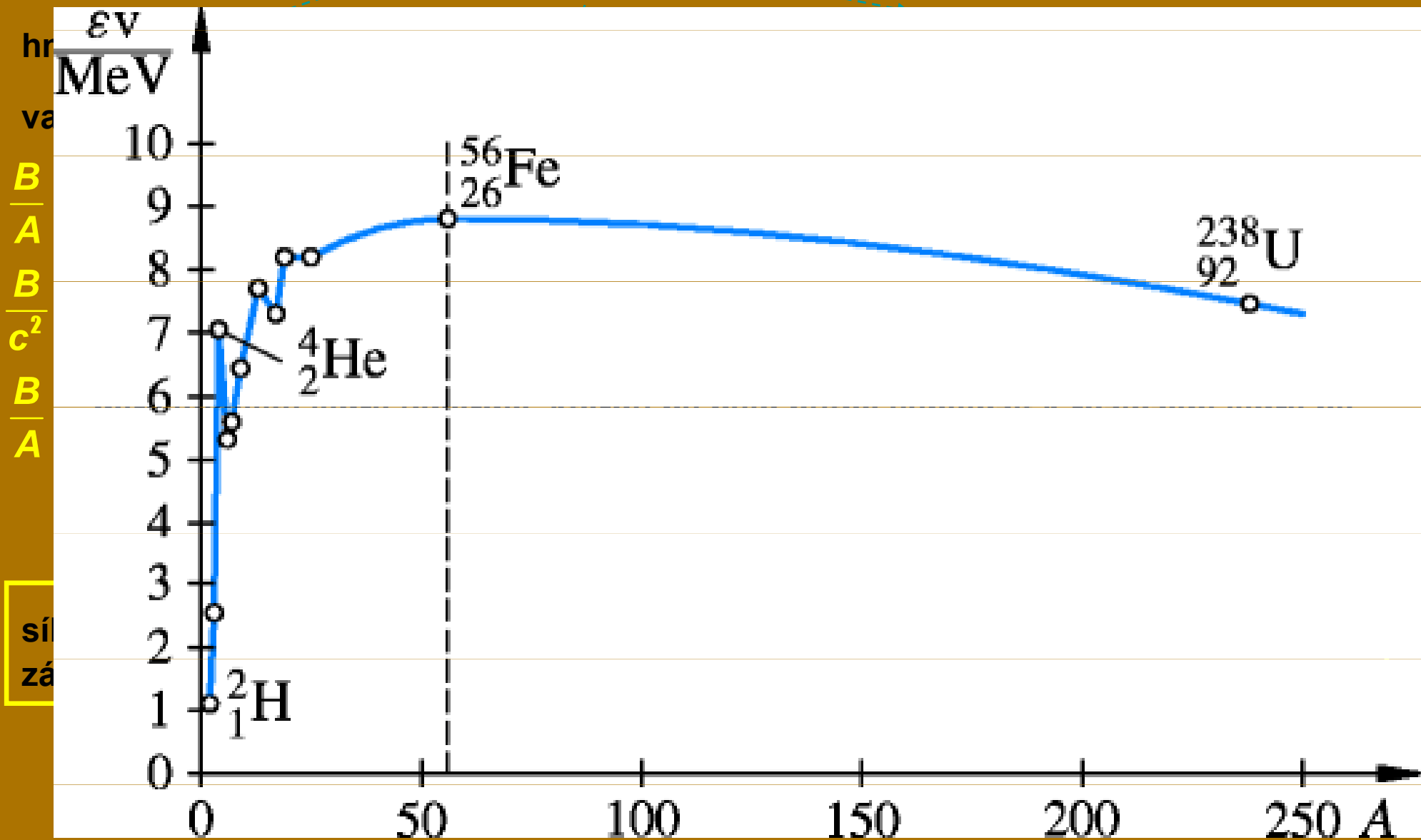


Vazebná energie

$$B = Z \cdot m_H c^2 + (A - Z) m_n c^2 - m_J c^2$$

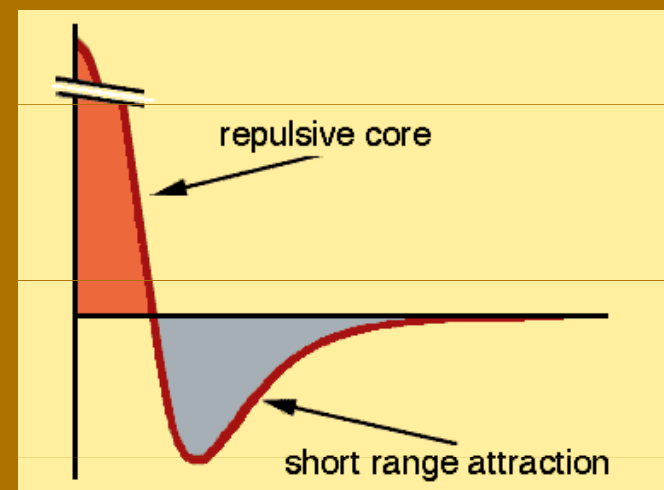
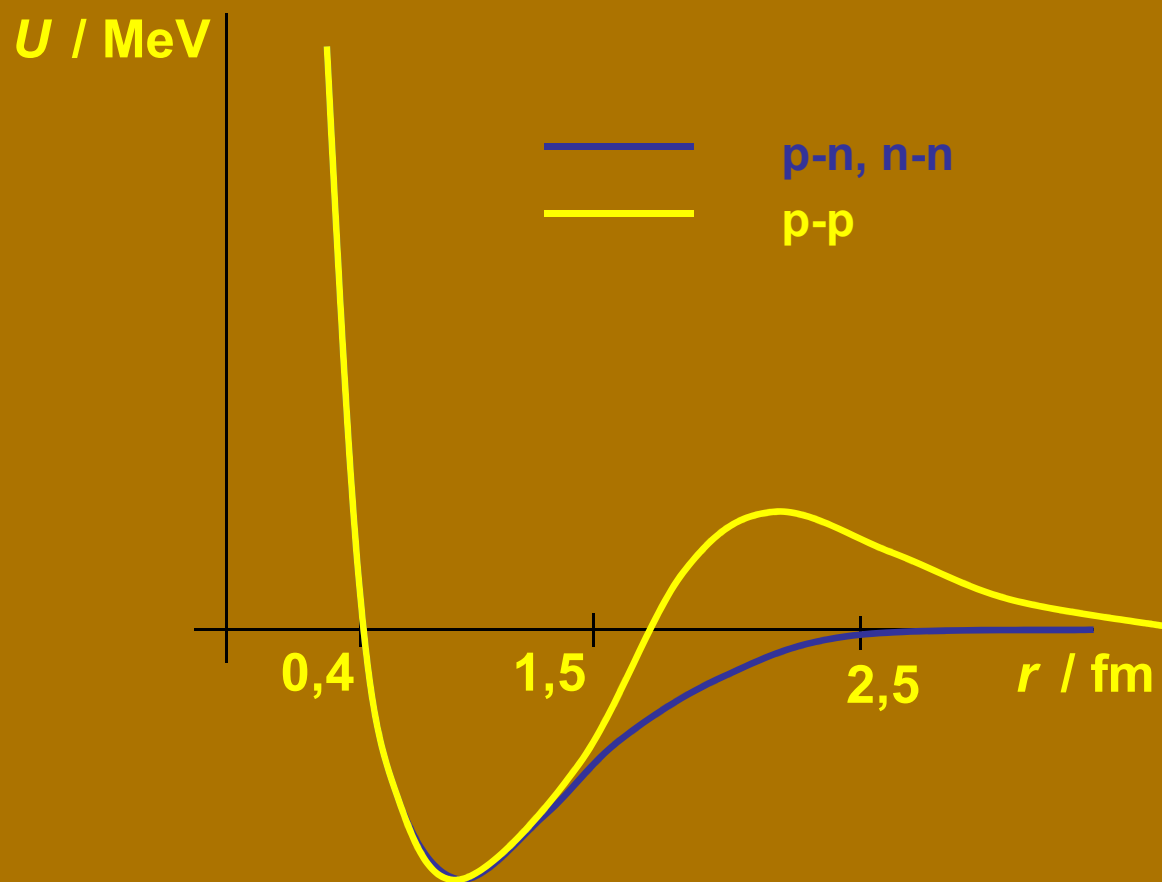


sí
zá

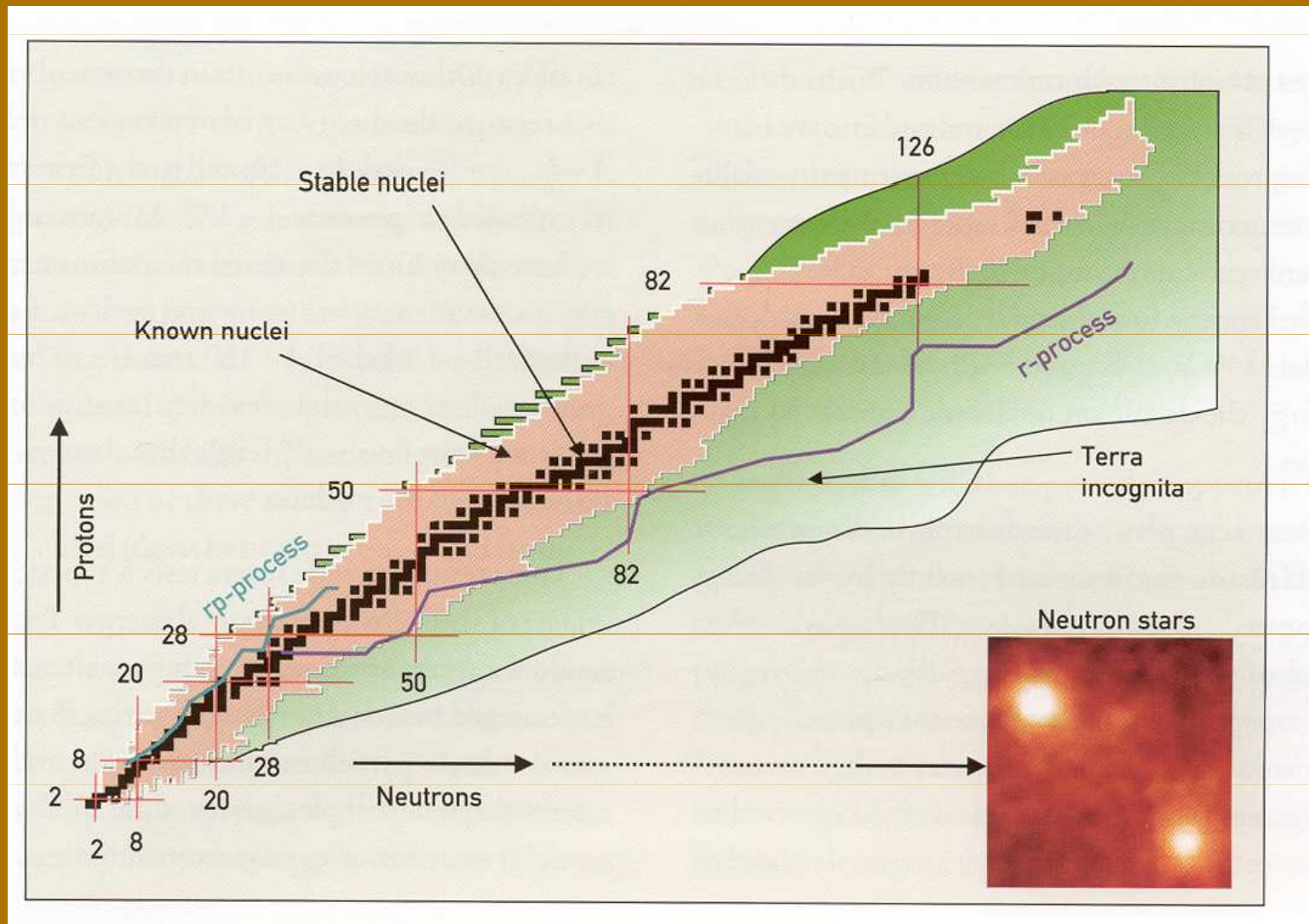
Jaderné síly

Základní vlastnosti jaderných sil:

