Pozitronový mikroskop

- rychlé pozitrony z β^+ radioizotopu
- prostorové rozlišení ≈ 100 μm
- nedestruktivní mapování rozložení defektů

Pozitronový mikroskop

- mapování rozložení defektů
- mikrotvrdost HV
- dislokace (work hardening)

$$\mathrm{HV} \approx \sqrt{\rho_D}$$

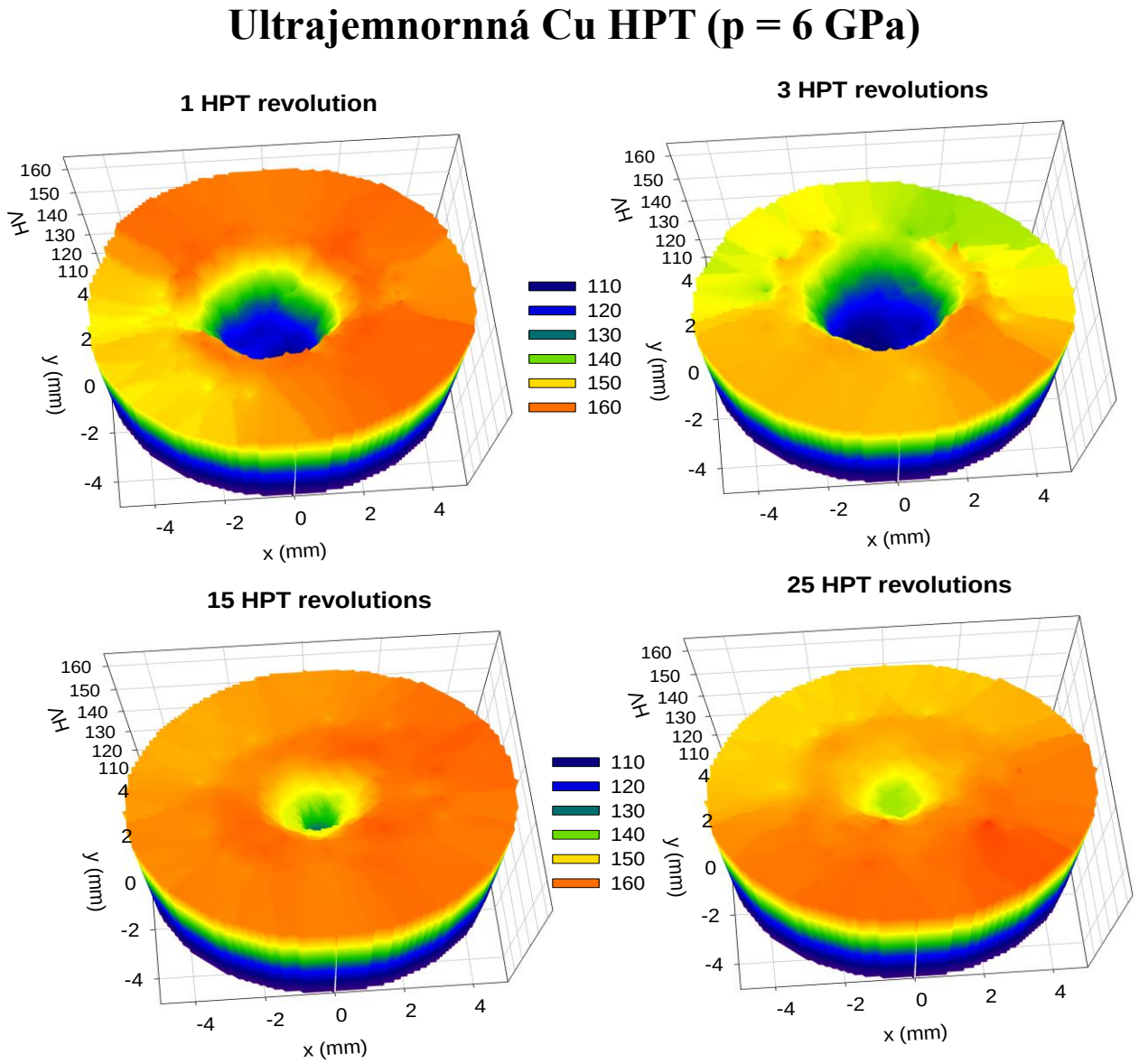
- hranice zrn (Hall-Petch)

$$\mathrm{HV} \approx 1/\sqrt{d}$$

- torzní deformace

$$e = \ln\left(\vartheta r / l\right)$$

  - e – skutečná true log. deformace
  - ϑ - úhel otočení
  - r – vzdálenost od středu
  - l – stloušťka vzorku



Pozitronový mikroskop

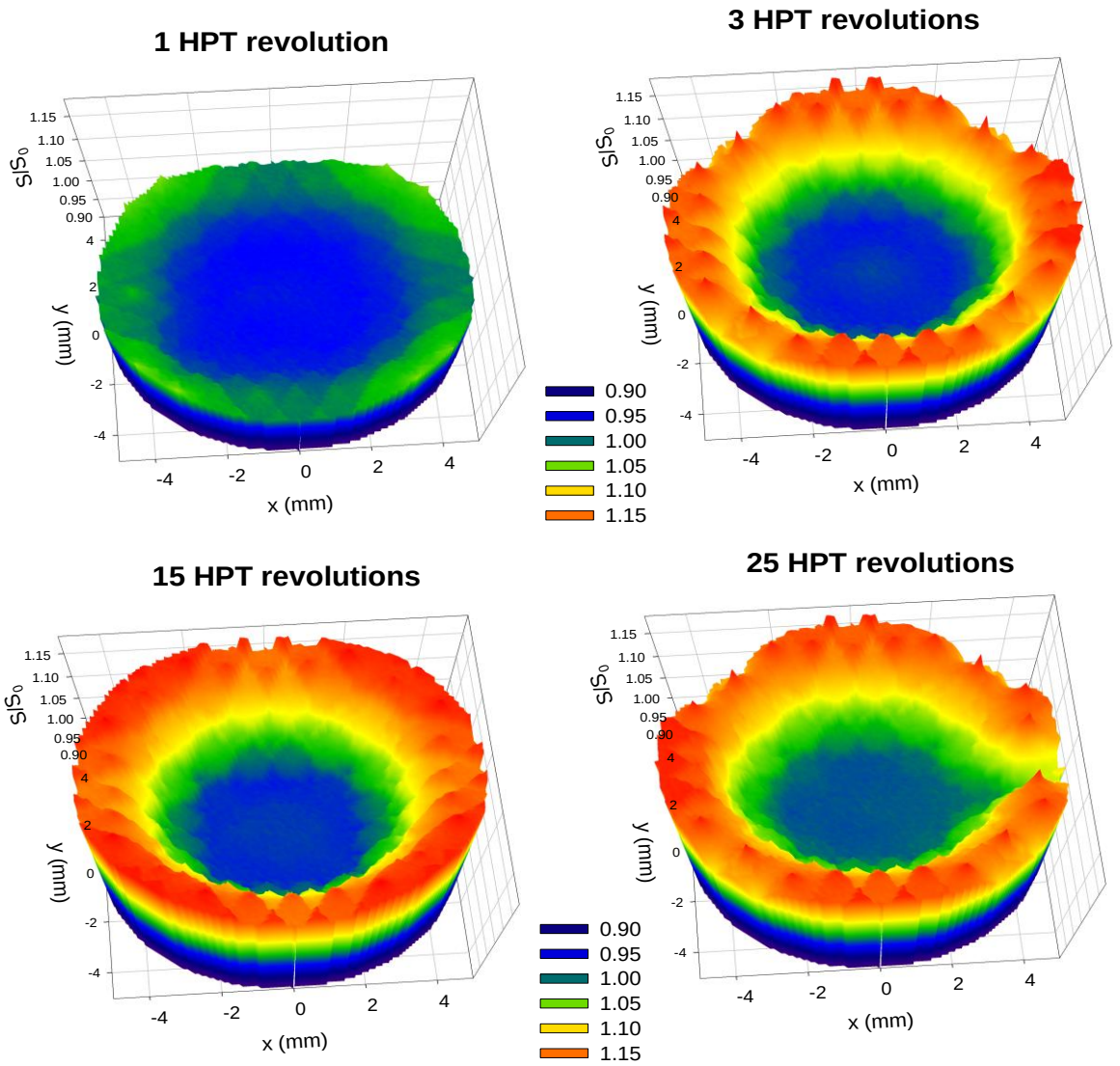
- nedestruktivní mapování rozložení defektů
- měření Dopplerovského rozšíření
- mapování pomocí *S*-parametru
- dislokace
- hranice zrn
- deformací-indukované vakance

