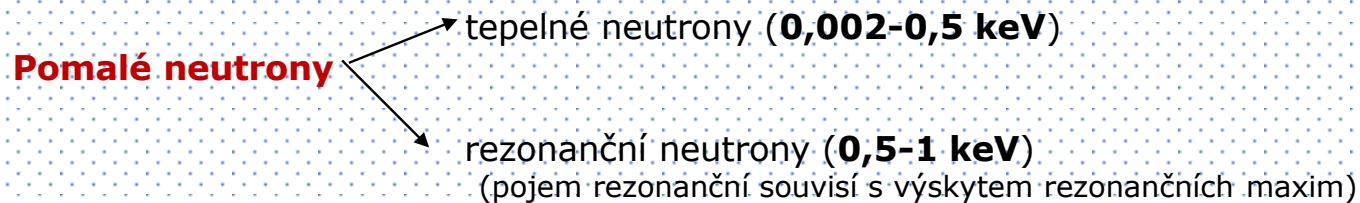


7. Reakce neutronů a kladných projektilů

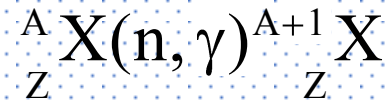


- **reakce neutronů jsou velmi časté, s vysokými výtěžky**
- pro neutron neexistuje potenciálová bariéra terčového jádra
- pravděpodobnost záchytu neutronu je tím větší, čím je neutron pomalejší (tj. déle se zdržuje v okolí jádra)



Rychlé neutrony $E > 1 \text{ keV}$

Reakce (n,γ) – radiční 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 ($Q = 6-10$ MeV)
- probíhají téměř se všemi jádry, výtěžky bývají vysoké $\sigma \approx 10^{-28} - 10^{-25} \text{ m}^2$



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

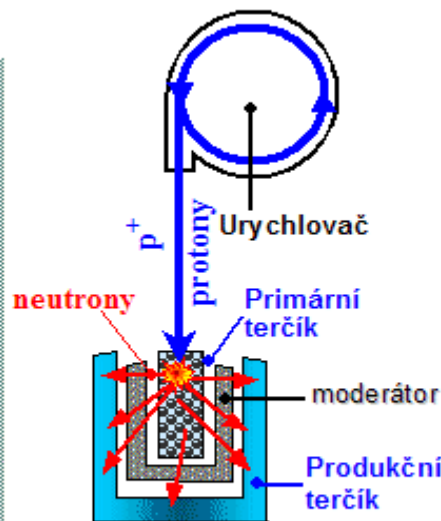
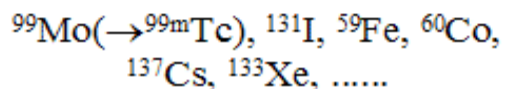
- vyžaduje jaderný reaktor nebo urychlovač kladných projektilů (cyklotron, aj.)
- toky neutronů musí být alespoň $10^{12} - 10^{13}$ neutronů/s cm^2
- výhodou je chemická jednoduchost ozařovaného materiálu (kovy, oxidy)
- terčový materiál musí být odolný vůči teplu a musí být radiačně stabilní
- terčový materiál se zatavuje do křemenných nebo PE ampulí, které se vkládají do Al-pouzder

VÝROBA UMĚLÝCH RADIOISOTOPŮ

Radionuklidy β^-

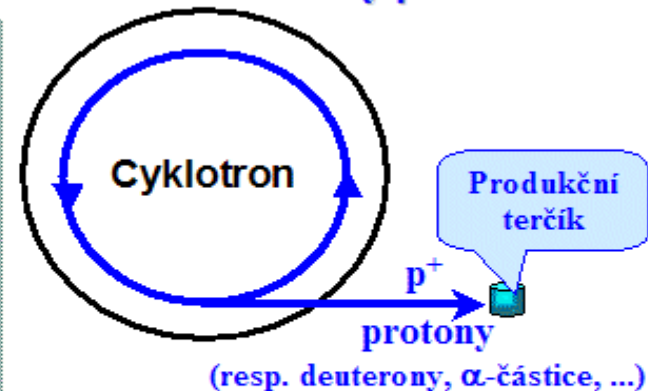


Reakce (n, γ) – záchyt neutronů
– výroba β^- -zářičů v reaktoru :

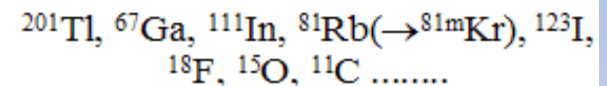


Urychlovačem řízený neutronový generátor

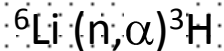
Radionuklidy β^+



Reakce (p, γ) – výroba β^+ -zářičů
v urychlovači (cyklotronu) :



