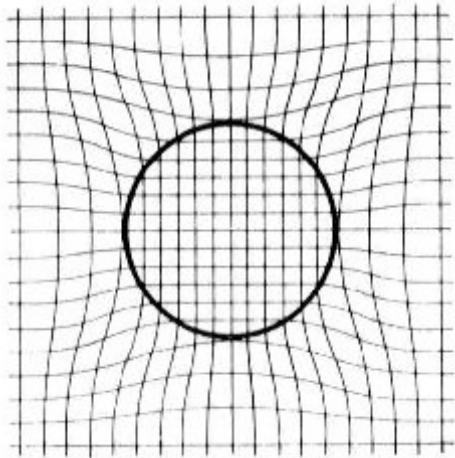
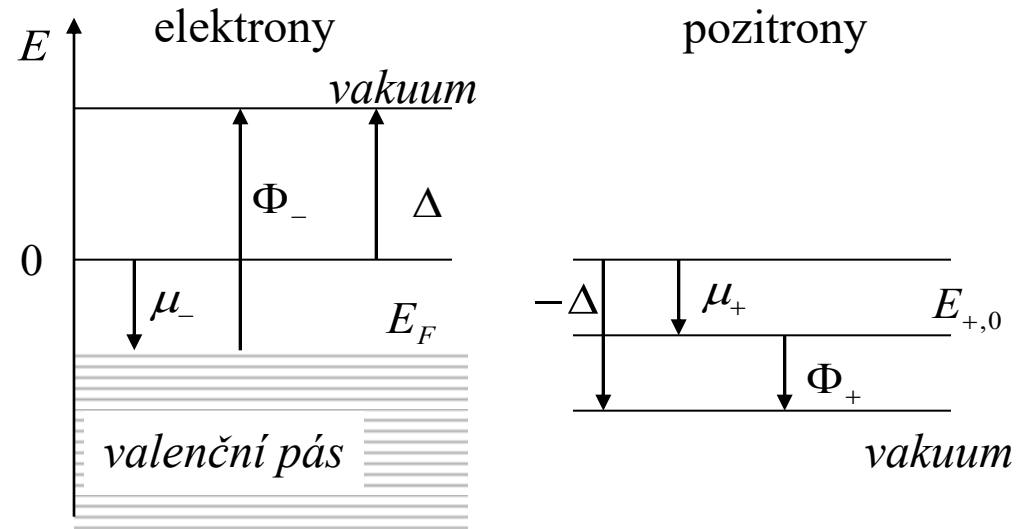


Záchyt pozitronů v precipitátech

koherentní precipitát



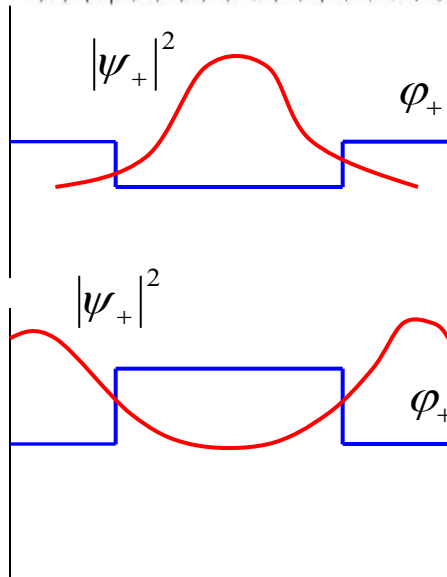
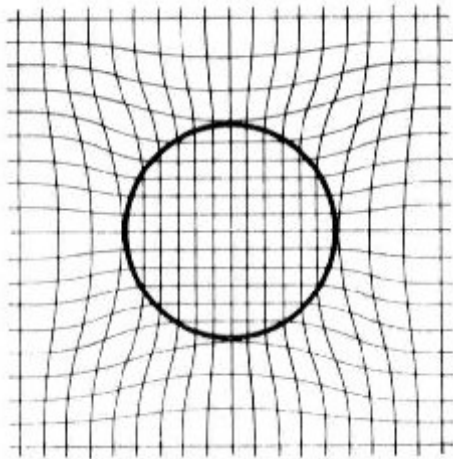
materiál ve vakuu



- výstupní práce: $\Phi_- = \Delta - \mu_-$
 $\Phi_+ = -\Delta - \mu_+$
- povrchový potenciál: Δ
- chemický potenciál: μ_- , μ_+

Záchyt pozitronů v precipitátech

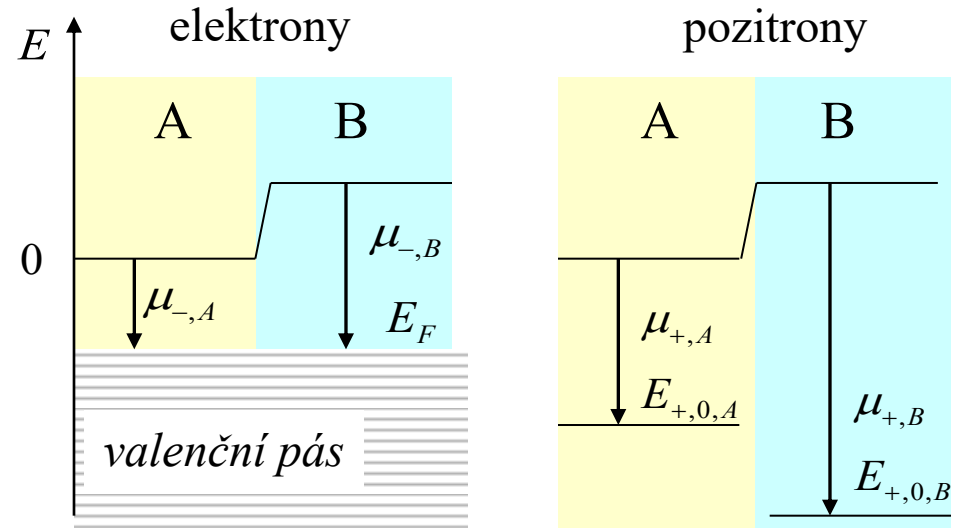
koherentní precipitát



$$A_{+,p} < A_{+,m}$$

$$A_{+,p} > A_{+,m}$$

dva materiály A a B v kontaktu



- rozdíl energií základního stavu e^+

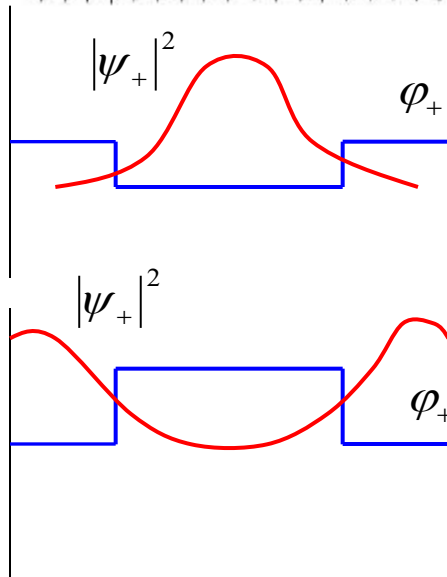
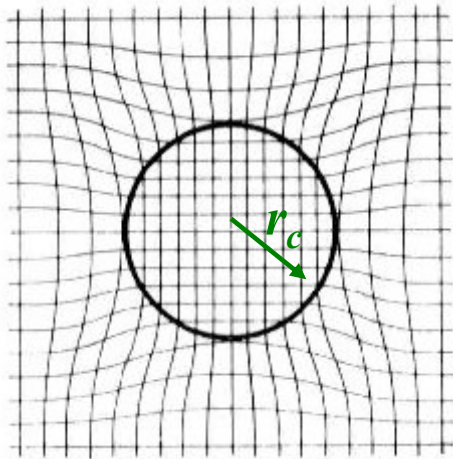
$$\Delta E_{+,A,B} = \mu_{-,A} - \mu_{-,B} + \mu_{+,A} - \mu_{+,B}$$

- afinita pozitronu: $A_+ = \mu_- + \mu_+$

$$\Delta E_{+,A,B} = A_{+,A} - A_{+,B}$$

Záchyt pozitronů v precipitátech

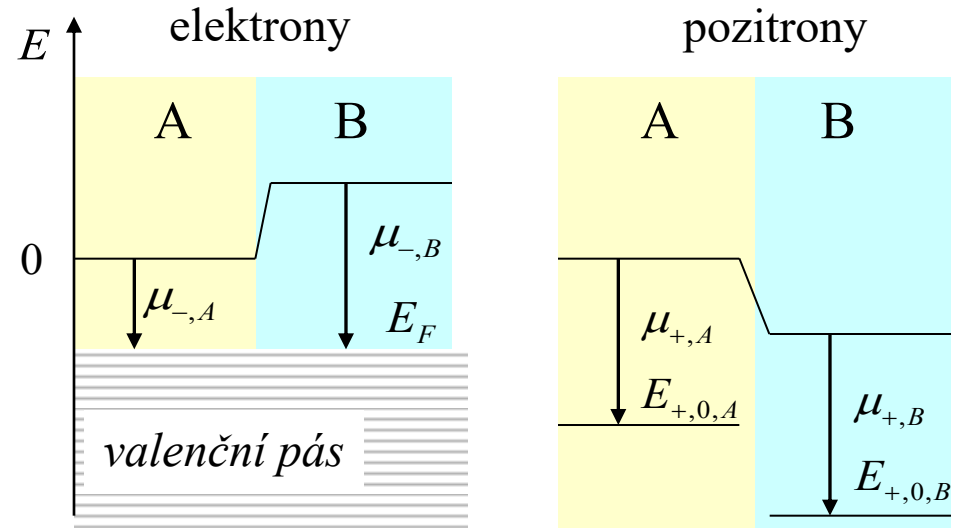
koherentní precipitát



$$A_{+,p} < A_{+,m}$$

$$A_{+,p} > A_{+,m}$$

dva materiály A a B v kontaktu

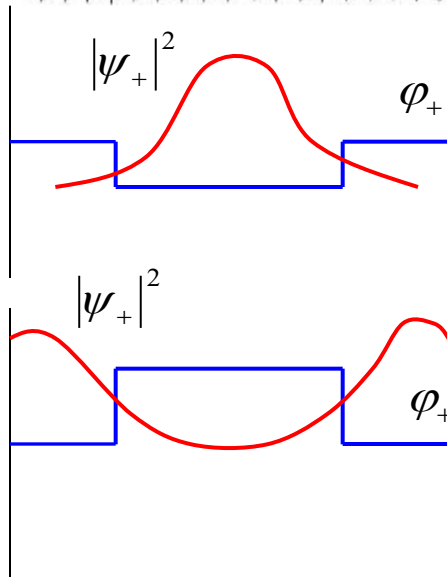
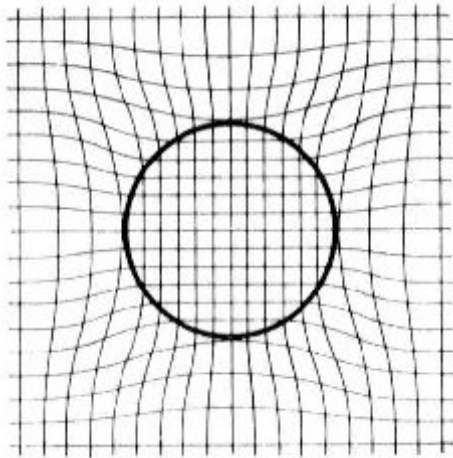


- minimální poloměr precipitátu

$$r_c [\text{nm}] = 0.31 / \sqrt{\Delta A [\text{eV}]}$$

Záchyt pozitronů v precipitátech

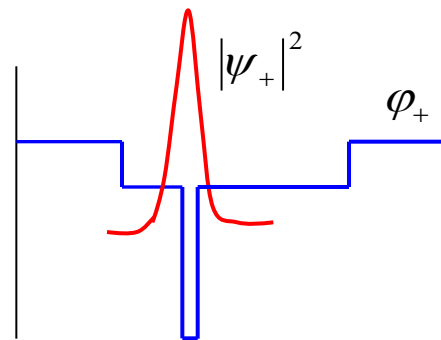
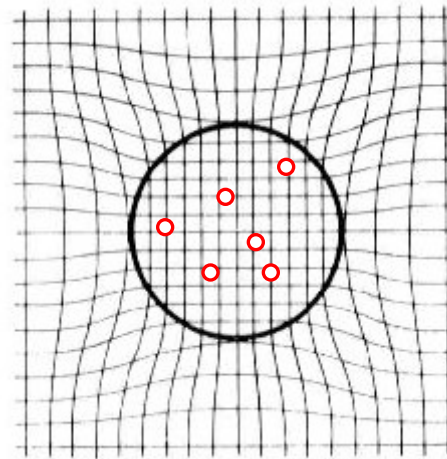
koherentní precipitát



$$A_{+,p} < A_{+,m}$$

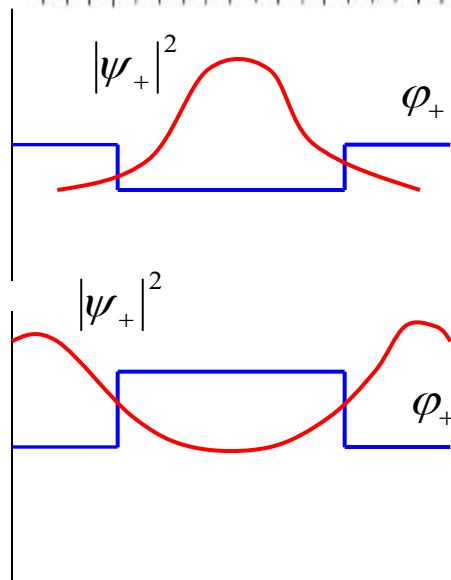
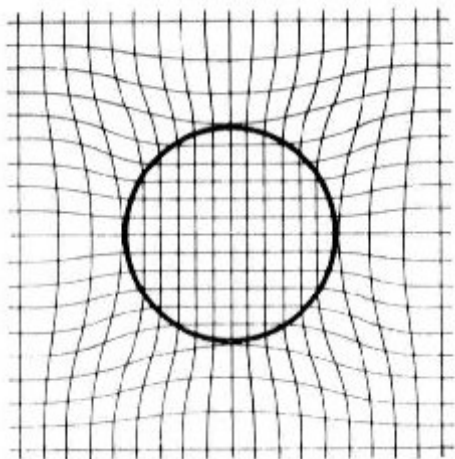
$$A_{+,p} > A_{+,m}$$

koherentní precipitát s defekty



Záchyt pozitronů v precipitátech

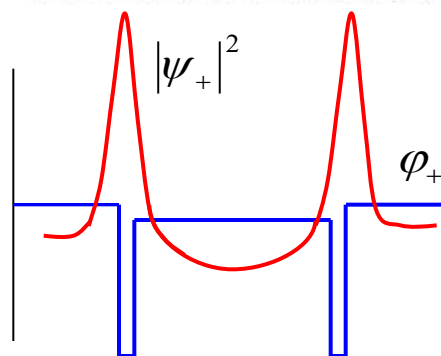
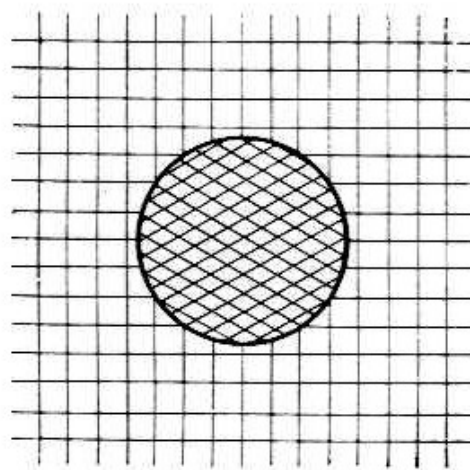
koherentní precipitát



