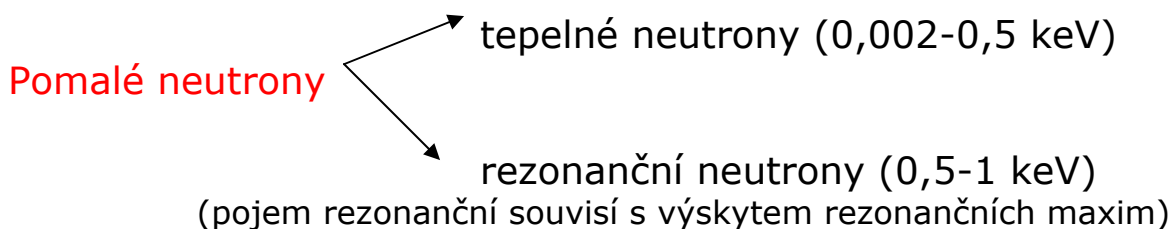


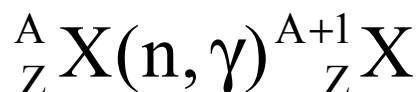
7. REAKCE NEUTRONŮ

- velmi časté reakce s vysokými výtěžky
- pro neutron neexistuje potenciálová bariéra terčového jádra
- pravděpodobnost záchytu neutronu je tím větší, čím je neutron pomalejší (déle se zdržuje v okolí jádra)



Rychlé neutrony $E > 1 \text{ keV}$

Reakce (n, γ) – radiační záchyt neutronu



- produktem je izotop terčového jádra, protože nízká excitační energie složeného jádra nestačí k uvolnění nukleonu – deexcitace probíhá vyzářením fotonu γ
- zvýšený počet neutronů vede často k nuklidům, které podléhají přeměnám β -
- reakce má praktický význam pro průmyslovou produkci radionuklidů (výroba ${}^{32}\text{P}$, ${}^{60}\text{Co}$ aj.)

Reakce jader o $Z > 10$ s pomalými neutrony

- jde o reakce (n, γ) , které jsou exoergické ($Q = 6\text{-}10 \text{ MeV}$)
- probíhají téměř se všemi jádry
- výtěžky bývají velké, $\sigma \approx 10^{-28} - 10^{-25} \text{ m}^2$

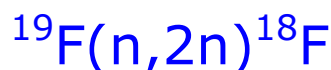
Reakce jader o $Z < 10$ s pomalými neutrony

- zpravidla probíhají reakce typu (n,p) , (n,α) – převládají nad reakcemi (n,γ) , mají vysoké výtěžky a jsou exoergické
- emise kladné částice je umožněna existencí nižší coulombické bariéry a existuje vyšší pravděpodobnost, že nukleon (nebo $2p + 2n$) získají potřebnou energii k opuštění jádra
- reakce se prakticky využívají:

| | |
|--|----------------------------|
| ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$ | výroba tritia |
| ${}^{14}\text{N}(n,p){}^{14}\text{C}$ | výroba ${}^{14}\text{C}$ |
| ${}^{10}\text{B}(n,\alpha){}^7\text{Li}$ | měření a absorpce neutronů |

Reakce těžších jader s neutrony o vyšších energiích

- s rostoucí energií neutronů klesá výtěžek záchytné reakce
- s rychlými neutrony (0,5-10 MeV) roste pravděpodobnost reakcí typu (n,p) a (n,α)
- reakce jsou však zpravidla endoergické a mají malý význam
- významnější jsou reakce typu $(n,2n)$



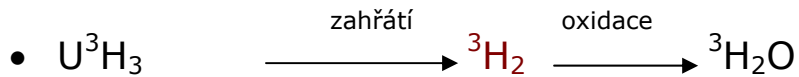
Průmyslová výroba radionuklidů

- vyžaduje reaktor
- toky neutronů musí být alespoň $10^{12} - 10^{13}$ neutronů/s.cm²
- terčový materiál musí být odolný vůči teplu a musí být radiačně stabilní
- výhodou je chemická jednoduchost ozařovaného materiálu (kovy, oxidy)
- terčový materiál se zatavuje do křemenných nebo PE ampulí, které se vkládají do Al-pouzder

Příklady:

