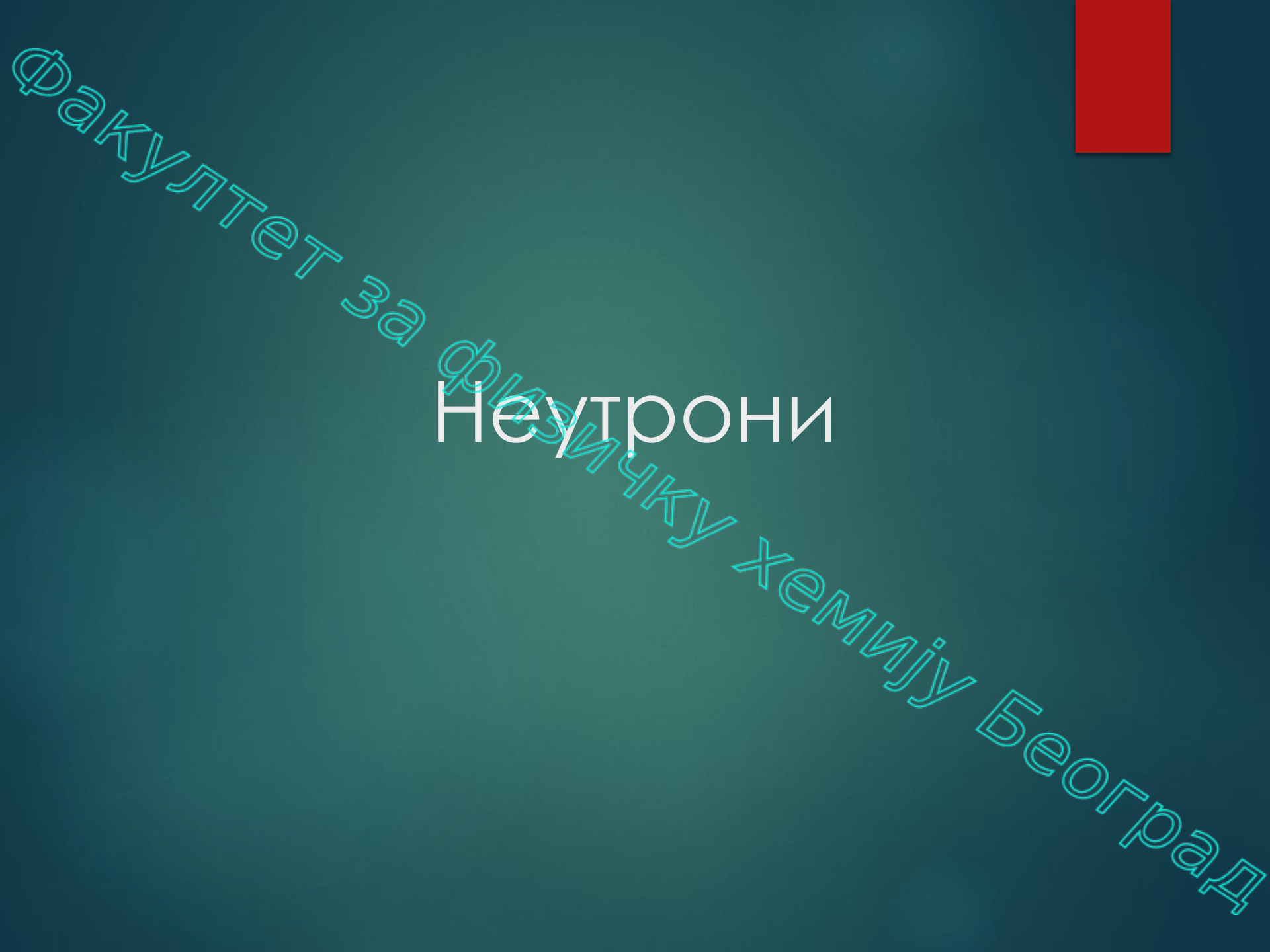


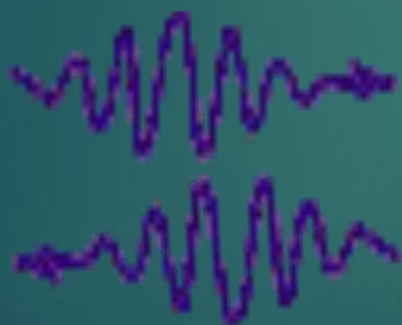


Неутрони

Факултет за физичку хемију Београд

Неутрони (*Revisited*)

- ▶ Bothe и Becker 1930. : бомбардовање Be алфа честицама доводи до производње продорног, нејонизујућег зрачења.
- ▶ I. Joliot-Curie & F. Joliot (1931): Зрачење произведено у оваквој реакцији избацује протоне из парафина. Закључак (?): у реакцији се емитује гама зрачење које путем Комптоновог ефекта избацује протоне. Измерена енергија протона била је 5,3 MeV. Међутим,



5,3 MeV



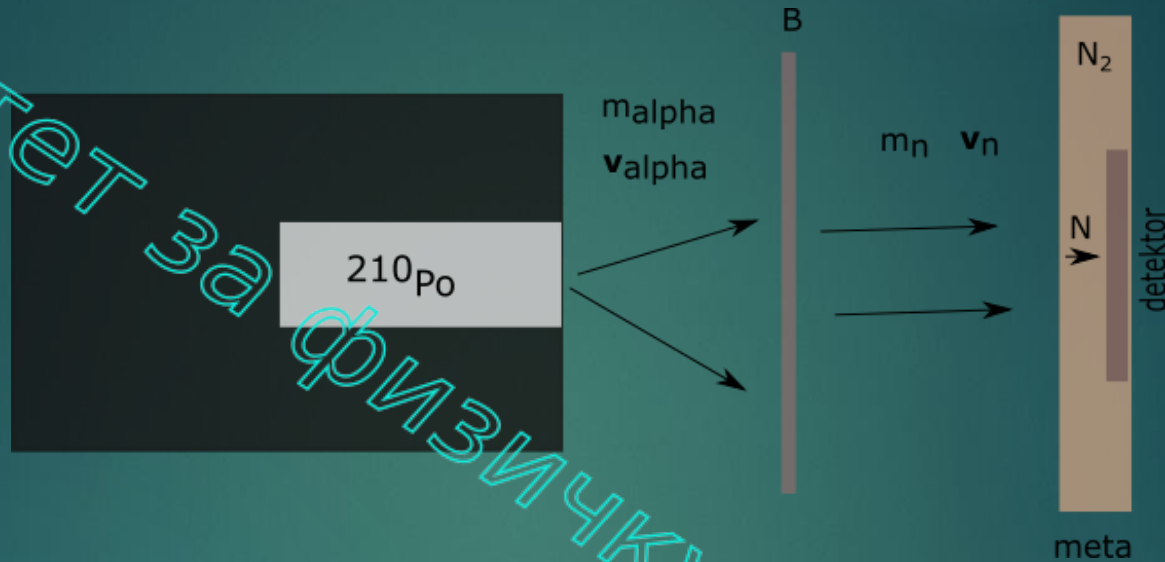
$$pc_{proton} = \sqrt{E_k^2 + 2E_k mc^2} \approx 100 \text{ MeV}$$

$$pc_{proton} = \Delta pc_{foton} \approx 2pc_{foton} \Rightarrow$$

$$E_{foton} \approx 50 \text{ MeV}$$

Откриће неутрона (Chadwick 1932)

$E_\gamma \approx 50 \text{ MeV} ??$

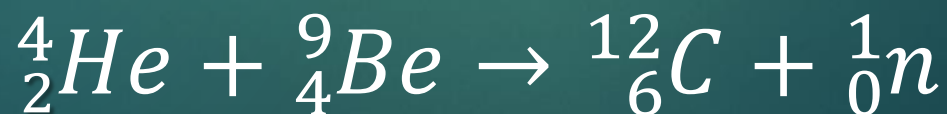


$$\frac{1}{2}m_\alpha v_\alpha^2 + m_\alpha c^2 + m_B c^2 = \frac{1}{2}m_N v_N^2 + m_N c^2 + \frac{1}{2}m_n v_n^2 + m_n c^2$$

$$m_n c^2 = \frac{\frac{1}{2}m_\alpha v_\alpha^2 + m_\alpha c^2 + m_B c^2 - \frac{1}{2}m_N v_N^2 - m_N c^2}{1 + \frac{v_n^2}{2c^2}}$$