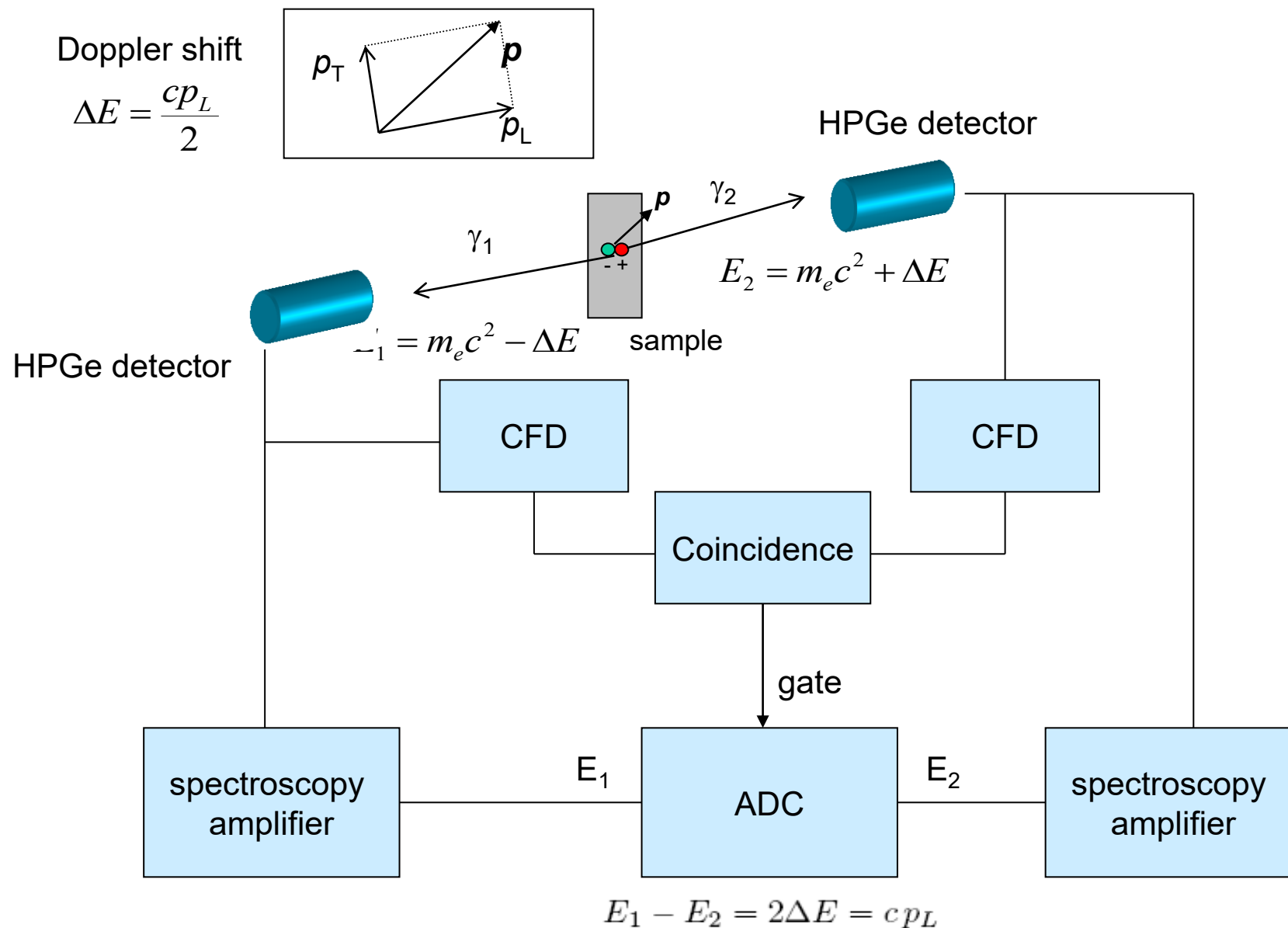
$$A_{+,p} < A_{+,m}$$

$$A_{+,p} > A_{+,m}$$

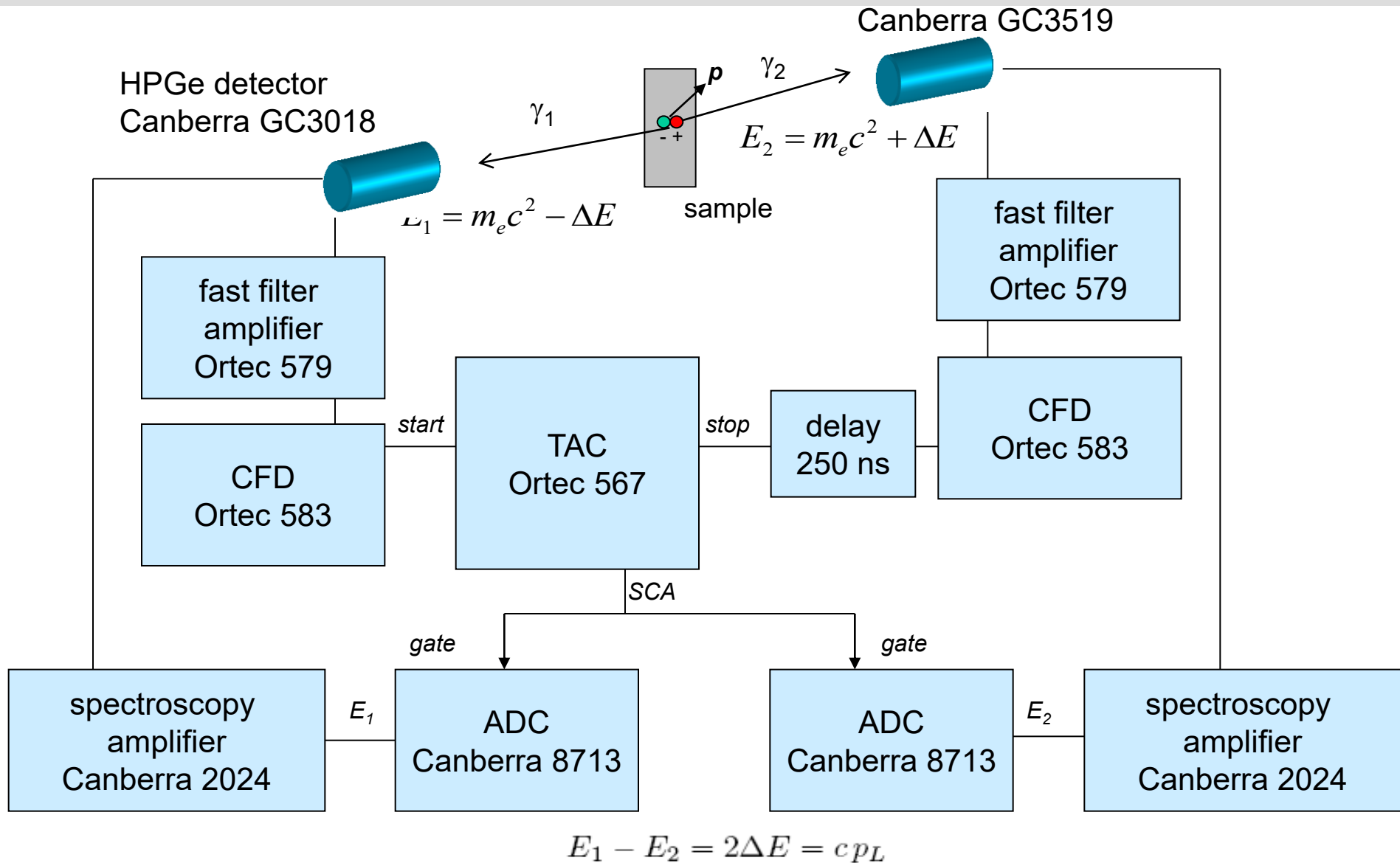
nekoherentní precipitát



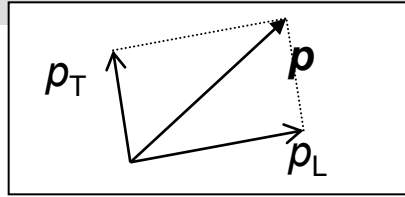
Koincidenční měření Dopplerovského rozšíření (CDB)



Koincidenční měření Dopplerovského rozšíření (CDB)



Digitální CDB spektrometr

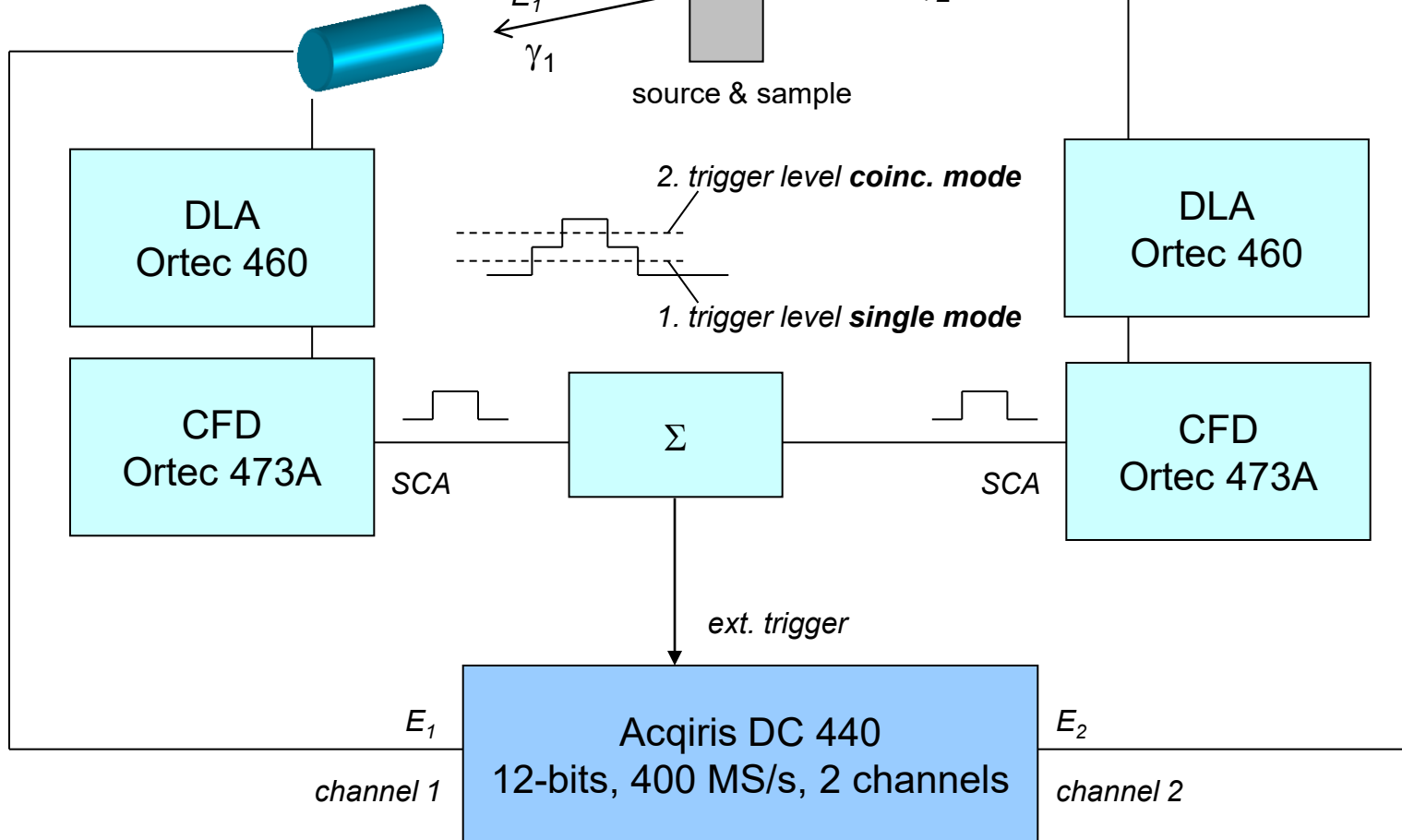
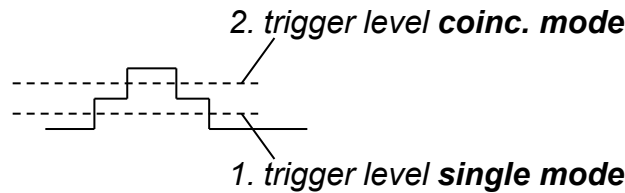
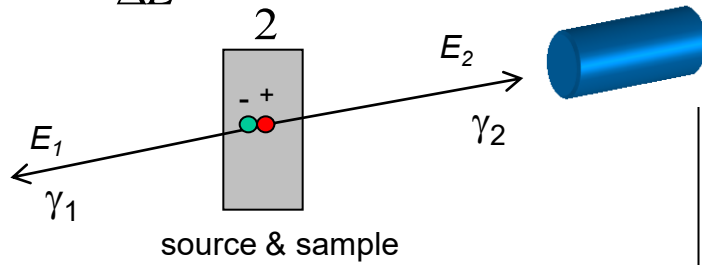


HPGe, detector 1
Canberra GC3519

$$E_{1,2} = m_e c^2 \pm \Delta E$$

$$\Delta E = \frac{cp_L}{2}$$

HPGe, detector 2
Canberra GC3018



Digitální CDB spektrometr – analýza dat

- modelová funkce (jednoduchý případ “čistého pulsu”)

$$f(t) = f_{main}(t - t_0) + b c g$$

- hlavní puls

$$f_{main}(t) = \left[\frac{1}{\beta_2 \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{t^2}{2\beta_2^2}\right) \right] * [\beta_0 H_s(t - t_0) \exp(-\beta_1(t - t_0))]$$

- parametry

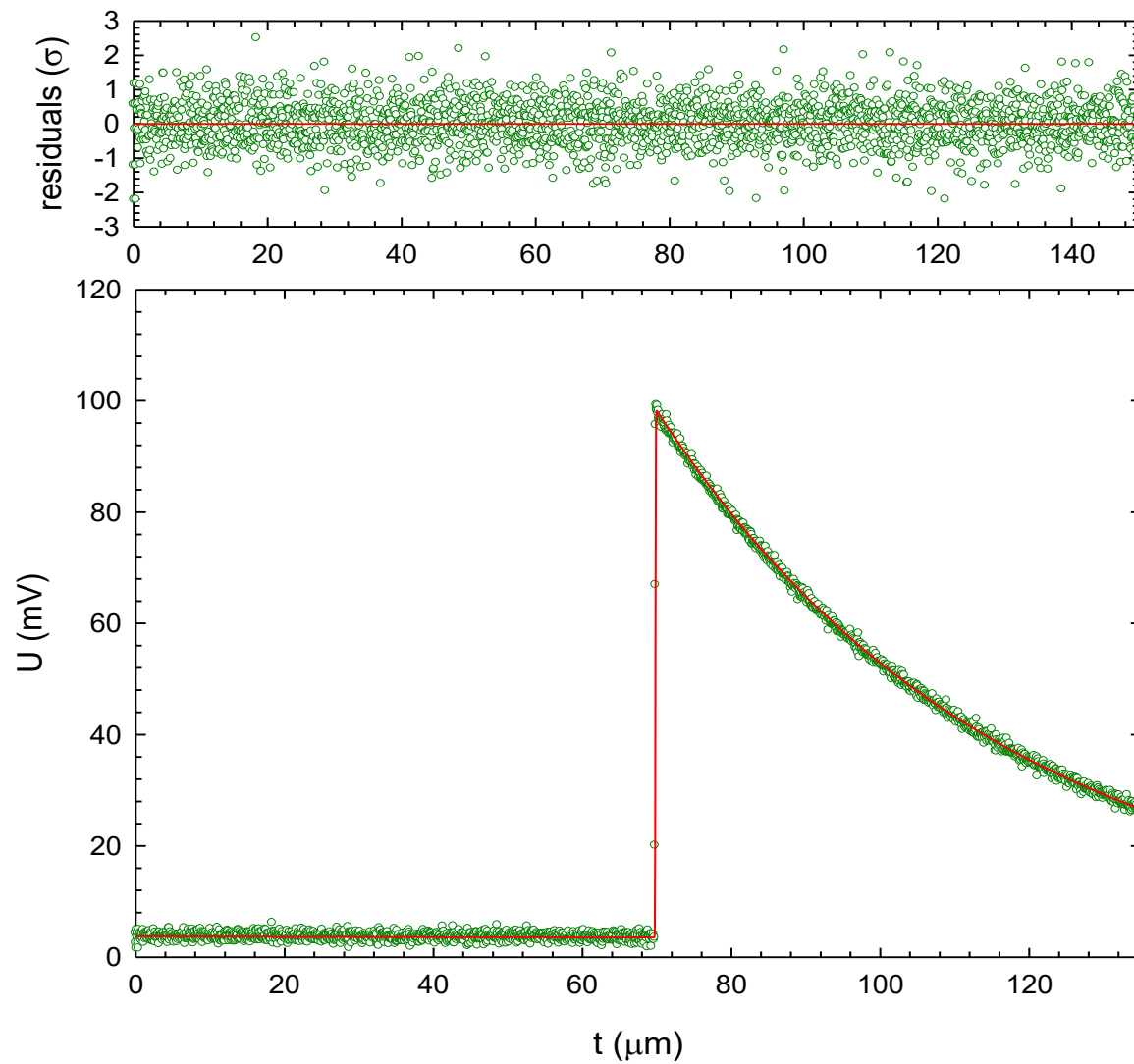
β_0 - amplituda pulsu (přímo úměrná energii detekovaného γ -záření)

t_0 - poloha pulsu

β_1 - rozpadová konstanta pulsu

β_2 - standardní odchylka Gaussiánu, který započítává vliv konečného energetického rozlišení HPGe detektoru

Digitální CDB spektrometr – analýza dat



puls bez pile-upu

Digitální CDB spektrometr – analýza dat

- modelová funkce (obecnější případ – **puls s pile-upem**)

$$f(t) = f_{main}(t - t_0) + f_{pile-up}(t - t_1) + f_{prec}(t) + bcg$$

hlavní puls pile-up (naložený puls) exponenciálně klesající pozadí kvůli předcházejícímu pulsu konstantní pozadí

- pile-up (naložený puls)

$$f_{pile-up}(t) = \left[\frac{1}{\beta_2 \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{t^2}{2\beta_2^2}\right) \right] * [\beta_3 H_s(t - t_1) \exp(-\beta_1(t - t_1))]$$

- další parametry (popisující naložený puls)

β_3 - amplituda naloženého pulsu

t_1 - poloha naloženého pulsu

Digitální CDB spektrometr – analýza dat

- modelová funkce (obecnější případ – **puls s pile-upem**)

$$f(t) = f_{main}(t - t_0) + f_{pile-up}(t - t_1) + f_{prec}(t) + bcg$$

hlavní puls pile-up (naložený puls) exponenciálně klesající pozadí kvůli předcházejícímu pulsu konstantní pozadí

