

STRUKTURA ATOMSKE JEZGRE

- izrazito mala ($\sim 10^{-15} \text{ m} = 1 \text{ fm}$) u sredini atoma
 - sadrži SAV pozitivni naboj atoma (protoni)
 - sadrži skoro SVU masu atoma ($> 99.95\%$)
- } RUTHERFORD
& Geiger
& Marsden
(1908-1913)

JEZGRA = NUKLEONI + JAKA NUKLEARNA SILA !

- protoni (p^+) - $1.00728 \text{ Da} = \underline{938.3 \text{ MeV}/c^2}$
- neutroni (n^0) - $1.00866 \text{ Da} = \underline{939.6 \text{ MeV}/c^2}$

Jaka nuklearna sila (rezidualna)

- privlačna (neg E_p) između nukleona
- puno jača od EM (na malim udaljenostima)
- puno kraćeg doseg od EM

$$\underline{1 \text{ Dalton}} = \frac{m(^{12}_6\text{C})}{12} = 1.6605 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

(pada eksponencijalno $\sim e^{-r}$, a ne kvadratno $\sim \frac{1}{r^2}$ kao EM)

→ ravnotežno stanje VELIKE

NEGATIVNE potencijalne energije

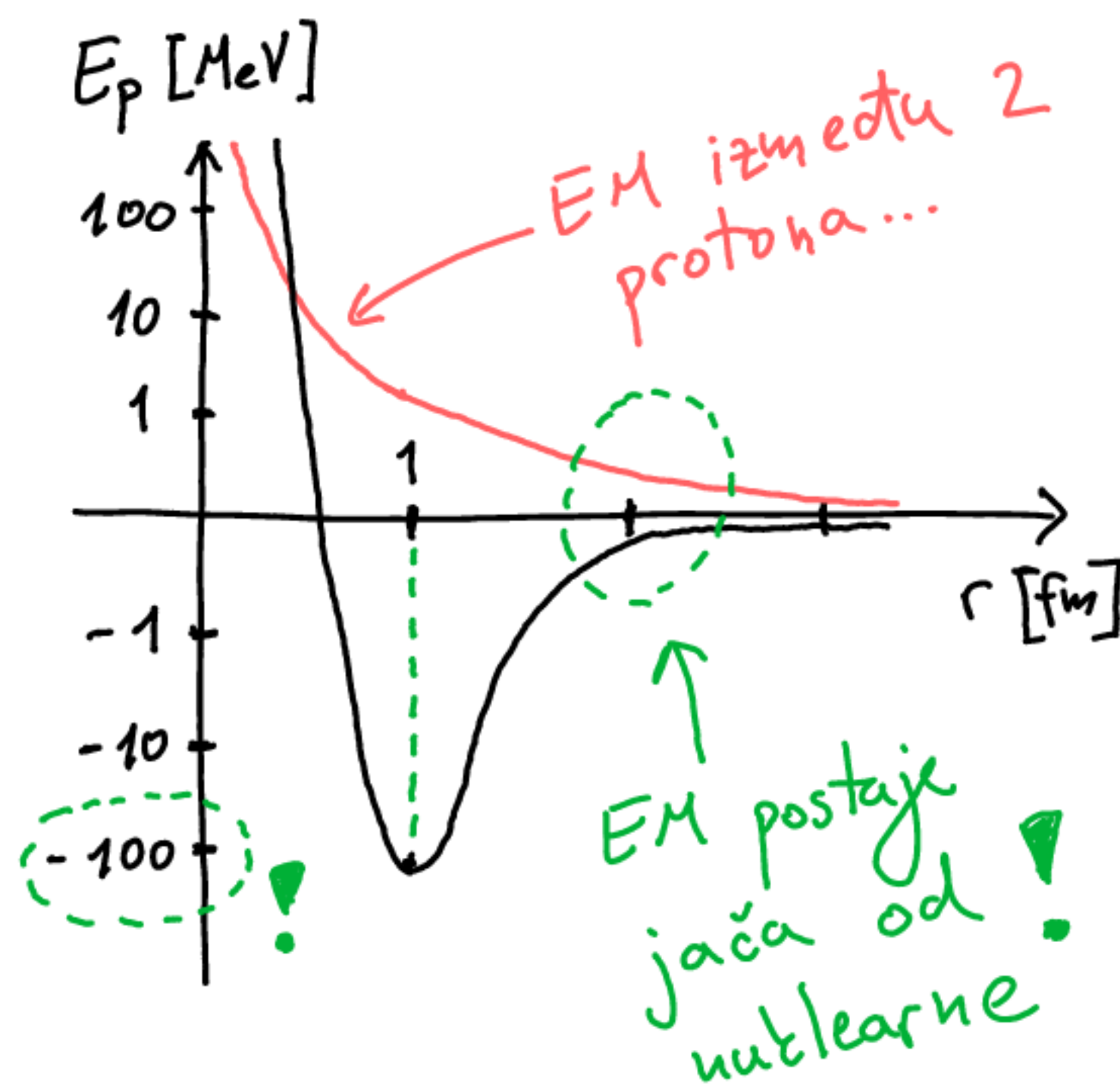
($\sim 100 \text{ MeV}$, $\sim 10\%$ mase nukleona)

na $r \sim 1 \text{ fm}$ udaljenosti između središta 2 nukleona

→ na $\sim 0.7 \text{ fm}$ VELIKA odbojna sila

→ na $\sim 2 \text{ fm}$ nuklearna sila ~ 0 ,

dakle EM prevladava !



