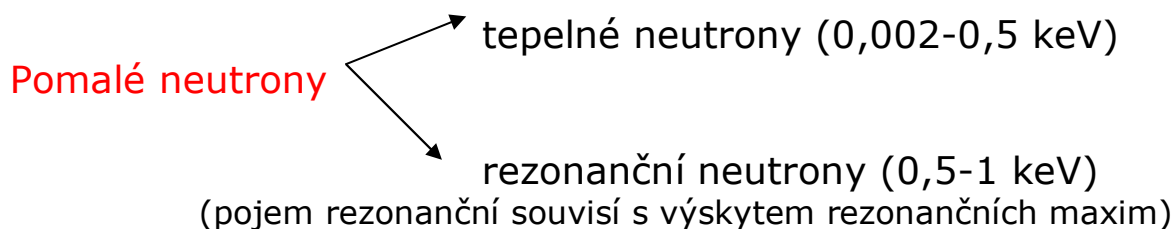


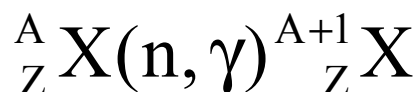
## 7. REAKCE NEUTRONŮ

- 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 $(n, \gamma)$ – radiační záchyt neutronu



- produktem je izotop terčového jádra, protože nízká excitační energie složeného jádra nestačí k uvolnění nukleonu – deexcitace probíhá vyzářením fotonu  $\gamma$
- zvýšený počet neutronů vede často k nuklidům, které podléhají přeměnám  $\beta^-$
- 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  $(n, \gamma)$ , které jsou exoergické ( $Q = 6-10 \text{ MeV}$ )
- 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  $(n,p)$ ,  $(n,\alpha)$  – převládají nad reakcemi  $(n,\gamma)$ , 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  $(n,\alpha)$
- reakce jsou však zpravidla endoergické a mají malý význam
- významnější jsou reakce typu  $(n,2n)$



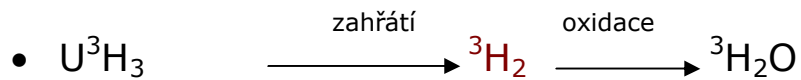
## Průmyslová výroba radionuklidů

- vyžaduje reaktor
- toky neutronů musí být alespoň  $10^{12} - 10^{13}$  neutronů/s.cm<sup>2</sup>
- 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:

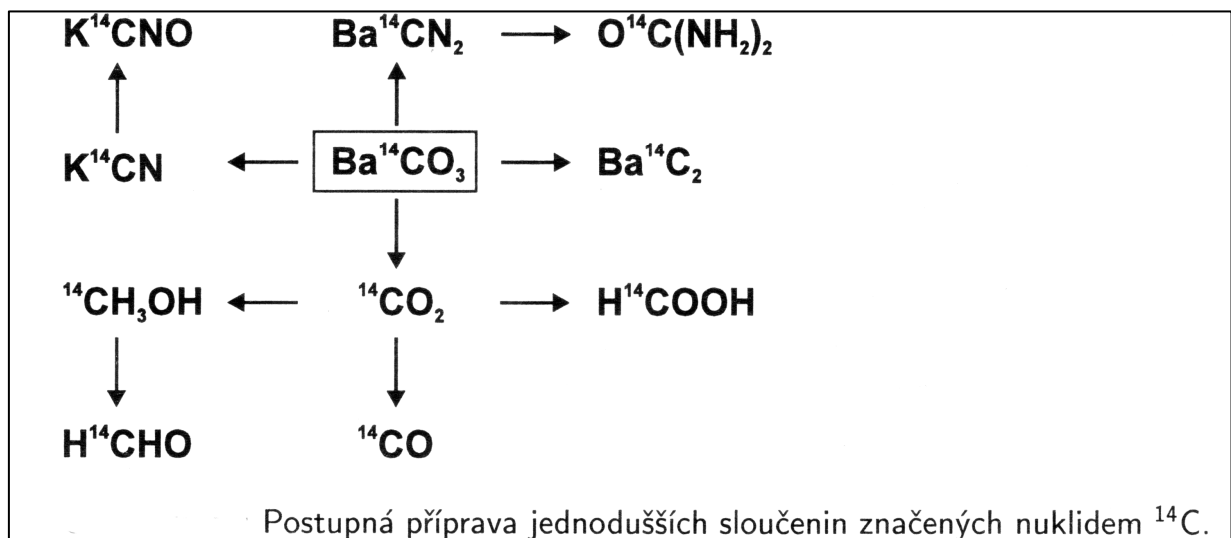
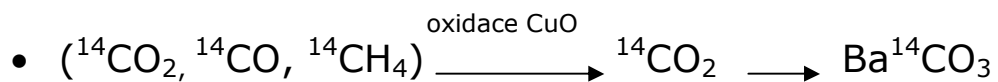
## 1. Výroba $^3\text{H}$

