

# БУДОВА АТОМНОГО ЯДРА

# Характеристики ядра

- **Склад (Z,N)**
- **Маса**
- **Спін**
- **Магнітний момент**
- **Квадрупольний момент**
- **Енергія збуджених станів (можливість існування ядерних ізомерів)**
- **Енергія зв'язку нуклонів у ядрі**
- **Стабільність (для нестабільних – тип розпаду та час напіврозпаду)**

# Моделі будови атомного ядра

<b>Модель</b>	<b>Період створення</b>	<b>Автори</b>
<b>Нуклонна</b>	1932	Д.І.Іваненко, В. Гейзенберг
<b>Краплинна</b>	1930-1936	Гамов, Н.Бор
<b>Мезонна</b>	1935	Юкава
<b>Оболонкова (фермі-газу – основа)</b>	1949	М.Гепперт-Майєр, Й.Х.Д. Йєнсен
<b>Суперструн (розвиток – мембранна)</b>	1974	Шек , Шверц

# **НУКЛОННА МОДЕЛЬ БУДОВИ АТОМНОГО ЯДРА**

## Основні положення:

1. Ядра атомів усіх елементів складаються з нуклонів - протонів та нейтронів (виключення **H-1**). Число протонів у ядрі визначає заряд атомного ядра. Масове число дорівнює загальній кількості нуклонів у ядрі.
2. Ізотопи – різновиди одного й того ж хімічного елементу, що мають однаковий заряд ядра, але відрізняються значеннями атомної маси (містять різну кількість нейтронів у ядрі). Електронні оболонки ізотопів практично ідентичні.

**3. Ізольований нейтрон є нестабільним**



**4. Розпад протона відбувається з поглинанням енергії**



**5. Енергію зв'язку нуклонів у ядрі можна розрахувати**

$$E_{зв} = \Delta m c^2$$

$\Delta m$  – дефект маси (різниця між сумою мас спокою всіх нуклонів і реальною масою ядра),  $c$  – швидкість світла.

# Характеристики нуклонів

	маса спокою (а.о.м)	енергія спокою (Мев)	Заряд (Кл)	Спін	Магн. момент, $\mu_{\text{яд}}$	Час життя
<b>p</b>	<b>1,00727</b>	<b>938,25</b>	<b><math>+1,6 \cdot 10^{-19}</math></b>	<b>1/2</b>	<b>+ 2,7928</b>	<b><math>10^{30}</math> років</b>
<b>n</b>	<b>1,00866</b>	<b>939,56</b>	<b>0</b>	<b>1/2</b>	<b>- 1,9130</b>	<b>15,3 хв</b>

# Енергія зв'язку нуклонів у ядрі

$$E_{\text{зв}} = \Delta m c^2$$

$$E_{\text{зв}} = \{ [Z \cdot m_p + (A-Z) \cdot m_n] - m_{\text{ядра}} \} c^2$$

$Z \cdot m_p$  – сумарна маса протонів у ядрі,

$(A-Z) \cdot m_n$  – сумарна маса нейтронів у ядрі,

$m_{\text{ядра}}$  – експериментально виміряна маса ядра

$$E_{\text{зв}} = \{ [Z \cdot m_H + (A-Z) m_n] - m_{\text{атома}} \} c^2$$

$m_{\text{атома}}$  – експериментально виміряна маса атома

$Z \cdot m_H$  – сумарна маса протонів у ядрі та електронів атома

Якщо маси протона, нейтрона та атома – в а.о.м.:

$$E_{\text{зв}} \text{ (MeV)} = 931(Z \cdot m_H + (A-Z) m_n) - m_{\text{атома}}$$



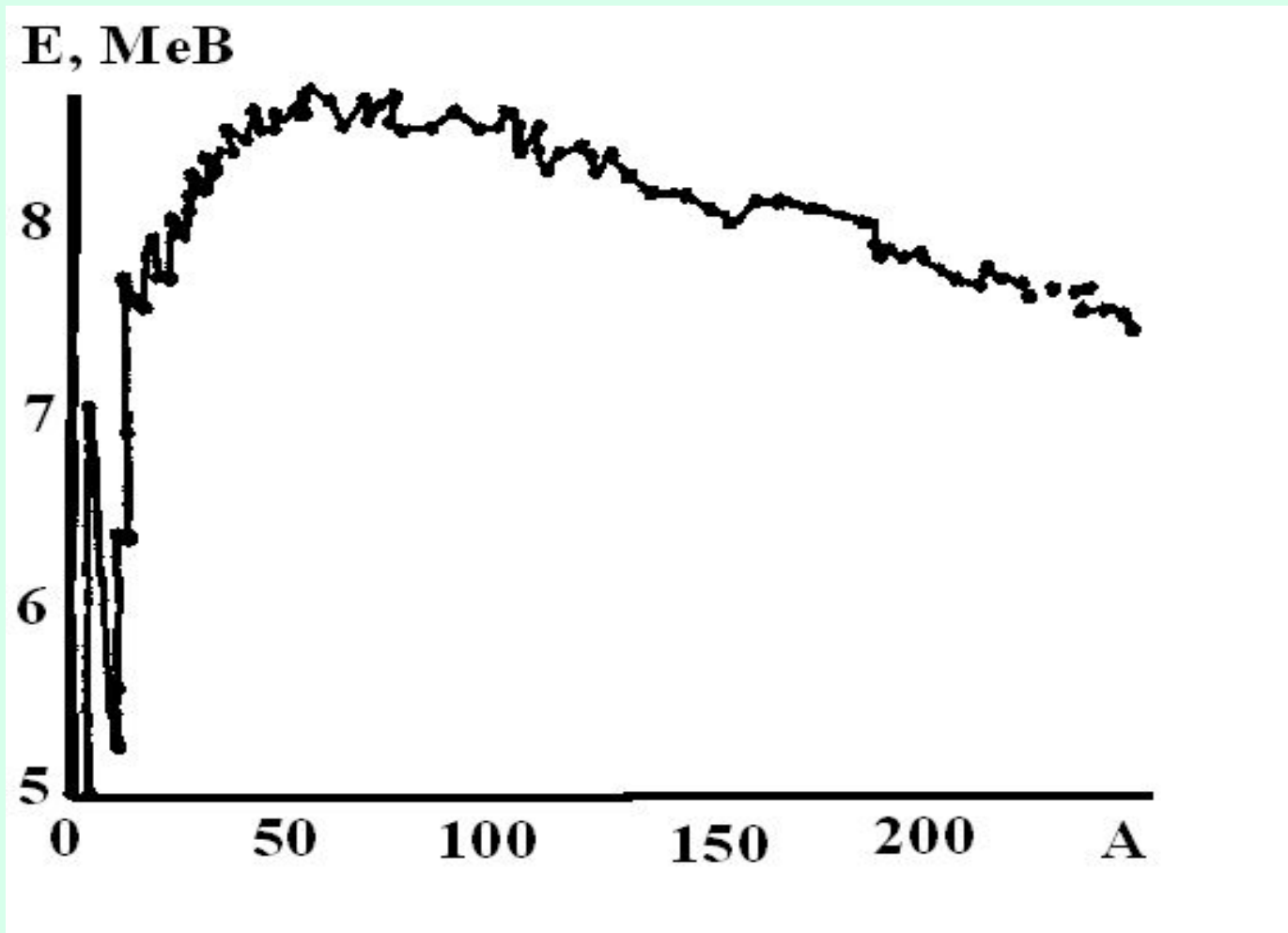
**Питома енергія зв'язку нуклонів у ядрі ( $E_d$ ) - частка енергії зв'язку, що припадає на один нуклон**