- torzní deformace

$$e = \ln\left(\vartheta r / l\right)$$

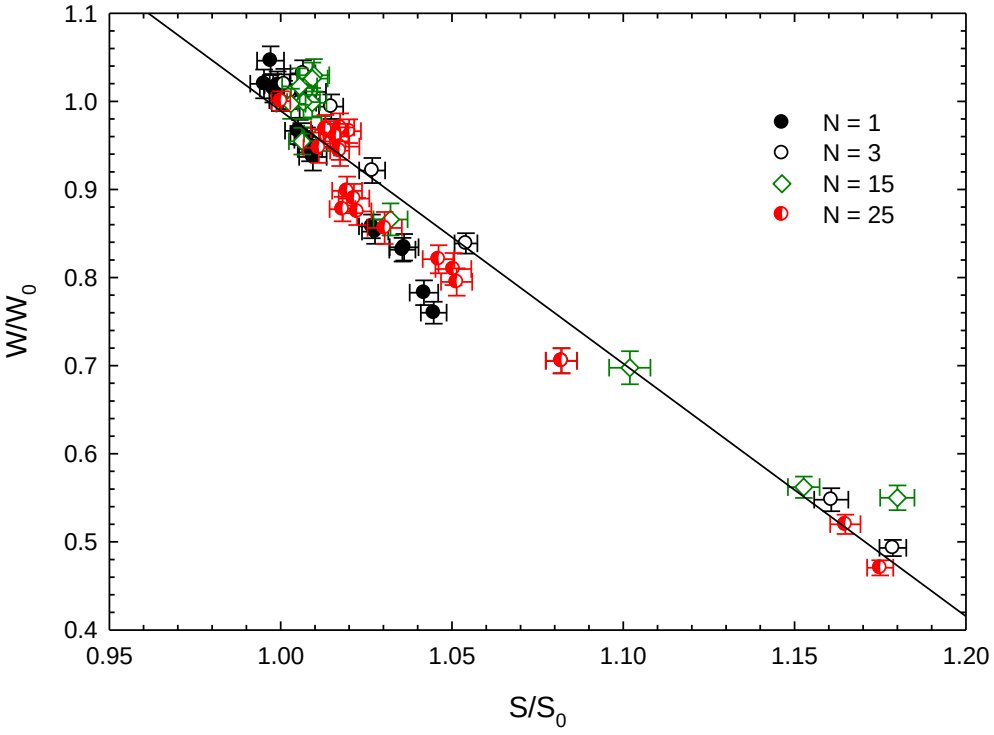
- e – skutečná true log. deformace
- ϑ - úhel otočení
- r – vzdálenost od středu
- l – stloušťka vzorku

Ultrajemnornná Cu HPT (p = 6 GPa)

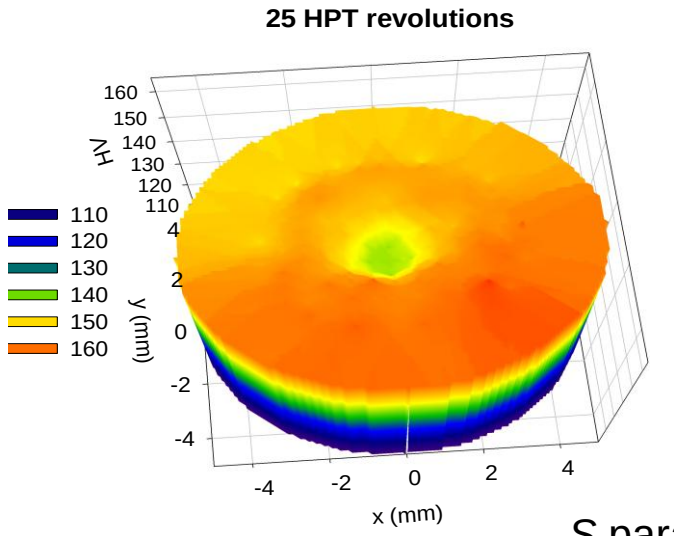


Pozitronový mikroskop

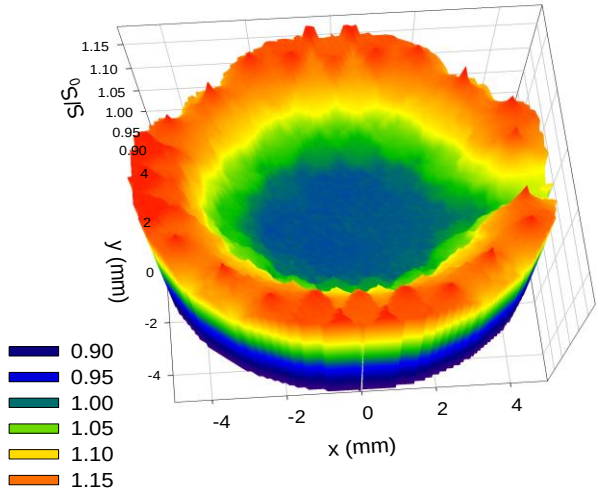
- **Ultrajemnornná Cu HPT (p = 6 GPa)**
- *S-W* plot



microhardness



S parameter



Pozitronový mikroskop

- pomalé pozitrony moderované ve svazku
- střední implantační hloubka pro $E \approx 1$ keV je $z_{mean} \approx 10$ nm
- protorové rozlišení limitováno diffůzní délkou termalizovaného pozitronu ≈ 100 nm
- mapování laterálního rozložení defektů + měření hloubkového profilu
- nedstruktivní 3D mapování rozložení defektů

Pozitronový mikroskop

• **jas (brightness) svazku pozitronů**

$$B = \frac{I}{\Omega_x \Omega_y}$$

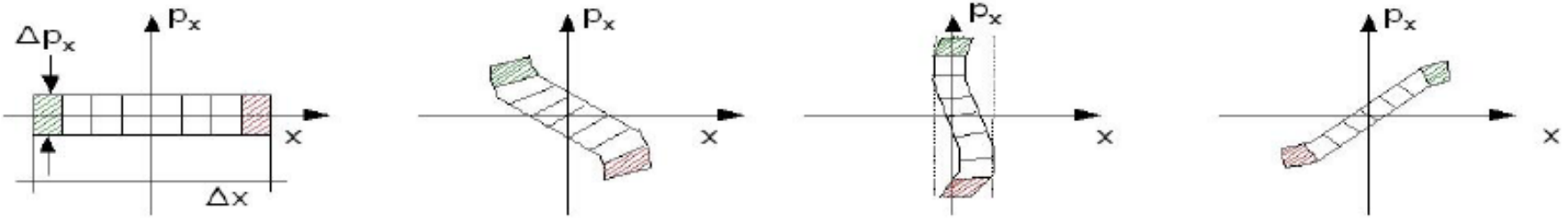
I – intenzita

• jas komerčně dostupných zdrojů e^+
10^{-19} – 10^{-16} krát jas typických zdrojů e^- !