- ozařuje se kovové Li
- Li se roztaví ve vakuu a uvolněné  $^3\text{H}_2$  reaguje s uranem na  $\text{U}^3\text{H}_3$



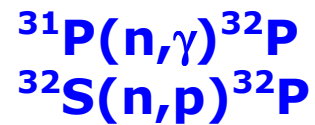
## 2. Výroba $^{14}\text{C}$

- ozařuje se  $\text{Be}_3\text{N}_2$  nebo  $\text{AlN}$
- terč se rozpustí ve směsi  $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{SO}_4$



## Výroba $^{32}\text{P}$

- 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  $(n,\gamma)$

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

## Zvláštní postupy přípravy nuklidů

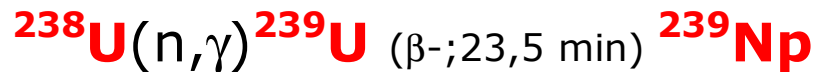
Je nutno aplikovat tehdy, když jsou potenciální výchozí nuklidy samy málo stabilní. Např. z tohoto důvodu nelze realizovat reakci  ${}^{130}\text{I}(n,\gamma){}^{131}\text{I} \Rightarrow$



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

## Výroba lehčích transuranů ( $Z \leq 100$ )

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



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



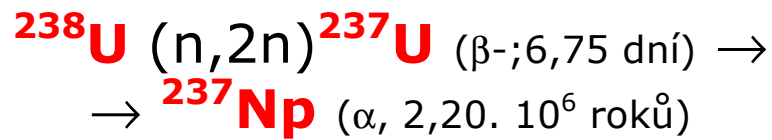
Z tohoto nuklidu mohou při delším ozařování vznikat záchytem neutronu i další radionuklidy