► „Ови резултати и остали резултати које сам добио током рада, веома тешко се могу објаснити претпоставком да је радијација из берилијума електромагнетно зрачење, ако закони одржања енергије и импулса важе у судару. Тешкоће, међутим ишчезавају, ако се претпостави да се то зрачење састоји од честица масе 1 и наелектрисања 0, или **неутрона**.“

- На основу овога нуклеарна реакција коју су користили Bothe и Becker, те I. Joliot-Curie & F. Joliot се може написати као



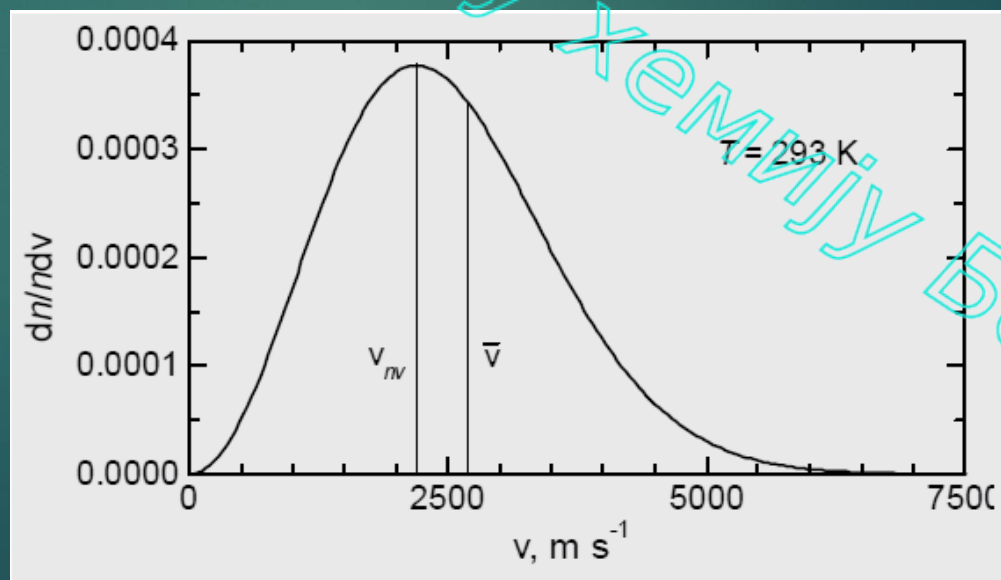
► Слободни неутрон је нестабилна честица са $t_{1/2} = 10,6 \text{ m}$



$$E_{\text{max}} = (782 \pm 13) \text{ keV}$$

Термални неутрони

- неутрони који су у термодинамичкој равнотежи са средином



Математички облик Максвелове функције расподеле

$$f(v) = \frac{dn}{n} = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} e^{-\frac{mv^2}{2kT}} v^2 dv$$

Најверованија вредност брзине је на максимуму расподеле. Она се може наћи из првог извода функције расподеле

$$\frac{df(v)}{dv} = 0; \quad v_{nv} = \sqrt{\frac{2kT}{m}}, \quad \varepsilon_{nv} = \frac{mv_{nv}^2}{2} = kT$$

Енергија која одговара тој брзини на 298 K је 0,025 eV
Средња вредност брзине се може добити интеграцијом

$$\bar{v} = \int_0^{\infty} v \cdot f(v) dv = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}, \quad \bar{\varepsilon} = \frac{m\bar{v}^2}{2} = \frac{4}{\pi} kT$$

и на 298 K је 0,032 eV

Моћ успоравања средине за неутроне

- ▶ Неутрони емитовани из неутронских извора или у другим нуклеарним реакцијама имају брзине неколико MeV.
- ▶ Да би неутрони били доведени до термалних енергија које су најкорисније за експерименте (закон $1/v$) користе се модератори.
- ▶ Моћ успоравања атома неке средине дата је релацијом

$$MU = \xi n \sigma_s = \xi \frac{\rho N_A}{M} \sigma_s$$

- ▶ Ако употребимо макроскопски ефикасни пресек за расејање

$$MU = \xi \Sigma_s$$

- ▶ Моћ модерације је дата као

$$MM = \xi \frac{\Sigma_s}{\Sigma_a}$$

Моћ успоравања и моћ модерације за неке средине

Medijum	$\rho (10^3 \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$\xi \Sigma_s (\text{m}^{-1})$	$\xi \Sigma_s / \Sigma_a$
H ₂ O	1,00	135	61
D ₂ O	1,10	18,8	5700
Be (metal)	1,84	15,5	125
BeO	2,96	12	170
C (grafit)	1,60	6,1	205
He	0,000178	0,009	45
U (metal)	18,7	0,33	0,009



Физика

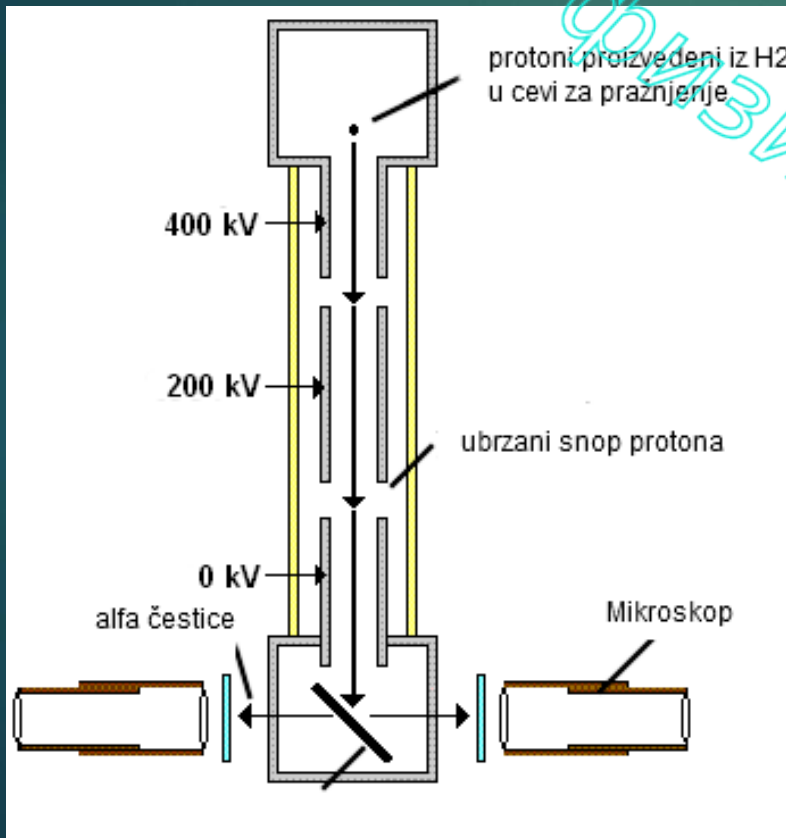
Факултет за физичку хемију Београд

Откриће фисије

- ▶ St. Louis Post-Dispatch „Најлепша и најтајанственија сила у свемиру – енергија атома – ће бити незамислива. Може донети револуцију у систему осветљавања света. Може онемогућити ратове. **Чак ће можда бити пронађен инструмент који би на додир протрла разнео целу Земљу и довео до смака света.**“
- ▶ E. Rutherford (чланак у новинама) „Ове трансформације атома су од изузетног значаја за научнике **али ми не можемо контролисати енергију атома до те мере да би се комерцијално могла користити, и, вероватно, то никада нећемо моћи то да урадимо...** Ми се интересујемо за ову ствар чисто са становишта науке и експерименти који се одвијају омогућиће нам да боље разумемо структуру материје.