$$E_d = E_{зв} / A$$

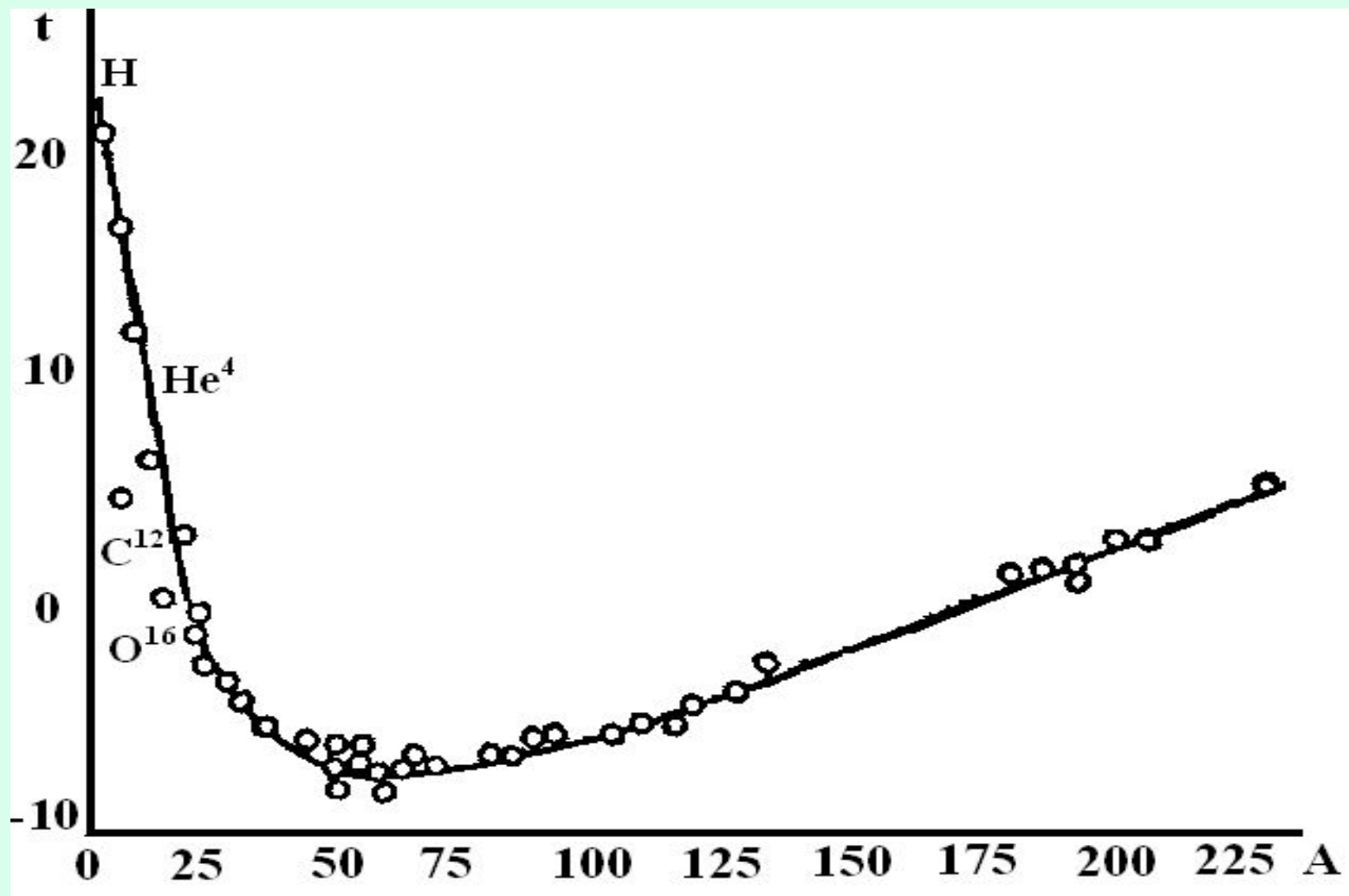
**Коефіцієнт упаковки ( $f$ ), введений у 1927 Астоном, як частка дефекту маси, що припадає на один нуклон:**

$$f = ((m_{\text{атома}} - A) / A) \times 10^4$$

# Залежність питомої енергії зв'язку нуклонів у атомному ядрі від масового числа



# Залежність коефіцієнта упаковки від масового числа



# Нуклонна модель будови атомного ядра

## Переваги:

- Експериментально підтверджена, є базою для більш складних моделей.
- Дає можливість записати рівняння ядерних реакцій та радіоактивного розпаду.
- Дозволяє розрахувати:
  - питому енергію зв'язку нуклонів у ядрі для будь-якого ізотопу (з дефекту мас);
  - Енергію, що виділяється чи поглинається в ядерній реакції (теж з дефекту мас).
- Дозволяє встановити закономірності зміни питомої енергії зв'язку від  $A$ ,  $Z$ ,  $N$ .

# Нуклонна модель будови атомного ядра

## Недоліки:

### Не пояснює:

- природу ядерних сил
- внутрішню будову ядра
- властивості ядер (спін, магнітний момент, квадрупольний момент)
- стабільність ядер (лише встановлює кореляції між складом ядра та його стабільністю)

# **КРАПЛИННА МОДЕЛЬ БУДОВИ АТОМНОГО ЯДРА**

## Основні положення:

- Атомне ядро - сферична крапля зарядженої ядерної рідини, яка не стискається.
- Радіус ядра  $R = r_0 A^{1/3}$   
 $r_0$  - середній радіус нуклона  $1,35 \cdot 10^{-13}$  см  
( $r_p = 1,2 \cdot 10^{-13}$ ,  $r_n = 1,5 \cdot 10^{-13}$ ),  
 $A$  – масове число
- Нуклони в ядрі рівноцінні, індивідуальні відмінності нуклонів не враховуються (колективна модель)

- Концентрація нуклонів у ядрі є практично сталою:

$$n = A / V = A / (4/3) \pi R^3 = A / (4/3) \pi r_0^3 A = 3 / 4 \pi r_0^3 \approx 10^{38} \text{ см}^{-3}$$

- Густина ядерної речовини є сталою:

$$\rho = m_N \cdot n = 1,66 \cdot 10^{-24} \cdot 10^{38} \approx 10^{14} \text{ г/см}^3$$

для макроскопічних твердих тіл

$$\rho \approx 2-20 \text{ г/см}^3$$

$$(r_{\text{атома}} / r_{\text{ядра}} \approx 10^5 - 10^6)$$



# Напівемпірична формула Вейцзеккера

Дозволяє розрахувати енергію зв'язку нуклонів у ядрі для заданих  $A$  і  $Z$ :

$$E_{\text{зв}} = a_1 A - a_2 A^{2/3} - a_3 Z^2 / A^{1/3} - a_4 (A/2 - Z)^2 / A + \gamma a_5 A^{-3/4},$$

коефіцієнти  $a_1 - a_5$  – сталі

$a_1 A$  - об'ємна енергія ядра,  
пропорційна  $A$  (лінійна залежність)

- –  $a_2 A^{2/3}$  - поверхнева енергія ядра, пропорційна площі поверхні сферичної ядерної краплі. Враховує нерівноцінність нуклонів у ядрі.
- –  $a_3 Z^2/A^{1/3}$  - взаємне кулонівське відштовхування протонів ( $Z^2/R$ ) при рівномірному розподілі електричного заряду всередині сферичного ядра з радіусом  $R = r_0 A^{1/3}$ . Кожен з  $Z$  протонів взаємодіє з іншими  $Z-1$  протонами,  $(Z-1) \cdot Z \approx Z^2$ .

