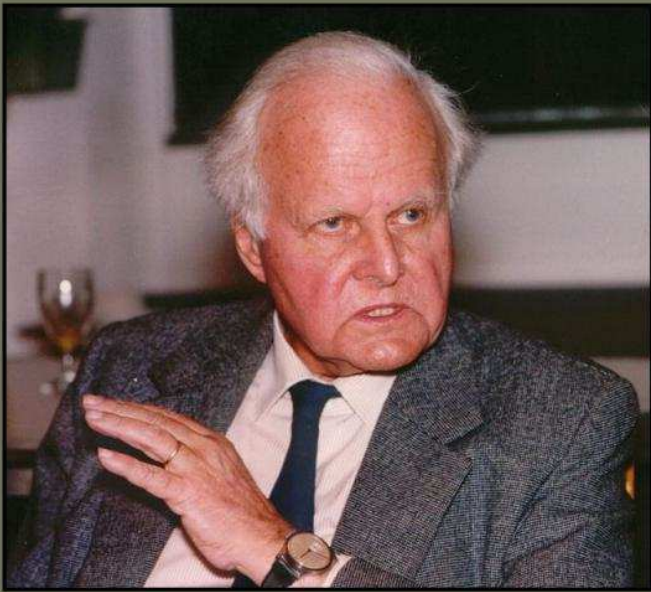
$$\delta E = BE(N, Z) - BE(N_1, Z_1) - BE(N - N_1, Z - Z_1), \quad (4)$$

$$186.8 = -1790.4 - (-1169.4) - (-807.8). \quad (5)$$

Тут величини енергії у МеВ.







Карл Фридрих фон Вейцеккер
(28 июня 1912 – 28 апреля 2007)

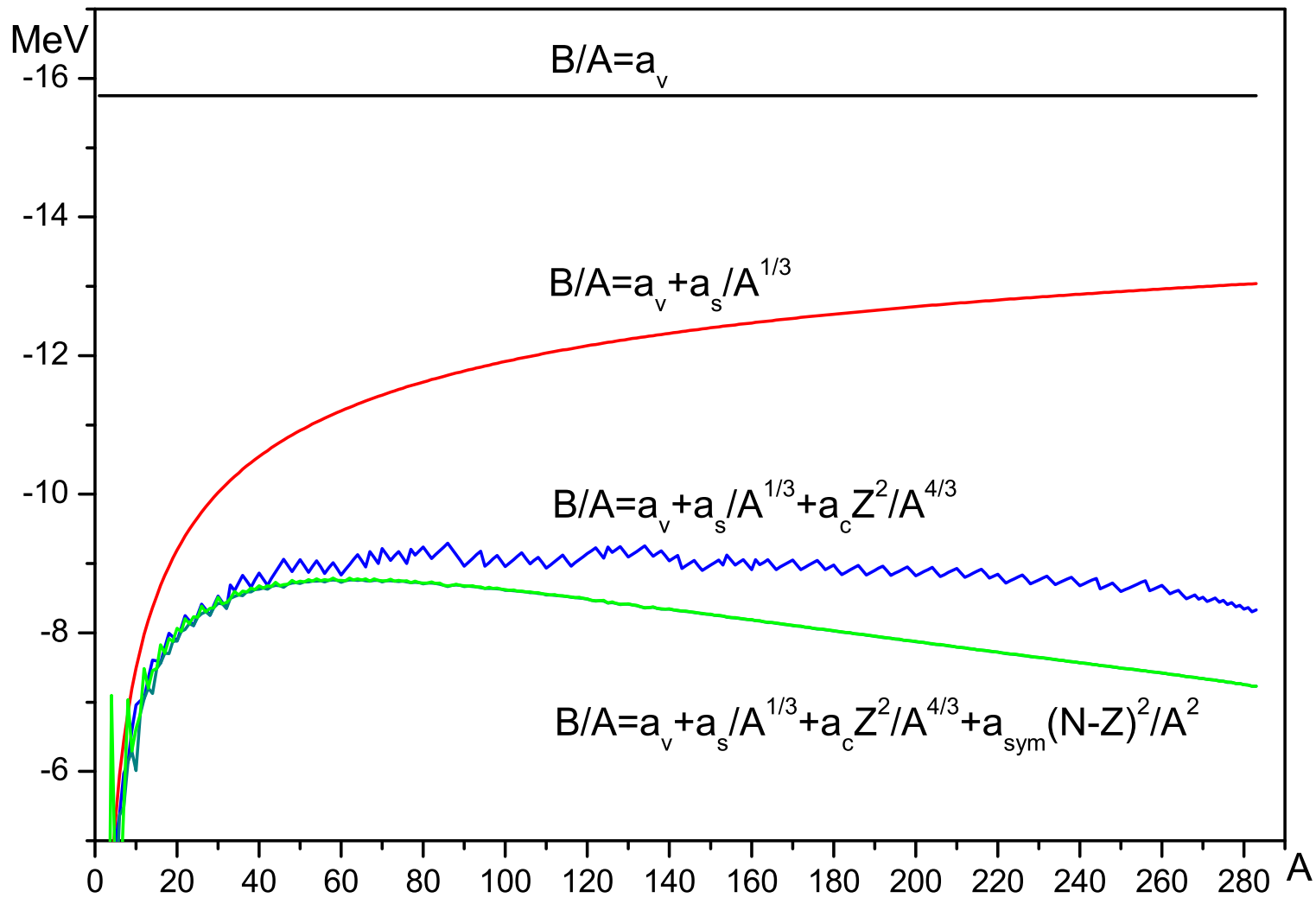
- * Формула Вейцеккера для энергии связи ядра
- * Метод эквивалентных фотонов в квантовой электродинамике (метод Вейцеккера - Вильямса)
- * Теория ядерных изомеров
- * Аккреционная теория формирования звезд
- * Углеродно-азотный цикл в звёздах (независимо от Х.Бете)
- * Гидродинамическая (вихревая) теория формирования Солнечной системы

etc.