1. mají krátký dosah

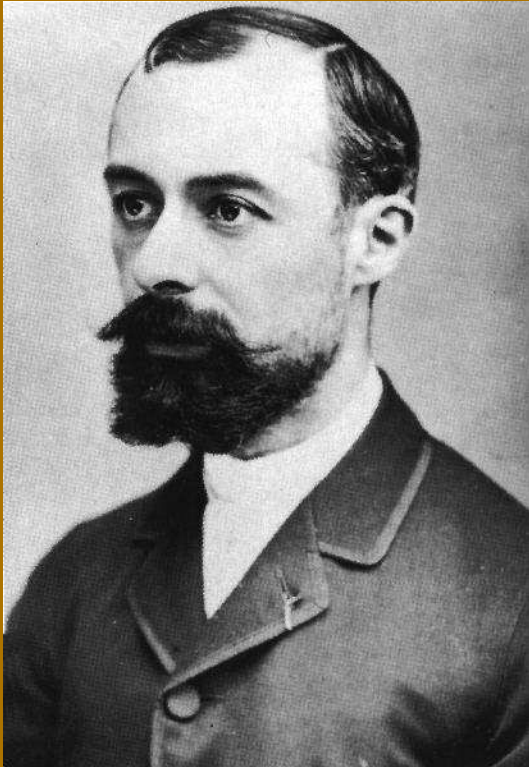


Tabulka nuklidů – údolí stability



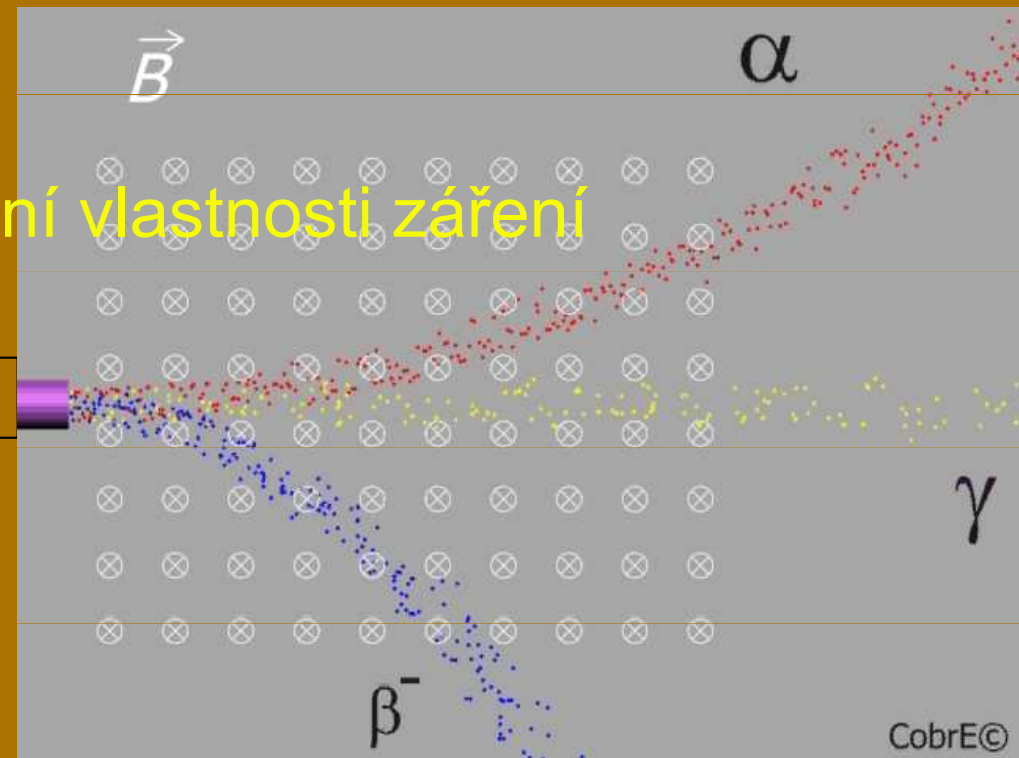
Radioaktivita

Radioaktivita je jev, kdy dochází k samovolné vnitřní přeměně atomových jader, přičemž je emitováno vysokoenergetické záření. Jádra vykazující tuto vlastnost se nazývají radionuklidy.

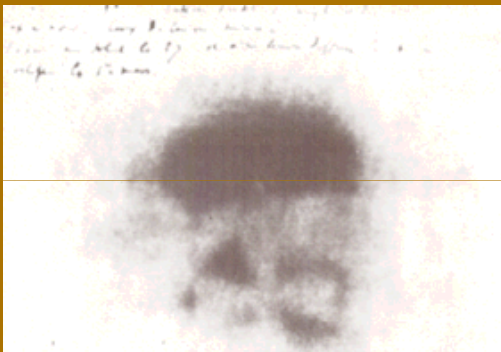


- z některých látek vychází neviditelné pronikavé záření
- záření má 3 složky
- nedá se ovlivnit žádnými fyzikálními ani chemickými procesy
- po roce 1911 \Rightarrow musí pocházet z jádra atomu
- Rutherford: je pouze průvodním jevem přeměny jader

Základní vlastnosti záření

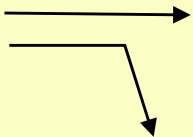
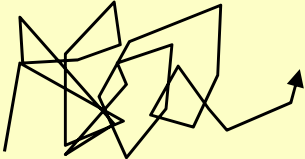
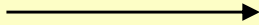


396 Henri Antoine Becquerel (1852-1908)



Radioaktivita

. Objev, základní vlastnosti záření

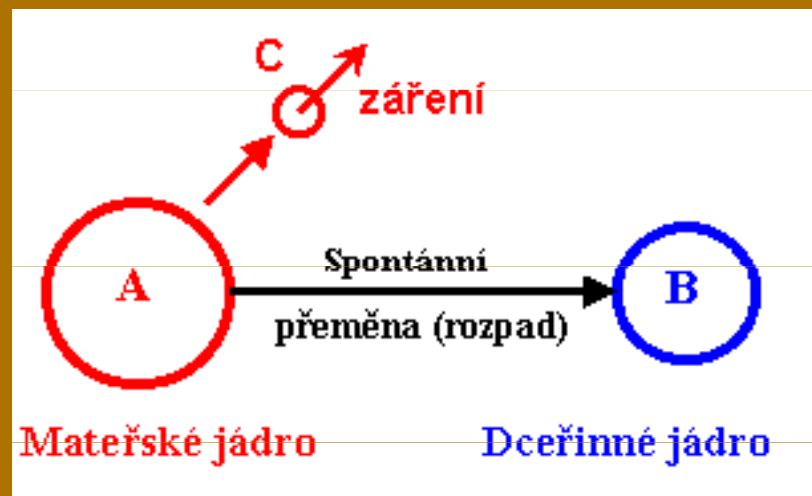
vlastnost	α	β	γ	způsob zjištění
náboj	+2e	-e	0	v magnetickém poli
rychlost	$20 \cdot 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	0,3 – 0,998 c	c	hmot. spektroskopie
schopnost ionizace / i. p. / cm vzduchu	10^5	60 - 100	1	detektory
pronikavost	5 cm vzduch, 0,1 mm Al	3-5 mm Al	velká – nedá se odstínit	detektory
způsob šíření				zobrazovací detektory

Exponenciální zákon radioaktivního rozpadu

Radioaktivní přeměna jader je **stochastický jev**, takže nelze nijak předpovědět čas, za nějž se určité konkrétní jádro přemění. Lze stanovit pouze pravděpodobnost, s jakou se jádro daného druhu rozpadne za jednotku času.

Mějme radioaktivní látku, v níž je v počátečním čase $t=0$ obsaženo celkem N_0 stejných radioaktivních jader A, které se budou postupně přeměňovat na jádra B .

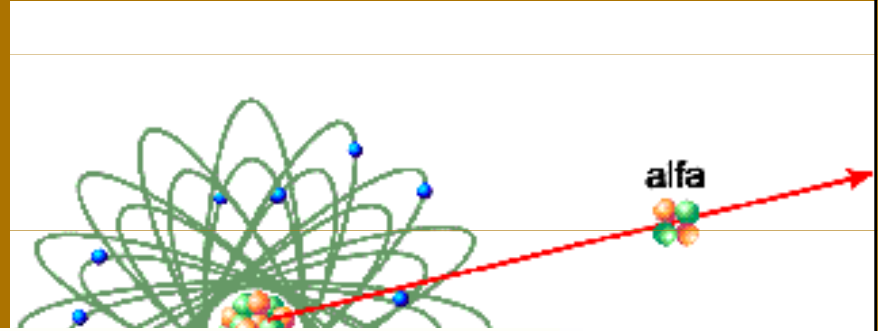
Zajímá nás, jak rychle nám bude ubývat počet mateřských jader A (a tím zároveň přibývat dceřinných jader B) - jinými slovy chceme stanovit funkční závislost $N(t)$ okamžitého počtu N (zbylých) mateřských jader na čase t .



Rozpadový zákon

Místo nepraktické rozpadové konstanty se spíše používá „poločas rozpadu“: T - doba, za kterou se rozpadne právě polovina původního počtu radioaktivních atomů.

$$\frac{N_0}{2} = N_0 \cdot e^{-\lambda T} \quad T = \frac{\ln 2}{\lambda}$$



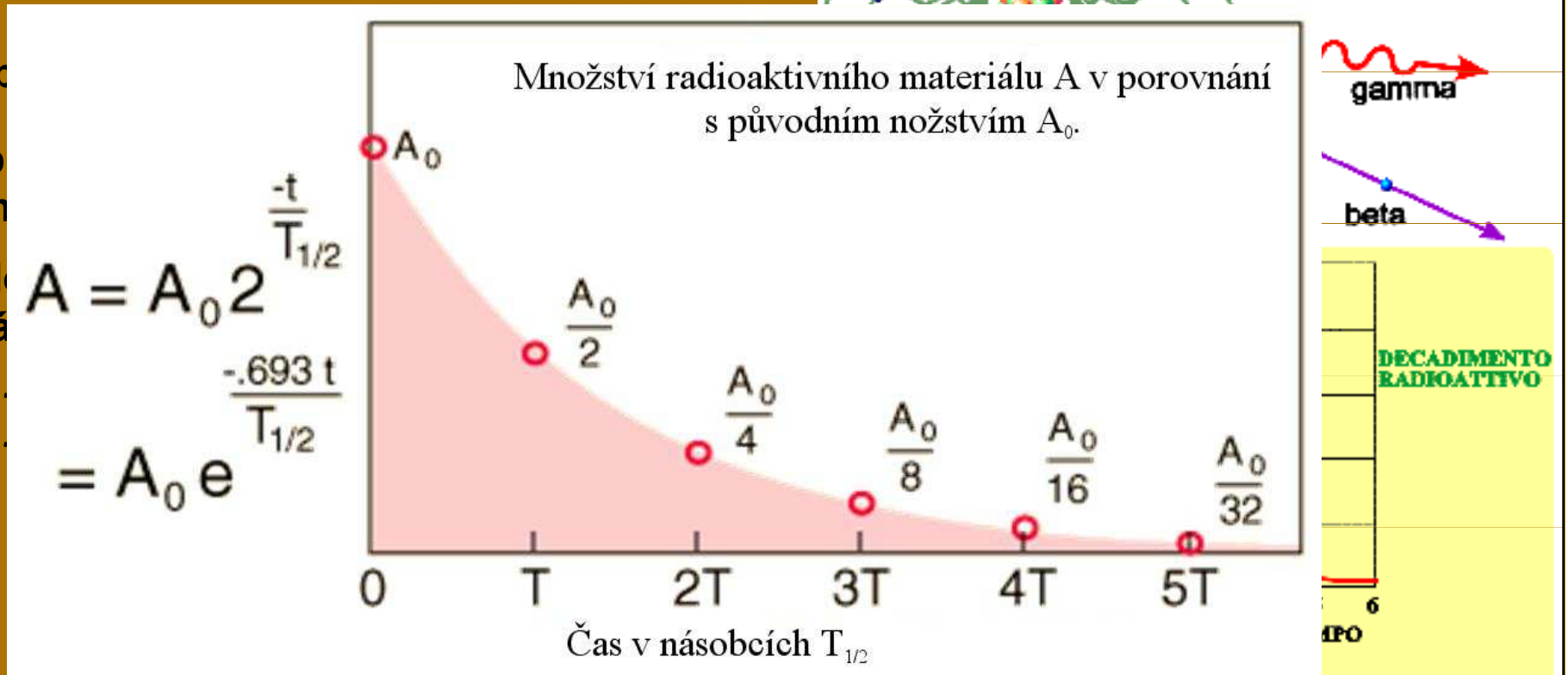
pro různé nuklidy je T od 10^{-20} s do 10^{20} roků

střední doba

problém: p
radioaktivn

pravděpod
že se jedná

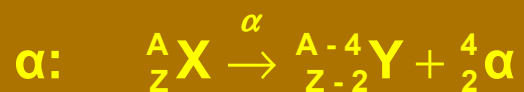
- α rozpad
- β rozpad



T_f = PERIODO DI DIMEZZAMENTO FISICO

Radioaktivní přeměny

Rutherford: radioaktivní záření je projevem přeměny (rozpadu) atomových jader.