• Liouvilleův teorém

$$\Delta x \, \Delta p_x = \Omega_x = \text{konst}$$

$$\Delta y \, \Delta p_y = \Omega_y = \text{konst}$$



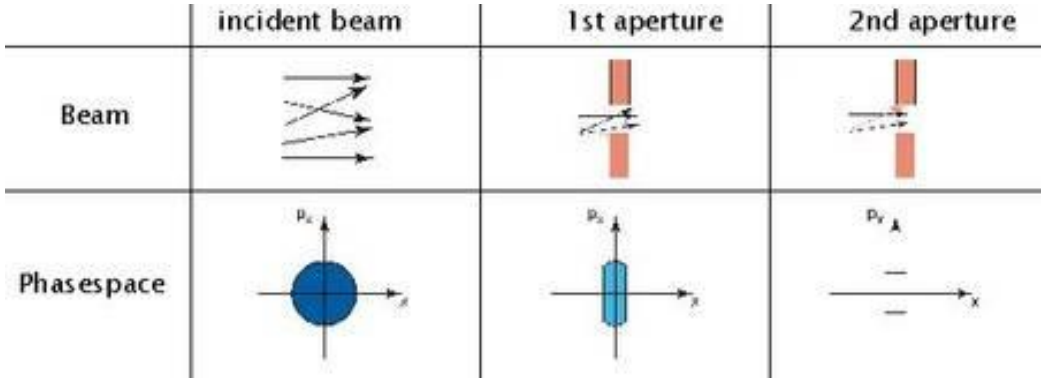
Kögel, EPOS meeting 2002

Pozitronový mikroskop

• **remoderace**

$$B = \frac{I}{\Omega_x \Omega_y}$$

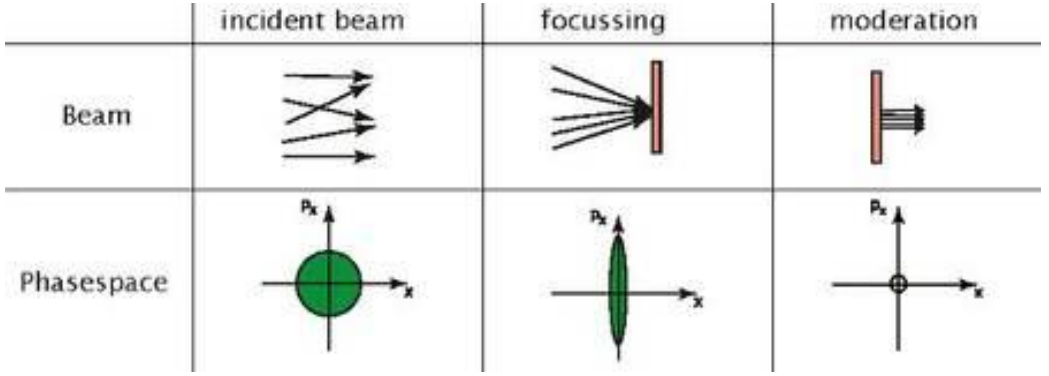
I – intenzita



• zvýšení jasu B

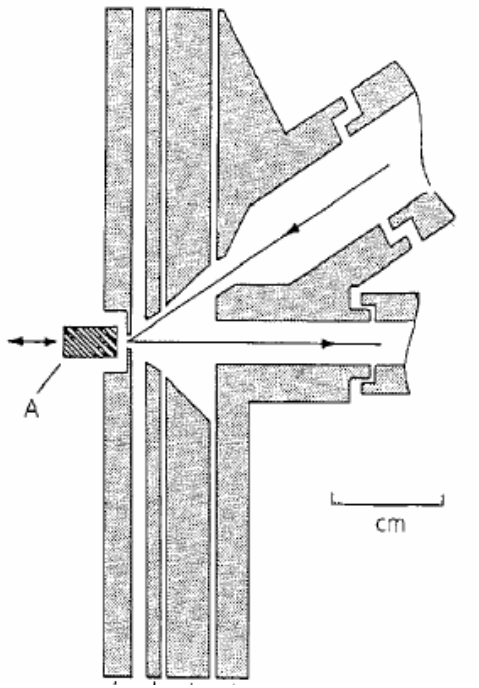
• tj. zmenšení objemu svazku ve fázovém prostoru

• ale nutně snížení intenzity

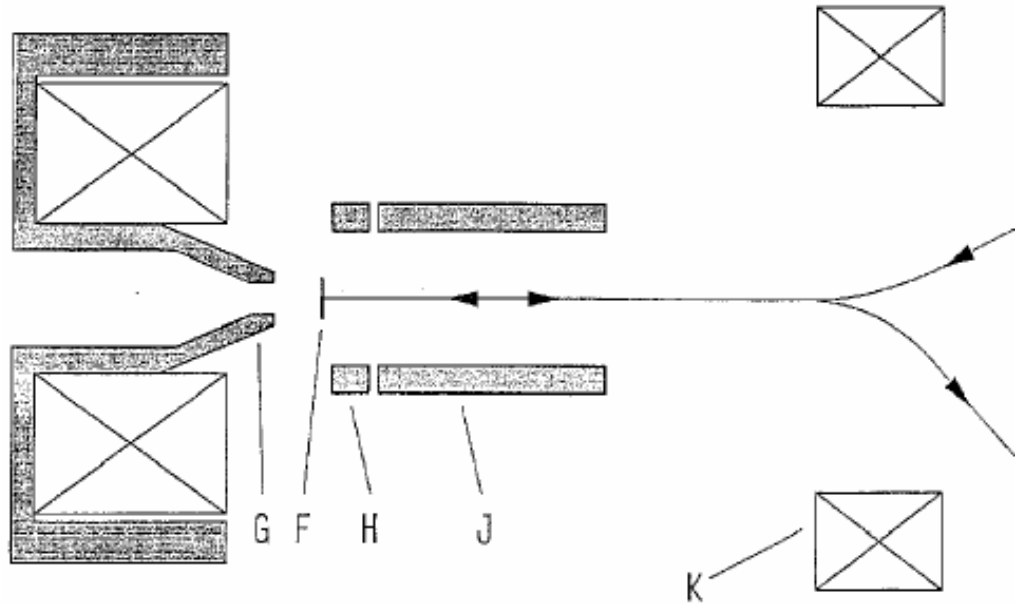


Pozitronový mikroskop

- **remoderace**
  - elektrostatický remoderátor
  - redukce velikosti svazku ≈ 10 ×



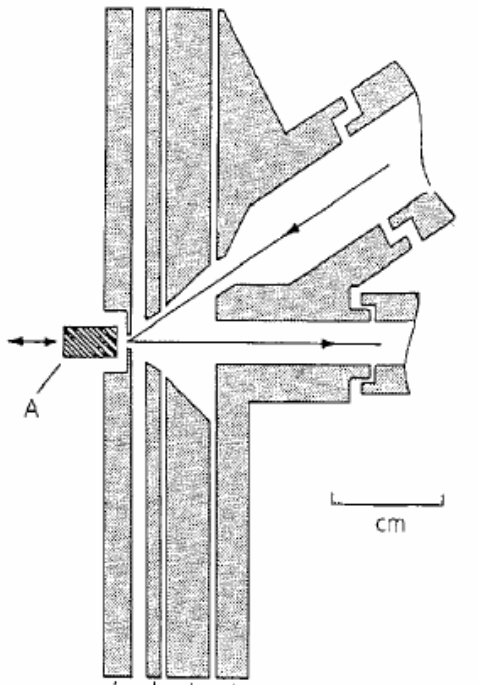
- remoderátor s magnetickou čočkou
- magentická separace primárního svazku a remoderovaných e^+
- redukce velikosti svazku ≈ 100 ×



Kögel, EPOS meeting 2002

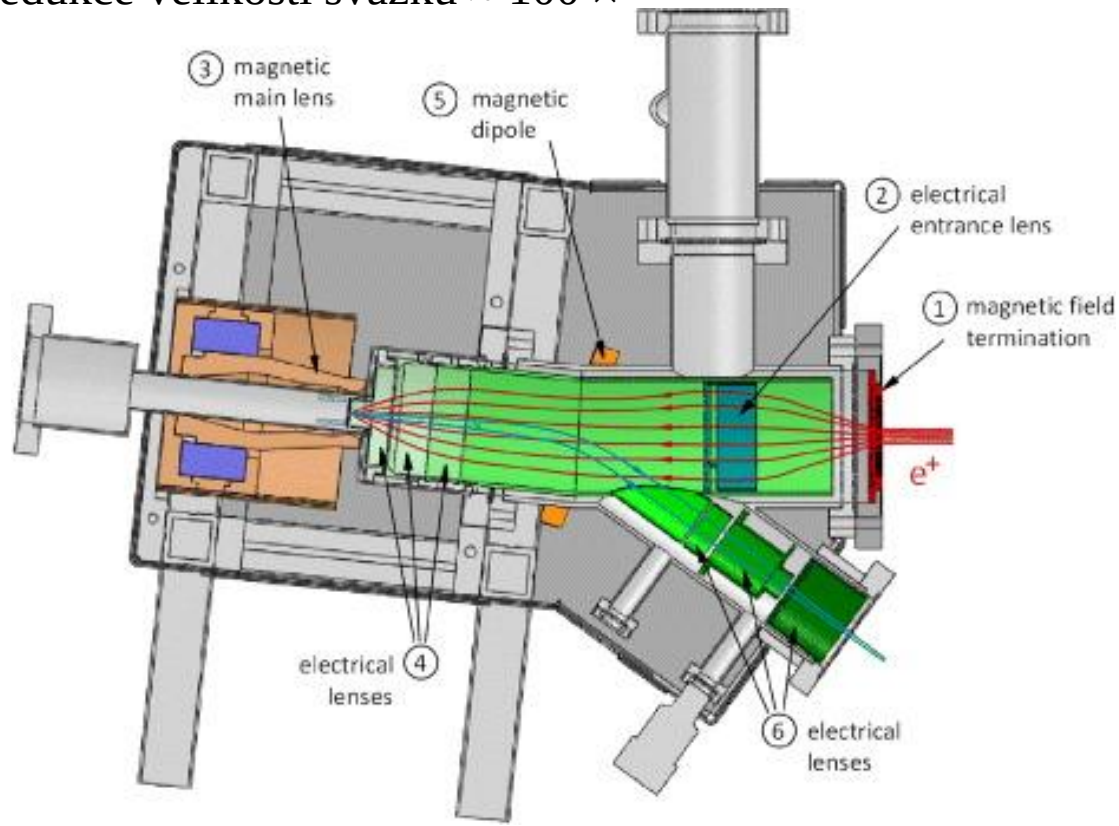
Pozitronový mikroskop

- **remoderace**
  - elektrostatický remoderátor
  - redukce velikosti svazku ≈ 10 ×



Kögel, EPOS meeting 2002

- remoderátor s magnetickou čočkou
- magentická separace primárního svazku a remoderovaných e^+
- redukce velikosti svazku ≈ 100 ×



