

# Experimentálne metódy

Marcel MiGLiERiNi

## 2. Elektrón-pozitrónová anihilácia

- pozitrony
  - vlastnosti, zdroje, anihilácia
- techniky EPA
  - doba života pozitronov
  - Dopplerovo rozšírenie
  - uhlové korelácie

# Obsah

- elektrón-pozitrónová anihilácia
  - vlastnosti pozitronu
  - zdroje pozitronov
  - princíp anihilácie
  - pozitronium
- techniky anihilačnej spektrometrie
  - doba života pozitronov
  - Dopplerovo rozšírenie
  - uhlové korelácie
- použitie pozitronovej anihilácie
  - prehľad

# Pozitrón

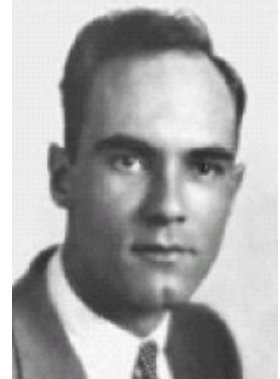
- prvá objavená antičastica

- pozitron:  $m_{e^+} = 9.1091 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ ,  $e = +1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

- predpovedaný v r. 1928 Diracom:  $E = \pm \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4}$

- objavený C. D. Andersonom:

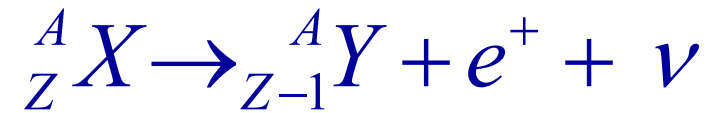
- 1932 z kozmických lúčov vo Wilsonovej komore
  - 1933 dôkaz tvorby  $e^- - e^+$  páru detekciou anihilačného žiarenia



# Zdroje pozitronov

## ■ $\beta^+$ rádionuklidy

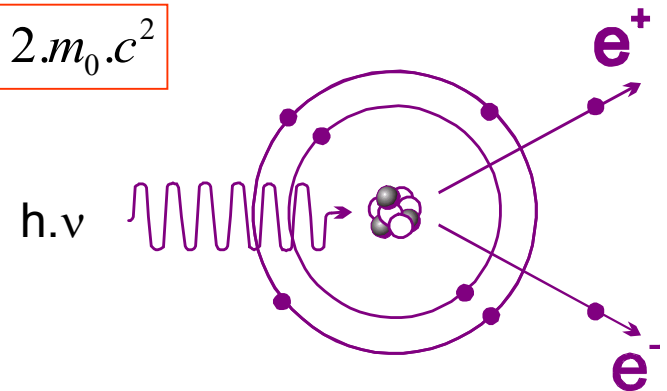
- jadrá bohaté na protóny (nízky pomer N/Z)
- $p \rightarrow n + \beta^+ + \nu$
- napr.  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{64}\text{Cu}$ ,  $^{58}\text{Co}$



## ■ produkcia $e^- - e^+$ párov z vysokoenergetických fotónov $\gamma$

- urýchlené  $e^-$  sú zbrzdené v absorbátore s vysokým Z  
→ **brzdné žiarenie**
- $h \cdot \nu_{\min} = 1.022 \text{ MeV} = 2 \times 0.511 \text{ MeV}$
- pulzný zdroj  $e^+$

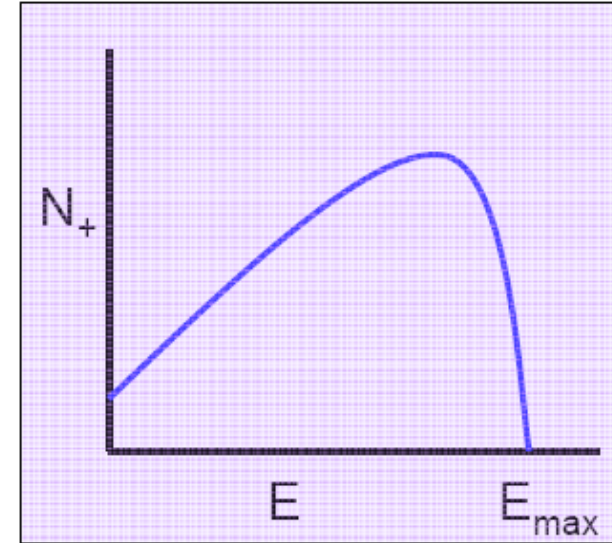
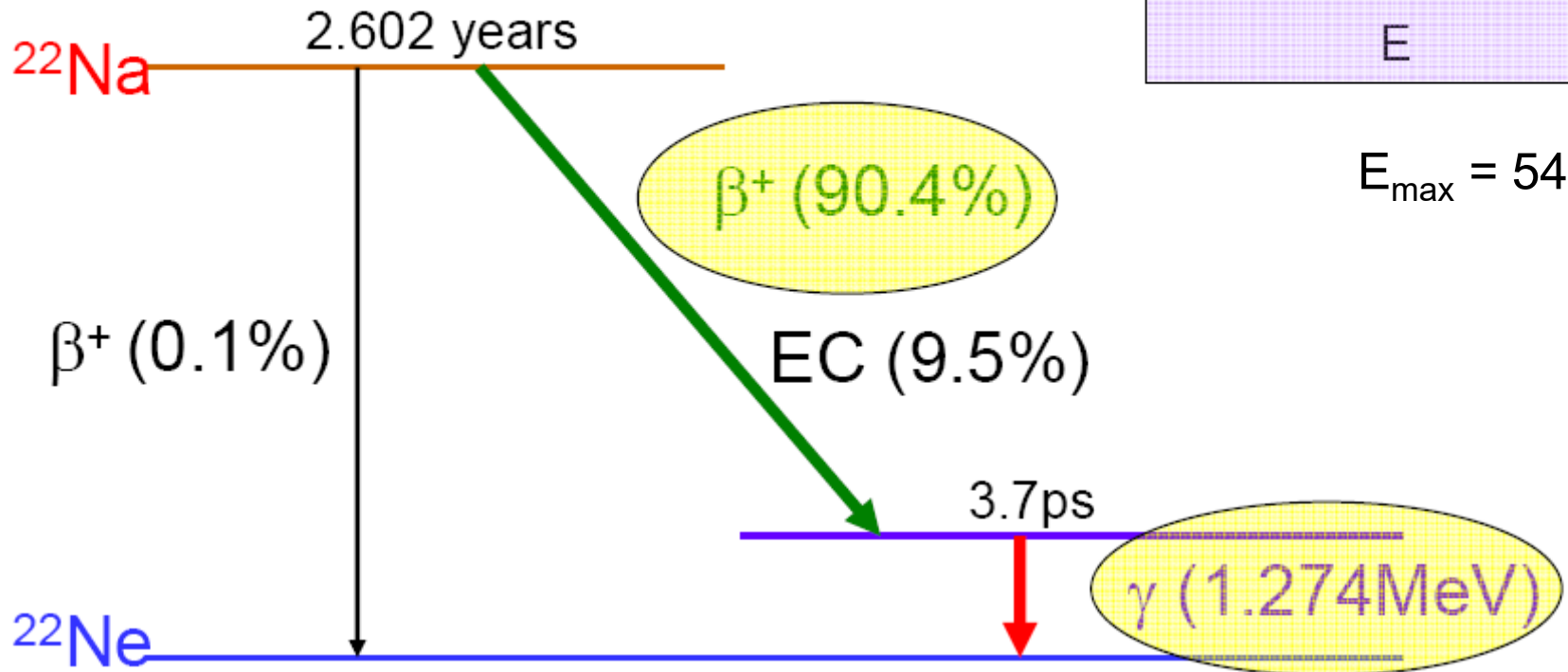
$$h \cdot \nu > 2 \cdot m_0 \cdot c^2$$



## ■ z jadrových reakcií

- $^{113}\text{Cd}(n, \gamma)^{114}\text{Cd}$ ,  $^{63}\text{Cu}(n, \gamma)^{64}\text{Cu}$
- kontinuálny zdroj  $e^+$  s vysokou intenzitou

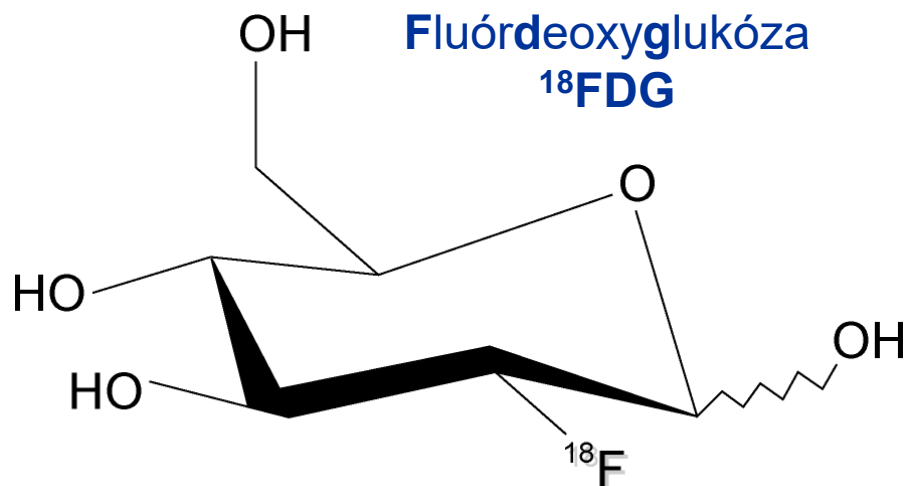
# Zdroj $^{22}\text{Na}$



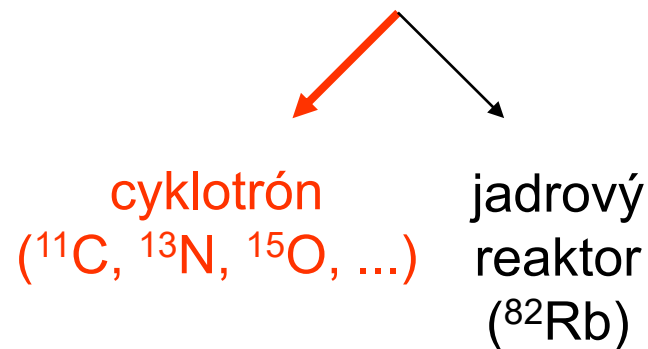
$$E_{\text{max}} = 540 \text{ keV}$$

# Zdroje pozitronov pre PET

rádionuklid	$\tau_{1/2}$ (min)	$E_{\max}$ (MeV)	$a_{\max}$ (mm)	$\langle a \rangle$ (mm)	reakcia
$^{11}\text{C}$	20.38	0.96	5.0	0.3	$^{14}\text{N}(p,\alpha)^{11}\text{C}$
$^{13}\text{N}$	9.96	1.19	5.4	1.4	$^{16}\text{O}(p,\alpha)^{13}\text{N}$
$^{15}\text{O}$	2.03	1.72	8.2	1.5	$^{15}\text{N}(p,n)^{15}\text{O}$
$^{18}\text{F}$	109.8	0.64	2.4	0.2	$^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$
$^{68}\text{Ga}$	68.1	1.89	9.1	1.9	$^{68}\text{Zn}(p,n)^{68}\text{Ga}$
$^{82}\text{Rb}$	1.25	3.35	15.6	2.6	$^{82}\text{Sr}$ generátor



