Rádioaktivita v prírode a aplikácie

1-FYZ-601 Jadrová fyzika

ROZPADOVÉ RADY

Rozpadové rady

Rádioaktívne rozpadové rady reprezentujú sériu rádioaktívnych izotopov, produkovaných rozpadom ťažších nestabilných izotopov. Vo všeobecnosti možno definovať rozpadový reťazec

$$N_1 \xrightarrow{\lambda_1} N_2 \xrightarrow{\lambda_2} N_3 \xrightarrow{\lambda_3}$$

kde N_i a λ_i sú početnosti a rozpadové konštanty jednotlivých izotopov. Výpočet početností jednotlivých izotopov sa dá realizovať výpočtom systému diferenciálnych rovníc

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

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

$$\frac{dN_3}{dt} = \lambda_2 N_2 - \lambda_3 N_3$$

$$\vdots$$

Rozpadové rady

Riešenia týchto diferenciálnych rovníc očakávame v podobe

$$N_1(t) = a_{11}e^{-\lambda_1 t}$$
$$N_2(t) = a_{21}e^{-\lambda_1 t} + a_{22}e^{-\lambda_2 t}$$
$$N_3(t) = a_{31}e^{-\lambda_1 t} + a_{32}e^{-\lambda_2 t} + a_{32}e^{-\lambda_3 t}$$

Počiatočné podmienky sú definované pre $t = 0$ platí $a_{11} = N_1$ a ďalej vo všeobecnosti pre a_{ki} v čase $t = 0$ platí $\sum_{i=1}^{k} a_{k,i} = 0$.

Dá sa ukázať, že pre koeficienty a_{ki} dostávame

$$a_{k,i} = \frac{\lambda_{k-1}}{\lambda_k - \lambda_i} a_{k-1,i}$$

Rozpadové rady

Názov série	Typ	Koncový (stabilný) produkt	Najdlhšie žijúci izotop	Polčas najdlhšie žijúceho
Tóriová	4n	^{208}Pb	^{232}Th	1.41×10^{10}
Neptúniová	4n+1	^{209}Bi	^{237}Np	2.14×10^{6}
Uránová	4n+2	^{206}Pb	^{238}U	4.47×10^{9}
Aktíniová	4n+3	207Pb	^{235}U	7.04×10^{8}

Väčšina rádioaktívnych izotopov po nukleosyntéze sa už rozpadlo a v prírode sa vyskytujú najmä izotopy zo štyroch rozpadových radov.

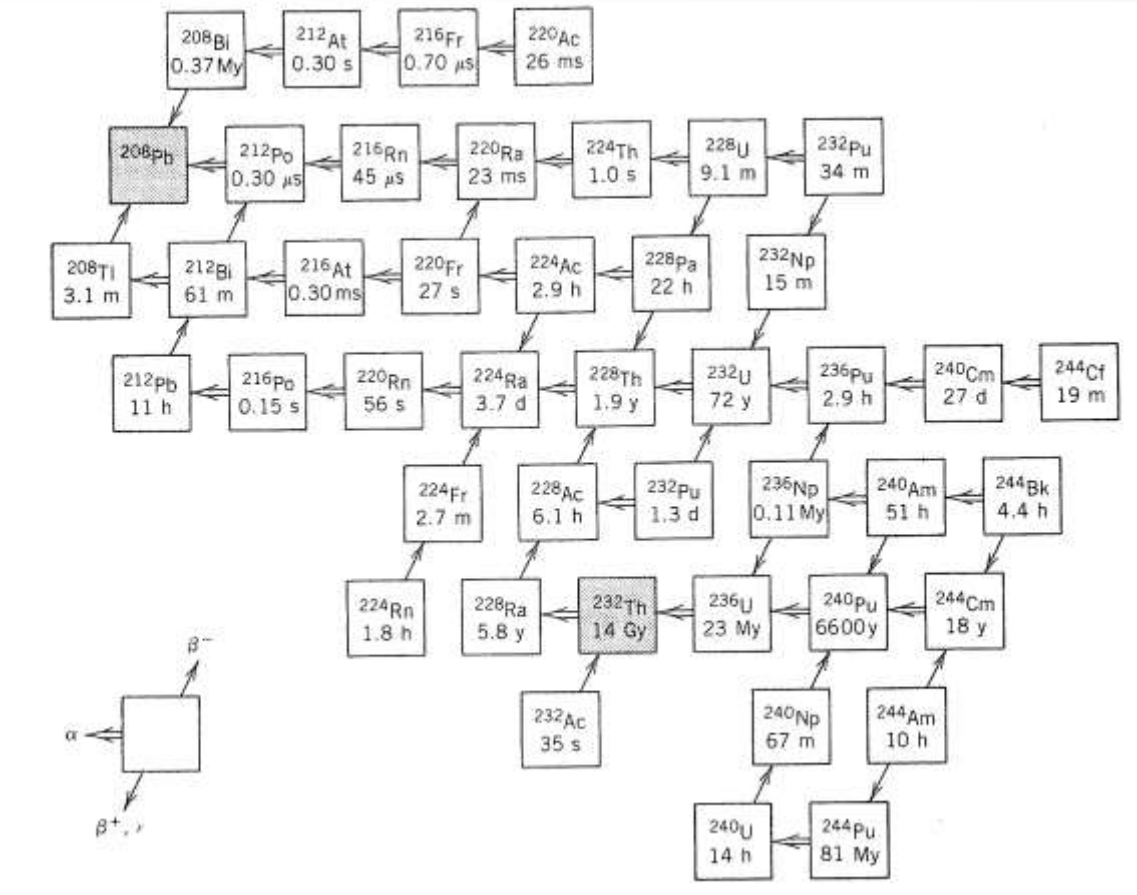
Alfa rozpad mení hmotnosť o 4 nukleóny a beta premena počet nukleónov nemení. Preto tvoria 4 nezávislé série , ktoré majú počet nukleónov svojichčlenov vždy s rovnakým zvyškom po delení štyrmi.

Rozpadové rady

Názov série	Typ	Koncový (stabilný) produkt	Najdlhšie žijúci izotop	Polčas / rok
Tóriová	4n	^{208}Pb	^{232}Th	1.41×10^{10}
Neptúniová	4n+1	^{209}Bi	^{237}Np	2.14×10^{6}
Uránová	4n+2	^{206}Pb	^{238}U	4.47×10^{9}
Aktíniová	4n+3	^{207}Pb	^{235}U	7.04×10^{8}

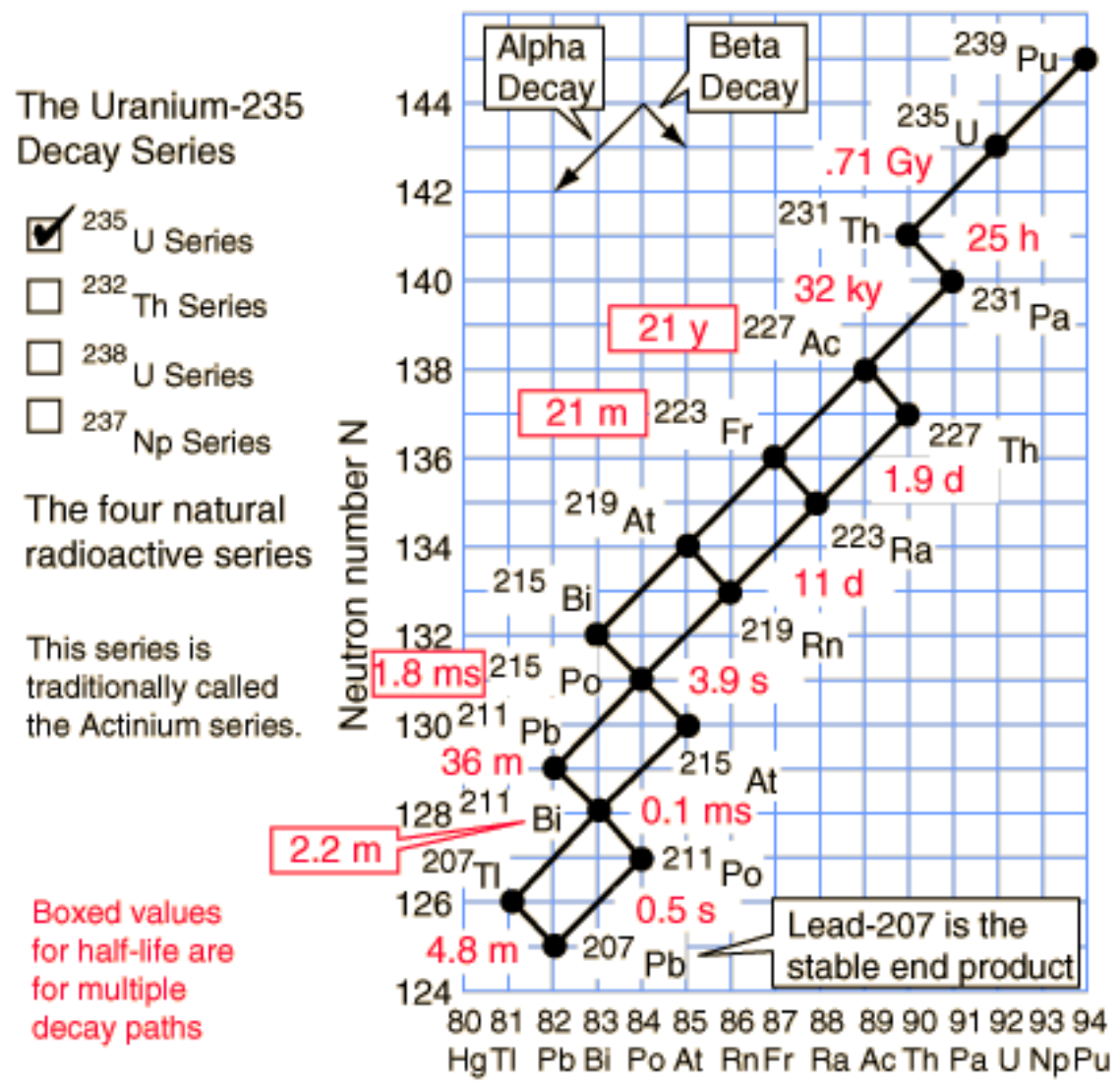
Doba života ^{237}Np je výrazne kratšia ako vek Zeme (4.5×10^{9} rokov), preto je teraz vymretý.