$\Rightarrow$ NUKLEONI se ponašaju kao MEKANE KUGLICE promjera $\sim 1 \text{ fm}$ koje se JAKO privlače ako se dodiruju, ali inače ne uopće (npr. 2 „kuglice“ koje nisu susjedne)

$\rightarrow$ neutroni u jezgri „služe“ tome da „razmažu“ protone jer se oni odbijaju EM silom i na većim udaljenostima, ne samo među „susjedima“!

NUKLID $\left({}^A_Z X \right)$ — jezgra atoma (službena terminologija)

$\hookrightarrow A$ (maseni broj) = $Z + N \rightarrow \# \text{ neutrona}$
 $\hookrightarrow$ atomski broj ($\# \text{ protona}$)

— izotopi (isti Z , različit N)

— srednja nukleonska masa: $\frac{m({}^A_Z X)}{A}$

— DEFEKT MASE: $(Z \cdot m_p + N \cdot m_n) - m({}^A_Z X) = \underline{\underline{\Delta m}}$!

$\Rightarrow$ fali masa! Odatle? $\rightarrow$ neg. pot. energija jače nuklearne sile $\left(\Delta m = \frac{E_{p,uk}}{c^2} \right)$

$\rightarrow$ srednja energija vezanja po nukleonu: $\frac{\Delta m}{A} (\cdot c^2)$
 $\sim 8 \pm 1 \text{ MeV}$ za veliku većinu stabilnih nuklida

— max je ${}^{62}\text{Ni}$, ${}^{58}\text{Fe}$, ${}^{56}\text{Fe}$ ($\sim 8.79 \text{ MeV}$)

$\rightarrow$ zato ih ima puno ($\sim 35\%$ mase zemlje)

NUKLEARNI PROCESI

→ bilo kakva promjena stanja atomske jezgre;
npr. apsorpcija ili emisija energije ili nukleona

→ pravila (koja svi nukl. procesi moraju zadovoljavati):

- 1) zakon očuvanja naboja*
- 2) zakon očuvanja broja nukleona ($\#A$)
- 3) zakon očuvanja energije*
- 4) zakon očuvanja količine gibanja*
(i pravocrtne i kutne)

* fundamentalni
zakoni prirode
(uvijek vrijede)

→ podjela:

- SPONTANI (dogode se sami od sebe)

↳ RADIOAKTIVNOST

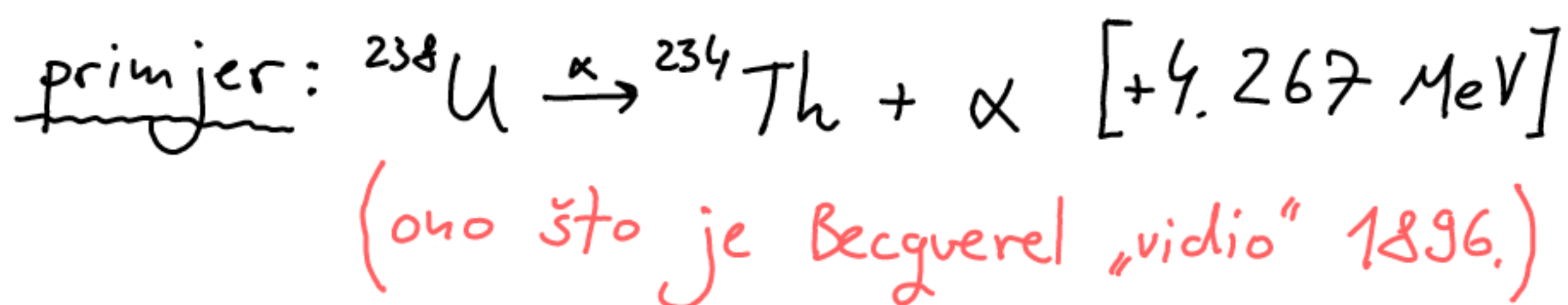
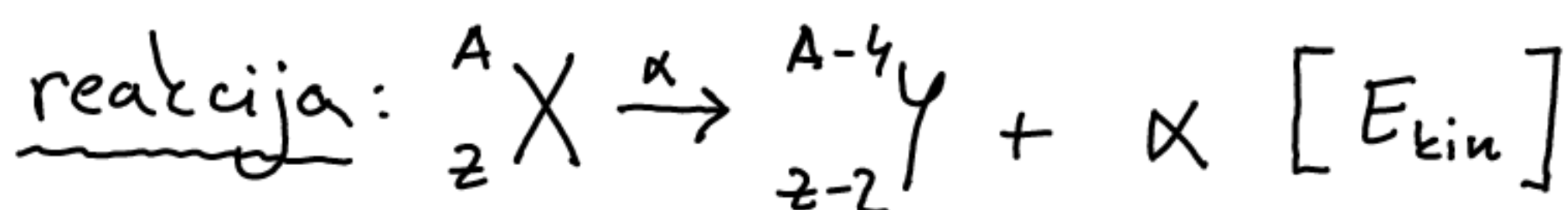
- POTAKNUTI (potreban je vanjski poticaj / energija)