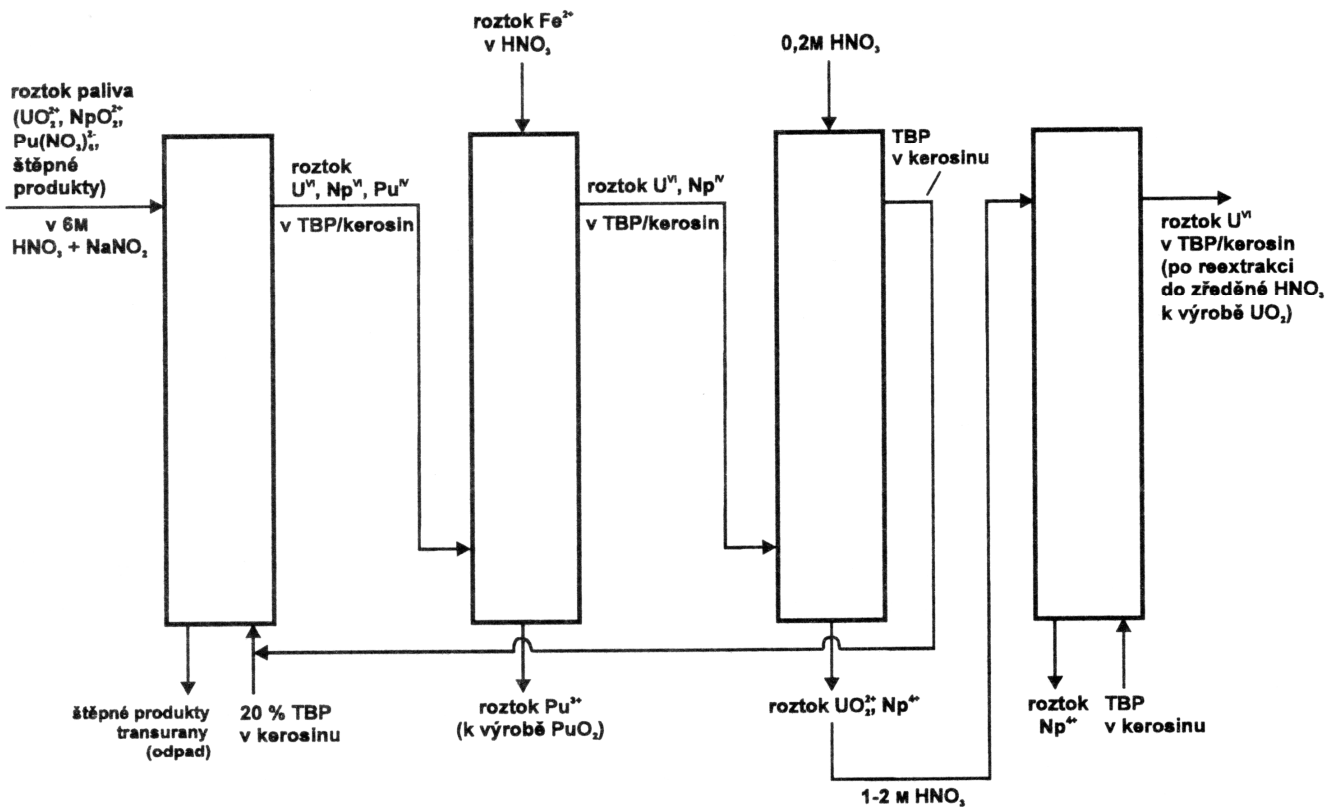
B) jaderném palivu termického reaktoru, který pracuje na principu štěpení  $^{235}\text{U}$ , se hromadí  $^{237}\text{Np}$  (počáteční nuklid neptuniové řady)



nebo



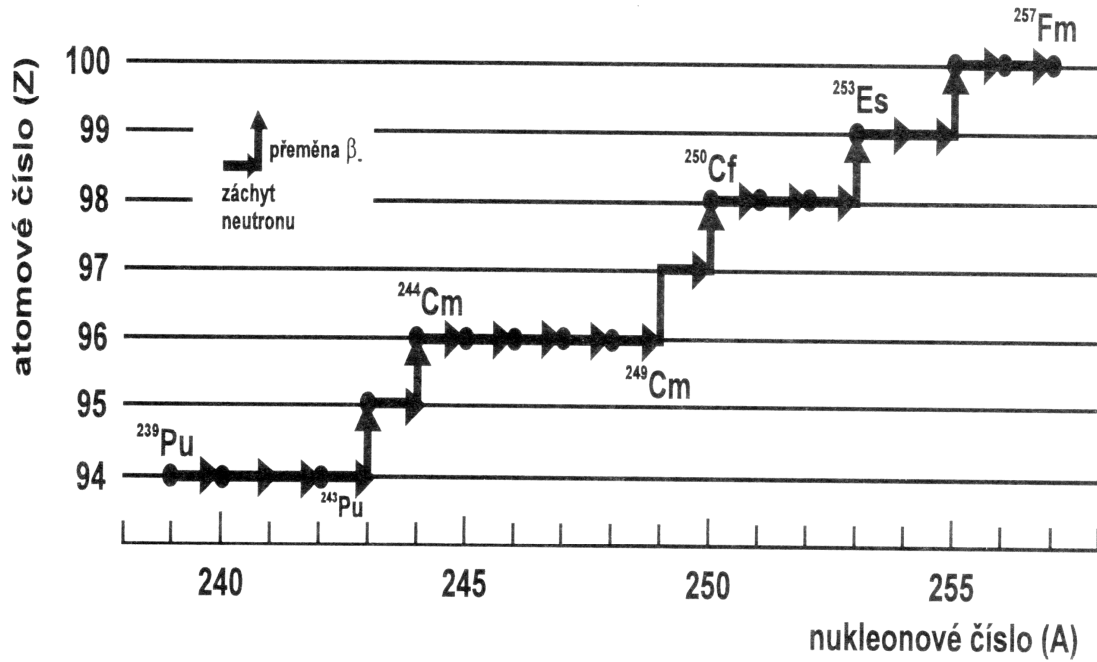
## Získávání neptunia a plutonia z ozářeného paliva (Proces PUREX)



