

# RADIOANALYTICKÉ METODY

## IV. Aktivační analýza

### 2. část

J. John

(s využitím podkladů doc. RNDr. Adolfa Zemana, CSc.)

[http://www.jaderna-chemie.cz/data/documents/vyuka/john/RAM\\_IV\\_AA\\_2.pdf](http://www.jaderna-chemie.cz/data/documents/vyuka/john/RAM_IV_AA_2.pdf)

Elektronická verze připravena s podporou



# Třídění

## Indikátorové metody

1. Indikátorová analýza
  - 1a. Analýza přirozeně rad. látek
2. Izotopová zředovací analýza
3. Radioreagenční metody
  - 3a. Radiometrické titrace

## Interakční metody

### *Aktivační*

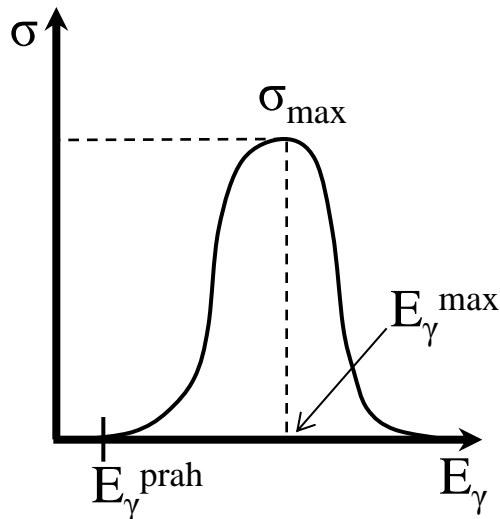
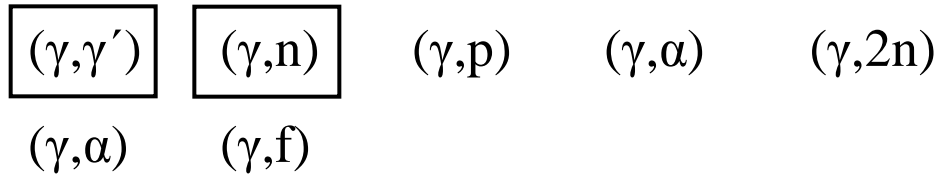
4. **Aktivační analýza**

### *Neaktivační*

5. Metody založené na absorpci a rozptylu jad. záření
6. Emisní metody

# Fotoaktivační analýza

Malé  $\sigma$ , prahové reakce ( $E_p > 1$  MeV). Výhoda – velká pronikavost  $\gamma$ .



$$E_{\gamma \text{ max}} = 40,7 A^{-0,2} \quad (20-10 \text{ MeV})$$

←  
A

Ca – 22 MeV

U – 13 MeV

$$E_{\gamma \text{ prah}} \sim \text{He (22 MeV) – U (6 MeV)}$$

←  
A

Výjimky:

${}^9\text{Be}$  – 1,7 MeV

D – 2,2 MeV

$$\sigma_{\text{max}} \sim 10^{-31} \text{ m}^2 - 10^{-28} \text{ m}^2$$

→  
A

(lehká j.) (těžká j.)

Gigantická rezonance  
(šířka 6-12 MeV)

# Fotoaktivační analýza (2)

Zdroje fotonového záření:

Izotopové zdroje:  $^{124}\text{Sb}$  (60,3 dne,  $E_\gamma = 2,07 \text{ MeV}$ ),  $^{24}\text{Na}$  (15 hod,  $E_\gamma = 2,76 \text{ MeV}$ ),  $^{60}\text{Co}$  (5,3 roku,  $E_\gamma = 1,33; 1,17 \text{ MeV}$ )

Nízká energie  $\Rightarrow$  jen speciální případy nebo reakce ( $\gamma, \gamma'$ )

Urychlovače elektronů:

1. *Elektrostatické urychlovače*:  $E_{e,\text{max}} = 5 - 6 \text{ MeV}$ , zato velké proudy - řádu několika mA
2. *Betatrony*:  $E_{e,\text{max}} = 25 - 40 \text{ MeV}$ ,  $X = 5 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-3} \text{ A.kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$  (100 až 1000  $\text{R.min}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ )
3. *Mikrotron*:  $E_{e,\text{max}} = 5 - 50 \text{ MeV}$ ,  $X = 5 \cdot 10^{-2} \text{ A.kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$  ( $10^4 \text{ R.min}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ )
4. *LINAC*:  $E_{e,\text{max}} = 30 - 45 \text{ MeV}$ , ale i 1 GeV, expoziční rychlost o 2 až 3 řády vyšší než u ostatních urychlovačů.

Teorie: urychlovač 30 MeV při  $I = 100 \mu\text{A}$  je rovnocenný reaktoru s  $\Phi = 10^{13} \text{ n.cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  (stejný počet stanovitelných prvků na úrovni  $10^{-7}\text{g}$ ).

# Fotoaktivační analýza (3)

Brzdné záření („bremsstrahlung“, záření  $X$ ).

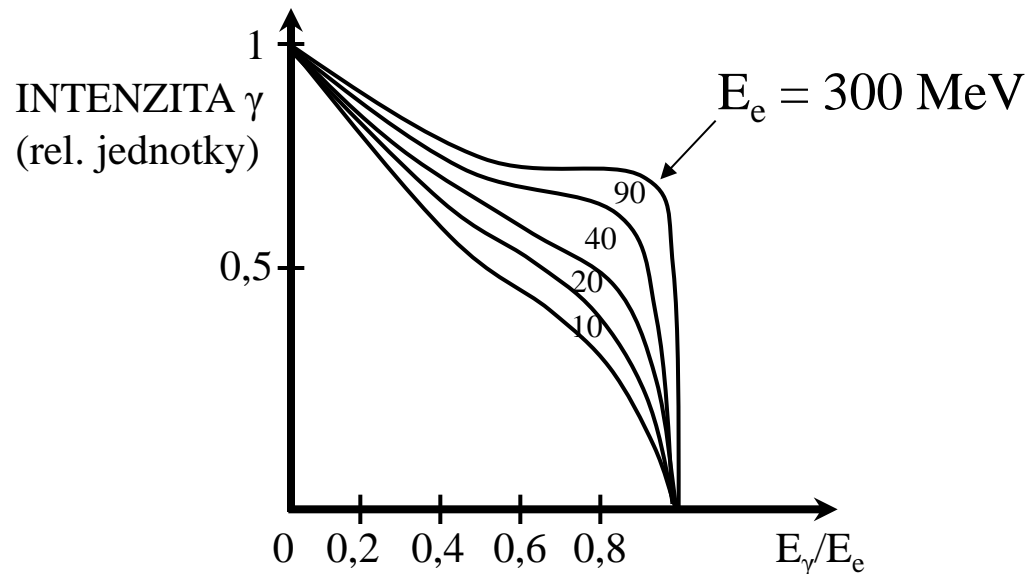
Vznik při dopadu urychlených  $e^-$  na terč z těžkého kovu. Účinnost konverze vysoká, roste s  $E_e$ .

Př.: při  $E_e = 20$  MeV konvertovány cca  $2/3$   $E_{\text{kin}}$ .

Energetické spektrum:

Široké,  $E_X = 0 - E_{e,\text{max}}$ .

Intenzita roste s klesající  $E_X$ , s rostoucí  $E_{e,\text{max}}$  roste podíl tvrdého  $X$ .



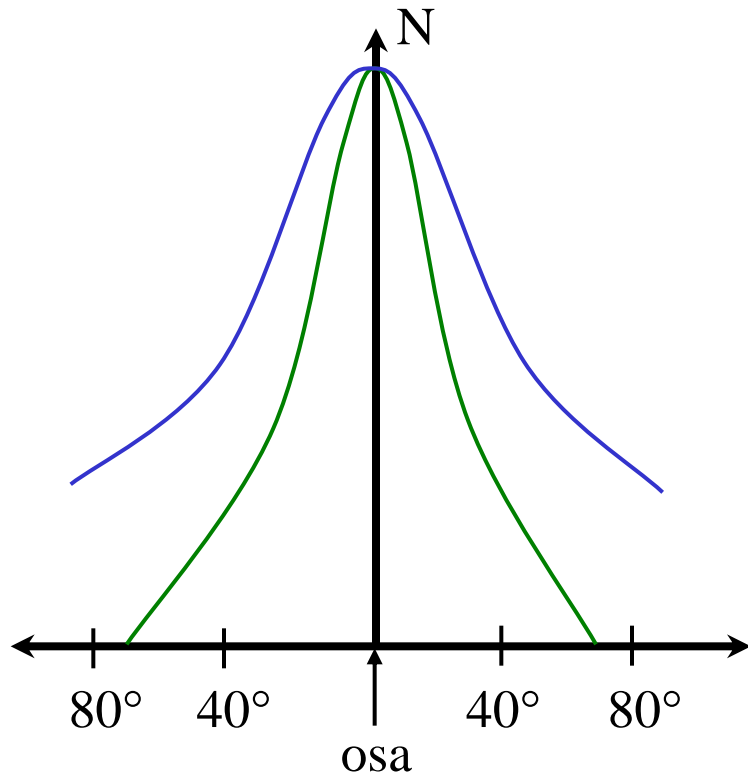
# Fotoaktivační analýza (4)

€

Brzdné záření – 2.