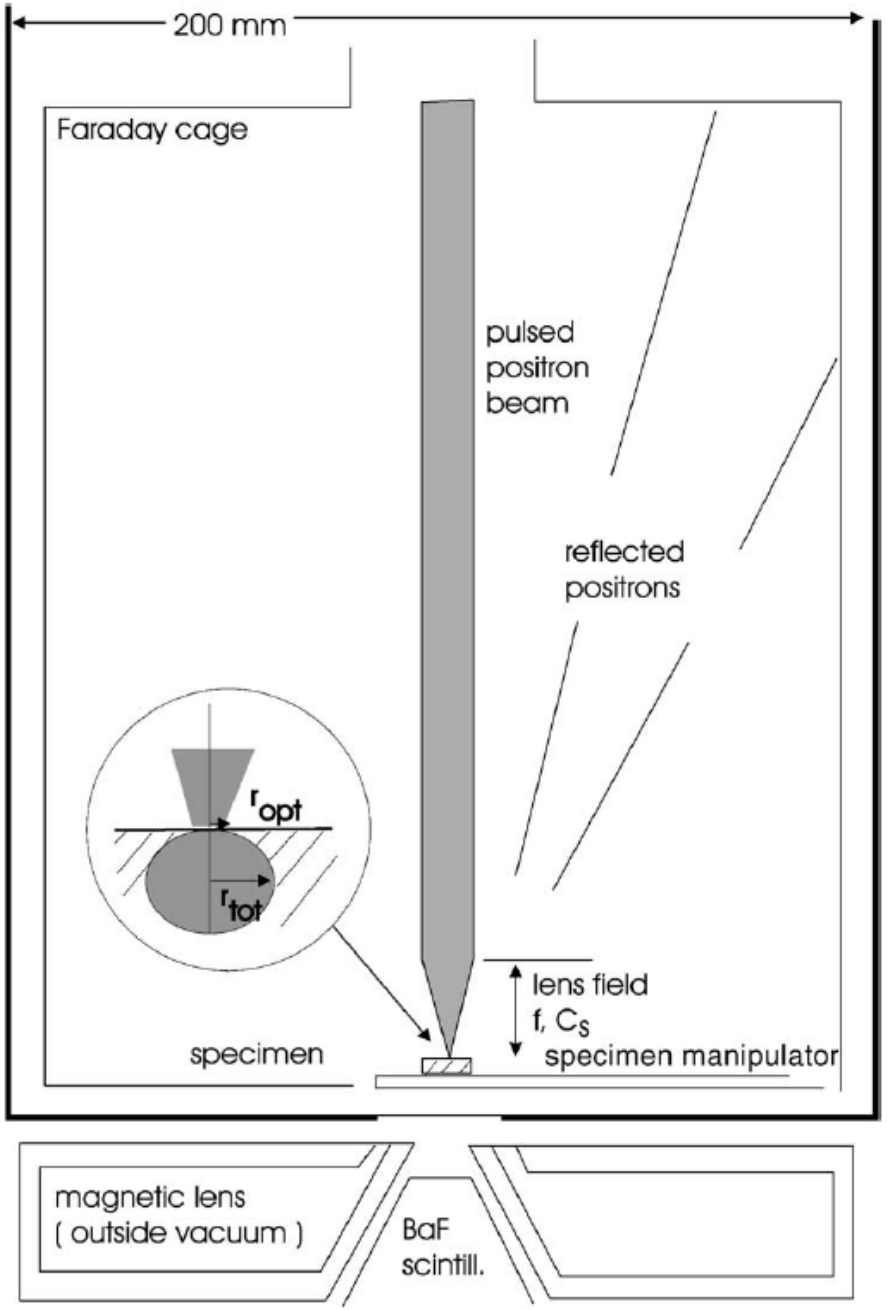
Pozitronový mikroskop

- **skenovací pozitronový mikroskop**
- TU Munich
- fokusovaný pulsovaný svazek
- pomalých e^+
- velikost fokusovaného svazku ≈ 2 μm

$$r_{opt} = \sqrt{\frac{f^2 \Delta E}{E} + \frac{C_S^2 R^6}{16 f^6}}$$

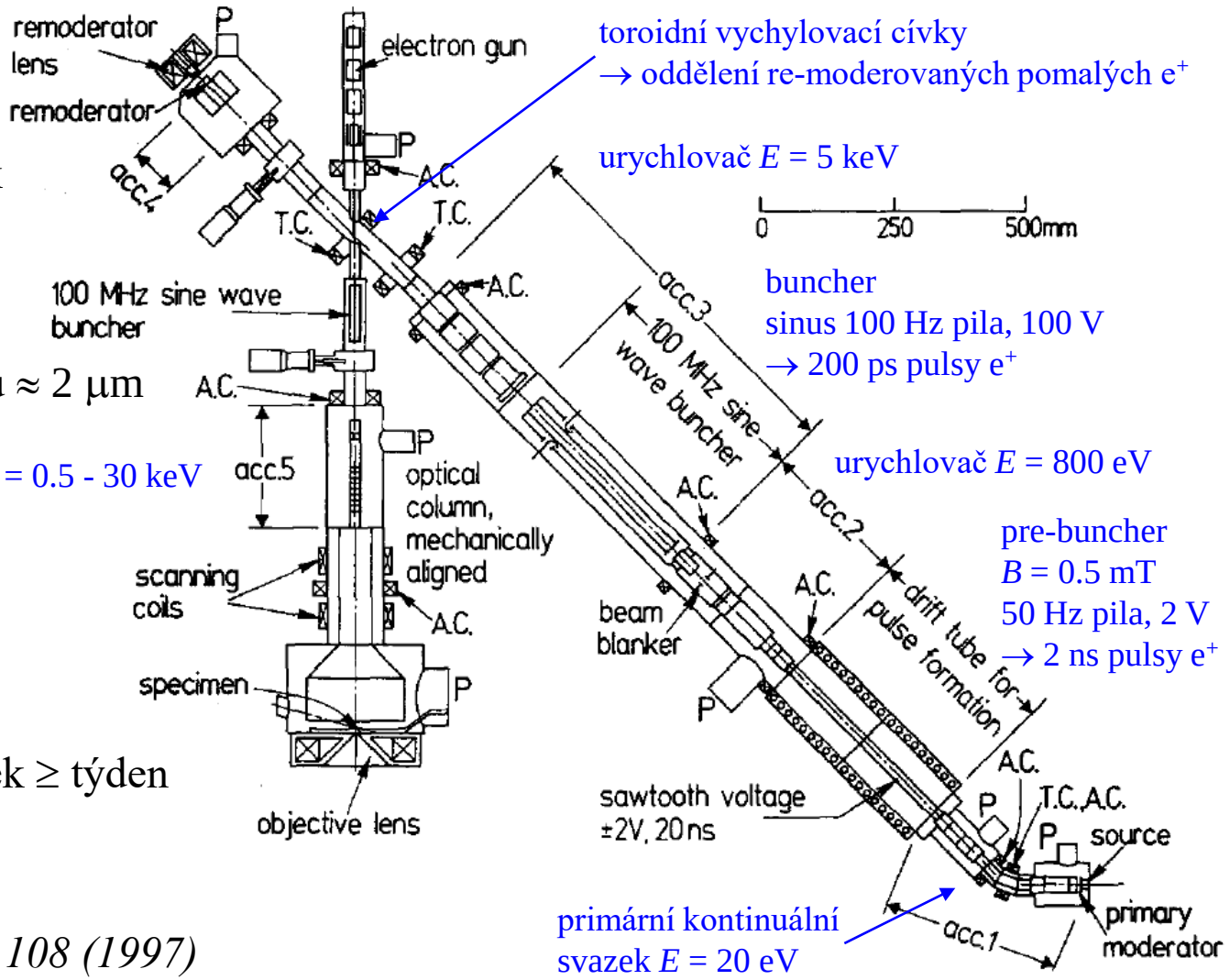
- ΔE – disperze energie e^+ v transverzálním směru
- f – ohnisková délka elektrostatické fokusační čočky
- C_S – sférická vada
- R – poloměr svazku

Kögel et al. Appl. Surf. Sci. 116, 108 (1997)



Pozitronový mikroskop

- **skenovací pozitronový mikroskop**
- TU Munich
- fokusovaný pulsovaný svazek
- pomalých e^+
- velikost fokusovaného svazku ≈ 2 μm
- časové rozlišení ≈ 250 ps
- četnost koincidencí ≈ 500 s^{-1}
- čas potřebný pro jeden obrázek ≥ týden