přírozená radioaktivita: radioaktivita nuklidů vyskytujících se v přírodě

nejtěžší stabilní nuklid: ${}^{209}_{83}\text{Bi}$ od ${}_{84}\text{Po}$ jsou všechny prvky radioaktivní

A se při obou druzích radioaktivní přeměny mění buď o 4 nebo se nemění.

přírozeně radioaktivní nuklidy jsou proto součástí 4 radioaktivních řad:

- řada typu $4n$: thoriová



- řada typu $4n+1$: neptuniová



- řada typu $4n+2$: uranová



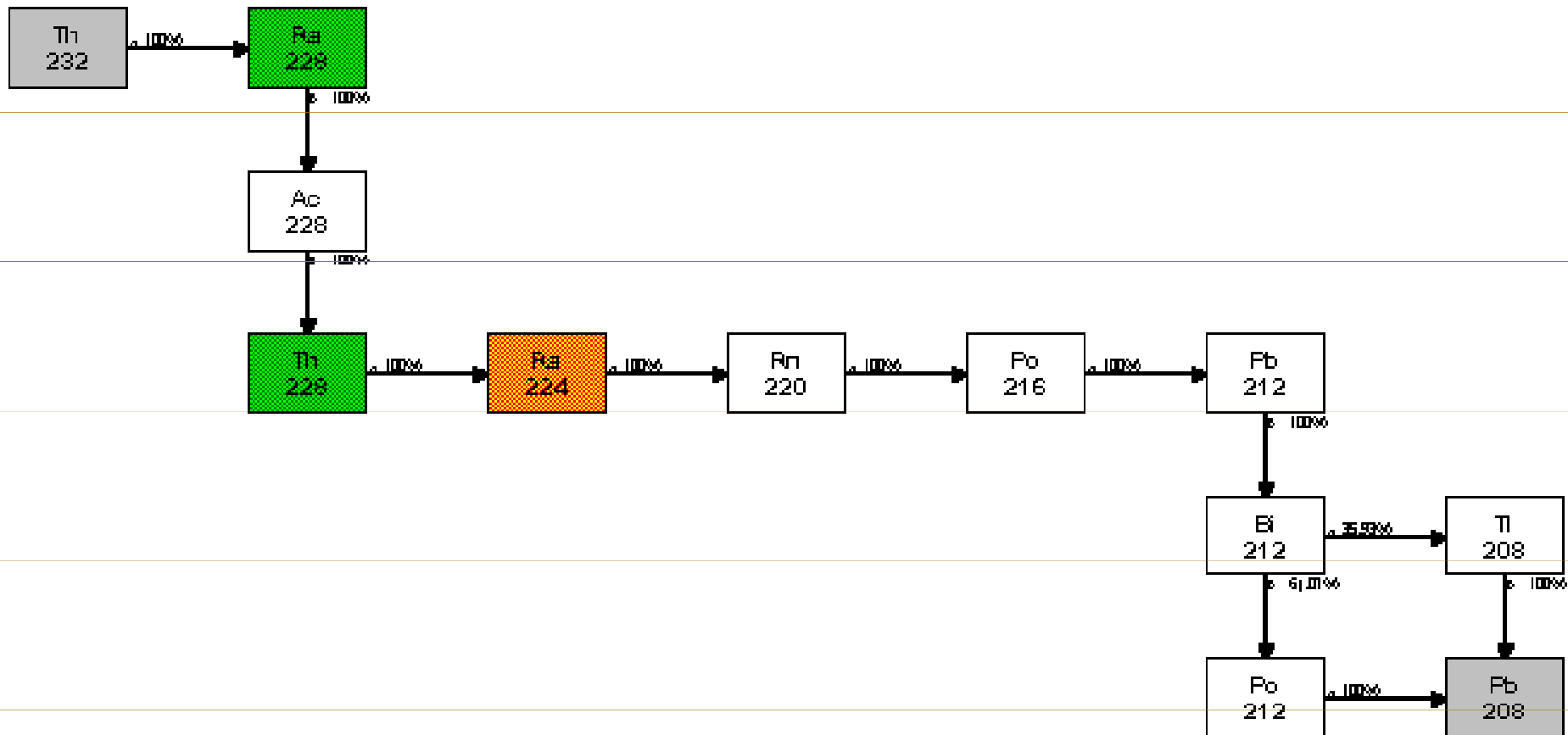
- řada typu $4n+3$: aktiniová



Ize jednoduše vypočítat, ke kolika přeměnám α a ke kolika přeměnám β v řadě došlo