Úhlová závislost energie X:

Při vzdalování od osy svazku  $e^-$  se spektrum X změkčuje.



Aktivace Cu ( $E_p = 10,8 \text{ MeV}$ )

Aktivace C ( $E_p = 18,6 \text{ MeV}$ )

$E > E_p$   $\theta$  (0; 80°)

$E > E_p$   $\theta$  (0; 60°)

*N – počet aktivních jader*

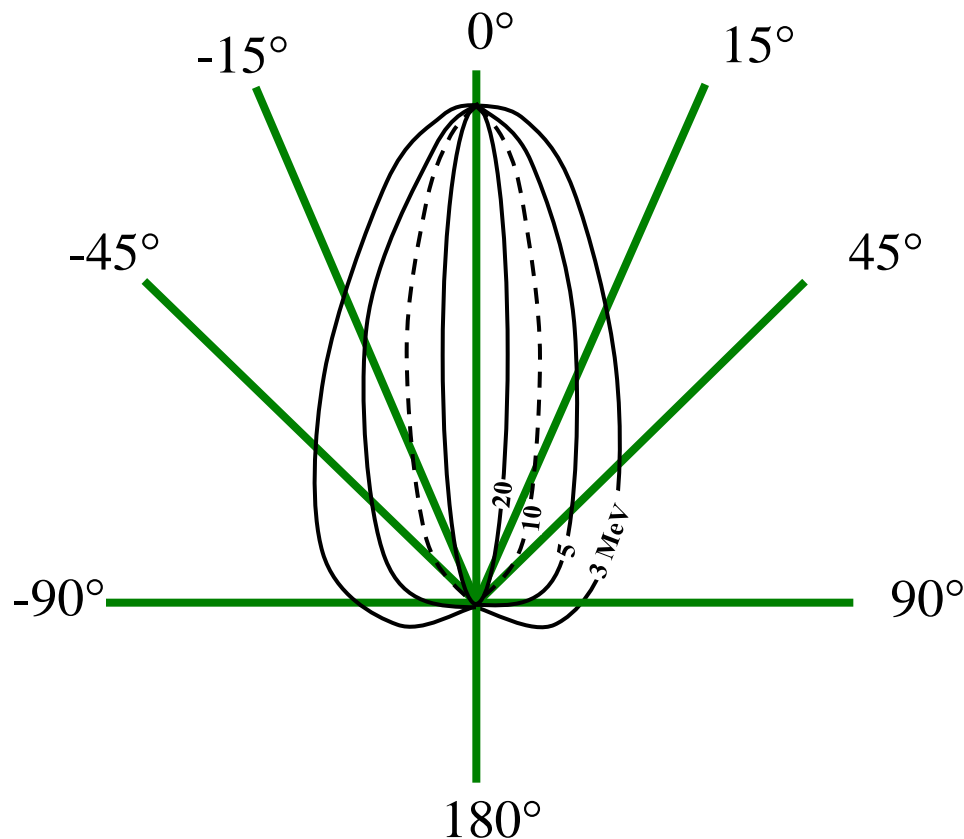
Spolu s rozptylem X a se složitou excitační funkcí znemožňuje provádění absolutní AA.

# Fotoaktivační analýza (5)

Brzdné záření – 3.

Úhlová rozdělení intenzity X:

Závisí na  $E_e$  – s rostoucí  $E_e$  se svazek zužuje a závislost zvětšuje.



# Fotoaktivační analýza (6)

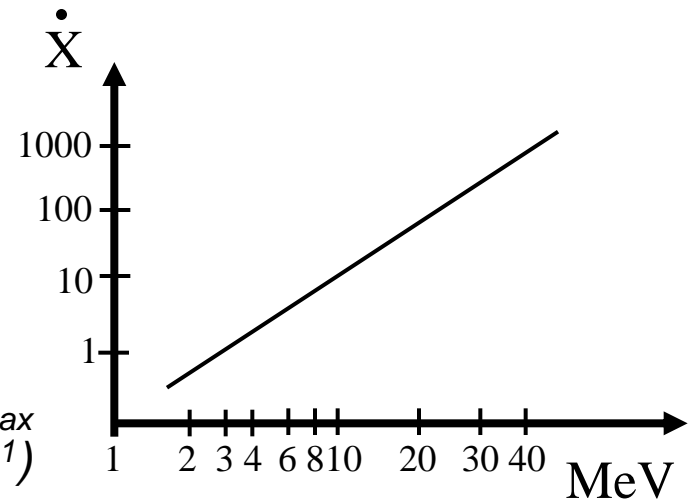
Brzdné záření – 4.

Srovnání urychlovačů:

Prakticky se nepoužívá „hustota toku fotonů“  $\Leftarrow$  závisí na energii fotonů.

Snadno měřitelné veličiny:

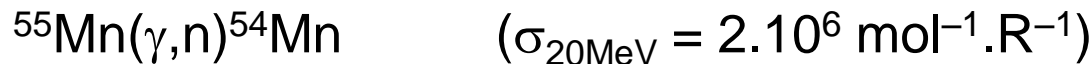
- Expoziční příkon  $X$
- Proud urychlovače



*Závislost expoziční rychlosti  $X$  [ $R \cdot min^{-1}$ ] na  $E_{X,max}$   
 ( $I_e = 1 \mu A$ , 1 m od terčíku;  $1 R \cdot min^{-1} = 4,3 \cdot 10^{-6} A \cdot kg^{-1}$ )*

Ozařovací místo obvykle těsně u terče  $\Rightarrow$  nelze měřit  $X$ .

Charakteristika pomocí fotojaderných reakcí, např.:



$$A_{{}^{54}\text{Mn}} = \dot{X} \cdot \sigma \cdot N_{{}^{55}\text{Mn}} \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot t}) \Rightarrow \dot{X} = \frac{A_{{}^{54}\text{Mn}}}{\sigma \cdot N_{{}^{55}\text{Mn}} \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot t})}$$



# Fotoaktivační analýza (7)

Vybrané meze stanovitelnosti pomocí PAA (LINAC,  $E_e = 28$  MeV,  $I = 50$   $\mu$ A).

	$E_{\text{prah.}}$ [MeV]	T [min]	$E_{\beta^+}$ [MeV]	M.S. [ $\mu$ g]
$^{12}\text{C}(\gamma, n)^{11}\text{C}$	18,6	20,7	0,97	0,04
$^{14}\text{N}(\gamma, n)^{13}\text{N}$	10,5	10,1	1,2	0,06
$^{16}\text{O}(\gamma, n)^{15}\text{O}$	15,7	8,05	1,73	0,05
$^{19}\text{F}(\gamma, n)^{18}\text{F}$	10,5	1,2	0,65	0,02
$^{31}\text{P}(\gamma, n)^{30}\text{P}$	12,4	2,56	3,30	0,015
$^{54}\text{Fe}(\gamma, n)^{53}\text{Fe}$	13,8	8,9	2,84	
$^{32}\text{S}(\gamma, np)^{30}\text{P}$	19,2	2,56	3,30	0,3

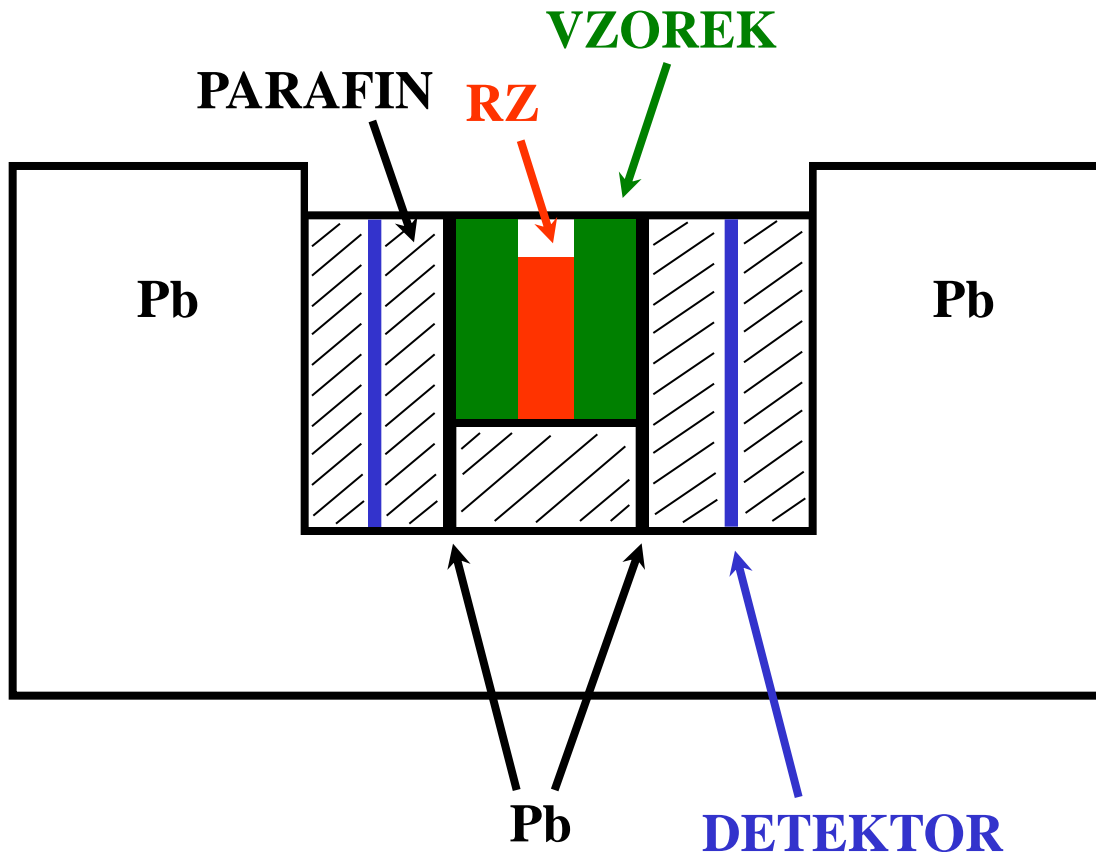
# Fotoaktivační analýza (8)