↳ nuklearne reakcije (FUZIJA, FISIJA)

→ RADIOAKTIVNOST - spontani nuklearni proces u kojem iz jezgre izlazi neka čestica/energija

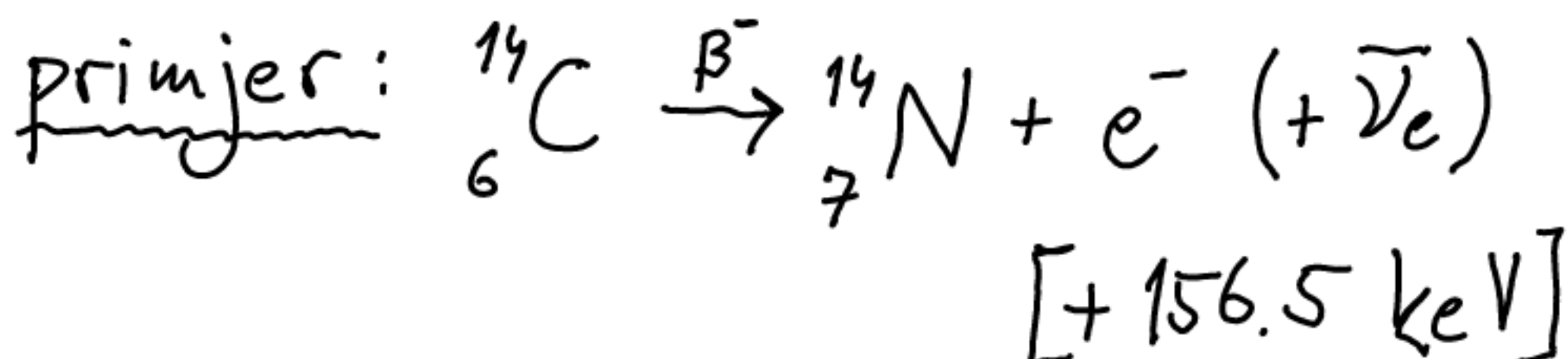
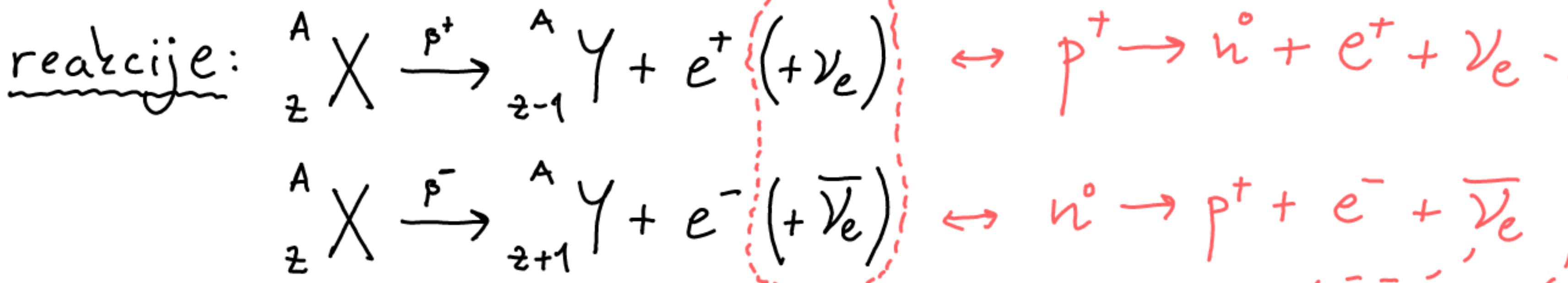
- povijest ⁽¹⁸⁹⁶⁾ (H. Becquerel, M. Curie, P. Curie, E. Rutherford, ...)