Výroba ^3H



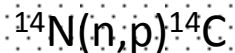
ozařuje se kovové Li

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

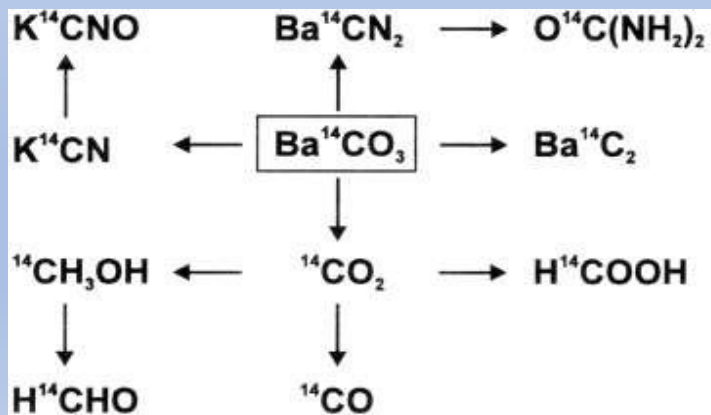
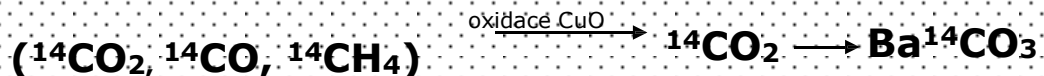


Výroba ^{14}C

ozařuje se Be_3N_2 nebo AlN



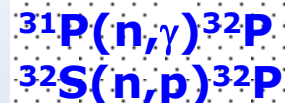
terč se rozpustí ve směsi $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{SO}_4$



Postupná příprava jednodušších sloučenin značených nuklidem ^{14}C .

Výroba ^{32}P

- a). Ozáření elementárního fosforu
- b). Ozáření 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

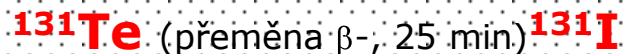
Výroba radioaktivních nuklidů kovů

Nejčastěji z kovových prvků reakcí (n,γ)

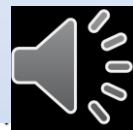
- terč se rozpustí ve vodě (např. ^{24}Na)
- kovy, oxidy se rozpustí v HCl
- může se provést alkalické oxidační tavení (např. s Na_2O_2)

Zvláštní postupy přípravy nuklidů

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



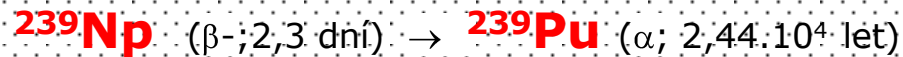
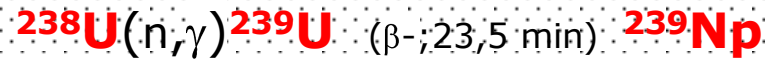
Z ozářeného terče se jod získává sublimací a rozpuštěním v roztoku siřičitanu sodného na Na^{131}I .





Výroba lehčích transuranů ($Z \leq 100$)

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

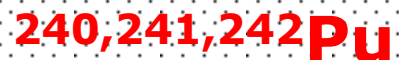


⇒ při provozu energetického jaderného reaktoru se v proto v palivu, které je převážně tvořeno

^{238}U , hromadí sekundární štěpný materiál, a to:



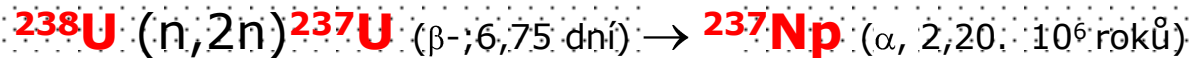
Z tohoto nuklidu mohou při delším ozařování vznikat záchytem neutronu i další radionuklidy



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



nebo



Přepřacování jaderného paliva

Získávání neptunia a plutonia z ozářeného (použitého) paliva

(proces **PUREX**), využívá se rozdílů v redoxním chování **U, Np a Pu**

(zkratka **PUREX – Plutonium-Uranium Refining Extraction**)

- Tento proces umožňuje od transuranů oddělit štěpné produkty.
- Původně byl navržen pro účely získávání především zbytkového ^{235}U a samozřejmě i ^{238}U (o složení jaderného paliva viz kapitola o jaderné energetice). Bonusem bylo získávání dalších transuranů, především ^{239}Pu . Avšak vzhledem k tomu, že proces je velmi nákladný, dnes tento proces pro uvedené účely není v podstatě využíván. Levnější je získávat uran z přírodních zdrojů. Proto se použité jaderné palivo skladuje, nejprve v prostorách jaderných elektráren v dočasném úložišti, po uplynutí doby (cca 40 - 50 let) pak v úložišti trvalém. Toto úložiště pak bude potenciálním zdrojem uranu, až jeho získávání bude ekonomické. Navíc, mnoho radioaktivních štěpných produktů, které se také v palivových článcích nacházejí, do té doby vymře a přepracování bude bezpečnější.