Stanovení D a Be pomocí izotopového zdroje fotonů.

Reakční produkty stabilní  $\Rightarrow$  počítají se neutrony z  $(\gamma, n)$ .

Citlivost:  $D_2O \sim 200$  ppm (dvojnásobek přirozené koncentrace)

Be  $\sim 1$  ppm



$^{124}Sb$  2,07 MeV

$^{24}Na$  2,96 MeV

1 ppm Be (100 mCi)

200 ppm  $D_2O$

$^{60}Co$  1,17 MeV

1,33 MeV

# Fotoaktivační analýza (9)

Využití reakce ( $\gamma, \gamma'$ ).

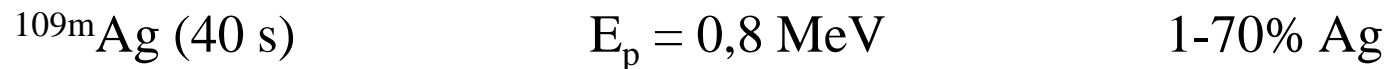
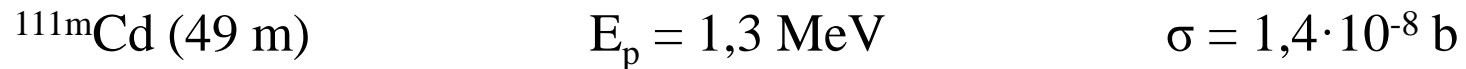
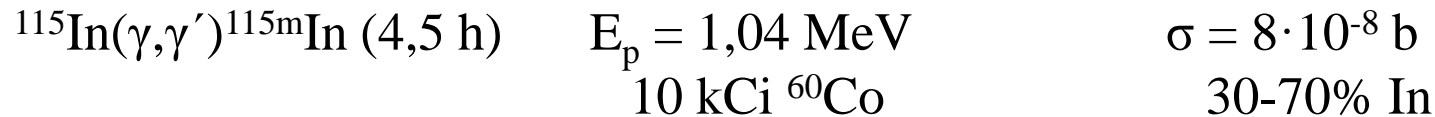
Nižší prahové energie  $\Rightarrow$  urychlovače s  $E_e < 6$  MeV nebo i izotopové zdroje. Vznik izomerů, vhodných cca 30.

Citlivost (urychlovač,  $E_e = 3$  MeV,  $I = 1$   $\mu$ A):

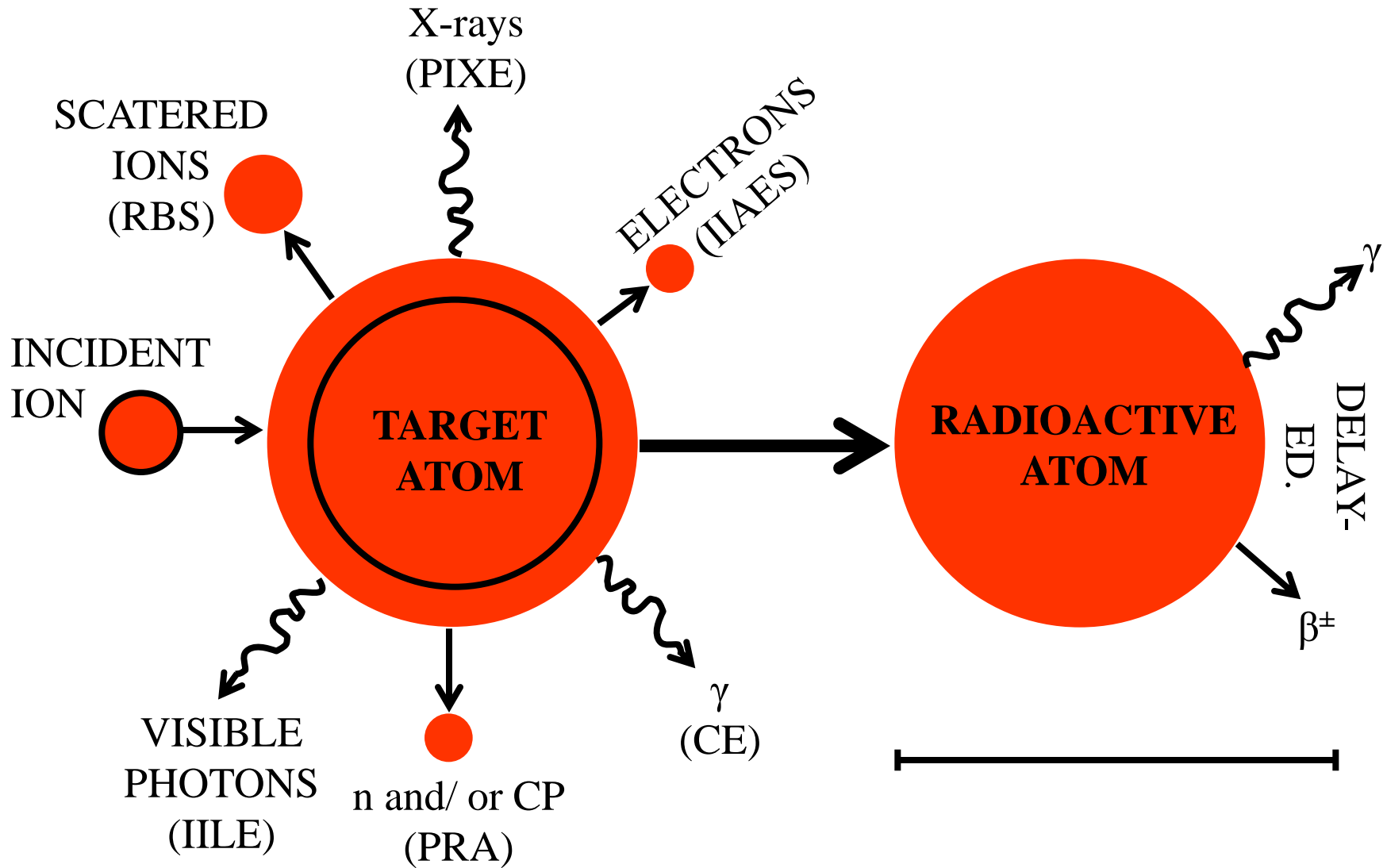
- desetiny mg: In, Hf
- mg: Se, Sr, Ag, Cd, Ir, Au
- desítky mg: Y, Rh, Lu, Pt, Hg

Malou citlivost možno kompenzovat navážkami až 0,5 kg vzorku.