- vrste: 1) α -zračenje - oslobađanje jezgri ${}^4_2\text{He}$ (α čestice)
- posljedica jake nuklearne i EM sile



2) $\beta^\pm$ -zračenje - izbacivanje elektrona/pozitrona (i neutrina) zbog pretvorbe protona u neutron ili obrnuto
- posljedica SLABE (nuklearne) SILE

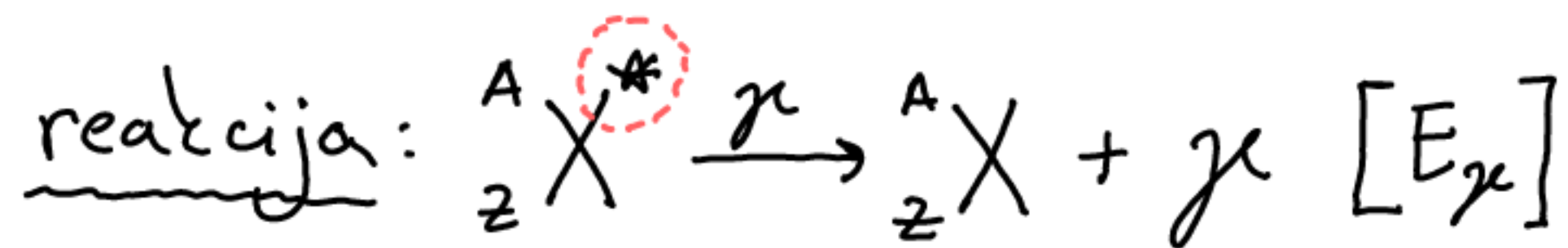
Neutrini imaju masu ≈ 0 i EKSTREMNO SLABO reagiraju s bilo čime pa ih se u pravilu ignorira i niti ne piše...



elektronski (anti)neutrino

[zakon očuvanja kol. gib. i zakon očuvanja leptonskog broja (kasnije)]

- 3) γ -zračenje - oslobađanje jednog fotona (γ -zrake)
- prijelaz iz pobuđenog u niže tj. osnovno stanje jezgre
- posljedica jake nuklearne i EM sile



primjeri: ${}^{133}\text{Ba}$, ${}^{60}\text{Co}$, ${}^{152}\text{Eu}$, ${}^{22}\text{Na}$, ...

- 4) uhvat elektrona - jezgra "pojede" elektron...



- slično kao β^+ proces...

- 5) emisija protona

- 6) emisija neutrona

- 7) spontana fisija

$\left\{ \begin{array}{l} \text{rijetki} \\ \text{procesi} \end{array} \right\}$

: (razne kombinacije i "egzotični" procesi...)

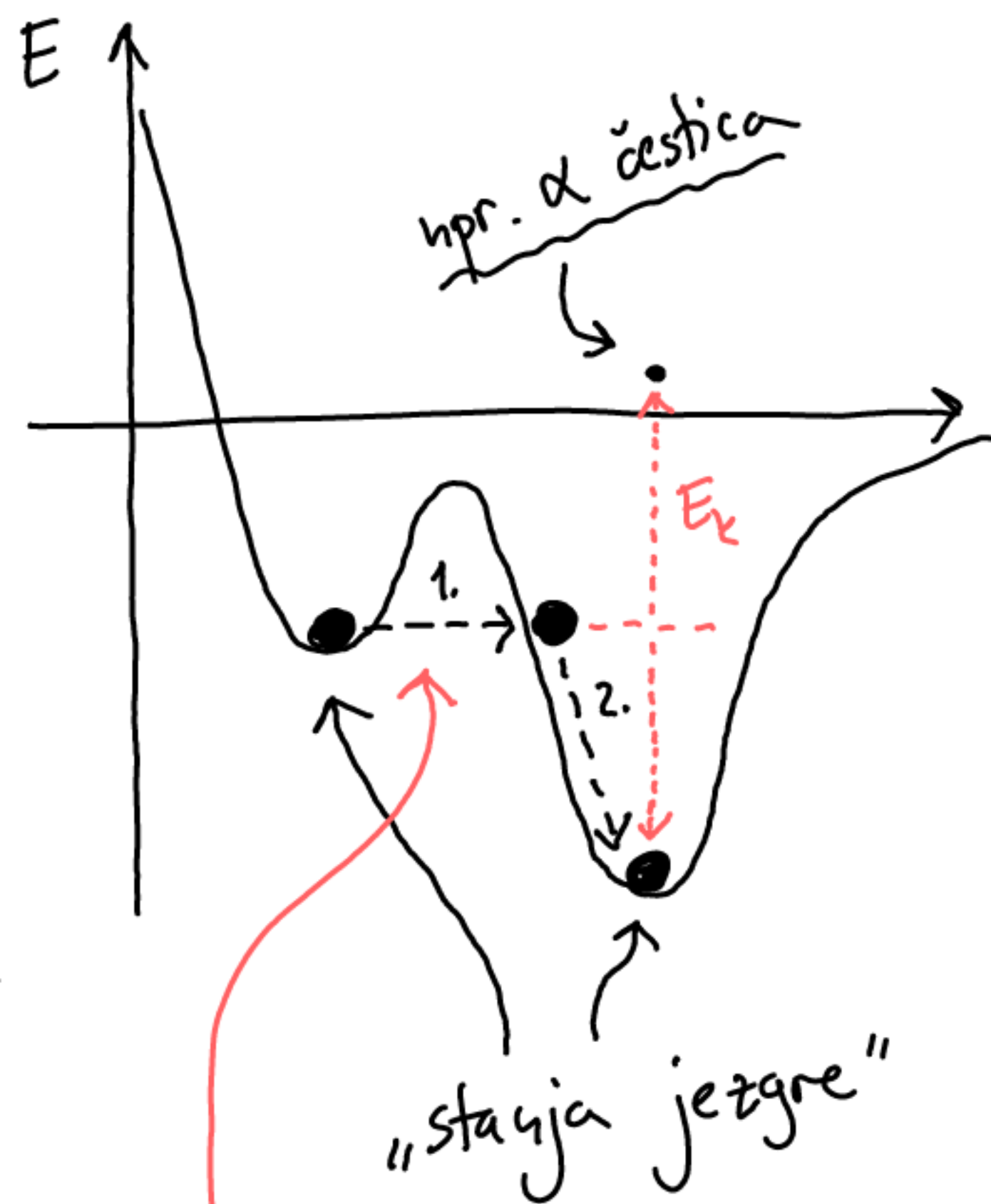
Pitanje: zašto dolazi do radioaktivnosti??