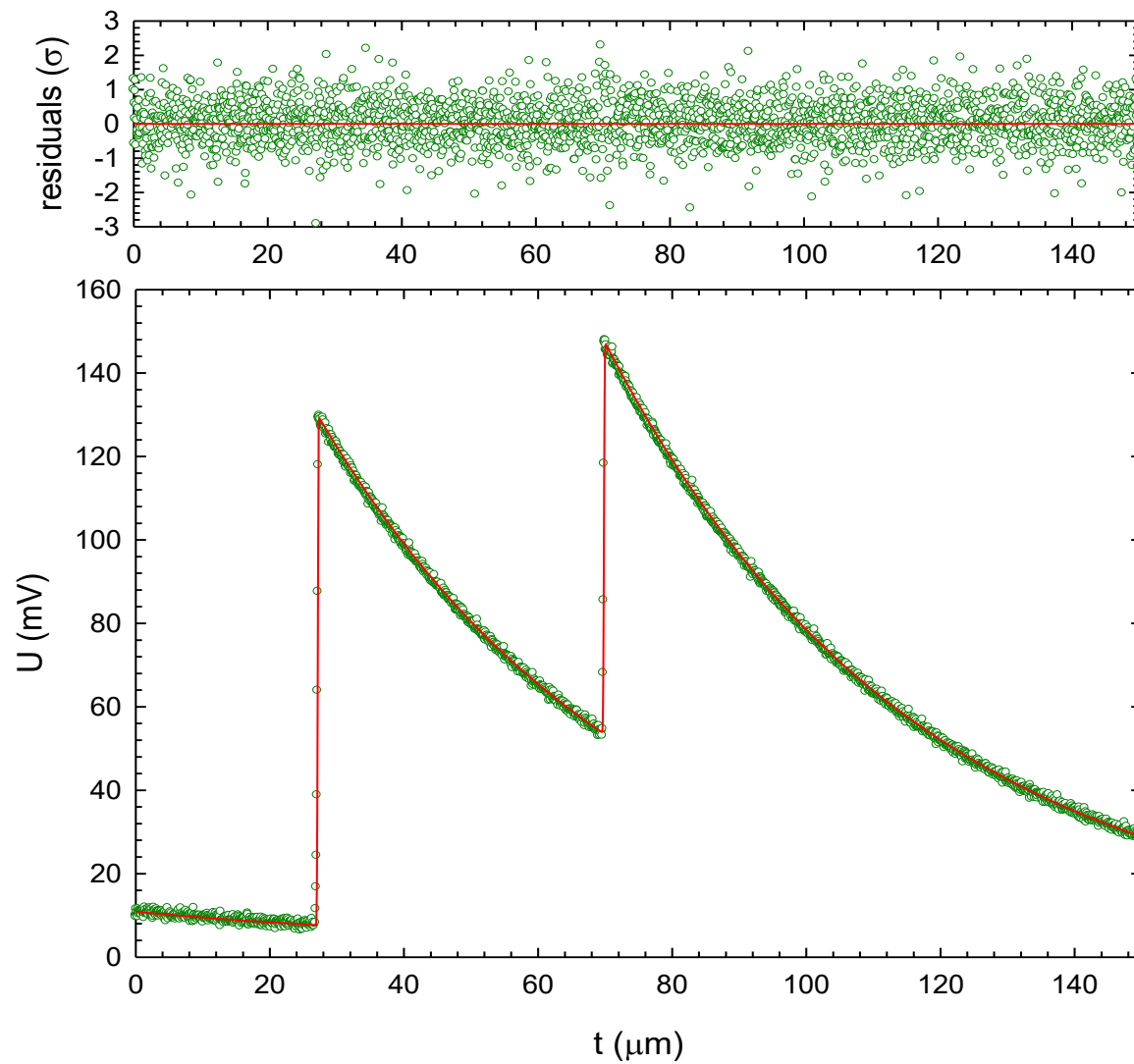
- exponenciálně klesající pozadí

$$f_{prec}(t) = \beta_4 \exp(-\beta_1 t)$$

- další parametr (popisující exponenciálně klesající pozadí)

β_4 - amplituda předchozího pulsu

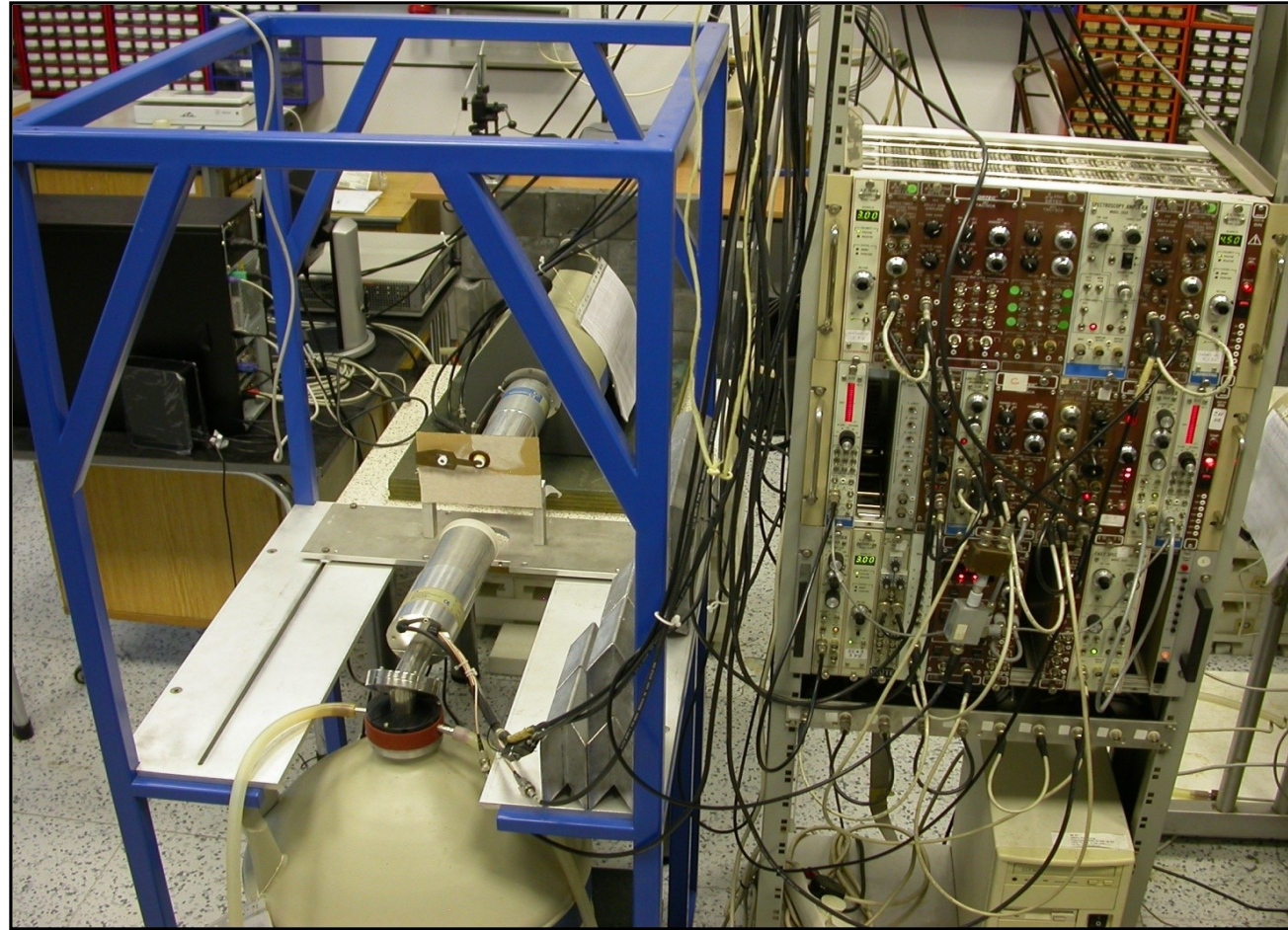
Digitální CDB spektrometr – analýza dat



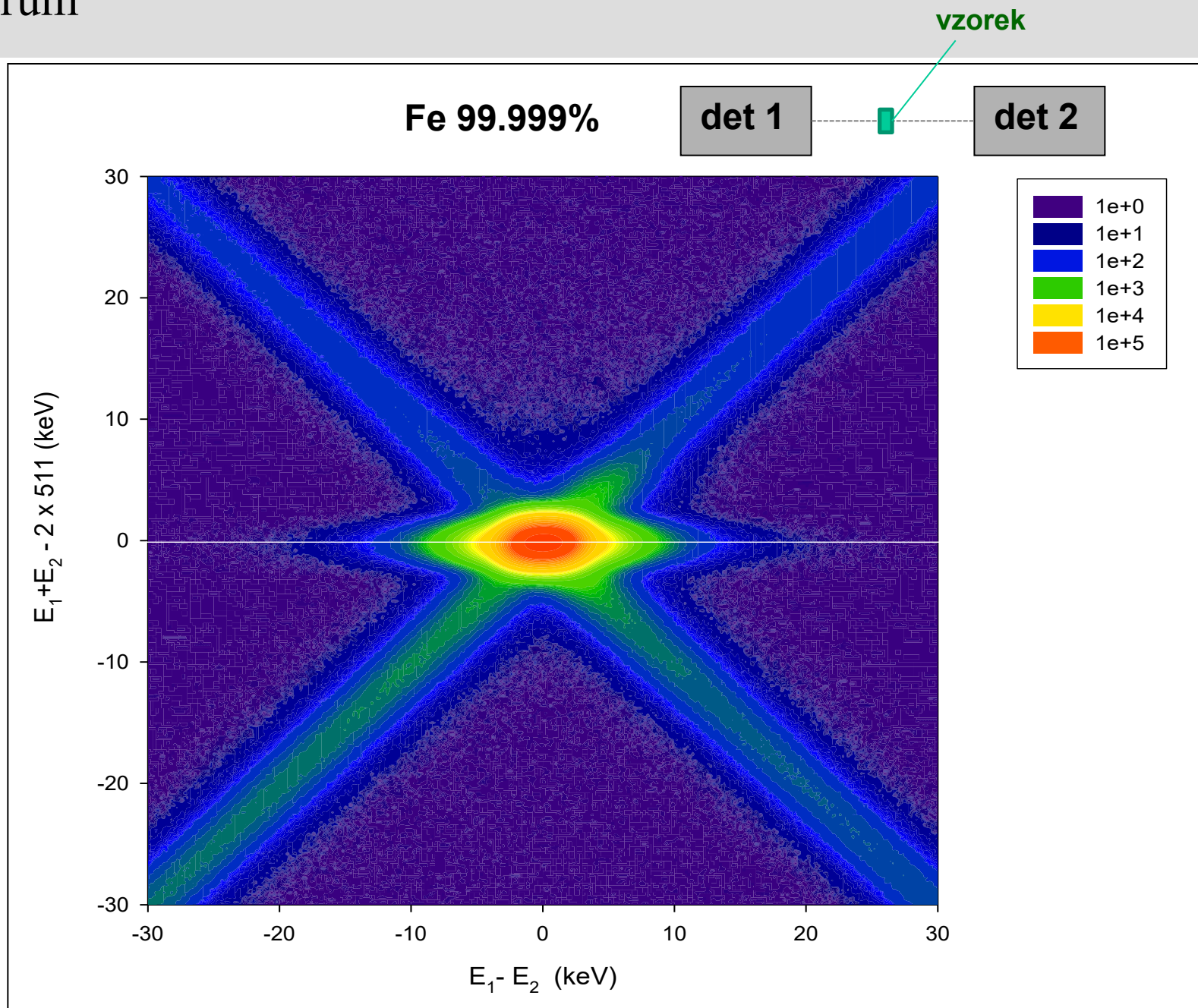
pulse s pile-upem

Digitální CDB spektrometr

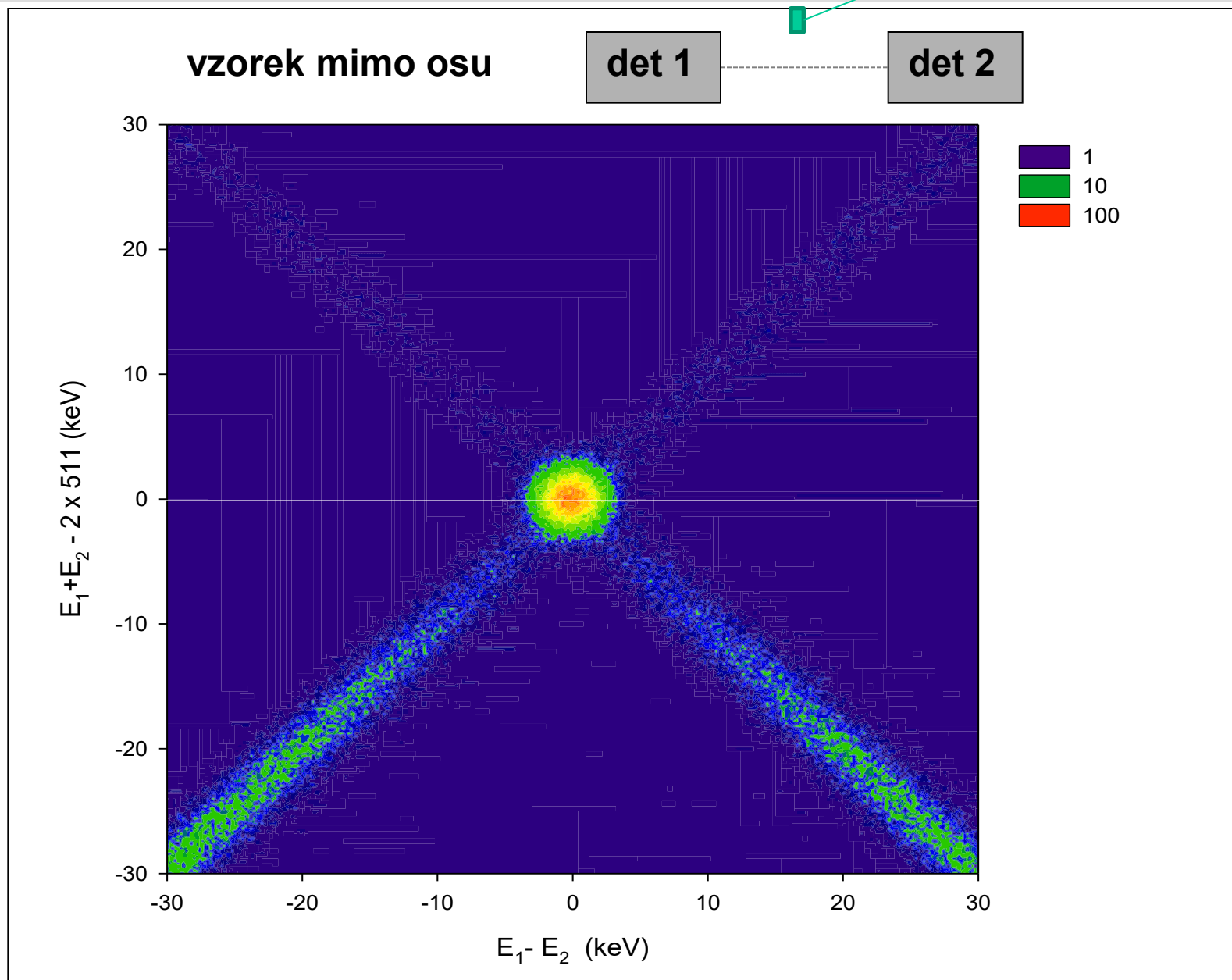
- dva HPGe detektory
- energetické rozlišení:
1.05 keV (FWHM, $E = 511$ keV)
- četnost koincidenčí 550 s^{-1}
- 10^8 událostí ve spektru