Формула Вейцеккера для энергии зв'язку

$$B = a_v A + a_s A^{2/3} + a_c \frac{Z^2}{A^{1/3}} + a_{sym} \frac{(N - Z)^2}{A} - \begin{cases} 34A^{-3/4} & \text{for even - even} \\ 0 & \text{for odd} \\ -34A^{-3/4} & \text{for odd - odd} \end{cases} .$$

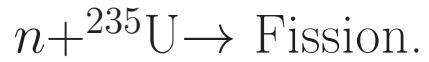
тут $a_v = -15.75$ MeV, $a_s = 17.8$ MeV, $a_c = 0.71$ MeV та $a_{sym} = 23.7$ MeV.



2. Вимушений поділ

снаряд + ядро \Rightarrow збуджене компаунд ядро \Rightarrow ділення на 2 уламка.

Ядро має суттєву енергію збудження, тому легко подолає бар'єр ділення.



3. Краплинна модель

$$R(\theta) = R_0 \lambda(\beta_2, \beta_4) [1 + \beta_2 Y_{20}(\theta) + \beta_4 Y_{40}(\theta)].$$

Об'єм та кількість частинок зберігається при деформації ядра, тому

$$\frac{4\pi R_0^3}{3} = \frac{2\pi}{3} \int_0^\pi \sin(\theta) d\theta [R(\theta)]^3 = \frac{4\pi R_0^3}{3} (\lambda(\beta_2, \beta_4))^3 \int_0^\pi \sin(\theta) d\theta [1 + \beta_2 Y_{20}(\theta) + \beta_4 Y_{40}(\theta)]^3.$$

тому $\lambda(\beta_2, \beta_4) \in$

$$\lambda(\beta_2, \beta_4) = \left\{ \int_0^\pi \sin(\theta) d\theta [1 + \beta_2 Y_{20}(\theta) + \beta_4 Y_{40}(\theta)]^3 \right\}^{-1/3}.$$

Якщо ми враховуємо члени з β_2^2 and β_2^3 тоді поверхнева і кулонівська енергії

$$\frac{E_{surf}}{b_s A^{1/3}} = 1 + \left(\frac{1}{2\pi} \right) \beta_2^2 + \left(\frac{1}{42} \frac{\sqrt{5}}{\pi^{3/2}} \right) \beta_2^3,$$

$$\frac{E_{coul}}{\frac{3e^2 Z^2}{5 R_0}} = 1 - \left(\frac{1}{4\pi} \right) \beta_2^2 - \left(\frac{1}{42} \frac{\sqrt{5}}{\pi^{3/2}} \right) \beta_2^3.$$

$$\begin{aligned}
E_{def} &= E_{surf} + E_{coul} = \\
&= b_s A^{1/3} \left[1 + \left(\frac{1}{2\pi} \right) \beta_2^2 + \left(\frac{1}{42} \frac{\sqrt{5}}{\pi^{3/2}} \right) \beta_2^3 \right] \\
&\quad + \frac{3e^2 Z^2}{5 R_0} \left[1 - \left(\frac{1}{4\pi} \right) \beta_2^2 - \left(\frac{1}{42} \frac{\sqrt{5}}{\pi^{3/2}} \right) \beta_2^3 \right]
\end{aligned}$$

Параметр подільності

$$x = \frac{E_{coul}}{2E_{surf}} = \frac{\frac{3e^2 Z^2}{5 R_0}}{2b_s A^{2/3}} = \frac{3e^2}{10b_s} \frac{Z^2}{R_0 A^{2/3}} = \frac{3e^2}{10r_0 b_s} \frac{Z^2}{A^1} \approx 0.02 \frac{Z^2}{A},$$

here $R_0 = r_0 A^{1/3} \approx 1.2 A^{1/3} \text{fm}$, $B_s \approx 17 - 19 \text{MeV}$.

$$\begin{aligned}
E_{def} &= b_s A^{1/3} \left\{ \left[1 + \left(\frac{1}{2\pi} \right) \beta_2^2 + \left(\frac{1}{42} \frac{\sqrt{5}}{\pi^{3/2}} \right) \beta_2^3 \right] + 2x \left[1 - \left(\frac{1}{4\pi} \right) \beta_2^2 - \left(\frac{1}{42} \frac{\sqrt{5}}{\pi^{3/2}} \right) \beta_2^3 \right] \right\} \\
&= b_s A^{1/3} \left\{ (1 + 2x) + \left(\frac{1}{2\pi} \right) \beta_2^2 (1 - x) + \left(\frac{1}{42} \frac{\sqrt{5}}{\pi^{3/2}} \right) \beta_2^3 (1 - 2x) \right\}
\end{aligned}$$