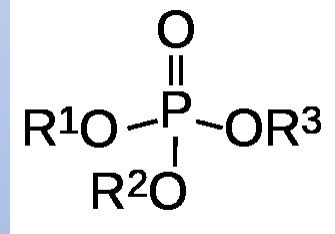
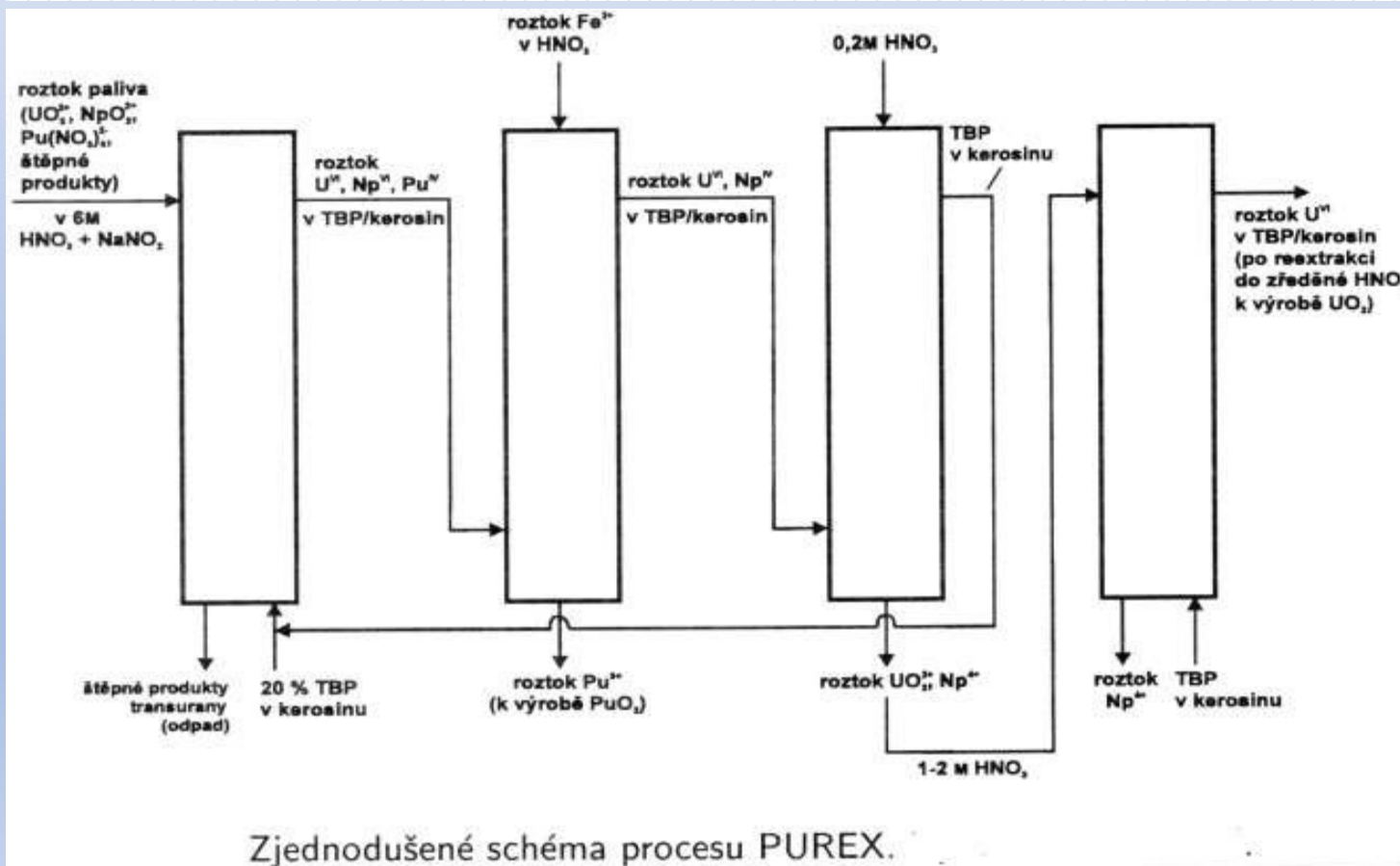


Dočasné úložiště použitého jaderného paliva



Provedení procesu PUREX

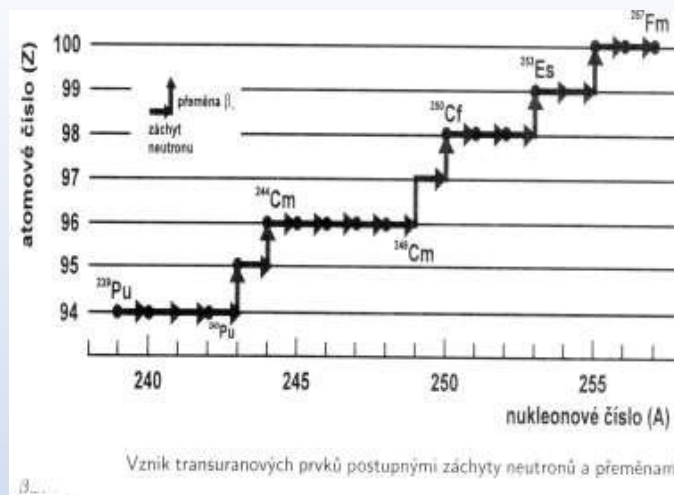
- palivo vyjmuté z reaktoru se rozpustí v konc. HNO_3 , tento roztok obsahuje veškeré transurany a štěpné produkty – dusičnany všech kovů jsou rozpustné
- separace transuranů z roztoku se provádí kapalinovou extrakcí protiproudě pomocí extrakčního činidla, kterým je **TBP (tri n - butylfosfát)** v kerosinu, což je triester kyseliny fosforečné (viz vzorec, R – n-butyl)
- reextrakce se provádí železitou solí
- další průběh provedení extrakčního procesu vyplývá z přiloženého schématu
- nutno dbát na to, aby se někde v technologii nenahromadilo kritické množství Pu (pro nasycený vodný roztok je to cca 500 g Pu) – nebezpečí exploze