U klasičnoj fizici nije moguć proces kojim sustav priđe iz jednog naizgled stabilnog stanja u drugo, sam od sebe, spontano... !

ODGОВOR: KVANTNO TUNELIRANJE!

↳ U kvantnoj stanje = valna funkcija
+ Bornovo pravilo (amplituda valne
funkcije određuje vjerojatnost)

⇒ postoji vjerojatnost da se jezgra
nađe u drugom stanju koje je
STABILNIJE (niže energije), makar
u njega ne bi mogla doći po
klasičnoj fizici ("tunnelira" kroz
barijeru)



→ vjerojatnost je određena detaljima stanja/jezgre/atoma ...

↳ što je veća to je kraće VRJEME ŽIVOTA tog stanja
(i obrnuto)

[u prosjeku brže "pobjegne" iz tog
stanja, ali svaki pojedini slučaj je
drugačiji - fundamentalni probabilizam
kvantne teorije - stohastičan proces]

Recimo da imamo UZORAK s N radioaktivnih jezgara (radionuklida) A_ZX koje se raspadaju, dakle njihov broj se mijenja, tj. smanjuje $\left(N(t), \frac{\Delta N}{\Delta t} < 0\right) \dots$

Broj raspada u jedinici vremena bit će to veći što je veći broj jezgara u uzorku, dakle $\frac{\Delta N}{\Delta t} \propto N$, i što je veća vjerojatnost pojedinog raspada (a to ovisi samo o vrsti jezgre, dakle konstantno je za uzorak)...

$$\Rightarrow \frac{\Delta N}{\Delta t} \propto -\lambda \cdot N \xrightarrow{\lim_{\Delta t \rightarrow 0}} \boxed{\frac{dN}{dt} = -\lambda \cdot N}$$

„konstanta raspada“

AKTIVNOST UZORKA ($A = \lambda \cdot N$)