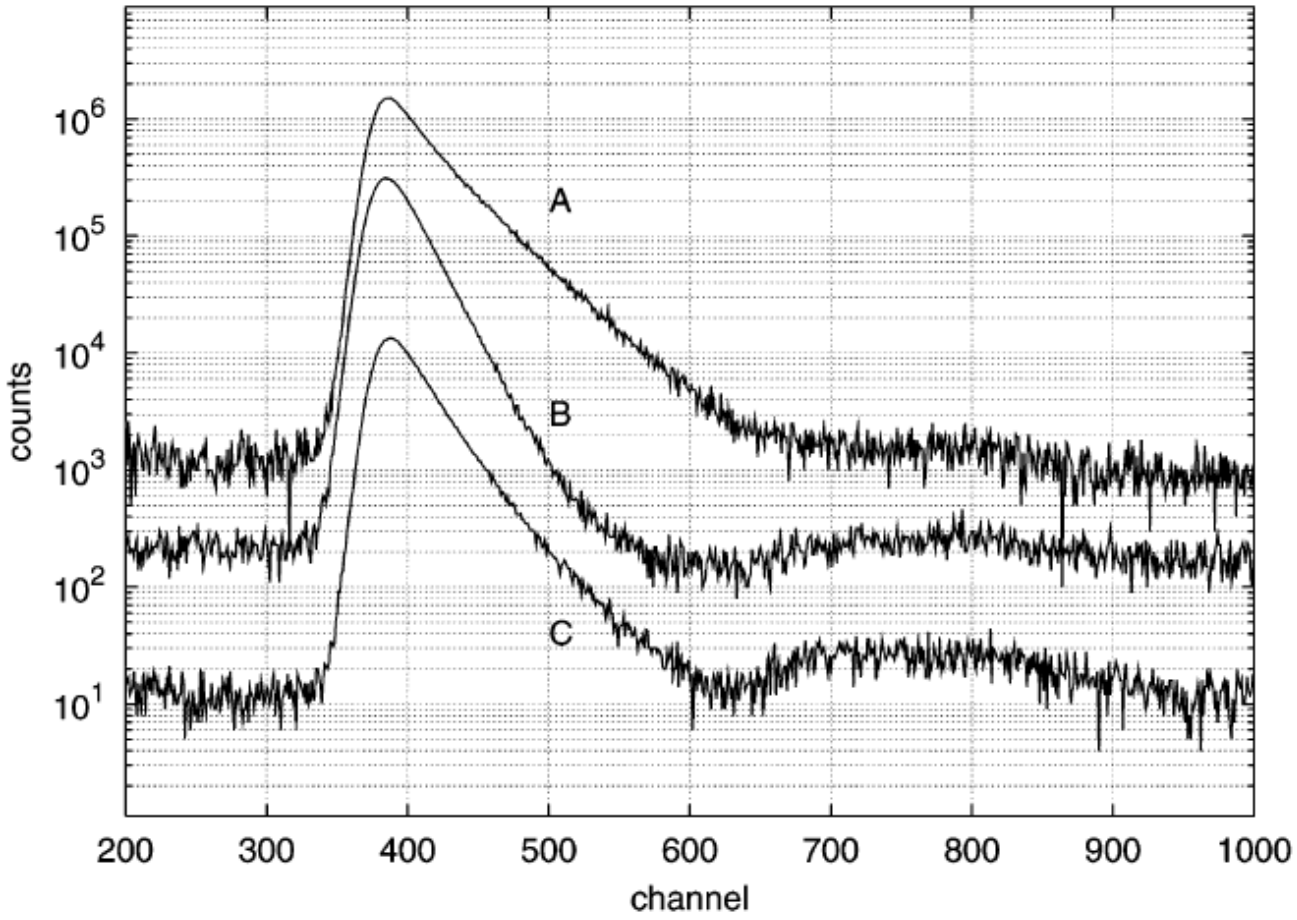


Kögel et al. Appl. Surf. Sci. 116, 108 (1997)

Pozitronový mikroskop

- **skenovací pozitronový mikroskop**
- TU Munich
- fokusovaný pulsovaný svazek
- pomalých e^+
- časové rozlišení ≈ 250 ps

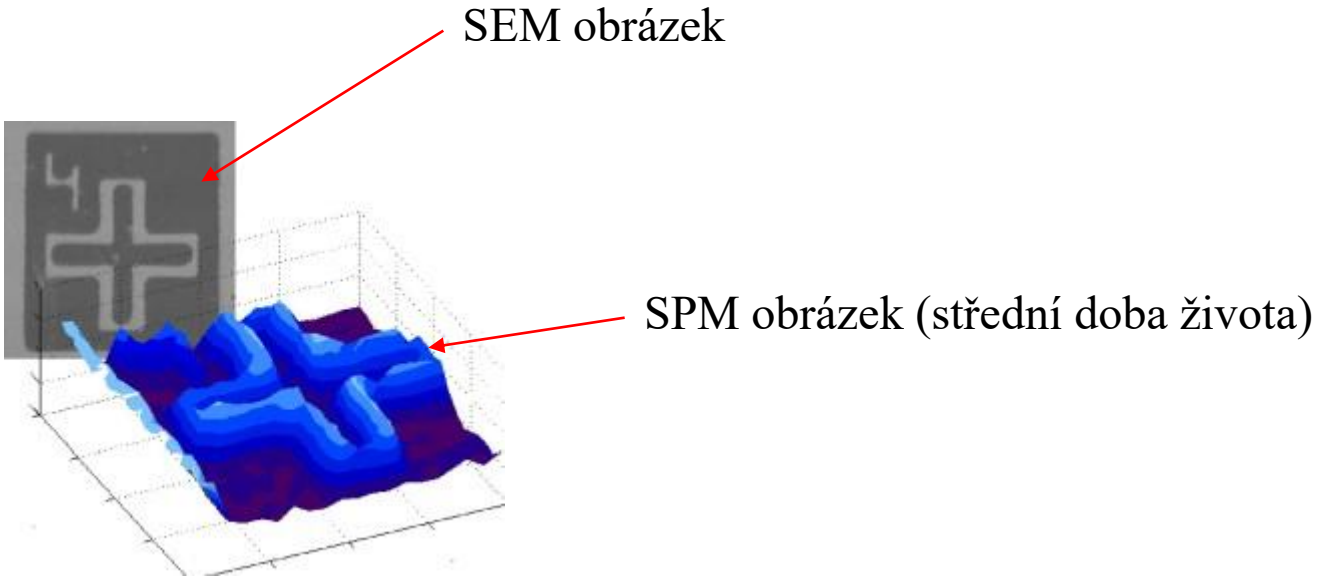
příklad spekter dob života e^+ měřených na SPM, E = 8 keV



Kögel et al. Appl. Surf. Sci. 116, 108 (1997)

Pozitronový mikroskop

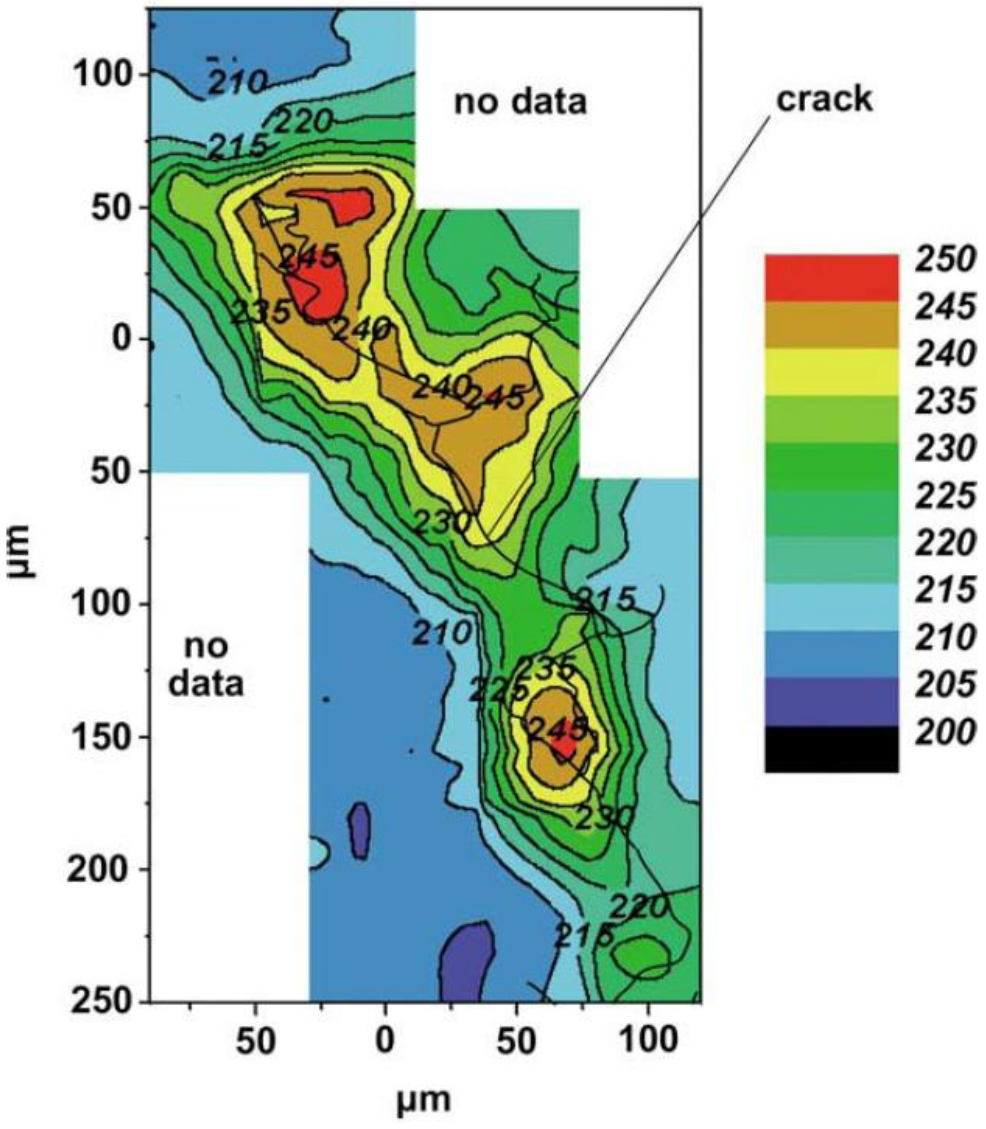
- **skenovací pozitronový mikroskop**
- TU Munich
- prostorové rozlišení ≈ 2 μm
- Si substrát s vyleptaným obrazcem