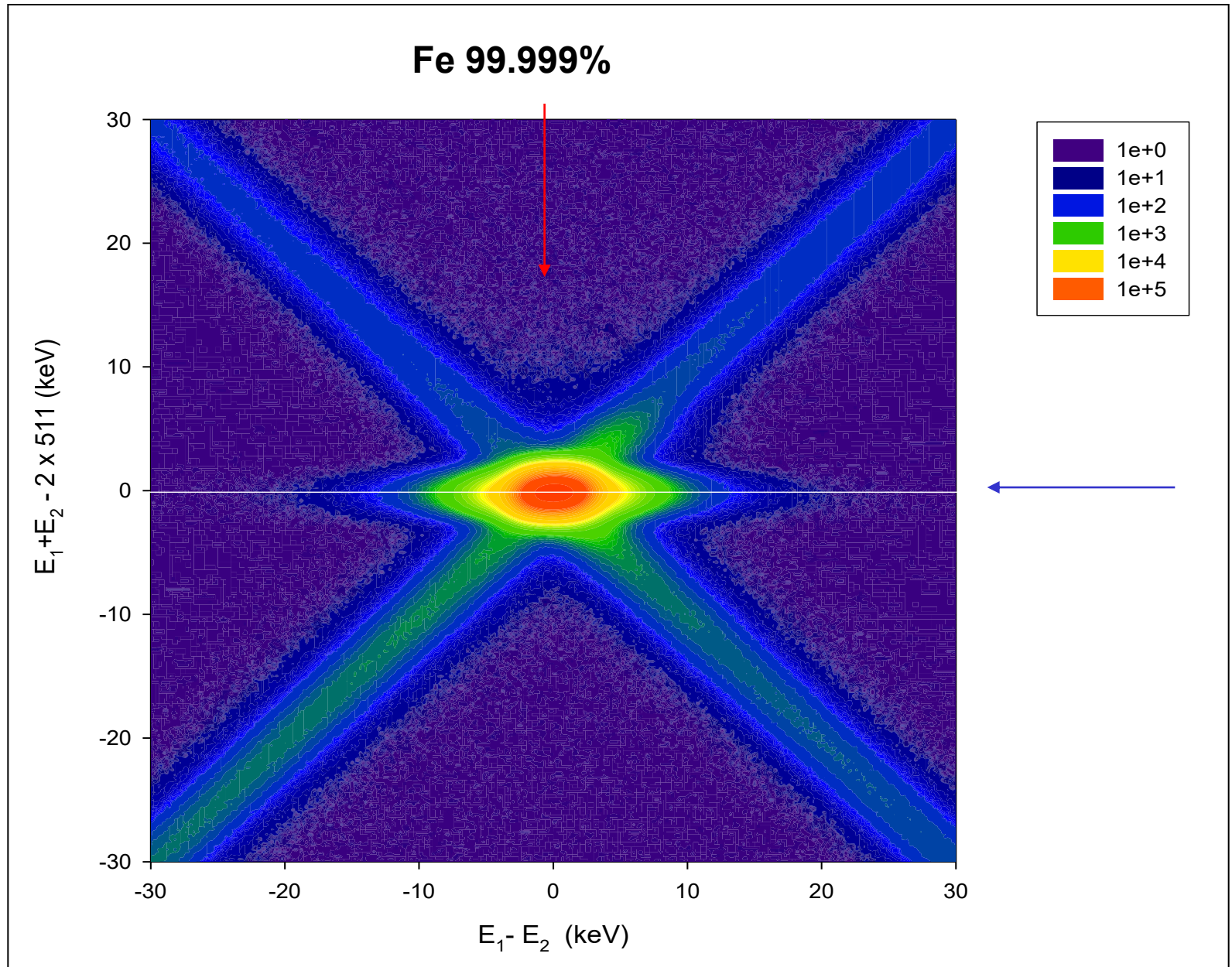
CDB spektrum



CDB spektrum



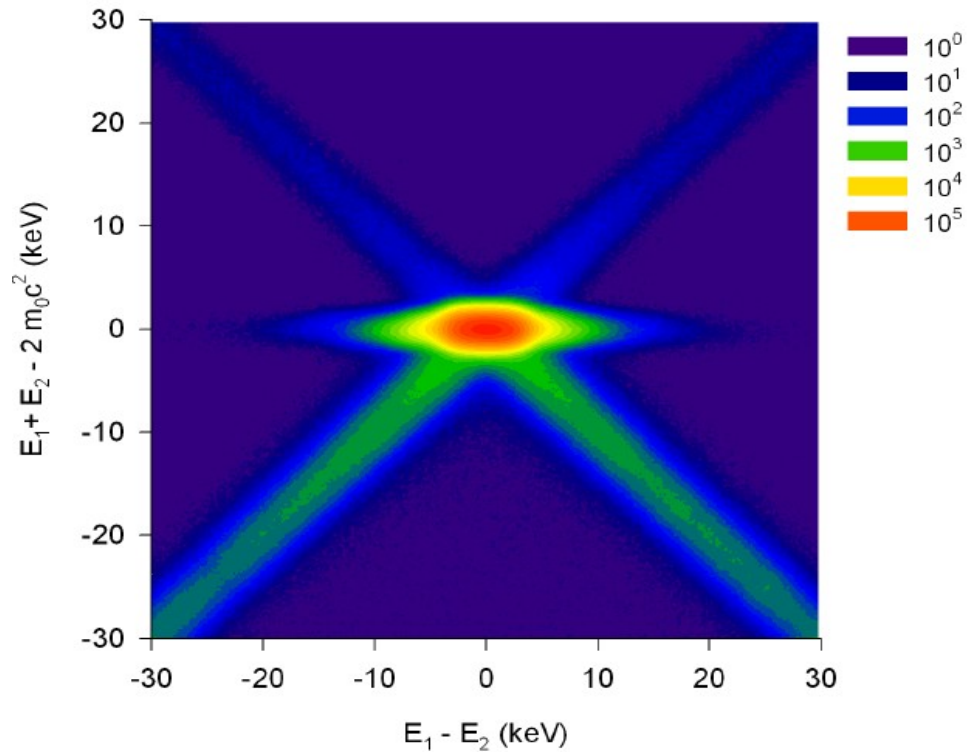
CDB spektrum



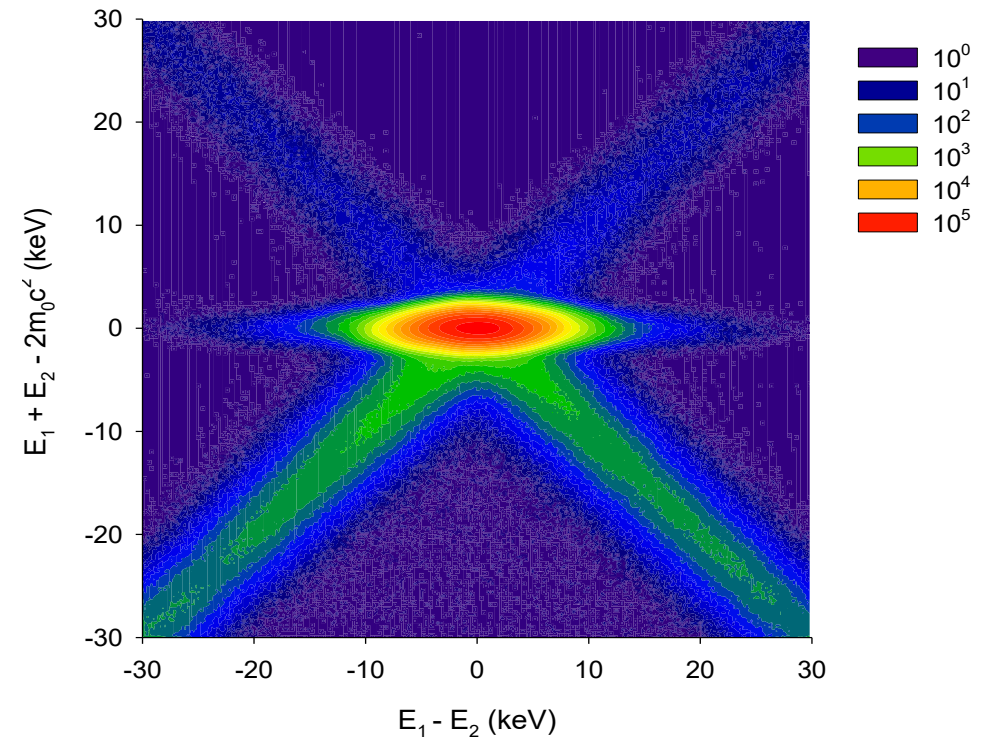
CDB spektra

- 2D CDB energetická spektra: $E_1 + E_2$ vs. $E_1 - E_2$

Al (99.9999%)

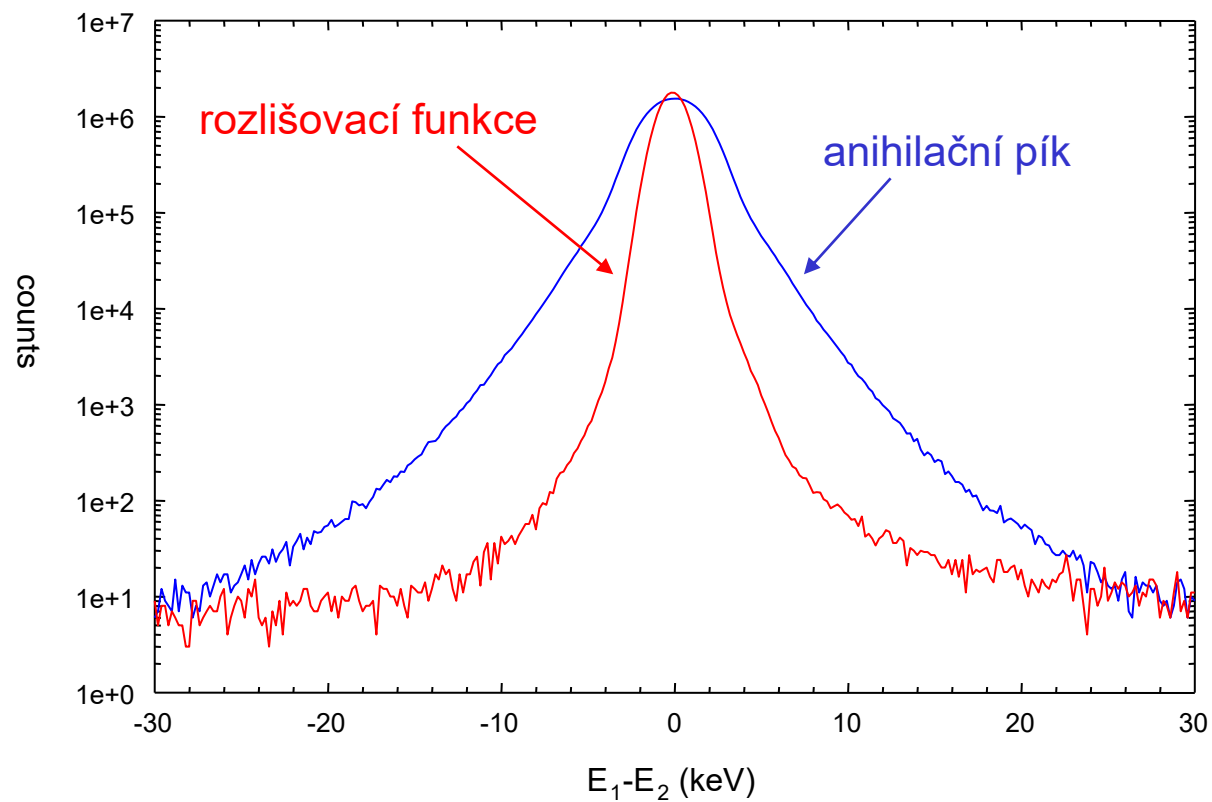


Fe (99.999%)



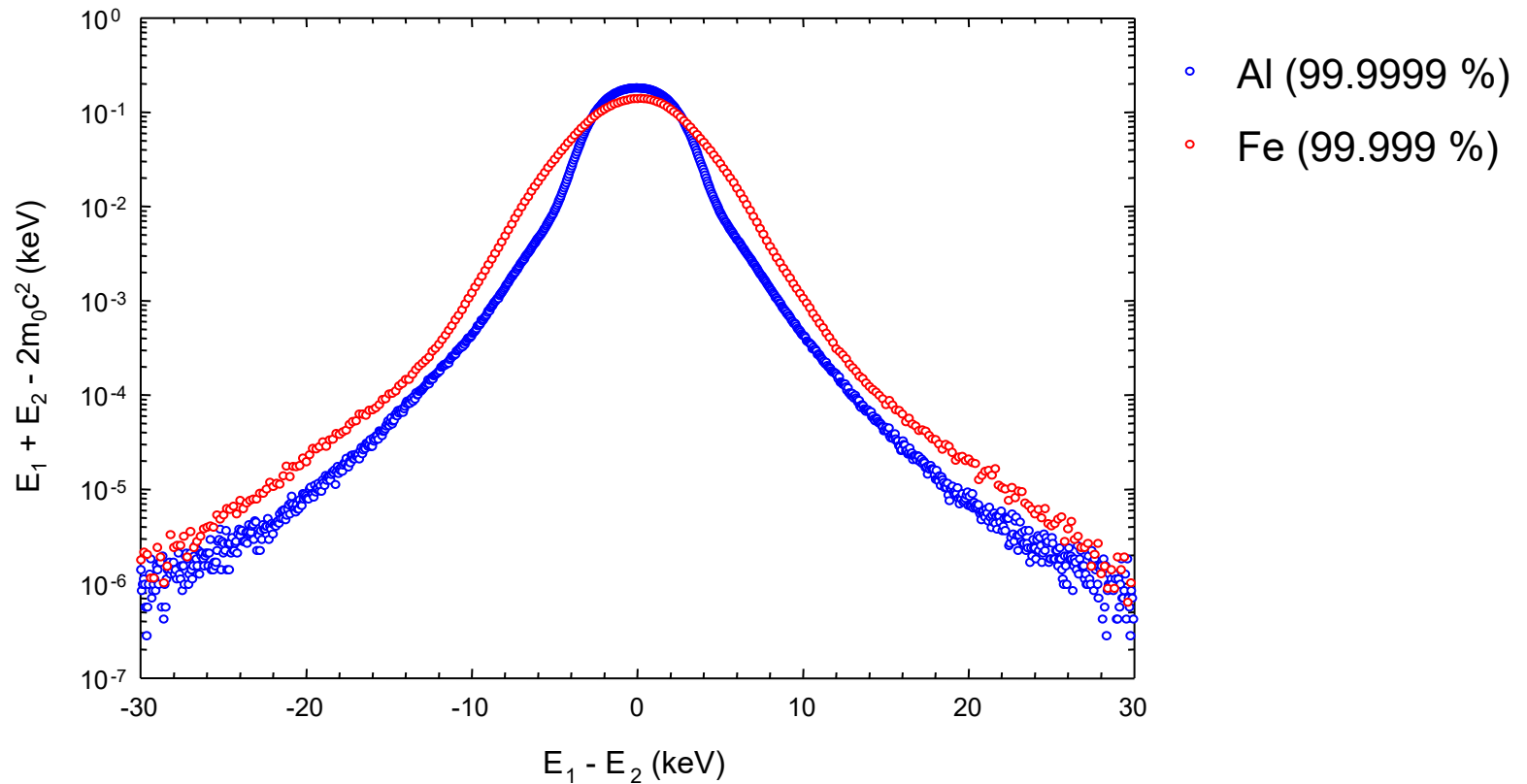
CDB spektra – 1D řezy

dobře vyžíhaný Al 99.9999%



CDB spektra – Dopplerovsky rozšířený profil

normalizované Dopplerovsky rozšířené anihilační profily



CDB spektra – Dopplerovsky rozšířený profil

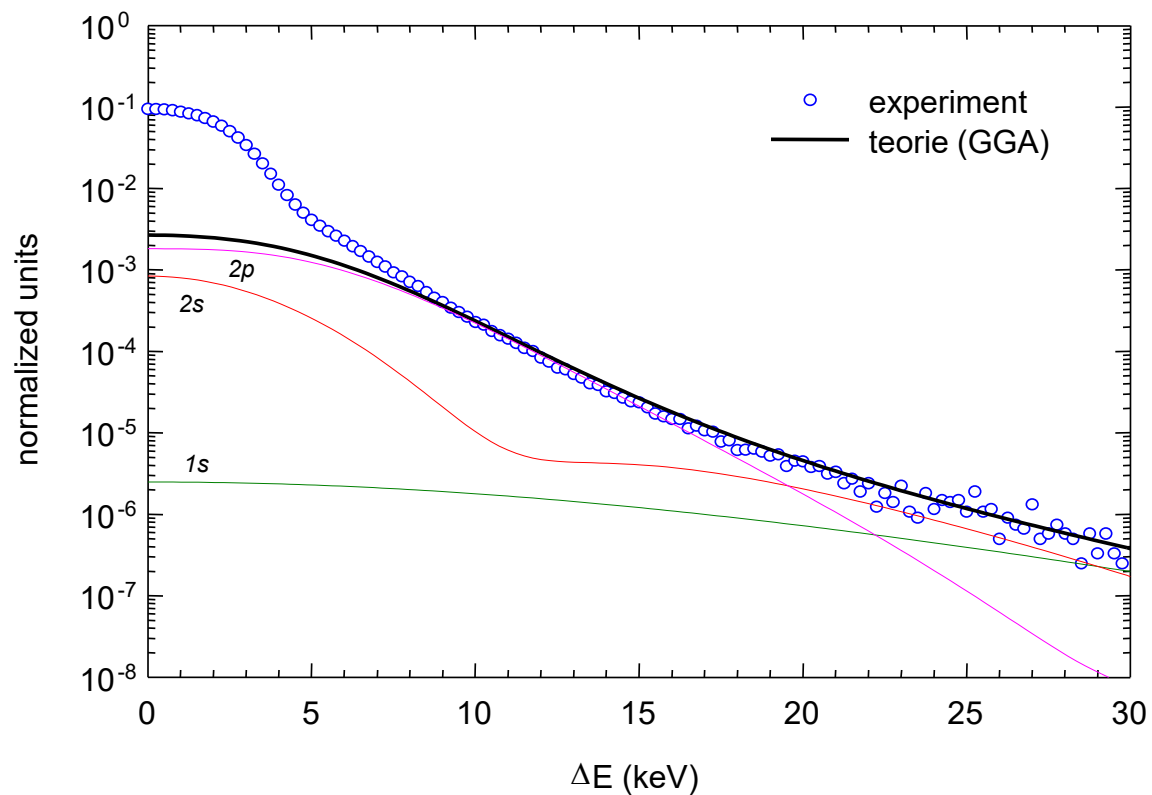
- Al (99.9999 %)

core elektrony: $1s^2 2s^2 2p^6$

valenční elektrony: $3s^2 3p^1$

- normalizovaný Dopplerovsky rozšířený profil

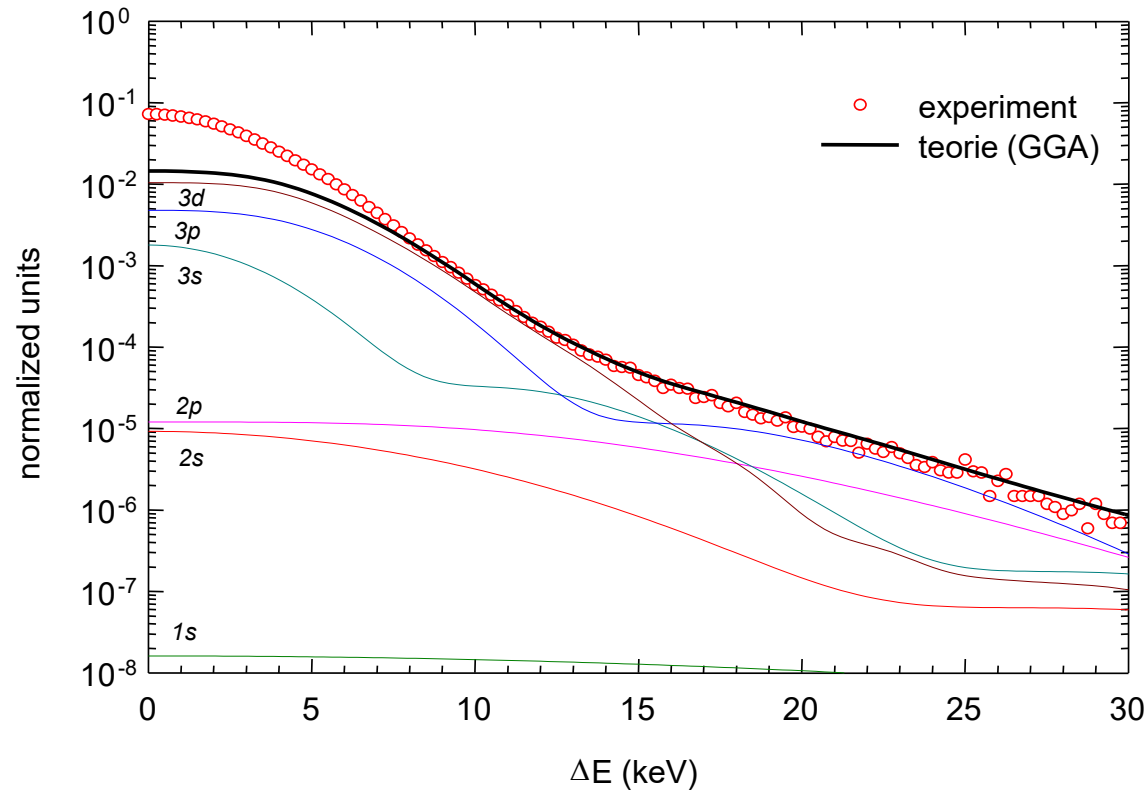
- *ab-initio* teoretické výpočty rozdělení hybností (GGA schéma)