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)

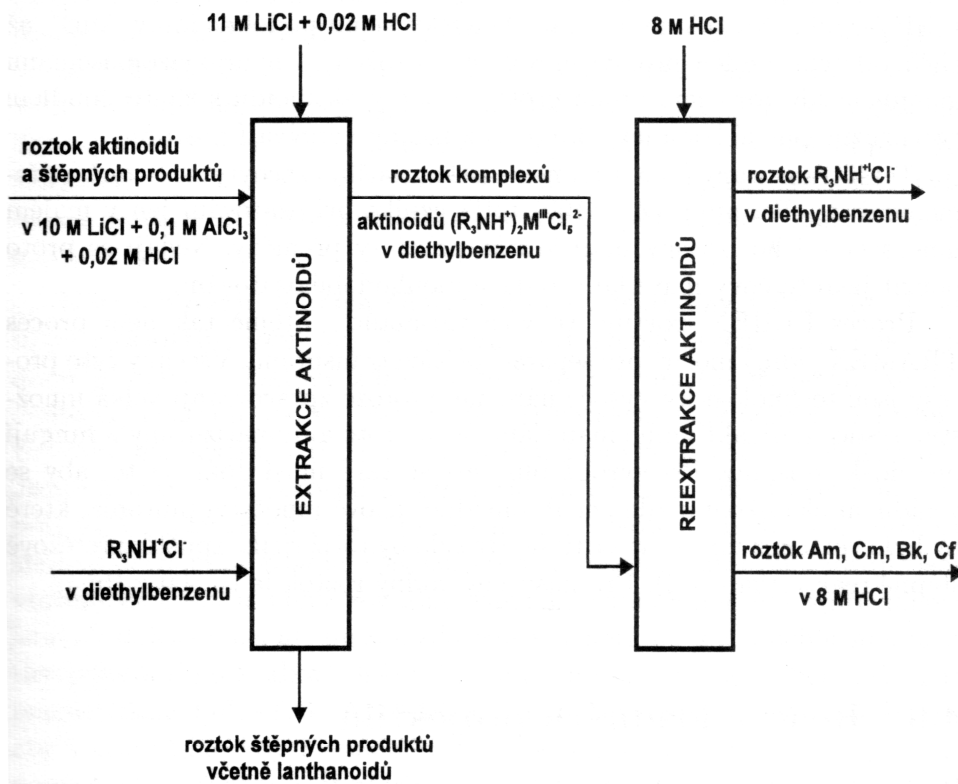
## Výroba těžších transuranů



Vznik transuranových prvků postupnými záchyty neutronů a přeměnami

$\beta$ -...