David et al. Phys. Rev. Lett. 87, 067402 (2001)

Pozitronový mikroskop

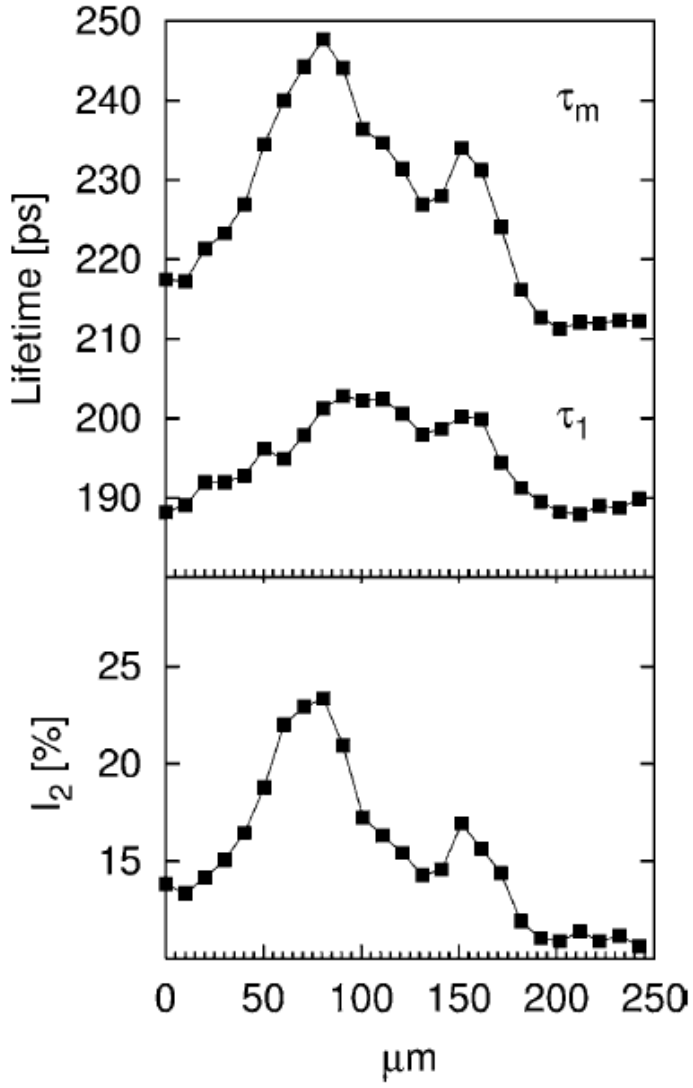
- **skenovací pozitronový mikroskop**
- TU Munich
- prostorové rozlišení ≈ 2 μm
- mechanicky namáhaná Cu
- mapování pomocí střední doby života e^+
- E = 16 keV



Egger et al. Appl. Surf. Sci. 194, 214 (2002)

Pozitronový mikroskop

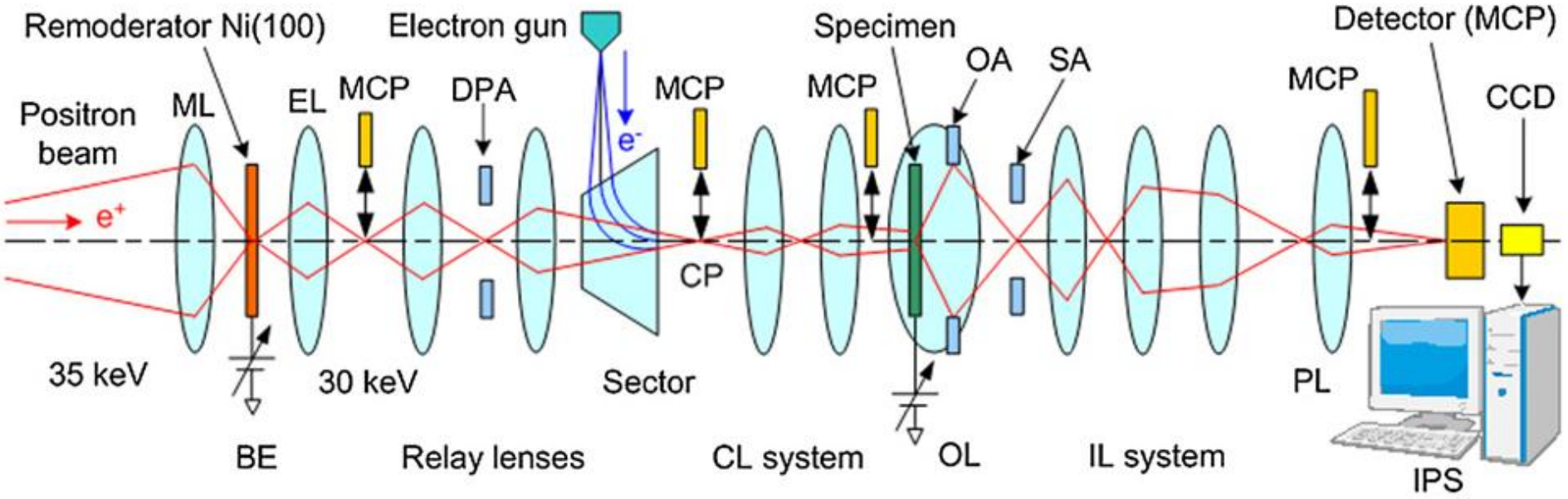
- **skenovací pozitronový mikroskop**
- TU Munich
- prostorové rozlišení ≈ 2 μm
- mechanicky namáhaná Cu
- lineární sken kolmo na crack
- E = 16 keV
- dvou-komponentní rozklad, τ_2 fixováno na 400 ps



Egger et al. Appl. Surf. Sci. 194, 214 (2002)

Pozitronový mikroskop

- **transmisní pozitronový mikroskop**
- KEK Tsukuba
- pozironový zdroj: LINAC



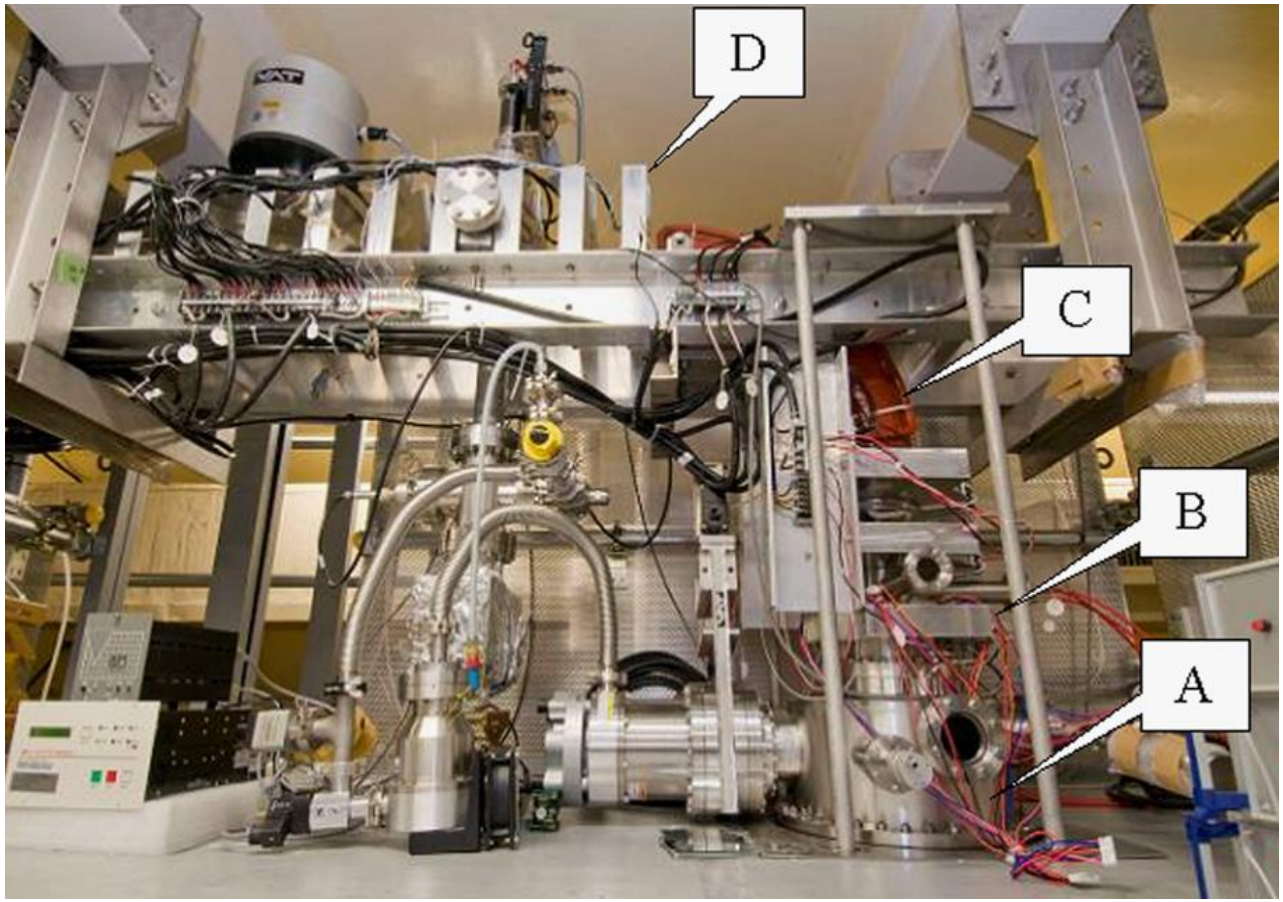
Matsua et al. Nucl. Insr. Meth. A 645, 102 (2011)