Radioaktivní přeměny

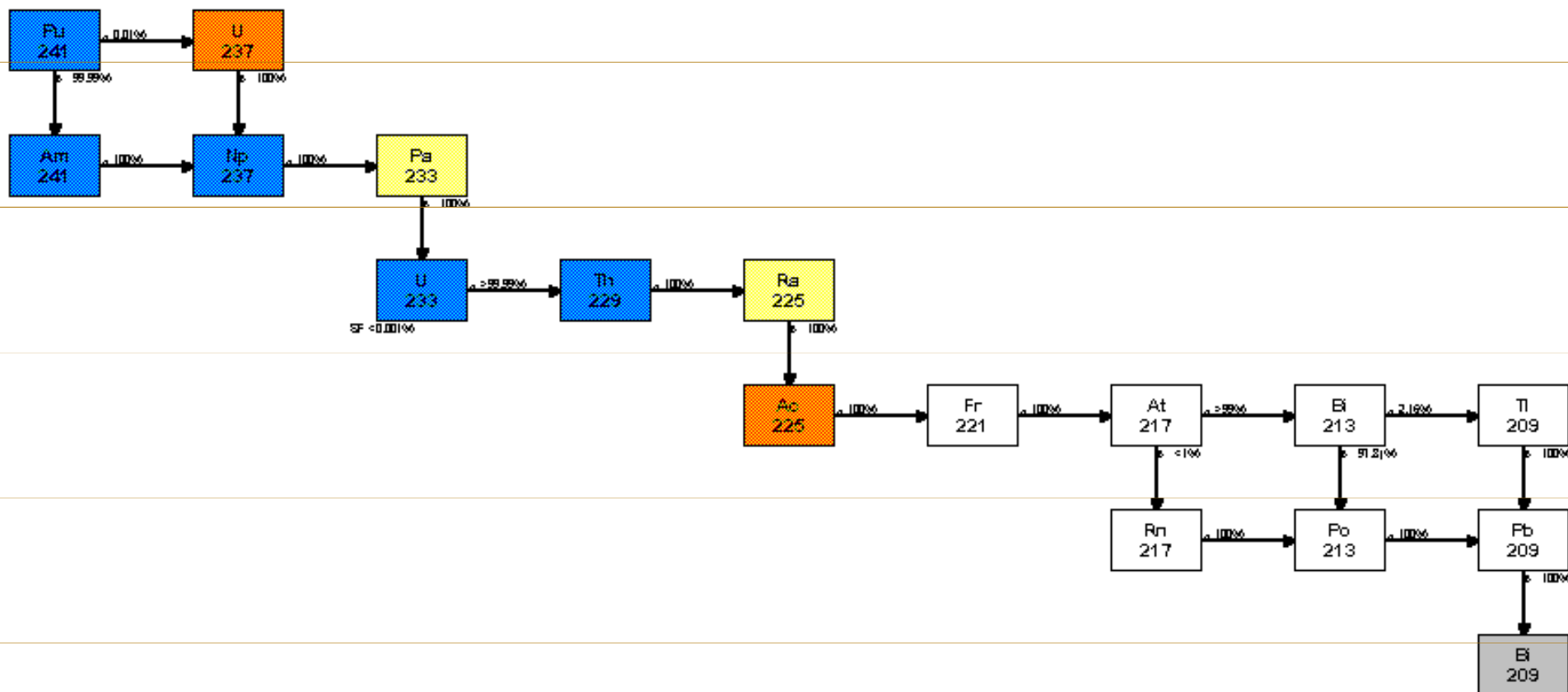
- řada typu 4n: thoriová



5. Radioaktivita

5.3. Radioaktivní přeměny

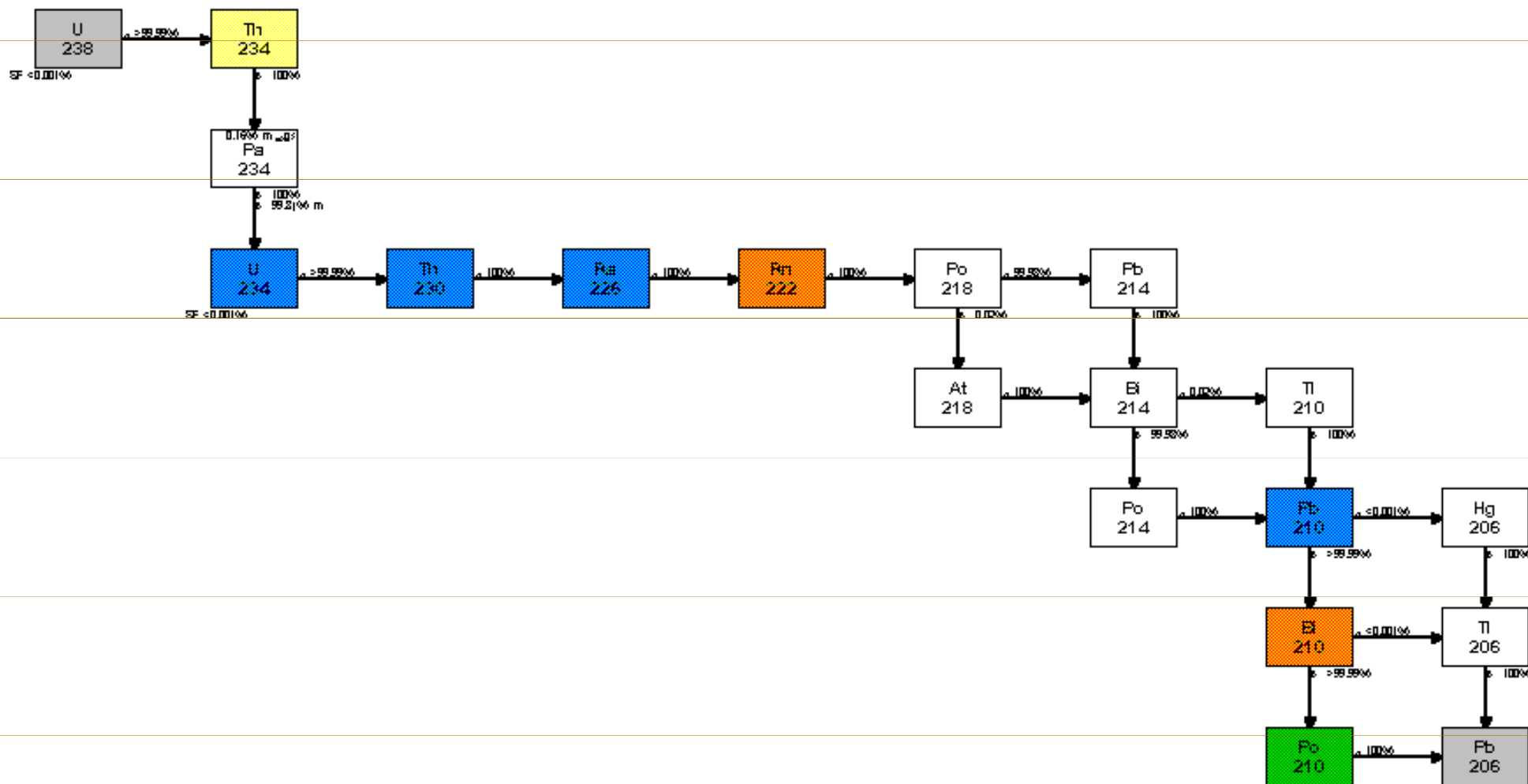
- řada typu $4n+1$: neptuniová



5. Radioaktivita

5.3. Radioaktivní přeměny

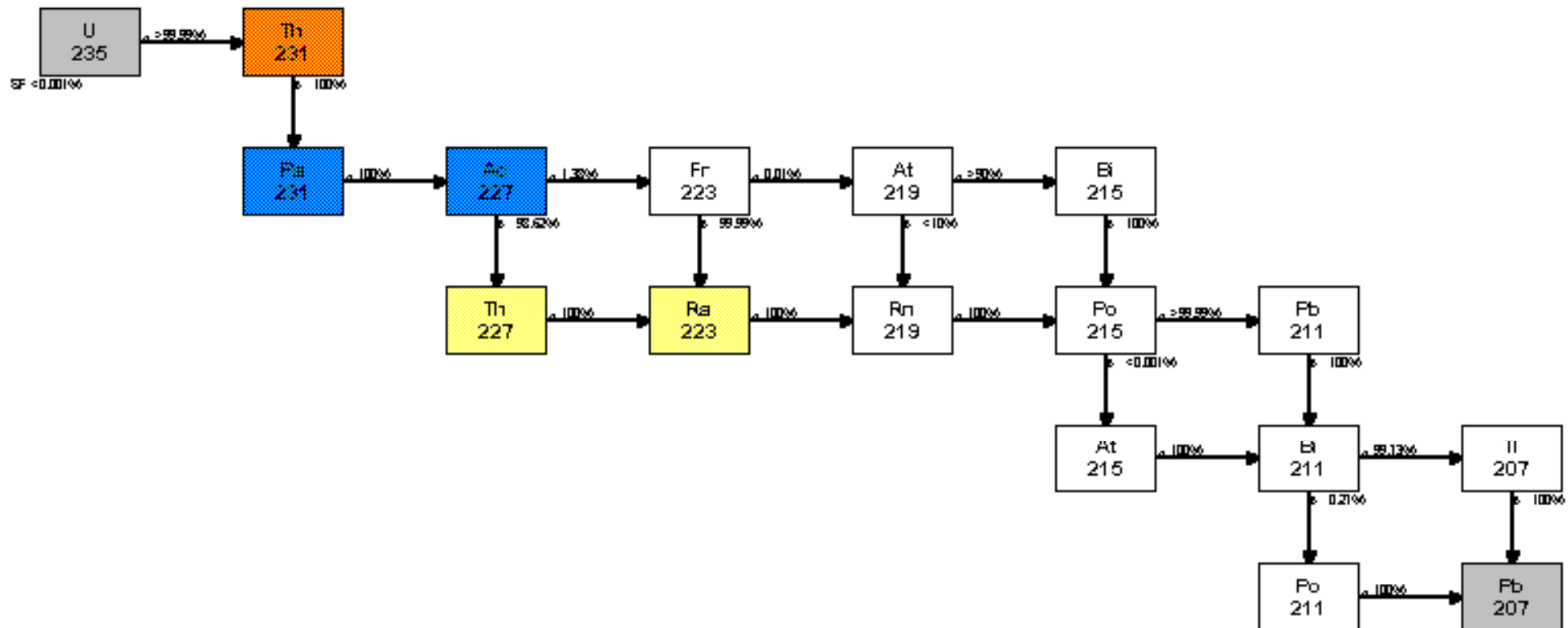
- řada typu $4n+2$: uranová



5. Radioaktivita

5.3. Radioaktivní přeměny

- řada typu $4n+3$: aktiniová



Postupný rozpad, radioaktivní rovnováha

Příklad: Před 3 miliardami let byl vytvořen 1 kg čistého U238. Jaké je zastoupení jednotlivých nuklidů rozpadové řady v současnosti?

nuklid	poločas rozpadu / rok	poměrné zastoupení	počet atomů v současnosti	aktivita / Bq	Z	A	hmotnost / kg
U 238	4500000000	0,63	1,59E+24	7,78E+06	92	238	6,30E-01
Th 234	0,0657	9,198E-12	2,33E+13	7,78E+06	90	234	9,04E-12
Pa 234	0,000764	1,07E-13	2,71E+11	7,78E+06	91	234	1,05E-13
U 234	250000	0,000035	8,86E+19	7,78E+06	92	234	3,44E-05
Th 230	75000	0,0000105	2,66E+19	7,78E+06	90	230	1,01E-05
Ra 226	1600	2,24E-07	5,67E+17	7,78E+06	88	226	2,13E-07
Rn 222	0,0105	1,47E-12	3,72E+12	7,78E+06	86	222	1,37E-12
Po 218	0,00000589	8,246E-16	2,09E+09	7,78E+06	84	218	7,55E-16
Pb 214	0,0000513	7,182E-15	1,82E+10	7,78E+06	82	214	6,45E-15
Bi 214	0,000038	5,32E-15	1,35E+10	7,78E+06	83	214	4,78E-15
Po 214	5,07E-12	7,098E-22	1,80E+03	7,78E+06	84	214	6,38E-22
Pb 210	22	3,08E-09	7,79E+15	7,78E+06	82	210	2,72E-09
Bi 210	0,0137	1,918E-12	4,85E+12	7,78E+06	83	210	1,69E-12
Po 210	0,383	5,362E-11	1,36E+14	7,78E+06	84	210	4,73E-11
Pb 206		0,36995	9,36E+23	0	82	206	3,20E-01
celkem			2,53E+24	1,09E+08			0,95
He 4			7,49+E24	0	2	4	4,98E-02

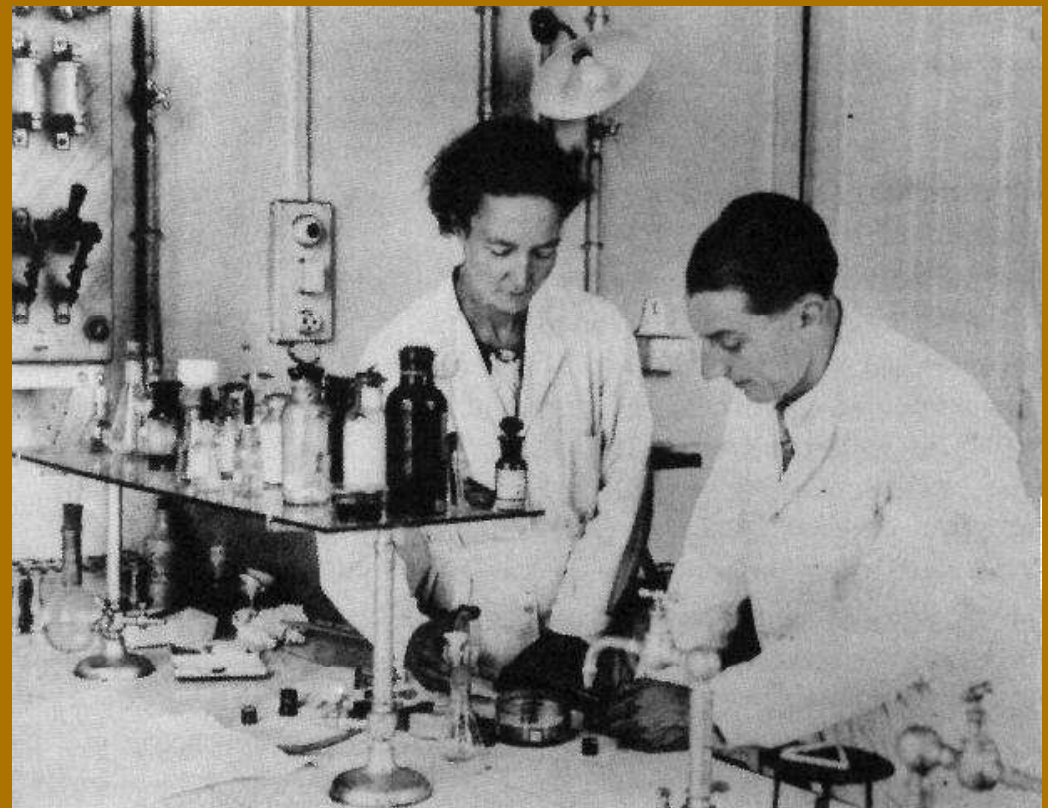
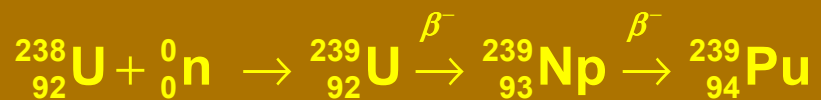
Umělá radioaktivita

1934 manželé Joliot-Curieovi

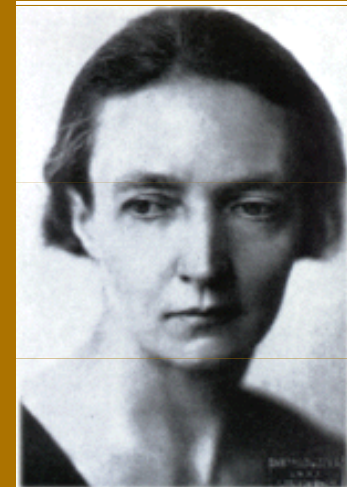


jaderná reakce, pozitronový rozpad

dnes - nejefektivnější způsob:
ozařování neutrony



Frédéric Joliot



Irène Joliot-Curie

Frédéric Joliot (1900-1958),

Irène Joliot-Curie (1897–1956)

Postupný rozpad, radioaktivní rovnováha

Jaká je bilance při postupném rozpadu?

1 → **2** → **3** → → **i** → **s**

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 \cdot N_1$$

$$N_1 = N_{10} \cdot e^{-\lambda_1 t} = c_{11} \cdot e^{-\lambda_1 t}$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 \cdot N_1 - \lambda_2 \cdot N_2$$