## 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  $\beta^-$  .... 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

<b>proton (p)</b>
<b>deuteron (d)</b>
<b><math>\alpha</math>-částice (helion)</b>
<b><math>^3\text{He}</math></b>
<b>těžká jádra</b>

⇒ i u exoergických reakcí musí mít projektil určitou kinetickou energii



## Cyklotron (urychlování lehčích částic)

Protony a deuterony lze urychlovat do energie 30 MeV

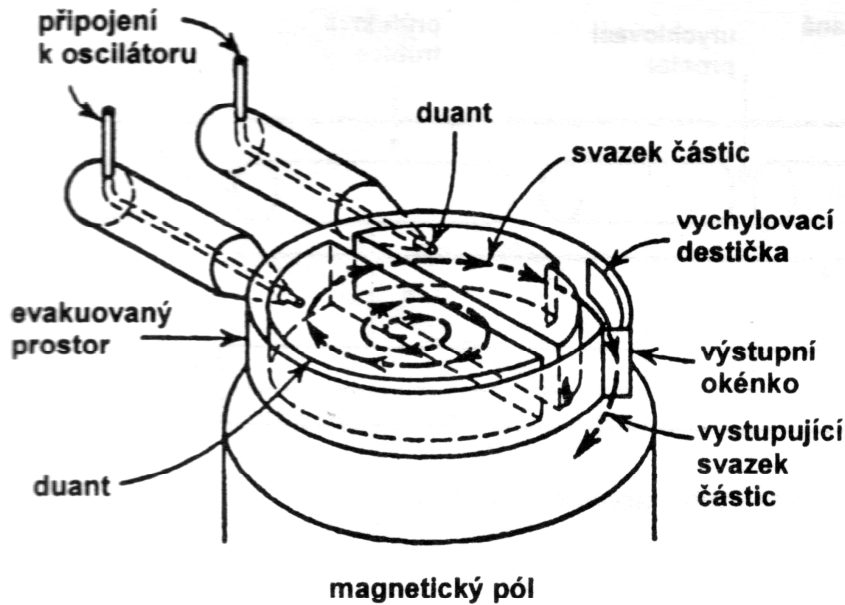


Schéma cyklotronu (druhý pól magnetu, který zde není pro přehlednost zakreslen, je umístěn nad duanty).

## Lineární urychlovač

Slouží k urychlování těžších iontů (od Li)