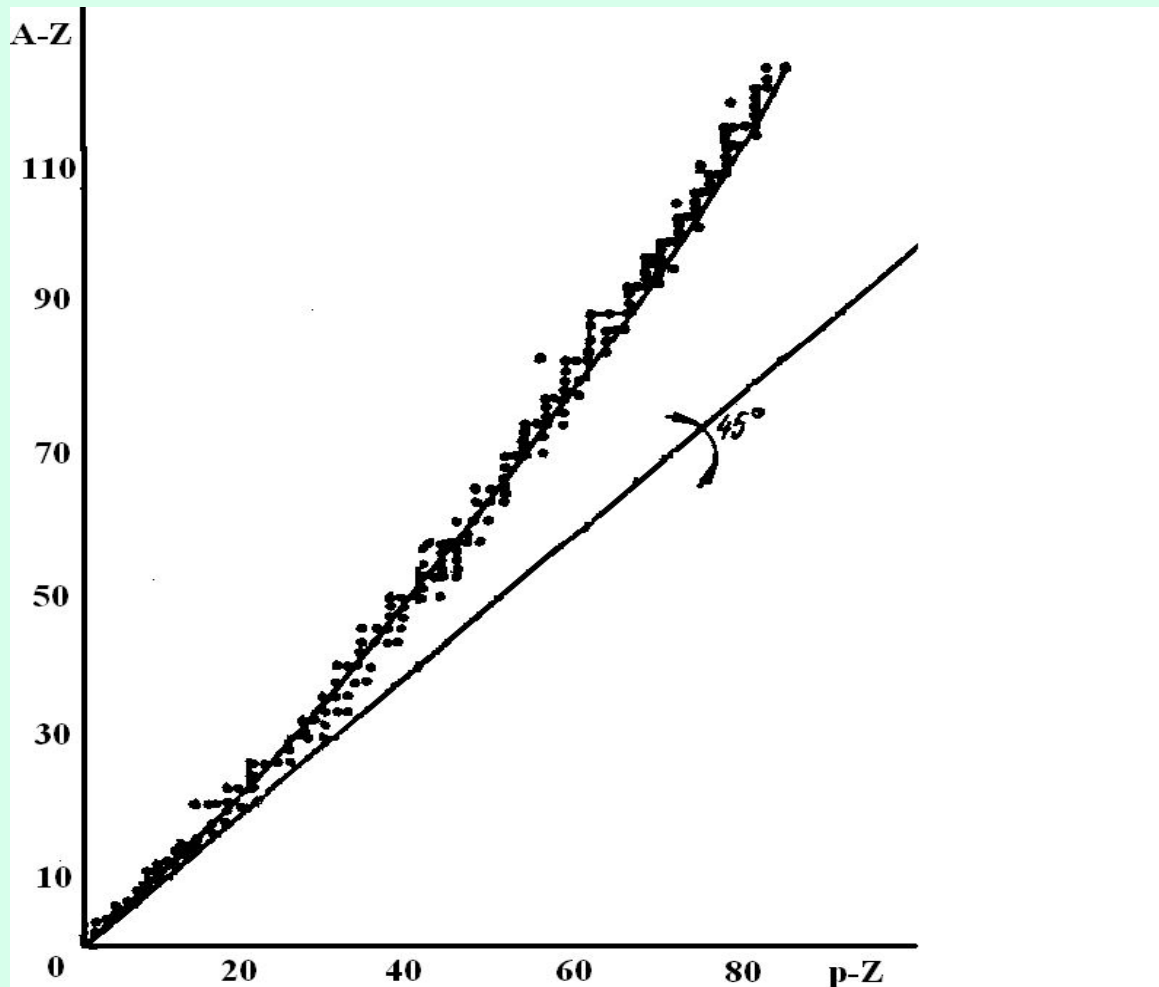
- –  $a_4(A/2-Z)^2/A$  - поправка на енергію симетрії ядра. Підвищена стабільність ядер з рівною кількістю протонів і нейтронів, обумовлену зарядовою незалежністю ядерних сил та принципом Паулі.
- $\gamma a_5 A^{-3/4}$  - ефект спарювання однакових нуклонів.  $\gamma$  приймає три значення:
  - $\gamma = 1$  для ядер з парною кількістю протонів і нейтронів
  - $\gamma = 0$  для ядер з непарною кількістю одного виду нуклонів
  - $\gamma = -1$  для ядер з непарною кількістю і протонів, і нейтронів

$$\begin{aligned} a_1 &= 15,75 \text{ MeB,} \\ a_2 &= 17,8 \text{ MeB,} \\ a_3 &= 0,71 \text{ MeB,} \\ a_4 &= 94,8 \text{ MeB,} \\ a_5 &= 34 \text{ MeB} \end{aligned}$$

# Приклади розрахунку питомої енергії зв'язку нуклонів у ядрі за формулою Вейцзеккера (MeV)

	$^{40}\text{Ca}$	$^{120}\text{Sn}$	$^{238}\text{U}$
Притягання	560	1680	3332
Поверхневий ефект	-153	-317	-501
Електростатичне відштовхування	-68.4	-292	-799
Асиметрія	0	-64.3	-236
Парність числа нуклонів	3.2	1.1	0.5
$\Sigma E_{3B}$	342	1004	1792
$E_{3B}/A$	8.52	8.37	7.54

# Залежність кількості нейтронів в ядрах стабільних нуклідів від кількості протонів



**Рівноважне число протонів у ядрі  
для ізобарів ( $A=\text{const}$ ) за  
формулою Вейцзеккера  
мінімум суми кулонівської енергії  
та енергії симетрії**

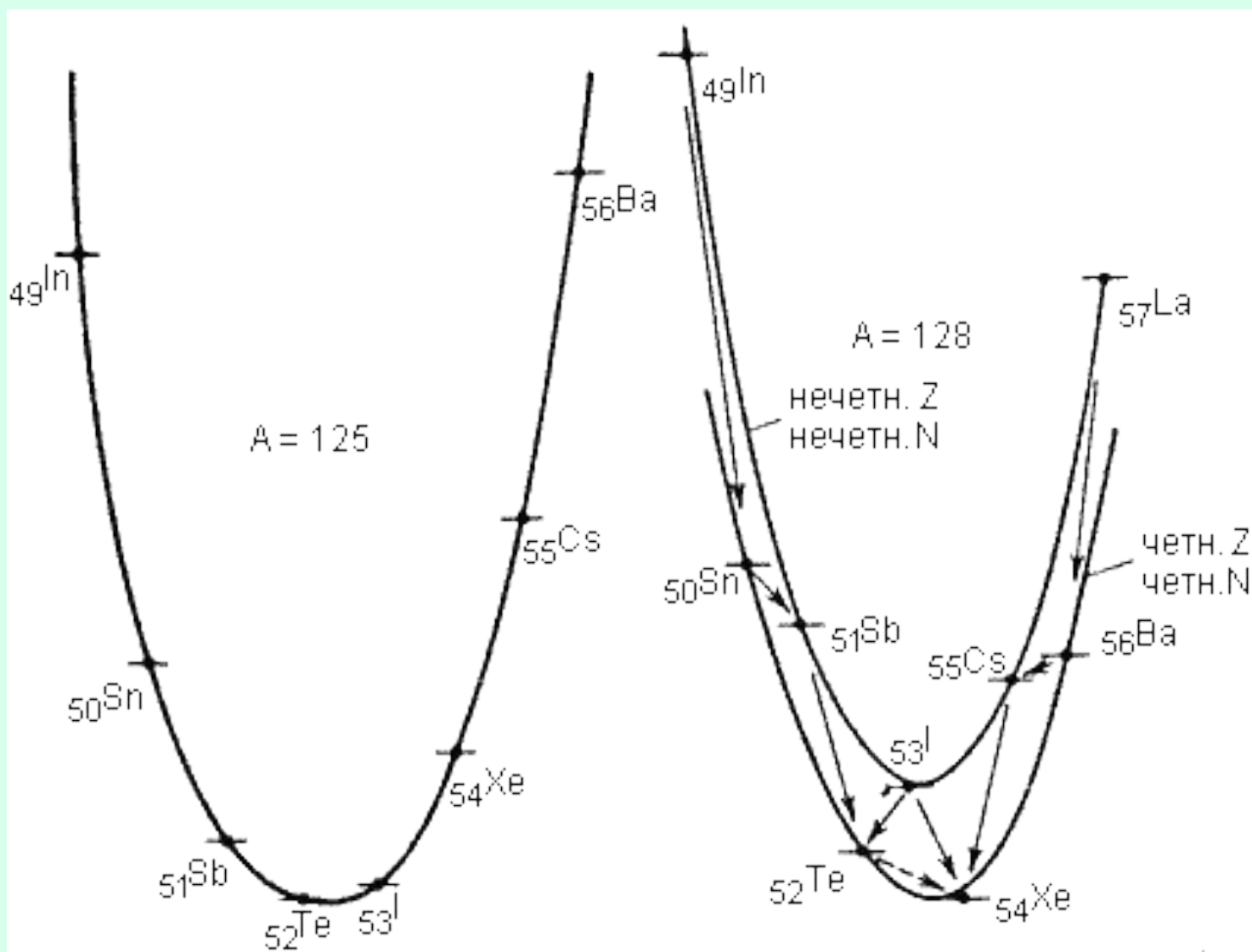
$$Z_{\text{рівн}} = \frac{2a_{\text{sym}}A}{a_c A^{2/3} + 4a_{\text{sym}}} \approx \frac{A}{0,015 \cdot A^{2/3} + 2}$$