Příklady:



# Radioanalytické metody na svazku iontů



# Radioanalytické metody na svazku iontů (2)

CE = Coulomb Excitation

CPAA = Charged Particle Activation Analysis

IIAES = Ion Induced Auger Emission Spectroscopy

IILE = Ion Induced Light Emission

PIXE = Particle Induced X-Ray Emission

PRA = Prompt Radiation Analysis

RBS = Rutherford Back Scattering

# Aktivační analýza nabitými částicemi (CPAA)

$$\text{Záchyt částice s } x \text{ nukleony} \Rightarrow E_{Akt,jádro} = x \cdot E_{vaz,nukleon} - E_{vaz,částice}$$

Částice	Počet nukleonů	Náboj	$E_{vaz.}$ částice [MeV]	E získaná terč. jádrem [MeV]
p	1	1	—	8
d	2	1	2,2	14
t	3	1	8,5	15,5
$^3\text{He}$	3	2	8	16
$^4\text{He}$	4	2	28	4
$^7\text{Li}$	7	3	39	17
$^{12}\text{C}$	12	6	91	5
$^{14}\text{N}$	14	7	105	7
$^{16}\text{O}$	16	8	127	1

$\Rightarrow$  nejvýhodnější *d* a *t* ( $^3\text{He}$  – 2x vyšší potenciální bariéra)

# Aktivační analýza nabitými částicemi (2)

## Aktivační formule.

Faktory: zeslabení svazku, excitační funkce, prahová energie

$$A = \frac{mN_A \ominus}{M} \int_0^{x_1} b_x \sigma_x dx (1 - e^{-\lambda t})$$

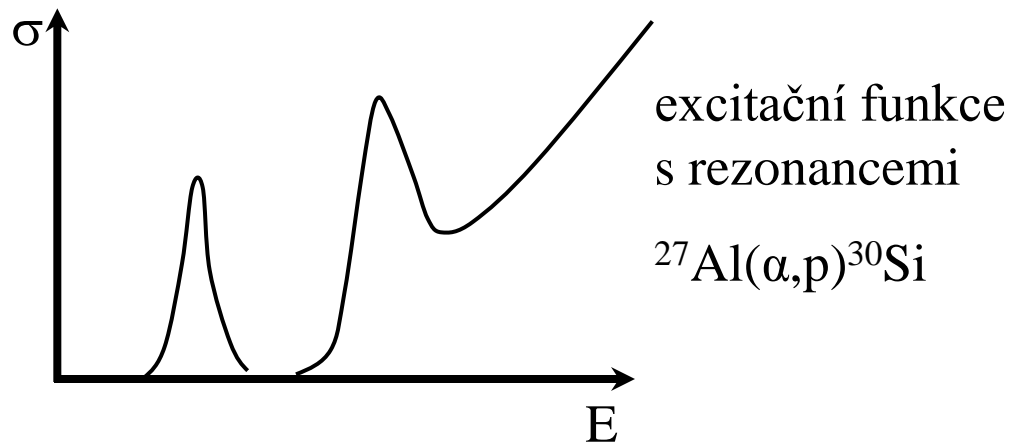
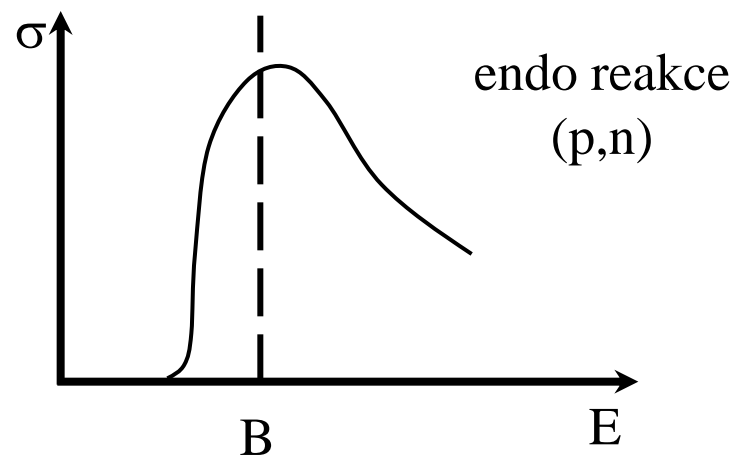
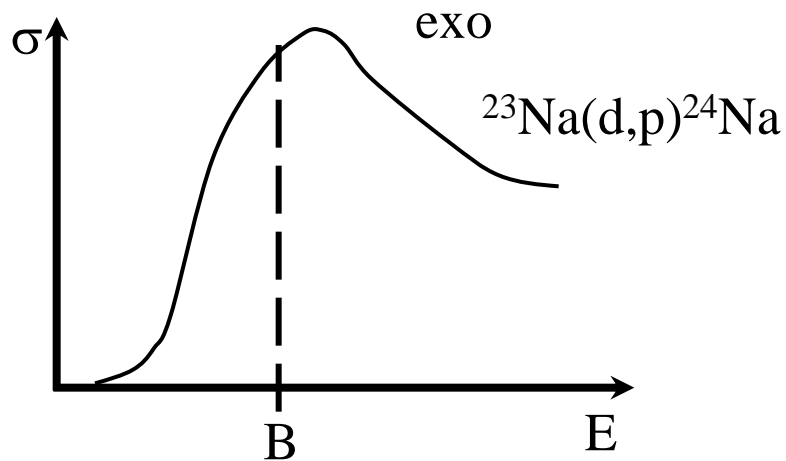
$x_1$  = tloušťka vzorku, kdy se energie částice sníží na hodnotu prahové energie reakce

$b_x$  = intenzita iontového svazku v hloubce  $x$  vzorku

$\sigma_x$  = účinný průřez pro energii v hloubce  $x$

# Aktivační analýza nabitými částicemi (3)

## Excitační funkce.





# Aktivační analýza nabitými částicemi (4)

Relativní metoda – nutné dodatečné korekce.

SINGLE COMPARATOR METHOD

$$\frac{A_{vz}}{A_s} = \frac{b_{vz} N_{vz} R_{vz}}{b_s N_s R_s}$$

N – počet atomů

R – korekce na dosah

# Aktivační analýza nabitými částicemi (5)

Aktivace protony.

Malý dosah – analýzy povrchových vrstev.

E [MeV]	DOSAH PROTONŮ [mm]	
	Al	Ta
1	0,015	0,007
10	0,63	0,2
20	2,1	0,63

(p,n) 1-5 MeV,  $A \rightarrow$ ,  $E_{\text{prah}} \rightarrow$ ,  $\sigma \leftarrow$  (10-500mb pro lehké)

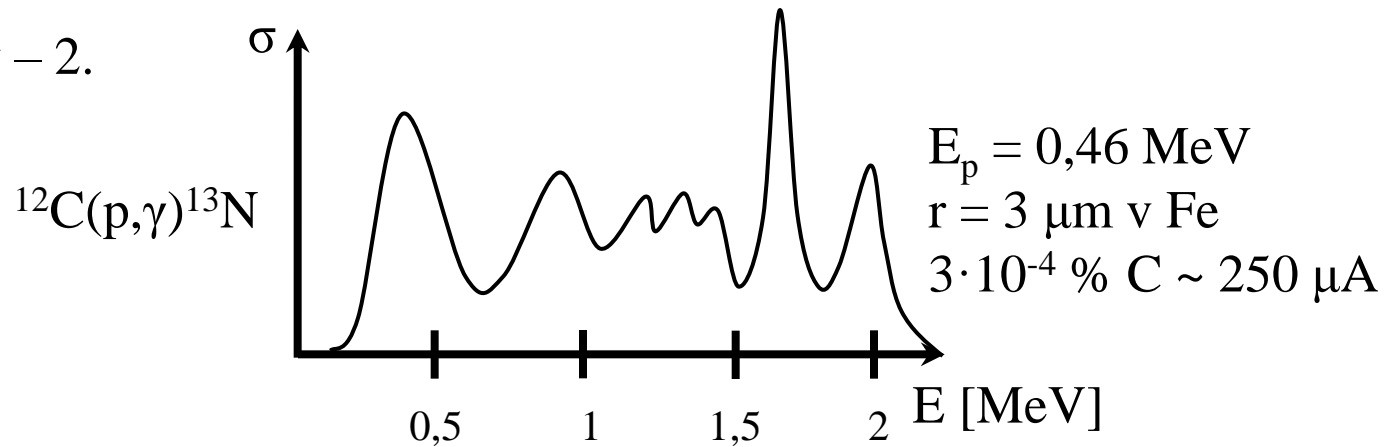
(p, $\alpha$ ); (p,t); (p,pn); (p,2n), E vyšší

# Aktivační analýza nabitými částicemi (6)

Aktivace protony – 2.

## Příklady:

C v Fe:

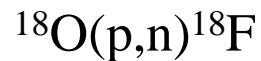


B v Si:



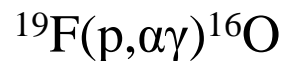
$(\beta^+, 20\text{min}) \quad E \sim 20 \text{ MeV}, \quad 10^{-7} \% \text{ B(Si)}$

O v Al:



v hliníku  $E \sim 20 \text{ MeV}, \quad 0,3 \text{ ppm}$

F ve skle:



ve skle **PROMPTNÍ  $\gamma$  6~7 MeV, 1 mA**

$E_p = 1,4 \text{ MeV}, \text{ citlivost } 3 \%$

# Aktivační analýza nabitými částicemi (7)

## Aktivace deuterony.

(d,n) (d,p) při E 1~2 MeV

(d, $\alpha$ ) (d,t) (d,p $\alpha$ ) (d,2n) aj. při E > 5 MeV

A  $\rightarrow$   $\sigma \leftarrow$  0,1~1b (lehké) — 1 mb (těžké)

$^{69,71}\text{Ga}(d,p)^{70,72}\text{Ga}$  v železe  $6 \cdot 10^{-4} \% \text{ Ga}$  (1938)

$^{16}\text{O}(d,n)^{17}\text{F}$  ;  $^{12}\text{C}(d,n)^{13}\text{N}$  (0,001 % C) ;  $^{10}\text{B}(d,n)^{11}\text{C}$  (1  $\mu\text{g}$ )

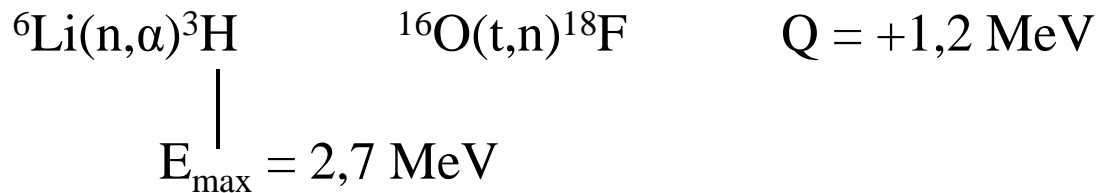
# Aktivační analýza nabitými částicemi (8)

## Aktivace tritony.

Zdroje  $t$  málo časté – problémy s radioaktivitou T.