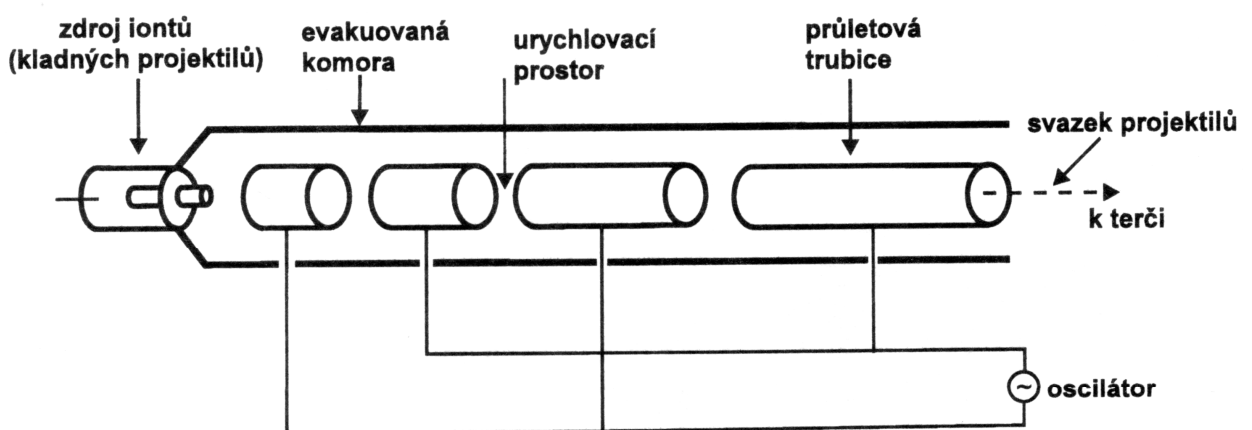


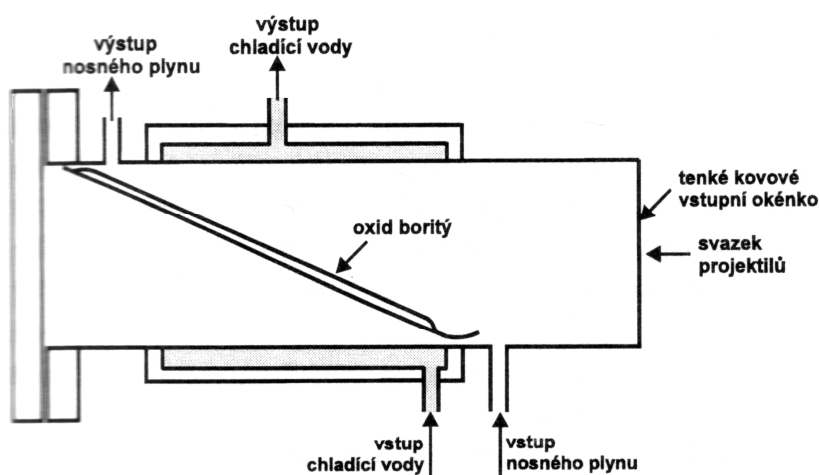
Schéma funkce lineárního urychlovače.

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

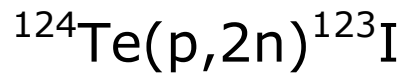
## Příklady reakcí:

### A) Reakce protonů typu (p,xn)

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



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

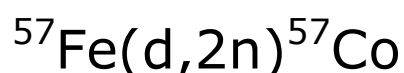
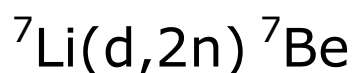


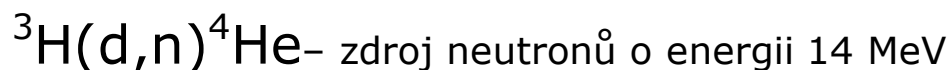
## **B) Reakce deutronů (d,p)**

- 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, $\gamma$ )
- 
- Výťažky jsou vysoké – do jádra neproniká celý projektil

## **C) Reakce deutronů typu (d,n), (d,2n)**

- Významné pro přípravu neutron-deficitních nuklidů