**для будь-якої групи ізобар:**

**для легких ядер  $Z \approx 0,5 A$ ,**

**для важких ( $A \geq 238$ ) –  $Z \approx 0,39 A$**

# Енергія зв'язку для ізобарів

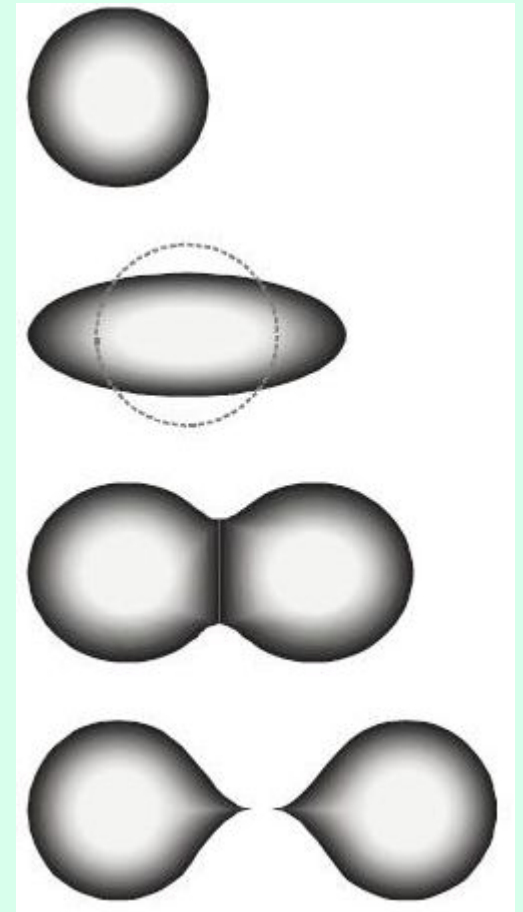


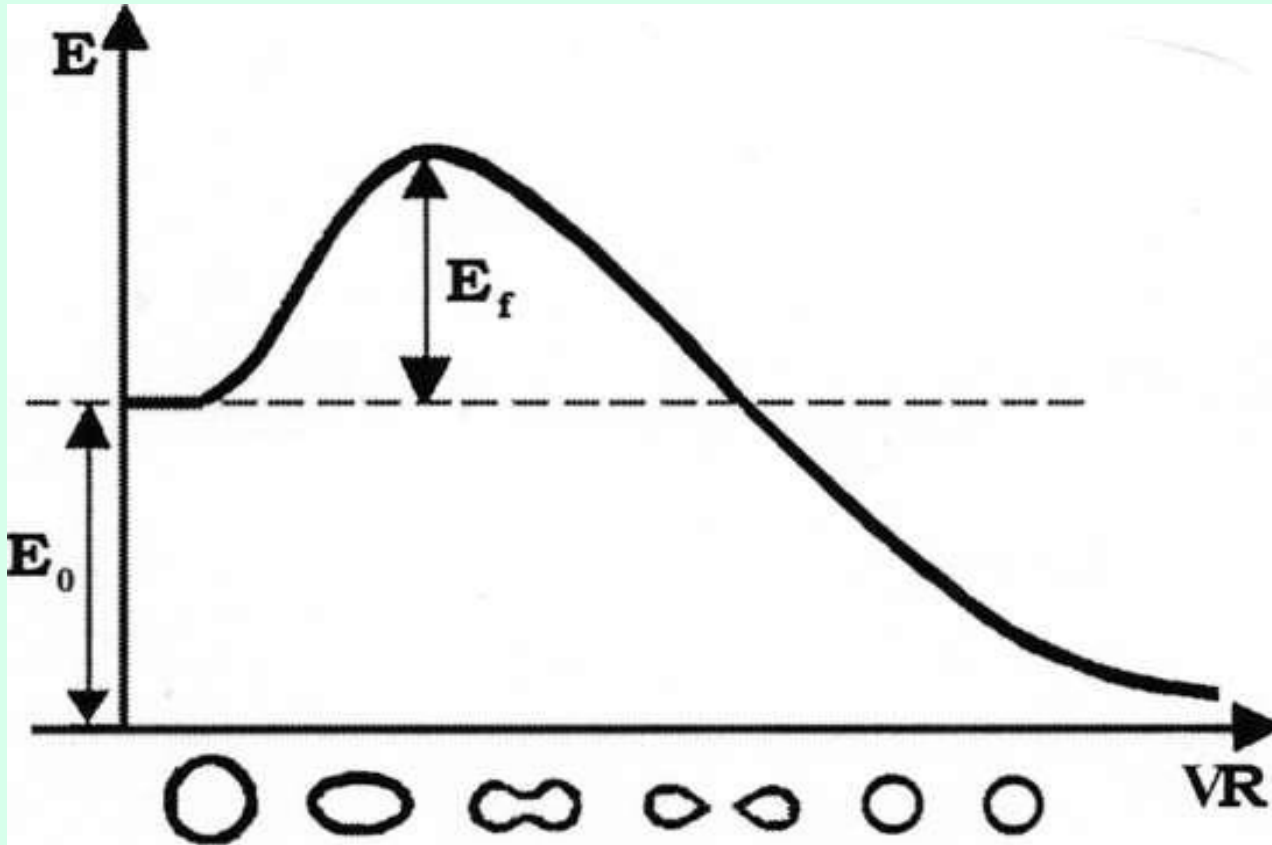


# Механізм та якісна модель симетричного ділення важких ядер (на основі краплинної моделі)

**Важкі ядра можуть розпадатися внаслідок зростання кулонівського відштовхування протонів.**

**Механізм ділення – деформація ядра внаслідок поверхневих коливань з високою амплітудою.**





**Потенційна енергія ядерної краплі під час поділу як функція відстані між центрами мас продуктів поділу**

# Краплинна модель будови атомного ядра - переваги

- Пояснює механізм симетричного ділення важких ядер
- Дозволяє розрахувати:
  1. питому енергію зв'язку нуклонів у ядрі;
  2. середню енергію зв'язку (відриву) протона, нейтрона чи будь-якої групи нуклонів (наприклад  $\alpha$ -частинки) від ядра;
  3. знайти  $Z$  нуклідів, стійких по відношенню до  $\beta$ -розпаду.
  4. масу ядра

# Краплинна модель будови атомного ядра - недоліки

- не враховує властивості окремих нуклонів
- не пояснює магнітні властивості та спін ядер
- не пояснює аномалії на залежності питомої енергії зв'язку від  $A$
- не пояснює наявності магічних чисел.
- не дає правильного опису збуджених станів легких та середніх ядер;
- не пояснює асиметричне ділення ядер.

# **МЕЗОННА ТЕОРІЯ БУДОВИ АТОМНОГО ЯДРА**

# Основні положення

- Нуклони в ядрі огорнуті мезонним полем (хмарою віртуальних  $\pi$ - мезонів)
- Нуклони в ядрі постійно обмінюються між собою енергією шляхом передачі  $\pi$ - мезонів
- Можливе перетворення  $n$  в  $p$  та  $p$  в  $n$  внаслідок передачі  $\pi^-$  чи  $\pi^+$  мезонів, при передачі  $\pi^0$  мезонів тип нуклону не змінюється

# Взаємоперетворення нуклонів

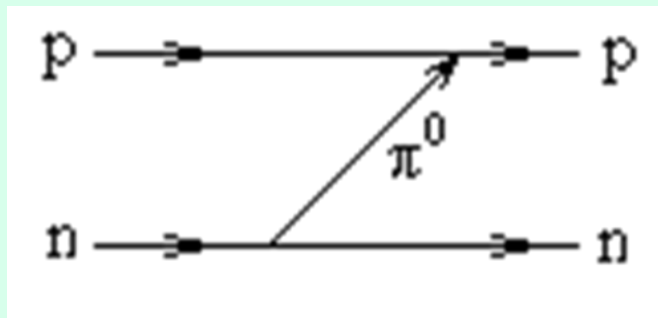
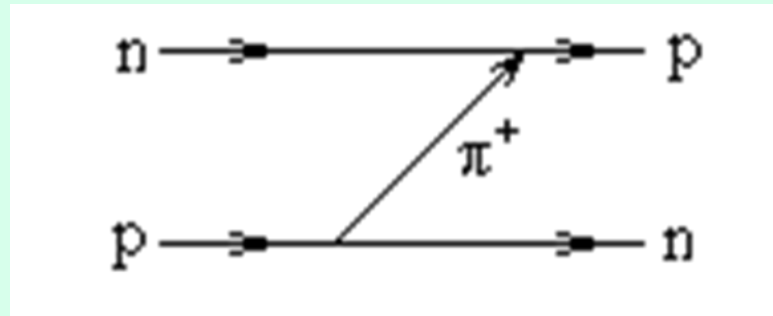
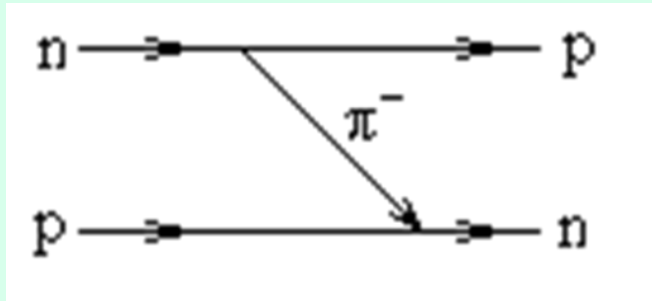
$$p + n \rightarrow (n + \pi^+) + n \rightarrow n' + (\pi^+ + n) \rightarrow n' + p'$$

$$n + p \rightarrow (p + \pi^-) + p \rightarrow p' + (\pi^- + p) \rightarrow p' + n'$$

$$n + n \rightarrow (n + \pi^0) + n \rightarrow n' + (\pi^0 + n) \rightarrow n' + n'$$

$$p + p \rightarrow (p + \pi^0) + p \rightarrow p' + (\pi^0 + p) \rightarrow p' + p'$$