Експеримент Cockcroft- Walton-a

- ▶ Атом се може разбити и добити енергија !!!
- ▶ Доказ Einstein-ове формуле $E=mc^2$



Потрага за трансуранима

- ▶ Нутрон као идеална честица за нуклеарне реакције



- ▶ Италијанска група (Sapienza Università di Roma) 1934-1938



Enrico Fermi



▶ Француска група (Radium Institute, Paris)



I. Joliot-Curie

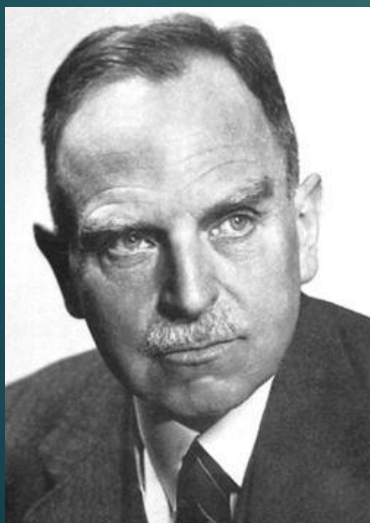


I. Curie & F. Joliot



Павле Савић

▶ Немачка група (Berlin Universität)



Otto Hahn



Fritz Strassman



Lise Meitner

Кључни резултати

- ▶ Први пут добијен вештачки радионуклид (I. & F. Joliot-Curie 1934)



- ▶ Експерименти бомбардовања различитих елемената са неутронима (Ферми 1934-1937.) – преко 400 новостворених изотопа
- ▶ Иста група – бомбардовање уранијума неутронима. Нађено шест нових активности од којих је једна имала време полуарспада 13 минита и која је приписана елементу са редним бројем 93 („ека-ренијум“)

92—*Uranium*—We give here only the main results on this element, as its behaviour has been discussed recently elsewhere.*

Besides the half-periods of 10 seconds, 40 seconds and 13 minutes, we have identified later one more of about 1.5 hours. The intensity of the activation is of the order of 0.5 for each of these lives. We have already discussed experiments which appear to prove that the 13 minutes' active product is not isotopic with any of the elements with atomic number from 86 to 92 (emanation, ekacæsium, radium, actinium, thorium, protactinium, uranium). These

Берлинска група понавља Фермијеве експерименте – нађено је 9 активности које су приписали

1 H																	2 He															
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne															
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar															
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr															
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	(43)	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe															
55 Cs	56 Ba	57-71 La-Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	(85)	86 Rn															
(87)	88 Ra	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	(93)	(94)	(95)	(96)	(97)	(98)	(99)	(100)																			
																		57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	(61)	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu

Ека-Re Ека-Os Ека-Ir Ека-Pt

али без дефинитивних доказа о сличности са Rh, Os, ...

- ▶ Париска група је поред 9 већ регистрованих активности открила и 10-ту чије је време полураспада било 3,5 часова ($R_{3,5h}$) која је по њиховим речима

SUR LES RADIOÉLÉMENTS FORMÉS DANS L'URANIUM IRRADIÉ PAR LES NEUTRONS.

Par IRÈNE CURIE et PAUL SAVITCH.

Institut du Radium. Laboratoire Curie.

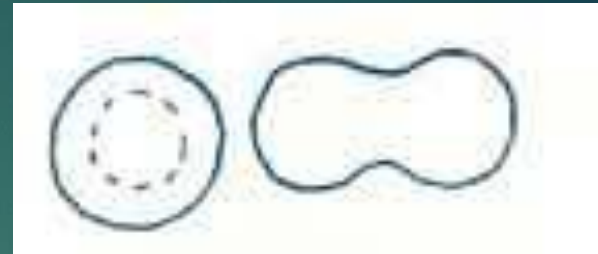
Dans l'ensemble, les propriétés de $R_{3,5h}$ sont celles du lanthane, dont il semble jusqu'ici qu'on ne puisse le séparer que par fractionnement.

- ▶ „укупно узев има својсва лантана, од кога се, изгледа, може једино одвојити фракционисањем“
- ▶ Берлинска група која је покушала да оповргне/провери резултате Париске групе нашла је у производима La (уместо актинијума) и Ba (уместо Ra). Нису могли да нађу објашњење за те резултате

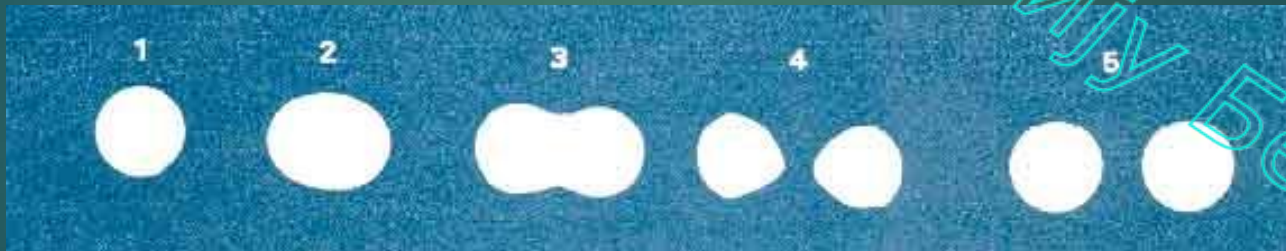
Über den Nachweis und das Verhalten der bei der Bestrahlung des Urans mittels Neutronen entstehenden Erdalkalimetalle¹.

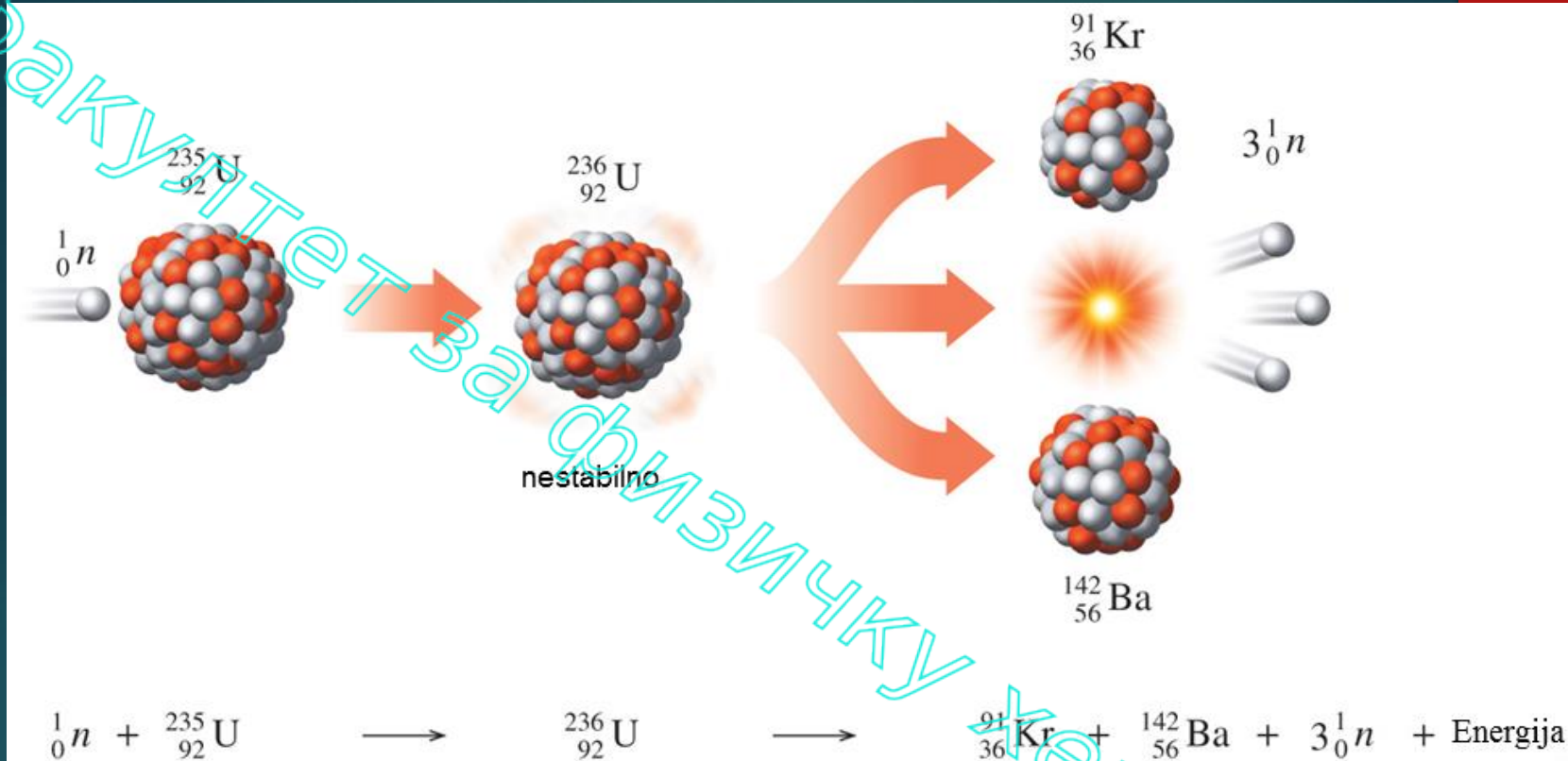
Von O. HAHN und F. STRASSMANN, Berlin-Dahlem.