CDB spektra – Dopplerovsky rozšířený profil

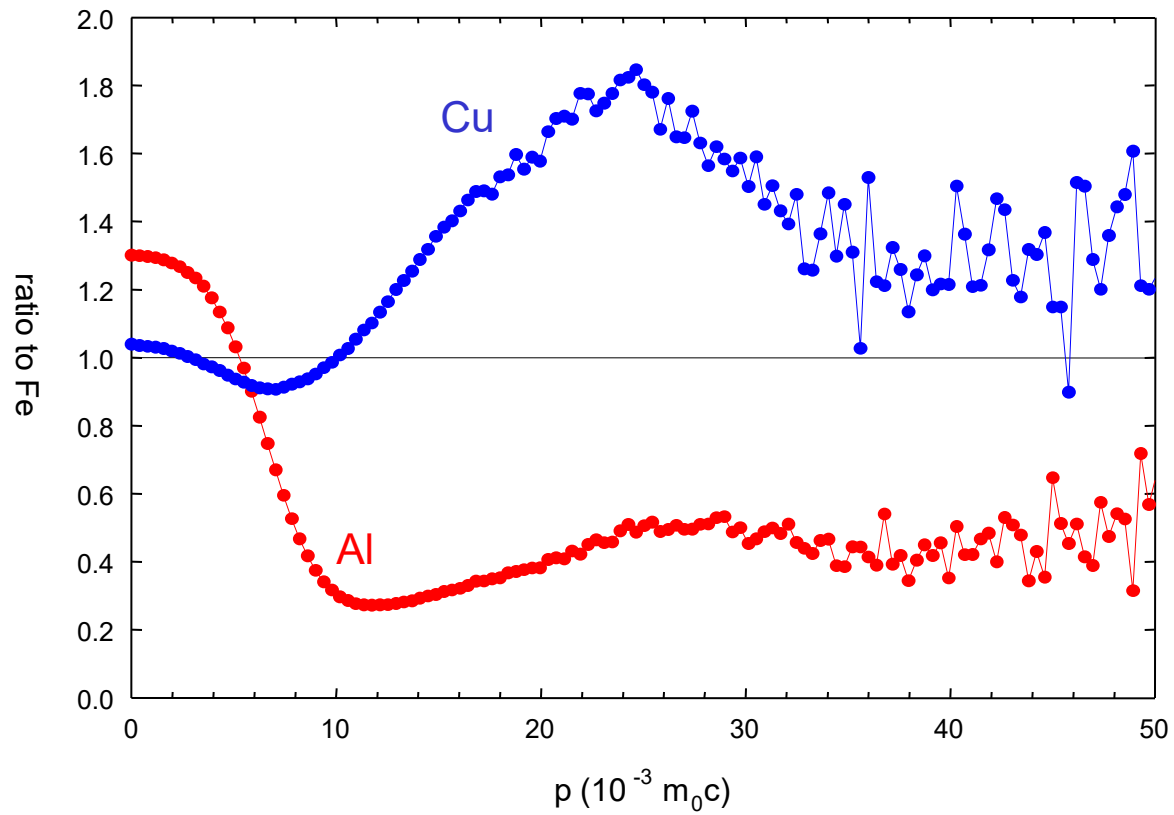
- Fe (99.99 %)
- normalizovaný Dopplerovsky rozšířený profil
- *ab-initio* teoretické výpočty rozdělení hybností (GGA schéma)

core elektrony: $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^6$
valenční elektrony: $4s^2$



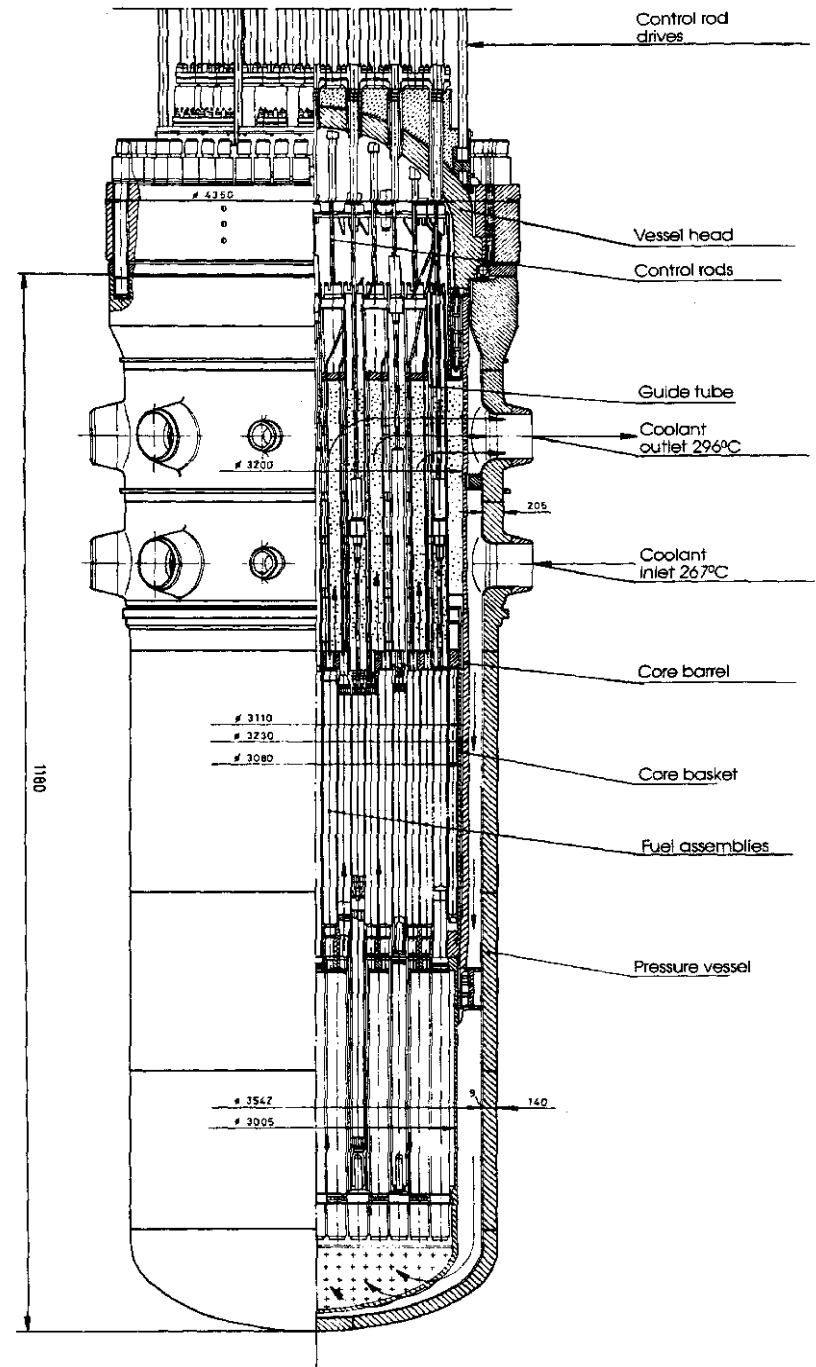
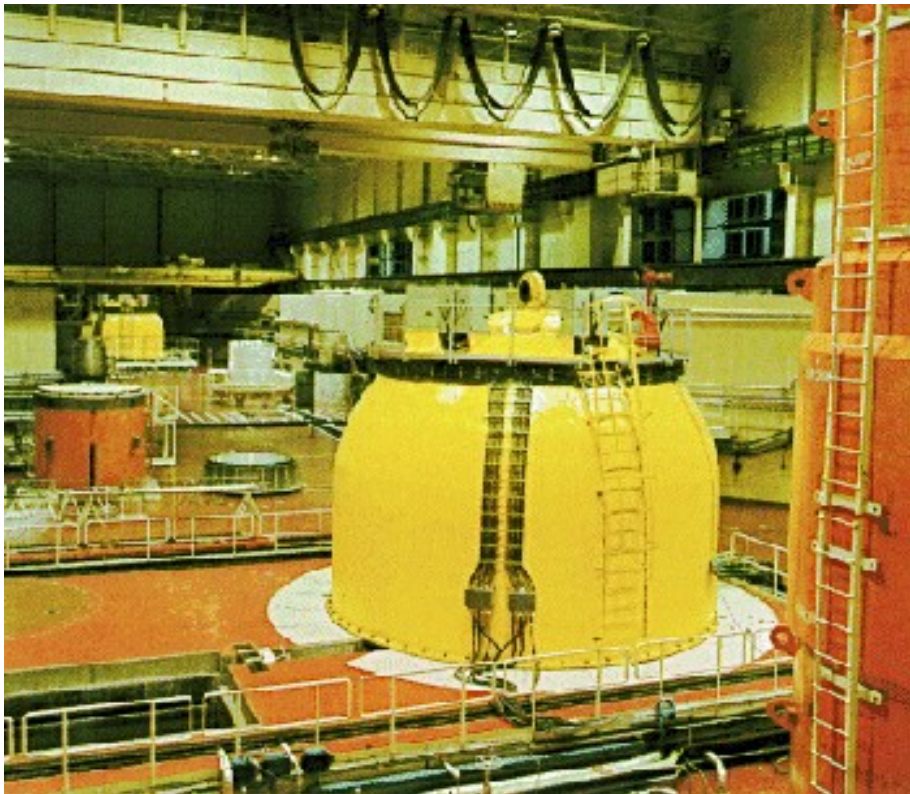
CDB spektra – podílové křivky

Experimentální CDB podílové křivky (reference Fe)



Ocel tlakové nádoby reaktoru

- Cr-Mo-V ocel (15Kh2MFA)
- VVER 400 vodou chlazený reaktor
- pracovní podmínky:
teplota 280°C
tlak 16 MPa



Ocel tlakové nádoby reaktoru

- Cr-Mo-V ocel (15Kh2MFA)
- VVER 400 vodou chlazený reaktor



Chemické složení (wt.%)

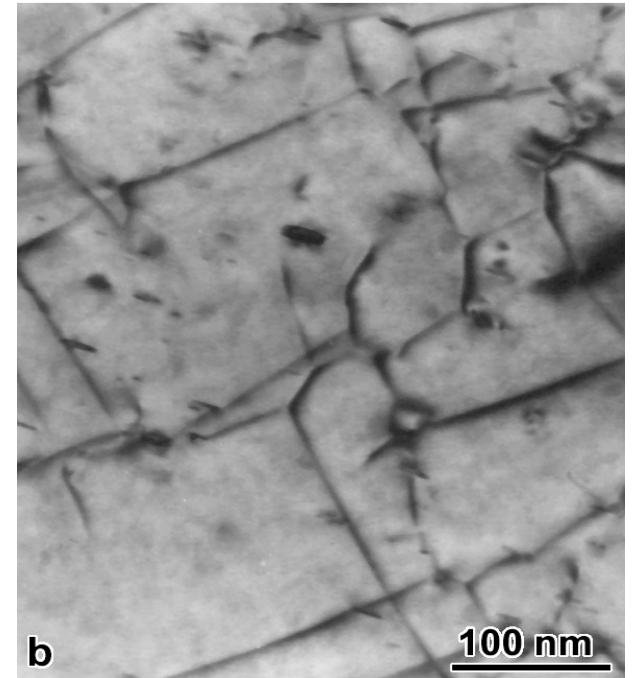
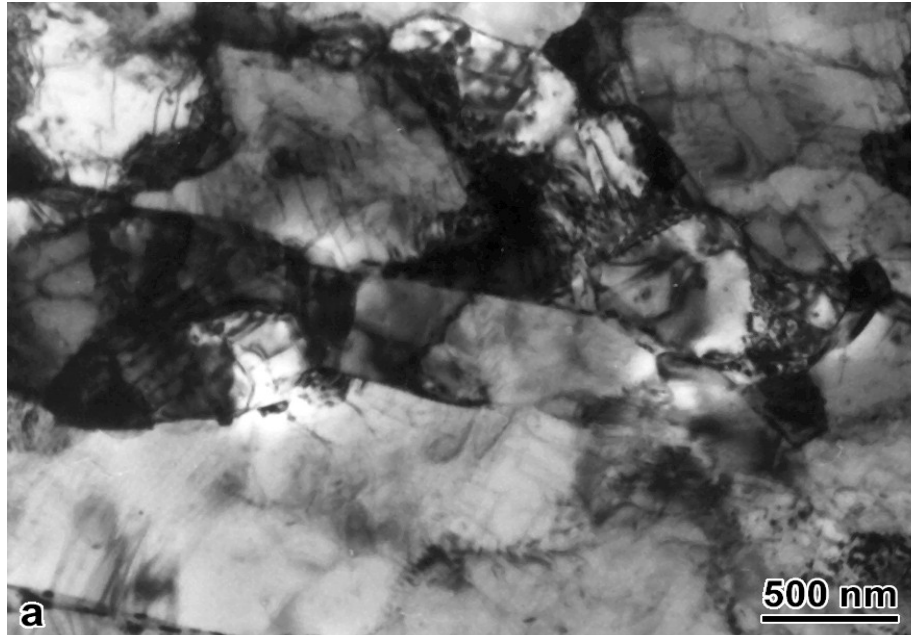
Cr	Mo	V	Mn	Si	C	Ni	Cu	S	P
2.90	0.66	0.31	0.46	0.17	0.16	0.07	0.07	0.02	0.01

- Ocel byla ozářená neutrony v jaderné elektrárně po dobu 1 - 10 let
- podmínky ozáření:
 - VVER-440 reaktor
 - $T \approx 275 \text{ }^\circ\text{C}$
 - tok ($E > 0.5 \text{ MeV}$): $\phi \approx (1-5) \times 10^{16} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
 - fluence: $F \approx (1-10) \times 10^{24} \text{ m}^{-2}$

Mikrostruktura

- 15Kh2MFA Cr-Mo-V ocel, neozářený materiál

TEM



- záchyt pozitronů v dislokacích

$$\tau_1 = 64(5) \text{ ps}, I_1 = 14.1(7) \%$$

$$\tau_2 = 151.6(8) \text{ ps}, I_2 = 85.9(6) \%$$

volné pozitrony



dislokace

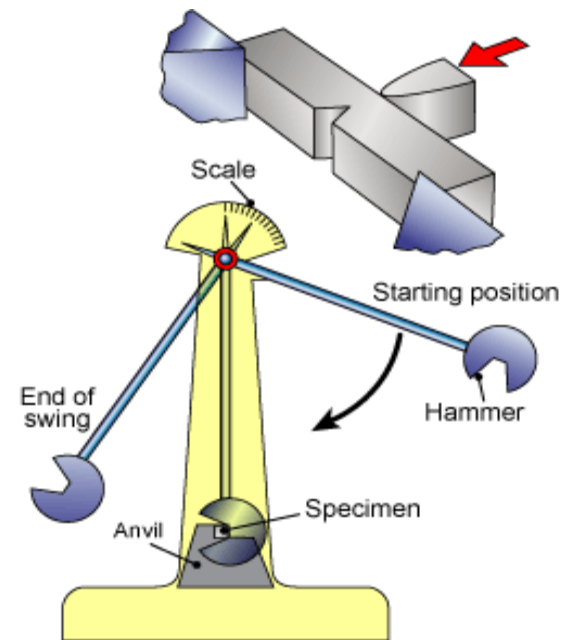
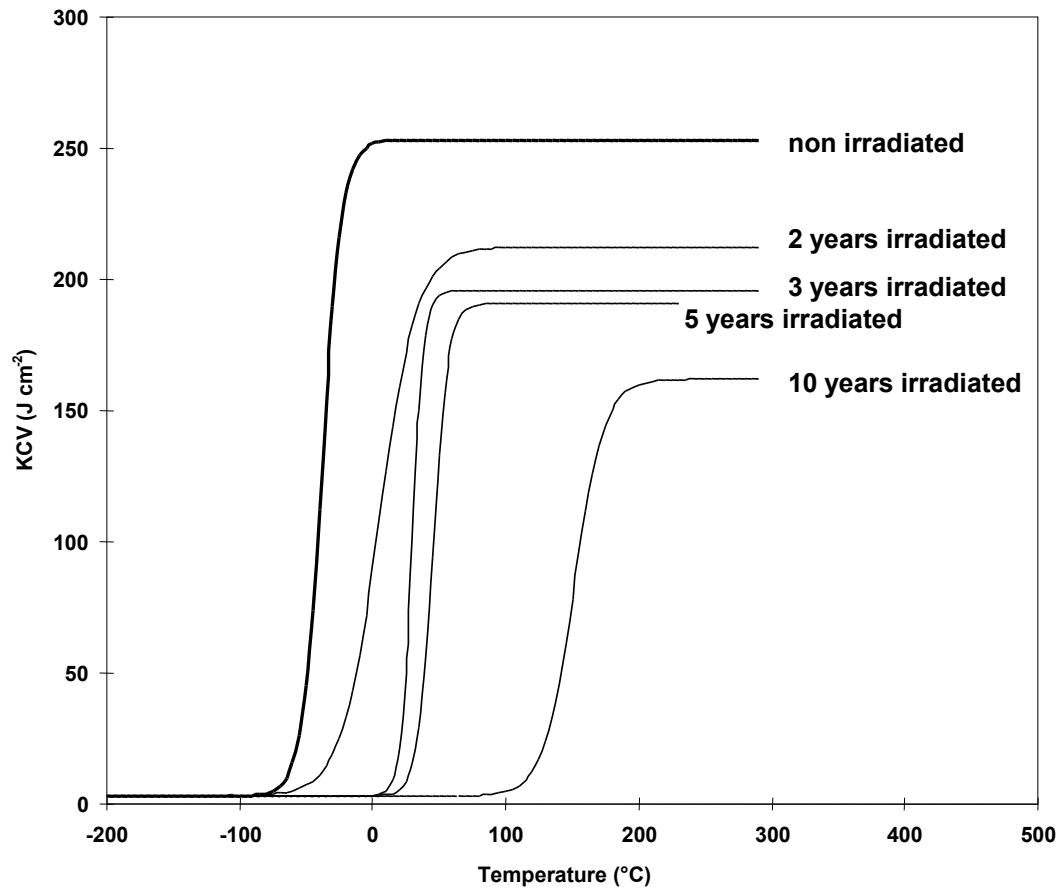
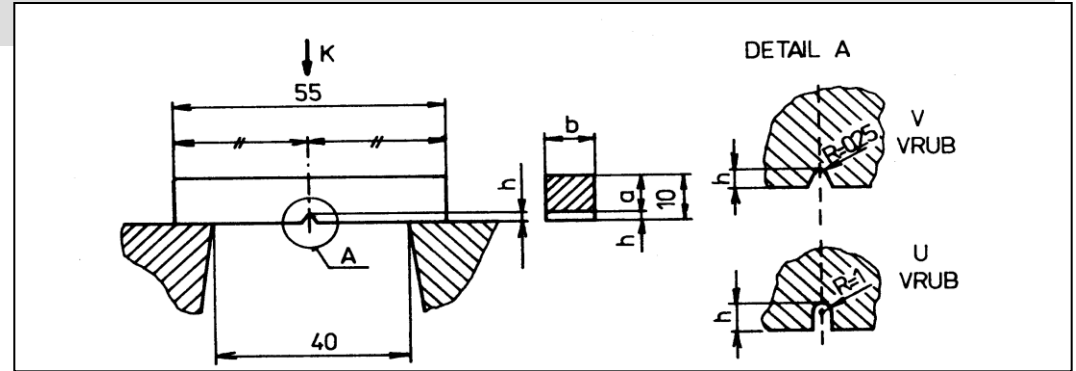