# Взаємоперетворення нуклонів

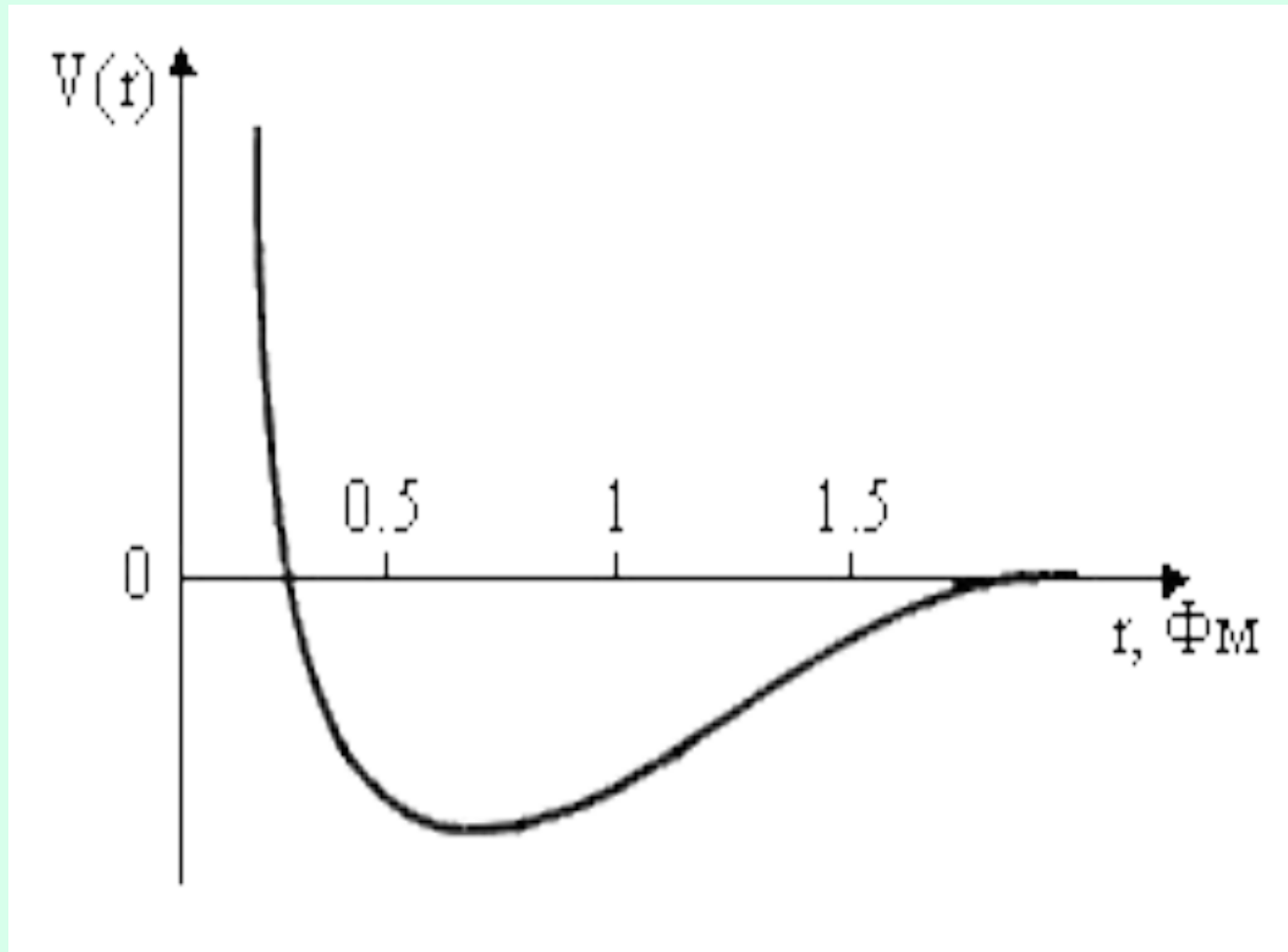




# Характеристики мезонів

Частка	Маса, ( $m_e$ )	Час життя, (сек)	Основні шляхи розпаду
$\pi^+$ $\pi^-$	273,1	$2.6 \cdot 10^{-8}$	$\nu, \mu^+$ $\nu^-, \mu^-$
$\pi^0$	264,1	$8.4 \cdot 10^{-17}$	$2\gamma$

# Потенціал Юкави



**За взаємодію між нуклонами на малих відстанях (у тому числі за міжнуклонне відштовхування при  $r < 0.3$  Фм) відповідають більш важкі мезони (K, B, D)**

# Мезонна теорія будови атомного ядра

## Переваги:

- Експериментально підтверджена
- Пояснює природу сильної взаємодії
- Дала можливість передбачити існування ряду елементарних часток

## Недоліки:

- Кількісна сторона, зокрема розрахунок енергії зв'язку нуклонів

# МОДЕЛЬ ФЕРМИ-ГАЗУ

# Основні положення

- Нуклони не взаємодіють між собою
- Нуклони рухаються в області об'ємом  $V$ , в межах якої потенціал вважають сталим.
- Одночастинні стани нейтронів и протонів описуються плоскими хвилями (справедливо при  $R$  ядра  $\rightarrow \infty$ , фактично нехтуємо наявністю поверхні ядра)
- В обмеженому об'ємі можний лише дискретний набір значень вектору імпульсу
- Імпульс та кінетичну енергію нуклонів знаходять шляхом введення періодичних граничних умов

## Імпульс нуклона (p):

$$p_x = (2\pi \hbar / L)n_x,$$

$$p_y = (2\pi \hbar / L)n_y,$$

$$p_z = (2\pi \hbar / L)n_z$$

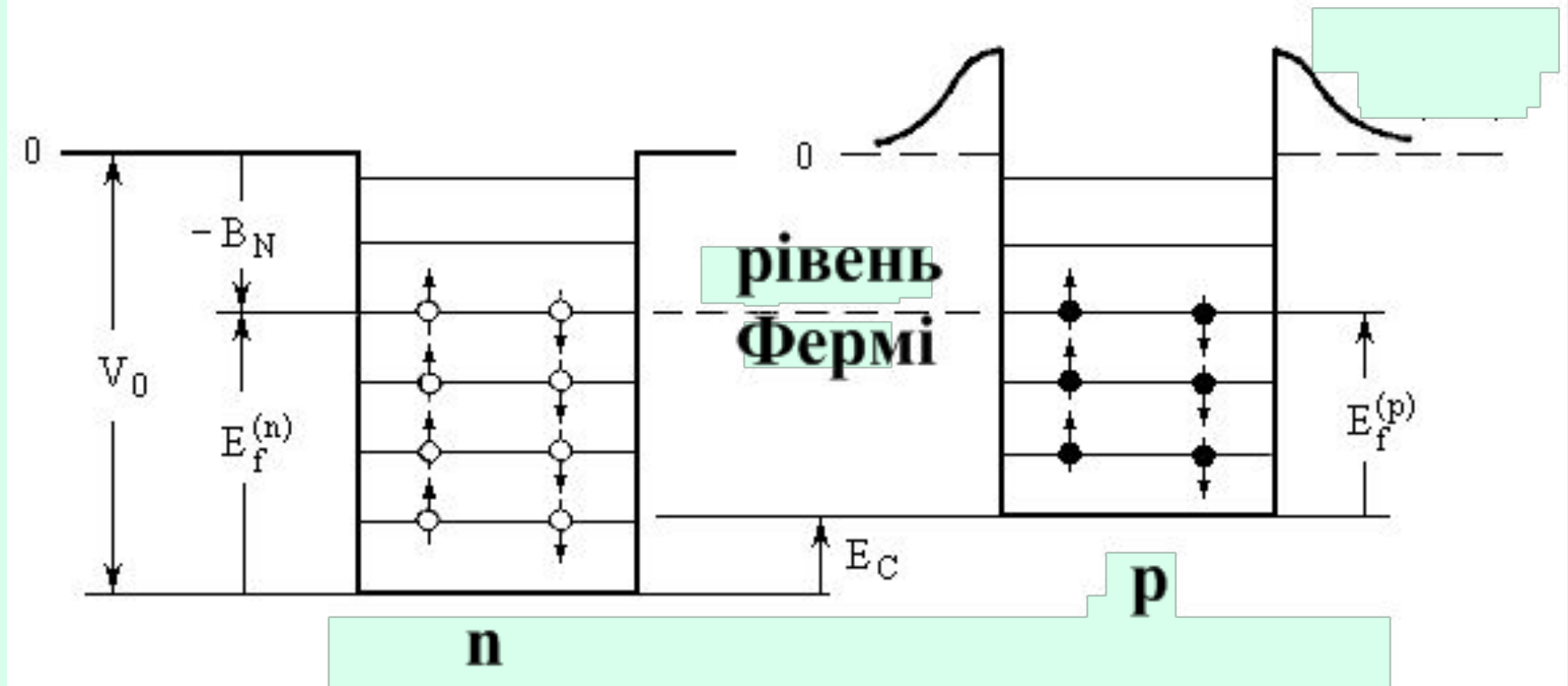
(L – довжина ребра куба з об'ємом V)