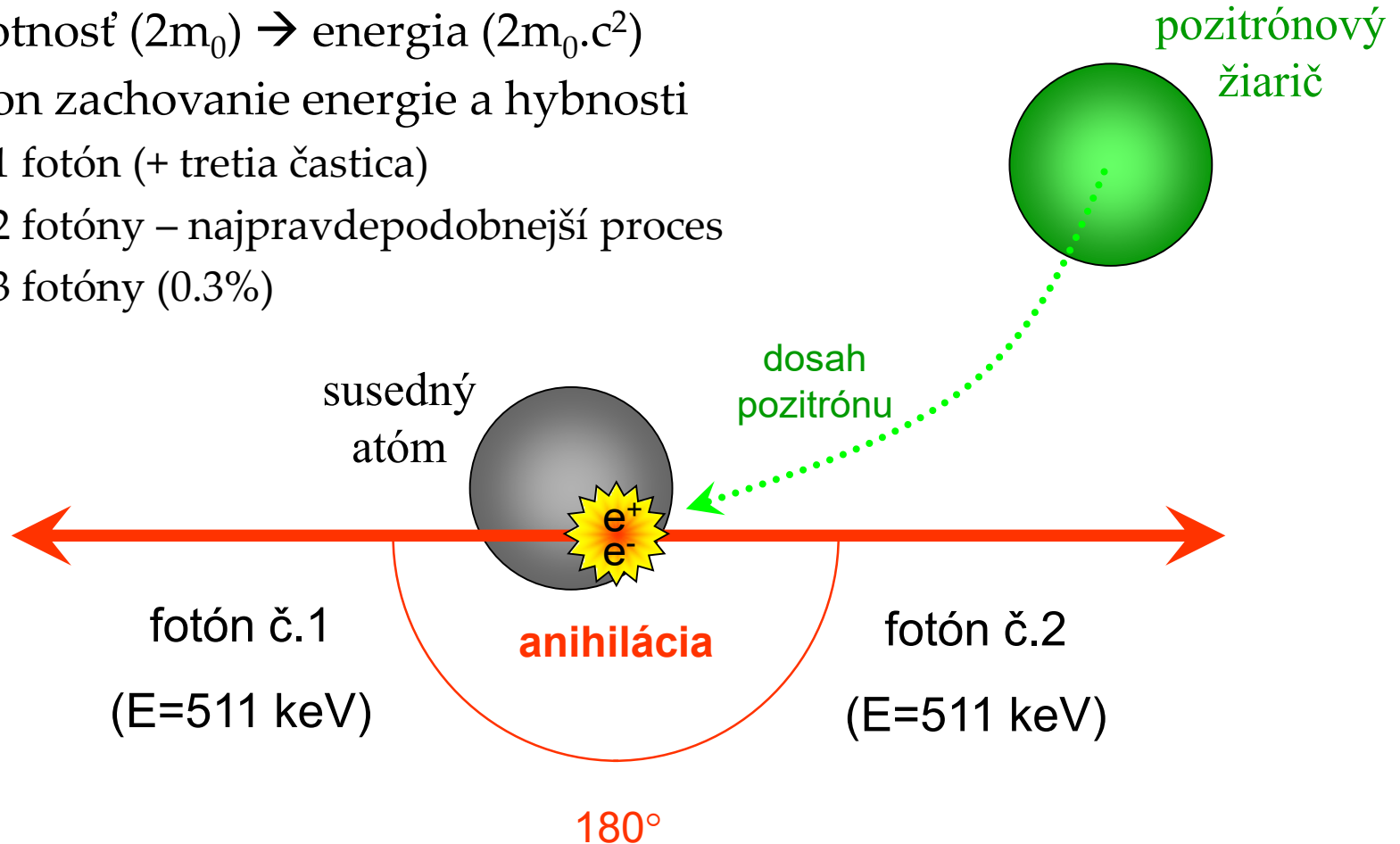
výroba rádionuklidov



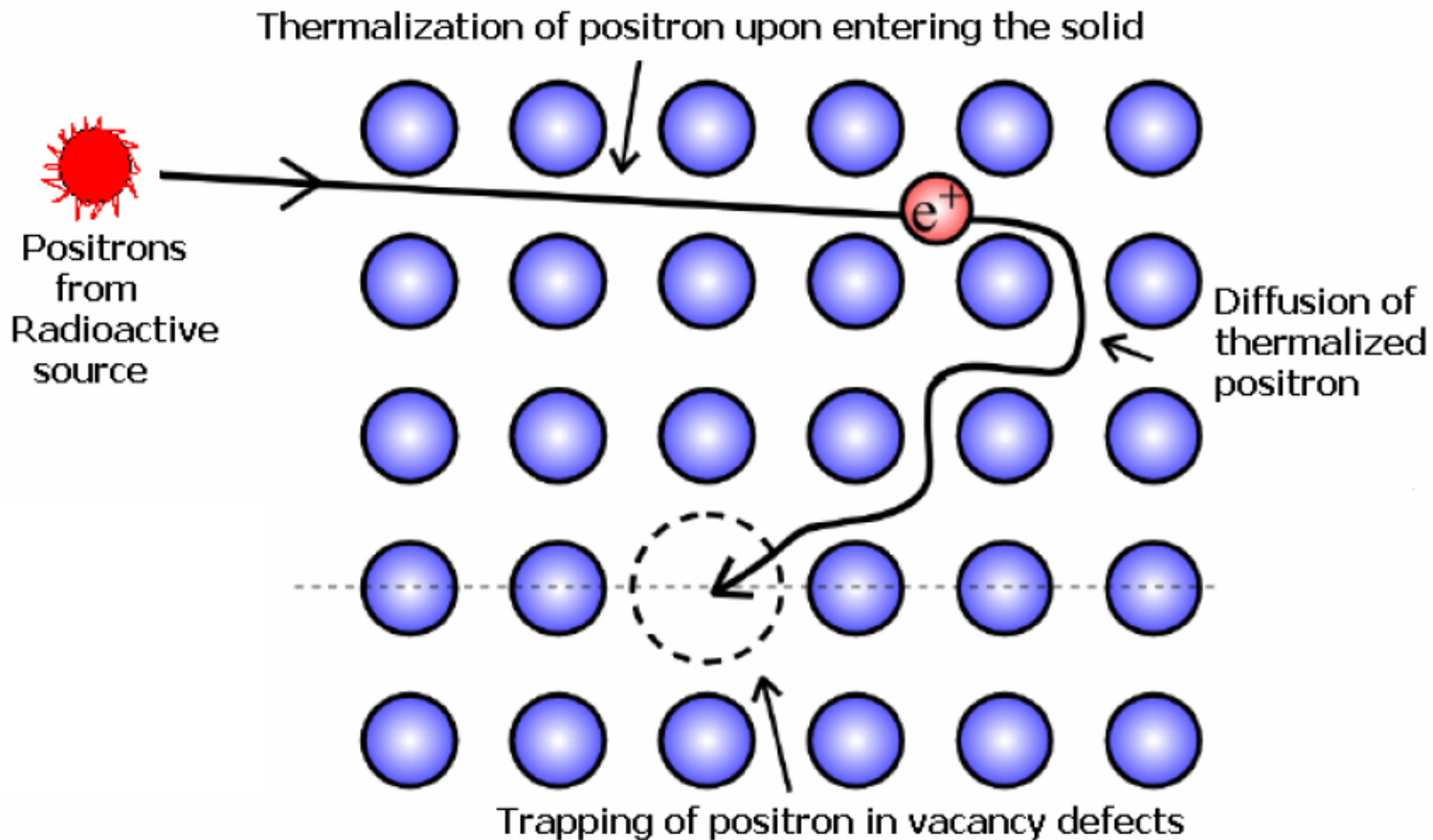
# Princíp anihilácie

## ■ fyzikálna podstata

- hmotnosť ( $2m_0$ )  $\rightarrow$  energia ( $2m_0 \cdot c^2$ )
- zákon zachovanie energie a hybnosti
  - 1 fotón (+ tretia častica)
  - 2 fotóny – najpravdepodobnejší proces
  - 3 fotóny (0.3%)