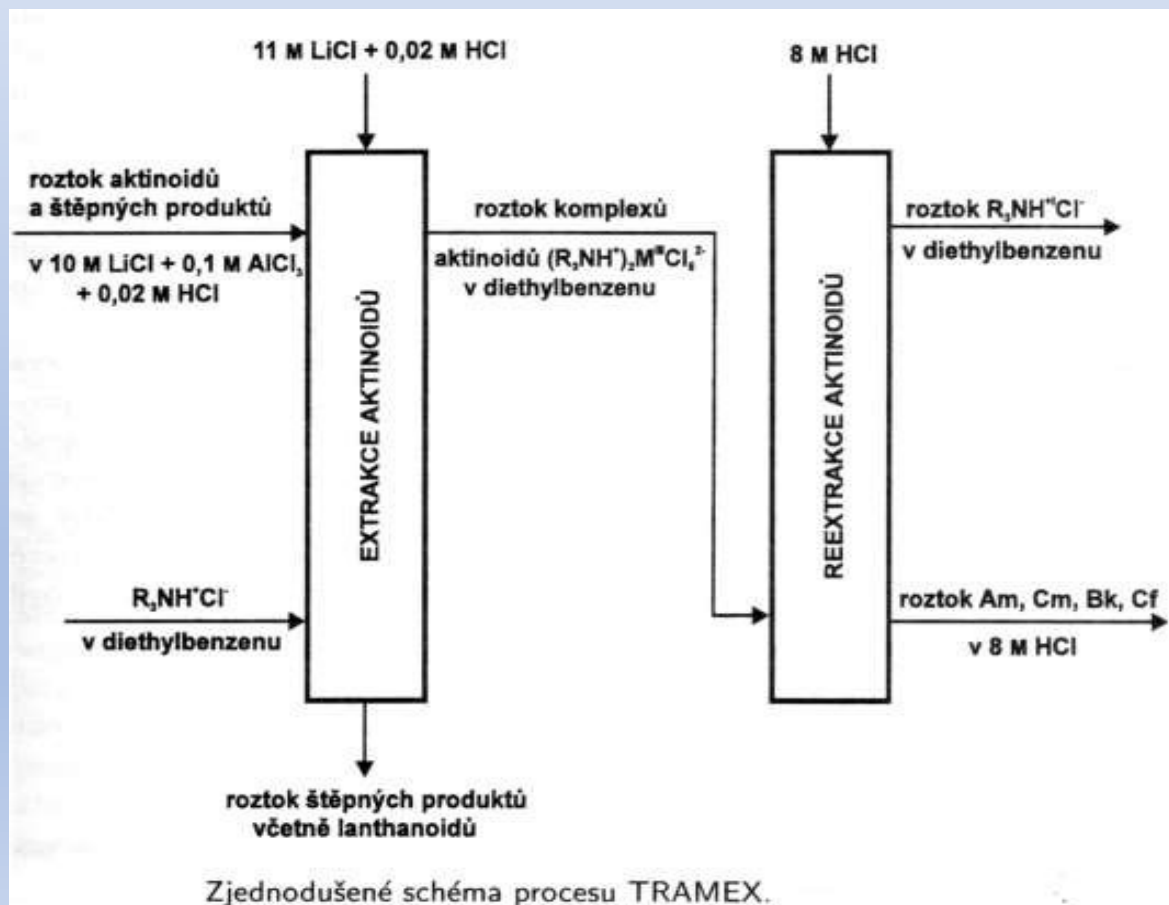
Zjednodušené schéma procesu PUREX.

Výroba těžších transuranů

Získávají se **ozařováním terčových jader neutrony a následnými β^- přeměnami.**



Dělení těžších transuranových prvků se provádí procesem TRAMEX.



Reakce kladně nabitých projektilů

Tyto projektily musí při průniku do jádra překonat coulombickou bariéru

⇒ nižší výtěžky reakcí ve srovnání s reakcemi neutronů

⇒ i u exoergických reakcí musí mít projektil určitou kinetickou energii



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

Cyklotron

- slouží k urychlování lehčích kladně nabitých částic
- protony a deuterony **lze urychlovat do energie 30 MeV.**