Tóriový rad

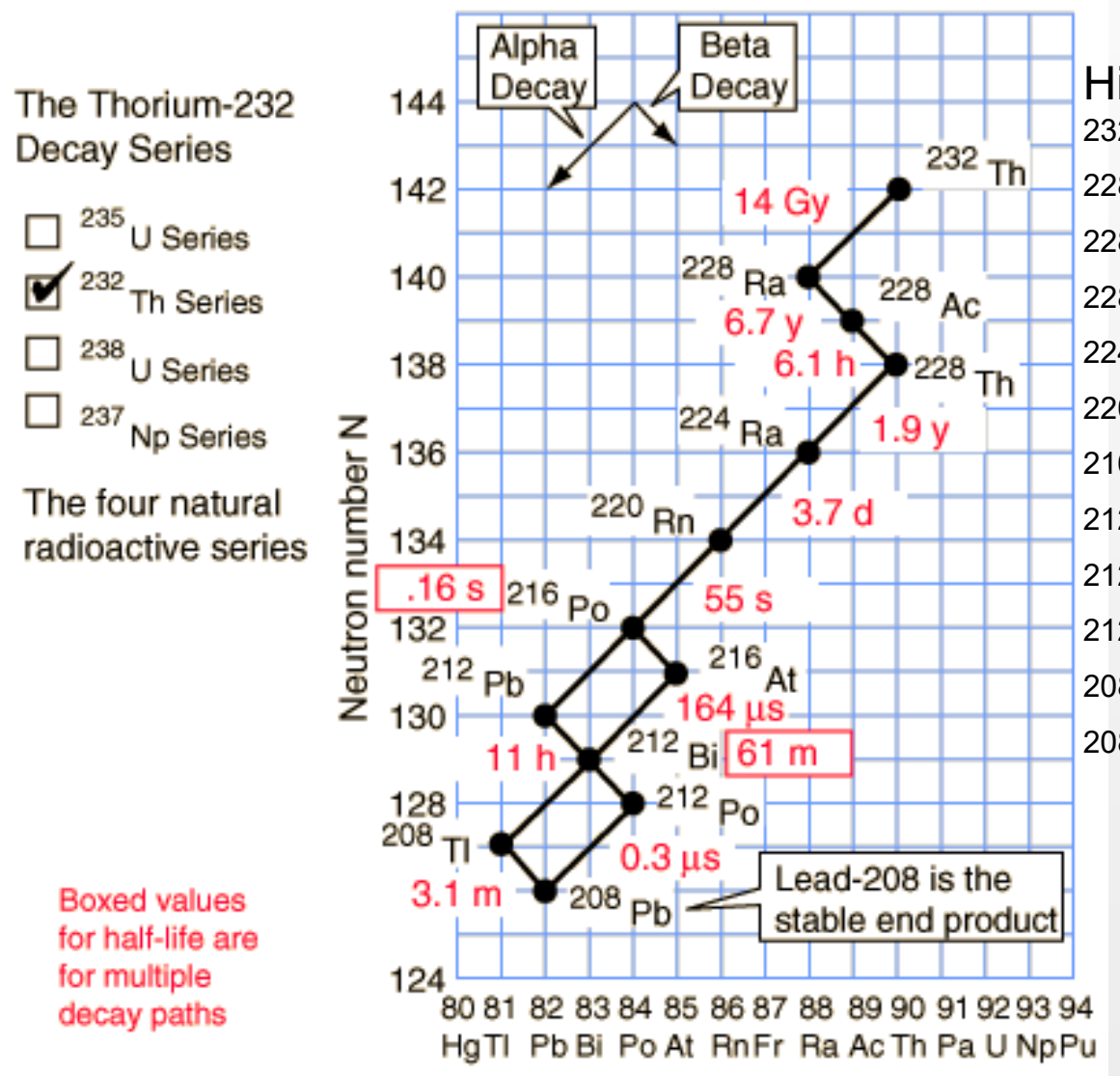


Tóriový rad so všetkými pôvodnými členmi. V súčasnosti je už hlavným zdrojom jeho rozpadových členov iba ^{232}Th

Aktíniový rad



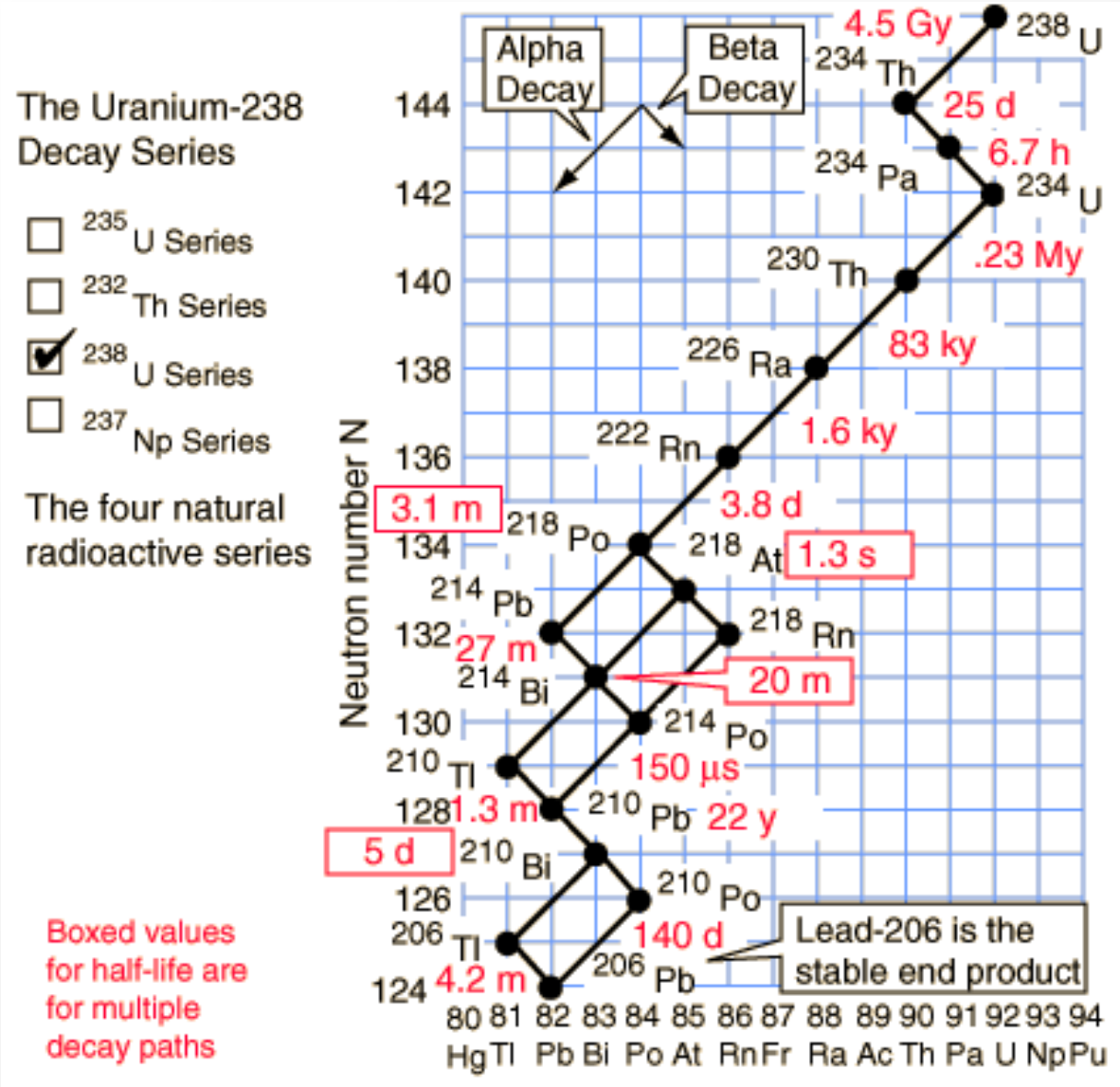
Tóriový rad



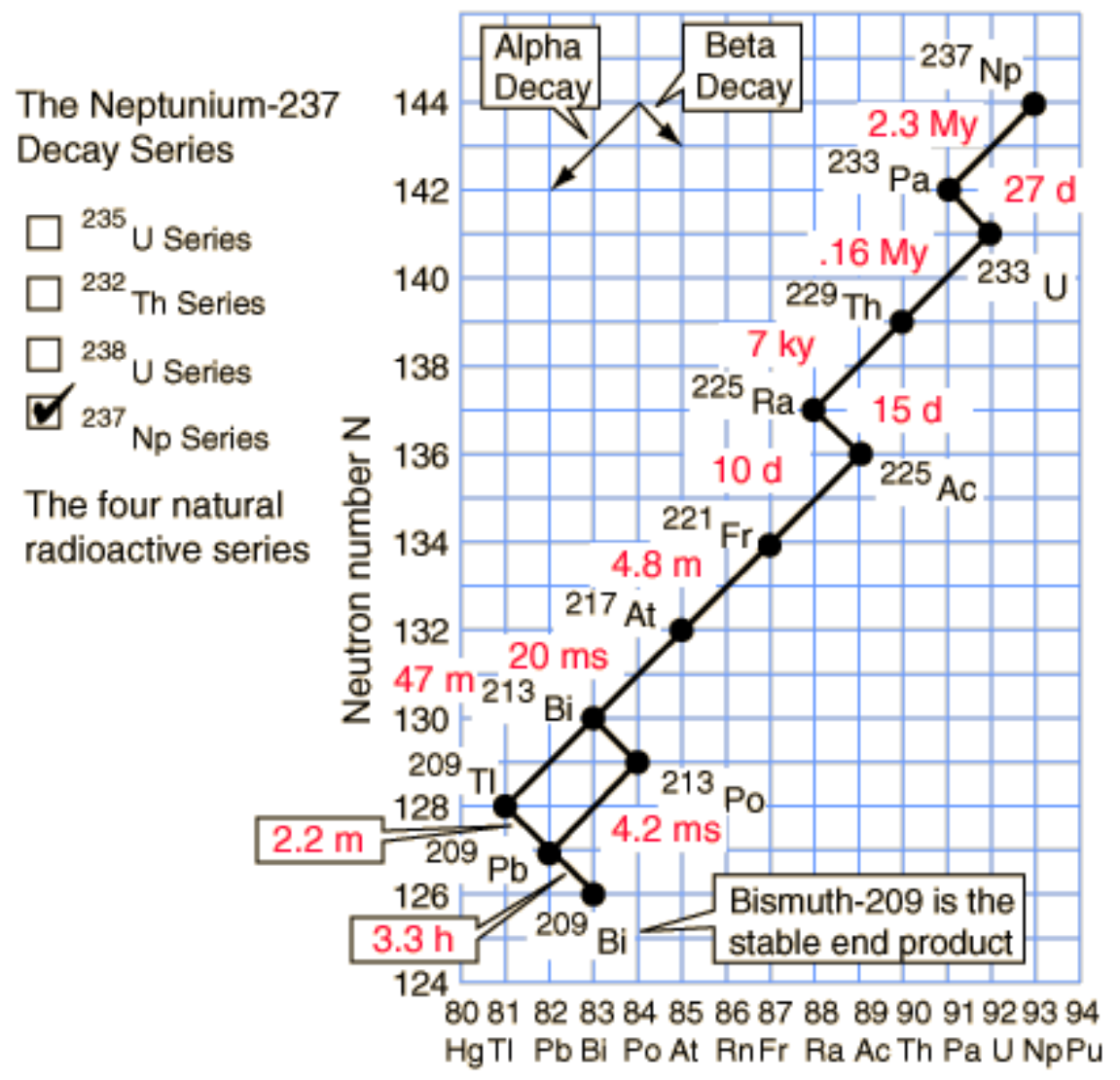
Historické názvy

^{232}Th – Thórium	Th
^{228}Ra – Mesothorium1	$MsTh_1$
^{228}Ac – Mesothorium2	$MsTh_2$
^{228}Th – Radiothorium	RaTh
^{224}Ra – Thorium X	ThX
^{220}Rn – Thoron	Tn
^{216}Po – Thorium A	ThA
^{212}Pb – Thorium B	ThB
^{212}Bi – Thorium C	ThC
^{212}Po – Thorium C’	ThC’
^{208}Tl – Thorium C”	ThC”
^{208}Pb – Thorium D	ThD

Uránový rad


The Uranium-238 Decay Series
235 U Series
232 Th Series
238 U Series
237 Np Series
The four natural radioactive series
Alpha Decay
Beta Decay
Neutron number N
144
142
140
138
136
134
132
130
128
126
124
238 U
4.5 Gy
234 Th
25 d
234 Pa
6.7 h
234 U
.23 My
230 Th
83 ky
226 Ra
1.6 ky
222 Rn
3.8 d
3.1 m
218 Po
218 At
1.3 s
214 Pb
218 Rn
27 m
214 Bi
20 m
214 Po
150 µs
210 Tl
1.3 m
210 Pb
22 y
5 d
210 Bi
210 Po
140 d
206 Tl
4.2 m
206 Pb
Lead-206 is the stable end product
Boxed values for half-life are for multiple decay paths
80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92 93 94
Hg Tl Pb Bi Po At Rn Fr Ra Ac Th Pa U Np Pu

Neptúniový rad



VYUŽITIE INDUKOVANÉHO ŠTIEPENIA

Indukované štiepenie

Po interakcii s neutrónom vznikne zložené jadro v excitovanom stave, napr. $n + {}^{235}U \rightarrow {}^{236}U^{*}$. Ak je energia vzbudenia väčšia ako výška štiepnej bariéry, jadro sa štiepi.