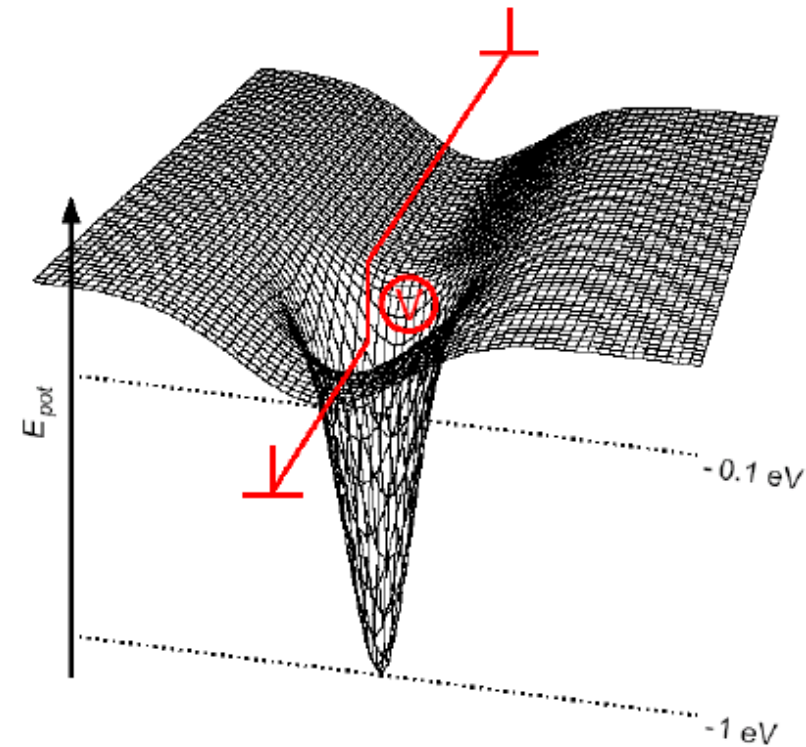
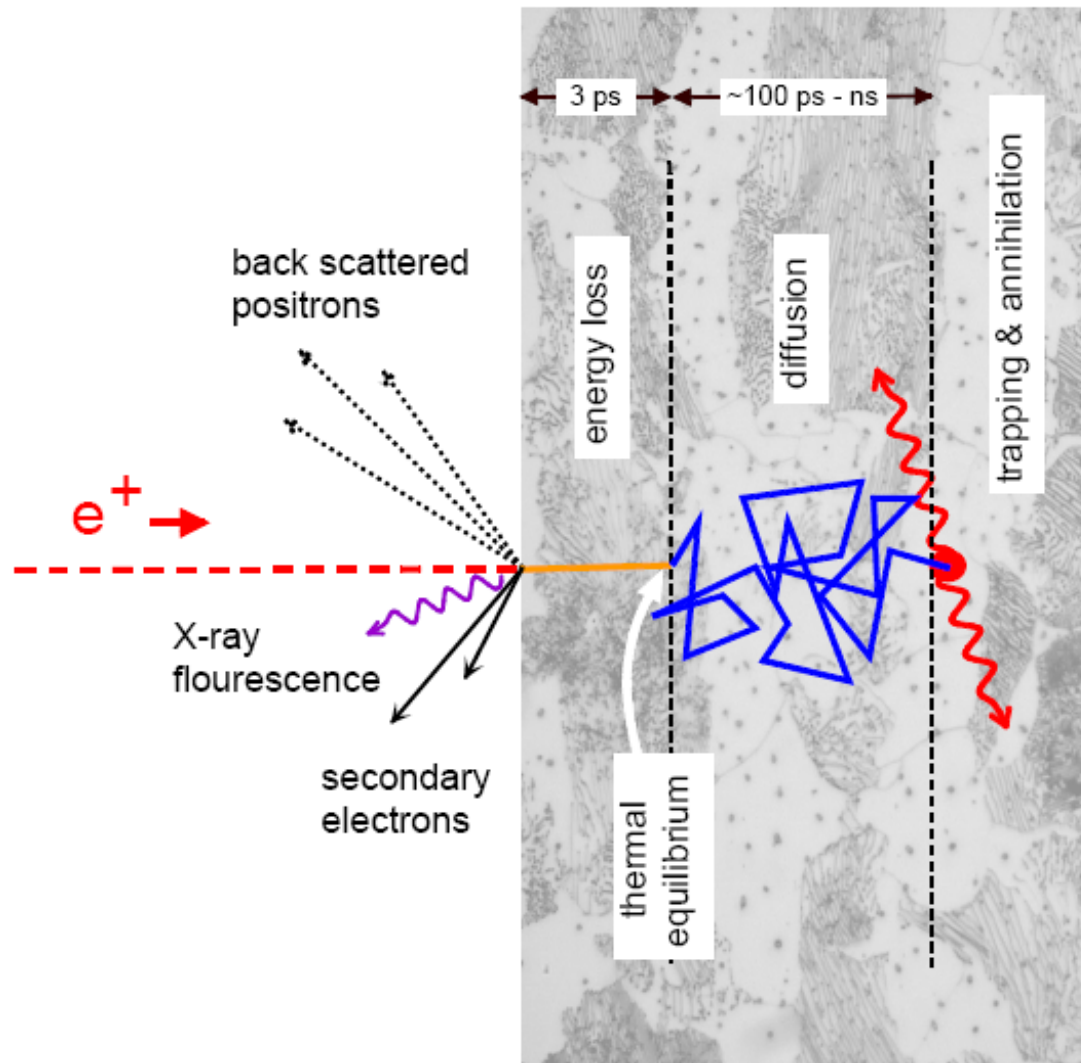


# Pozitróny v látke





# Interakcia pozitronov s látkou

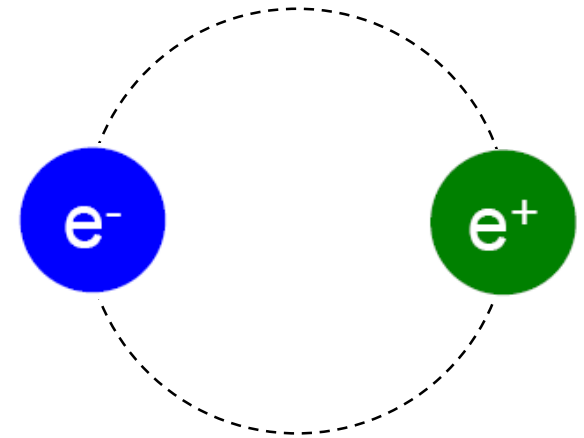


# Pozitrónium

- anihilácia nenastáva okamžite

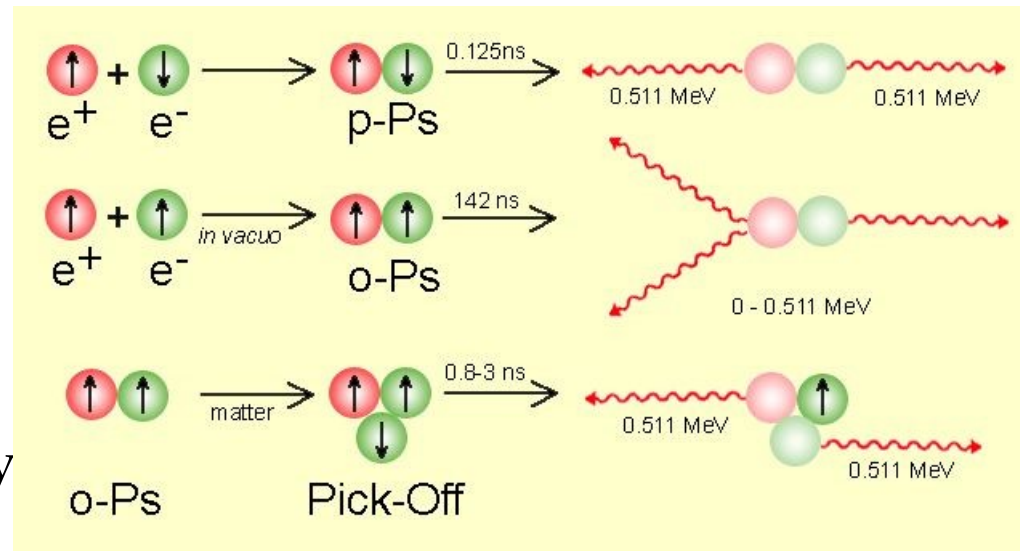
- viazaný stav  $e^- + e^+$

- para-pozitrónium (125 ps)  $\uparrow\downarrow$
- orto-pozitrónium (142 ns)  $\uparrow\uparrow$



- existencia pozitronia v:

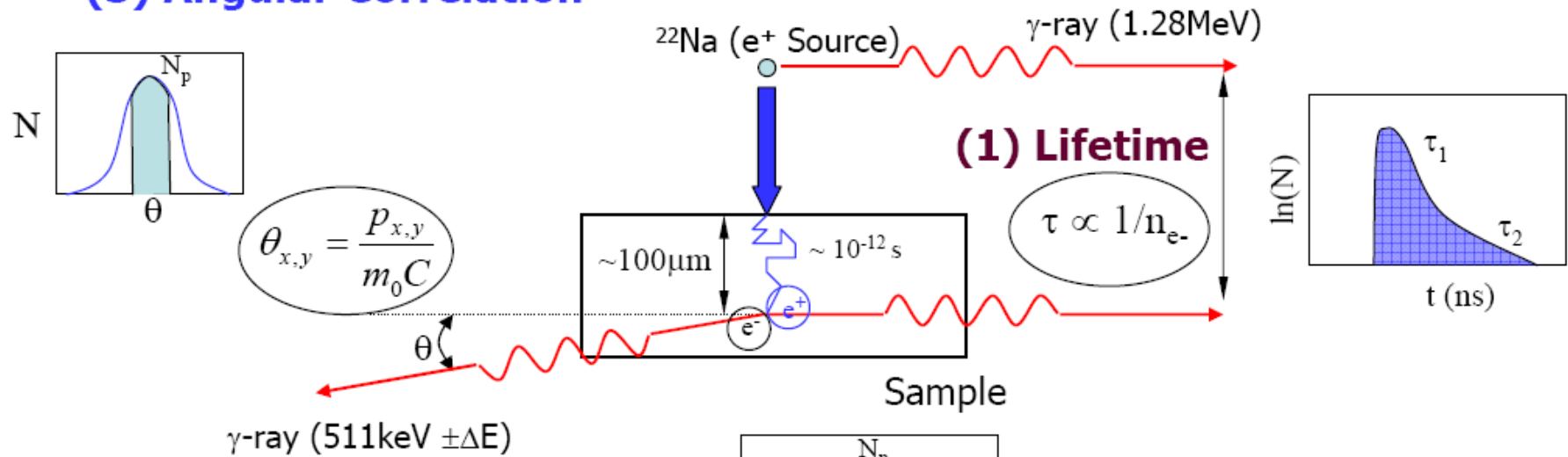
- polyméroch
- iónových kryštáloch
- kvapalinách
- plynoch
- defektoch kryštálovej mriežky