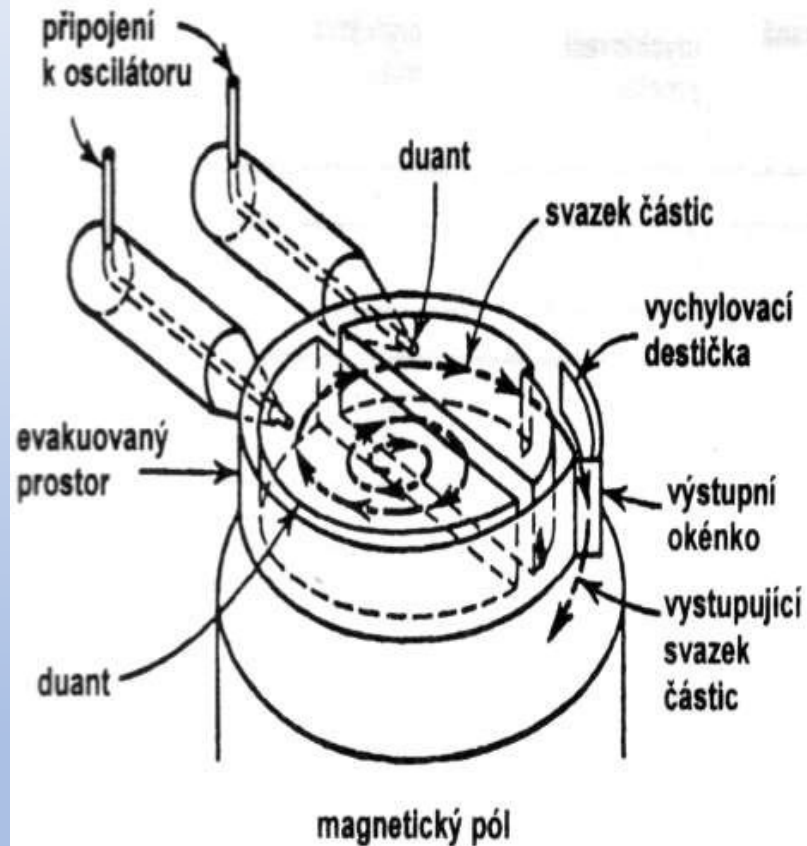
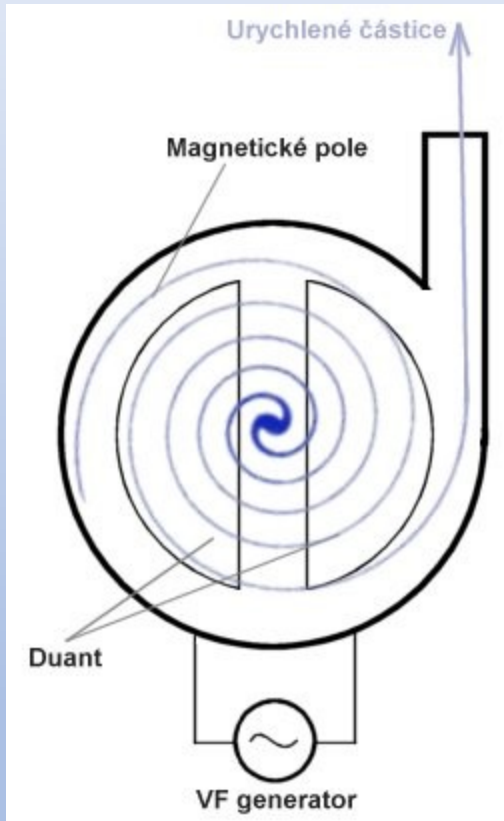
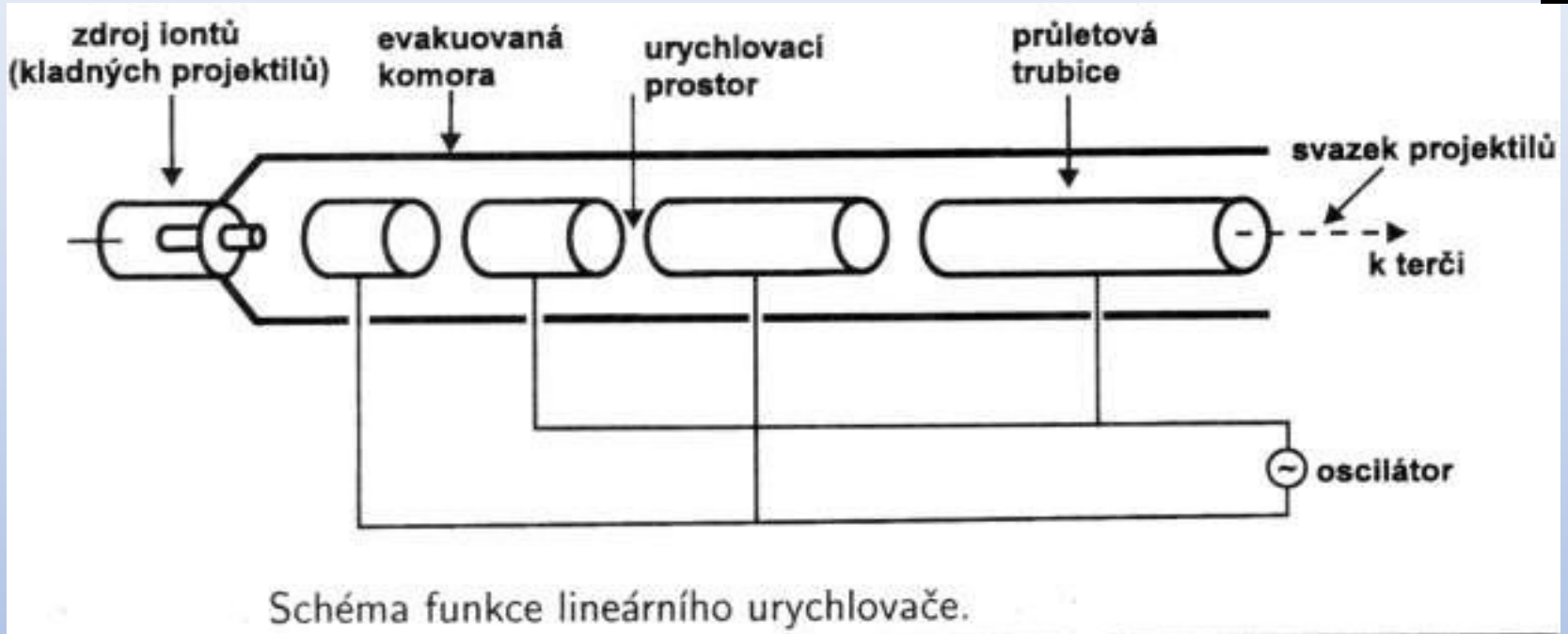


Schéma cyklotronu (druhý pól magnetu, který zde není pro přehlednost zakreslen, je umístěn nad duanty).