→ broj raspada u jedinici vremena

! → 1 Bq [Becquerel] = $\frac{1}{s}$

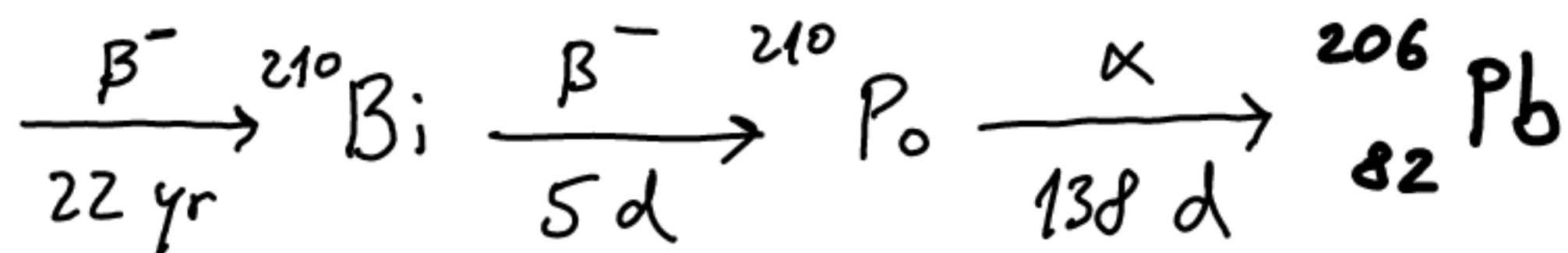
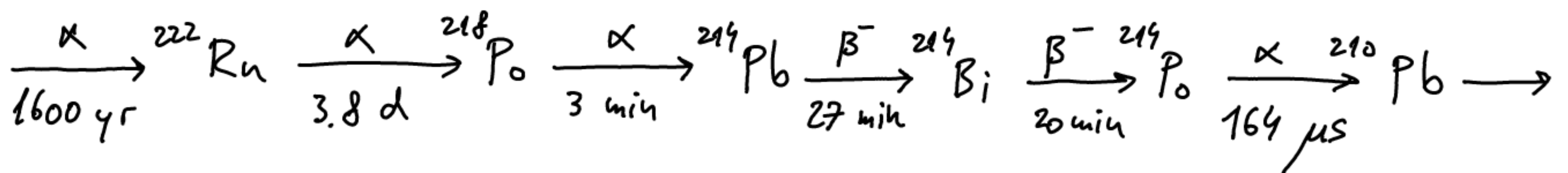
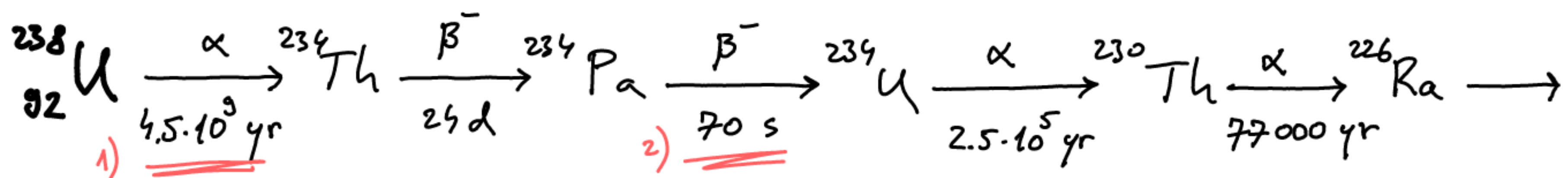
$$\Rightarrow \text{rješenje: } \boxed{N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}} \quad \text{ZAKON RADIOAKTIVNOG RASPADA}$$

$$\rightarrow \text{za } t=0 : e^0 = 1 \Rightarrow N(0) = N_0$$

$$\rightarrow \text{za } t = T_{1/2} : \frac{N_0}{2} = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot T_{1/2}} \Rightarrow \boxed{T_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda}}$$

↑
VRIJEME POLURASPADA

Primjer radioaktivnog raspada: URANSKI NIZ (Wikipedia)



$$\left. \begin{array}{l} \text{1) } m(\alpha) = 3727 \text{ MeV}/c^2 \\ m({}_{92}^{238}\text{U}) = 221743 \text{ MeV}/c^2 \\ m({}_{90}^{234}\text{Th}) = 218010 \text{ MeV}/c^2 \end{array} \right\} \underline{E_{\text{kin}, \alpha} \approx 6 \text{ MeV}}$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{2) } m(e^-) = 0.51 \text{ MeV}/c^2 \\ m({}_{91}^{234}\text{Pa}) = 218009.96 \text{ MeV}/c^2 \\ m({}_{92}^{234}\text{U}) = 218007.76 \text{ MeV}/c^2 \end{array} \right\} \underline{E_{\text{kin}, e^-} \approx 1.69 \text{ MeV}}$$

→ NUKLEARNE REAKCIJE - promjena jezgre potažnuta vanjskom energijom (kinetičkom/termalnom, ...)

- općenita shema: $X + X \longrightarrow Y + Y$ [kraće: $X(x, y)Y$]
↓ ↓ ↓
projektil meta (nus)produkti

uvijek se može odabrati ref. sustav u kojem „X“ miruje ...

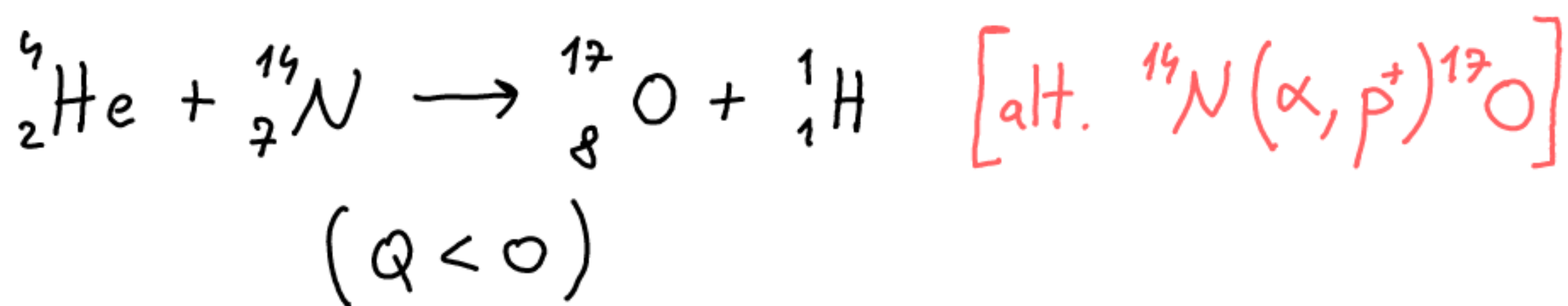
$$\Rightarrow (m_x \cdot c^2 + E_{k,x}) + M_x \cdot c^2 = (M_y \cdot c^2 + E_{k,y}) + (m_y \cdot c^2 + E_{k,y})$$