# Experimentálne techniky

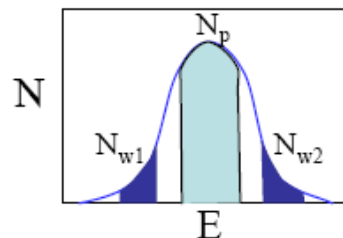
- doba života pozitronov (1)
- Dopplerovo rozšírenie (2)
- uhlové korelácie (3)

## (3) Angular Correlation



## (2) Doppler Broadening

$$\Delta E = \frac{C p_z}{2}$$

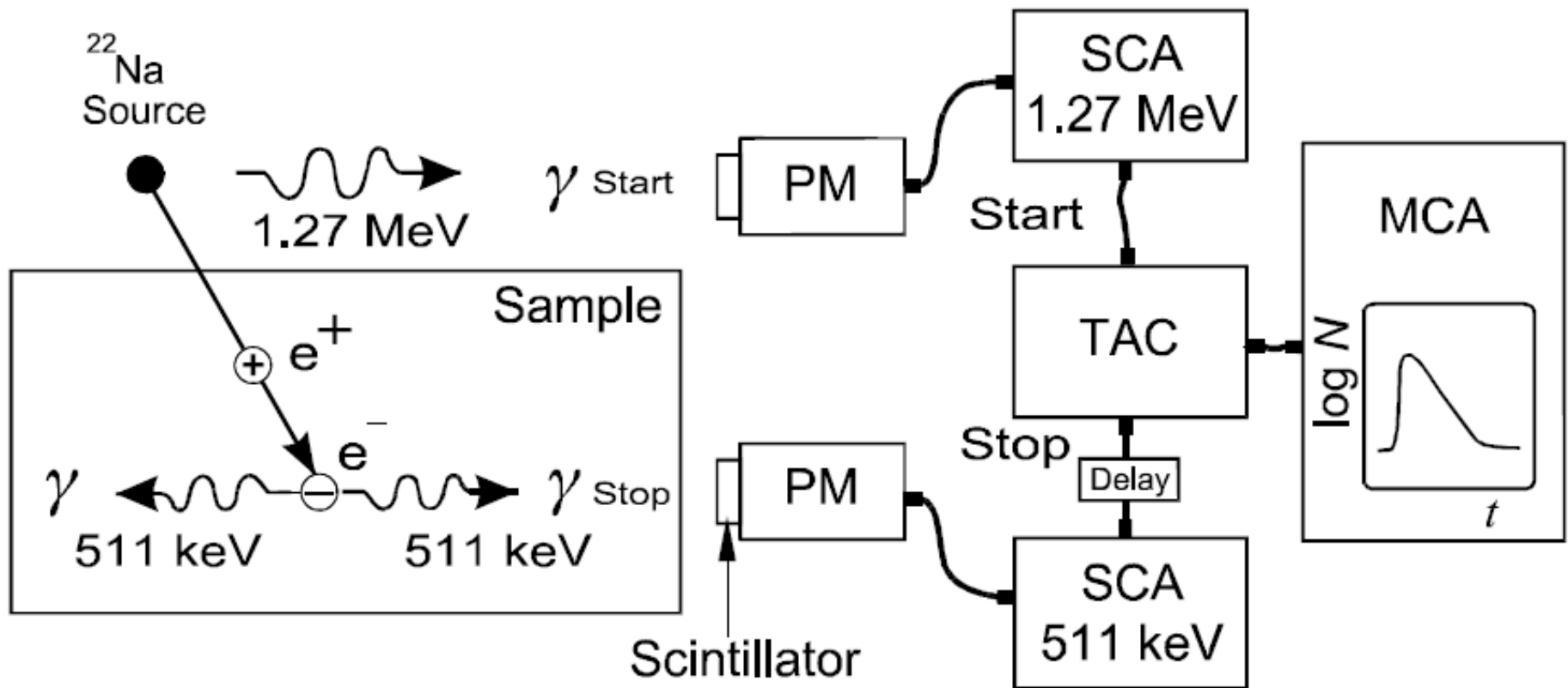


$$S = N_p / N_{\text{total}}$$

$$W = (N_{w1} + N_{w2}) / N_{\text{total}}$$

# Doba života pozitronov

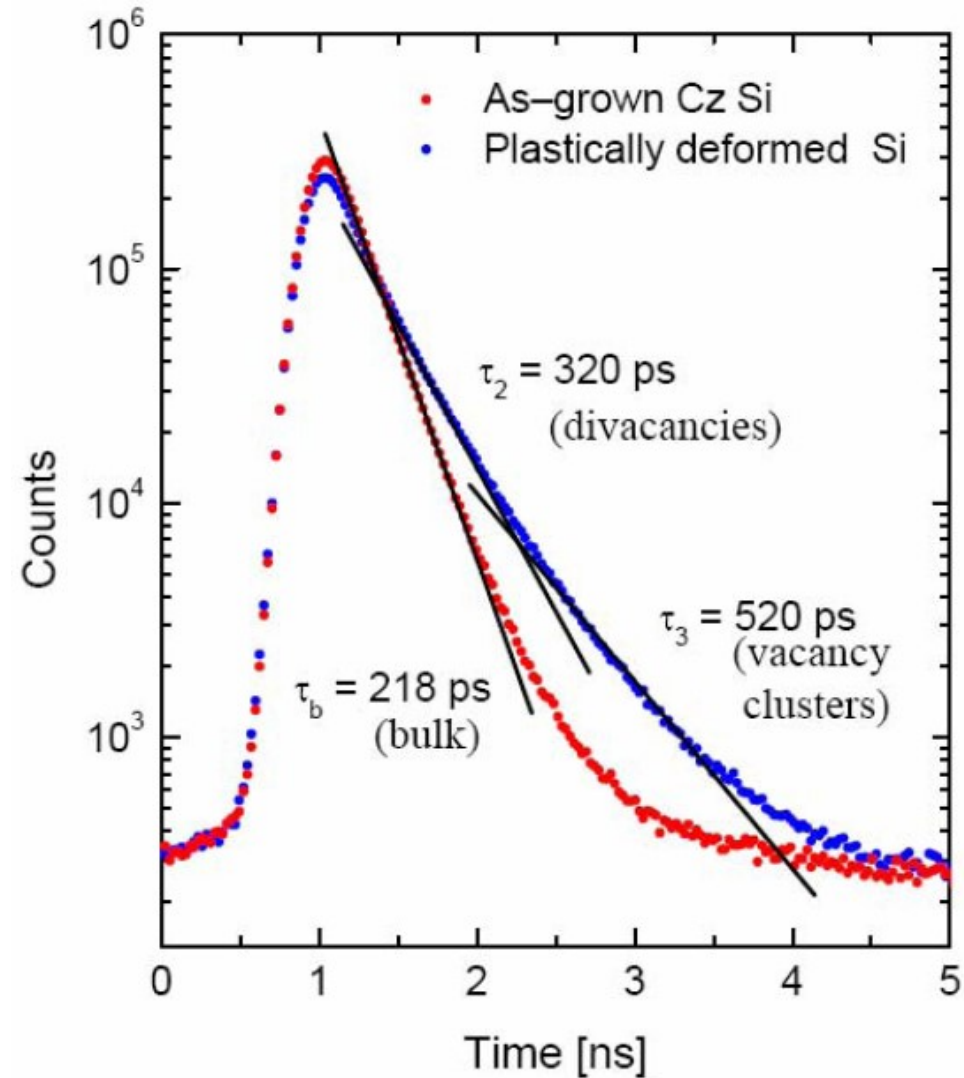
- bloková schéma spektrometra



# Časové spektrá

- zložky spektra
  - prístrojové rozlíšenie
  - zdroj
  - vzorka
- identifikácia a kvantifikácia defektov kryštalickej mriežky