## Максимальна кінетична енергія нуклона (енергія Фермі)

$$E_f^{(n)} = \frac{(p_f^{(n)})^2}{2m}, \quad E_f^{(p)} = \frac{(p_f^{(p)})^2}{2m}$$

# Нейтронні та протонні одночасточні рівні енергії в моделі фермі-газа.

$E_C$  – кулонівська енергія протона,  
 $B_N$  - енергія відділення нейтрона.





# Модель Фермі-газу

## - Переваги:

- Дозволяє досить точно розрахувати : енергію Фермі, імпульс та середню кінетичну енергію нуклонів.
- Дозволяє інтерпретувати дані для ядерних реакцій, чутливих до розподілу нуклонів в ядрі по імпульсу
- пояснює  $N \approx Z$  для легких ядер

## Недоліки:

Не враховує індивідуальні особливості ядер

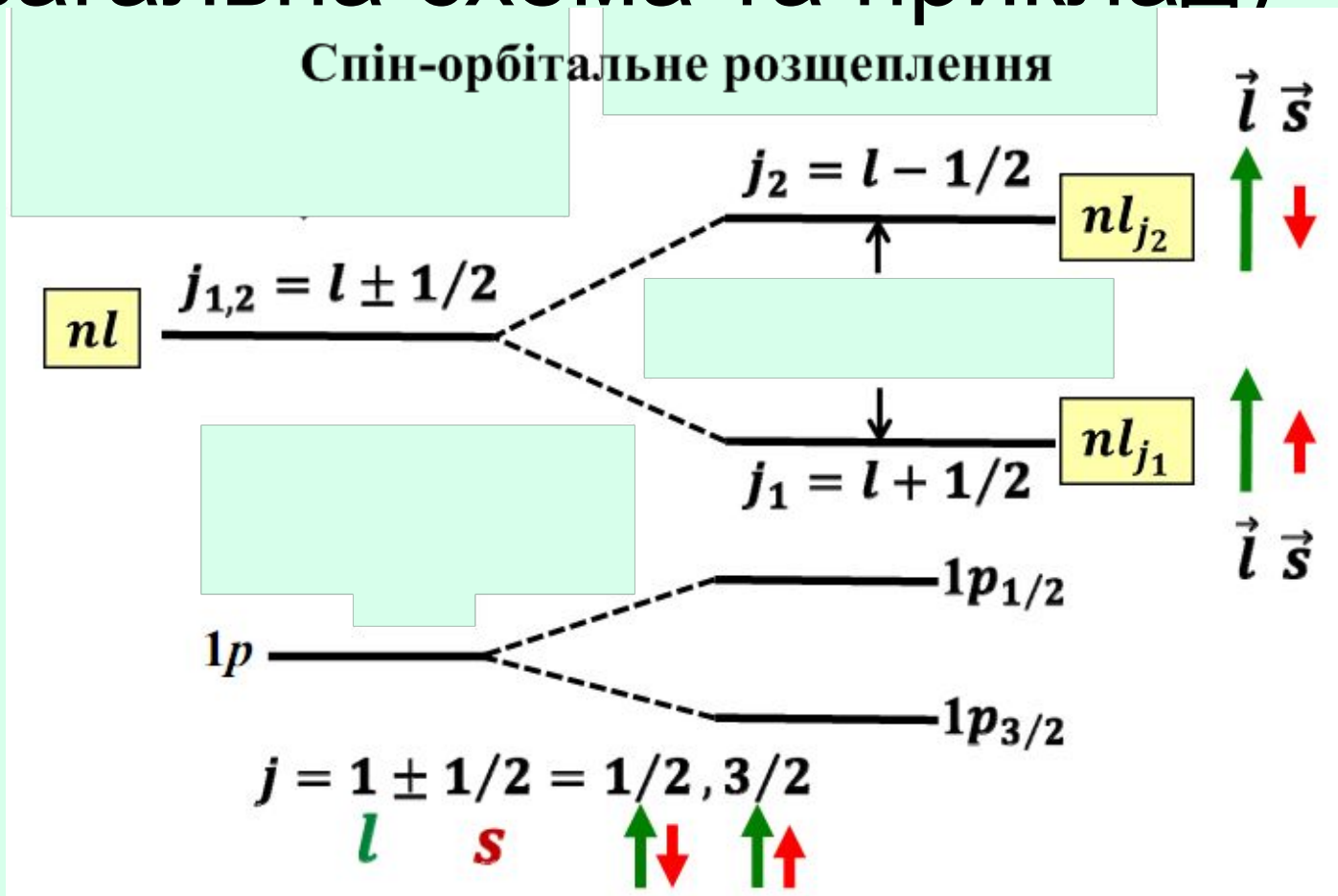
# **ОБОЛОНКОВА ТЕОРІЯ БУДОВИ АТОМНОГО ЯДРА**

## **Основні положення:**

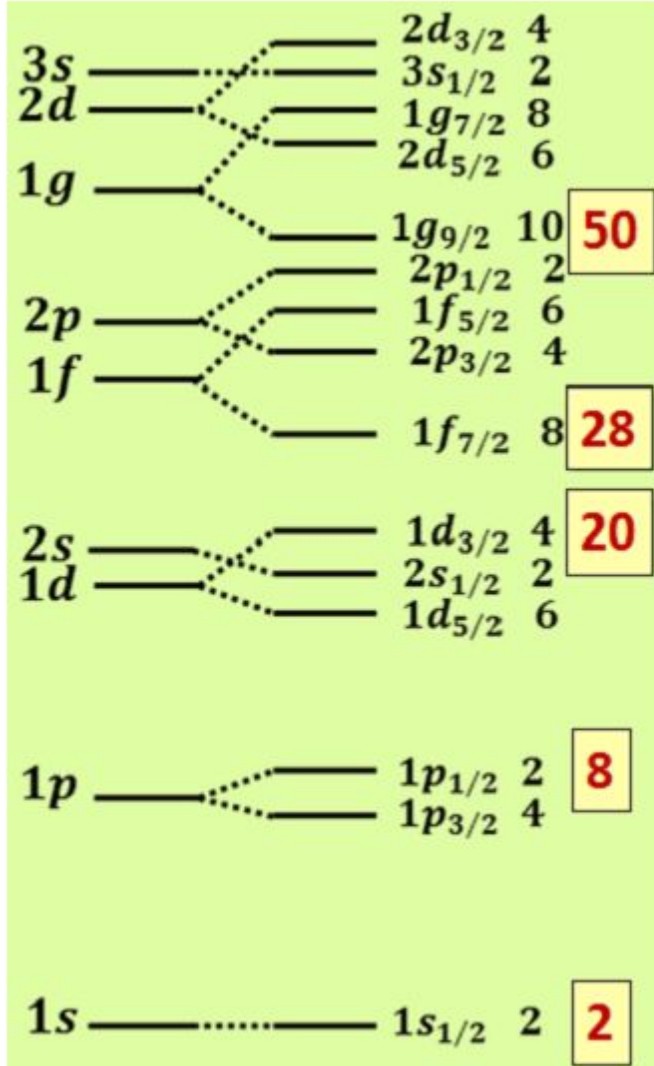
- **нуклони є незалежними частками (рухаються в потенційному полі, створеному іншими нуклонами)**
- **нуклони у ядрі знаходяться на квантових рівнях (як електрони – на електронних, для протонів і нейтронів ці енергетичні рівні не співпадають). Стан нуклона описується квантовими числами (спінове, орбітальне, магнітне, головне)**

- в результаті сильної спін-орбітальної взаємодії кожен дозволений енергетичний рівень розпадається на два підрівня. Енергія підрівнів з  $\ell+1/2$  є нижчою, ніж  $\ell-1/2$
- повний момент кількості руху оболонки  $j = \ell \pm 1/2$  ( $\ell$  орбітальне квантове число)
- ємність рівня =  $2j+1$
- якщо ядро складається з лише заповнених протонних та нейтронних оболонок, то його спін і повний орбітальний момент дорівнюють нулю. При цьому енергія зв'язку нуклонів у ядрі різко збільшується.