Објашњење – Lise Meitner & Otto Frisch – Stockholm 1938.



- ▶ Такође дају груб прорачун енергије ослобођене у фисији $E \approx 200 \text{ MeV}$
- ▶ Bohr – Објашњење теорије фисије на основу модела течне капи





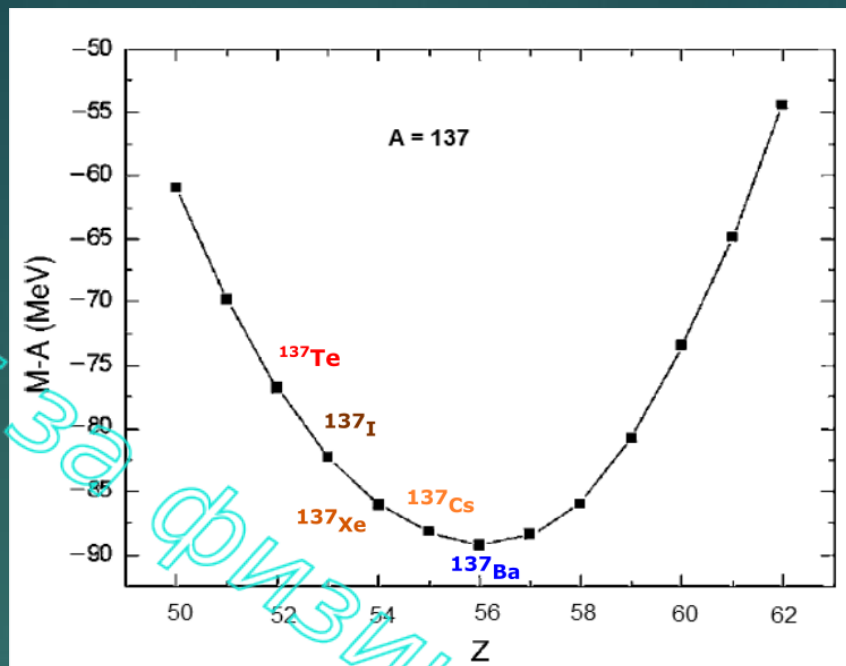
- 90 комбинација продуката фисије ${}^{235}\text{U}$
- Општа једначина фисије:
- ${}^{235}\text{U} + {}^1_0n \rightarrow [{}^{236}\text{U}] \rightarrow X_1 + X_2 + 2,5 {}^1_0n + \sum h\nu_i + \text{Energija}$

Фисија-основне карактеристике

- ▶ Енергија ослобођена у фисији је око 200 MeV
- ▶ Свака фисија је праћена емисијом неколико неутрона (до 5 за фисију ^{235}U , средњи број 2,5) и неколико гама зрака. Број емитованих неутрона расте са атомским бројем језгра које поделже фисији
- ▶ Ефикасни пресек за фисију опада са порастом енергије бомбардујућих неутрона (за термалне неутроне $\sigma = 584 \text{ b}$)
- ▶ Сложено језгро ^{236}U у 85 % случајева се распада фисијом, док у осталим случајевима у β -распаду настаје ^{236}Np
- ▶ Само ^{235}U кога у природној смеши има 0,72% подлеже фисији термалним неутронима. ^{238}U (89 %) подлеже фисији неутронима енергије 1 MeV.

► Поред неутрона фисију могу изазвати и наелектрисане честице виших енергија (протони, деутерони..), али и γ -зрачење

- Језгра X_1 и X_2 називају се **фисионим фрагментима**. Они имају велики однос N/Z и могу да се деексцитују мањим делом емисијом неутрона (**промптни неутрони**) и већим делом β^- распадом дуж изобарних парабола (ланаца).
- Настали фисиони фрагменти имају велико наелектрисање и брзину
- У малом броју случајева (0,016 % за ^{238}U) радионуклид после β^- распада емитује неутроне који се називају **закаснелим неутронима**.
- Језгра настала β^- распадом фисионих фрагмената називају се **фисиони производи**



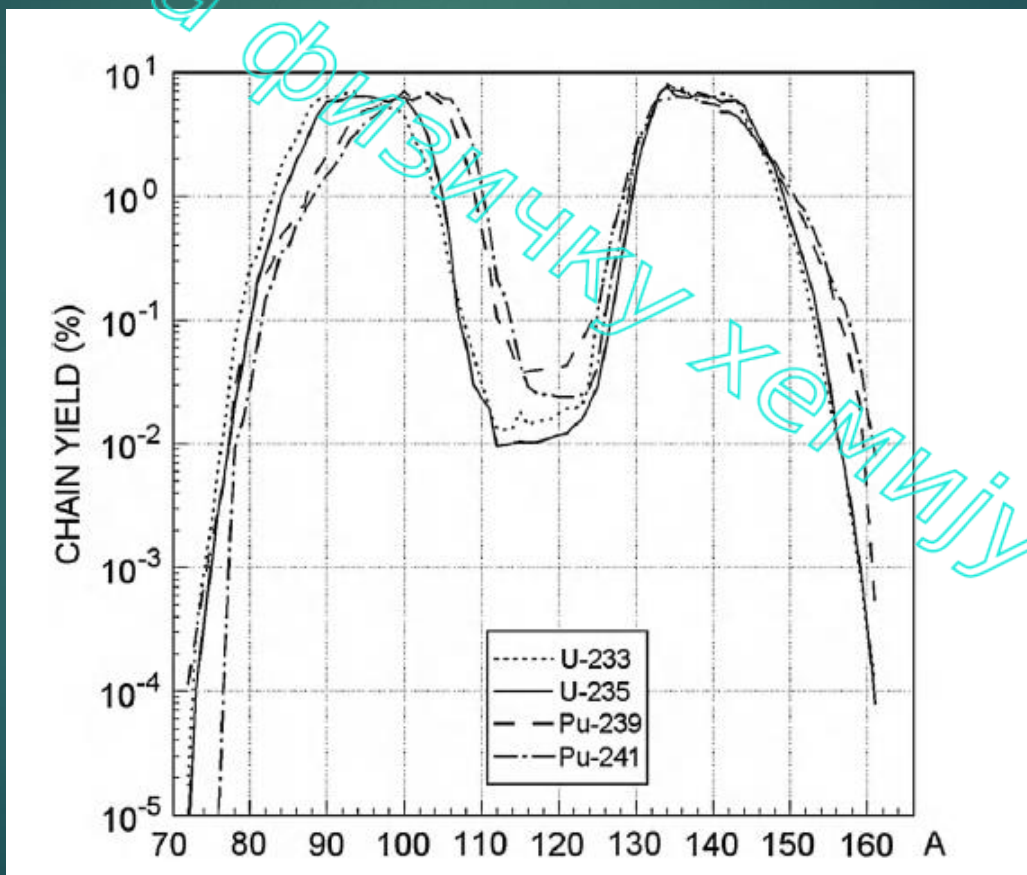
- Принос изобарног ланца дат је изразом

$$\gamma(A) = \frac{\text{број језгара са масеним бројем } A}{\text{укупни број језгара која су се распала фисијом}} \cdot 100\%$$