řešení druhé diferenciální rovnice: homogenní rovnice:

$$\frac{dN_2}{dt} = -\lambda_2 \cdot N_2 \Rightarrow N_{2h} = c_{22} \cdot e^{-\lambda_2 t}$$

partikulární řešení navrhne ve tvaru:

$$N_{2p} = c_{21} \cdot e^{-\lambda_1 t} \quad \text{dosazením:}$$

$$-\lambda_1 \cdot c_{21} \cdot e^{-\lambda_1 t} = \lambda_1 \cdot c_{11} \cdot e^{-\lambda_1 t} - \lambda_2 \cdot c_{21} \cdot e^{-\lambda_1 t} \quad \text{odtud:}$$

$$c_{21} = \frac{\lambda_1 \cdot c_{11}}{\lambda_2 - \lambda_1}$$

$$\text{z počáteční podmínky: } N_2(0) = 0$$

$$0 = c_{21} + c_{22} \Rightarrow c_{22} = -c_{21}$$

$$N_2(t) = \frac{\lambda_1 \cdot N_{10}}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$$

$$\frac{dN_i}{dt} = \lambda_{i-1} \cdot N_{i-1} - \lambda_i \cdot N_i$$

$$\frac{dN_s}{dt} = \lambda_{s-1} \cdot N_{s-1}$$

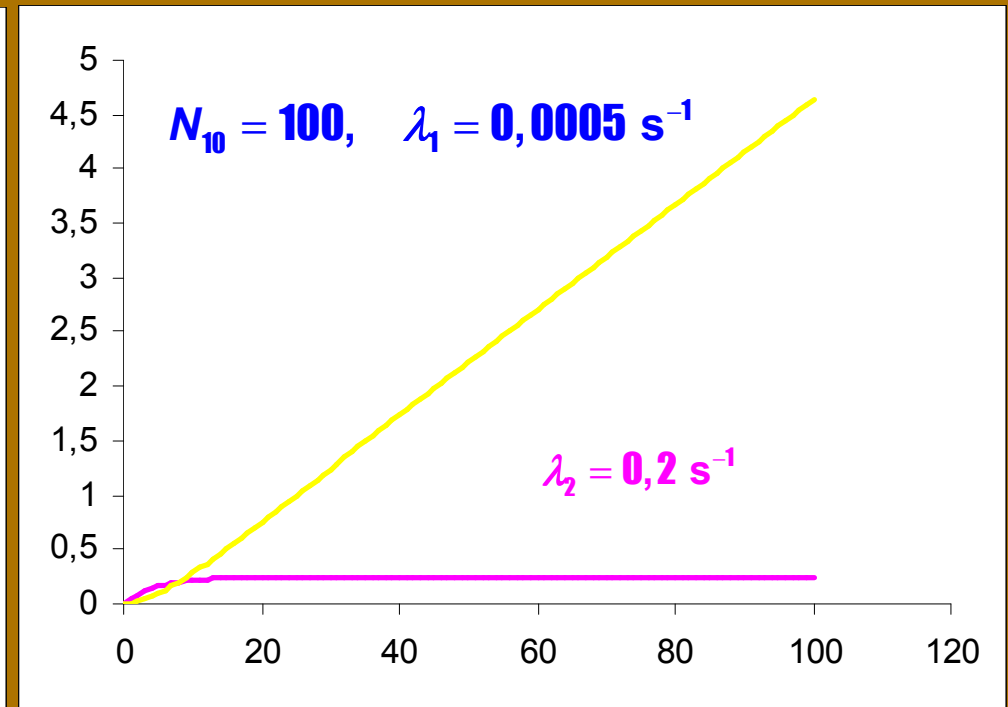
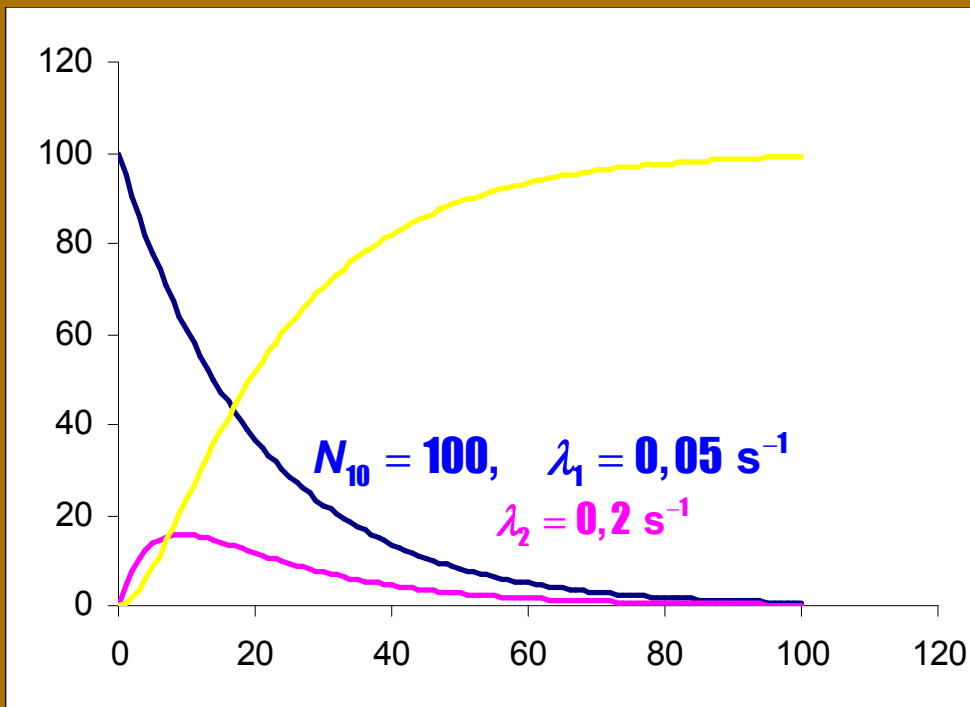
Postupný rozpad, radioaktivní rovnováha

řešení i - té rovnice:

$$N_i(t) = \sum_{j=1}^i c_{ij} e^{-\lambda_j t} \quad c_{ij} = c_{i-1,j} \frac{\lambda_{i-1}}{\lambda_i - \lambda_j} \quad c_{ii} = -\sum_{k=1}^{i-1} c_{ik}$$

řešení s - té rovnice (jako i - tá pro $\lambda_s = 0$)

$$N_s(t) = c_{ss} + \sum_{j=1}^{s-1} c_{sj} e^{-\lambda_j t} \quad c_{sj} = -c_{s-1,j} \frac{\lambda_{s-1}}{\lambda_j} \quad c_{ss} = c_{10} = N_{10}$$



Postupný rozpad, radioaktivní rovnováha

$$\text{je-li } \lambda_1 \ll \lambda_2 \quad N_2(t) = \frac{\lambda_1 \cdot N_{10}}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \cong \frac{\lambda_1 \cdot N_{10}}{\lambda_2} \cdot (1 - 0)$$

N_2 je proto v malých časech konstantní a platí:

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{T_1}{T_2}$$

zákon radioaktivní rovnováhy

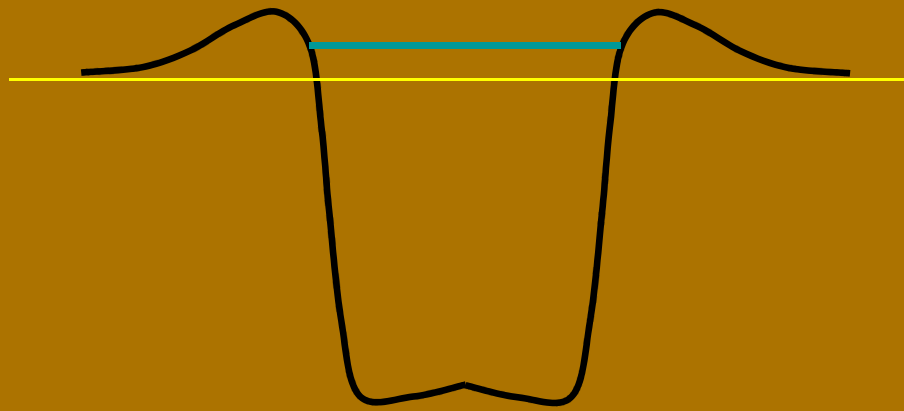
podmínka $\lambda_1 \ll \lambda_2$ je splněna ve všech rozpadových řadách, v historických dobách existuje u přírodních radioaktivních nuklidů rovnováha

Rozpad α

Nutná a postačující podmínka pro rozpad alfa: nejnižší energetická hladina částice α v jádře je >0 :

průběh potenciálu částice α v okolí jádra

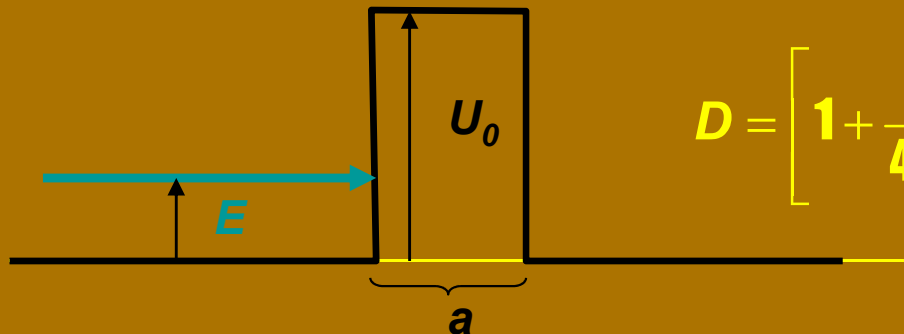
energetická hladina $E_\alpha > 0$



Přestože částice α má energii kladnou, nemůže opustit jádro klasickým způsobem, brání jí v tom Coulombovská bariéra.

TUNELOVÝ JEV

při pravoúhlé bariéře:



$$D = \left[1 + \frac{U_0^2}{4E \cdot (U_0 - E)} \cdot \sinh^2 \sqrt{\frac{2m}{\hbar^2} \cdot (U_0 - E) \cdot a} \right]^{-1}$$

animace
rozpdu

Rozpad α

Při bariéře obecného tvaru se používá numerického postupu: bariéra se aproximuje velkým počtem pravoúhlých bariér a výsledná pravděpodobnost se určí součinem:

$$D_i = \left[1 + \frac{U_{0i}^2}{4E \cdot (U_{0i} - E)} \cdot \sinh^2 \sqrt{\frac{2m}{\hbar^2} \cdot (U_{0i} - E) \cdot a_i} \right]^{-1} \quad D = \prod D_i$$

Celková pravděpodobnost úniku částice α přes Coulombovskou bariéru je pak:

$$\lambda = \lambda_\alpha \cdot \lambda_p \cdot D$$



pravděpodobnost toho, že částice α je na povrchu jádra

pravděpodobnost vzniku částice α v jádře

Přibližný tvar pro výpočet λ byl znám již před kvantovou mechanikou:

λ je velmi malé (10^{-20} až 10^{-50}), proto $\sinh^2 x \cong \frac{e^{2x}}{4}$, $\frac{U_{0i}^2}{16E \cdot (U_{0i} - E)} \approx 1$

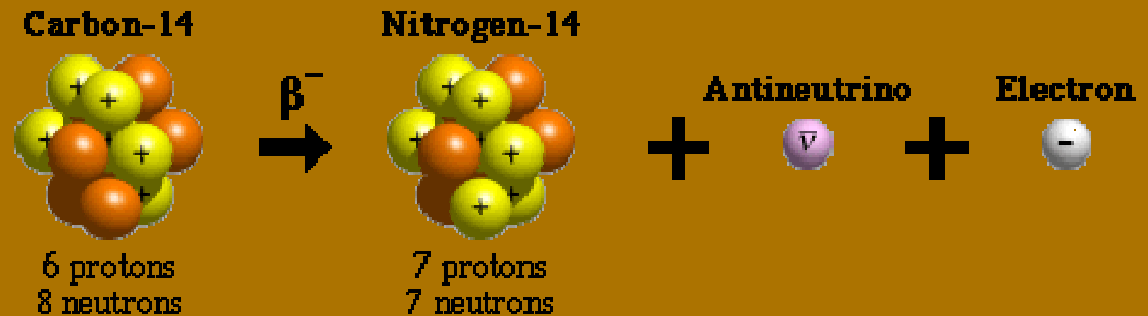
$$D = e^{-G}, \quad G = \frac{2\sqrt{2m}}{\hbar} \cdot \int_R^{R_E} \left(\frac{2Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r} - E \right)^{\frac{1}{2}} dr \quad G - \text{Gamowův faktor}$$

β -rozpad

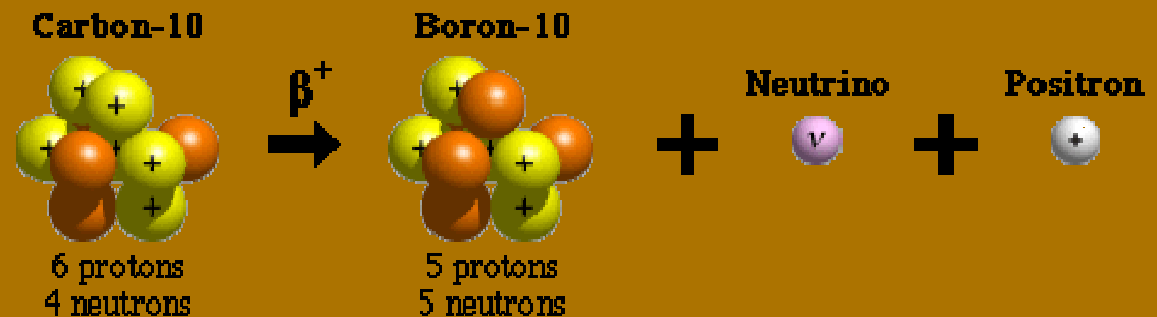
V průběhu beta-minus rozpadu, se změní neutron v jádře na proton, elektron a antineutrino.