# Спін-орбітальне розщеплення (загальна схема та приклад)

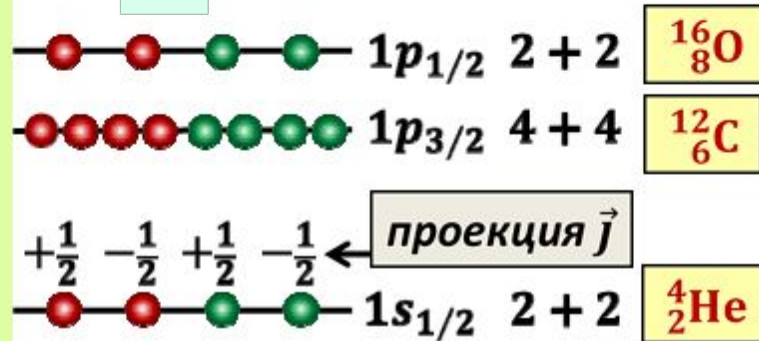


# Діаграма нижніх нуклонних рівнів з урахуванням спін-орбітальної взаємодії



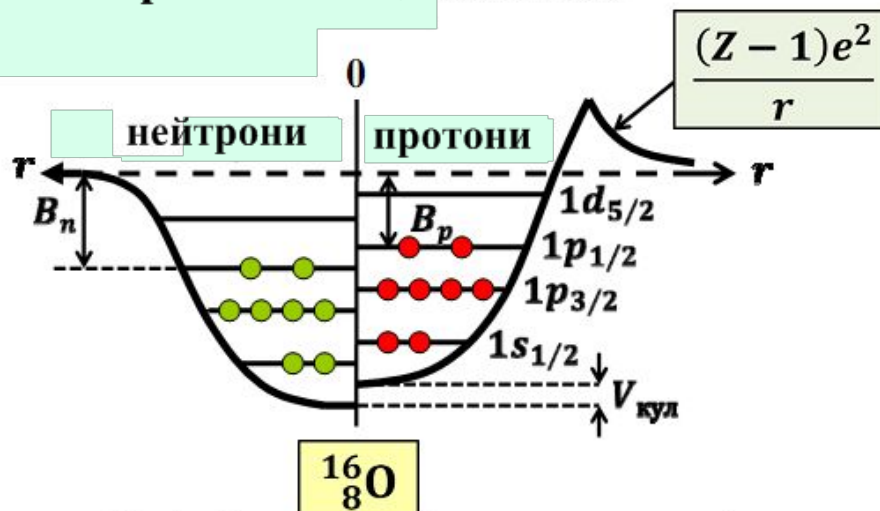
Діаграма нижніх нуклонних рівнів (підоболонок) число нуклонів кожного виду на підоболонці з повним моментом  $j$

$$v_j = 2j + 1$$



# Відносна енергія нейтронних та протонних підоболонок

## Нейтронні та протонні підоболонки



## Двічі магічні ядра

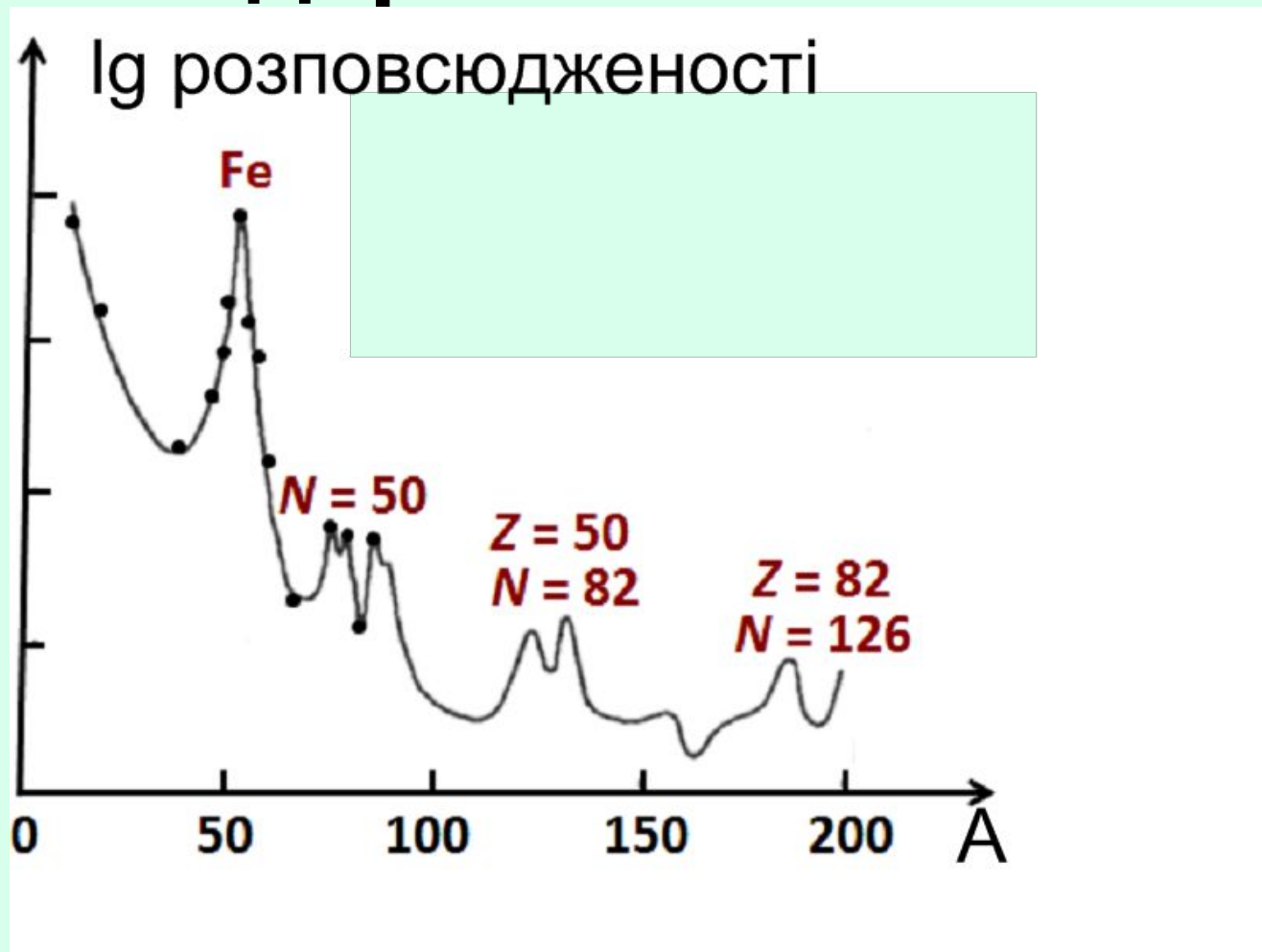
	$^4_2\text{He}$	$^{16}_8\text{O}$	$^{40}_{20}\text{Ca}$	$^{126}_{82}\text{Pb}$
N	2	8	20	126
Z	2	8	20	82