$\sim 3 \times 10^{-6}\%$	$4 \times 10^{-3}\%$	0.67%	2.96%	2.66%	0.074%	$3 \times 10^{-4}\%$	$\sim 2 \times 10^{-8}\%$
↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
$^{93}_{34}\text{Se} \rightarrow ?$	$^{93}_{35}\text{Br} \rightarrow ?$	$^{93}_{36}\text{Kr} \xrightarrow{1.3\text{ s}} ^{93}_{37}\text{Rb} \xrightarrow{5.8\text{ s}} ^{93}_{38}\text{Sr} \xrightarrow{7.45\text{ min}} ^{93}_{39}\text{Y} \xrightarrow{10.1\text{ h}} ^{93}_{40}\text{Zr} \xrightarrow{1.5\text{ My}} ^{93}_{41}\text{Nb (stable)}$					
↓ $\beta^- n?$	↓ $\beta^- n$	↓ $\beta^- n$ 1.9%	↓ $\beta^- n$ 1.4%				
$^{92}_{35}\text{Br}$	$^{92}_{36}\text{Kr}$	$^{92}_{37}\text{Rb}$	$^{92}_{38}\text{Sr}$	Total chain yield = 6.375%			

Дистрибуција маса фисионих фрагмената

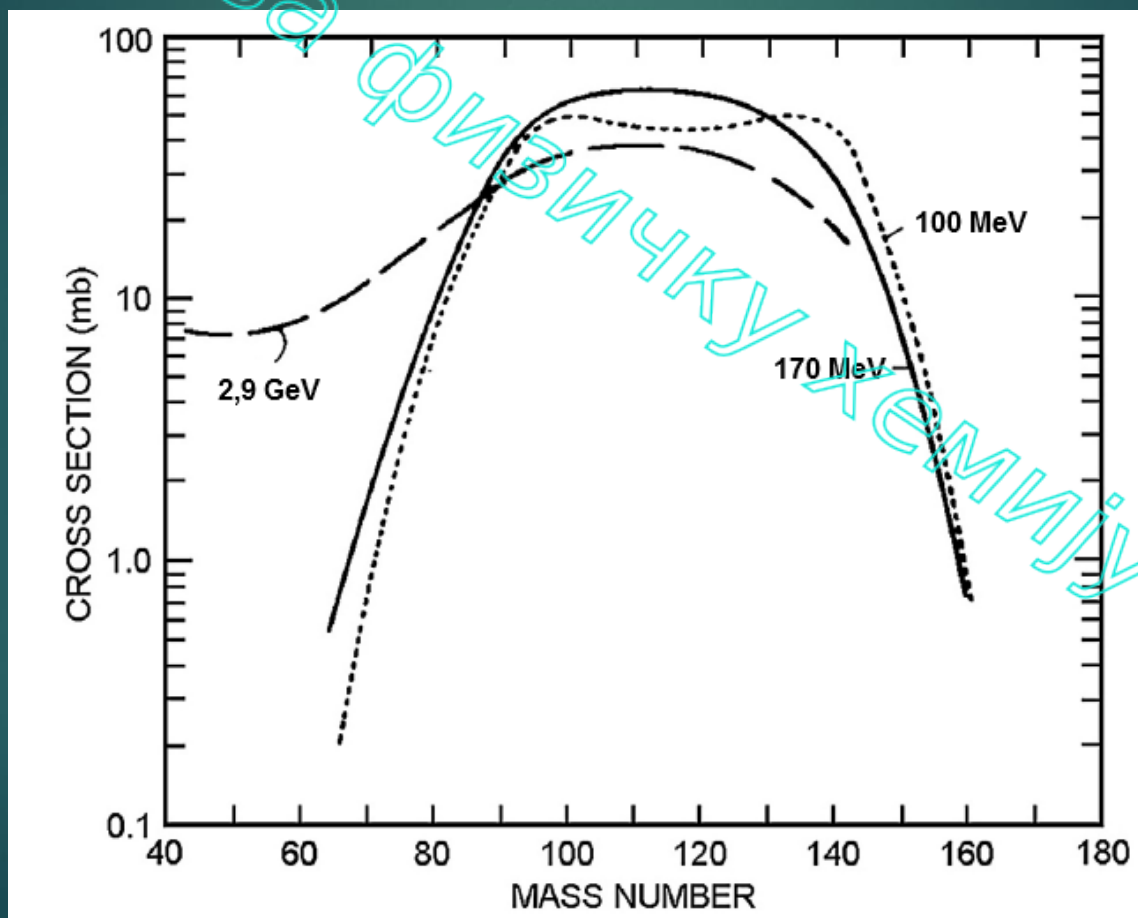
- ▶ Дистрибуција масених бројева фисионих фрагмената је асиметрична.
- ▶ Када би фисија била симетрична ${}^{235}_{92}\text{U} + {}^1_0\text{n} \rightarrow 2 {}^{118}_{46}\text{Pd}$. Али...



▶ За веће енергије пројектила крива постаје симетричнија (губи „грбе“)

▶ И језгра лакша од уранијума су подложна фисији. Нпр фисија радијума даје криву са три пика

▶ Код спонтане фисије ^{259}Fm фисиона крива је симетрична



Енергија фисије

- ▶ Енергија неутрона $2 \text{ MeV} \times 2,5 \text{ неутрона} = 5 \text{ MeV}$
- ▶ Промптни гама зраци..... $= 6-8 \text{ MeV}$
- ▶ E_k фисионих фрагмената..... $= 165 \text{ MeV}$
- ▶ Енергија ексцитације фисионих фрагмената..... $\sim 23 \text{ MeV}$

Укупна енергија фисије $\sim 200 \text{ MeV}$

Енергија коју носи појединачни фисиони фрагмент дата је релацијом (у систему центра масе) дата је изразом