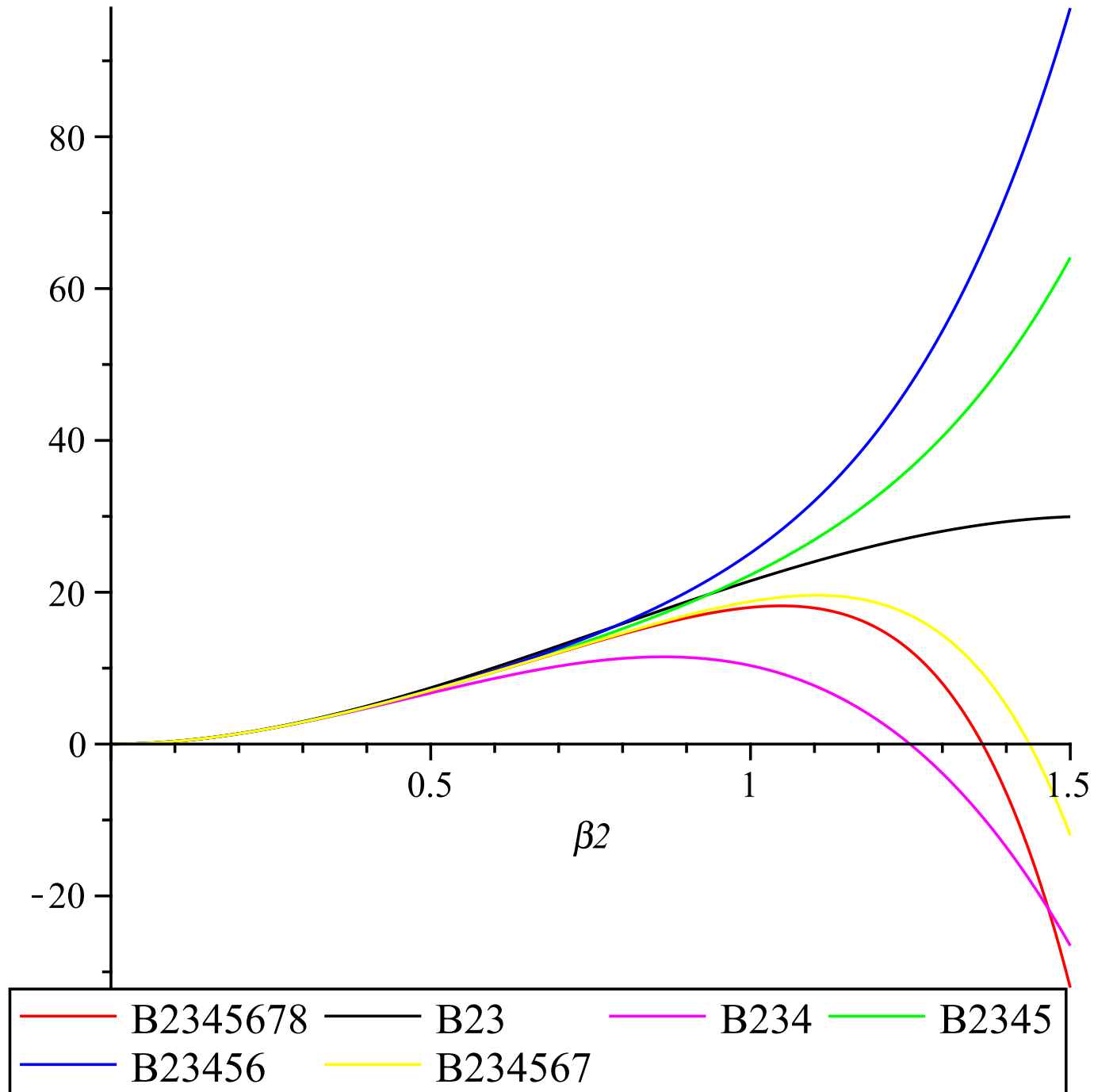
Поверхнева енергія:

$$\begin{aligned}
\frac{E_{surf}}{b_s A^{1/3}} = & 1 + \frac{10539}{616} \frac{\beta_2^2 \beta_3^2 \beta_4}{\pi^{5/2}} - \frac{1350}{1001} \frac{\sqrt{5} \beta_2 \beta_4^3}{\pi^2} - \frac{1805}{56056} \frac{\sqrt{5} \beta_2^5 \beta_4}{\pi^3} \\
& - \frac{5}{77} \frac{\sqrt{5} \beta_2 \beta_4^2}{\pi^{3/2}} - \frac{45}{308} \frac{\sqrt{5} \beta_2^3 \beta_4}{\pi^2} + \frac{1011}{572} \frac{\sqrt{5} \beta_2^3 \beta_4^2}{\pi^{5/2}} - \frac{1}{15} \frac{\sqrt{5} \beta_2 \beta_3^2}{\pi^{3/2}} \\
& + \frac{6637}{4620} \frac{\sqrt{5} \beta_2^3 \beta_3^2}{\pi^{5/2}} - \frac{54}{13} \frac{\sqrt{5} \beta_2 \beta_3^2 \beta_4}{\pi^2} - \frac{3}{14} \frac{\beta_2^2 \beta_4}{\pi^{3/2}} - \frac{3}{22} \frac{\beta_3^2 \beta_4}{\pi^{3/2}} + \frac{9911975}{879648} \frac{\beta_2^4 \beta_4^2}{\pi^3} \\
& + \frac{2593337}{288288} \frac{\beta_2^4 \beta_3^2}{\pi^3} - \frac{27955}{4004} \frac{\beta_4^2 \beta_2^2}{\pi^2} - \frac{18059}{1144} \frac{\beta_3^2 \beta_4^2}{\pi^2} + \frac{1313019}{136136} \frac{\beta_2^2 \beta_4^3}{\pi^{5/2}} \\
& - \frac{242835}{68068} \frac{\beta_2^6 \beta_4}{\pi^{7/2}} + \frac{23763}{16016} \frac{\beta_2^4 \beta_4}{\pi^{5/2}} + \frac{73}{924} \frac{\sqrt{5} \beta_2^5}{\pi^{5/2}} - \frac{1}{42} \frac{\sqrt{5} \beta_2^3}{\pi^{3/2}} - \frac{1635}{10192} \frac{\sqrt{5} \beta_2^7}{\pi^{7/2}} \\
& - \frac{195}{44} \frac{\beta_2^2 \beta_3^2}{\pi^2} - \frac{157122775}{274450176} \frac{\beta_2^8}{\pi^4} - \frac{33}{56} \frac{\beta_2^4}{\pi^2} + \frac{9}{4} \frac{\beta_4^2}{\pi} + \frac{5}{4} \frac{\beta_3^2}{\pi} \\
& + \frac{1218115}{2018016} \frac{\beta_2^6}{\pi^3} - \frac{81}{2002} \frac{\beta_4^3}{\pi^{3/2}} + 1/2 \frac{\beta_2^2}{\pi} - \frac{27099}{11440} \frac{\beta_3^4}{\pi^2} - \frac{161299}{24752} \frac{\beta_4^4}{\pi^2}.
\end{aligned}$$