- hustota dislokací $\rho_D = (2.3 \pm 0.4) \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$

Radiační zkřehnutí

Charpyho V-test

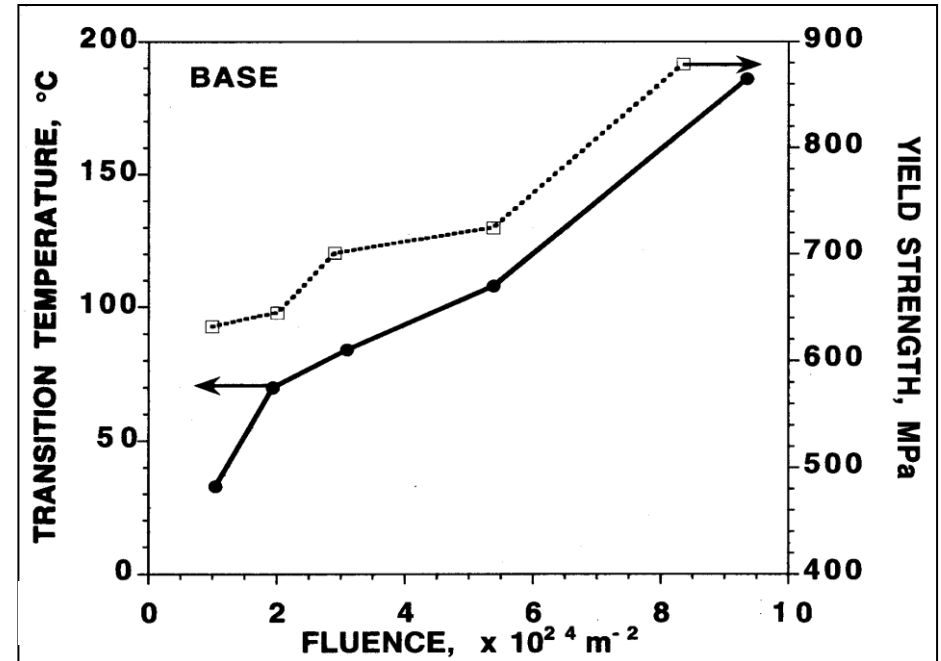
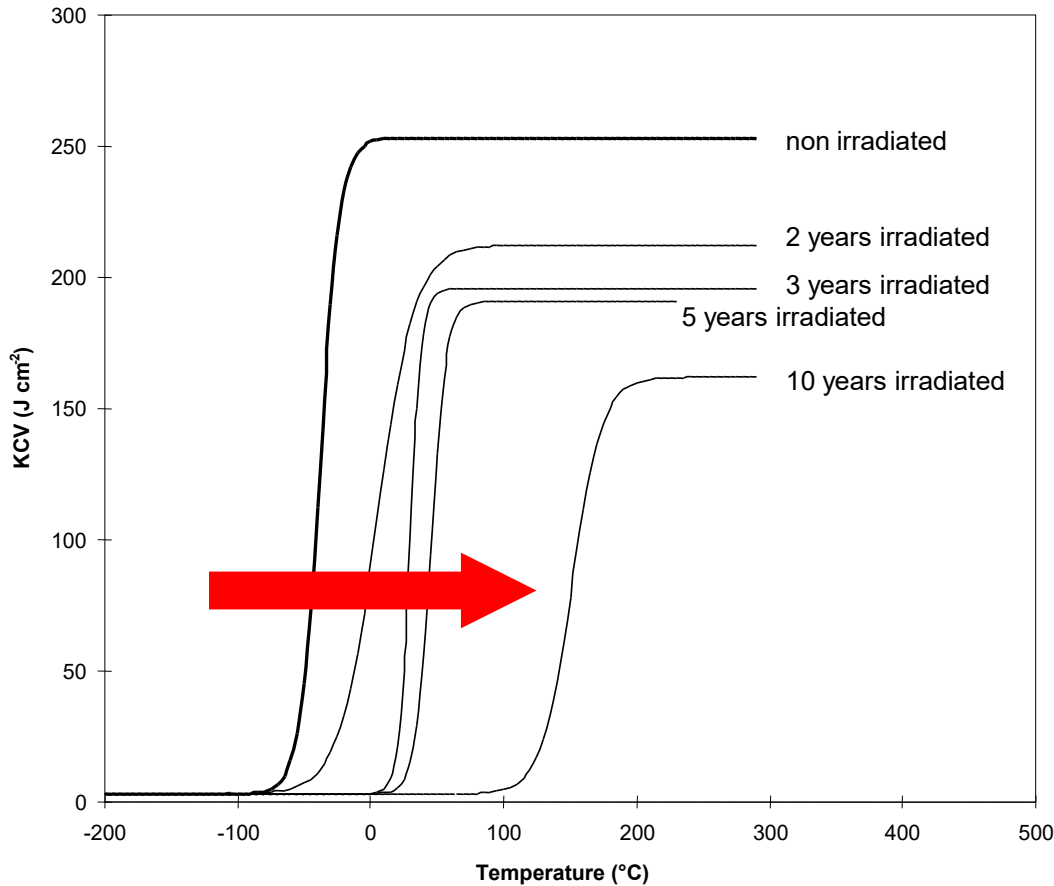
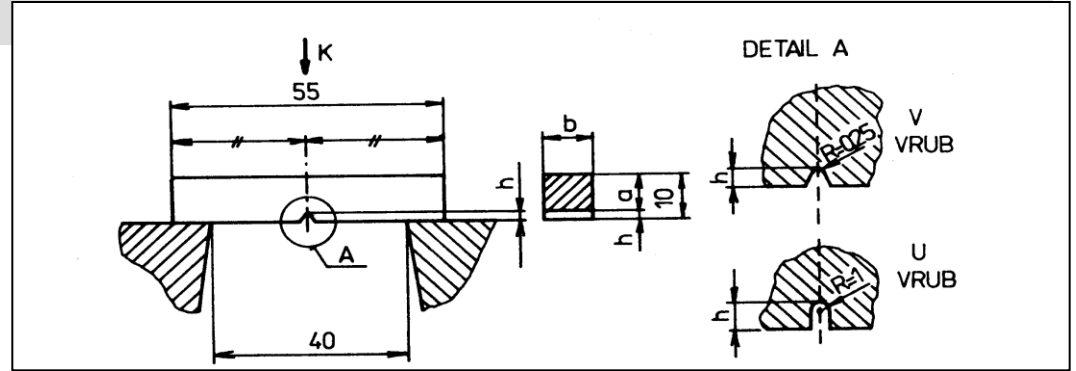
Cr-Mo-V ocel



Radiační zkřehnutí

Charpyho V-test

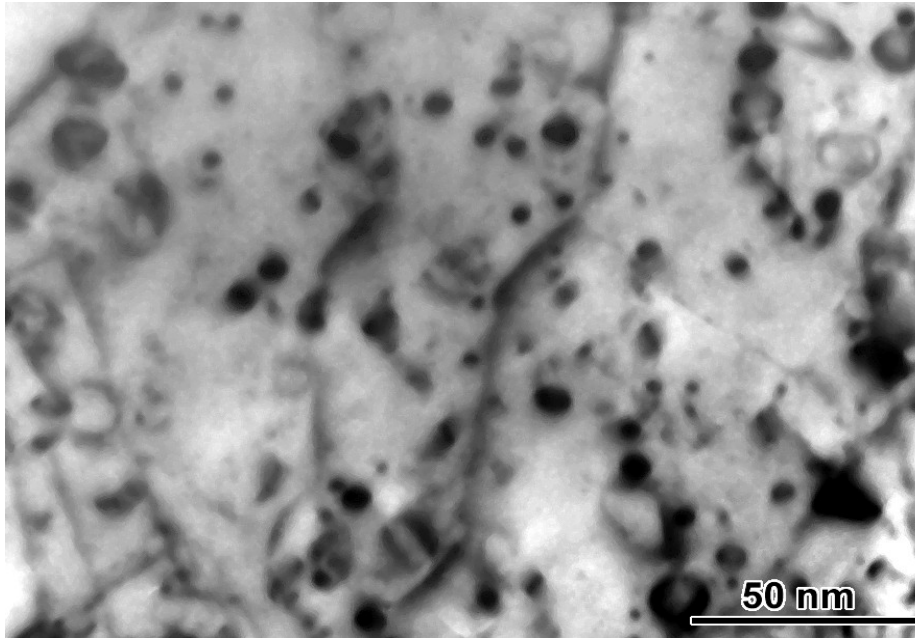
Cr-Mo-V ocel



Radiačně indukované defekty

- 15Kh2MFA Cr-Mo-V ocel, ozářený materiál

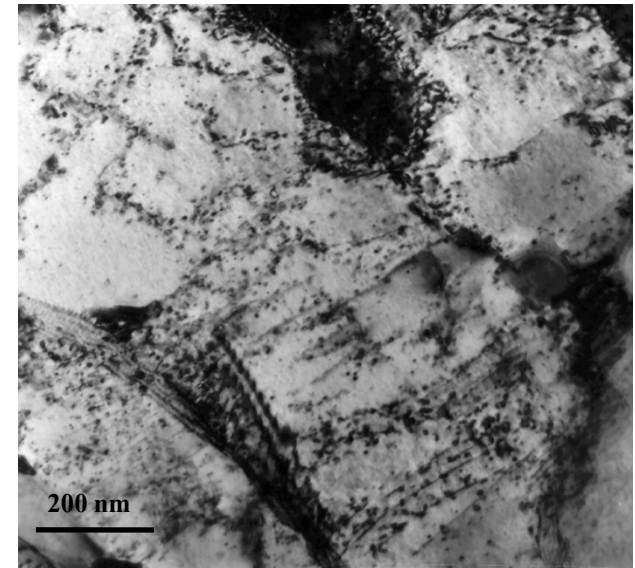
TEM



10 let

Fluence ($E > 0.5$ MeV):

$$F = 9.96 \times 10^{24} \text{m}^{-2}$$

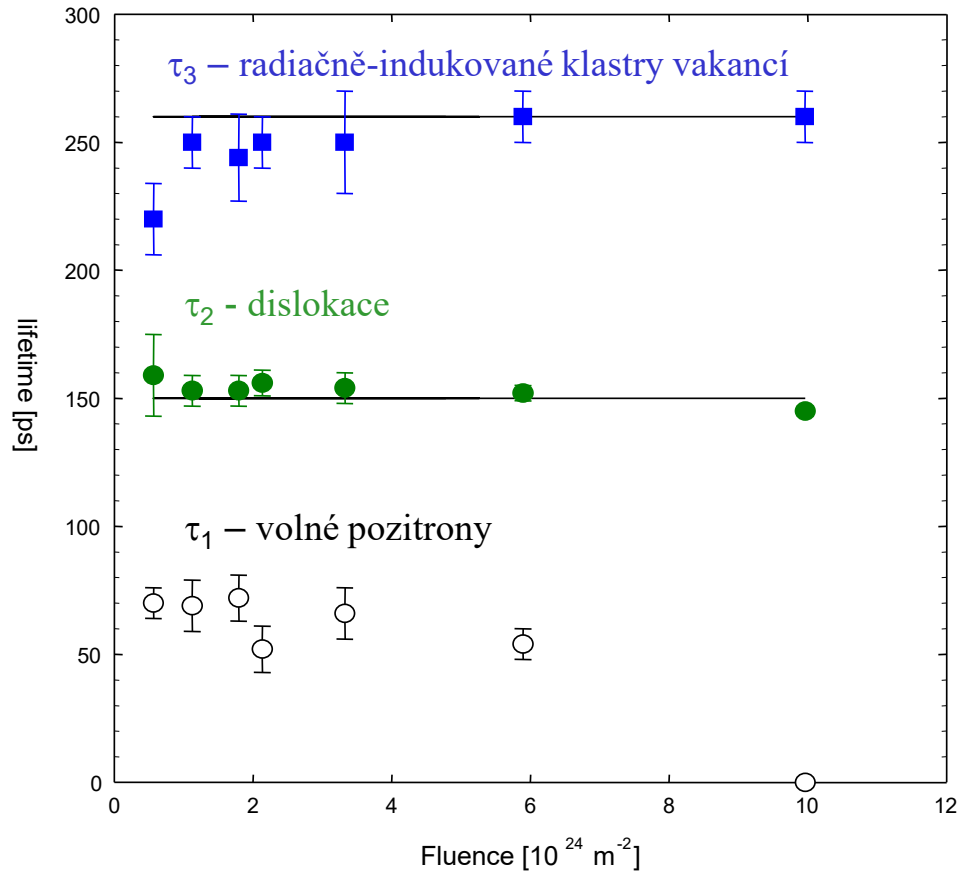


- Radiačně-indukované precipitáty
- struktura a chemické složení??