# **Експериментальне підтвердження моделі оболонки**

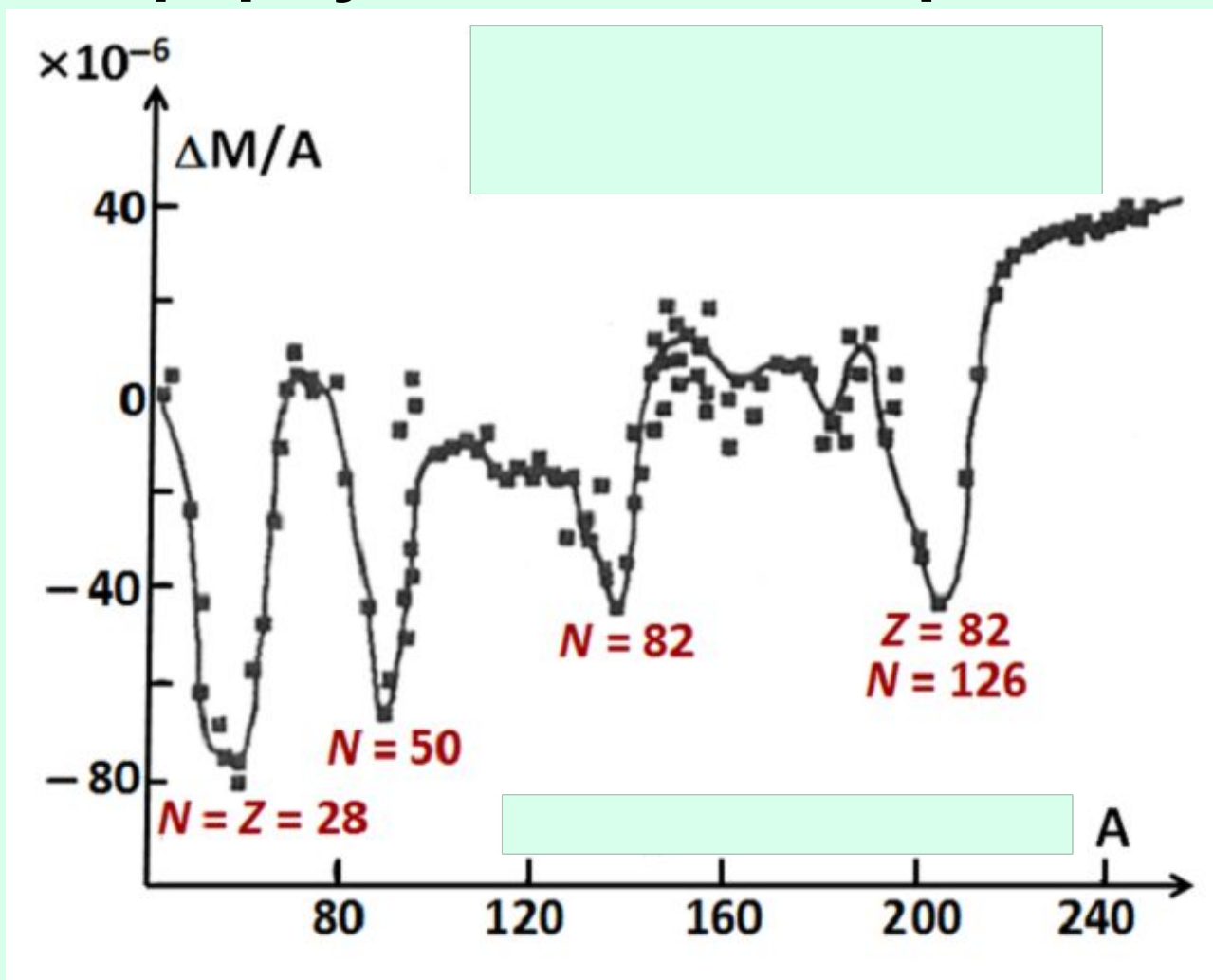
**Ядра з  $Z = 2, 8, 20, 28, 50, 82, 114$   
та ядра з  $N = 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126$   
(«магічні числа» нуклонів)  
мають підвищену стійкість та  
розповсюдженість**



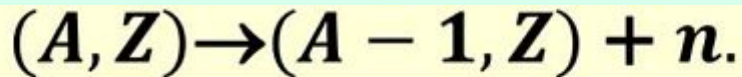
# Розповсюдженість середніх і важких ядер в Сонячній системі



# Відхилення маси ядра від розрахованої за формулою Вейцзеккера



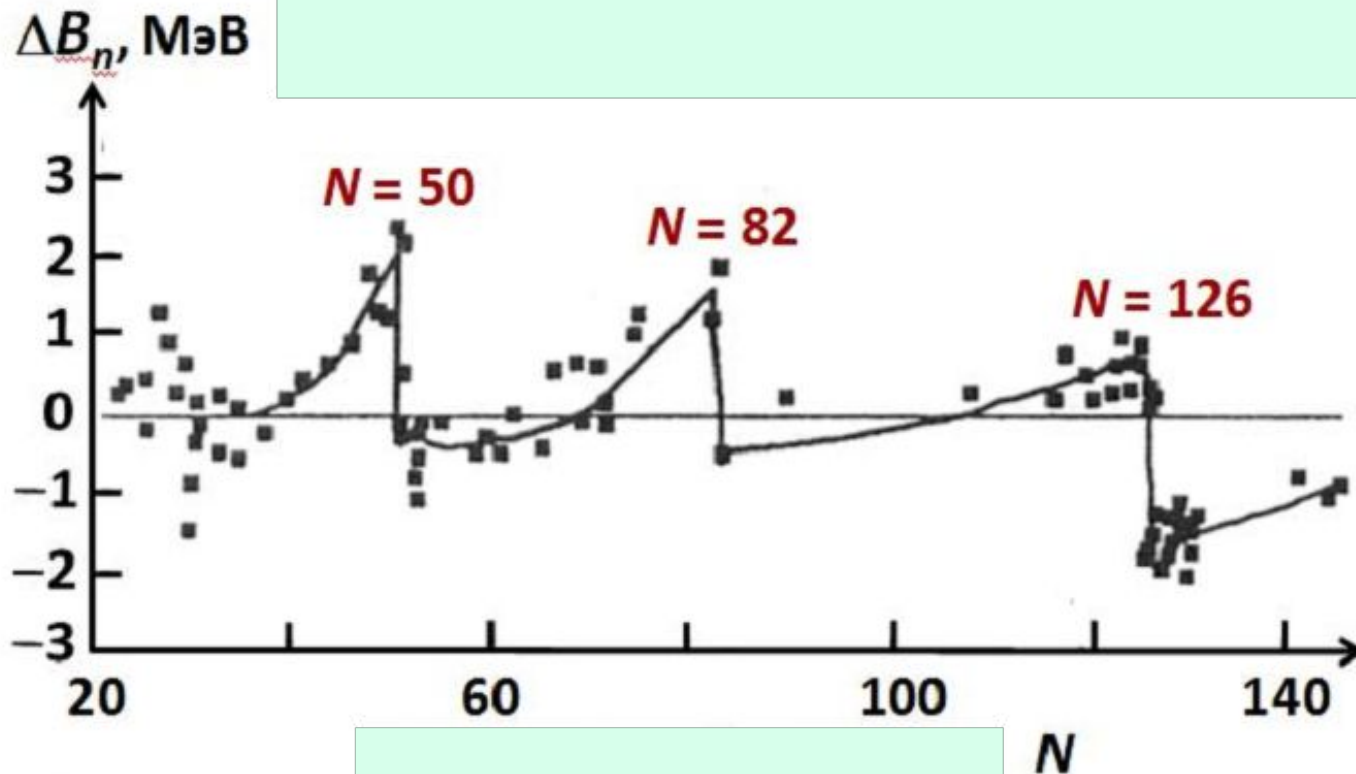
# Відділення нейтрона



Енергія відділення нейтрона:

$$B_n = M(A - 1, Z)c^2 + m_n c^2 - M(A, Z)c^2$$

# Відхилення енергії відділення нейтрона від розрахованої за формулою Вейцзеккера



# Варіанти оболонкової моделі атомного ядра

- Одночастинна модель оболонок (ОМО)
- Багаточастинна модель оболонок (БМО) – робить спробу врахувати залишкову взаємодію між нуклонами, яке не описується потенційною ямою.
- Модель оболонок, що враховує несферичність ядер (несферичність потенційної ями)

# Оболонкова теорія будови атомного ядра

## переваги

- Пояснює магічні числа
- Пояснює спіни та магнітні моменти ядер
- Дозволяє описати збуджені стани ядер

# Оболонкова теорія будови атомного ядра

## недоліки

- Не може точно розрахувати квадрупольні моменти (є періодичність, але величина і навіть знак – не завжди точно)
- розрахунок магнітних моментів є не досить точним
- Магічні числа для важких ядер складно пояснити