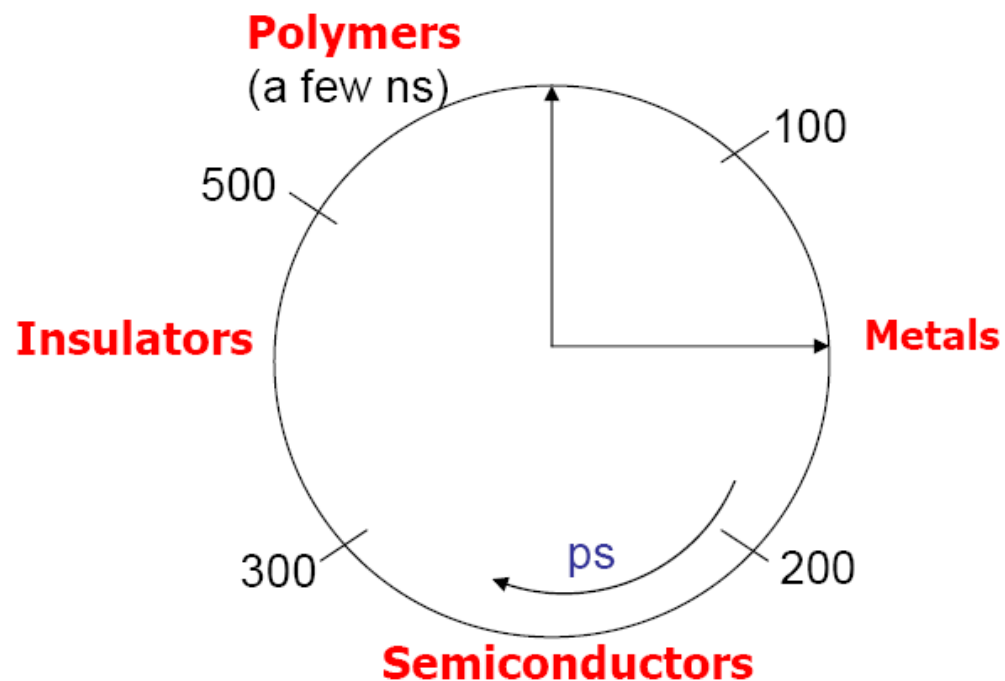
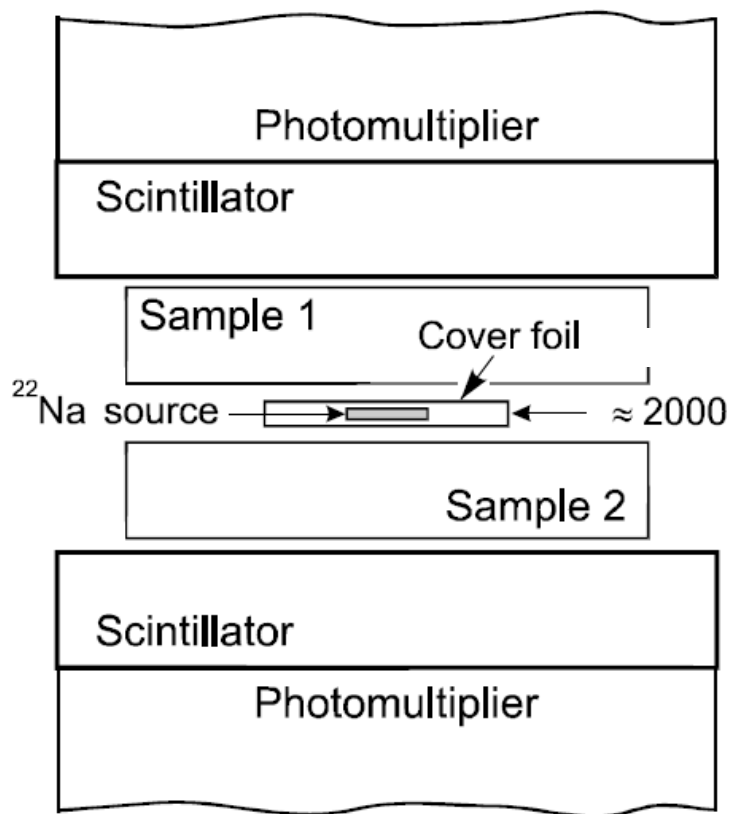
$$N(t) = \sum_{i=1}^{k+1} \frac{I_i}{\tau_i} \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right)$$



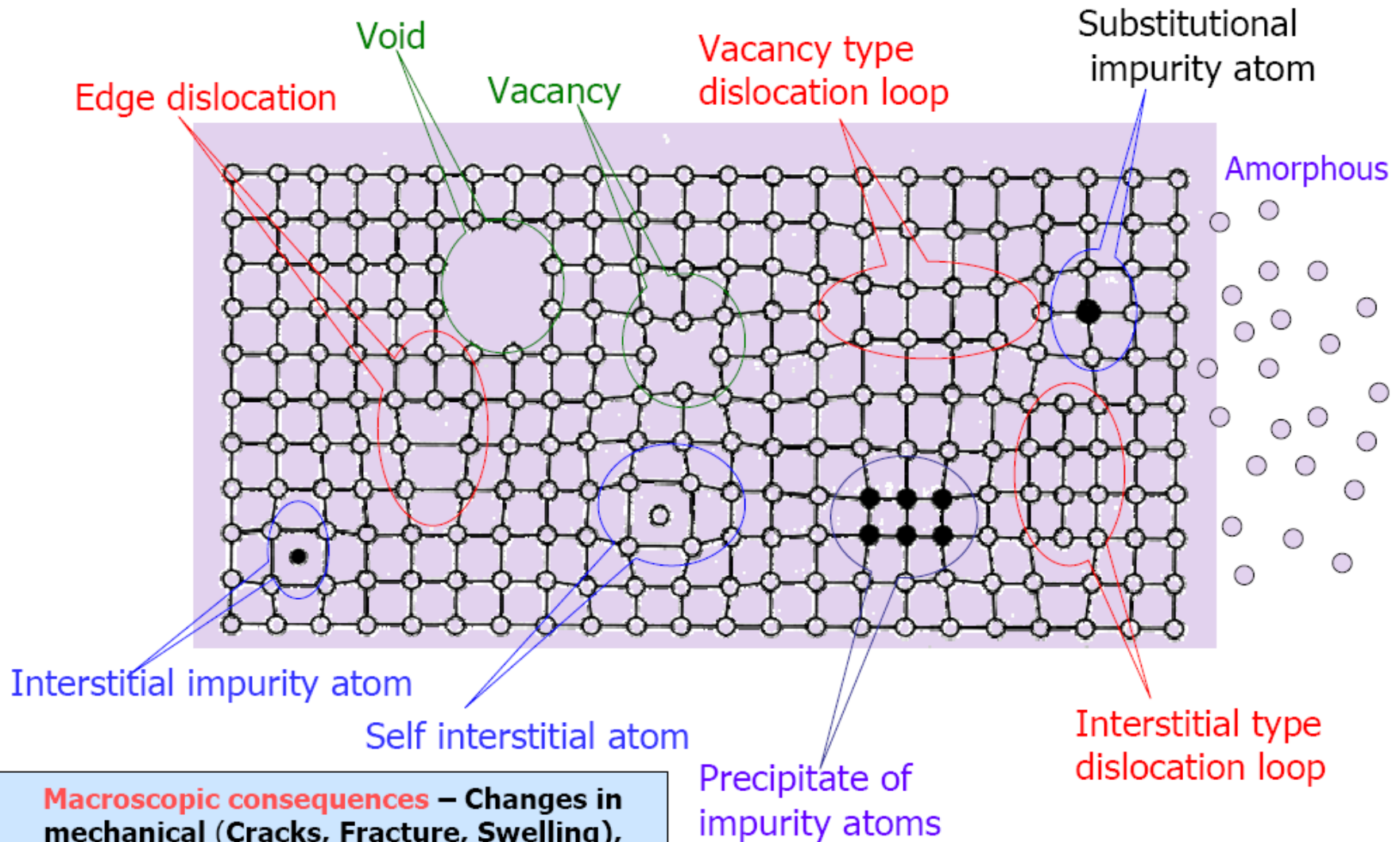
# Doba života pozitronov - $\tau$

- závisí od hustoty elektrónov  $n_{e^-}$
- usporiadania pozitronia

$$\tau \propto 1/n_{e^-}$$



# Nepravidelnosti kryštálovej mriežky



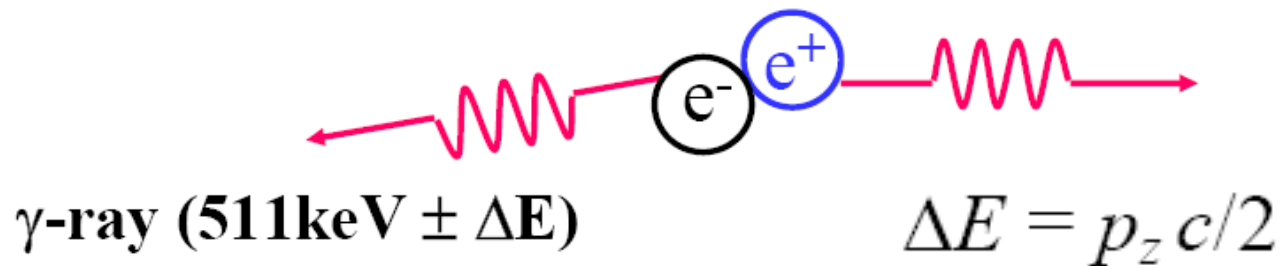
**Macroscopic consequences** – Changes in mechanical (Cracks, Fracture, Swelling), Optical, electrical & magnetic properties