Možnost využití reaktorových  $n$  a tritonů produkovaných reakcí  ${}^6\text{Li}(n,\alpha)\text{T}$ .

Příklad: Stanovení kyslíku v beryliu (Be smíšeno s LiF, ozařování v reaktoru)



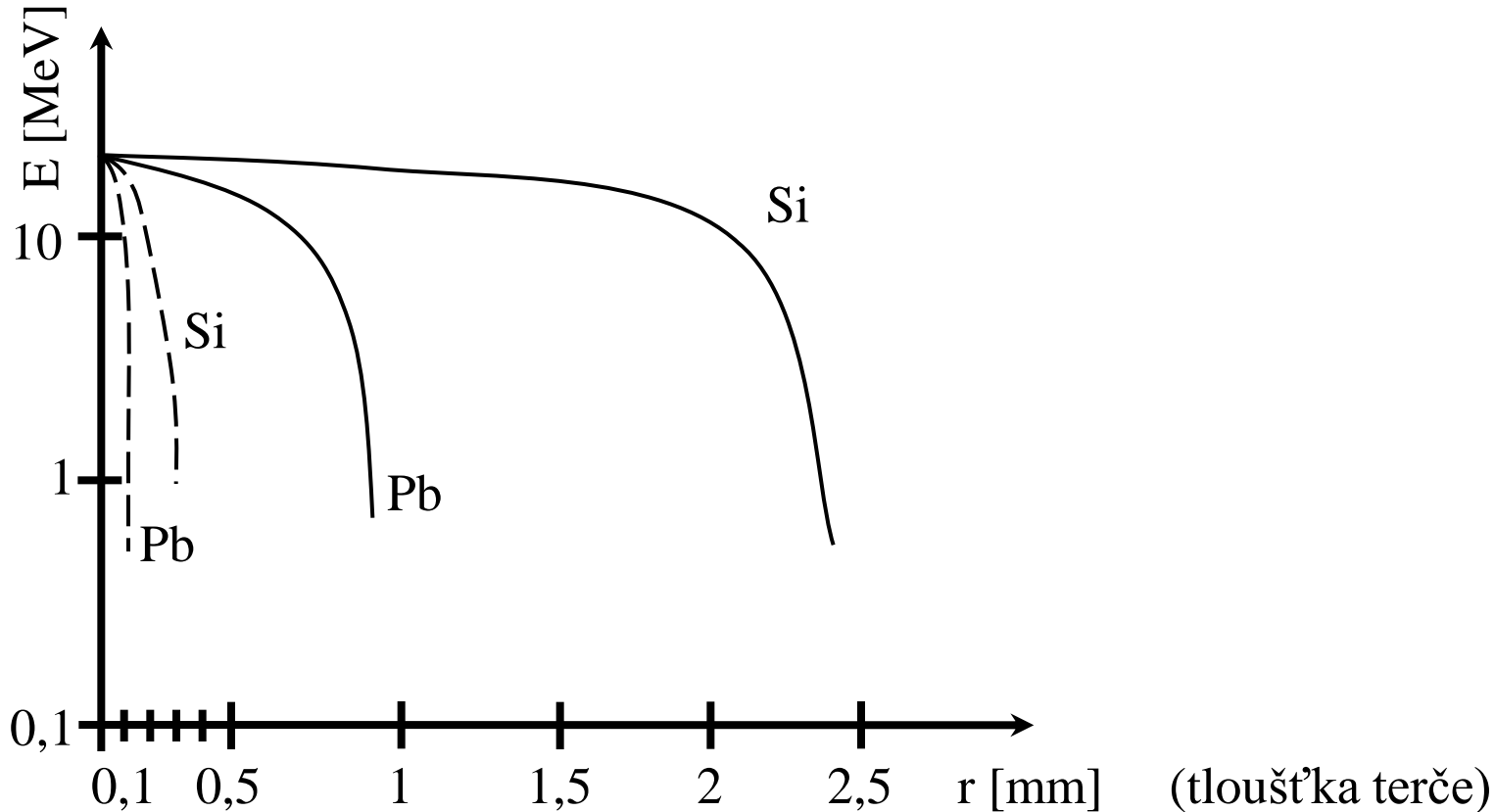
0,1-0,2 %  $\text{O}_2$   
 $7 \cdot 10^{-9} \text{ g } \text{O}_2$

Příklad 2: Stanovení kyslíku v GaAs – vzorek se pokryje vrstvičkou kovového Li, ozařování v reaktoru.

# Aktivační analýza nabitými částicemi (9)

Aktivace  $^3\text{He}$  ( $\Theta = 1,3 \cdot 10^{-4} \%$ ).

Řídké. Malý dosah – analýza povrchů.



— protony 20 MeV  
- - -  $^3\text{He}$  20 MeV

# Aktivační analýza nabitými částicemi (10)

Aktivace  ${}^3\text{He}$  – 2.

Nízká  $E_{\text{vaz}} \Rightarrow$  řada reakcí exoergická,  
 ${}^3\text{He}$  nižších energií – specifická aktivace lehkých prvků.

Příklad: Stanovení kyslíku v thoriu nebo beryliu

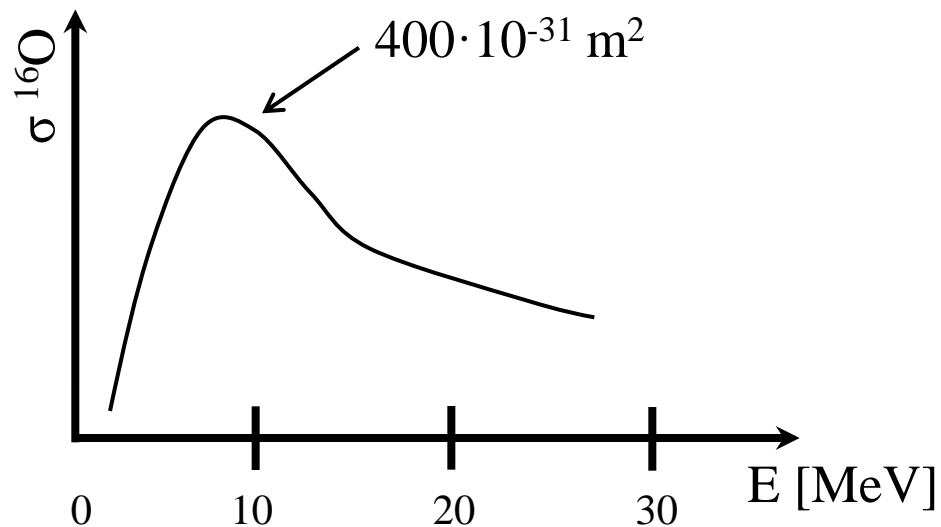
$({}^3\text{He},n)$   $({}^3\text{He},p)$   $({}^3\text{He},2n)$   $({}^3\text{He},\alpha)$   $({}^3\text{He},t)$

$E_{\text{vaz}}({}^3\text{He}) = 7,7 \text{ MeV}$  ,  $\beta^+$  ,

$E = 8 \text{ MeV}$   $Z \leq 20$

${}^{16}\text{O}({}^3\text{He},p){}^{18}\text{F}$

${}^{16}\text{O}({}^3\text{He},n){}^{18}\text{Ne} \xrightarrow[1,6 \text{ s}]{\beta^+} {}^{18}\text{F}$



# Aktivační analýza nabitými částicemi (11)

## Aktivace částicemi alfa.

$(\alpha, n)$  – objev umělé radioaktivity (1934), přesto malé použití v AA.  
Reakce většinou endoergické.