$$\rightarrow \underline{Q} = E_{k,y} + E_{k,y} - E_{k,x} \\ = [(m_x + M_x) - (m_y + M_y)] \cdot c^2$$

$\left(\underline{Q} > 0 \text{ znači neto dobitak} \right)$
„korisne“ energije, na račun smanjenja mase

tzv. factor dobrote/korisnosti: pojavljuje se posvuda u fizici u različitim oblicima, ali s istom svrhom/namjerom

- primjer (prvi - Blackett/Rutherford 1921)

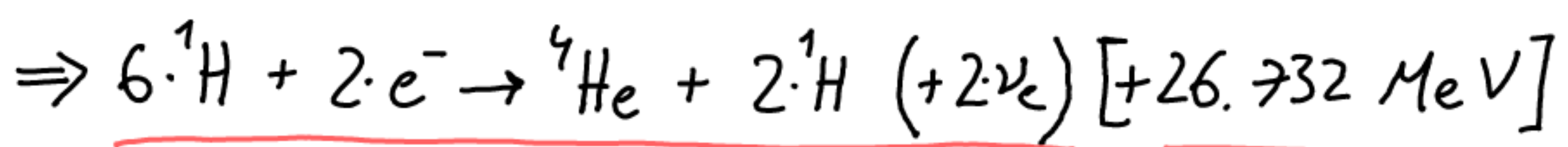
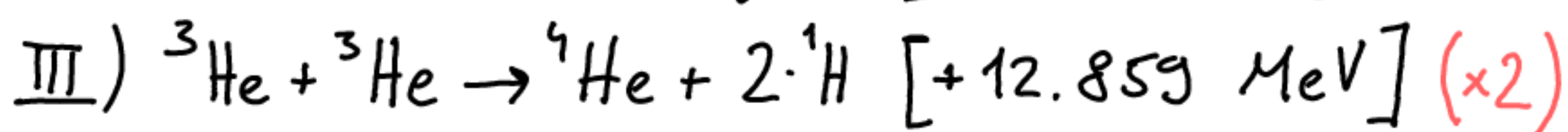
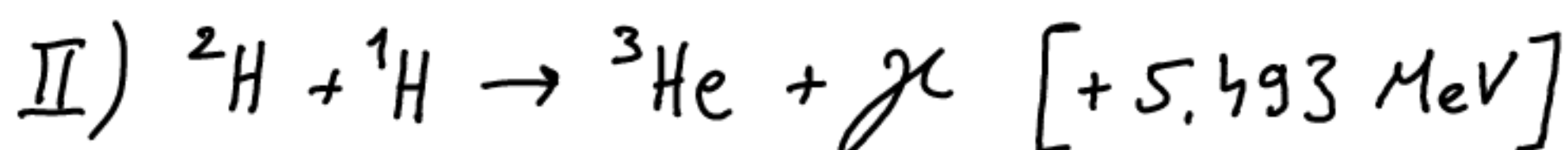
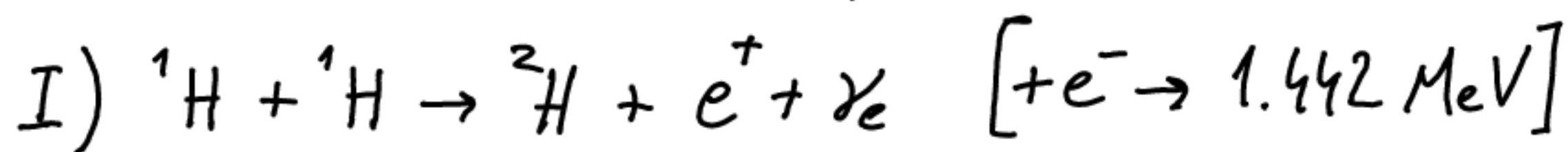


- vrste: Fuzija - manje jezgre u veće (+ ostatak)
Fisija - veća jezgra u više manjih