Lineární urychlovač - slouží k urychlování těžších iontů (od Li)

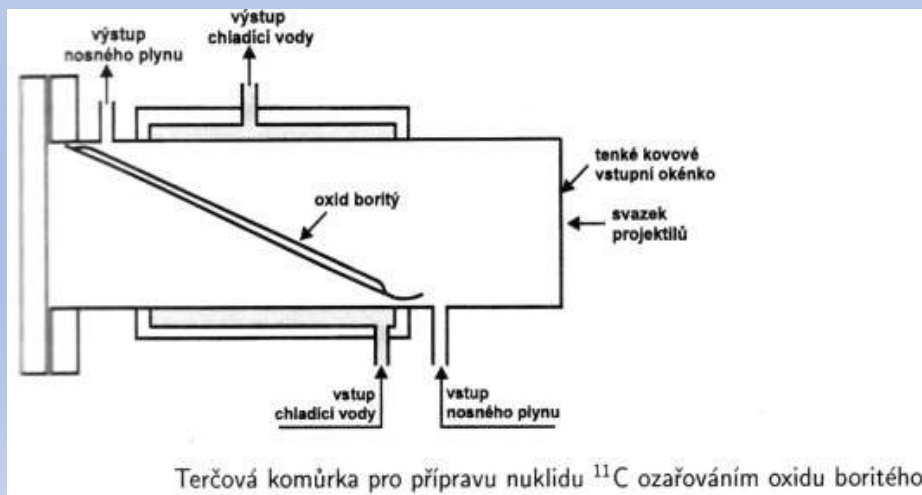


energie potřebná k urychlení protonů	20 GeV
energie potřebná k urychlení ostatních jader (včetně uranu)	30 MeV

Příklady jaderných reakcí

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

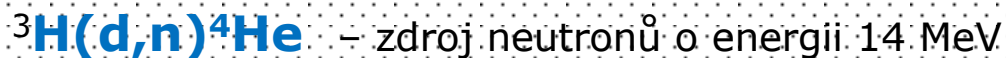


Reakce deutronů typu (d,p)

- 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 ($Q = 4-8$ MeV)
- produkty těchto reakcí jsou stejné, jako kdyby proběhla reakce (n, γ)
- výtěžky jsou vysoké, protože do jádra neproniká celý projektil

Reakce deutronů typu (d,n), (d,2n)

Významné pro přípravu neutron - deficitních nuklidů



Poslední reakce ukazuje použití tritia jakožto zdroje neutronů - **neutronový generátor**: tritium je rozpuštěno v Ti nebo Zr a je ozařováno deuterony, které produkuje malý lineární urychlovač z plynného deuteria. Vznikající tok neutronů se pak využívá k ozařování.





Zdroje toku neutronů

Pro produkci toku neutronů se využívá především jaderný reaktor a zdroje laboratorní

Pro laboratorní přípravu se používají **radionuklidové zdroje neutronů**, které obsahují:

- α -nestabilní radionuklid s dlouhým poločasem ^{241}Am , ^{239}Pu jako zdroj α záření
- práškové **Be**
- směs je hermeticky uzavřena do ocelového pouzdra, probíhá jaderná reakce



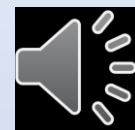
- toky neutronů jsou relativně malé ($10^5 - 10^6 \text{ n s}^{-1}$ při aktivitě α -aktivního radionuklidu 1 GBq)

Reakce těžších kladně nabitých iontů

slouží pro přípravu nuklidů o $Z > 100$

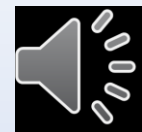
příprava prvků o Z	terč	projektil
101 - 106	lehčí transurany	ionty B - Ne
> 106	nuklidy Pb, Bi	ionty Cr, Fe, Ni, Zn

- 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 – viz informace o složeném jádře
- konkurenční reakcí bývá štěpení složeného jádra
- konkurenční štěpení je však silně potlačeno u nuklidů s $Z > 106$ s lichým nukleonovým číslem