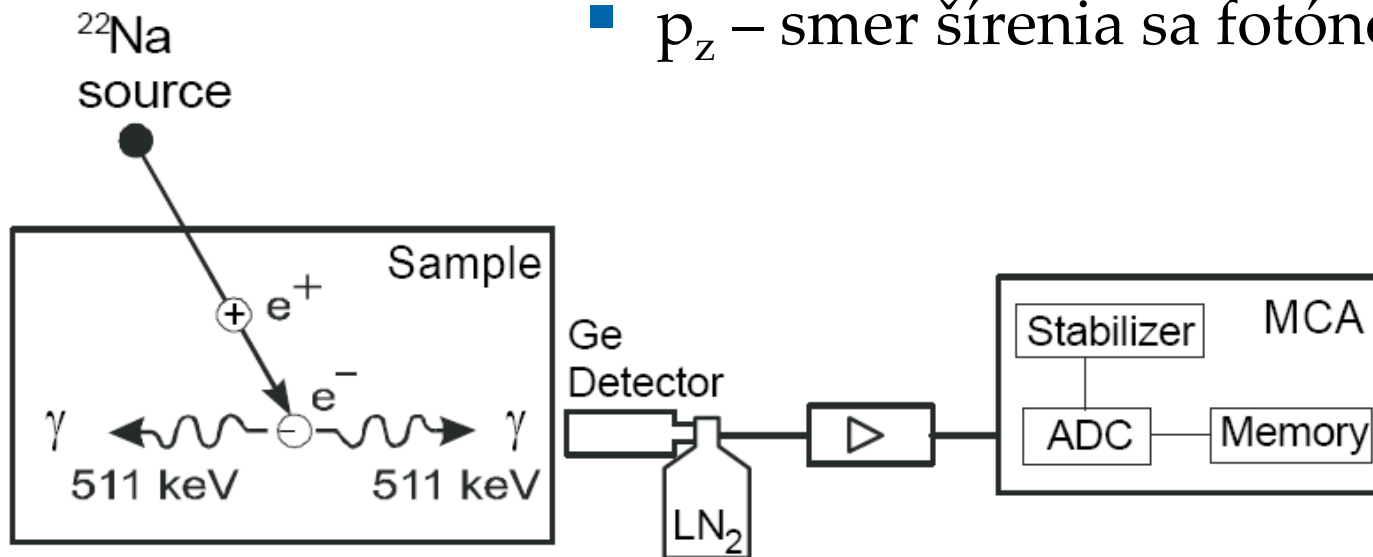




# Dopplerovo rozšírenie (spektrálnej čiary)

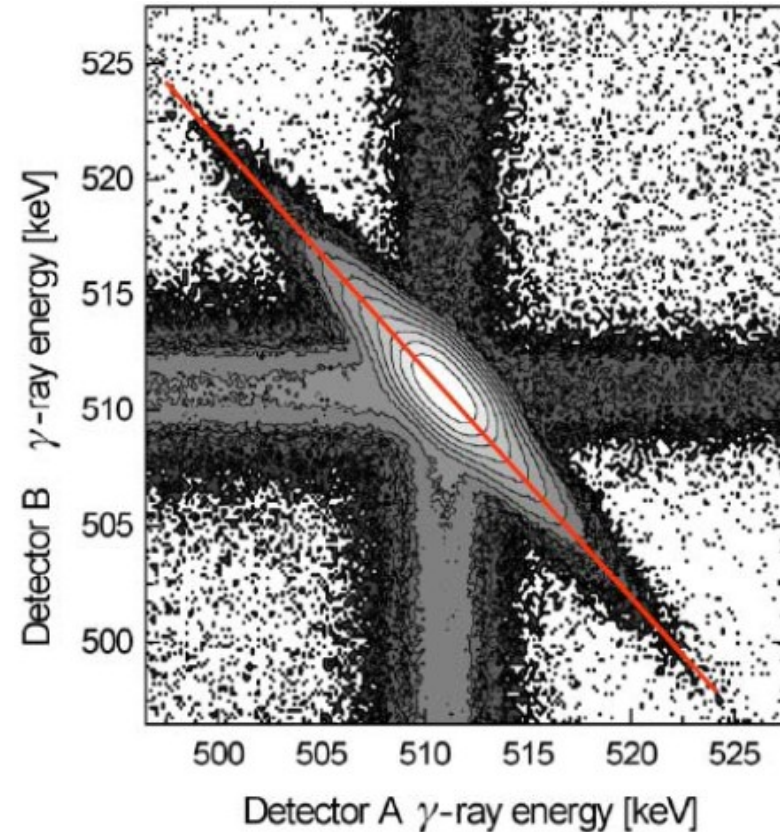
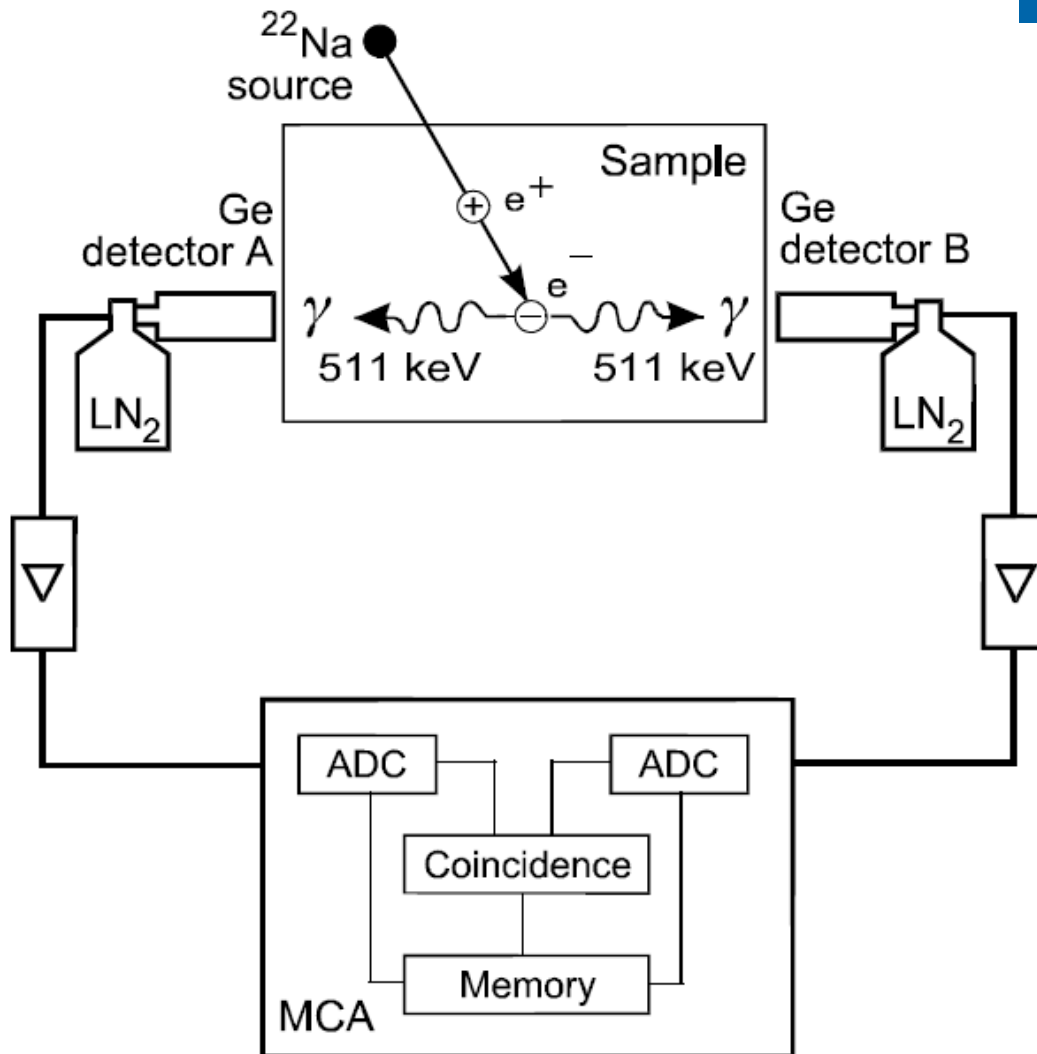


- moment  $e^- - e^+$  páru  $\mathbf{p}$  je prenesený na pár fotónov
- $p_z$  – smer šírenia sa fotónov

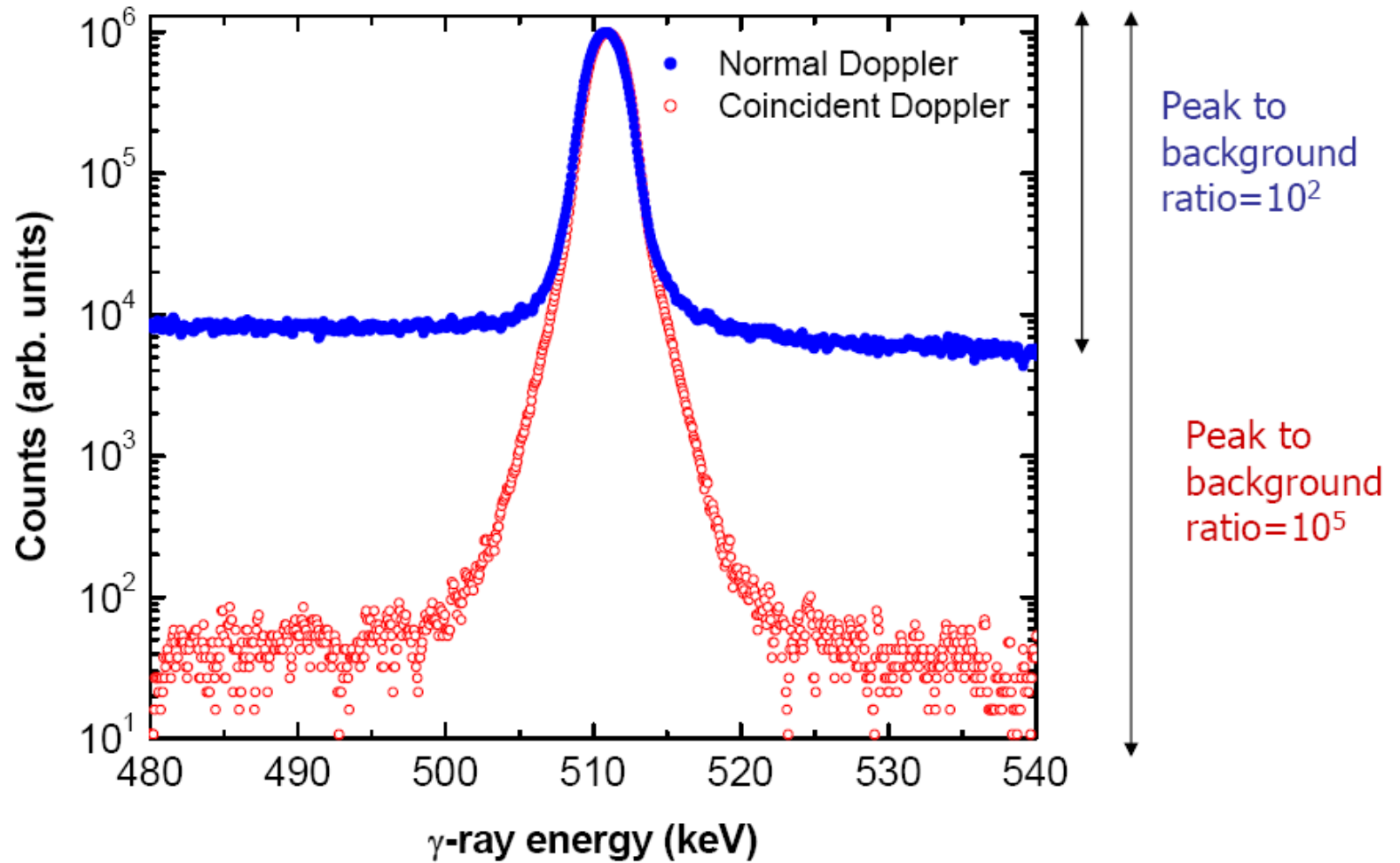


# Koincidenčné zapojenie

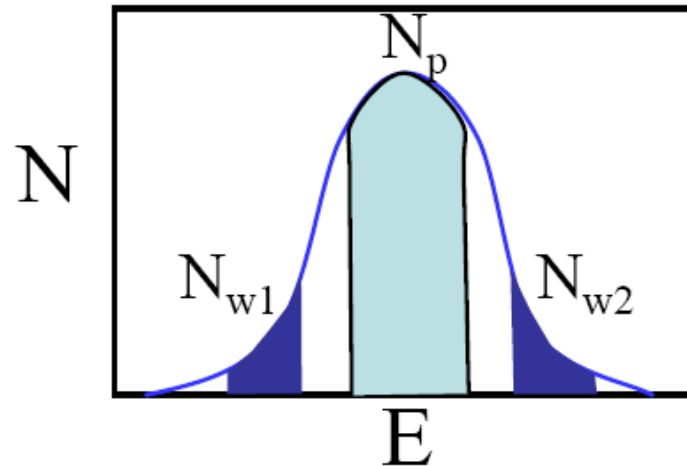
- potlačenie vplyvu pozadia
  - od 1.27 MeV o 2 rády
- vylepšenie energetického rozlíšenia o  $\sqrt{2}$