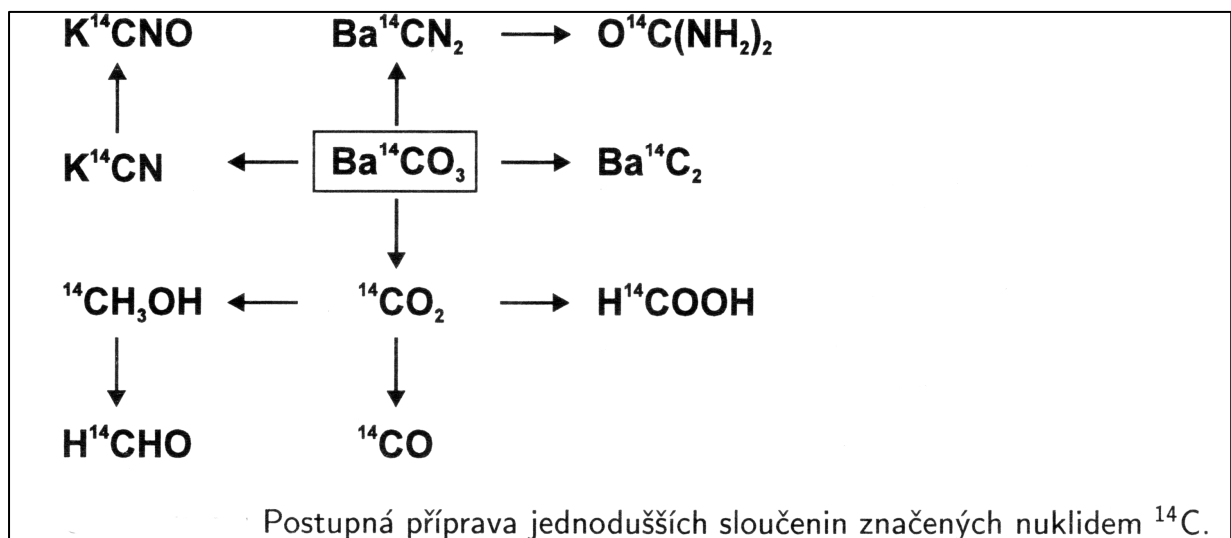
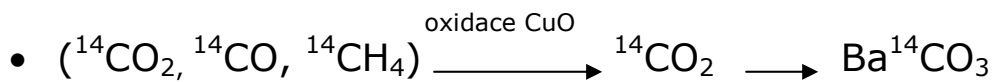
1. Výroba ^3H

- ozařuje se kovové Li
- Li se roztaví ve vakuu a uvolněné $^3\text{H}_2$ reaguje s uranem na U^3H_3



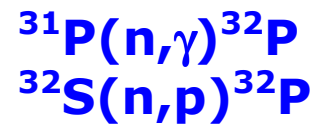
2. Výroba ^{14}C

- ozařuje se Be_3N_2 nebo AlN
- terč se rozpustí ve směsi $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{SO}_4$



Výroba ^{32}P

- a) Ozařování elementárního fosforu
- b) Ozařování elementární síry



Chemické zpracování:

- terč se rozpustí v konc. $\text{HNO}_3 \rightarrow \text{H}_3^{32}\text{PO}_4$
- kyselina se čistí prolitím ionexem

Výroba radioaktivních nuklidů kovů

Nejčastěji z kovových prvků reakcí (n,γ)

- Terč se rozpustí ve vodě (např. ^{24}Na)
- kovy, oxidy se rozpustí v HCl
- může se provést alkalické oxidační tavení

Zvláštní postupy přípravy nuklidů

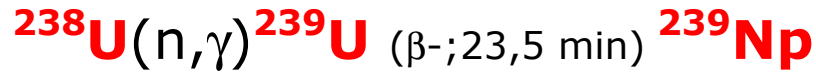
Je nutno aplikovat tehdy, když jsou potenciální výchozí nuklidy samy málo stabilní. Např. z tohoto důvodu nelze realizovat reakci $^{130}\text{I}(n,\gamma)^{131}\text{I} \Rightarrow$



Z ozářeného terče se jod získává sublimací a rozpuštěním v roztoku siřičitanu sodného na Na^{131}I .

Výroba lehčích transuranů ($Z \leq 100$)

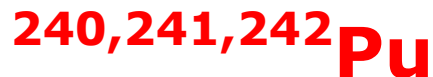
A) ^{238}U se pomalými neutrony neštěpí, probíhá záchytná reakce



\Rightarrow při provozu jaderného reaktoru se v proto v palivu, které je převážně tvořeno ^{238}U , hromadí sekundární štěpný materiál



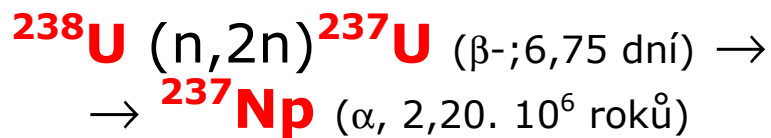
Z tohoto nuklidu mohou při delším ozařování vznikat záchytem neutronu i další radionuklidy