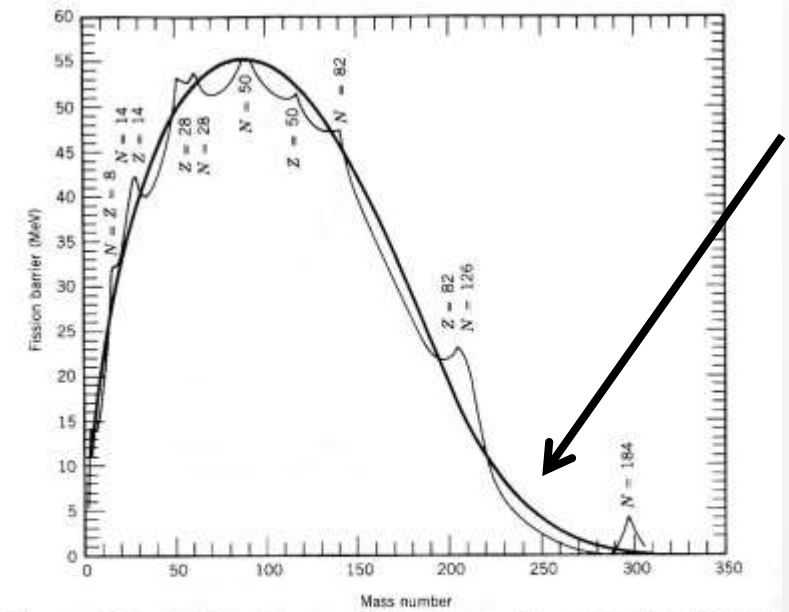


Figure 13.3 Variation of fission activation energy with mass number. The dark curve is based on the liquid-drop model, calculated only for the most stable isotope at each mass number, and the light curve shows the effect of including shell structure. Note the typical 5-MeV energies around uranium, the vanishing energy around mass 280 (making these nuclei extremely unstable to spontaneous fission), and the stability around mass 300 from the expected neutron shell closure. From W. D. Myers and W. J. Swiatecki, *Nucl. Phys.* **81**, 1 (1966).

Typická výška štiepnej bariéry v oblasti uránu je ~ 5 – 10 MeV.

Emisia promptných neutrónov

Počet emitovaných neutrónov je charakteristický pre príslušný proces štiepenia a konkrétny izotop. Tento počet mierne narastá s energiou neutrónu vyvolajúceho štiepenie.

Pri štiepení sa zvyčajne emituje 2 – 4 promptných neutrónov

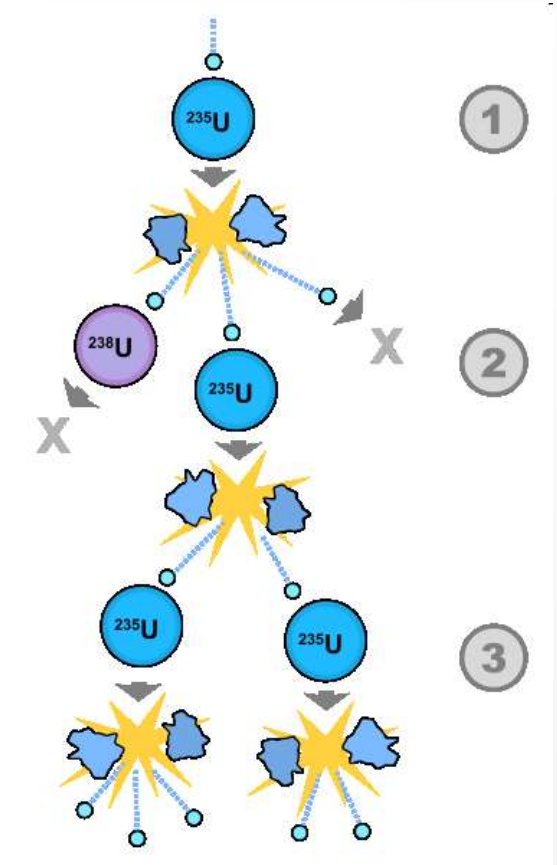
^{233}U ... 2.6 neutrónov

^{235}U ... 2.5 neutrónov

^{238}Pu ... 2.3 neutrónov

^{252}Cf ... 3.8 neutrónov

Indukované štiepenie ^{235}U vs. ^{238}U



Pri interakcii neutrónu so zanedbateľnou kinetickou energiou je excitačná energia ^{235}U o takmer 2 MeV vyššia ako v prípade ^{238}U.

Dôvodom je párovanie nukleónov (^{235}U je má nepárny počet neutrónov a jadro po absorbcii neutrónu získa párovaciu energiu (viď párovací člen vo Weiszackerovej formuli).

V prípade ^{235}U excitačná energia postačuje na prekonanie štiepnej bariéry, preto je možné štiepenie tepelnými neutrónmi. Izotop ^{238}U potrebuje dodatočnú – tzv. aktivačnú – energiu.

Indukované štiepenie ^{235}U vs. ^{238}U

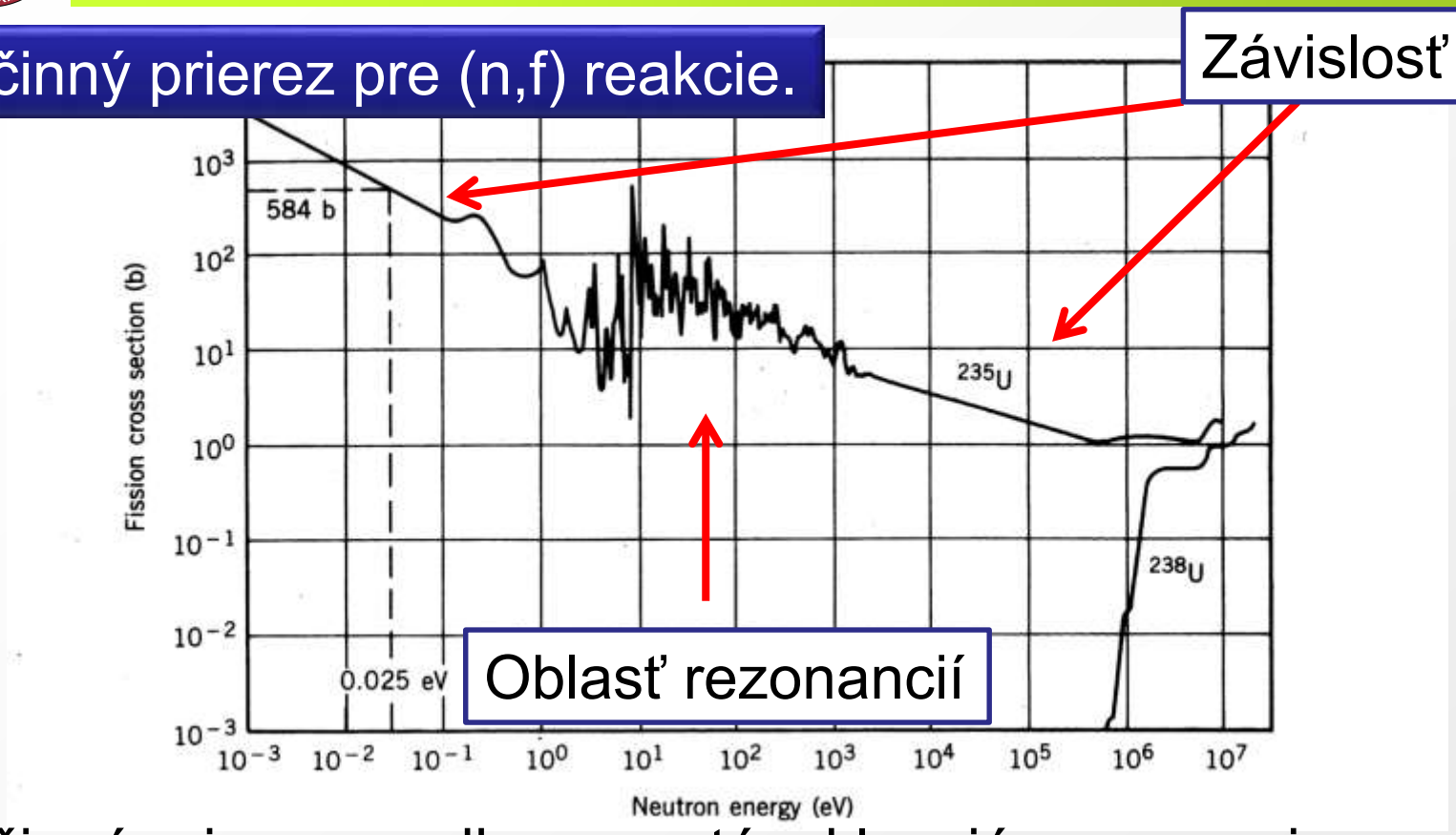
Pri interakcii neutrónu so nulovou kinetickou energiou je excitačná energia ^{235}U o ~ 2 MeV vyššia ako v prípade ^{238}U.

Dôvodom je párovanie nukleónov (^{235}U je má nepárny počet neutrónov a jadro po absorbcii neutrónu získa párovaciu energiu (viď párovací člen vo Weiszackerovej formuli).

V prípade ^{235}U excitačná energia postačuje na prekonanie štiepnej bariéry, preto je možné štiepenie tepelnými neutrónmi. Izotop ^{238}U potrebuje dodatočnú – tzv. aktivačnú – energiu.

Indukované štiepenie ^{235}U vs. ^{238}U

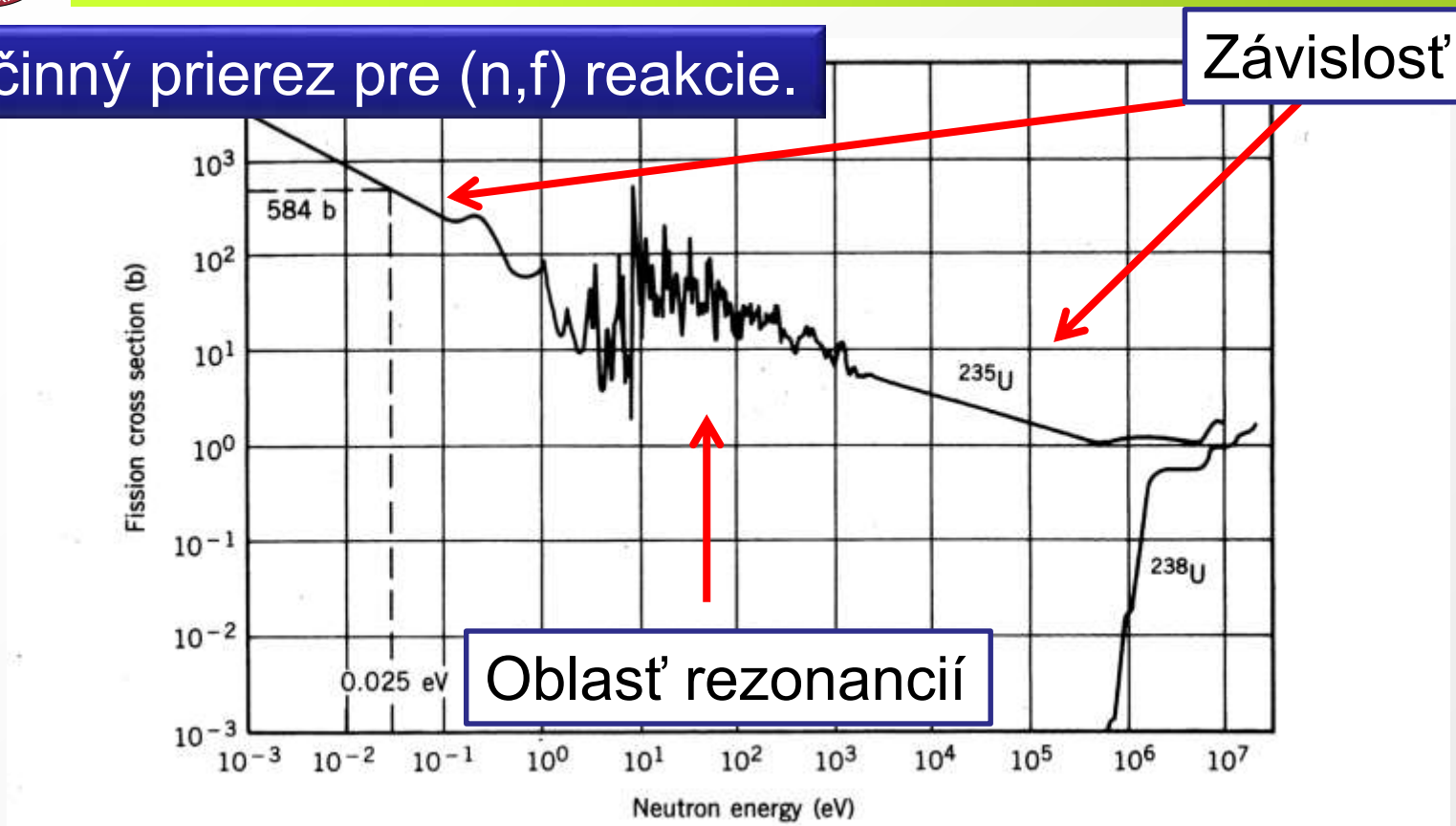
Účinný prierez pre (n,f) reakcie.