Elektron a antineutrino odletí z jádra, které nyní má o jeden proton více.

Beta-minus Decay

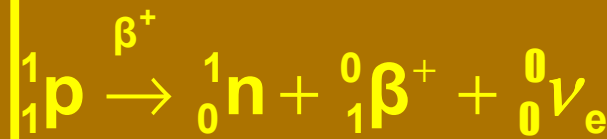
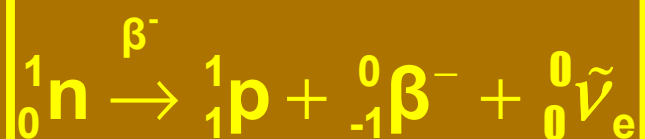


Beta-plus Decay



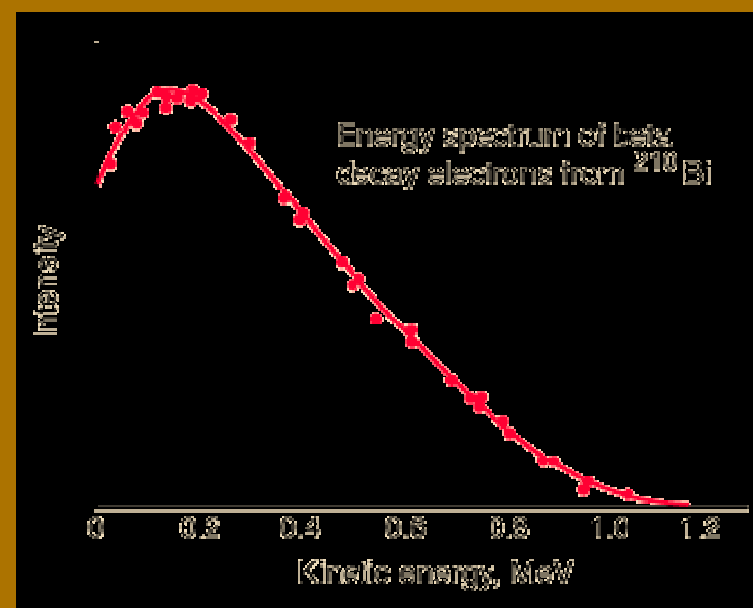
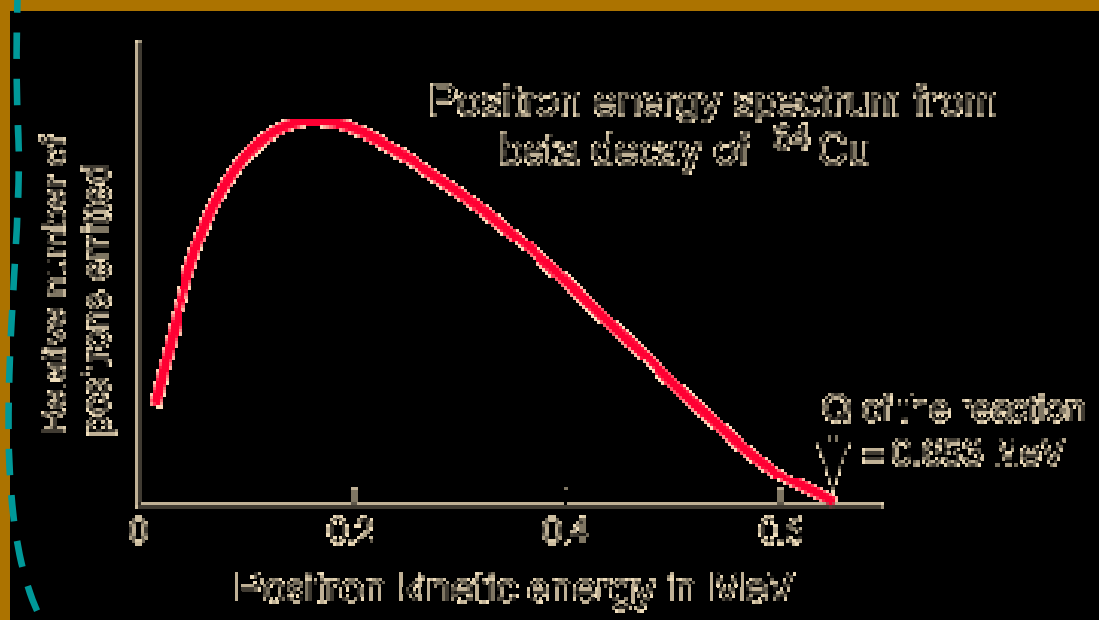
Přeměna β

podstatou přeměny nukleonů



bez neutrina by byl porušen zákon zachování energie, hybnosti, momentu hybnosti

neutrino: W. Pauli 1934



→ probíhá i u volného neutronu s poločasem rozpadu 11,7 minut

Ostatní druhy radioaktivních přeměn

a) vznik záření γ

po primární přeměně α , β může vzniknout jádro v excitovaném stavu, ze kterého přechází do základního vyzářením fotonu:



Excitované jádro má kvantované hodnoty energie \Rightarrow spektrum γ je čárové, má několik charakteristických energií, lze tedy poznat, o jaké jádro jde. Na tom je založena spektrální gama analýza.

Zvláštní případ: gama foton vykoná při průletu obalem fotoelektrický jev: předá veškerou svoji energii obalovému elektronu; z atomu pak vylétá elektron se zcela přesnou energií (na rozdíl od beta přeměny) – **elektronová konverze**

b) K záchyt

Jádra s přebytkem protonů mohou pohltnout elektron ze slupky K a změnit tak proton na neutron (obdoba pozitronové přeměny):



c) emise neutronu, emise protonu

. Ostatní druhy radioaktivních přeměn

d) spontánní štěpení

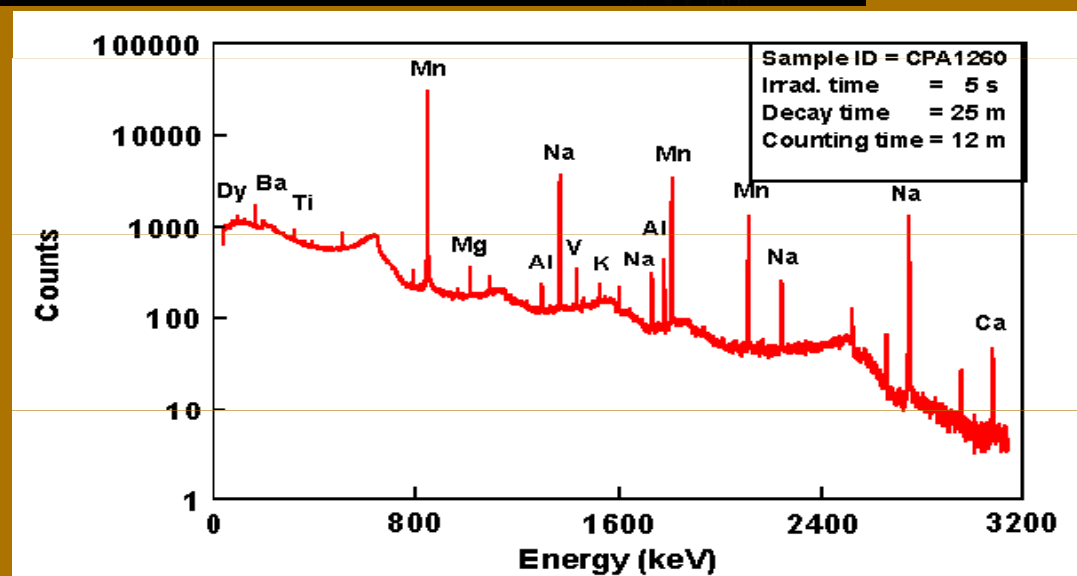
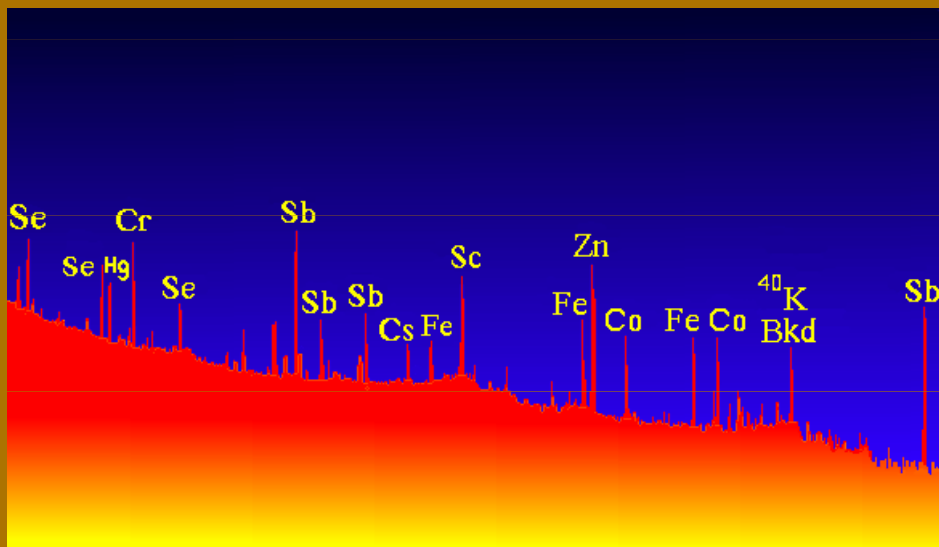
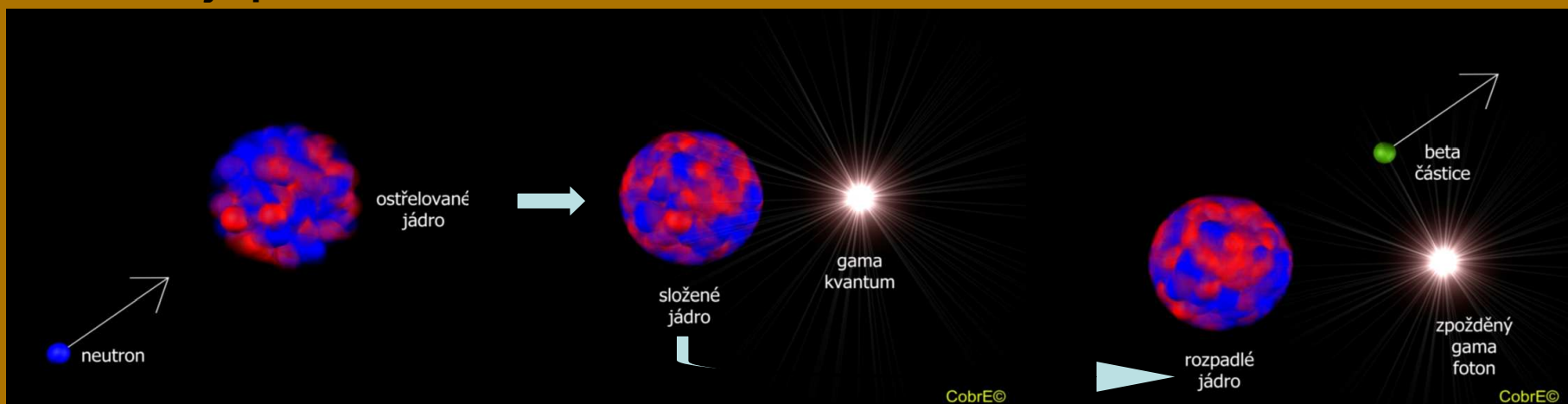
Velmi těžká jádra se mohou spontánně rozdělit na 2 lehčí. Velmi vzácně může tento děj probíhat i u uranu 238 a 235 (tisíciny procenta), běžnější je u Cf252 s poločasem rozpadu 2,64 roku. Protože se při štěpení uvolňuje několik neutronů, používá se tento nuklid jako zdroj neutronů.