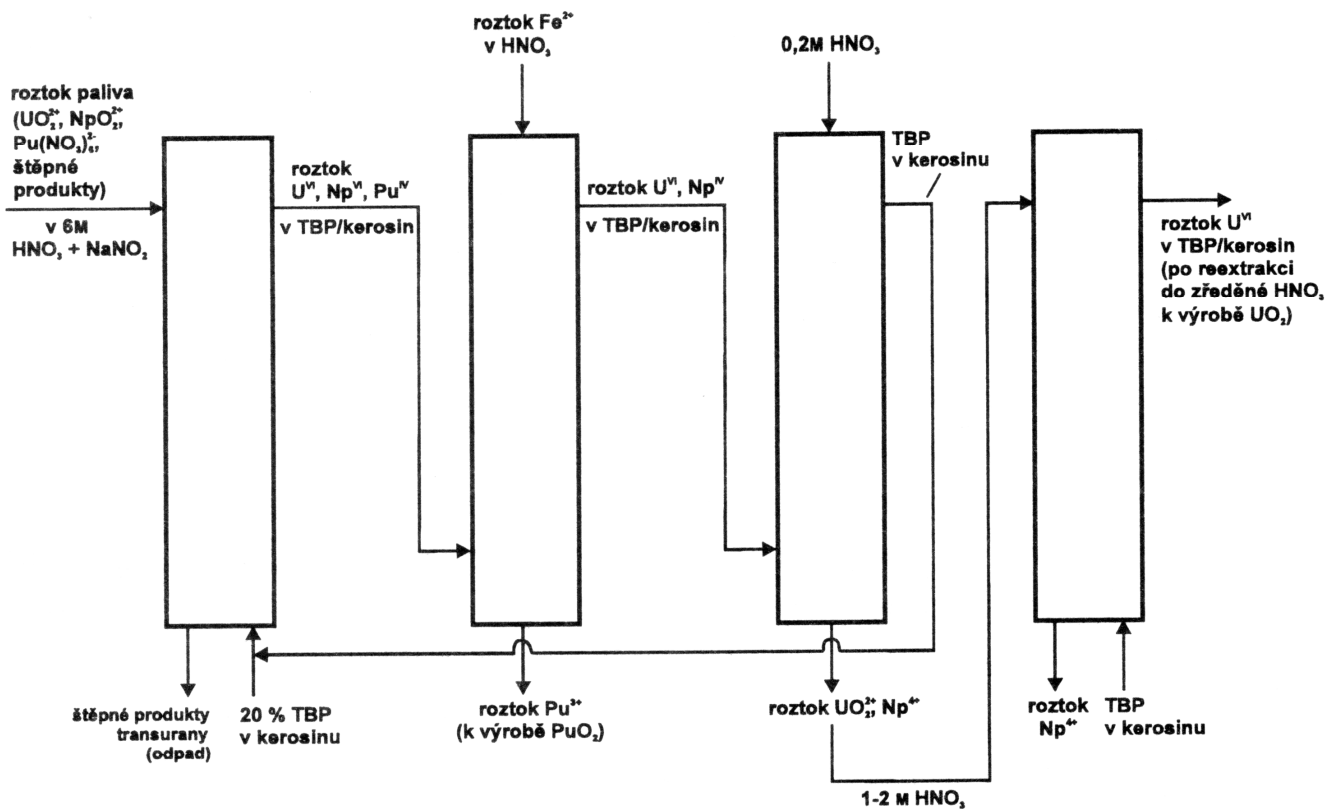
B) jaderném palivu termického reaktoru, který pracuje na principu štěpení ^{235}U , se hromadí ^{237}Np (počáteční nuklid neptuniové řady)



nebo



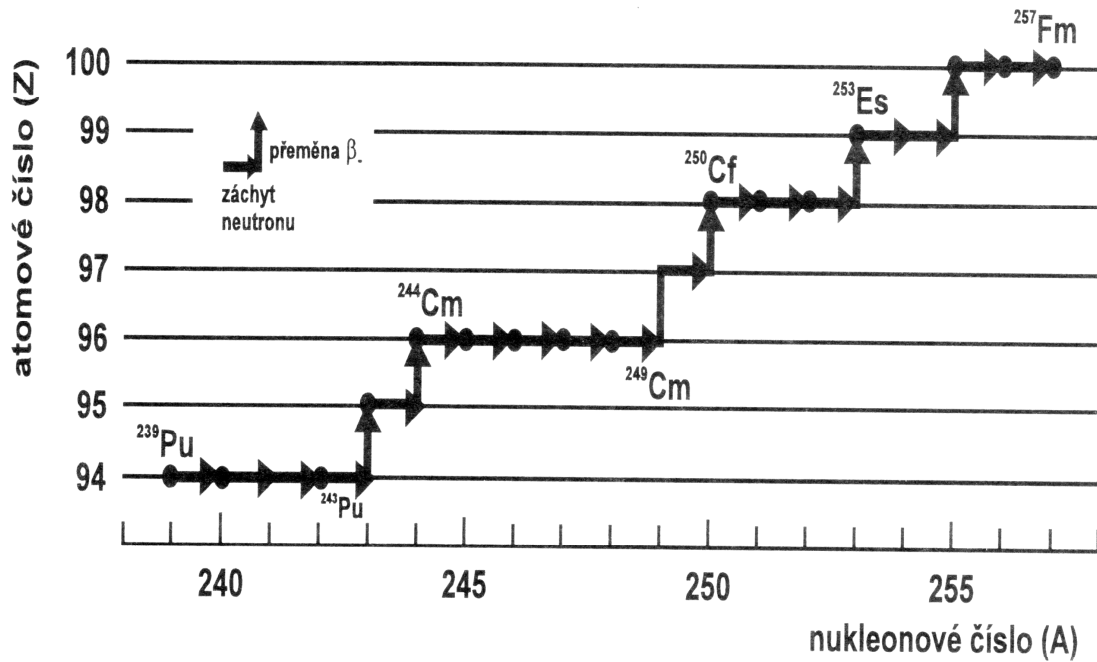
Získávání neptunia a plutonia z ozářeného paliva (Proces PUREX)