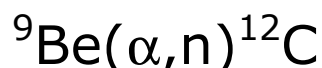


**Neutronový generátor:** tritium je rozpuštěno v Ti nebo Zr a je ozařováno deuterony, které produkuje malý lineární urychlovač z plynného deuteria

## D) Reakce helionů ( $\alpha, n$ )

Radionuklidové zdroje neutronů:

- Obsahují  $\alpha$ -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 ( $10^5 - 10^6 \text{ n/s}$  při aktivitě  $\alpha$ -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

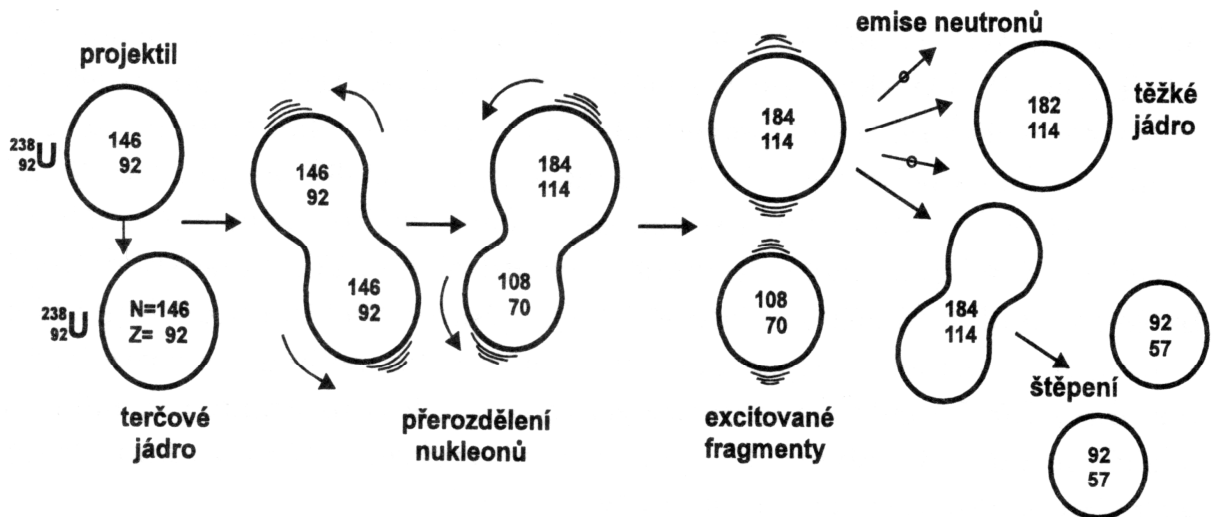
- reakce probíhají mechanismem složeného jádra – vzniká nuklid a jeden nebo více neutronů (protonové číslo se v jednom kroku může zvýšit až o několik jednotek)
- nevýhodou jsou však nízké výtěžky (vysoká potenciálová bariéra)