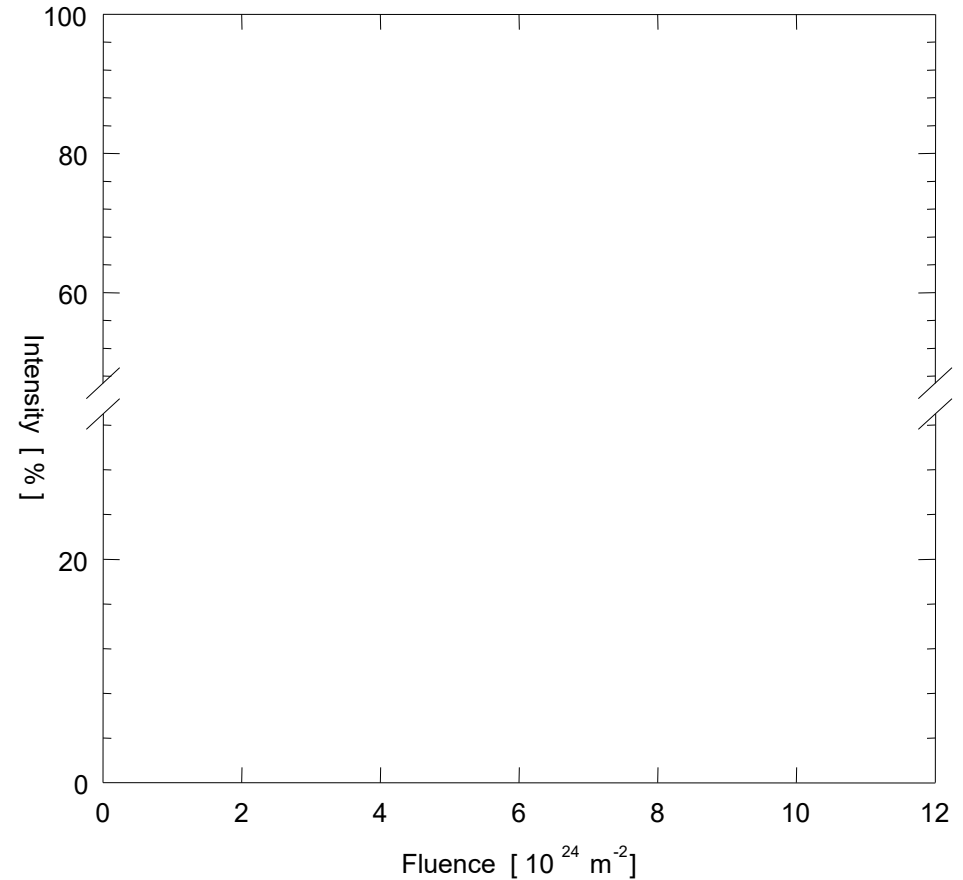
Radiačně indukované defekty - PAS

- 15Kh2MFA Cr-Mo-V ocel, ozářený materiál

doby života



intenzity

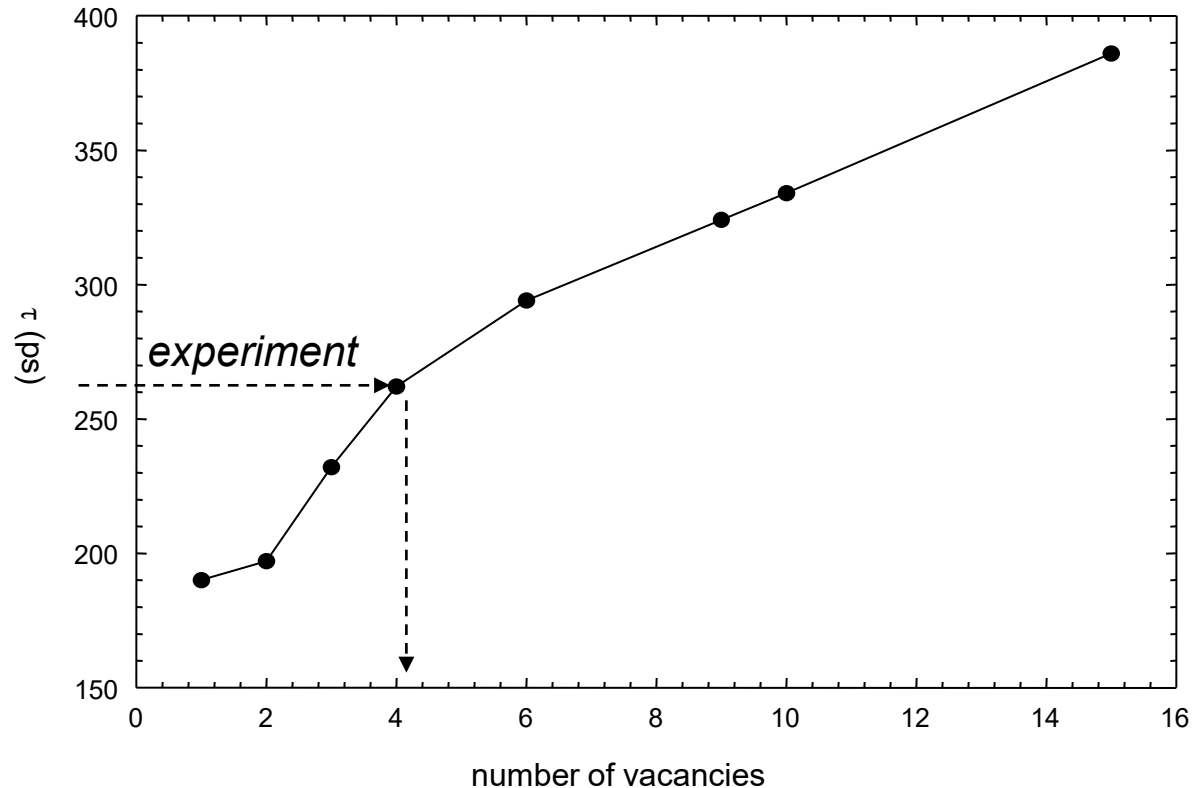


- radiačně-indukované klastry vakancí

Radiačně indukované defekty - PAS

- 15Kh2MFA Cr-Mo-V ocel, ozářený materiál

vypočítaná závislost doby života e^+ na velikosti klastru vakancí pro Fe

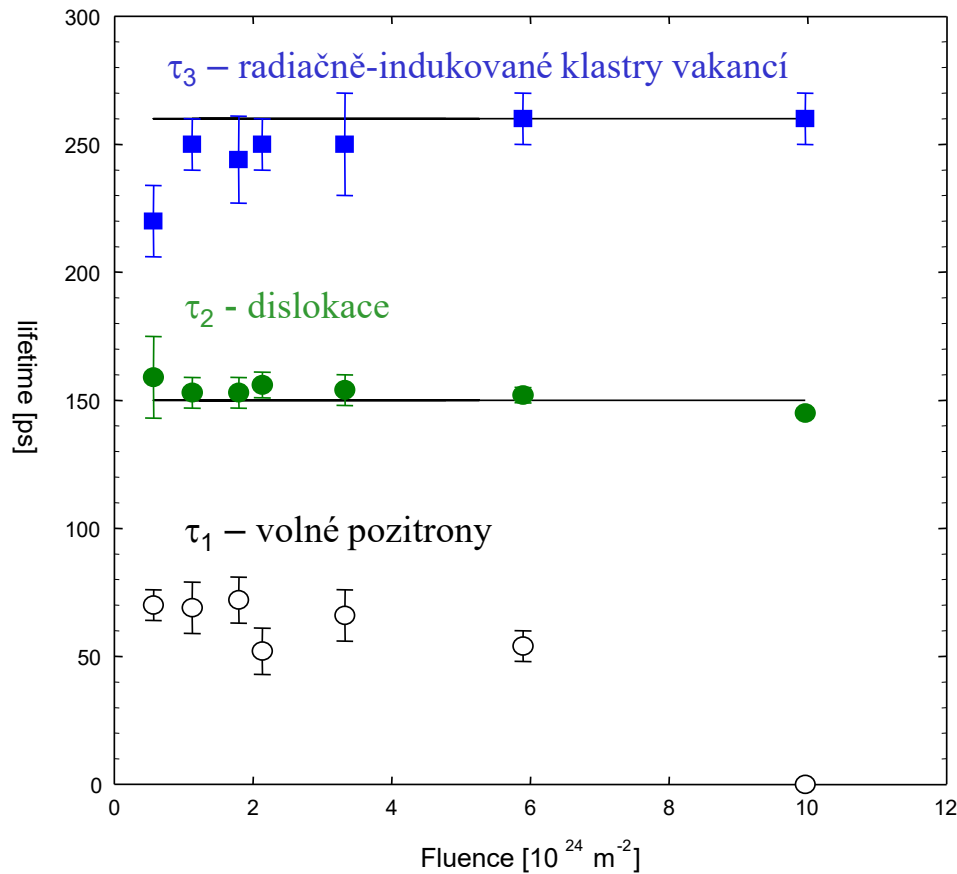


- radiačně-indukované klastry vakancí – velikost ≈ 4 vakance ($d \approx 0.5$ nm)

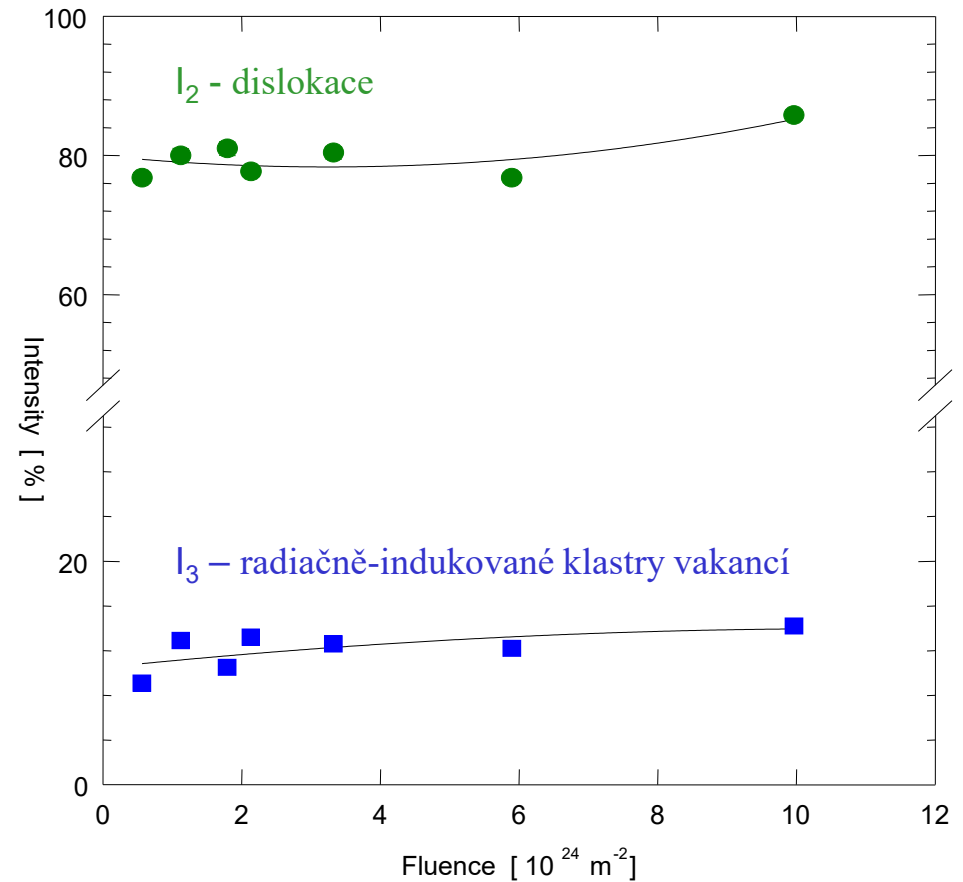
Radiačně indukované defekty - PAS

- 15Kh2MFA Cr-Mo-V ocel, ozářený materiál

doby života



intenzity

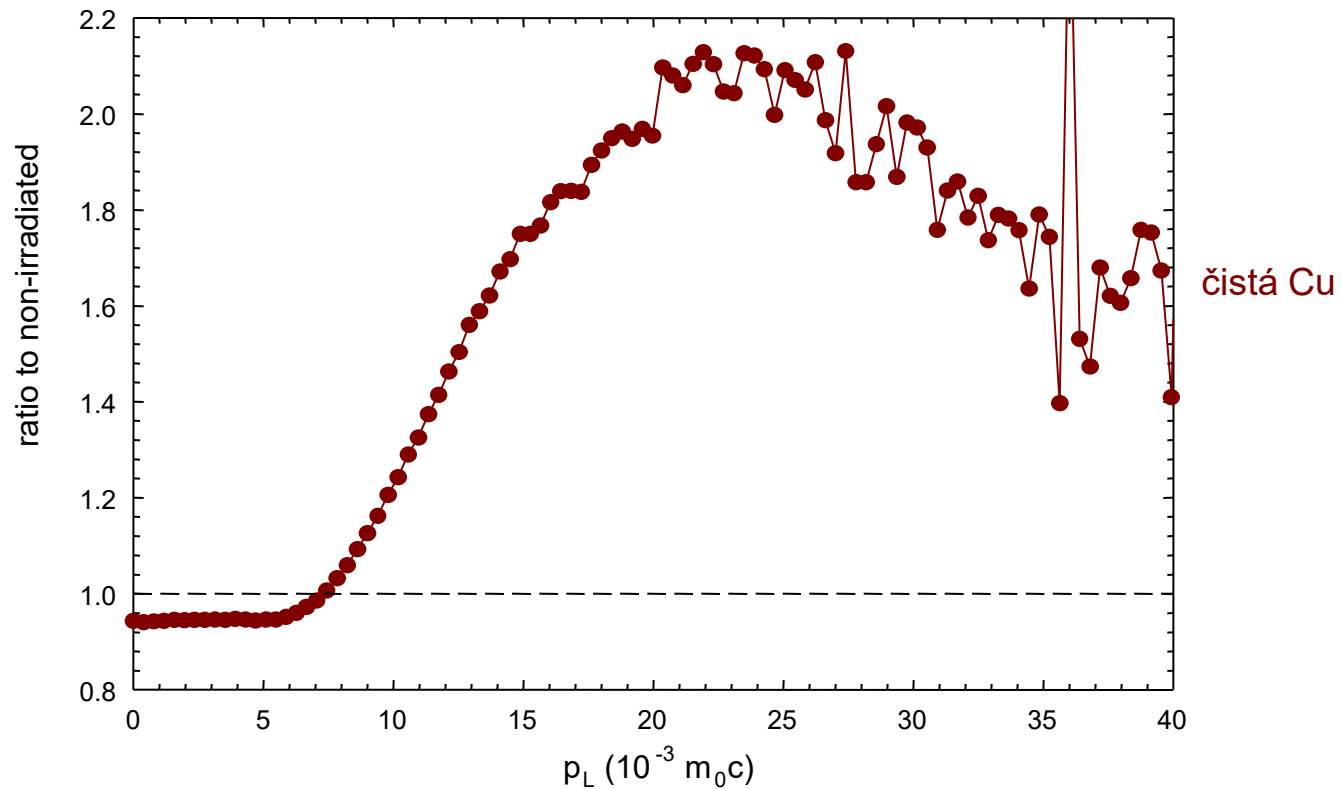


- radiačně-indukované klastry vakancí

Radiačně indukované defekty - CDB

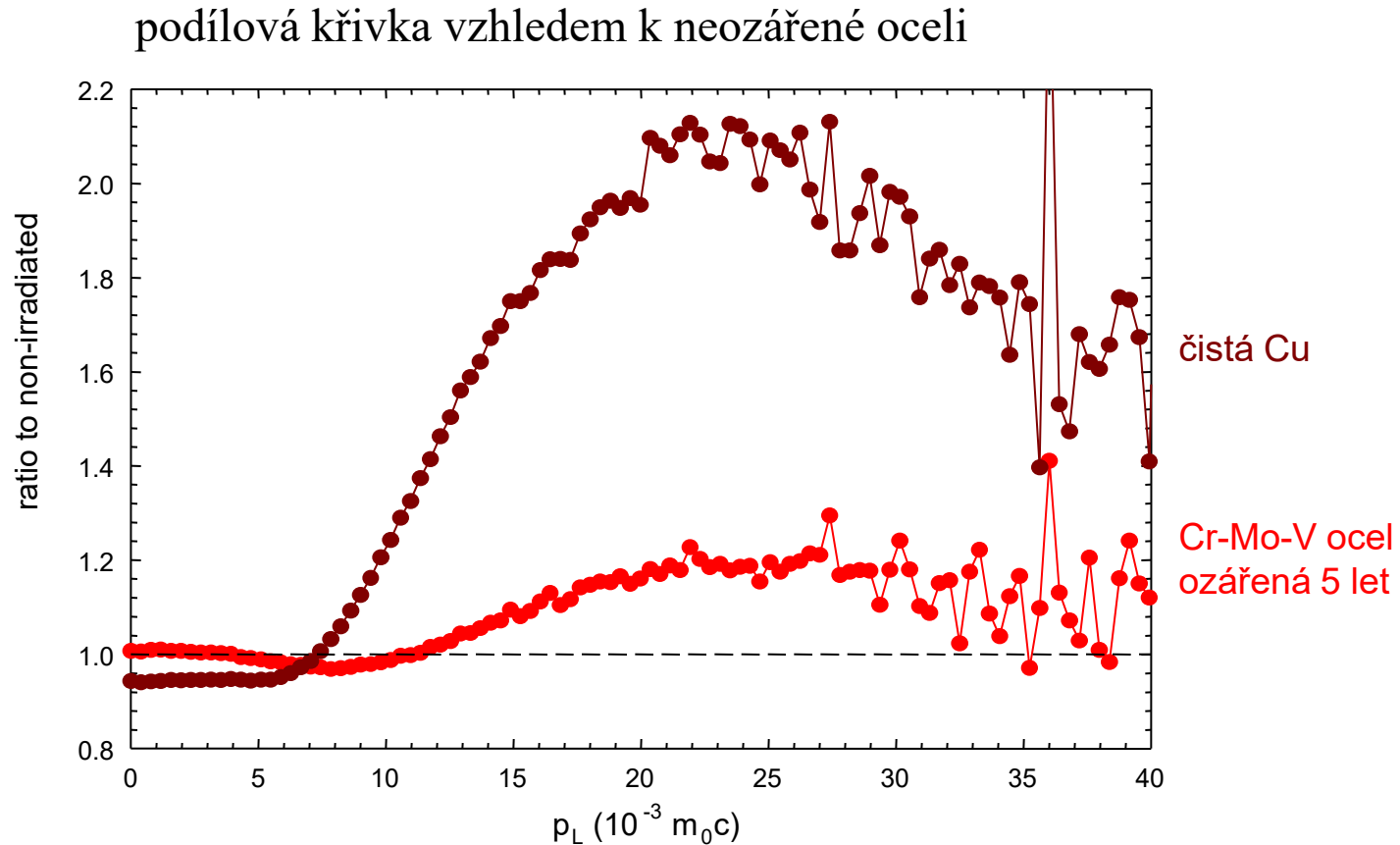
- 15Kh2MFA Cr-Mo-V ocel, ozářený materiál

podílová křivka vzhledem k neozářené oceli



Radiačně indukované defekty - CDB

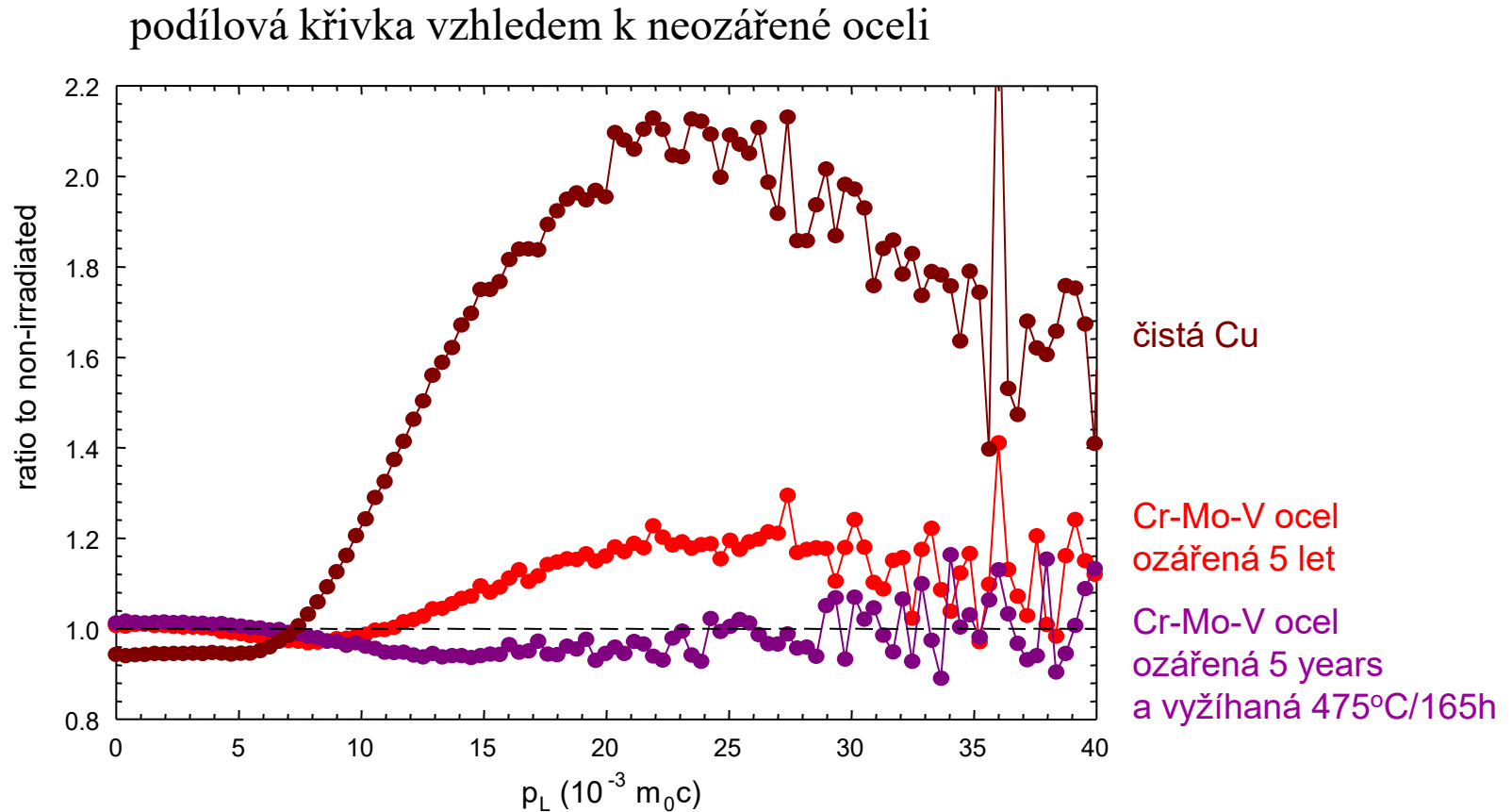
- 15Kh2MFA Cr-Mo-V ocel, ozářený materiál