Účinný prierez prudko narastá s klesajúcou energiou neutrónu. Preto je výhodné využiť na štiepenie pomalé neutróny. V oblasti epithermálnych neutrónov (1 – 10 eV) sa objavujú výrazné rezonancie.

Indukované štiepenie ^{235}U vs. ^{238}U

Účinný prierez pre (n,f) reakcie.



Časť neutrónov v zmesi $^{235}U/^{238}U$ sa zachytáva na ^{238}U a nespôsobuje štiepenie. Ide o tzv. (n,γ) reakcie, pri ktorých sa po absorbcii neutrónu emituje γ žiarenie. Preto je vhodné obohacovať palivo aby malo vyšší podiel ^{235}U.

Znásobenie neutrónov

Časť neutrónov je pohlcovaná bez vyvolania štiepenia. Zavádzame efektívny faktor znásobenia neutrónov *k* definovaný ako pomer počet neutrónov zo štiepenia, schopných vyvolať štiepenie.

- k>1 reaktor sa stáva nadkritickým, čo vedie k exponenciálnemu nárastu prebiehajúcich reakcií (prípad jadrových zbraní)
- k = 1 kritický reaktor. Výkon je konštantný. Jadrové elektrárne pracujú zvyčajne v tomto režime
- k < 1 podkrytický systém, neudrží sa reťazová reakcia a po určitom čase zanikne.

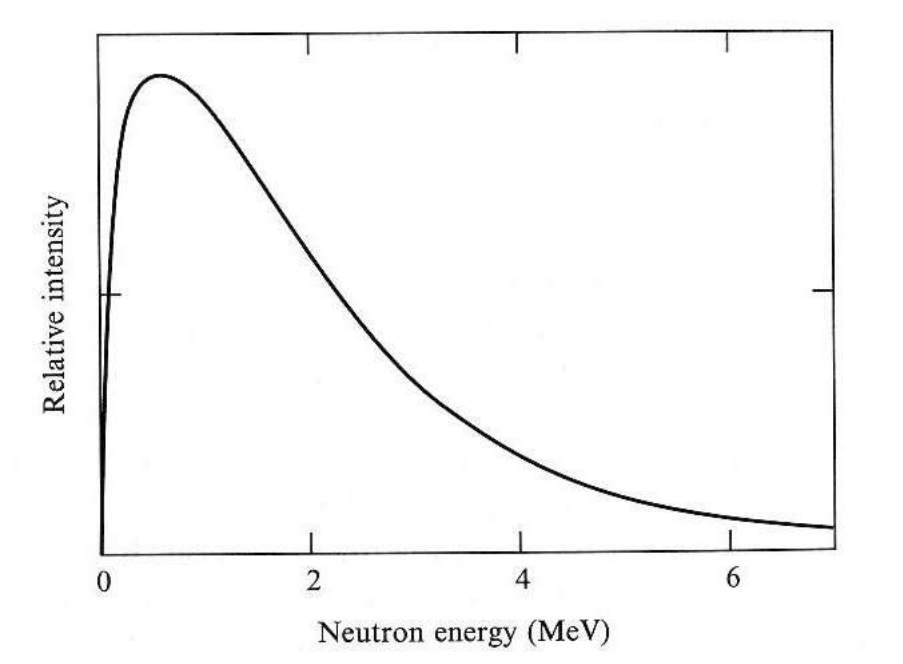
Oneskorené neutróny

Malá časť neutrónov (~ 0.64% v prípade ^{235}U) sa emituje oneskorene po beta premene štiepnych produktov. Tie prispievajú k reťazovej reakcii a sú kritické pri kontrole reaktora.

Výpočet udržatelnosti reakcie sa realizuje pre promtné neutróny tak, aby bol v tesne podkritickom režime (z bezpečnostných dôvodov). Reťazová reakcia sa tak udržiava v režime iba vďaka oneskoreným neutrónom. To umožňuje plynulejšiu kontrolu reaktora.

Energia neutrónov

Energia neutrónov je v priemere cca 2 MeV – považujú sa preto za rýchle neutróny. To je kritický faktor pri konštrukcii reaktora. Vo všeobecnosti je možné zvoliť design reaktora pre rýchle aj pomalé neutróny, ale je potrebné tomu prispôsobiť konštrukciu reaktora a najma vhodne zvoliť štiepny materiál.



Palivo

Medzi štandartne využívané palivá patrí:

- Prírodný urán – obsahuje 0.72% ^{235}U
- Obohatený urán – obsahuje viac ako 0.72% ^{235}U. Stupeň obohatenia závisí od konkrétnej aplikácie (90% jadrové zbrane, 2 – 4% jadrové reaktory).
- ^{239}Pu
- ^{233}U

Obohatený urán umožňuje využívať pomalé neutróny, ktoré majú vysoké účinné prierezy pre (n,f) reakciu. Neutróny je však potrebné spomaliť v moderátore.

Moderátor

V prípade využitia pomalých neutrónov je potrebné využiť tzv. tzv. moderátor, v ktorom prostredníctvom pružných rozptylov strácajú neutróny energiu.

Moderátor by ma mal byť preto zložený z ľahkých atómov, ktoré pri pružnom rozptyle preberajú veľa hybnosti neutrónov. Dôležité sú aj cena, konzistencia (pevný, príp. kvapalný materiál), absorbcia neutrónov a chemická stabilitu. Možnosti sú:

- Grafit - využitý Fermim v prvom jadrovom reaktore (1941), lacný ale málo efektívny
- H2O - klasická voda, relatívne malá kontaminácia
- D2O – ťažká voda – nižší záchyt neutrónov ako voda vzniká rádioaktívne trícium, drahá produkcia
- Bór – nevhodný kvôli vysokému záchytu neutrónov
- Berýlium – jedovaté.

Palivo a moderátor

Množstvo rôznych typov reaktorov. Vo všeobecnosti možno zjednodušiť design na dva základné typy.

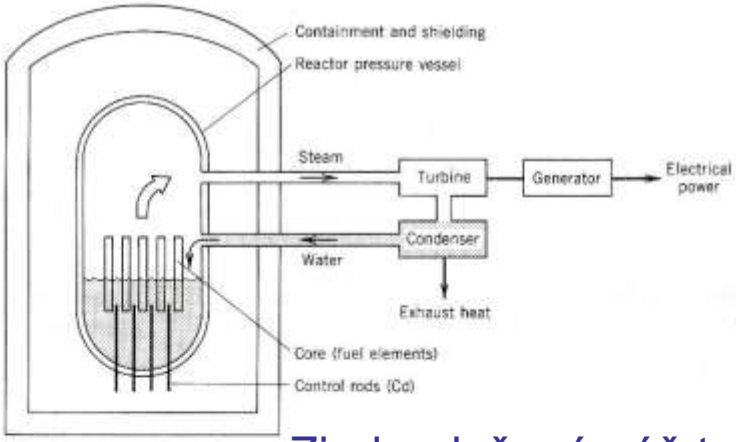
- Heterogénne - moderátor a palivo oddelené.
- Homogénne keď sú zmiešané (jednoduchšie na kontrolu teploty).

Chladenie reaktora vodou

Kritické je chladenie reaktora zabezpečujúce že sa jadro reaktora neroztavý (meltdown). V prípade vodného chladenia možno zvoliť dva typy:

- varné
- tlakové

Pri vodnom chladení je potrebné použiť obohatený urán nakoľko prichádza k absorbcii neutrónov. Čistá voda je málo rádioaktívna (okrem aktivácie kyslíka) ale nečistoty môžu byť rádioaktívne. Riešením sú oddelené okruhy.



Zjednodušený náčrt

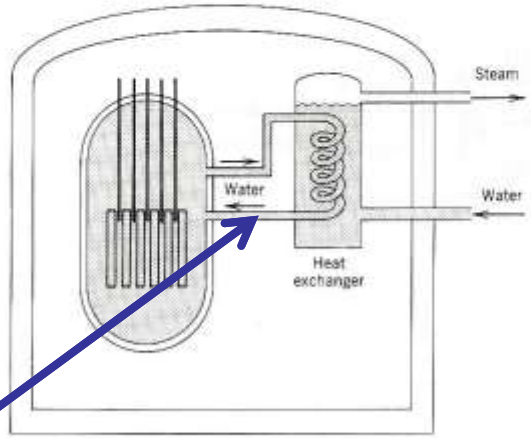
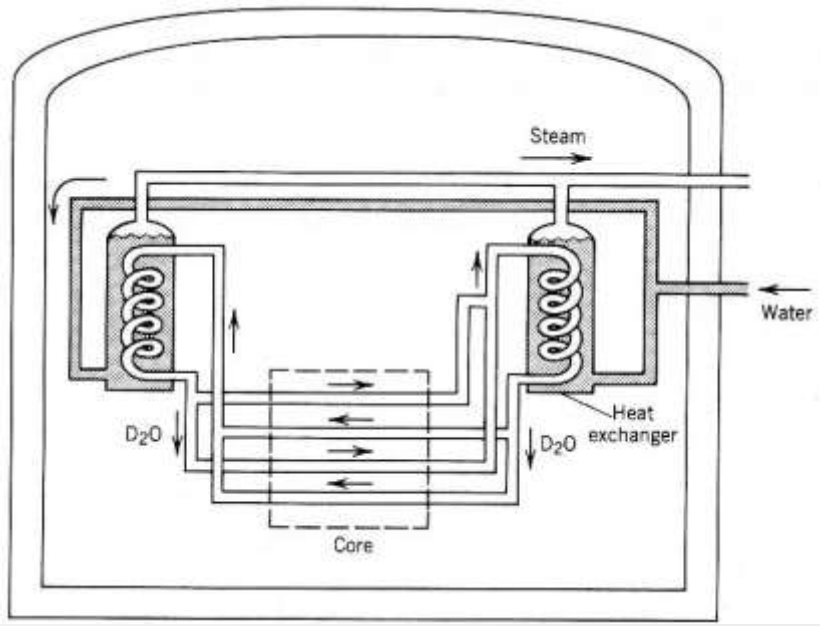


Figure 13.25 Schematic diagram of boiling-water (top) and pressurized-water (bottom) reactors. The core consists of a number of rods containing pellets of uranium oxide in a metal (zirconium alloy or stainless steel) housing. Control rods of cadmium can be inserted into the core to absorb neutrons and keep the power level stable. The boiling-water reactor is shown driving electrical generating equipment. Many details, including the important emergency core cooling system, are omitted.

Chladenie ťažkou vodou

Concept CANDU reaktor (Canadian Deuterium Uranium) – ťažká voda slúži na chladenie (prenos tepla) aj ako moderátor.

Neutróny sú využité efektívnejšie a umožňuje využiť neobohatený prírodný urán.