Zjednodušené schéma procesu PUREX.

- využívá se rozdílů v redoxním chování U, Np a Pu
- extrakce se provádí TBP (tri n-butylofosfát) v kerosinu
- nutno dbát na to, aby se nenahromadilo někde kritické množství Pu (pro nasycený vodný roztok je to cca 500 g Pu)

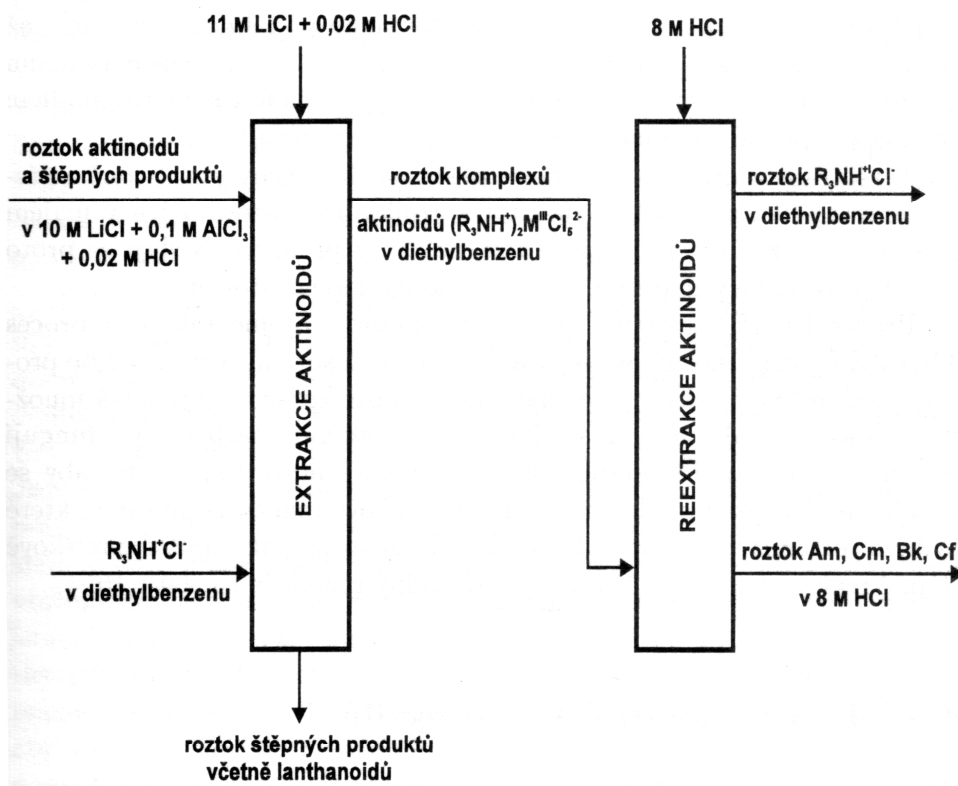
Výroba těžších transuranů



Vznik transuranových prvků postupnými záchyty neutronů a přeměnami

β ...

Dělení těžších transuranových prvků se provádí procesem TRAMEX



Zjednodušené schéma procesu TRAMEX.

Výroba těžších transuranů ($Z > 100$)

neprovádí se dalšími záchyty neutronů a následnými přeměnami β^- izotopy vznikají v malých výtěžcích a mají krátké poločasy přeměny.