$(\alpha, n)$  – produkty radioaktivní,  $\sigma \sim 0.1$  b

$(\alpha, p)$  – produkty většinou stabilní,  $\sigma \sim 0.1$  b

$(\alpha, \gamma)$  – malé  $\sigma$

Využity reakce:  ${}^9\text{Be}(\alpha, 2n){}^{11}\text{C}$ ,  ${}^{10}\text{B}(\alpha, n){}^{13}\text{N}$ ,  ${}^{63}\text{Cu}(\alpha, n){}^{66}\text{Ga}$ ,  
 ${}^{27}\text{Al}(\alpha, n){}^{30}\text{P}$ ,  ${}^{23}\text{Na}(\alpha, n){}^{26}\text{Al}$ .

Někdy měření promptních  $n$ , nebo promptního  $\gamma$ .

Příklad: Stanovení berylia

${}^9\text{Be}(\alpha, n){}^{12}\text{C}$ , měření promptního  $\gamma$ ,  $E_\gamma = 4,4$  MeV, citlivost 5  $\mu\text{g}$ .

Příklad 2: Stanovení kyslíku v křemíku.

${}^{16}\text{O}(\alpha, pn){}^{18}\text{F}$ ,  $E_\alpha = 4,4$  MeV,  $I_\alpha = 5$   $\mu\text{A}$ ; chem. separace  ${}^{18}\text{F}$ ,  
citlivost  $10^{-7}$  % $\text{O}_2$ .



# Aktivační analýza nabitými částicemi (12)

## Detekční limity CPAA.

Podmínky: (p, d, t,  $^3\text{He}$ ):  $E \leq 12 \text{ MeV}$ ,  $^4\text{He}$ :  $E \leq 35 \text{ MeV}$   
 $t_{\text{oz}} = 1 \text{ poločas, max 2 hod; } I = 2 \mu\text{A}$

$\leq 1 \text{ ppb:}$  Ca, Y, B, C, N, O, Pr, Nd

---

1-10 ppb: Li, Ti, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, Br,  
Rb, Zr, Mo, Ru, Cd, Sn, Te, Ba, Hf, W,  
Yb, Os, Pt, Tl, Pb, Bi, La, Ce, Eu, Ho, Er, Lu

---

10-100 ppb: H, He, Na, Mg, Al, Si, P, S, U, Fe, As, Se, Sr, Nb, Rh,  
Pd, Ag, Sb, I, Cs, Au, Hg, Dy

---

0,1-1 ppm: Be, Cl, Mn, Re

---

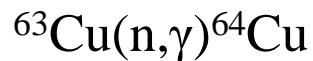
1-10 ppm: K, Ta

# Interference v aktivační analýze

## Primární interference:

Měřený radionuklid vzniká i z jiného než stanovovaného prvku.  
Vadí zejména pokud rušivá reakce probíhá na matricovém prvku.  
Lze korigovat výpočetně.

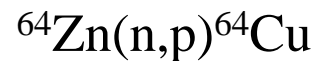
## Příklad:



$$\Theta_1 = 0,691$$

$$\sigma_t = 4,3 \cdot 10^{-28} \text{ m}^2$$

$$\varphi_t = 4 \cdot 10^{11}$$



$$\Theta_2 = 0,489$$

$$\bar{\sigma} = 0,039 \cdot 10^{-28} \text{ m}^2$$

$$\bar{\varphi} = 2,17 \cdot 10^{10}$$

$$\frac{A_{\text{Zn}}}{A_{\text{Cu}}} = \frac{\bar{\varphi} \bar{\sigma} \Theta_{\text{Zn}} M_{\text{Cu}}}{\varphi_t \sigma_t \Theta_{\text{Cu}} M_{\text{Zn}}} =$$

$$1 \text{ g Zn} = 360 \text{ ppm Cu}$$

$$= \frac{2,17 \cdot 10^{10} \cdot 0,039 \cdot 65,17 \cdot 0,489}{4 \cdot 10^{11} \cdot 4,3 \cdot 63,54 \cdot 0,691} \cong 3,6 \cdot 10^{-4}$$

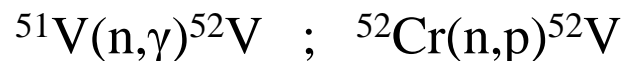
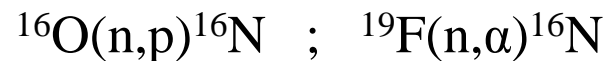
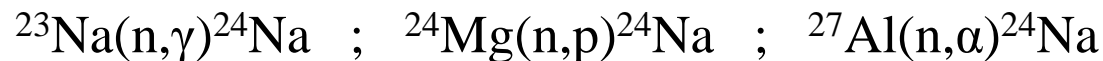
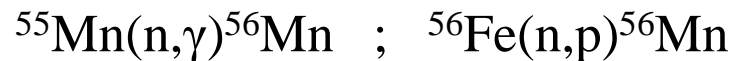
# Interference v aktivační analýze (2)

Primární interference – 2:

Častější u AA rychlými neutrony a CPAA.

Interferující může vznikat i jako produkt přeměnové řady.

Příklady:



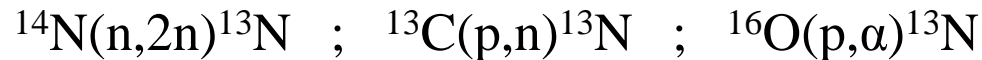
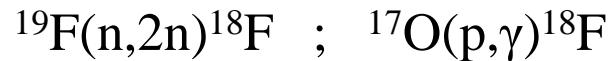
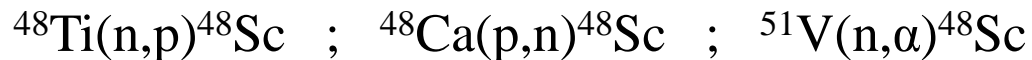
# Interference v aktivační analýze (3)

## Sekundární interference:

Aktivují i částice vznikající při reakcích vyvolaných primárně aktivující částicí.

U (n,γ) aktivace zřídka, častější u CPAA.

## Příklady:



# Interference v aktivační analýze (4)

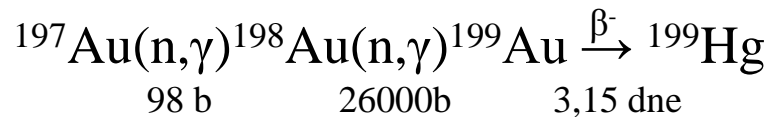
Interference druhého řádu:

Dva případy – dochází ke:

- a) snížení „koncentrace“ měřeného radionuklidu
- b) zvýšení „koncentrace“ měřeného radionuklidu

Příklad:

Snížení koncentrace  $^{198}\text{Au}$  vyhoříváním.



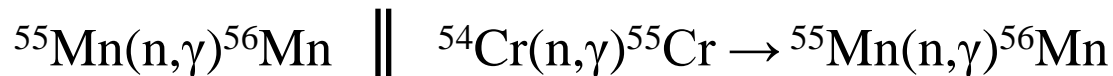
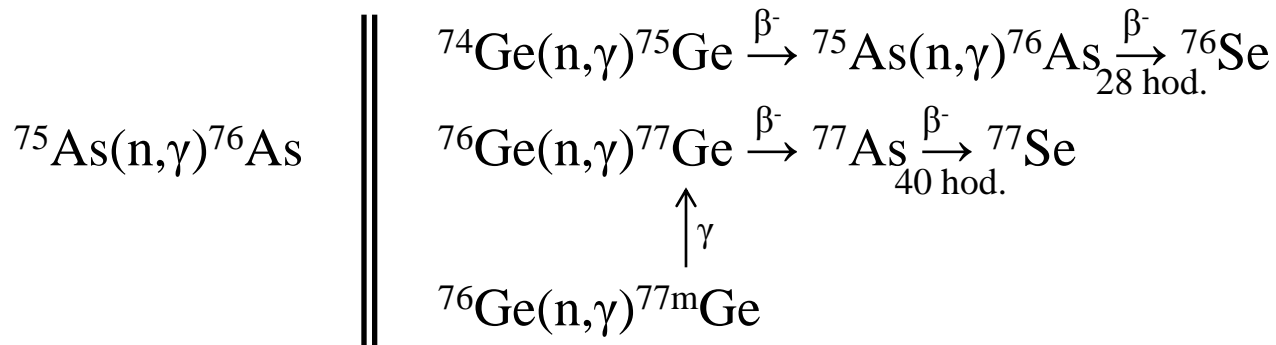
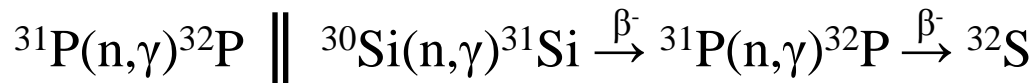
Nevadí při relativní metodě.

# Interference v aktivační analýze (5)

Interference druhého řádu – 2:

Zvýšení množství stanovovaného nuklidu jeho vznikem jadernou reakcí z matricového prvku.

Příklady:



# Interference v aktivační analýze (6)

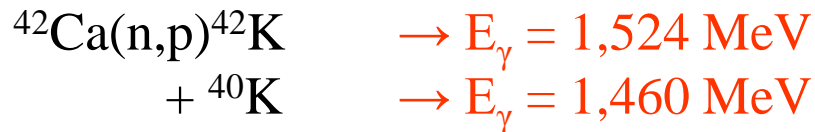
Terciární interference:

Přirozeně radioaktivní prvky.