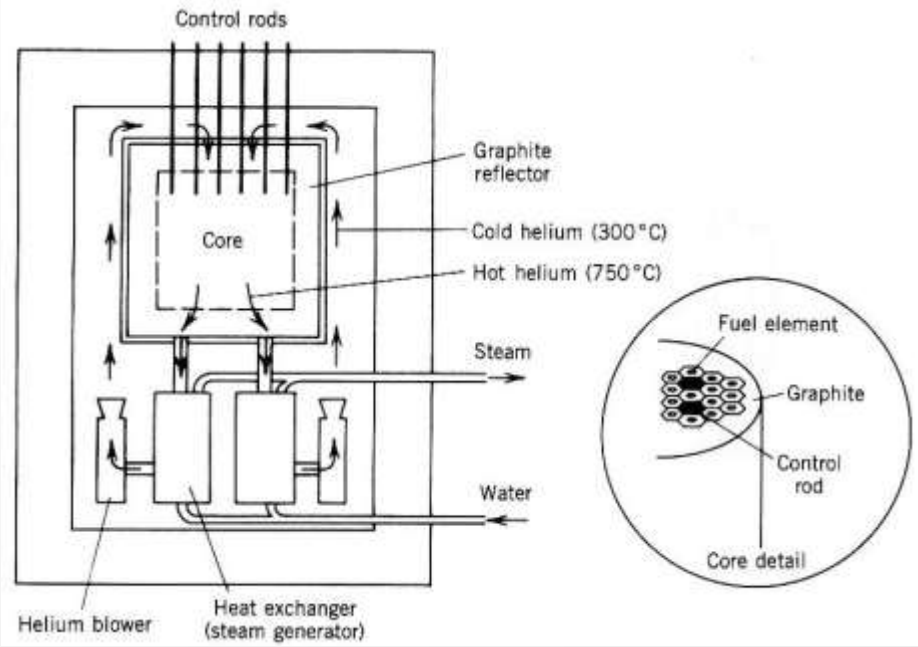


Zjednodušený náčrt

Bruce Nuclear Generating Station (Ontario, Kanada)

Chladenie héliom

Priamo jadrom reaktora preteká hélium. Palivové články su kombinované z paliva, grafitu a kanálikov na pretekanie plynu



Zjednodušený náčrt

Chladenie sodíkom

V prípade reaktorov s vysokým výkonom pracujúcich na vysokej teplote je neefektívne chladenie vodov. Využíva sa roztavený sodík. Netreba používať vysoký tlak média, nevyhodou je korozívnosť a aktivácia.

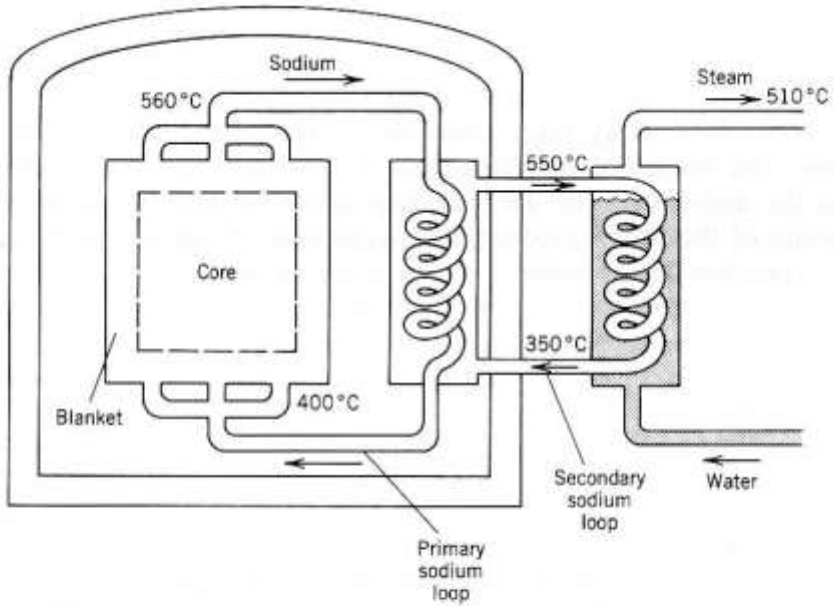


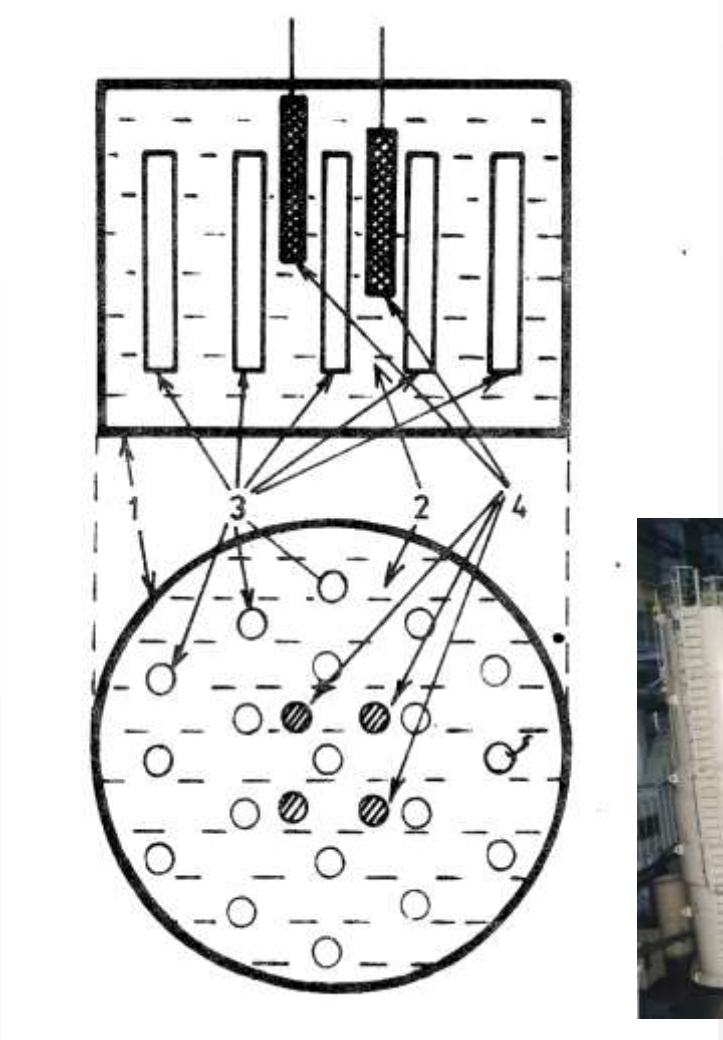
Figure 13.28 Schematic diagram of a liquid-sodium-cooled fast breeder reactor. The core may consist of ^{235}U and ^{239}Pu, while the blanket contains the fertile ^{238}U that will breed into fissionable material. An intermediate heat exchanger is necessary to keep sodium and water (which react explosively) from simultaneously being present in the reactor core, and also to keep water away from the highly radioactive sodium in the primary loop.

Regulovanie reaktora

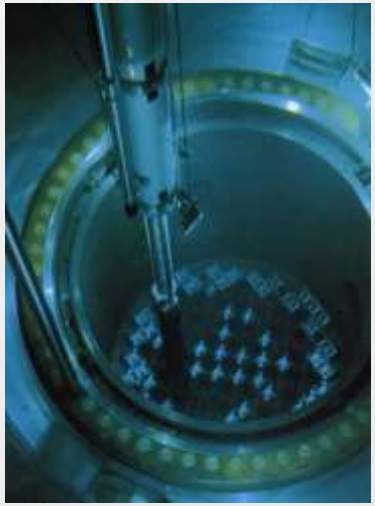
Regulácia reaktora sa realizuje pomocou regulačných tyčí vyrobené z materiálu z vysokým účinným prierezom záchytu neutrónov.

Typicky je vyuzitý karbid bóru $(\sigma = 760\ b)$ alebo kadmium $(\sigma = 2450\ b)$

Regulovanie reaktora



1. Nádoba aktívnej zóny reaktora
2. Moderátor
3. Palivové články
4. Absorbujúci materál, regulačné tyče pohlcujúce neutróny



Energetická bilancia štiepenia

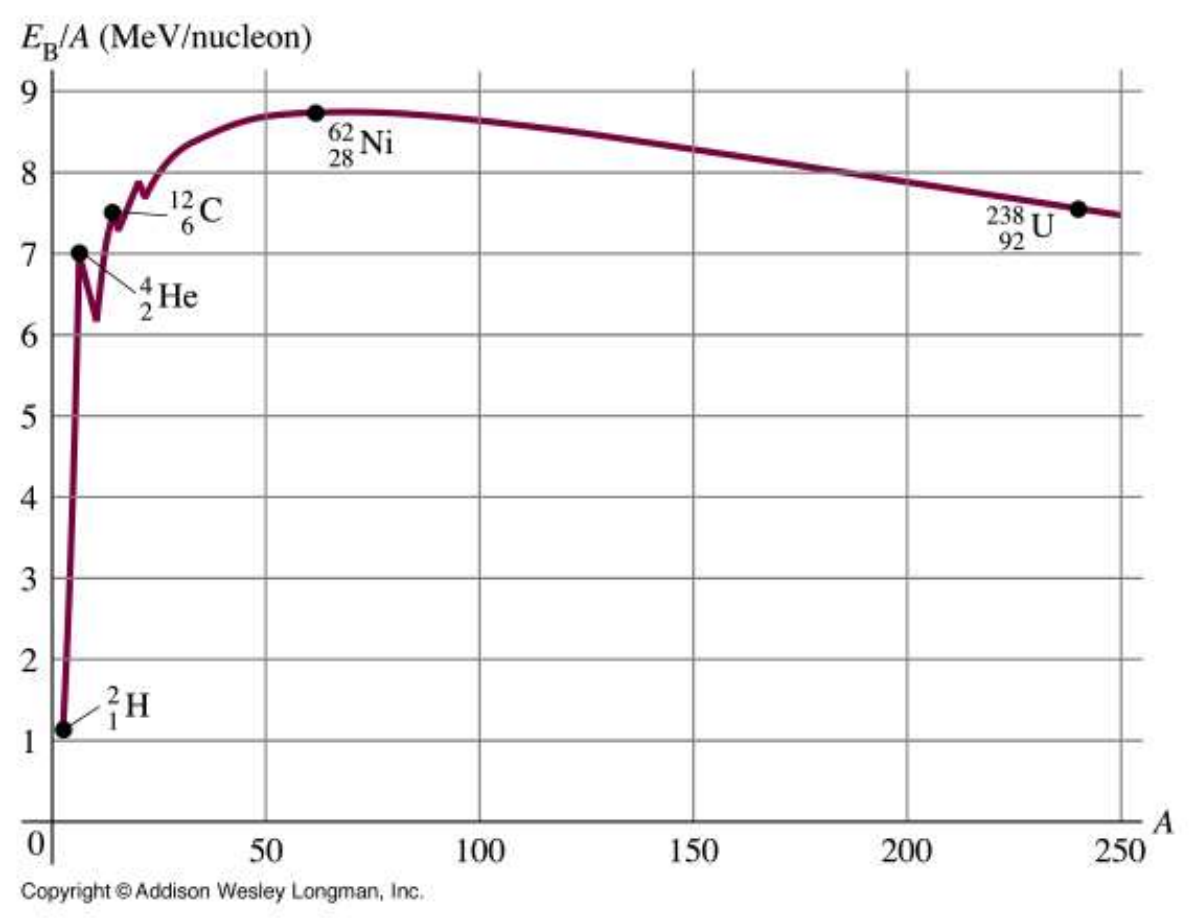
Väčšina energie sa pri štiepení uvoľnuje v podobe kinetickej energie fragmentov.

- V prípade ^{235}U je rozdelenie energie približne nasledujúce:
  Kinetická energia fragmentov ~165 MeV
- Promptné neutróny (v priemere 2.5 neutrónu s priemernou energiou 2 MeV) ~ 5 MeV
- Promptné γ kvantá ~ 8 MeV
- β premena rádioaktívnych fragmentov (približne 30 – 40% elektróny, zvyšok neutrína) ~ 19 MeV
- γ kvantá z fragmentov ~ 7 MeV.

Oneskorene uvoľnená energia

RIADENÁ TERMONUKLEÁRNA REAKCIA

Ako získať energiu z jadier?



Základné reakcie

Fúzia nemôže v normálnych zemských podmienkach prebiehať kvôli nedostatočnej energii na prekonanie kulombovskej bariéry.

Proces $p+p \rightarrow {}^2He$ je nepravdepodobný kvôli nestabilite ${}^2He$.

Proces $p+n \rightarrow {}^2H$ je však prvým krokom nukleosyntézy vo vesmíre.

Ďalšou základnou reakciou je ${}^2H + {}^2H \rightarrow {}^4He + \gamma$.

Q hodnota reakcie 23.8 MeV je však výrazne nad separačnou energiou protónu (19.8 MeV) alebo neutrónu (20.6 MeV) preto by dochádzalo aj k spontánnemu rozpadu.