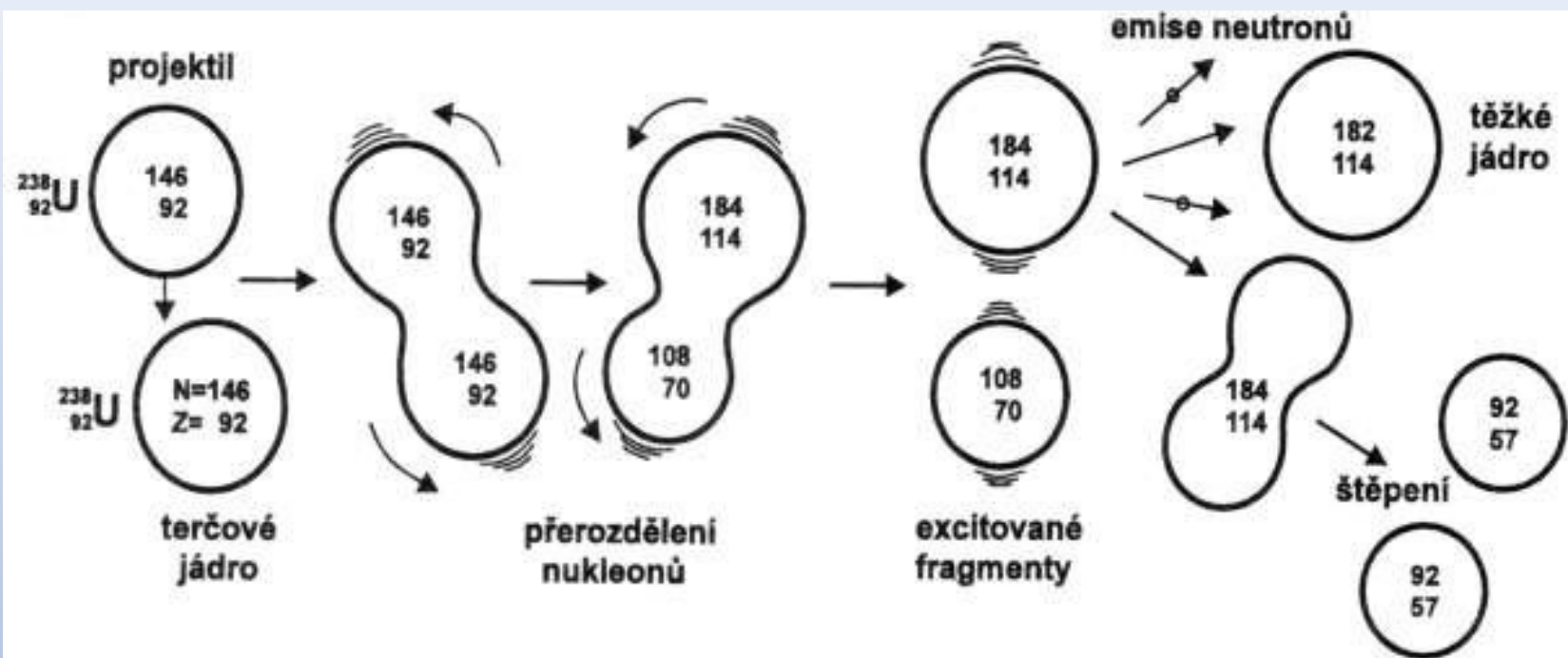


Přehled nuklidů transfermiových prvků.

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	$^{208}\text{Pb}(^{70}\text{Zn}, n)$

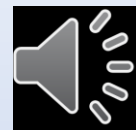
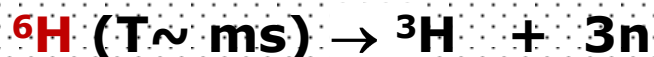


Nepružný přenos nukleonů - další mechanismus jaderné reakce typické pro těžká terčová jádra (U-Cm, s těžkými urychlenými ionty -



Jaderná reakce probíhající mechanismem nepružného přenosu nukleonů.