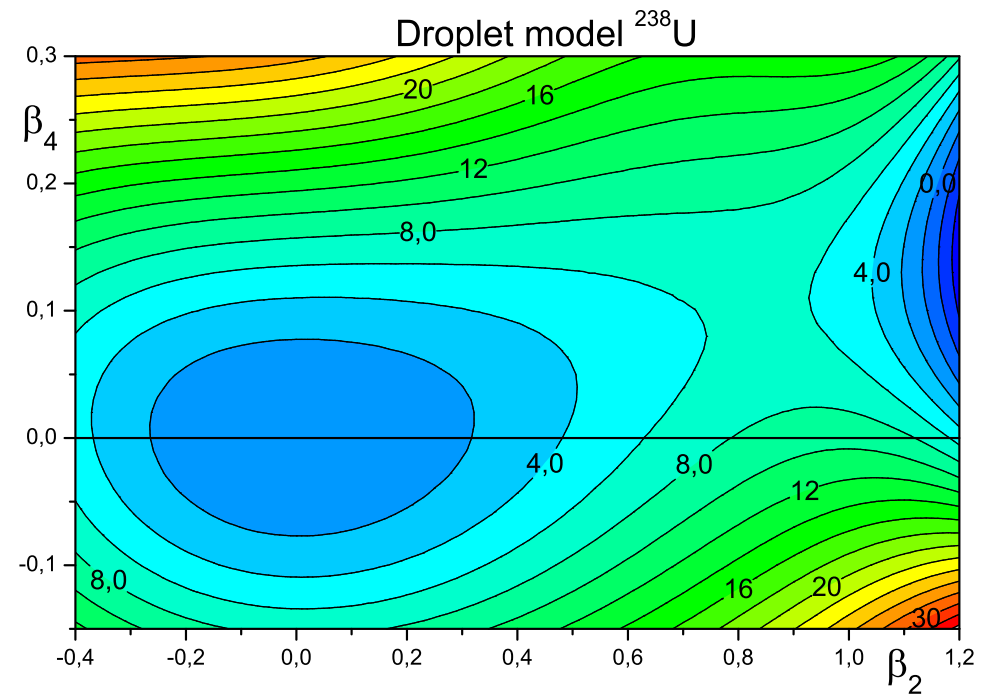
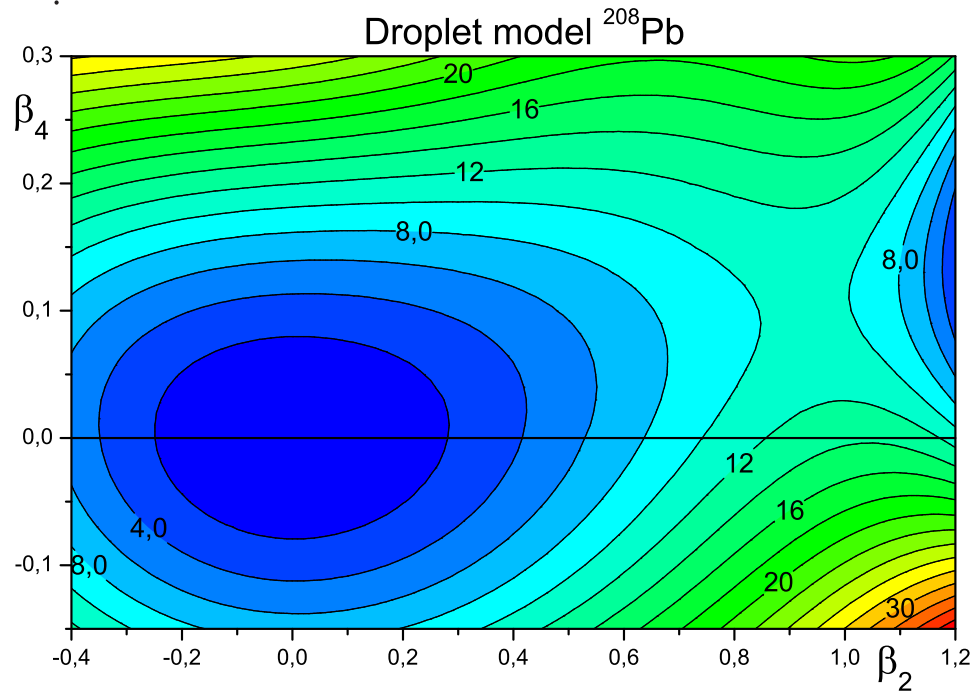
Кулонівська енергія