Reakce kladně nabitých projektilů

Tyto projektily musí při průniku do jádra překonat **coulombickou bariéru**

⇒ nižší výtěžky reakcí ve srovnání s reakcemi neutronů

| |
|---|
| proton (p) |
| deuteron (d) |
| α-částice (helion) |
| ^3He |
| těžká jádra |

⇒ i u exoergických reakcí musí mít projektil určitou kinetickou energii

Cyklotron (urychlování lehčích částic)

Protony a deuterony lze urychlovat do energie 30 MeV

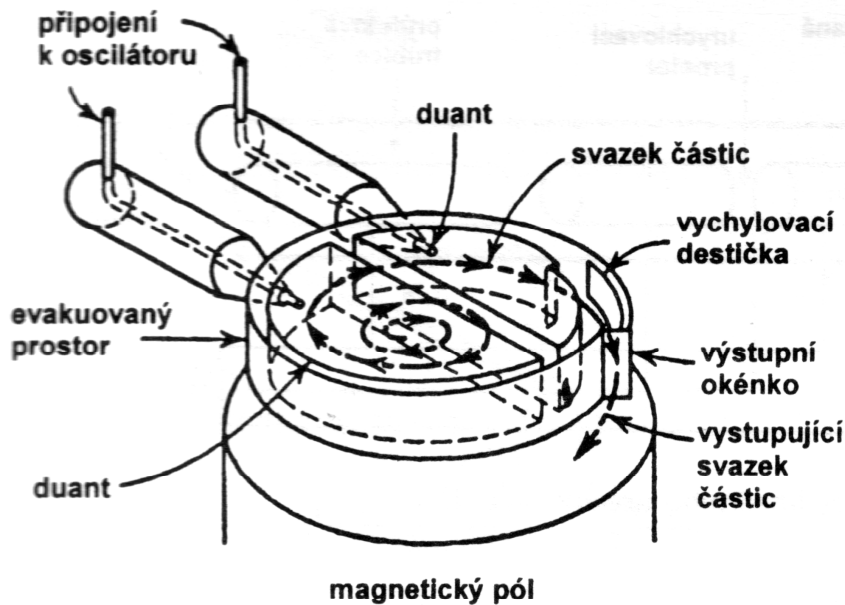


Schéma cyklotronu (druhý pól magnetu, který zde není pro přehlednost zakreslen, je umístěn nad duanty).

Lineární urychlovač

Slouží k urychlování těžších iontů (od Li)

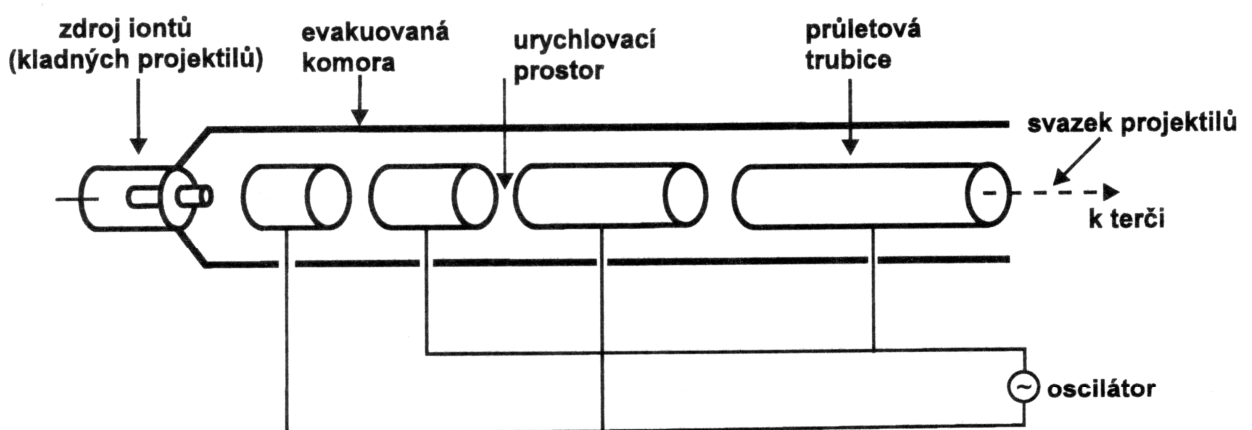


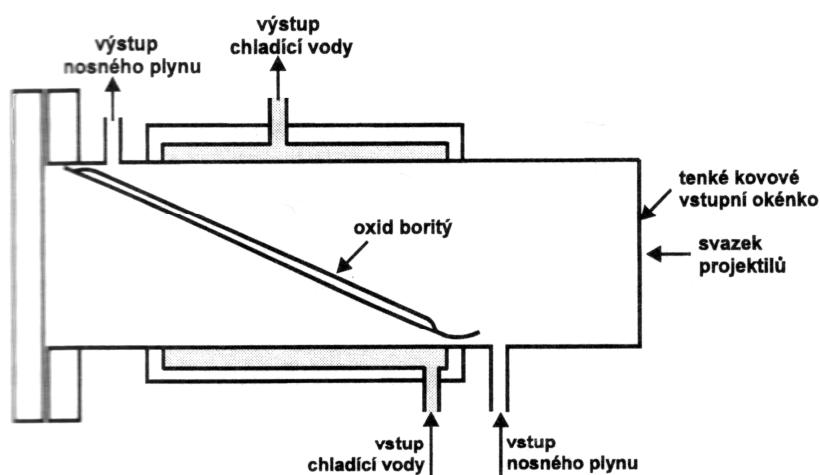
Schéma funkce lineárního urychlovače.