D-D a D-T reakcie

Vhodnejšie sú preto reakcie s iným vytvoreným jadrom ako ^{4}He:

^{2}H+ ^{2}H $\rightarrow$ ^{3}He+n (Q=3.3 MeV)

^{2}H+ ^{2}H $\rightarrow$ ^{3}H+p (Q=4.0 MeV)

(Q hodnota v týchto prípadoch je vlastne rozdielom Q hodnoty reakcie bez emisie nukleónu a separačnej energii nukleónu.

^{4}He je vhodné formovať napr. v reakcii

^{2}H+ ^{3}H $\rightarrow$ ^{4}He + n (Q=17.6 MeV)

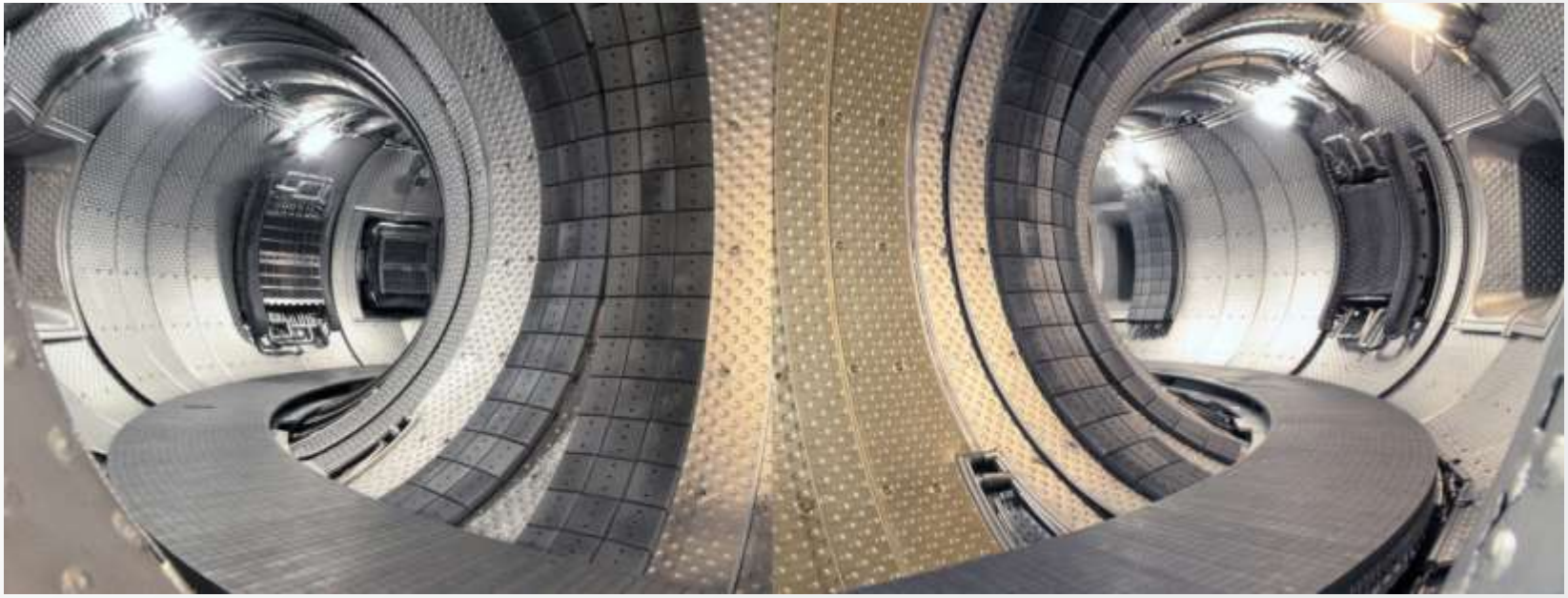
Možné spôsoby

1. Dlhodobé zohriatie hustej $^2H+^3H$ plazmy (1 sekunda) pri $n \geq 10^{15}$ cm^{-3} a $T \approx 10^8$ K.
2. Extrémne rýchle ($\approx 10^{-9}$ s) zohriatie malého množstva kondenzovanej termojadrovej zmesi (D+T, D+D)
3. μ-mezónová katalýza

Tokamak

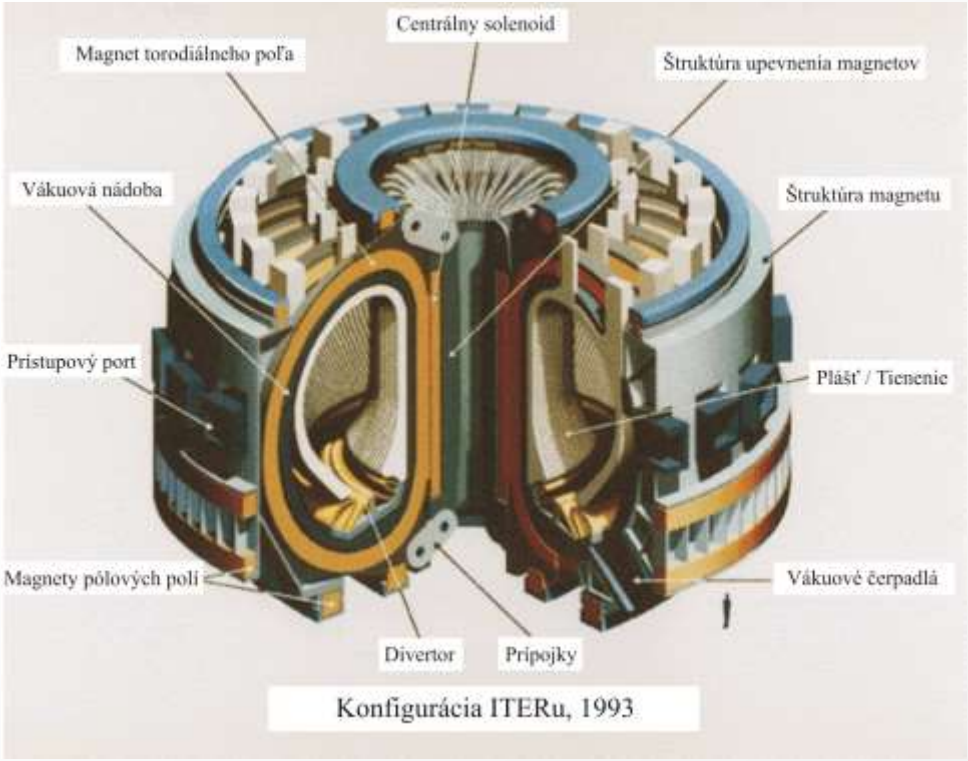
Jedným z konceptov je udržať horúcu plazmu v toroidnej nádobe – koncept tokamaku. Jej zahrievaním, sa umožní realizácia fúznych reakcií. Problémom je udržanie stabilnej plazmy. Aktuálne stovky sekúnd.

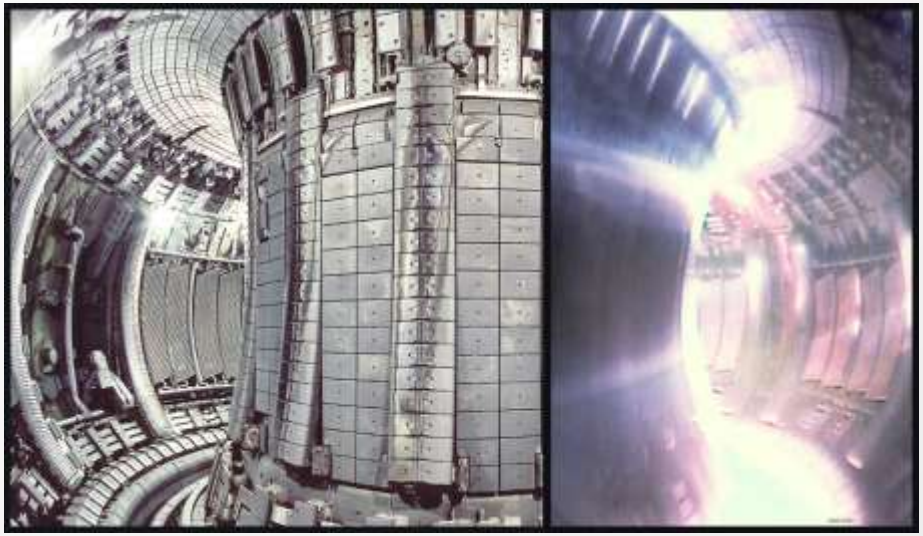
Napr. experiment Tore Supra (Cadarache, Francúzsko) udržal stabilný prúd plazmy 6 a pol minúty (inkjektovaných a extrahovaných 1GJ energie). Podobne experiment SST-1 (Gandhinagar, India) – 1000 sekún na jeden pulz.



Vnútorná nádoba Tore Supra

Typy vyvíjaných fúznych reaktorov





JET (Joint European torus), Culhan (pri Oxforde) GB

ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor; Cadarache) – pokračovanie Tore Supra. Začiatok výstavby 2013 experimenty s plazmou by mali začat 2020 a reakcie s deutériom a tríciom 2027.

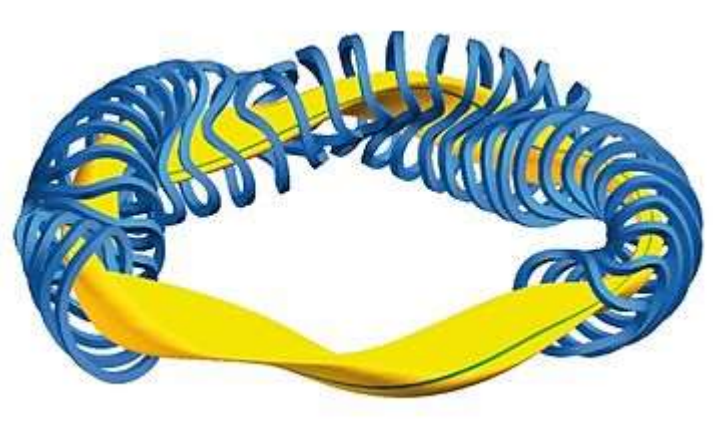
Tokamak

Tokamak má nehomonogénne magnetické pole – v strede je väčšie, takže plazma má tendenciu pohybovať sa vo vertikálnom smere a tým stráca stabilitu. Riešením je zatáčanie magnetických čiar.

V tokamaku sa vytvára magnetické pole prúdom v samotnej plazme indukovaným centrálnym solenoidom. Akonáhle však dosiahneme maximum indukcie prúdu plazma sa stáva nestabilnou.

Stellarator

- Stellarator - sa odlišuje od toroidálnych tokamakov a RPF toroidov tým, že helikálne prúdy v plazme sú vytvárané výlučne vonkajšími cievkami, ktoré sú formované tak aby už samotný prúd plazmy bol stočený a stabilnejší.
- Koncept pochádza z 50tych rokov, ale až do využitia moderných počítačov, nebolo možné presne zrátať magnetické polia.
- Príkladom experiment Wendelstein 7-X, ktorý na prelome rokov 2015 a 2016 dokázal vytvoriť plazmový pulz s dobou ¼ sekundy.