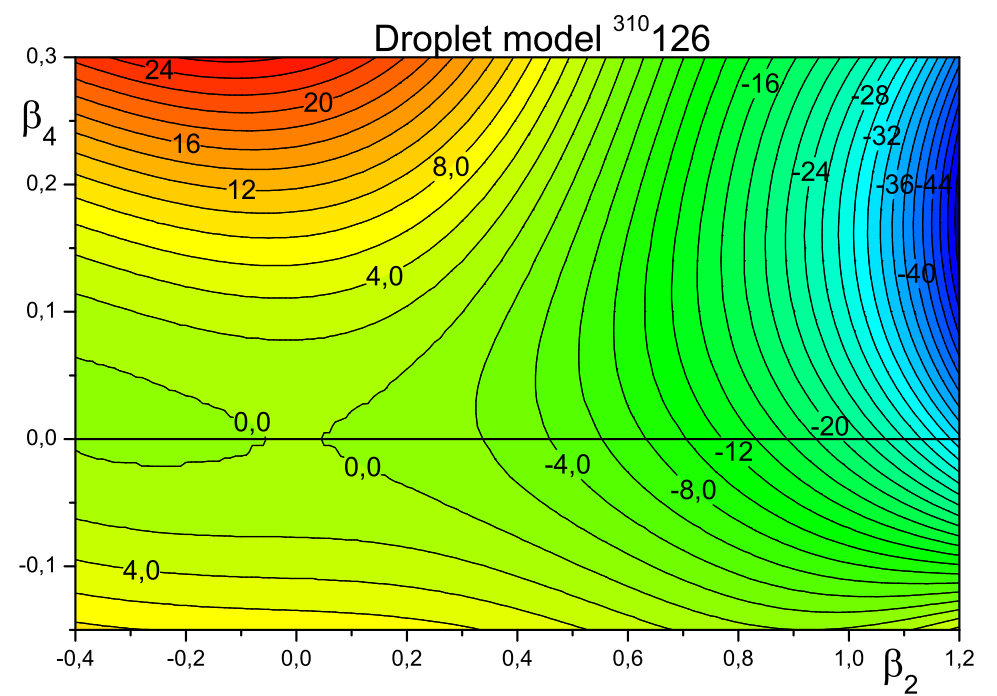
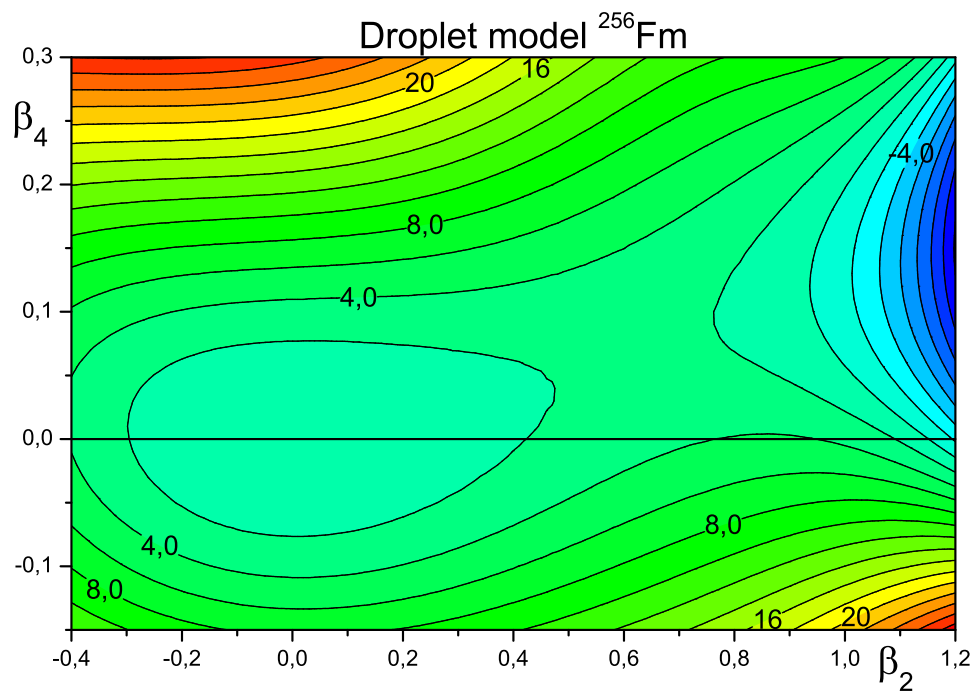
$$\begin{aligned}
 \frac{E_{coul}}{\frac{3e^2Z^2}{5R_0}} = & 1 + \frac{3644661}{2004002} \frac{\beta_3^2 \beta_2^2 \beta_4}{\pi^{5/2}} + \frac{125595}{2004002} \frac{\sqrt{5} \beta_2 \beta_4^3}{\pi^2} - \frac{1051935}{16032016} \frac{\sqrt{5} \beta_2^5 \beta_4}{\pi^3} \\
 & - \frac{10}{77} \frac{\sqrt{5} \beta_2 \beta_4^2}{\pi^{3/2}} + \frac{3}{98} \frac{\sqrt{5} \beta_2^3 \beta_4}{\pi^2} + \frac{20807009}{72144072} \frac{\sqrt{5} \beta_2^3 \beta_4^2}{\pi^{5/2}} - \frac{23}{210} \frac{\sqrt{5} \beta_2 \beta_3^2}{\pi^{3/2}} \\
 & + \frac{14271245}{48096048} \frac{\sqrt{5} \beta_2^3 \beta_3^2}{\pi^{5/2}} + \frac{41772}{102245} \frac{\sqrt{5} \beta_2 \beta_3^2 \beta_4}{\pi^2} - \frac{9}{28} \frac{\beta_2^2 \beta_4}{\pi^{3/2}} \\
 & - \frac{45}{154} \frac{\beta_4 \beta_3^2}{\pi^{3/2}} - \frac{102217343645}{55599031488} \frac{\beta_2^4 \beta_4^2}{\pi^3} - \frac{81589675}{36072036} \frac{\beta_2^4 \beta_3^2}{\pi^3} \\
 & + \frac{25948337}{24048024} \frac{\beta_4^2 \beta_2^2}{\pi^2} + \frac{708970}{429429} \frac{\beta_4^2 \beta_3^2}{\pi^2} + \frac{1080854539}{1158313156} \frac{\beta_2^2 \beta_4^3}{\pi^{5/2}} - \frac{721342715}{1425616192} \frac{\beta_2^6 \beta_4}{\pi^{7/2}} \\
 & + \frac{3915435}{8016008} \frac{\beta_2^4 \beta_4}{\pi^{5/2}} + \frac{235}{6468} \frac{\sqrt{5} \beta_2^5}{\pi^{5/2}} - \frac{1}{42} \frac{\sqrt{5} \beta_2^3}{\pi^{3/2}} - \frac{9059825}{224448224} \frac{\sqrt{5} \beta_2^7}{\pi^{7/2}} + \frac{23761}{20328} \frac{\beta_3^2 \beta_2^2}{\pi^2} \\
 & + \frac{73738687655}{212287211136} \frac{\beta_2^8}{\pi^4} + \frac{255}{784} \frac{\beta_2^4}{\pi^2} - \frac{5}{12} \frac{\beta_4^2}{\pi} - \frac{5}{14} \frac{\beta_3^2}{\pi} - \frac{206021315}{577152576} \frac{\beta_2^6}{\pi^3} \\
 & - \frac{405}{4004} \frac{\beta_4^3}{\pi^{3/2}} - \frac{1}{4} \frac{\beta_2^2}{\pi} + \frac{17550521}{34354320} \frac{\beta_3^4}{\pi^2} + \frac{9065087725}{13899757872} \frac{\beta_4^4}{\pi^2}.
 \end{aligned}$$