| | |
|---|--------|
| K urychlení protonů | 20 GeV |
| K urychlení ostatních jader (včetně uranu) | 30 MeV |

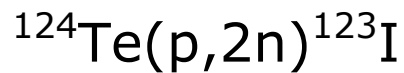
Příklady reakcí:

A) Reakce protonů typu (p,xn)

- Jsou endoergické
- Vedou k neutron-deficitním nuklidům
- Mají zpravidla krátký poločas přeměny ⇒ využívají se v nukleární medicíně
- K jejich výrobě se používají malé kompaktní cyklotrony přímo v nemocnicích



Terčová komůrka pro přípravu nuklidu ^{11}C ozařováním oxidu boritého.

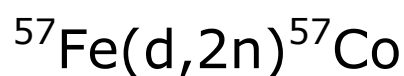
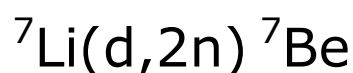


B) Reakce deutronů (d,p)

- Neprobíhají přes složené jádro
-
- Při přiblížení deutronu k jádru se deutron polarizuje, proton se od jádra odvrátí
-
- Nízká vazebná energie deutronu (2,22 MeV) vede k jeho rozštěpení
-
- Neutron je pohlcen jádrem a proton je odmrštěn
-
- Reakce jsou exoergické ($Q = 4-8 \text{ MeV}$)
- Produkty těchto reakcí jsou stejné jako kdyby proběhla reakce (n, γ)
-
- Výťažky jsou vysoké – do jádra neproniká celý projektil

C) Reakce deutronů typu (d,n), (d,2n)

- Významné pro přípravu neutron-deficitních nuklidů



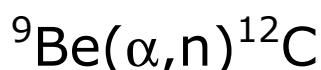
${}^3\text{H}(d,n){}^4\text{He}$ – zdroj neutronů o energii 14 MeV

Neutronový generátor: tritium je rozpuštěno v Ti nebo Zr a je ozařováno deuterony, které produkuje malý lineární urychlovač z plynného deuteria

D) Reakce helionů (α,n)

Radionuklidové zdroje neutronů:

- Obsahují α -nestabilní radionuklid s dlouhým poločasem ${}^{241}\text{Am}$, ${}^{239}\text{Pu}$
- práškové Be
- směs je hermeticky uzavřena do ocelového pouzdra



Toky neutronů jsou relativně malé ($10^5 - 10^6$ n/s při aktivitě α -aktivního radionuklidu 1 GBq)

E) Reakce těžších iontů

- Slouží pro přípravu nuklidů o $Z > 100$

| příprava prvků o Z | terč | projektil |
|--------------------|------------------|----------------------|
| 101 - 106 | lehčí transurany | ionty B - Ne |
| > 106 | nuklidy Pb, Bi | ionty Cr, Fe, Ni, Zn |

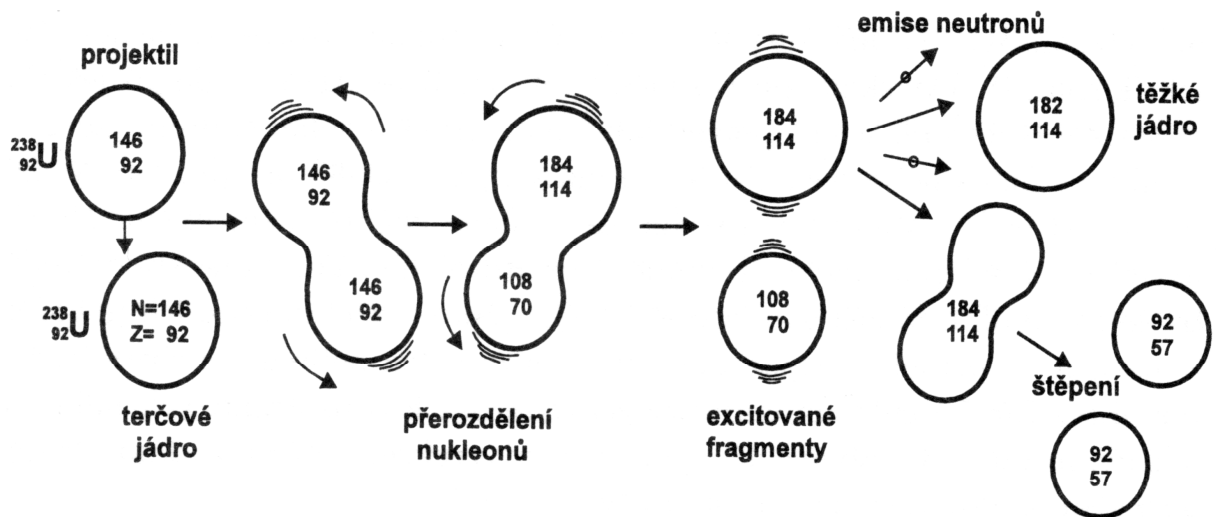
- reakce probíhají mechanismem složeného jádra – vzniká nuklid a jeden nebo více neutronů (protonové číslo se v jednom kroku může zvýšit až o několik jednotek)
- nevýhodou jsou však nízké výtěžky (vysoká potenciálová bariéra)