Viaceré praktické problémy

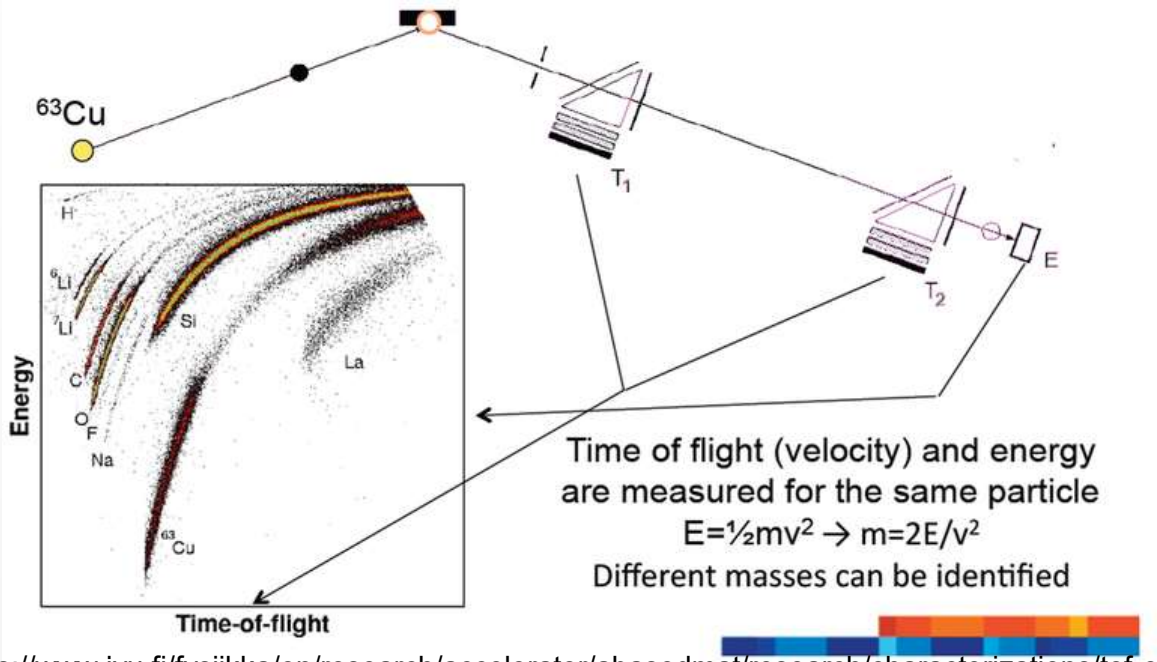
Kritické sú mnohé praktické problémy ako napr.

- Ohrev plazmy:
  - Injektovanie prúdu neutrálnych častíc do plazmy s energiami do 1 MeV aby zdvihli kT nad 100 keV
  - Rádiofrekvenčný ohrev cez rezonátory
  - Indukovanie prúdu prostredníctvom centrálneho solenoidu
- Odvádzanie vytvorenej energie: Vnútorná stena, záťaž okolo 100 $MJ.m^{-2}$. Energia deponovaná α časticami je rádovo niekoľko 100 MW. Prvá stena plazmovej komory dokáže zvládnuť 5 - 10 MWm^{-2}.)

MATERIÁLOVÉ ANALÝZY

TOF-ERDA

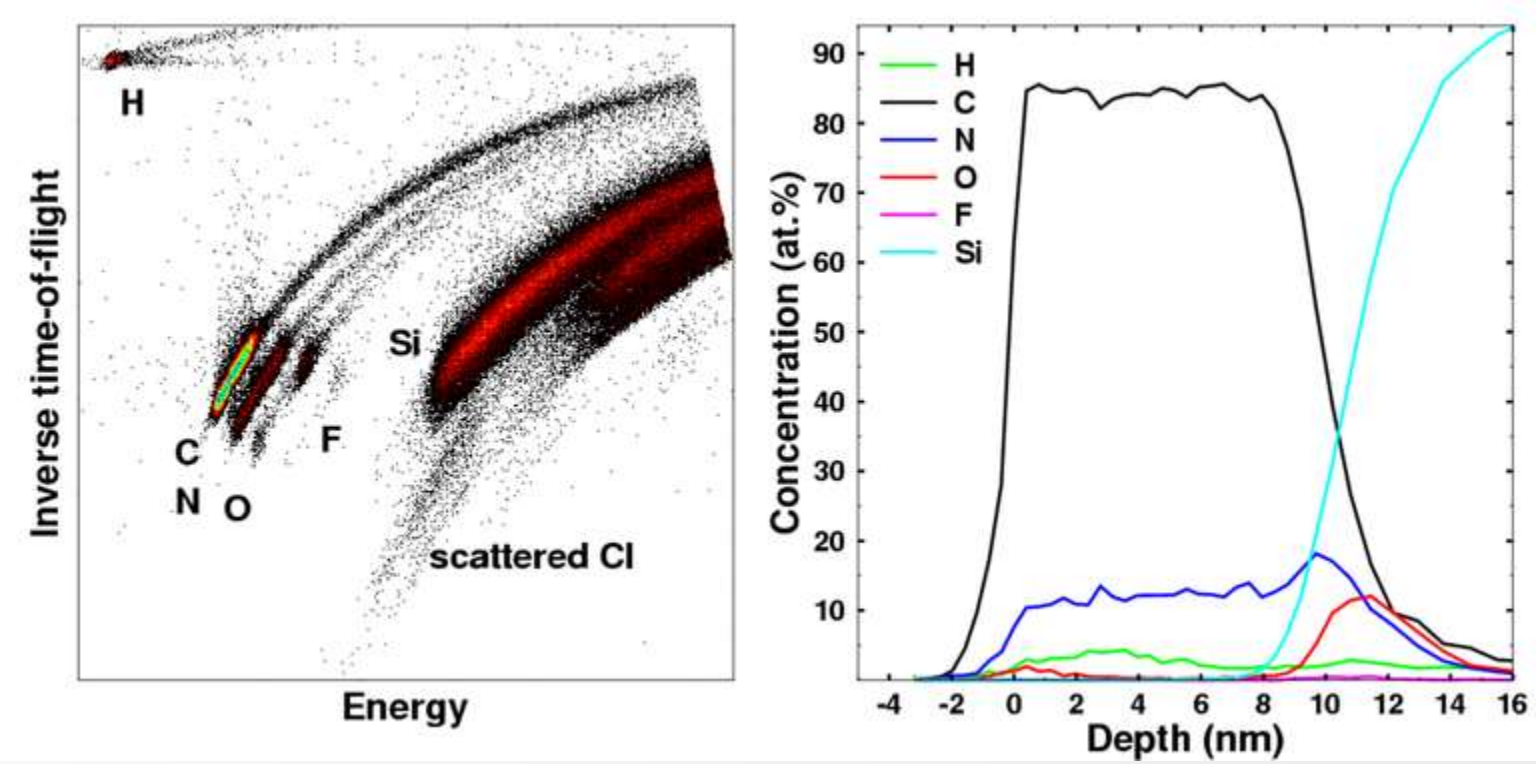
- Time-of-Flight - Elastic Recoil Detection Analysis
- Na materiálovú vrstvu nalietavajú ióny (Cl, Cu, Br, Au...) a vyrážajú z povrchu atómy materiálu. Presným meraním energie a rýchlosti (s využitím TOF detektoru) sa identifikujú jednotlivé prvky.



https://www.jyu.fi/fysiikka/en/research/accelerator/abasedmat/research/characterizations/tof-erda

TOF-ERDA

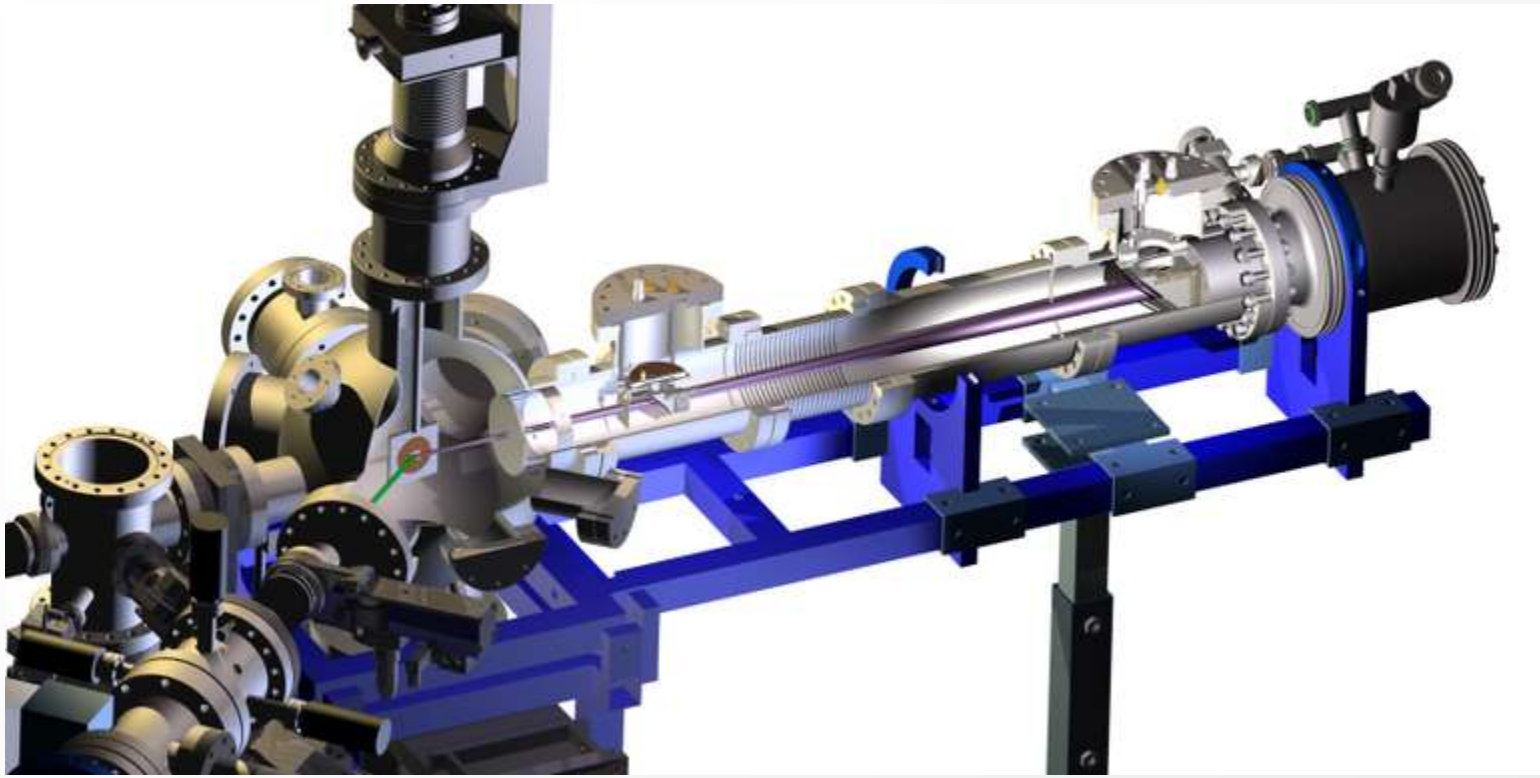
Vzhľadom na nízku energiu iónov je zvyčajne možné skúmať iba bezprostredný povrch materiálu – rádovo od 10 nm po mikrometre.



Príklad CN povlaku na kremíku

https://www.jyu.fi/fysiikka/en/research/accelerator/abasedmat/research/characterizations/tof-erda

TOF-ERDA



Vizualizácia realizácie na Univerzite v Jyväskylä (Fínsko)