→ FUZIJA - do ^{56}Fe ili ^{62}Ni uglavnom $Q > 0$

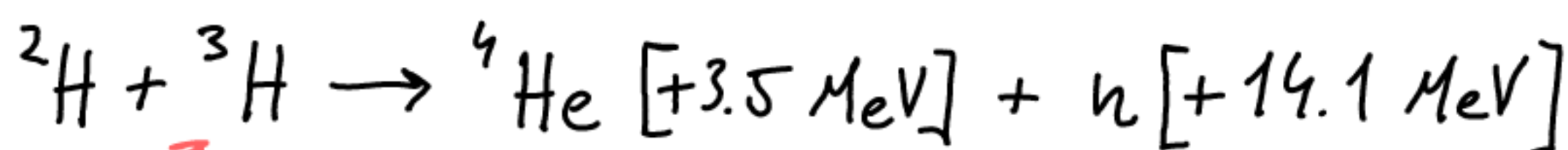
- proces koji "pogoni" zvijezde i kojim su, u zvijezdama, nastali svi atomi teži od He

primjeri : 1) na Suncu (jedan od "puteva"):



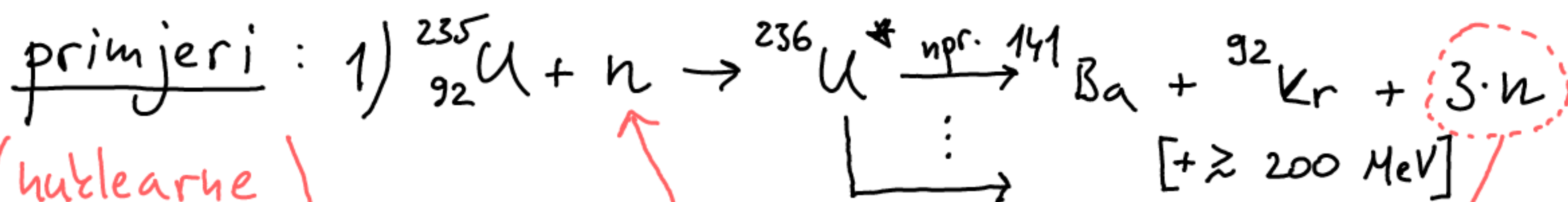
2) u ITER-u (fuzijska elektrana):

(plazma na
 $\sim 10^8 \text{ K}$)



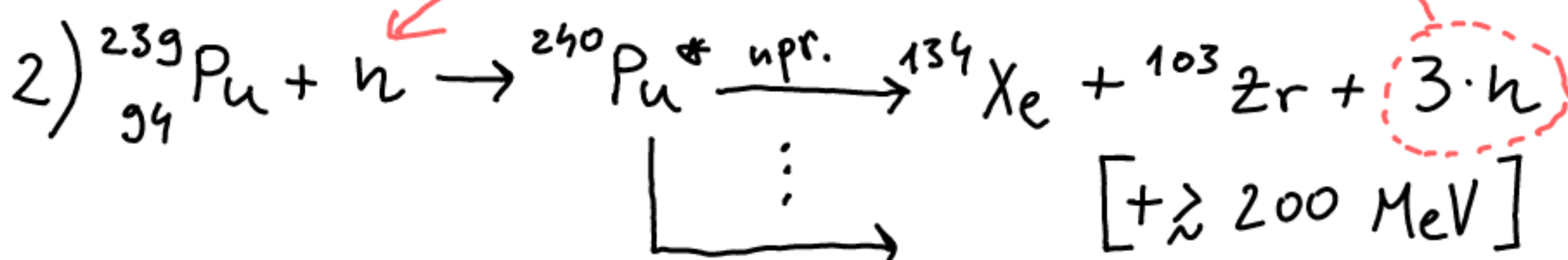
→ FISIJA - poticanje težih jezgri na raspad u 2 ili više "velikih" komada (većih od ${}^4_2\text{He}$)

- ne može se postići sa svim jezgrama...



(nuklearne
elektrane
&
atomske
bombe)

⇒ LANČANE REAKCIJE



DOZIMETRIJA - mjerenje apsorbirane količine
ionizirajućeg zračenja i njegovog efekta

↓
Ono koje uzrokuje ionizaciju atoma/molekula
(a to može uzrokovati oštećenja - materijala,
tkiva, stanica, ...)

- apsorbirana doza $D = \frac{\bar{E}}{m} \left[1 \text{ Gy} = \frac{1 \text{ J}}{\text{kg}} \right]$
↑
"Gray"

- Q-faktor - relativni biološki učinak neke vrste zračenja
(jer nisu sva jednako štetna, nije samo
količina energije bitna nego i vrsta ...)

- ekvivalentna doza $H = Q \cdot D \left[1 \text{ Sv} = \frac{1 \text{ J}}{\text{kg}} \right]$
↑
"Sivert"

↳ primjeri: 1) prosječna godišnja doza (okoliš): 2 mSv

2) let avionom na 10 000 mrv: $4 \frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}}$

(dakle ~1.5h leta je kao 1d na zemlji)

3) >2 Sv: teška radijacijska bolest

4) >6 Sv: smrtonosna doza