- 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	$^{258}\text{Md}$	55 dní	$^{255}\text{Es}(\alpha, n)$
102	250–259	$^{255}\text{No}$	185	$^{244}\text{Pu}(^{16}\text{O}, 5n)$
103	252–262	$^{256}\text{Lr}$	45	$^{243}\text{Am}(^{18}\text{O}, 5n)$
104	253–262	$^{261}\text{Rf}$	65	$^{248}\text{Cm}(^{18}\text{O}, 5n)$
105	255–258, 260–263	$^{262}\text{Db}$	34	$^{249}\text{Bk}(^{18}\text{O}, 5n)$
106	258–261, 263	$^{263}\text{Sg}$	0,9	$^{249}\text{Cf}(^{18}\text{O}, 4n)$
107	261, 262, 264	$^{262}\text{Bh}$	0,0061	$^{209}\text{Bi}(^{54}\text{Cr}, 2n)$
108	264, 265, 267, 269	$^{269}\text{Hs}$	19,7	produkt $\alpha$ přeměny $^{273}110$
109	266, 268	$^{266}\text{Mt}$	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

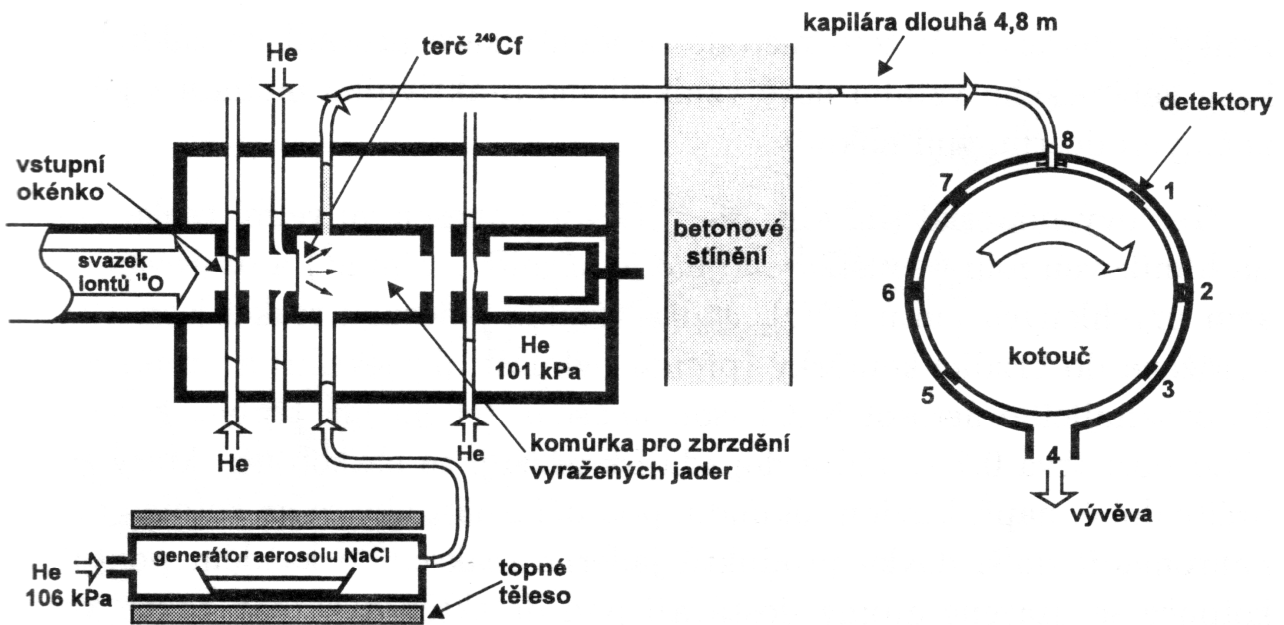


- ${}^6\text{H}$  ( $T \sim \text{ms}$ )  $\rightarrow {}^3\text{H} + 3n$

## Identifikace transfermiových prvků

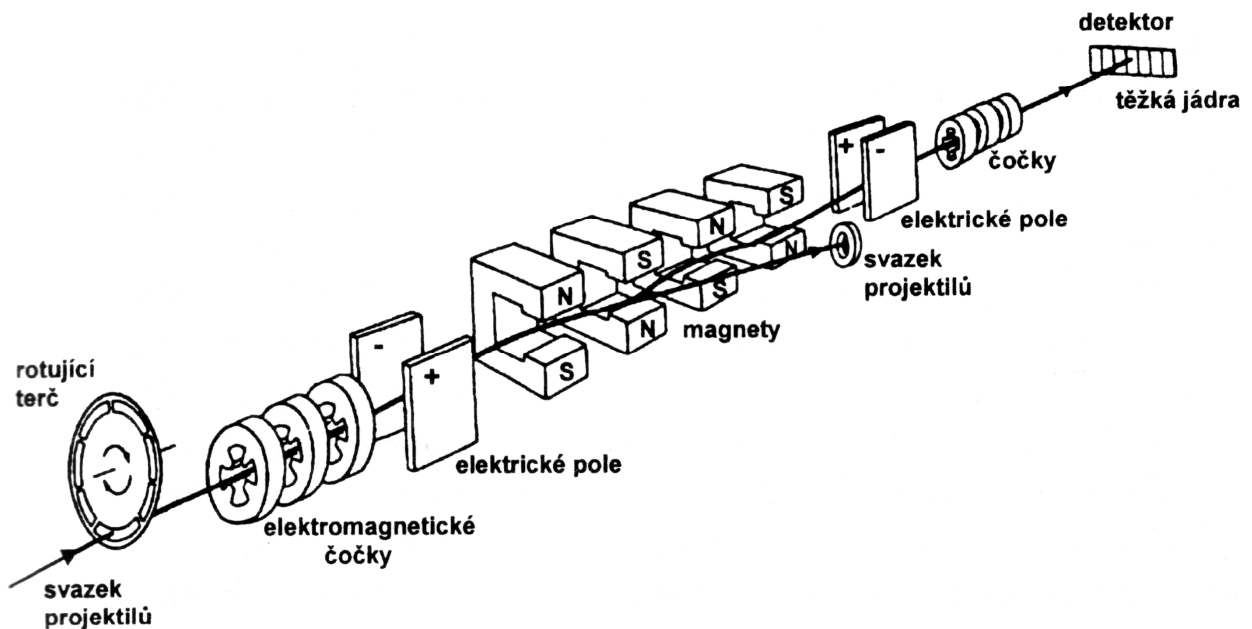
- v produktech ozařování se hledá nová radioaktivita (tj. nová energie a nový doposud nepozorovaný poločas přeměny)
- problémy – při ozařování probíhá řada rušivých reakcí

### 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