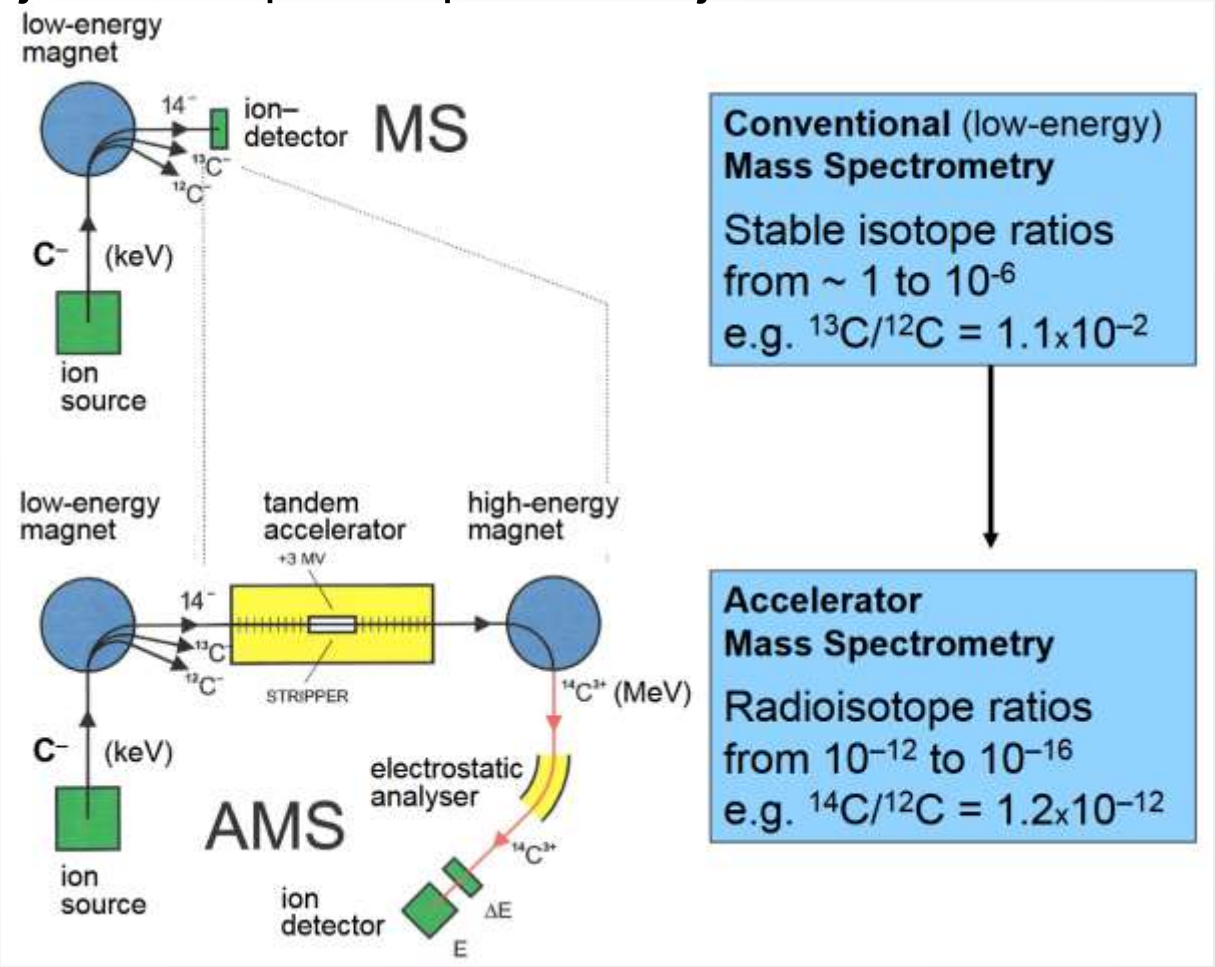
https://www.jyu.fi/fysiikka/en/research/accelerator/abasedmat/research/characterizations/tof-erda

Rádiouhlíkové datovanie

- Rádioaktívny izotop 14C vzniká v atmosfére pri interakcii kozmického žiarenia (konkr. $n + {}^{14}N \rightarrow {}^{14}C + p$). Živé organizmy maju rovnaký pomer izotopov ^{12}C a ^{14}C.
- Akonáhle sa metabolizmus organizmu zastaví začne sa pomer oboh izotopov v dôsledku beta premeny izotopu ^{14}C meniť. Meraním rozpadu ^{14}C dokážeme zistiť vek vzorky. Pôvodný za pôvodný návrh z r. 1947 dostal Willard Frank Libby v roku 1960 Nobelovu cenu za chémiu („for his method to use carbon-14 for age determination in archaeology, geology, geophysics, and other branches of science“)
- Komplikáciou je limit na maximálny vek vzorky. Polčas rozpadu 14C je cca 5730 rokov, technicky je možné merať vzorky s vekom niekoľko desiatok tisíc rokov.
- Potrebné aplikovať korekcie napr. na umelé navýšenie početnosti ^{14}C v dôsledku jadrových testov v 60-tych rokoch minulého storočia, resp. zvýšenie početnosti stabilného ^{12}C v dôsledku spaľovania fosílnych palív.
- Nevýhodou je, že ide o deštruktívnu metódu.

Accelerator Mass Spectrometry (AMS)

Možnosť určenia veľmi nízkych koncentrácií izotopov v materiáli.
Urýchlenie izotopov a separácia magnetickým poľom umožňuje napr. veľmi citlivé datovanie.
Na rozdiel od klasického rádiouhlíkového datovania sa neregistrujú rozpady jadier, ale priamo početnosti jadier.



Výhody:
Vysoká citlivosť (jeden atómu ^{14}C pri 10^{12} atómoch ^{12}C)
Meranie malých vzoriek. Ak klasické datovanie potrebuje 10g dreva, pre AMS postačuje niekoľko 10 mg.

Nevýhody:
Možná kontaminácia vzorky
Cena (vybudovanie AMS laboratória rádovo 1M USD)

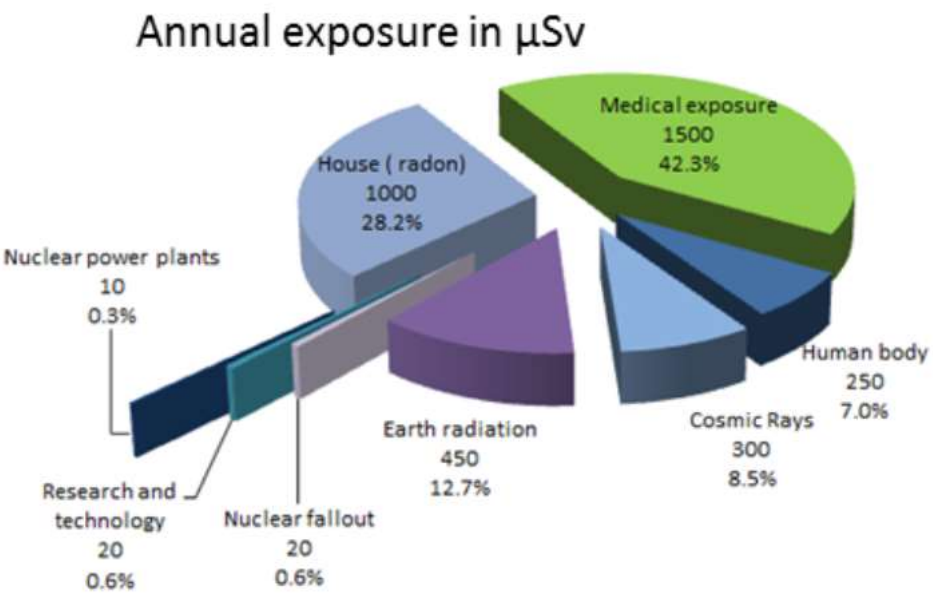
Accelerator Mass Spectrometry (AMS)

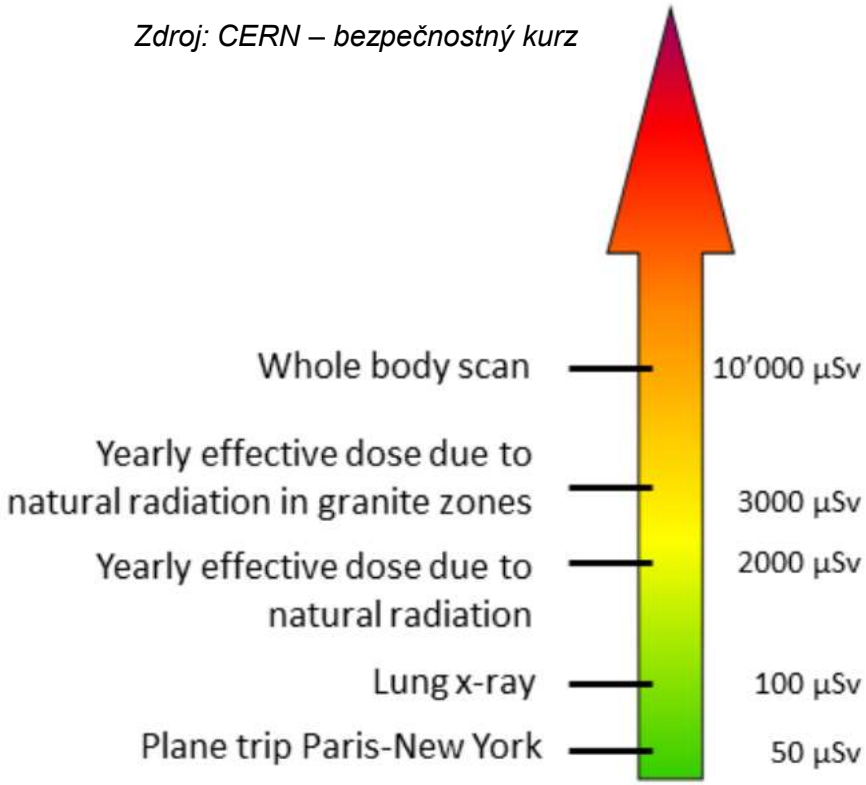
Prvá fáza budovaného AMS laboratória na FMFI UK.

MEDICÍNSKE APLIKÁCIE

Zdroje žiarenia

Zdroj: CERN – bezpečnostný kurz

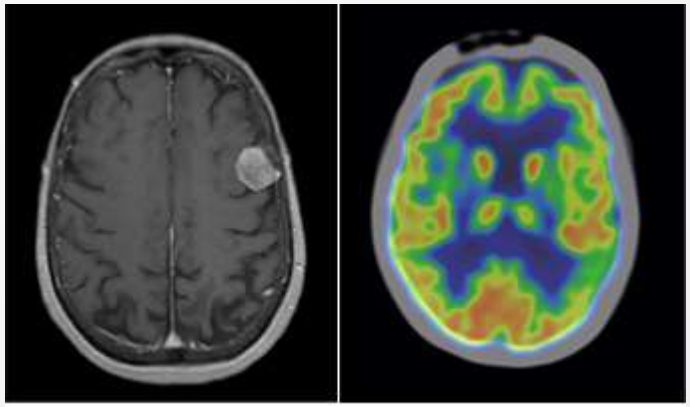




Typické prírodné pozadie 2 mSv/rok.. V niektorých častiach sveta 200+ mSv/rok
~100 mSv – Limit pre pracovníkov vykonávajúcich nevyhnutné záchranné opatrenia. Resp. 4 mesiace na ISS (0.5% zvýšené riziko kritického onkologického ochorenia)
~1000 mSv zvýšené riziko onkologického ochorenia (rádovo 10%) a čiastočná choroba z ožiarenia (znížený počet bielych krviniek, nevoľnosti).
~10000 mSv – smrteľné v priebehu niekoľko týždňov (Tokaimura accident; 17Sv ~ 83 d)

Diagnostika RA izotopmi

- V zlúčeninách viažucích sa na konkrétny orgán sa stabilný izotop prvku nahradí rádioaktívnym (napr. ^{198}Au, ^{11}C, ^{123}I, ^{99m}Tc).
- Ten pri rozpade emituje gama kvantá, ktoré sa môžu snímať detektormi (zvyčajne scintilačné detektory na báze NaI(Tl))
- Možnosť vytvárať snímky orgánov.
- Nevyhnutné krátky polčas.



(Uptake of Sestamibi Confirms tumor recurrence)

PET

- Pozitronovo-emisná tomografia využíva izotopy s β+ rozpadom. Pri anihilácii emitujú dve 511 keV γ kvantá letiace opačným smerom.
- Zvyčajne využívané ^{11}C (20 min), ^{13}N (10 min), ^{15}O (2 min), ^{18}F (110 min)
- Umožňuje určiť miesto a tvar nádoru s presnosťou na milimetre, prekrvenie orgánov, ale taktiež aj zobraziť činnosť a aktivitu mozgu.

- Kritické môže byť ožiarenie pacienta. V závislosti od zvolenej metódy a orgánu, môže dostať pacient dávku od 0.1 po 25 mSv (údaje sa rôznia), čím sa môže niekoľkonásobne prekročiť dávka, ktorú dostane pacient prirodzene (prírodné žiarenie).

Ožarovanie

- Možnosť likvidovať rakovinové bunky ožarovaním. Využíva sa často externé RTG alebo γ žiarenie (^{60}Co, ^{137}Cs). Nevýhodou je zasiahnutie veľkej časti zdravého tkaniva. Možnosť aj vnútorného ožiarenia zlúčeninami obsahujúcimi RA materiál
- Zaujímavé výsledky sa získavajú pri ožarovaní ťažko-iónovými zväzkami. Ťažké ióny (napr. 12C), príp. alfa častice majú relatívne presne definovaný dobeh a najviac energie deponujú na konci dráhy.
- Pri ožarovaní ťažkými iónmi sa umožňuje zmenou energie a smeru interakcie zväzku presne ožarovať iba nádor nachádzajúci sa aj v hlboko v tele (vhodné pri nádoroch mozgu)