# Porovnanie



# Spektrum Dopplerovho rozšírenia



## ■ S parameter:

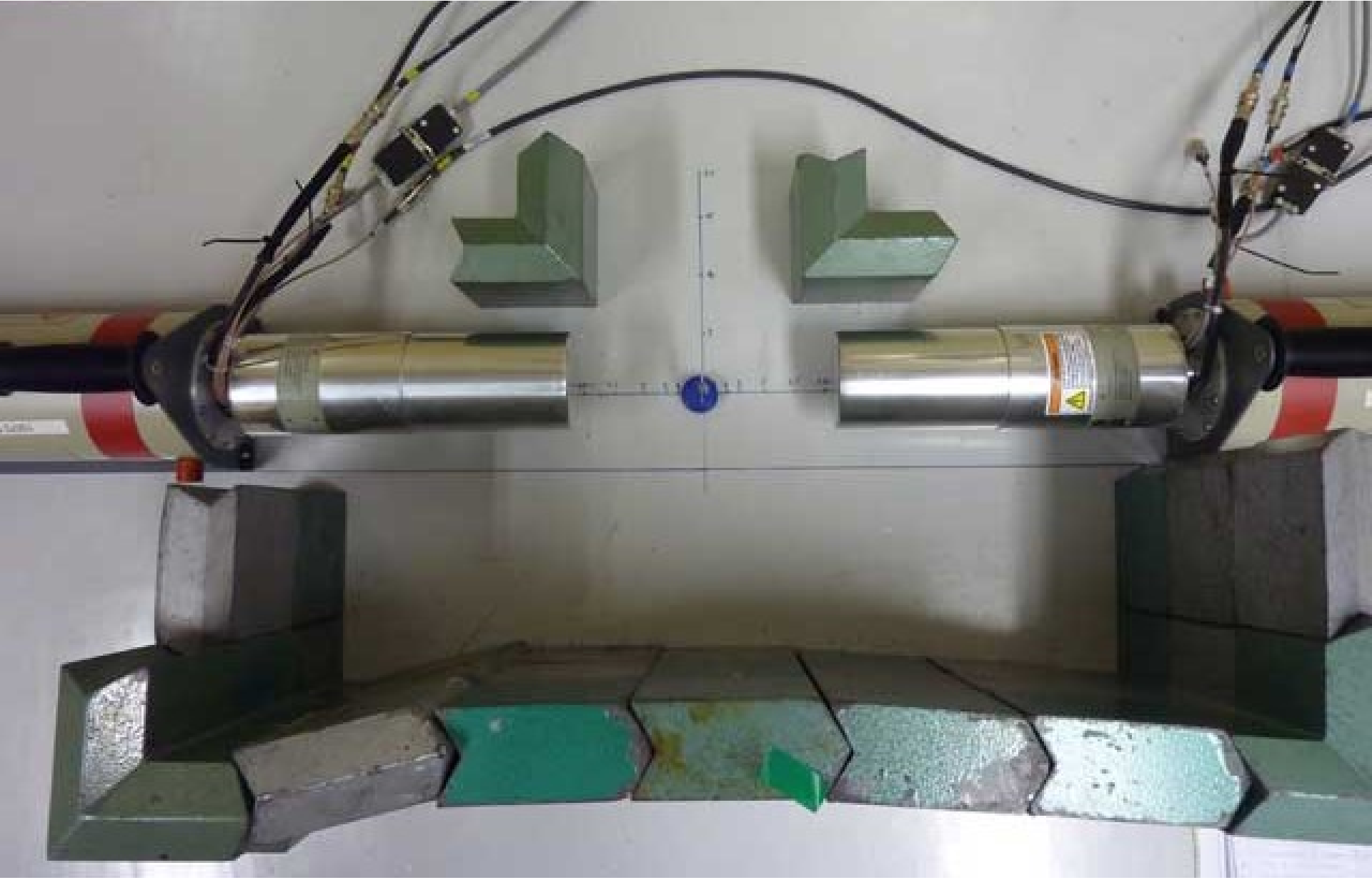
- anihilácia s valenčnými  $e^-$
- citlivý na objemové defekty

$$S = N_p / N_{\text{total}}$$

## ■ W parameter:

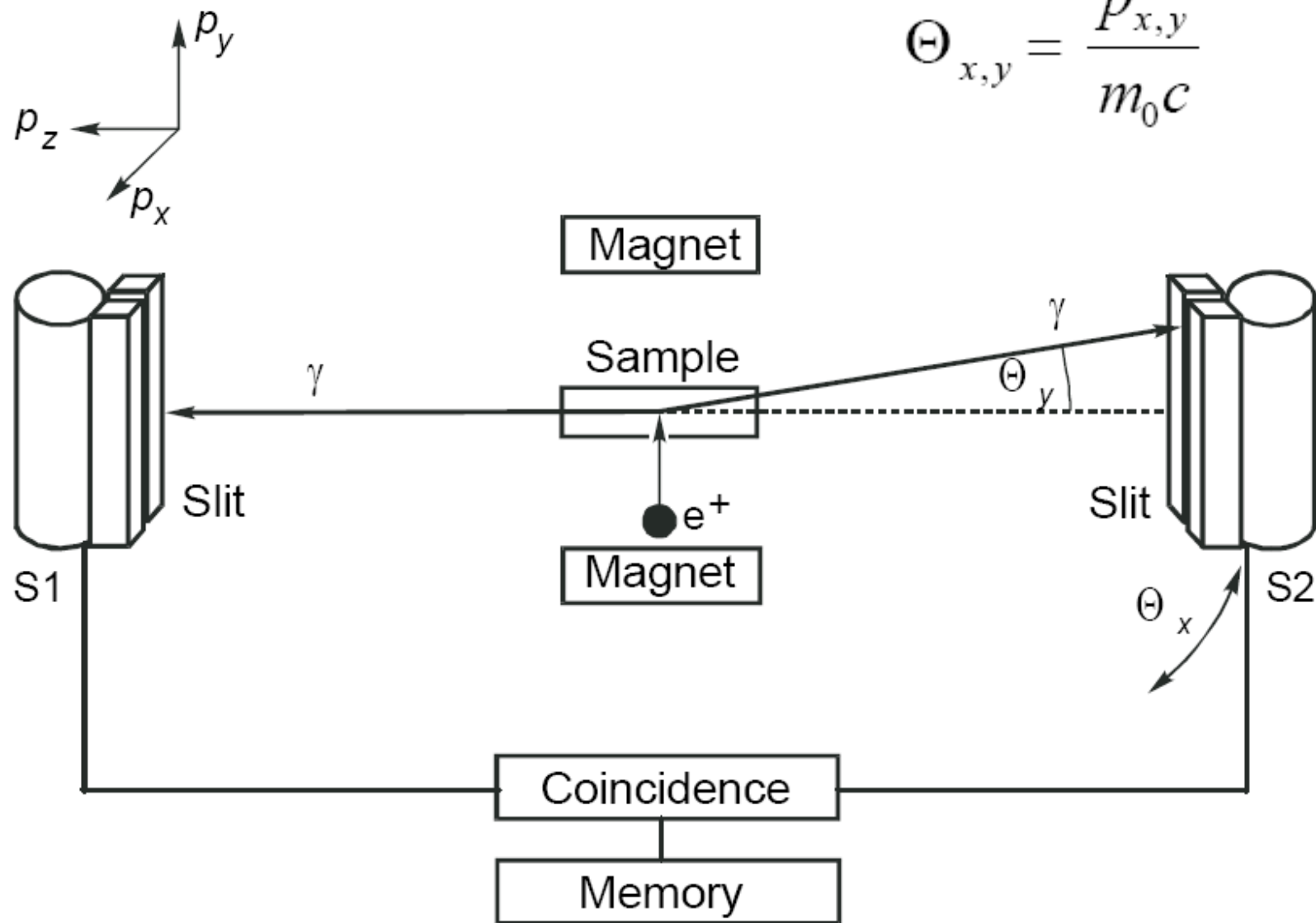
- anihilácia s jadrovými  $e^-$
- citlivý na chemické okolia v priestore anihilácie