Pozitronový mikroskop

• **transmisní pozitronový mikroskop** remoderator (brightness enhancer)

• KEK Tsukuba

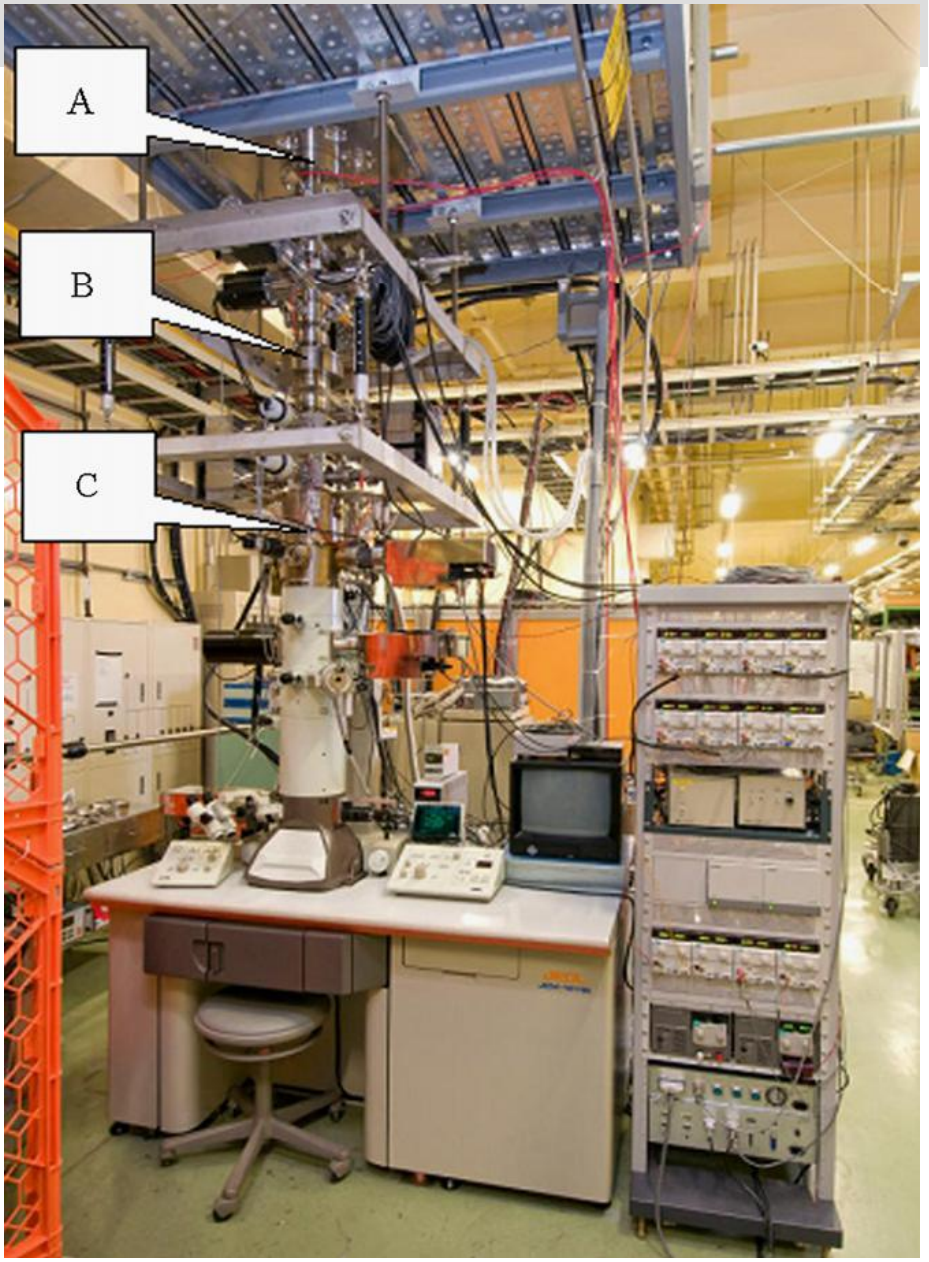
• pozironový zdroj: LINAC



Matsua et al. Nucl. Insr. Meth. A 645, 102 (2011)

Pozitronový mikroskop

- **transmisní pozitronový mikroskop**
- KEK Tsukuba
- pozironový zdroj: LINAC

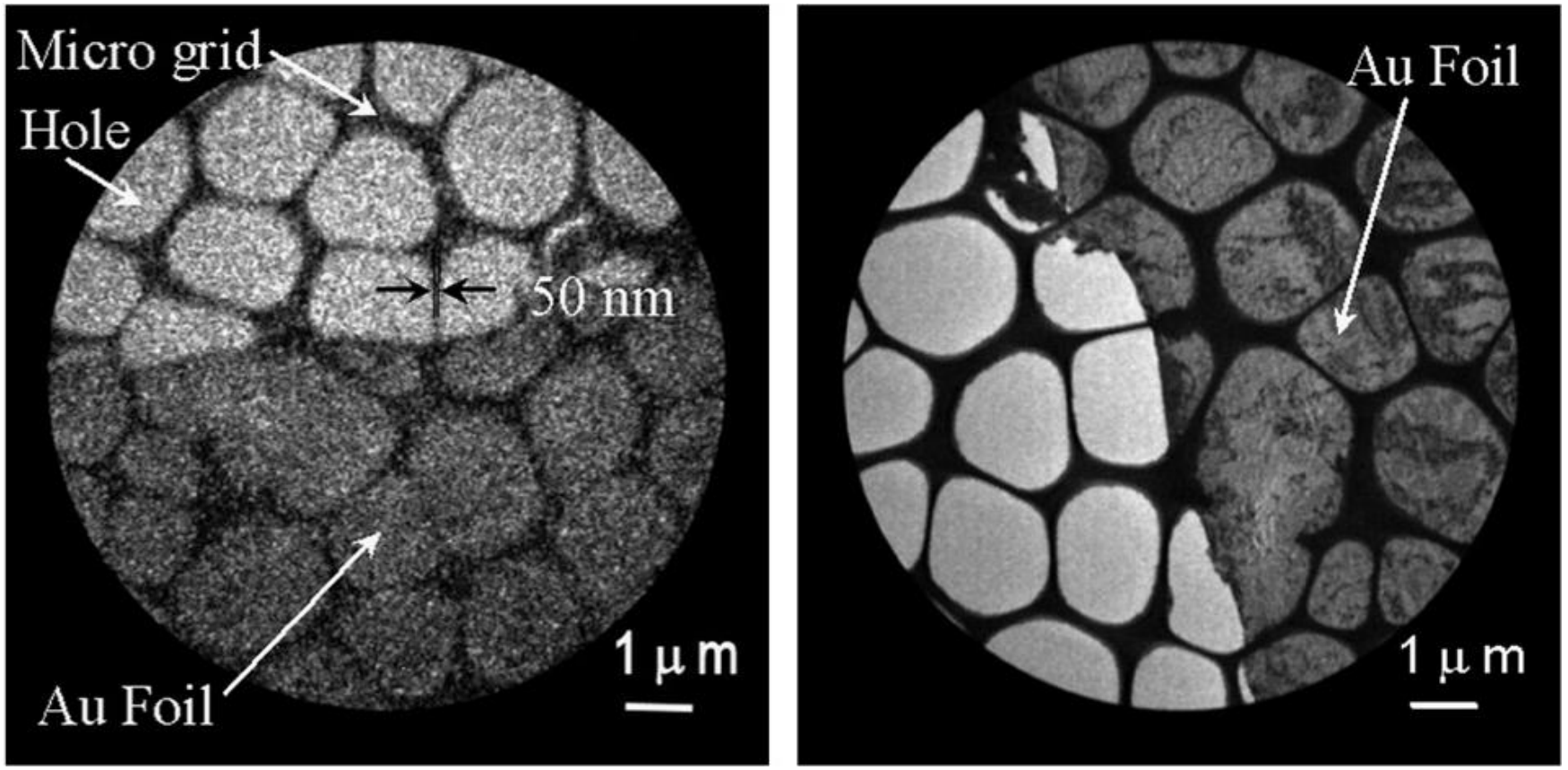


Matsua et al. Nucl. Insr. Meth. A 645, 102 (2011)