- projektil musí být proto značně urychlen (min. na 5 MeV/nukleon)
- reakce jsou však nejednoznačné, konkurenční reakcí bývá štěpení složeného jádra
- konkurenční štěpení je však silně potlačeno u nuklidů s $Z > 106$ s lichým nukleonovým číslem

Přehled nuklidů transfermiových prvků.

| Z | známé izotopy (A) | izotop s nejdelším T | T (s) | reakce |
|-----|--------------------|----------------------|---------|---------------------------------------|
| 101 | 248–259 | ^{258}Md | 55 dní | $^{255}\text{Es}(\alpha, n)$ |
| 102 | 250–259 | ^{255}No | 185 | $^{244}\text{Pu}(^{16}\text{O}, 5n)$ |
| 103 | 252–262 | ^{256}Lr | 45 | $^{243}\text{Am}(^{18}\text{O}, 5n)$ |
| 104 | 253–262 | ^{261}Rf | 65 | $^{248}\text{Cm}(^{18}\text{O}, 5n)$ |
| 105 | 255–258, 260–263 | ^{262}Db | 34 | $^{249}\text{Bk}(^{18}\text{O}, 5n)$ |
| 106 | 258–261, 263 | ^{263}Sg | 0,9 | $^{249}\text{Cf}(^{18}\text{O}, 4n)$ |
| 107 | 261, 262, 264 | ^{262}Bh | 0,0061 | $^{209}\text{Bi}(^{54}\text{Cr}, 2n)$ |
| 108 | 264, 265, 267, 269 | ^{269}Hs | 19,7 | produkt α přeměny $^{273}110$ |
| 109 | 266, 268 | ^{266}Mt | 0,0034 | $^{209}\text{Bi}(^{59}\text{Fe}, n)$ |
| 110 | 269, 271–273 | $^{269}110$ | 0,0027 | $^{208}\text{Pb}(^{62}\text{Ni}, n)$ |
| 111 | 272 | $^{272}111$ | 0,0015 | $^{209}\text{Bi}(^{64}\text{Ni}, n)$ |
| 112 | 272 | $^{272}112$ | 0,00028 | $^{208}\text{Pb}(^{70}\text{Zn}, n)$ |

- byl objeven další mechanismus jaderné reakce typické pro těžká terčová jádra (U-Cm, s těžkými urychlenými ionty – **nepružný přenos nukleonů**)



Jaderná reakce probíhající mechanismem nepružného přenosu nukleonů.