^{238}U : Залежність від ступеню n , β_2^n кулонівської та поверхневої енергії.



Залежність кулонівської та поверхневої енергій від параметра деформації.



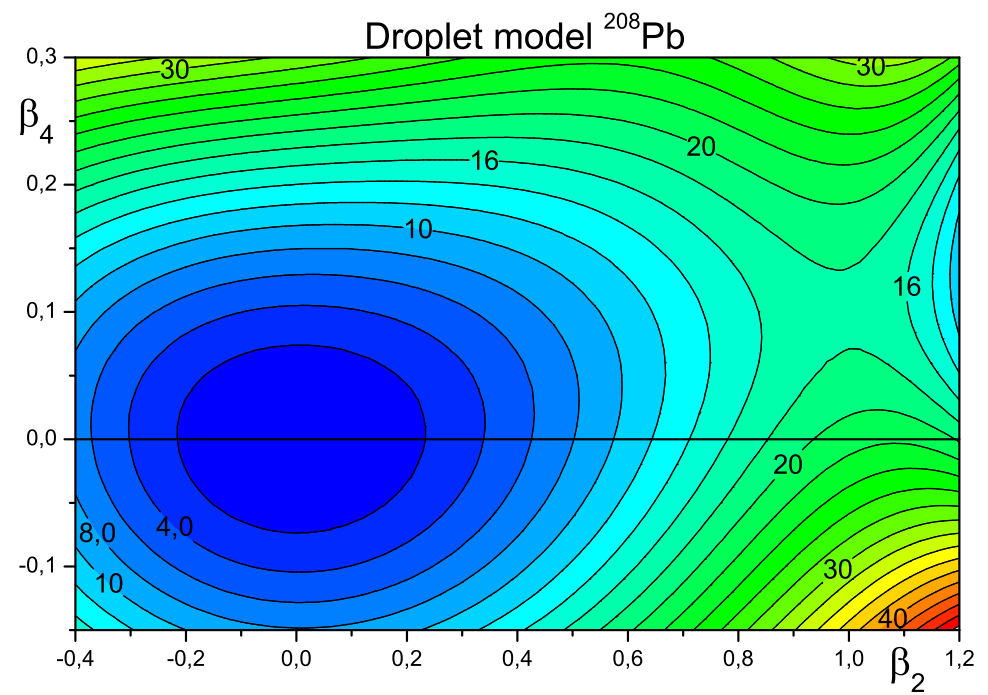
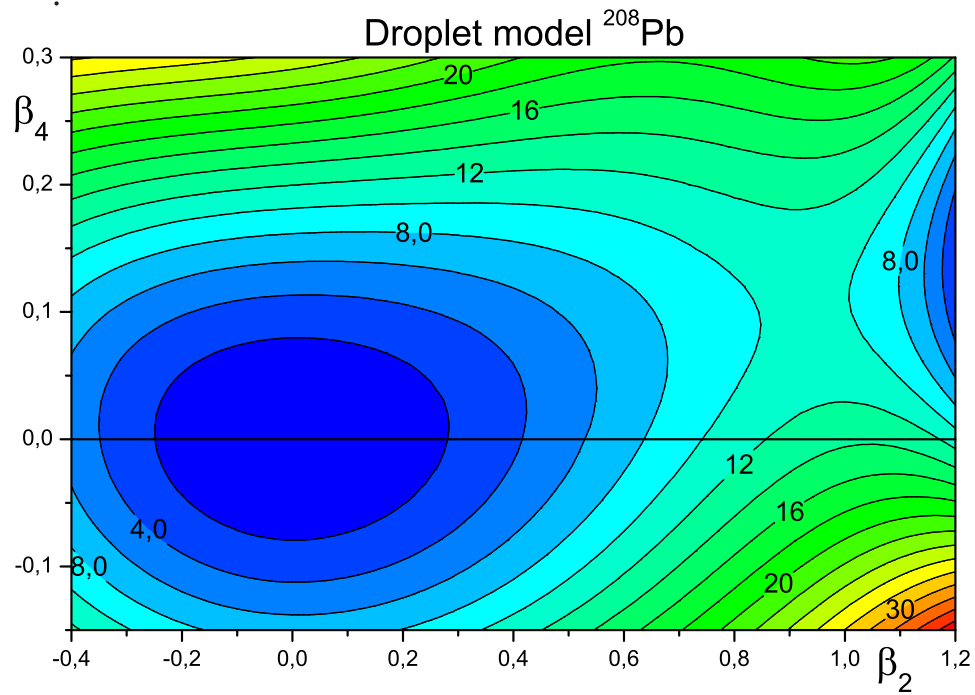