reakce přenosu nukleonů se uplatňují i u lehčích jader

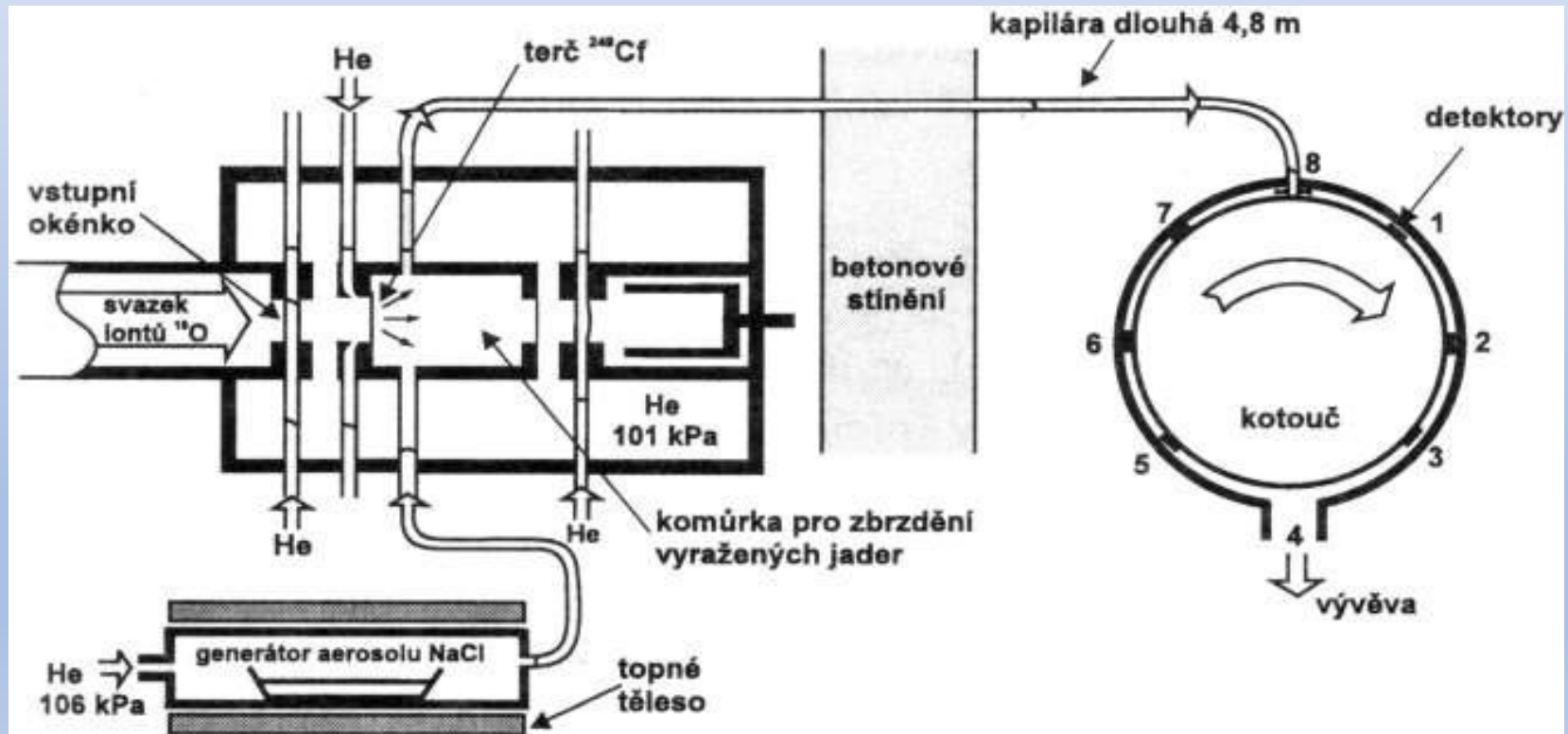


Identifikace transfermiových prvků

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

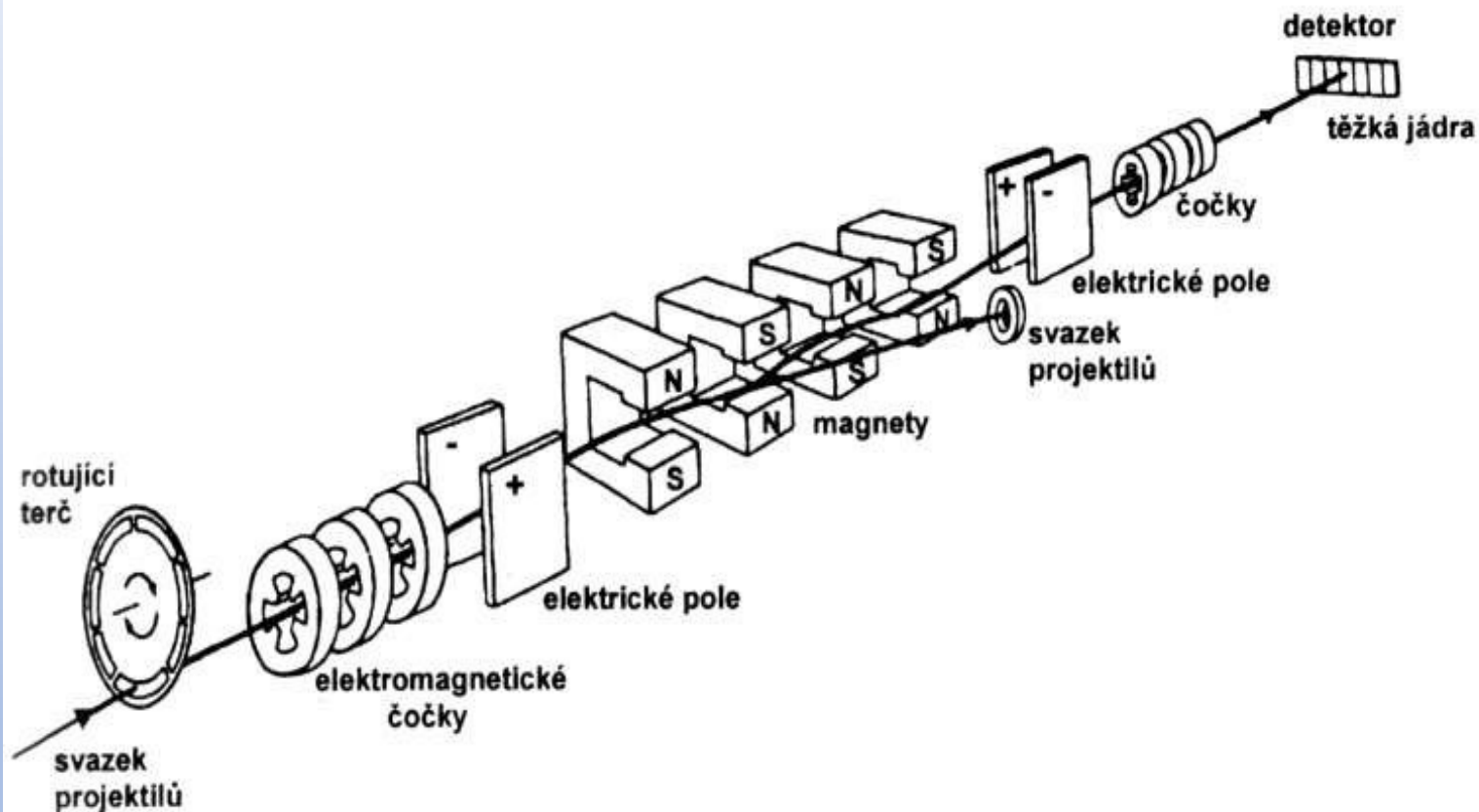


Metoda heliové trysky



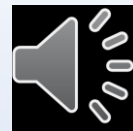
Heliová tryska – zařízení pro identifikaci izotopů transfermiových prvků.

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 přeměny)
- proto se chemie 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 učebnice Hála