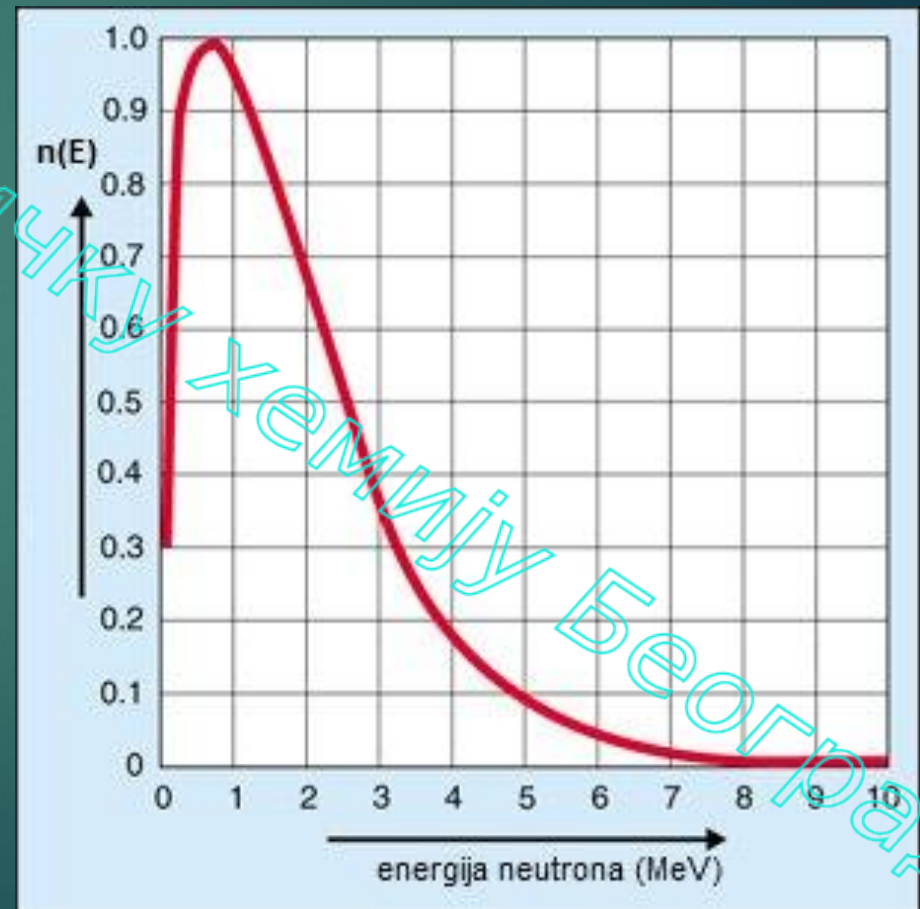
$$E_1 = \frac{A_2}{A_1 + A_2} E_k$$

Енергија неутрона из фисије

- ▶ Енергије 0 – 10 MeV
- ▶ Енергије се померавају расподели сличној Максвеловој расподели.

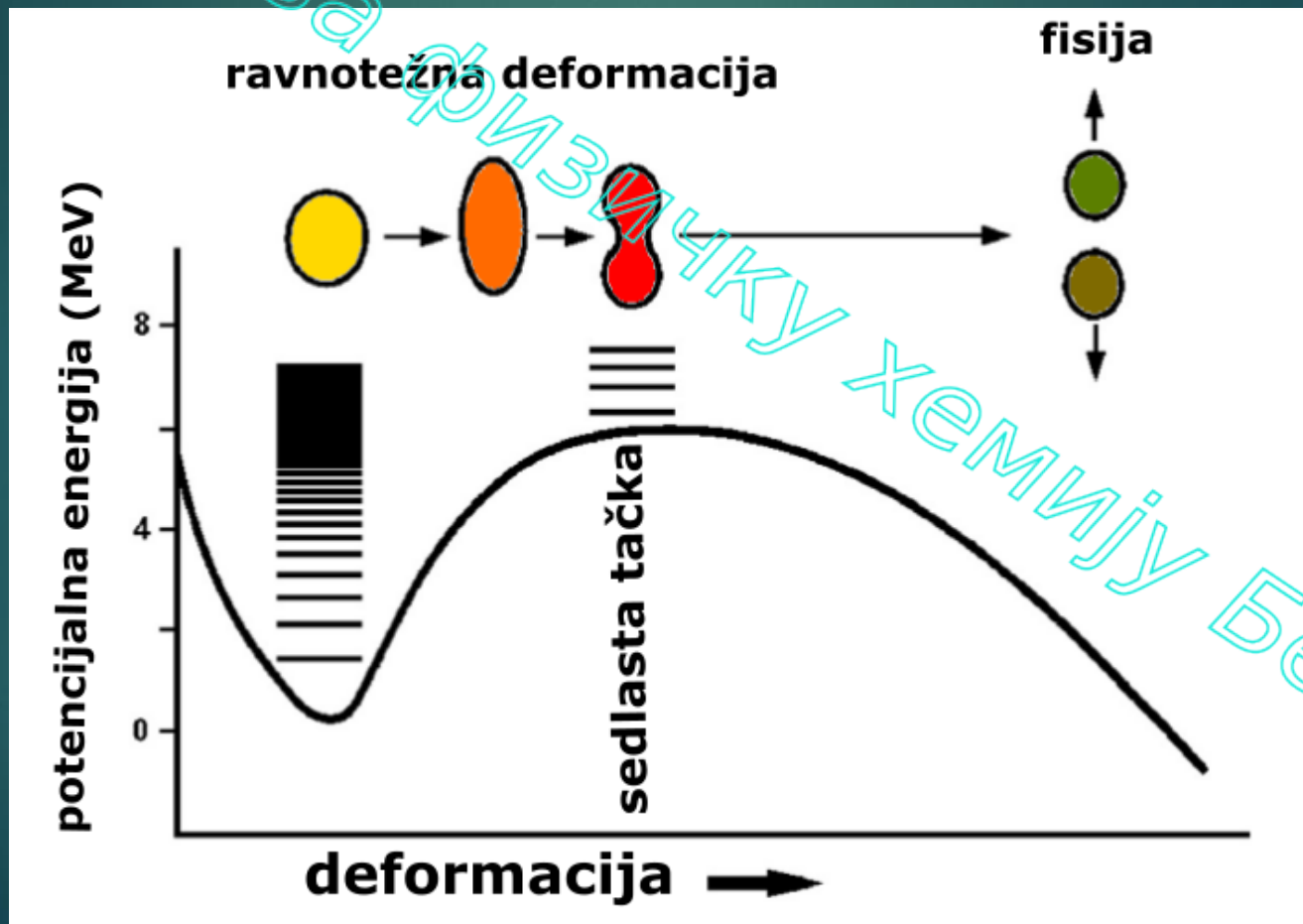
$$n(E) = \frac{1}{n_0} \frac{dn}{dE} = \frac{a}{v} \sqrt{E} e^{-ET}$$

a – параметар нормализације
расподеле
 v – број емитованих неутрона у
фисији
 T – параметар расподеле