Využití radioaktivity a fyziologické účinky

a) neutronová aktivační analýza - Neutron activation analysis (NAA)

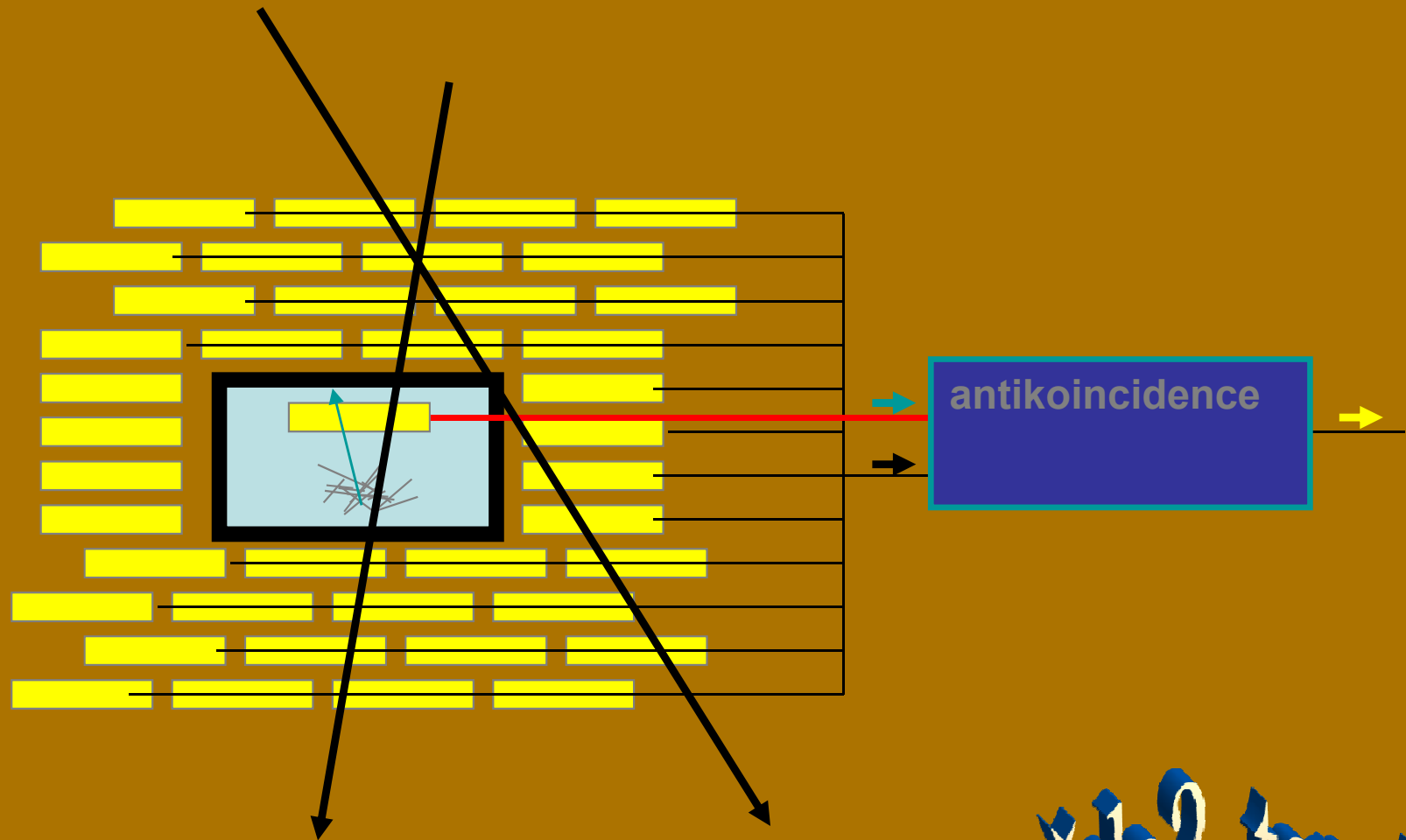
Neutrony velmi snadno pronikají do jader: neexistuje pro ně Coulombovská bariéra. Jádru se dostane do excitované stavy: vyzáří charakteristický foton gama. V jádru je pak přebytek neutronů a jádro se tak zpravidla stane radioaktivním, nejčastěji β^- . Zbytek energie se pak může vyzářit ještě dalším fotonem gama. Analýzou všech produktů se identifikuje původní atom.



Využití radioaktivity a fyziologické účinky

a) neutronová aktivační analýza - Neutron activation analysis (NAA)

Problém řešený v roce 1962: byl Napoleon při vyhnanství na Svaté Heleně otráven?



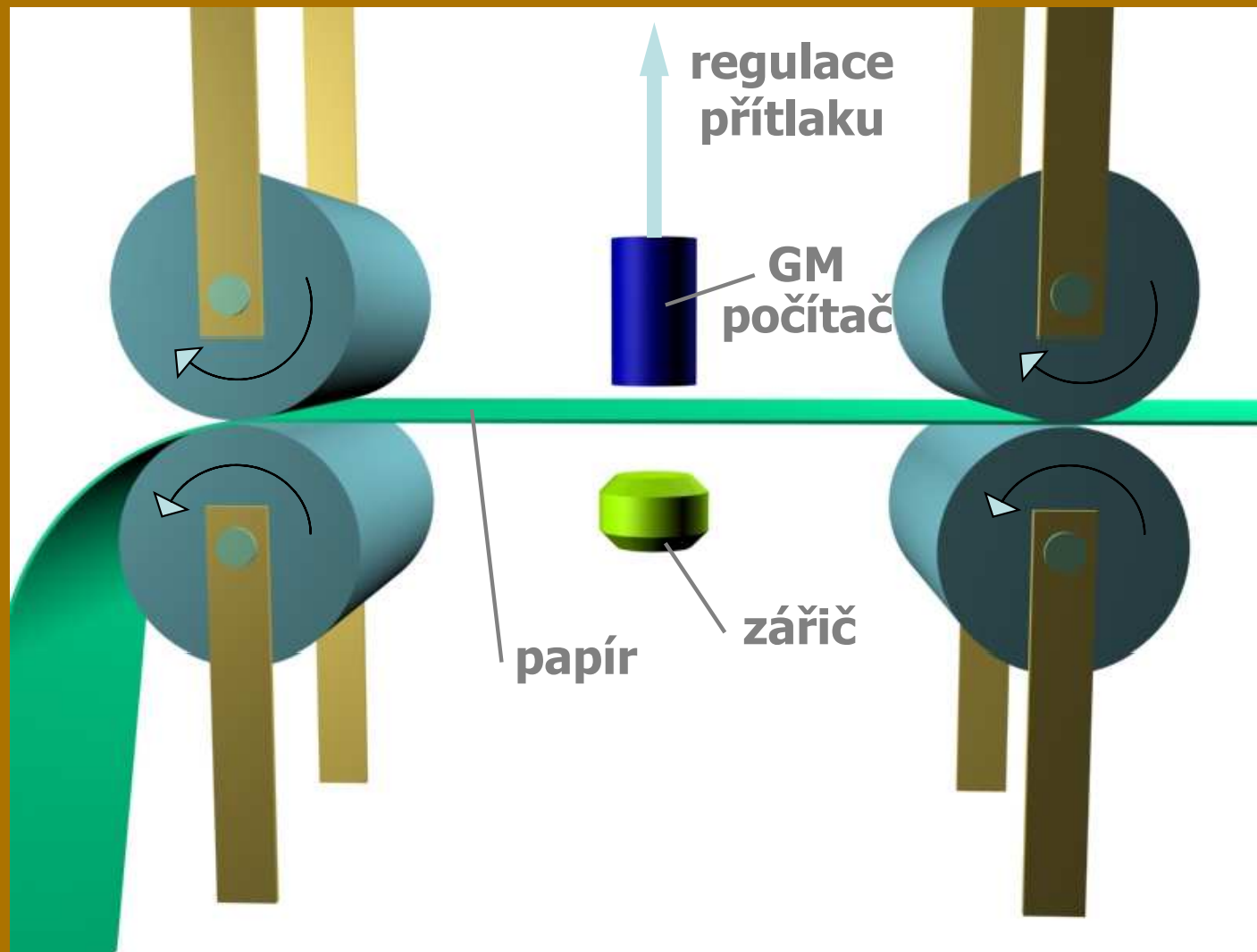
Ve vlasech Napoleona byl zjištěn arzén v koncentraci 13krát vyšší (0,000 15 %).

vražda? tapety?

Využití radioaktivity a fyziologické účinky

b) měření a kontrola tenkých vrstev

využívá se záření α nebo β : zářič je na jedné straně kontrolovaného materiálu (papír, látka, plech, ...), na druhé straně je detektor; ve zpětné vazbě se ovládá výrobní zařízení



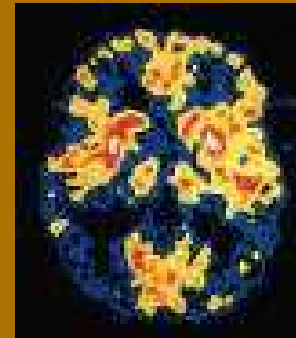
Využití radioaktivity a fyziologické účinky

d) lékařství - diagnostika

Do organismu se vpraví malé množství radioaktivního nuklidu s velmi krátkým poločasem rozpadu (minuty, hodiny). Sleduje se cesta nuklidu organismem, rychlost metabolismu, ukládání prvků v orgánech. Některé patologické struktury pak koncentrují zvolenou kontrastní látku, která je pak na snímku zdůrazněna.

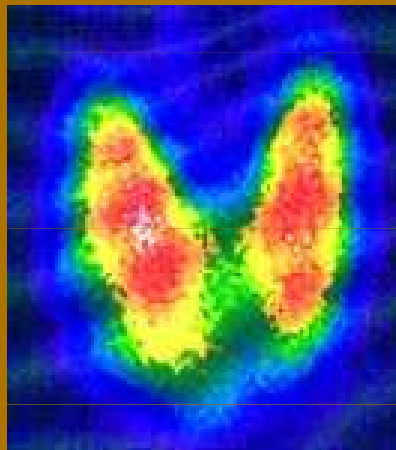
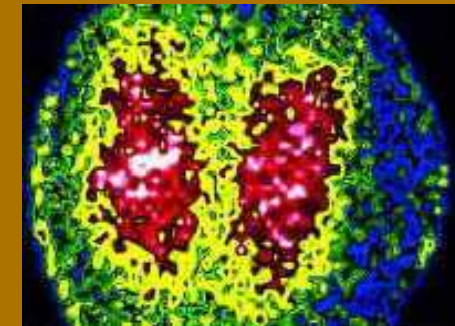


diagram plic po
vdechnutí
radioaktivního aerosolu
s techneciem 99



mozek s
tumorem

Alzheimerova
choroba



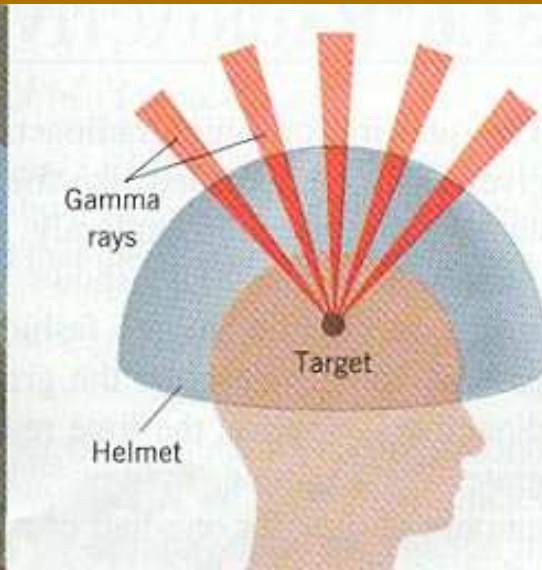
sledování ukládání
derivátů mastných
kyselin v myokardu



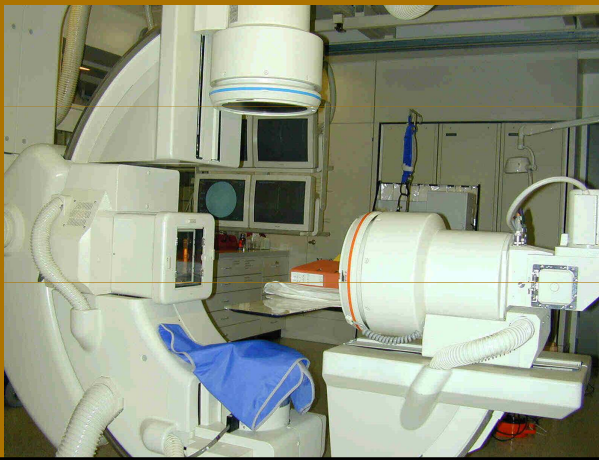
.Využití radioaktivity a fyziologické účinky

e) lékařství - terapie

je založena na možnosti směřování paprsku radioaktivního záření, či na jeho omezeném doletu, případně na schopnosti většího zachycení záření v postižené tkáni



princip Leksellova gama nože



příklady zařízení pro směrové ozařování

Využití radioaktivity a fyziologické účinky

e) lékařství - terapie



lineární urychlovač

. Využití radioaktivity a fyziologické účinky

f) sterilizace a konzervace

využívá se hlavně záření γ (Co60) proti mikrobům, škůdcům (červotoč), plísním, kvasinkám, zabraňuje se kažení potravin, klíčení brambor apod.