- reakce přenosu nukleonů se uplatňují i u lehčích jader

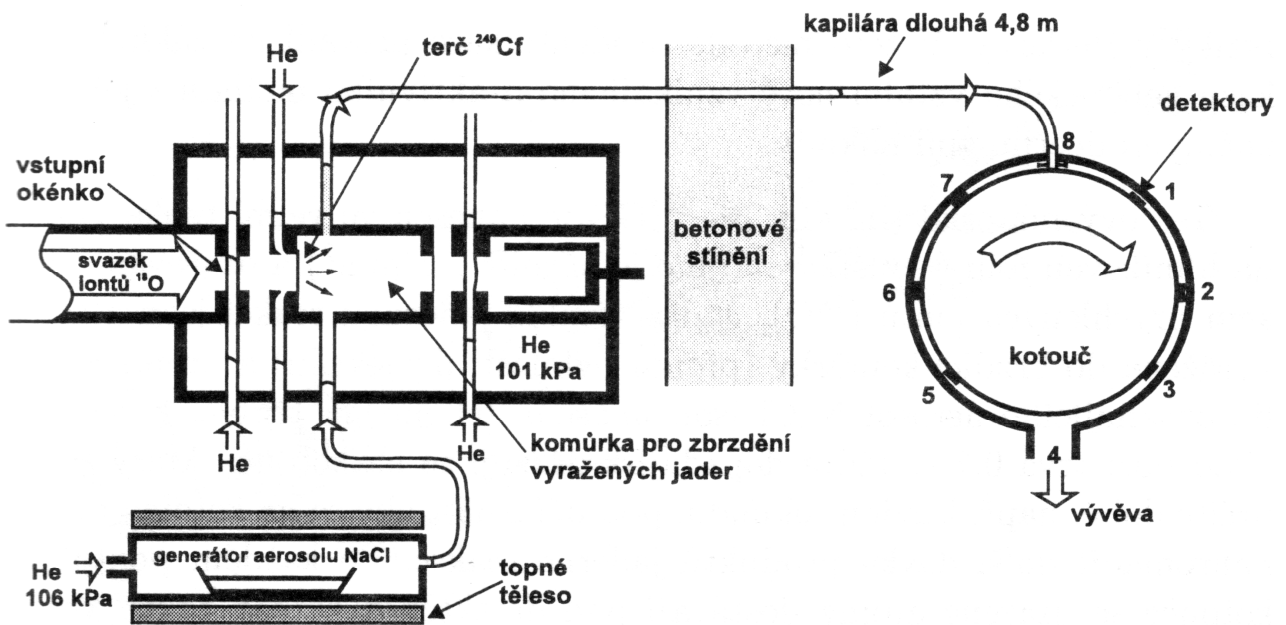


- ${}^6\text{H}$ ($T \sim \text{ms}$) $\rightarrow {}^3\text{H} + 3\text{n}$

Identifikace transfermiových prvků

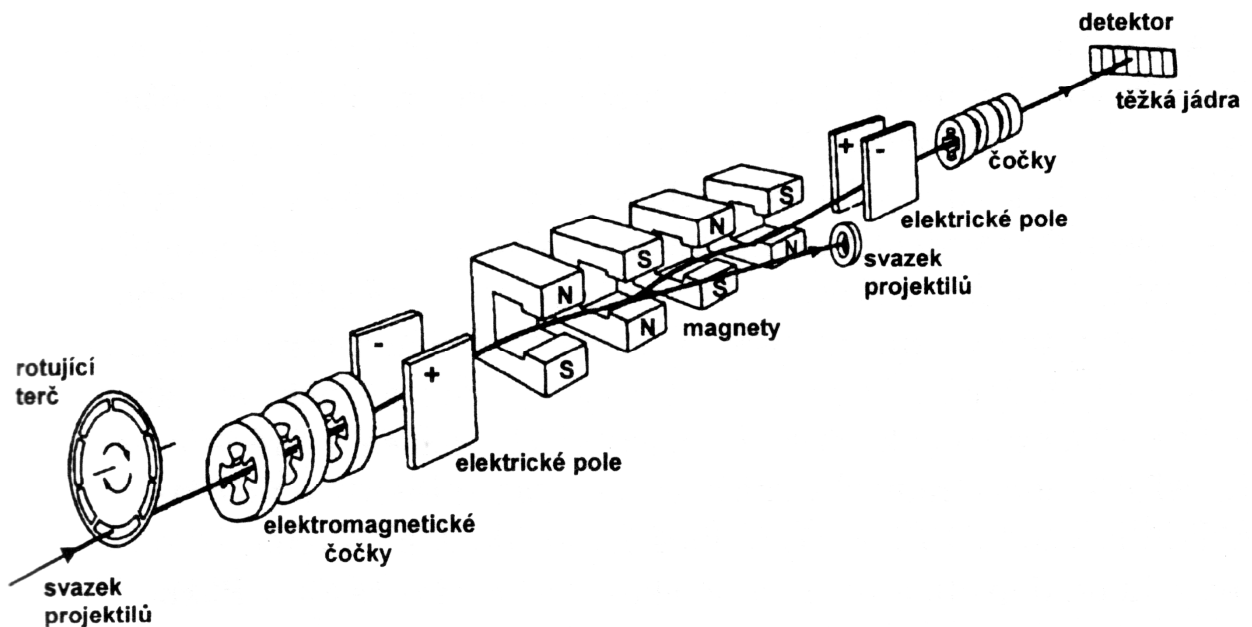
- v produktech ozařování se hledá nová radioaktivita (tj. nová energie a nový doposud nepozorovaný poločas přeměny)
- problémy – při ozařování probíhá řada rušivých reakcí

Metoda heliové trysky



Heliová tryska – zařízení pro identifikaci izotopů transfermiových prvků.

Rychlostní filtr



Rychlostní filtr – zařízení používané k identifikaci nejtěžších nuklidů ($Z \geq 107$) s velmi krátkou dobou života.

Chemická identifikace transfermiových prvků

- je významná pro potvrzení atomového čísla prvku a pro srovnání chemických vlastností (na základě předpovědi jejich vlastností vyplývajících ze zařazení prvku do periodického systému)
- preparativní metody prakticky nepřipadají v úvahu (krátké poločasy)
- chemie se zkoumá v roztoku nebo plynné fázi
- provedení experimentu vychází z určité očekávané chemické vlastnosti prvku – tomu je pořízeno sestavení aparatury
- nutno počítat s extrémně nízkými koncentracemi
- podrobnosti – viz Hála