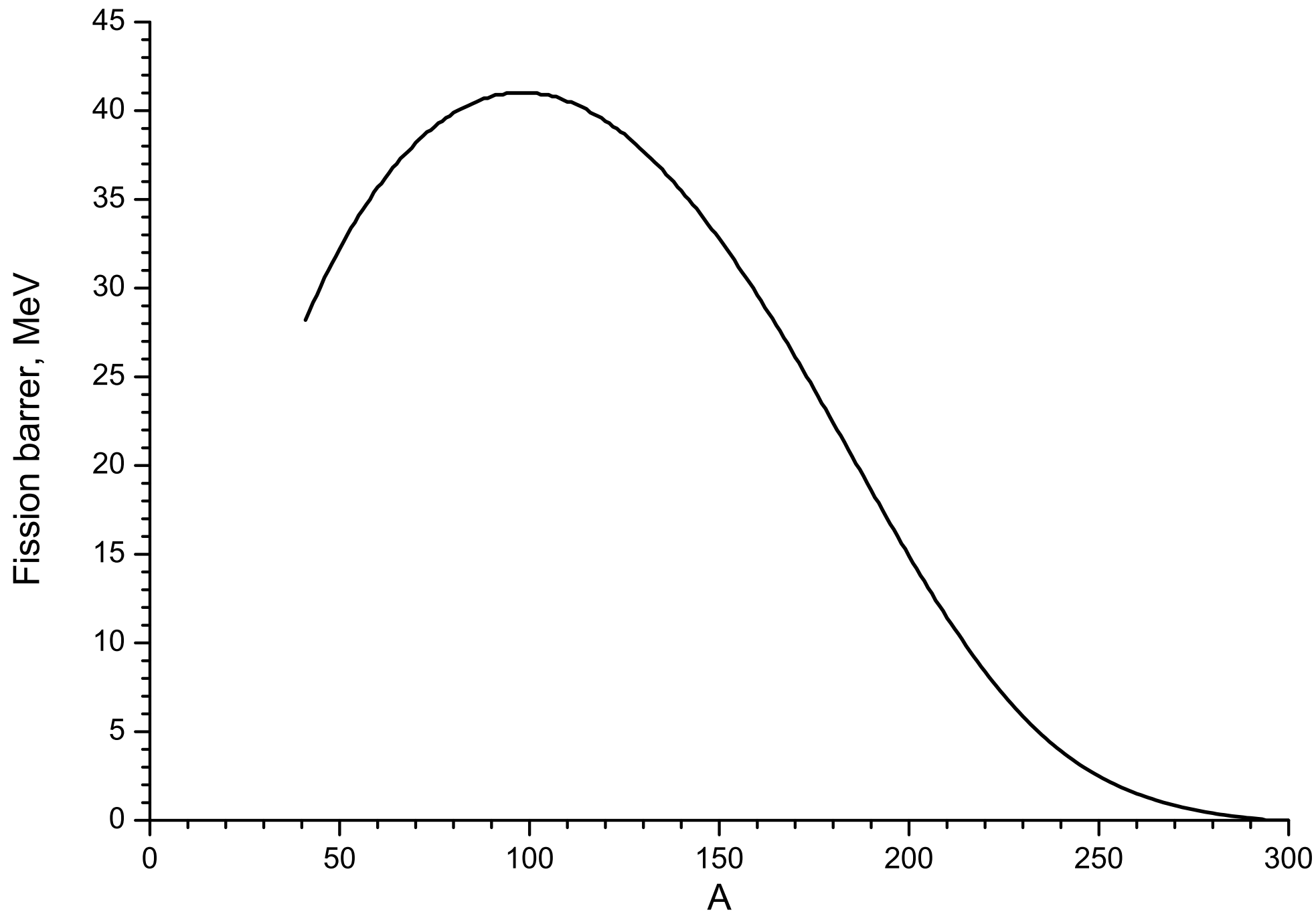
Залежність кулонівської + поверхневої енергій від параметра деформації