Nevadí u (n, $\gamma$ ) a (n,2n) reakcí, protože probíhá stejně ve vzorku i standardu.

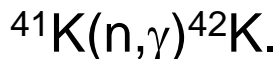
Na závadu u jiných reakcí.

Příklad:



Možno rozlišit gama spektrometricky.

V tomto konkrétním případě významnější primární interference



# Méně běžné varianty AA

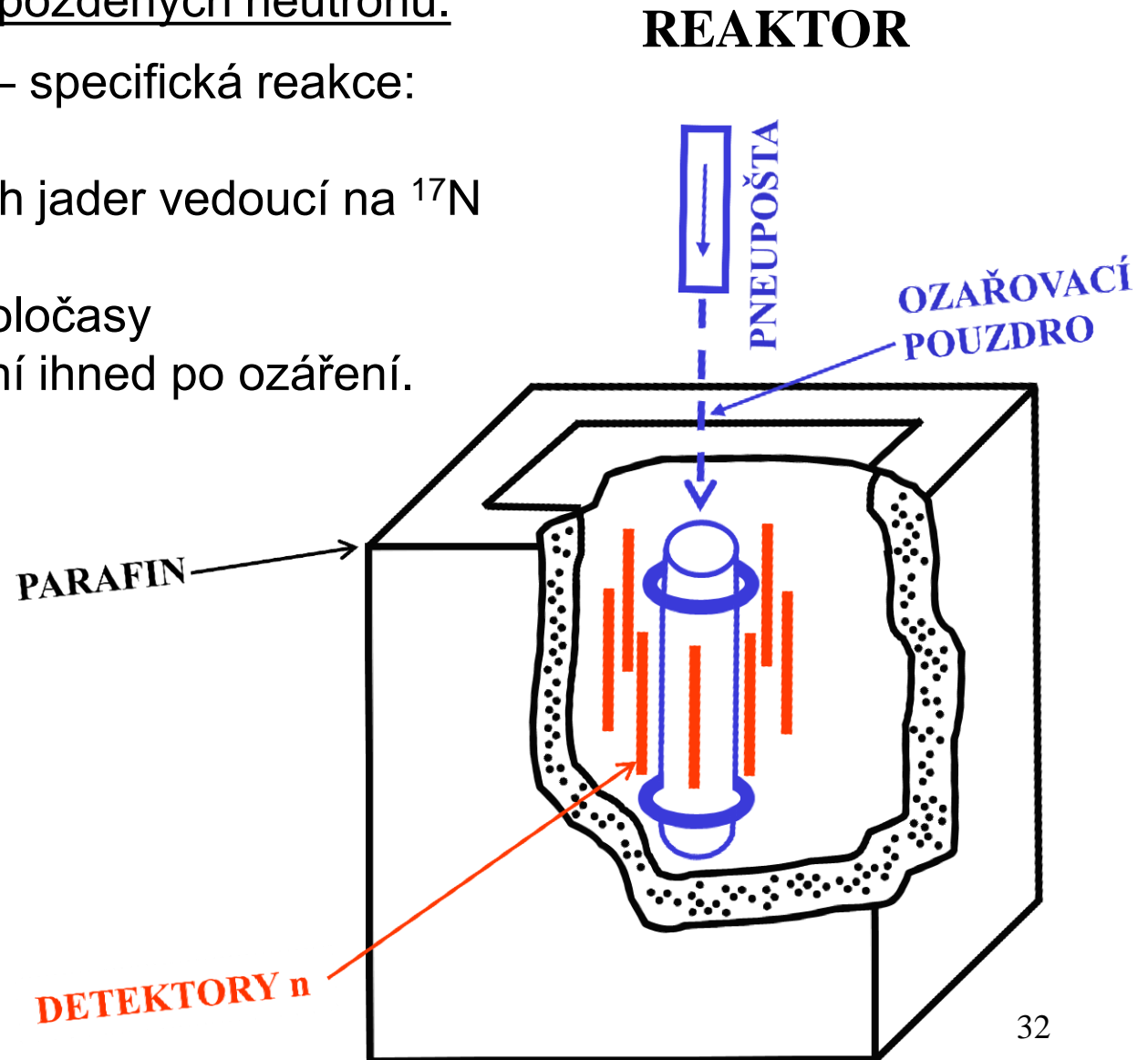
Analýza s využitím zpožděných neutronů.

Zpožděné neutrony – specifická reakce:

- štěpení U, Th
- reakce lehkých jader vedoucí na  $^{17}\text{N}$

Společné – krátké poločasy

⇒ měření ihned po ozáření.





# Méně běžné varianty AA (2)

Analýza s využitím zpožděných neutronů – 2.

Stanovení uranu – při ozáření pouze tepelnými neutrony specifické pro  $^{235}\text{U}$ . Rychlémi n se štěpí i  $^{238}\text{U}$  a  $^{232}\text{Th}$ .

$$t_1 = 60 \text{ s}$$

$$t_2 = 20 \text{ s}$$

$$t_3 = 60 \text{ s}$$

Pro  $\varphi_t = 10^{13} \text{ n}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$

1  $\mu\text{g U}_{\text{nat}} \sim 11700 \text{ n/min}$

stanovení  $\sim 10 \mu\text{g U}$  - přesnost  $\pm 1 \%$

stanovení izotopového složení U přesnost  $\pm 0,5 \%$  rel.

Pro  $\bar{\varphi} = 10^{13} \text{ n}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$

1  $\mu\text{g Th} \sim 412 \text{ n/min}$

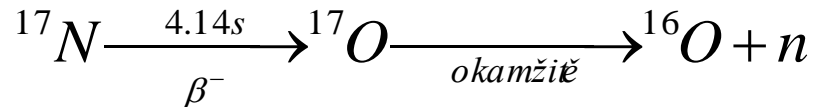
1) Cd filtr

2) bez filtru

# Méně běžné varianty AA (3)

Analýza s využitím zpožděných neutronů – 3.

Stanovení kyslíku, lithia a dusíku s využitím  $^{17}\text{N}$ .



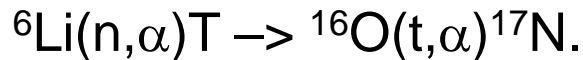
## Stanovení $\text{O}_2$ :

$^{17}\text{N}$  vzniká při ozařování  $\text{O}_2$  rychlými n  $^{17}\text{O}(\text{n},\text{p})^{17}\text{N}$  a  $^{18}\text{O}(\text{n},\text{d})^{17}\text{N}$ .

Málo citlivé kvůli malému zastoupení těžkých izotopů  $\text{O}_2$  a nízkým účinným průřezům (v  $10^{13} \text{ n}\cdot\text{sec}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$  cca 80 n / 1 mg O)

## Stanovení Li:

Vyšší výtěžky zpožděných neutronů pro systém



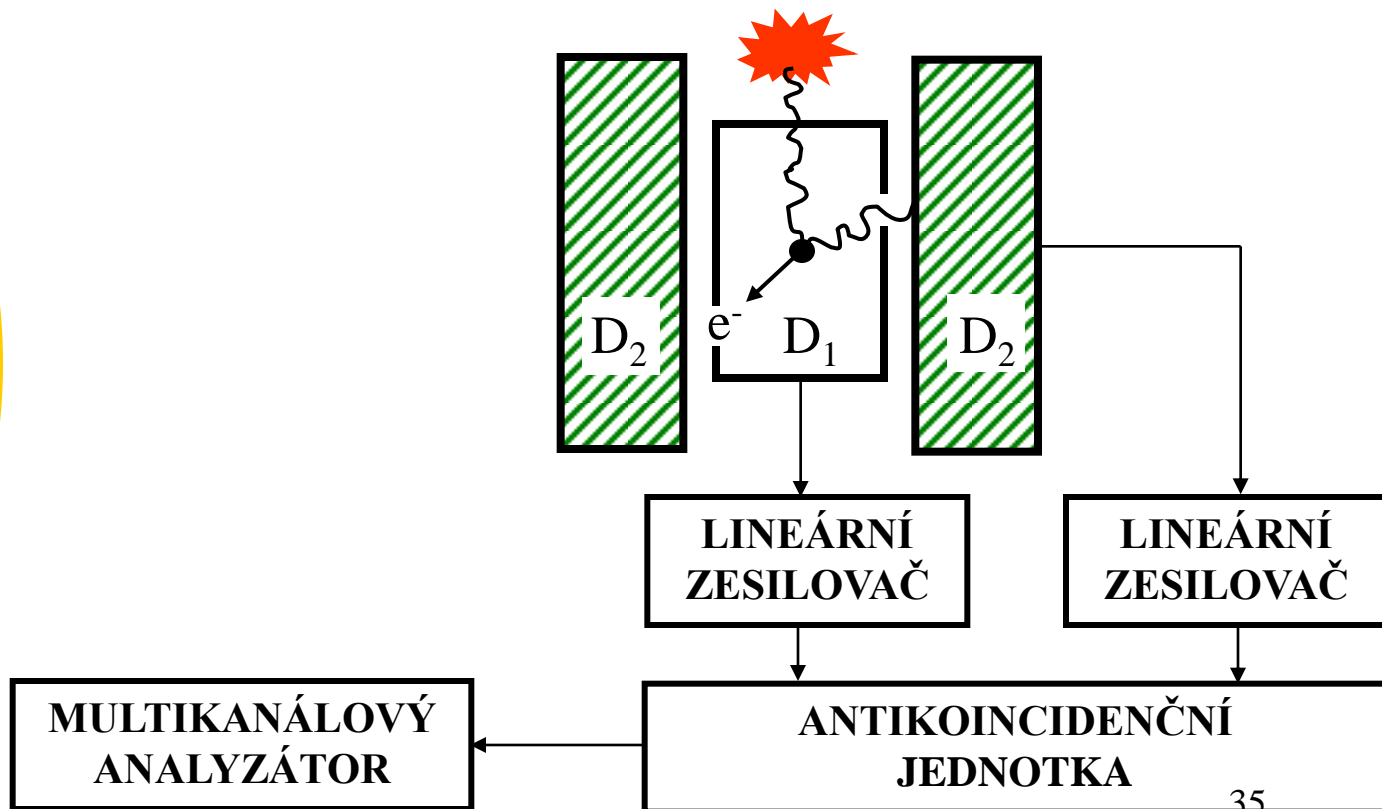
V  $10^{13} \text{ n}\cdot\text{sec}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$  cca 40.000 n / 1 mg  $^6\text{Li}$  rozpuštěného ve vodě.