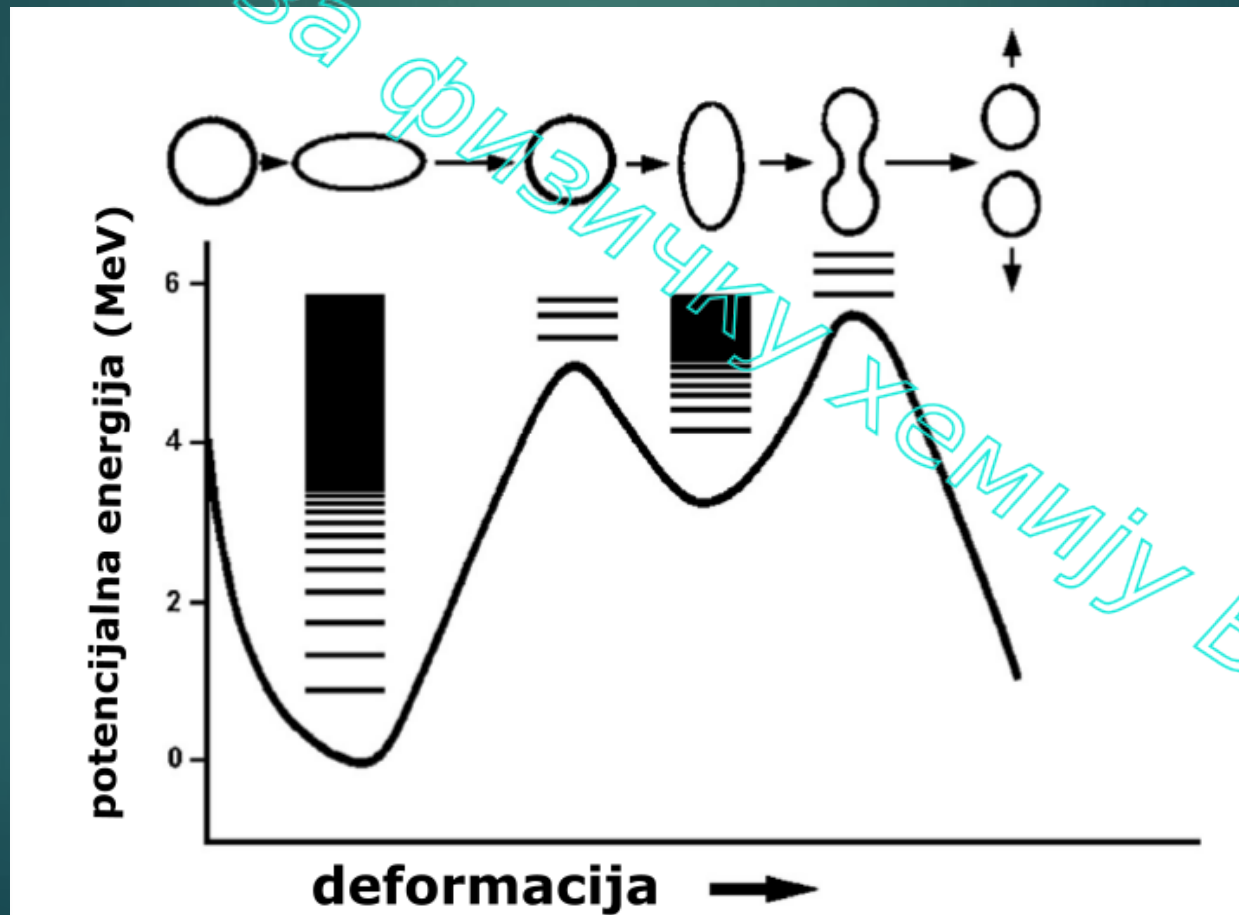


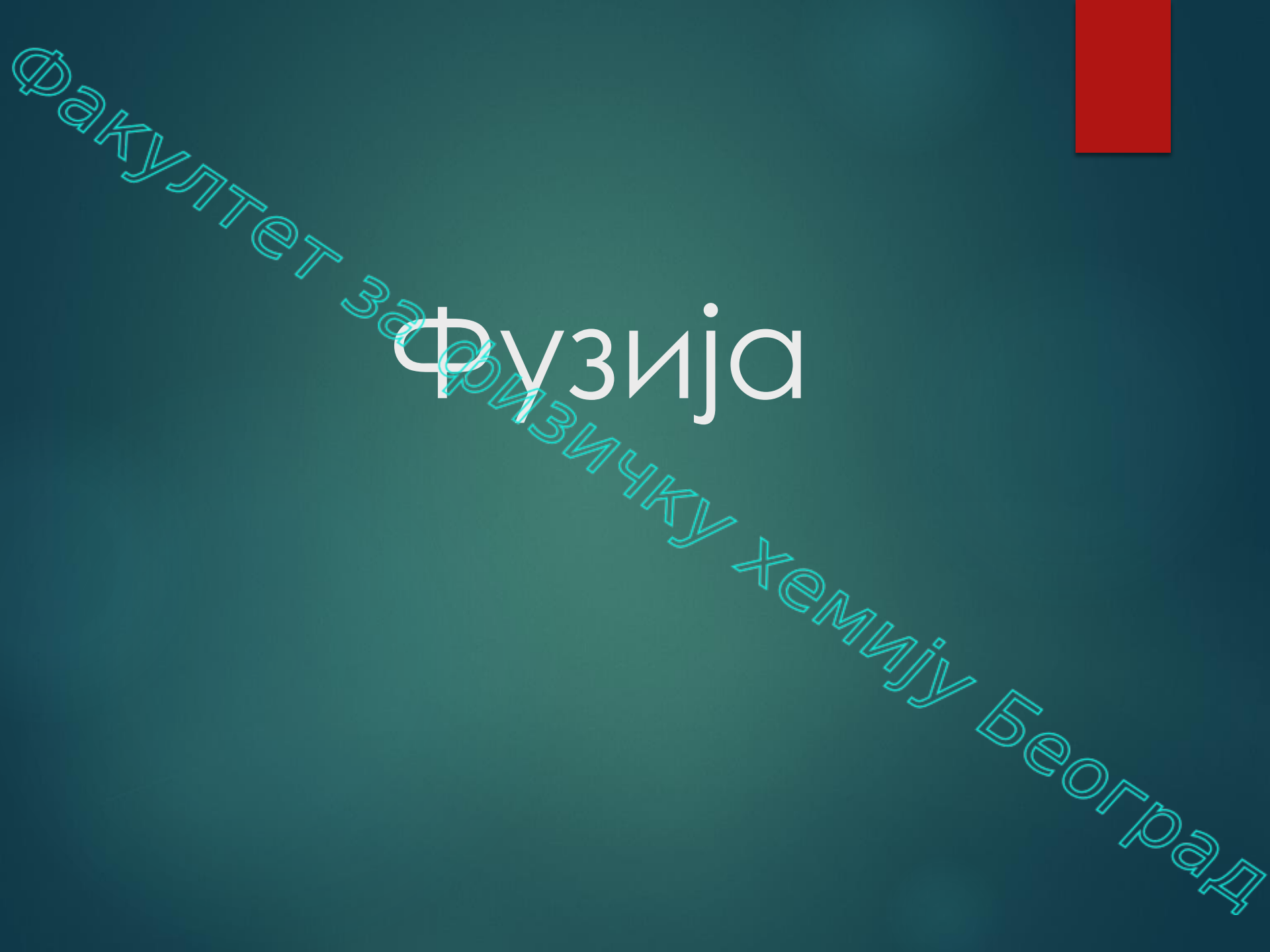
Модели фисије

- ▶ Bohr-Wheeler-ов модел фисије
- ▶ Увођењем деформације облика језгра уместо симетричног у моделу течне капи добија се



- ▶ Модел течне капи не објашњава спонтану фисију метастабилних језгара између уранијума и калифорнијума
- ▶ Strutinsky је модификао потенцијал капи да би објаснио фисибилне изомере и асиметричну расподелу