. Využití radioaktivity a fyziologické účinky

g) biologie, chemie – metoda značených atomů

Je obdobná lékařské diagnostice: do organismu nebo do chemické reakce se místo běžného izotopu vpraví radioizotop, sleduje se cesta organismem, chemickou reakcí (chemie jednoho atomu). V biologii se zkoumá metabolismus, ukládání stopových prvků, v chemii se zkoumá struktura molekul, průběhy chemických reakcí.

Využití radioaktivity a fyziologické účinky

h) archeologie

Využívá několika radionuklidů, které vznikají v přírodě a ukládají se v určitých strukturách. Nejznámějším je příklad radiouhlíku C 14 s poločasem rozpadu 5720 let. Ten vzniká v atmosférickém CO₂ a dostává se do živých organismů – u rostlin asimilací, u živočichů po jídání rostlin, či živočichů živících se rostlinami. Po odumření organismu se začíná radiouhlík rozpadat a jeho množství v pozůstatcích klesá. Z poměru C14 a C12 lze určit, před kolika lety organismus odumřel.



V Alpách byly nalezeny pozůstatky „ledového muže“. Normální obsah C14 je 0,23 Bq na 1 gram. V ledovém muži byla aktivita jen 0,121 Bq na 1 gram, tedy asi polovina aktivity živého organismu. Z toho plyne, že ledový muž zahynul přibližně před 5700 lety.

Využití radioaktivity a fyziologické účinky

h) archeologie



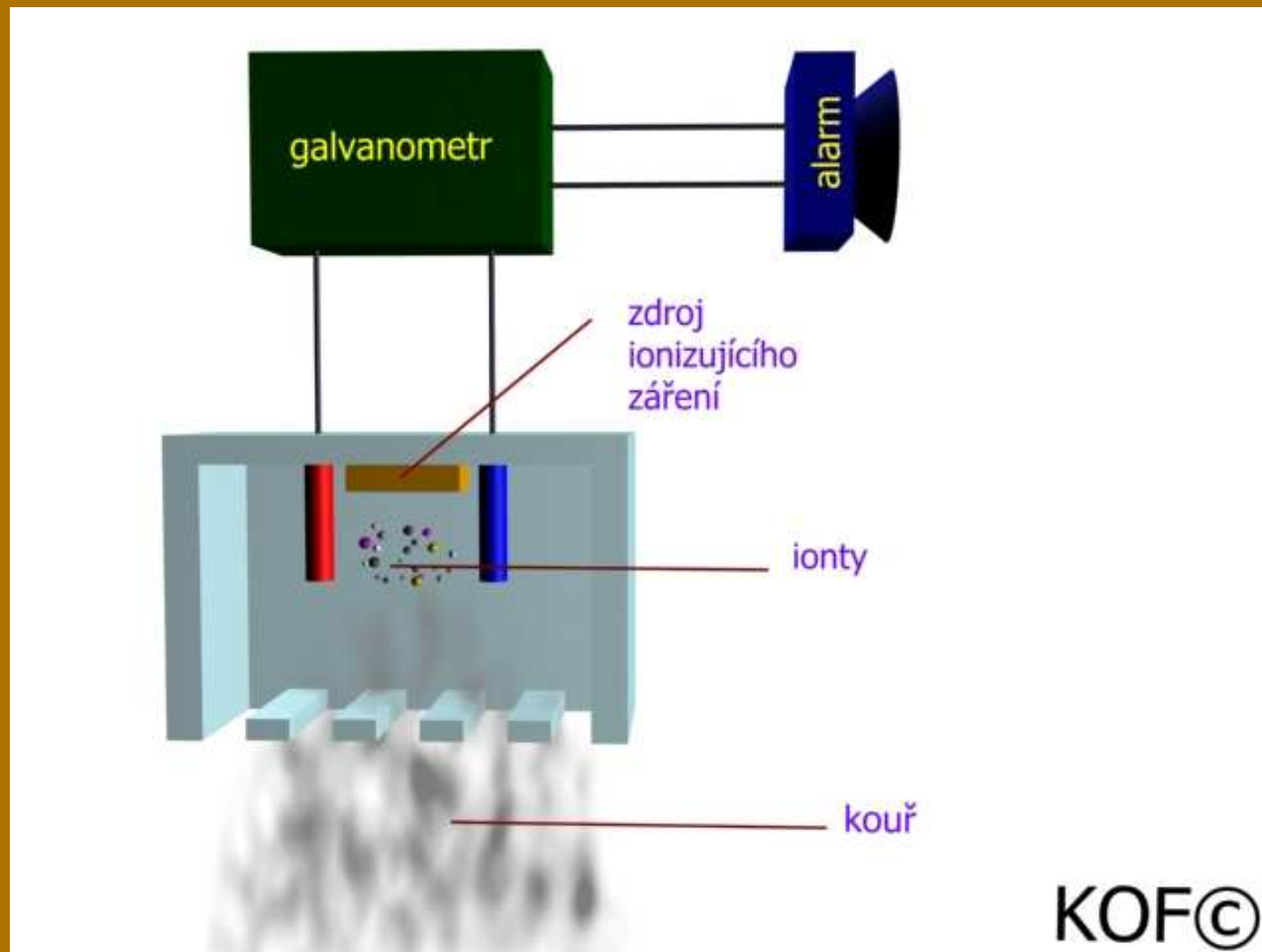
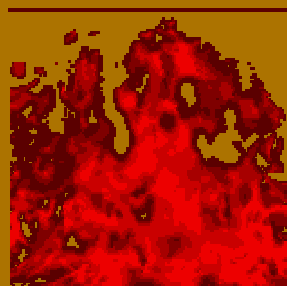
Turínské plátno, do kterého by měla být údajně zahalena mrtvola Ježíše Krista po sejmutí z kříže. V roce 1988 bylo zkoumáno radiouhlíkovou metodou a bylo zjištěno, že je staré 608-728 let, tj. z let 1260 až 1360. V této době se o Turínském plátně poprvé psalo. Zastánci pravosti tvrdí, že radiouhlík se v plátně obnovil zachycením sazí při požáru z uvedených let.



U fosilií starých například 80 milionů let není radiouhlíková metoda využitelná.

Využití radioaktivity a fyziologické účinky

i) detektory kouře a ohně



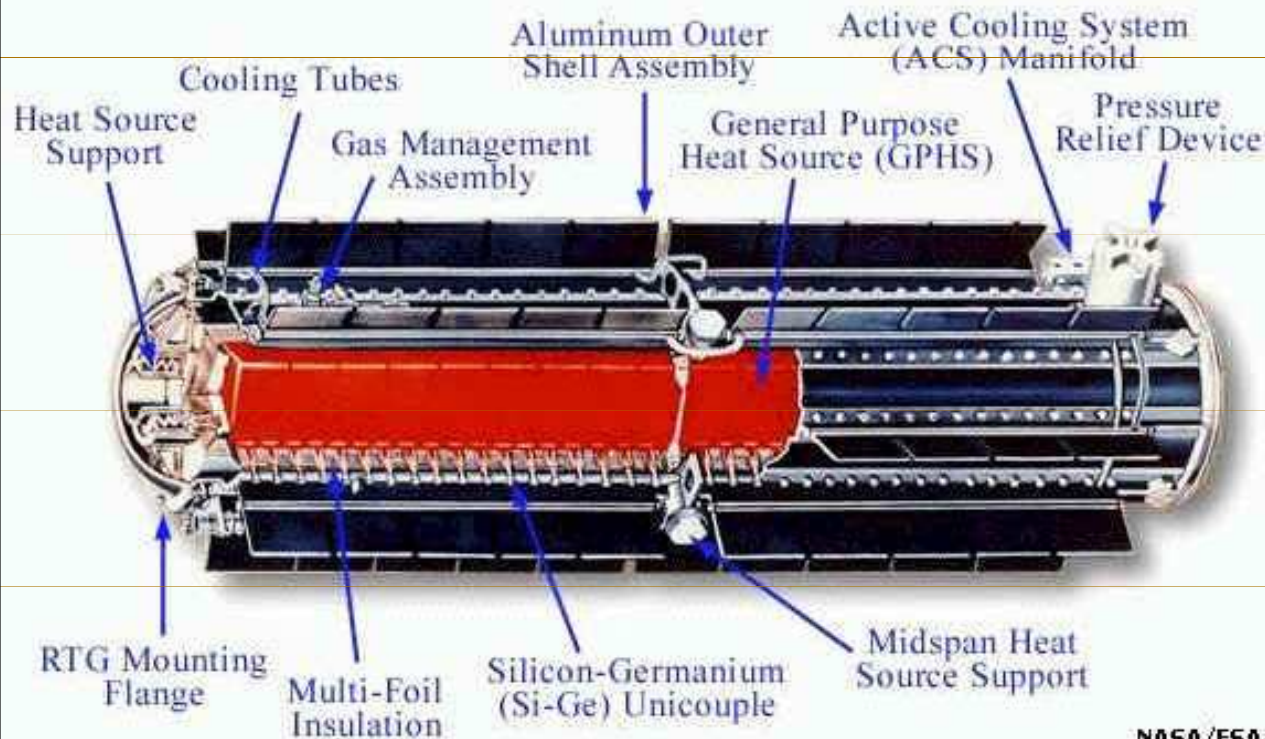
Využití radioaktivity a fyziologické účinky

j) zdroje energie



170 gramů plutonia rozžhavených teplem uvolňovaným při radioaktivním rozpadu v grafitovém držáku

GPHS-RTG



Jaderná baterie pro kosmický výzkum – elektrická energie se uvolňuje termoelektrickým jevem z rozdílu teplot: radioaktivní látka izolovaná uvnitř válce – vnější chladiče. Jako termočlánky slouží polovodičové spoje Si-Ge. Poskytuje výkon 628 W po 11 letech (sonda Cassini-Huygens)

5. Radioaktivita

5. 10. Využití radioaktivity a fyziologické účinky

k) zemědělství

šlechtitelství: k vyvolání mutací u rostlin a živočichů – ustupuje cílenému genovému inženýrství

zjišťování vlhkosti obilí na vjezdu do silových skladišť

- Konec pro dnešek

Účinný průřez

- pravděpodobnost jaderné reakce (např. štěpení) se vyjadřuje pomocí účinného průřezu $\sigma(E)$
- makroskopický účinný průřez $\Sigma = \sigma \cdot N$ (pst. interakce n v objemové jednotce)
- úbytek n na dráze dx :

$$-dl = l \cdot \sigma \cdot N \cdot dx$$

- pro homogenní terčík:

$$l(x) = l_0 e^{-\sigma N x}$$

$$\bar{x} \equiv \lambda = \frac{\int_0^{\infty} x I_0 e^{-\sigma N x} dx}{I_0} = \frac{1}{\sigma N} = \frac{1}{\Sigma}$$

- střední vzdálenost na niž dojde k interakci, vztažená na $1n$ je

$$P = \frac{nv}{\lambda} = nv\Sigma = \Phi\Sigma$$