Залежність кулонівської + поверхневої енергій від параметра поверхневого натягу

$$Bs = 4\pi r_0^2 \sigma = 17 \text{ MeV}$$

$$Bs = 4\pi r_0^2 \sigma = 19 \text{ MeV}$$





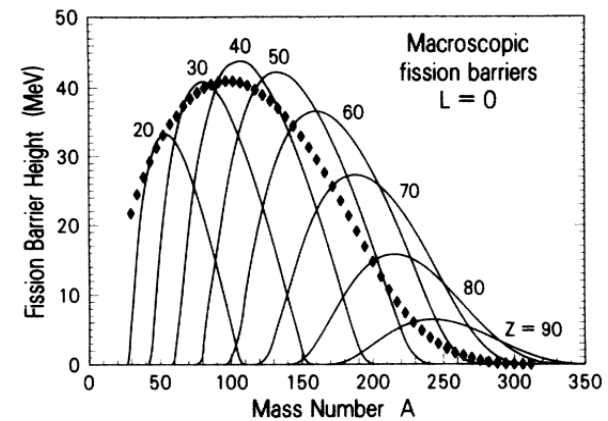
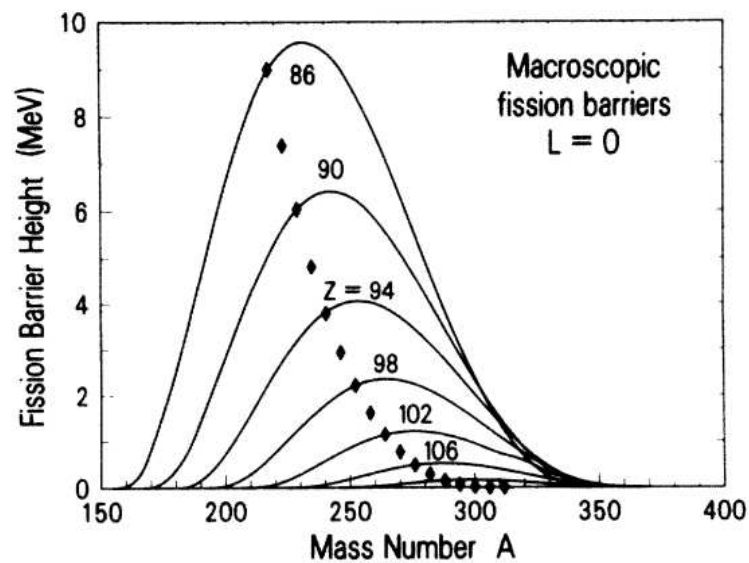
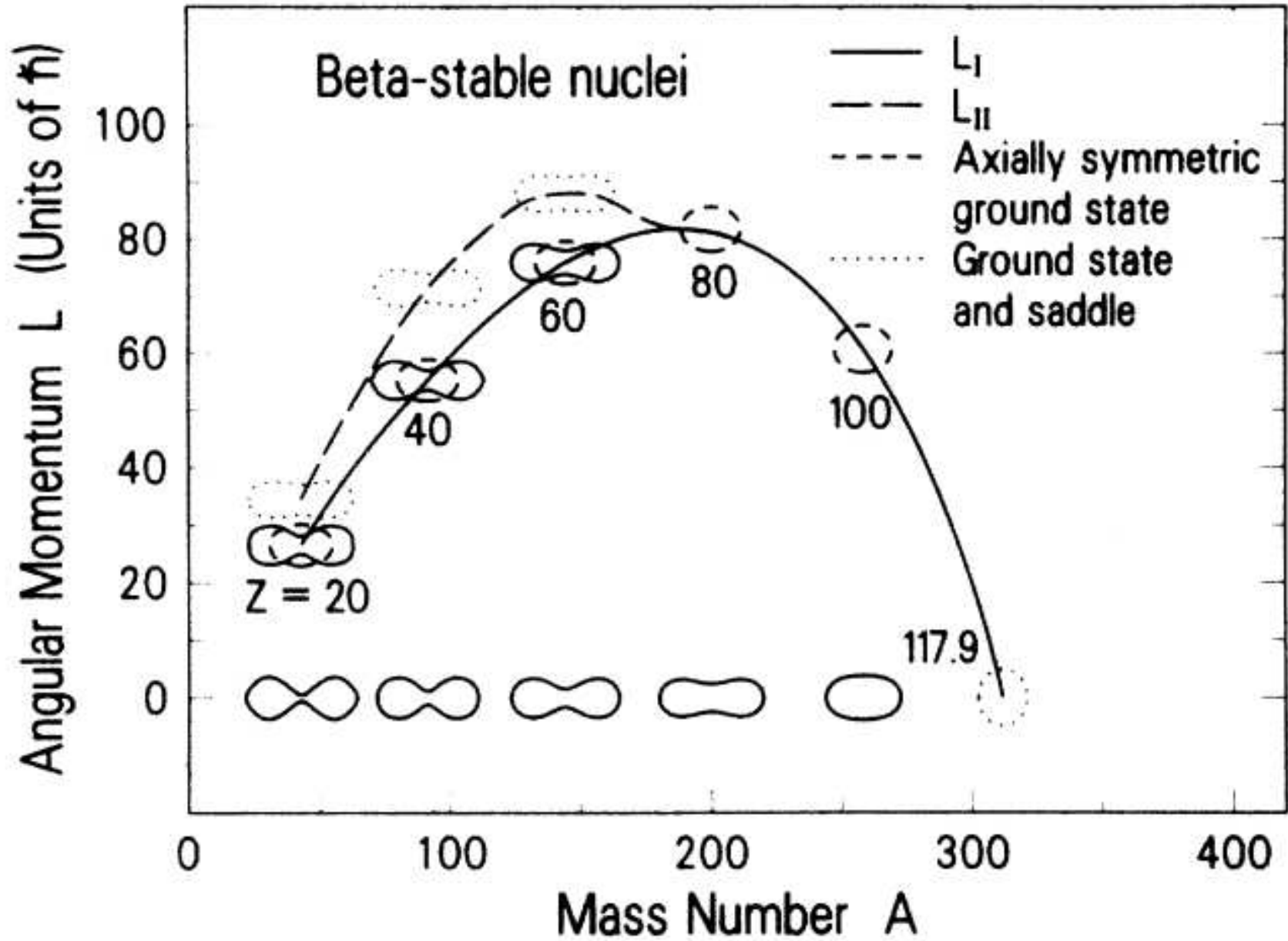


FIG. 3. Calculated fission-barrier heights as a function of mass number for atomic numbers $Z = 20$ to 90 . The points are barriers for beta-stable nuclei from $Z = 14$ to $Z = 117.9$ in steps of 2 (except for the last step). The points are the same as the solid curve in Fig. 2.

Форми ядра в основному стані і в седловій точці



3. Спонтанний поділ

$^{238}\text{U} \Rightarrow \text{Fission.}$

4. Основні особливості поділу

Ядро деліться на два фрагменти.

Фрагменти мають високу кінетичну енергію.

Фрагменти добре деформуються в точці розриву.

Фрагменти мають високу енергію збудження.

Емісія γ та n .

Емісія нейтрино.

Розподіл енергії поділу MeV:

Nucleus	²³³ U	²³⁵ U	²³⁹ Pu
Кінетична енергія фрагментів	160,5	166,0	171,5
Швидке енергетичне гамма-випромінювання	7,0	7,2	7,0
Енергія відкладених гамма-променів	7,0	7,2	7,0
Енергія нейтронів	5,0	4,9	5,8
Енергія бета-частинок	9,0	9,0	9,0
Енергія антинейтрино	10	10	10
Загальна енергія	198,5	204,1	210,3

5. Висновки

Важливі питання:

1. Виявлення індукованого поділу
2. Виявлення спонтанного поділу
3. Краплинна модель
4. Енергія зв'язування ядер
5. Існує бар'єр поділу
- 6 Залежність від параметрів та деформаційного простору моделі.

Дякую за увагу!