$$W = (N_{w1} + N_{w2}) / N_{\text{total}}$$



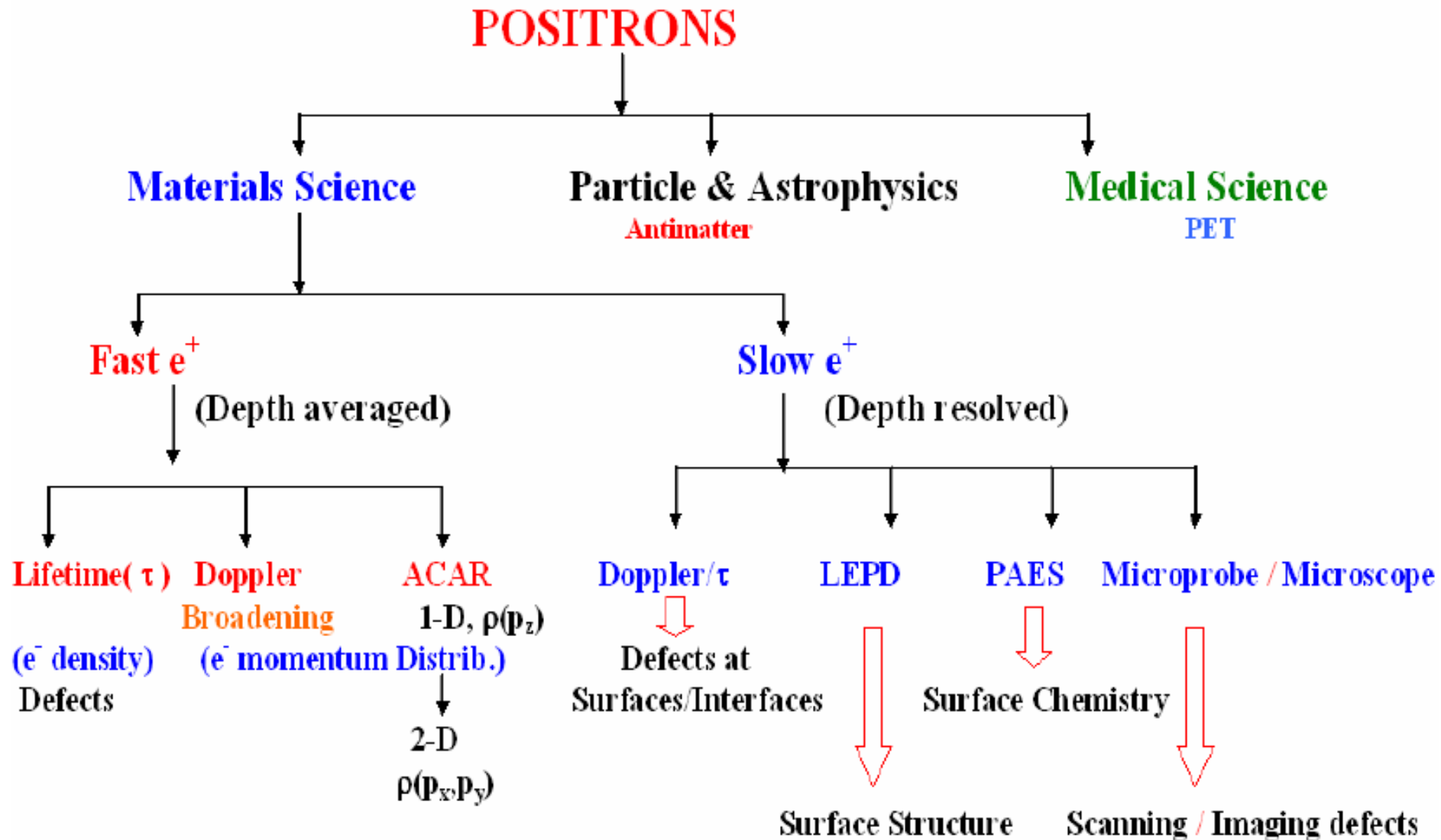
# Uhlové korelácie

$$\Theta_{x,y} = \frac{p_{x,y}}{m_0 c}$$





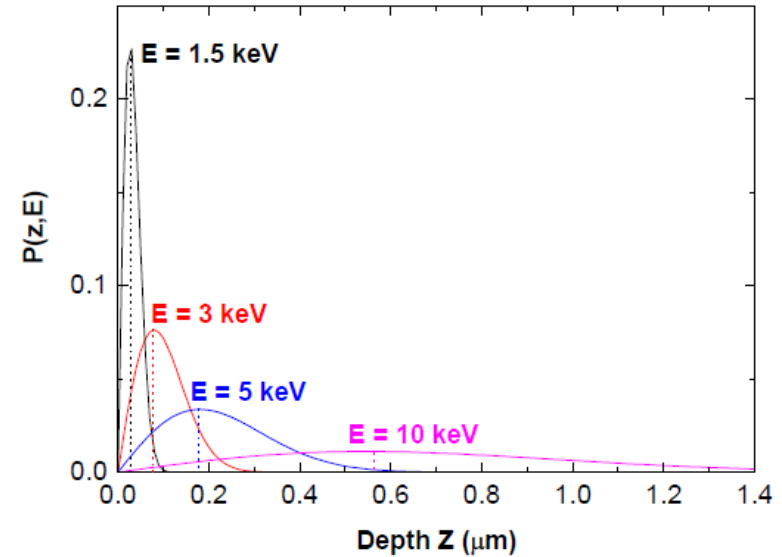
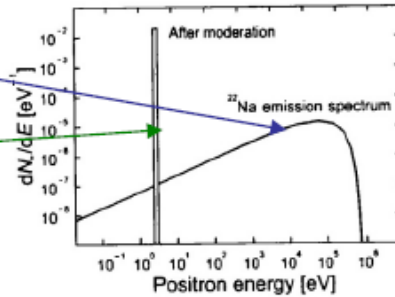
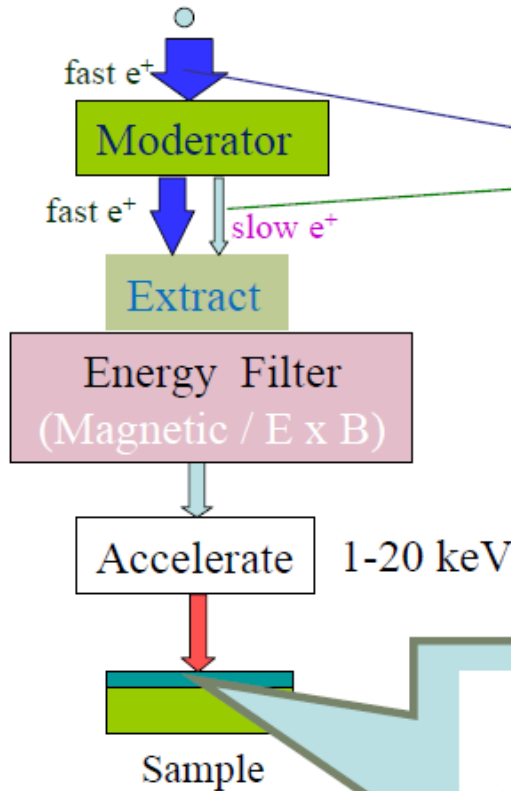
# Použitie pozitronov





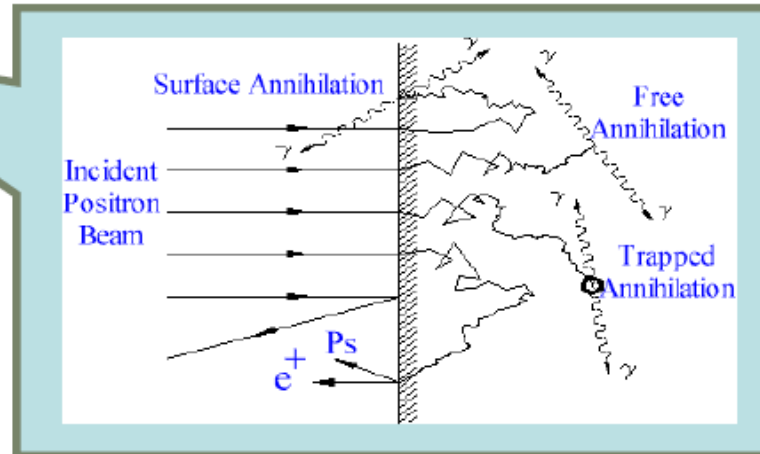
# Rýchle/pomalé pozitrony

$^{22}\text{Na}$  ( $e^+$  Source) / Pair production



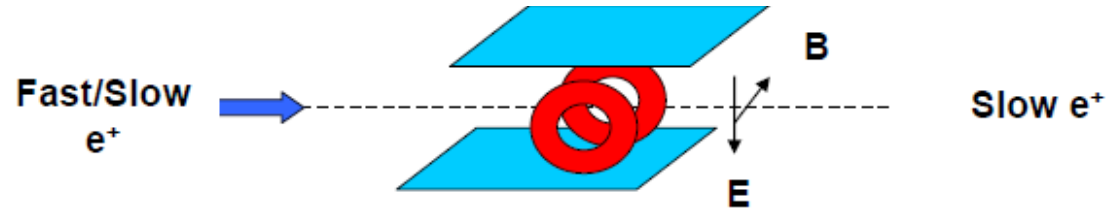
## Depth profiling with

- Doppler Broadening
- Lifetime

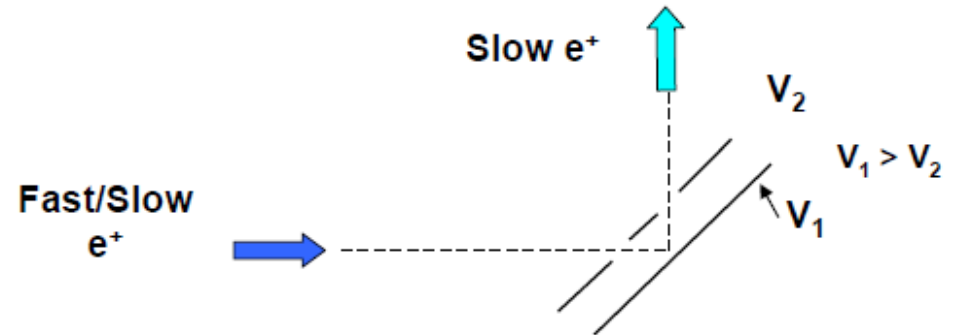


# Filtre pozitronov

- E x B filter



- elektrostatický filter



- magnetický filter