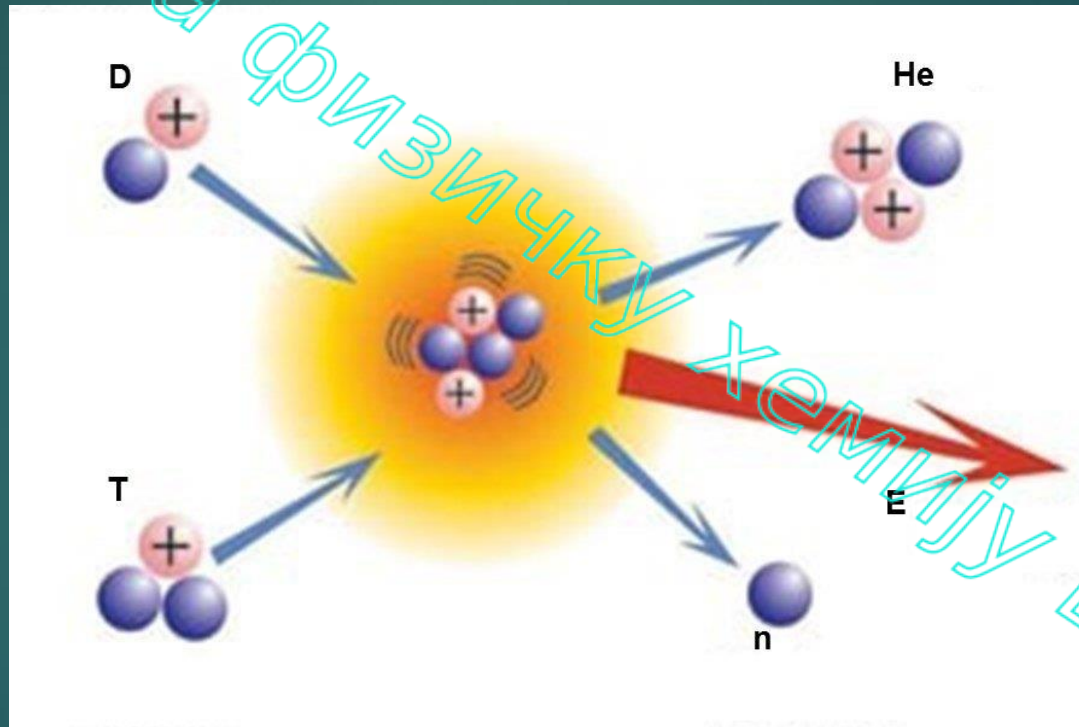




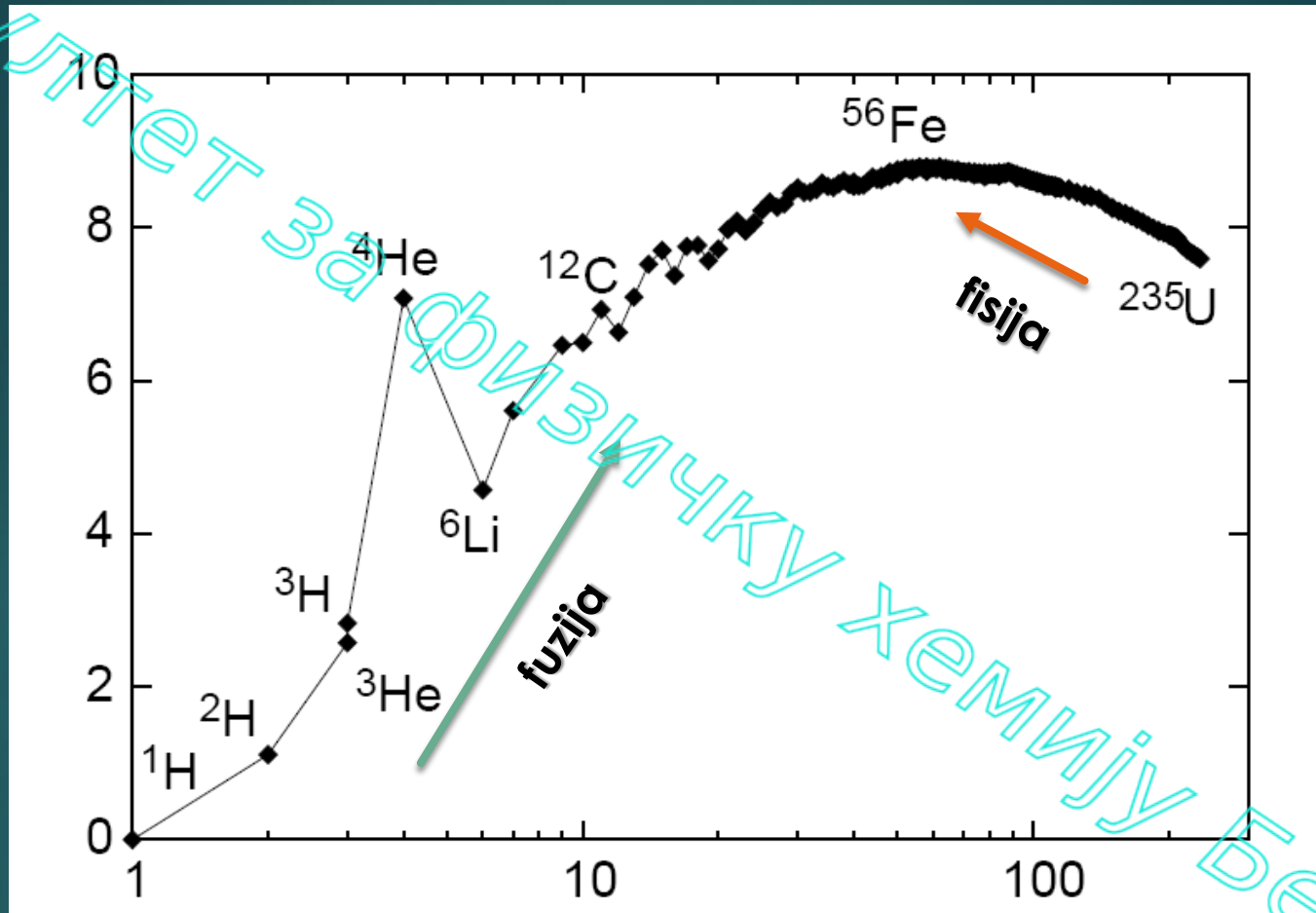
Факултет за физичку хемију Београд

Фузија

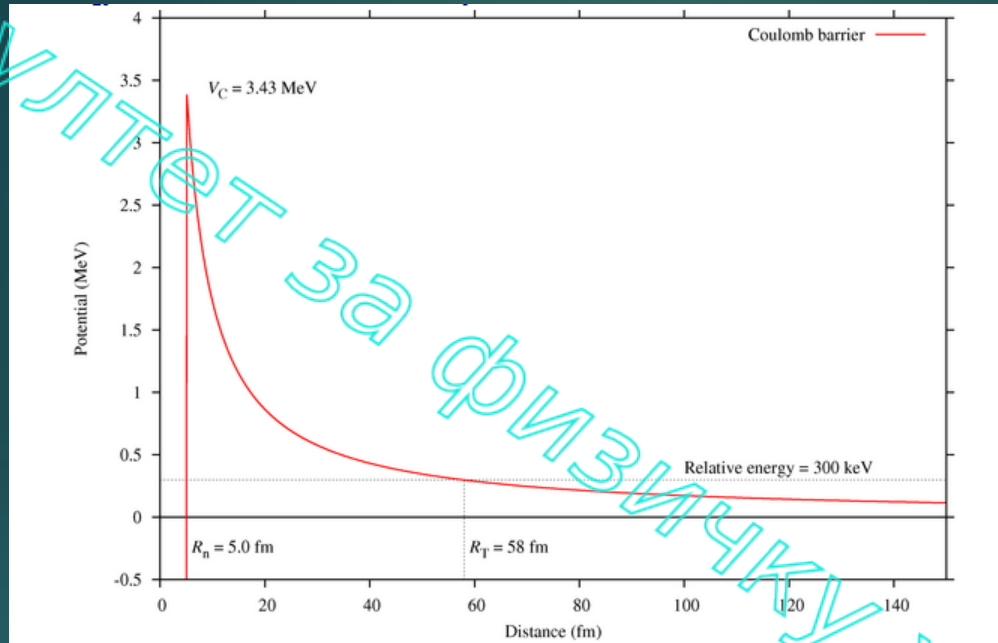
фузијом се назива процес у којем долази до спајања два (не нужно) лака језгра при чему настаје тежи атом и ослобађа се велика количина енергије



Откуда ослобођена енерија у фузији ?



Кулонова баријера за процес фузије



$^{12}\text{C} + ^4\text{He}$ фузија

$$V_c = \frac{Z_X Z_Y e^2}{R_N} = \frac{Z_X Z_Y e^2}{r_0 \left(A_x^{1/3} + A_Y^{1/3} \right)}$$

Стога реакција фузије има праг и

за њено одвијање реакције неопходно је довести довољно енергије реактантима: загревањем, акцелераторима...

Најважније реакције фузије

бр	тип	Реакција	Q(MeV)
1	p-p	$H + H \rightarrow {}^2H + \beta^+ + \nu$	1,4
2	p-d	$H + D \rightarrow {}^3He + \gamma$	5,5
3	p-t	$H + T \rightarrow {}^4He$	19,8
4	d-d	$D + D \rightarrow {}^3He + {}^1_0n$ (50%)	3,27
		$D + D \rightarrow T + H$ (50%)	4,03
5	d-t	$D + T \rightarrow {}^4He + {}^1_0n$	17,6
6	t-t	$T + T \rightarrow {}^4He + {}^1_0n$	11,3
7		$D + {}^3He \rightarrow {}^4He + {}^1_1p$	18,3
8		$D + {}^6Li \rightarrow 2 {}^4He$	22,4

- d-t реакција је најповољнија јер
 - Има најнижи температурни праг
 - Знатно већи ефикасни пресек за све температуре
 - Ослобађа 3,5 пута већу енергију по нуклеону од d-d реакције

Ефикасни пресеци за фузију за важније реакције