Pozitronový mikroskop

- **transmisní pozitronový mikroskop**
- 10 nm Au (100) fólie na mikro mřížce

pozitrony **elektrony**

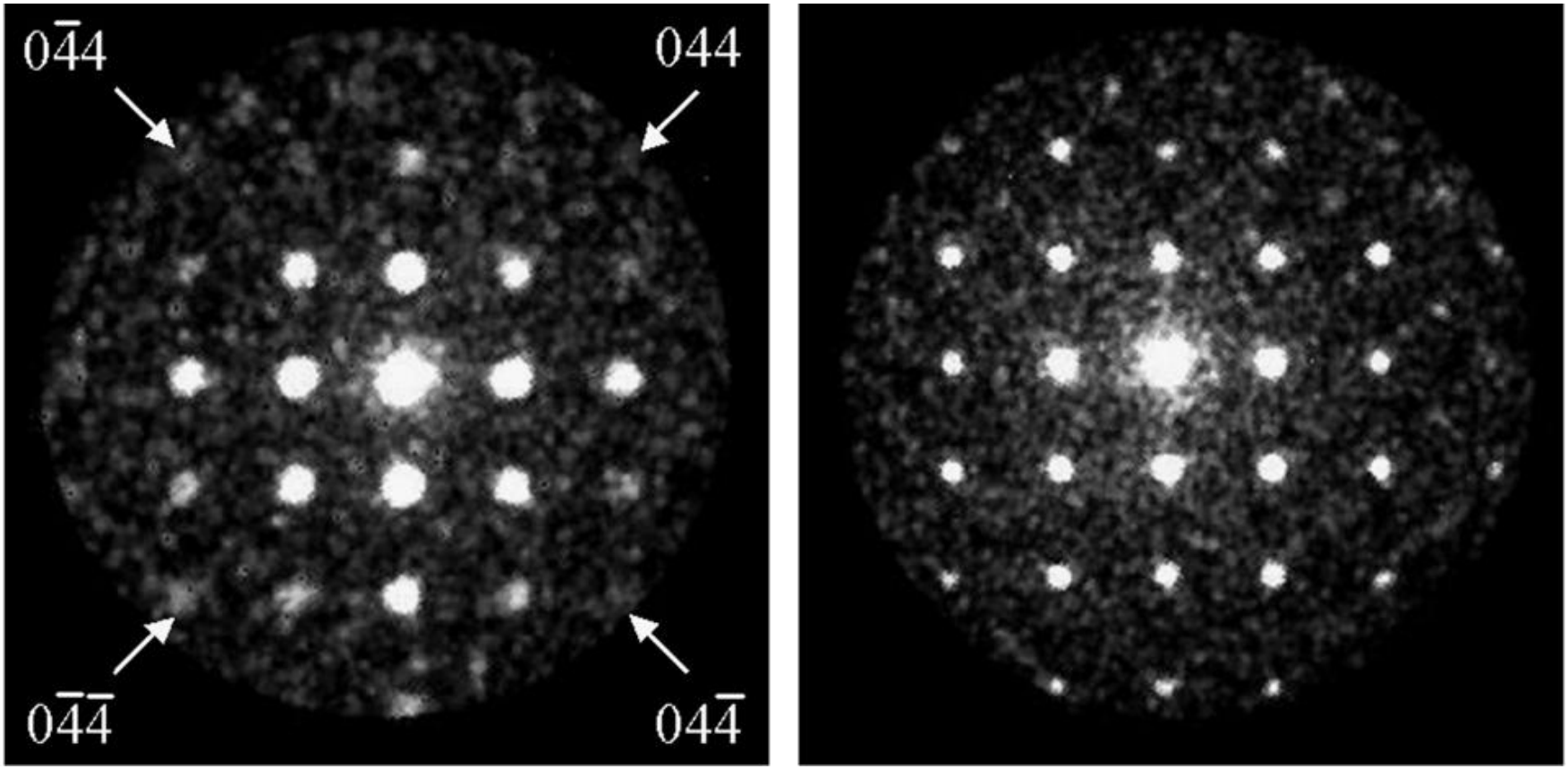


Matsua et al. Nucl. Insr. Meth. A 645, 102 (2011)

Pozitronový mikroskop

- **transmisní pozitronový mikroskop**
- 10 nm Au (100) fólie na mikro mřížce - difrakce

pozitrony **elektrony**

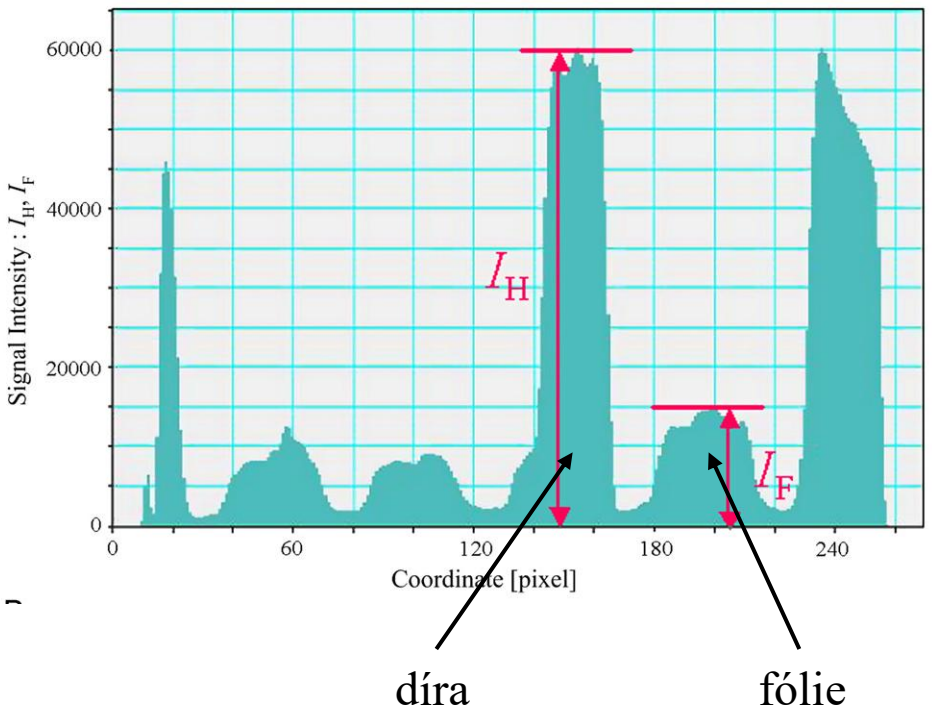


Matsua et al. Nucl. Insr. Meth. A 645, 102 (2011)

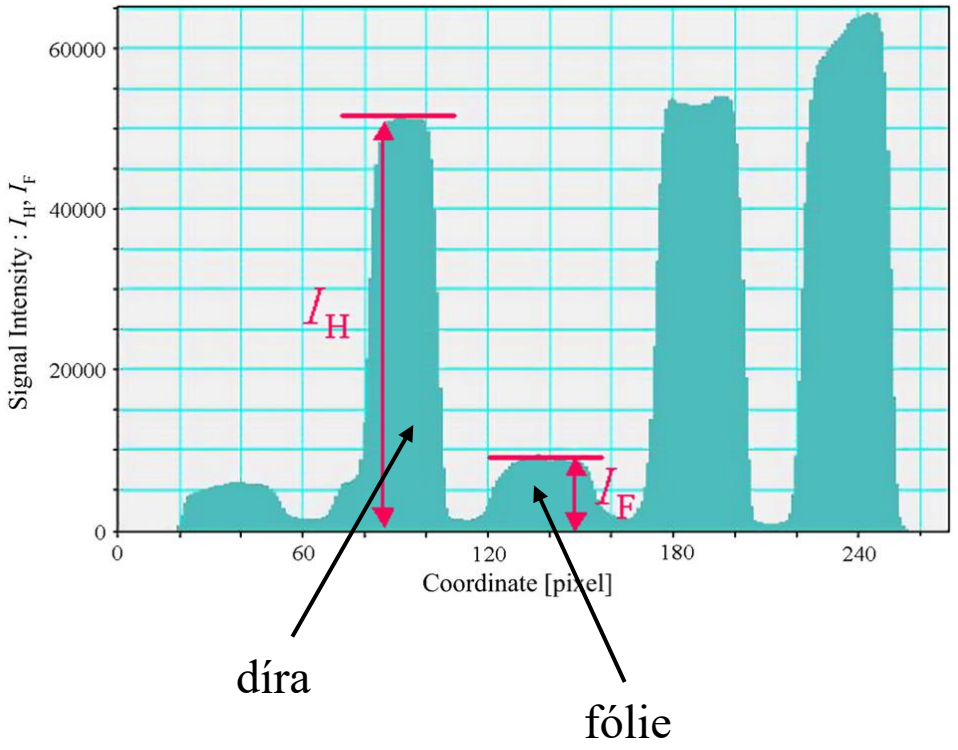
Pozitronový mikroskop

- **transmisní pozitronový mikroskop**
- 35 nm Al fólie na Cu mikro mřížce - transmitance

pozitrony



elektrony



Matsua et al. Nucl. Insr. Meth. A 645, 102 (2011)