# Méně běžné varianty AA (4)

Speciální spektrometry.

## I. Totálně absorbující spektrometr:

Comptonovsky rozptýlené fotony detegujeme v  $D_2$ , v  $D_1$  registrujeme pouze události, které nekoincidují s  $D_2$ , tj. pouze totálně absorbované fotony. Pro  $E_\gamma$  0,5 – 10 MeV. Současně snížení pozadí (cca 4x).

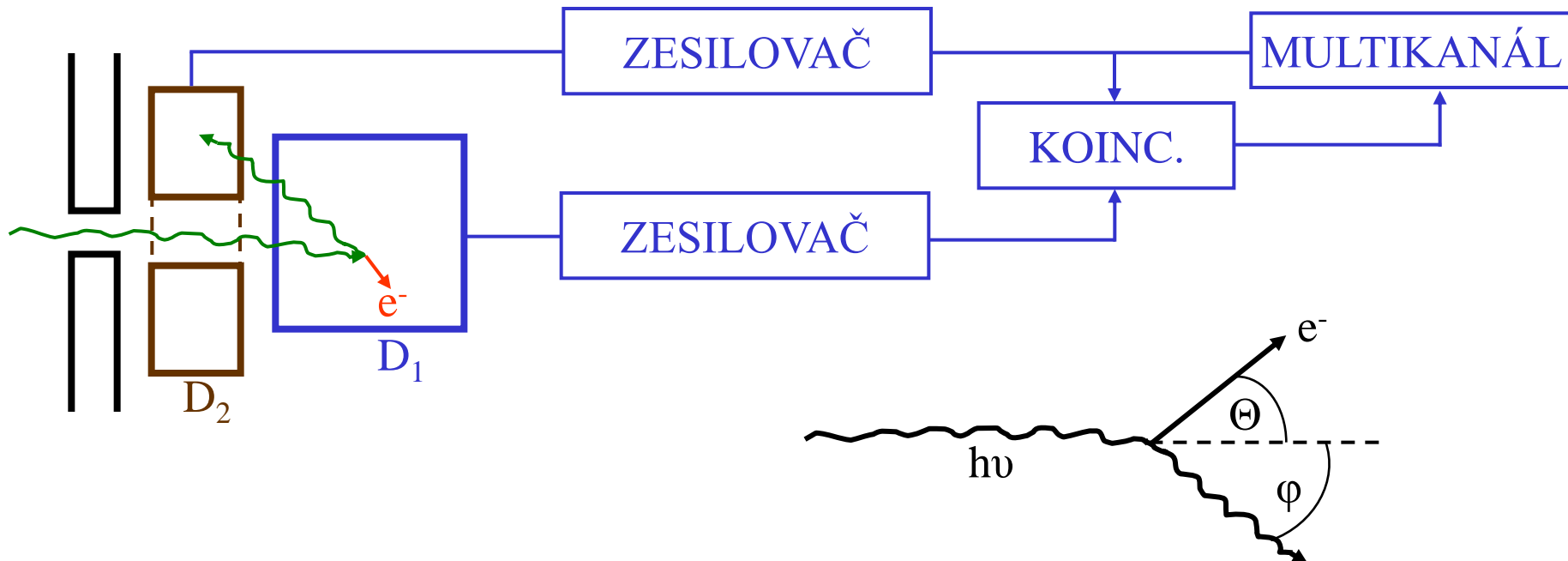


# Méně běžné varianty AA (5)

Speciální spektrometry – 2.

## II. Comptonovský (sumační) spektrometr:

Měříme události vyvolané comptonovskými elektrony v  $D_1$  v koincidence s comptonovskými fotony registrovanými pod úhlem  $150^\circ$  v  $D_2$ . V sumačních se impulsy sčítají – suma = pík totální absorpce. Malá účinnost (0,1 – 0,01 %).



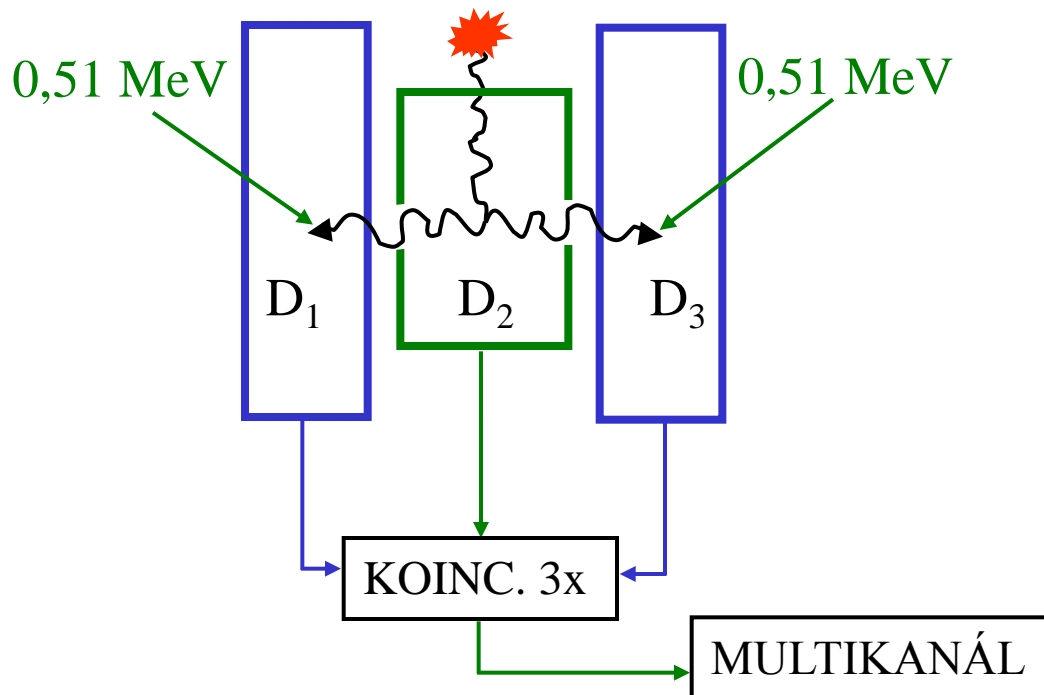
# Méně běžné varianty AA (6)

Speciální spektrometry – 3.

## III. Párový spektrometr:

Tři detektory v řadě, prostřední obvykle polovodičový, všechny v koincidenci. Měříme impulzy ze středního detektoru, registrujeme pouze ty, které jsou v koincidenci s anihilačními kvanty gama zaregistrovanými současně v obou bočních detektorech.

$E_{\gamma, \text{měř}} = E_{\gamma} - 2 \times 0,511 \text{ MeV}$ . Vhodné pro vyšší  $E_{\gamma}$ .



# Méně běžné varianty AA (7)

Speciální spektrometry – 4.

## IV. Koincidenční spektrometr:

Měříme koincidence 2 nebo více fotonů emitovaných v kaskádě. Registrujeme pouze ty, které jsou zachyceny v době  $\tau$  (rychlé koincidence  $\sim 10^{-8}$  s, pomalé  $\sim 10^{-6}$  s). Umožňuje měřit málo energetické nuklidy na pozadí tvrdého gama (v jednoduchém spektru nelze).