- ozáření neutrony → nárůst koncentrace Cu v okolí defektů
- radiačně-indukované precipitáty

Radiačně indukované defekty - CDB

- 15Kh2MFA Cr-Mo-V ocel, ozářený materiál



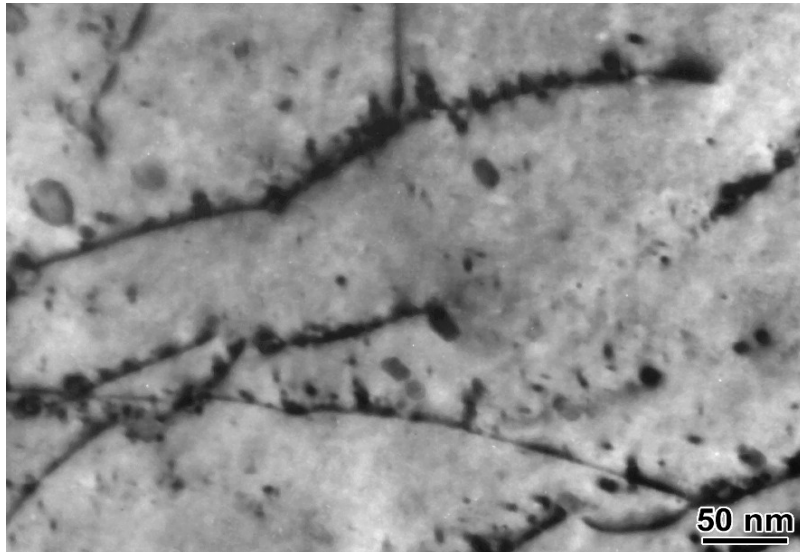
- regenerační žíhání → pokles koncentrace Cu v okolí defektů – rozpuštění Cu precipitátů

Radiačně indukované defekty - TEM

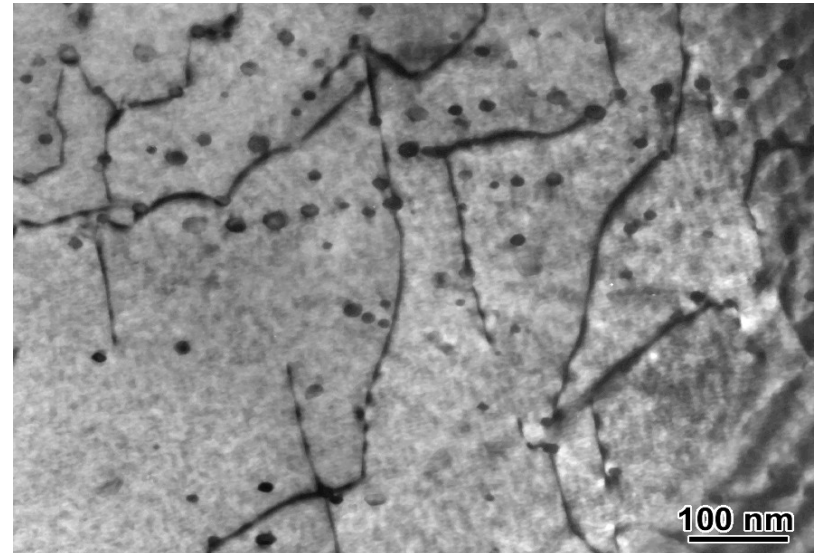
- 15Kh2MFA Cr-Mo-V ocel, ozářený materiál

Ocel ozářená 5 let

Fluence ($E > 0.5$ MeV): $4.78 \times 10^{24} \text{ m}^{-2}$



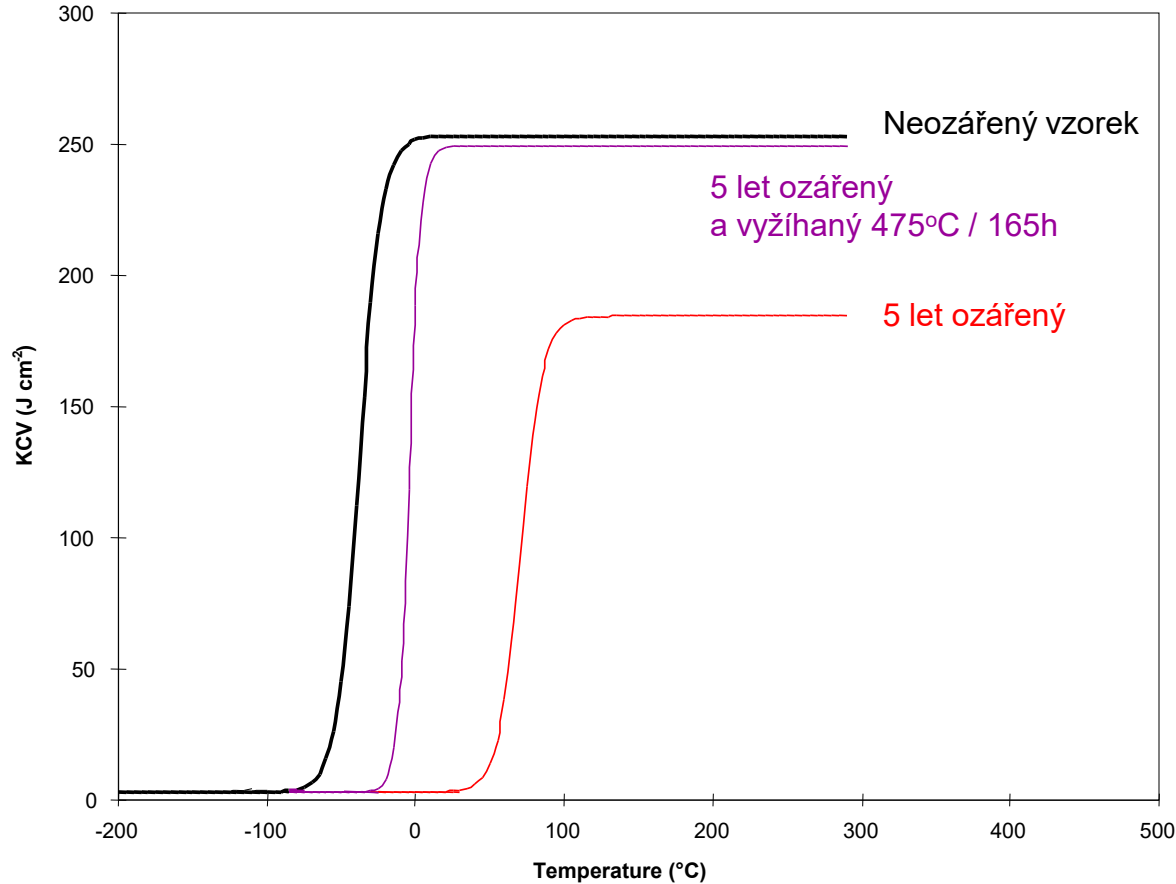
po vyžhání 475°C / 165h



- regenerační žhání na 475°C → rozpuštění radiačně-indukovaných precipitátů

Vliv regeneračního žíhání na mechanické vlastnosti

- 15Kh2MFA Cr-Mo-V ocel, ozářený materiál



- rozpuštění radiačně-indukovaných precipitátů
→ zotavení mechanických vlastností

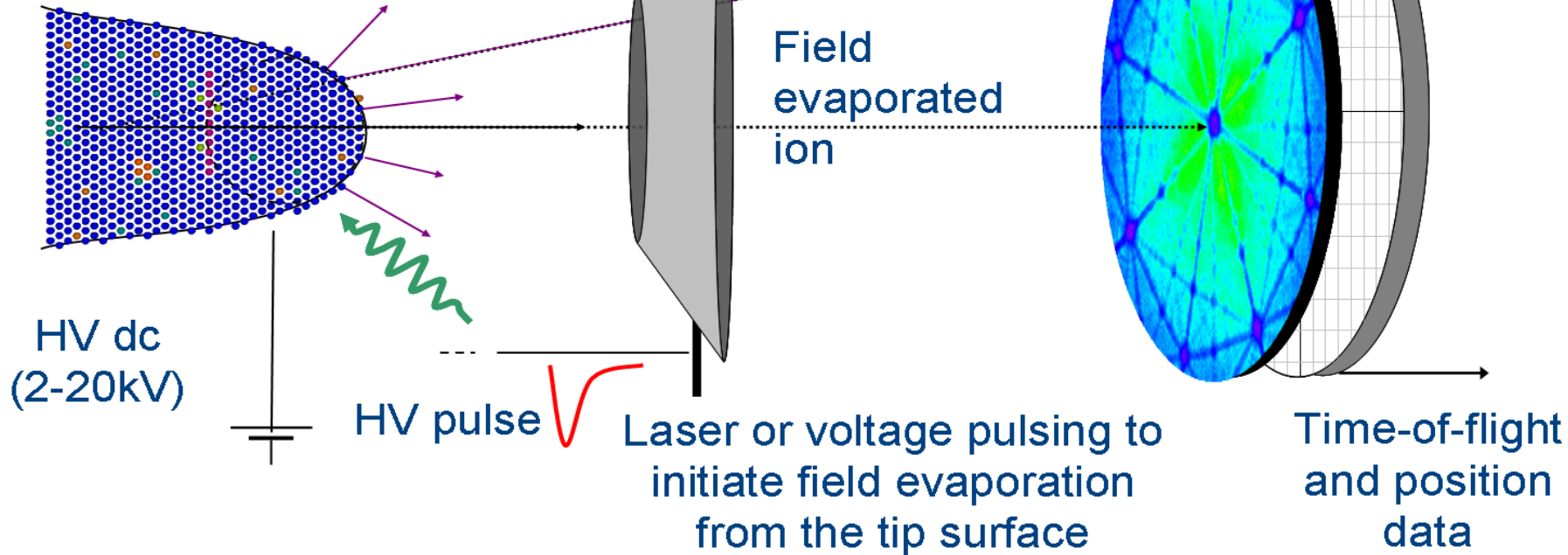
3D atom probe

Needle-shaped specimen
Tip radius 20-100nm
Cooled to 20-100K

E-field
 $\sim 10\text{-}50\text{V/nm}$

local-electrode

Position-sensitive detector



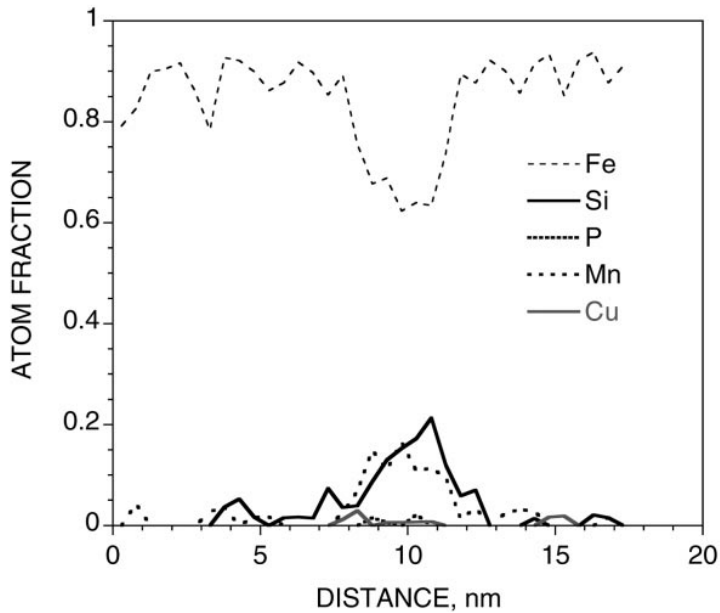
3D atom probe

- 15Kh2MFA Cr-Mo-V ocel, ozářený materiál

ozáření neutrony 10 let

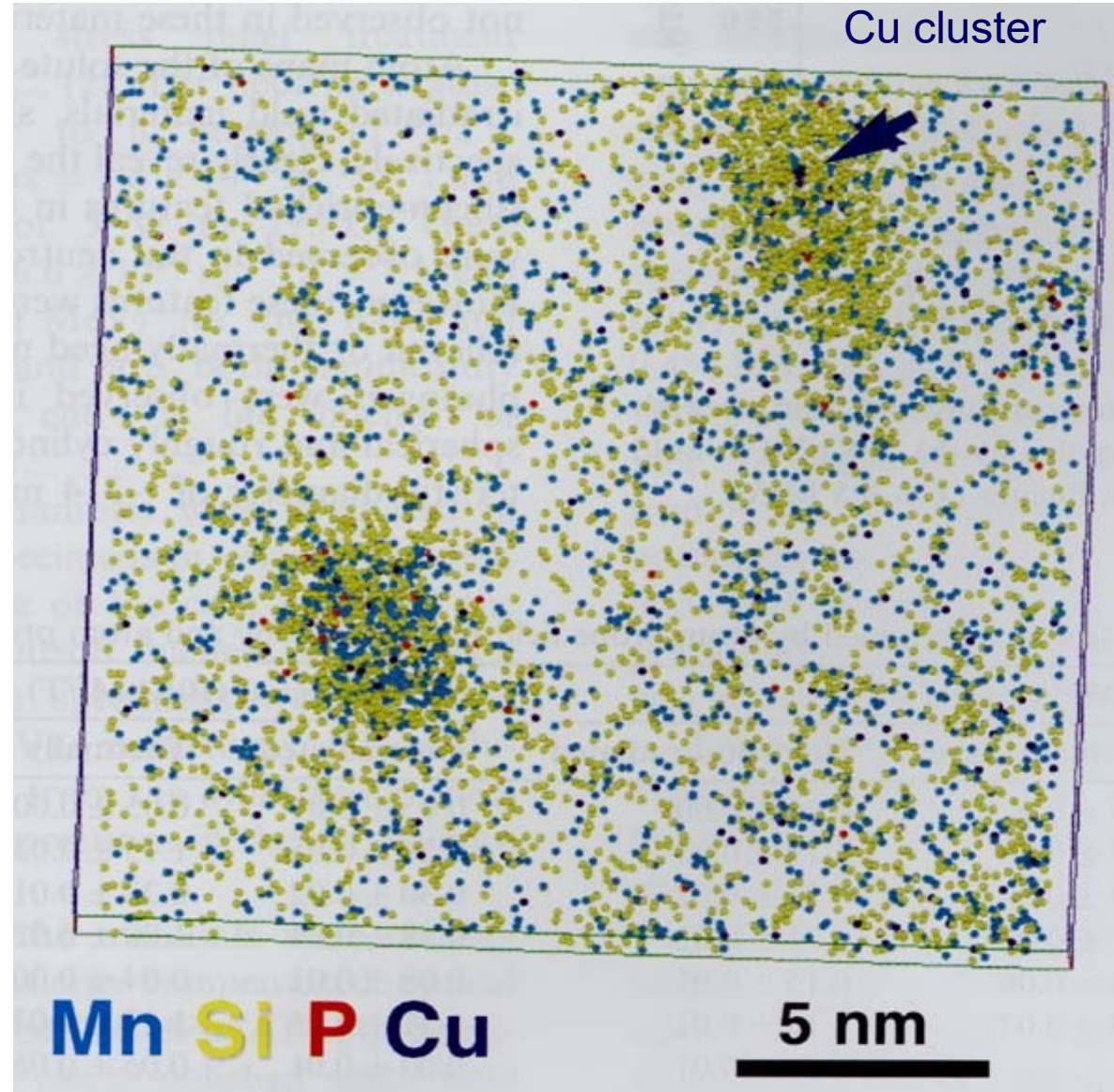
Fluence ($E > 0.5\text{MeV}$): $9.96 \times 10^{24}\text{m}^{-2}$

$T_{\text{irr}} = 270^\circ\text{C}$



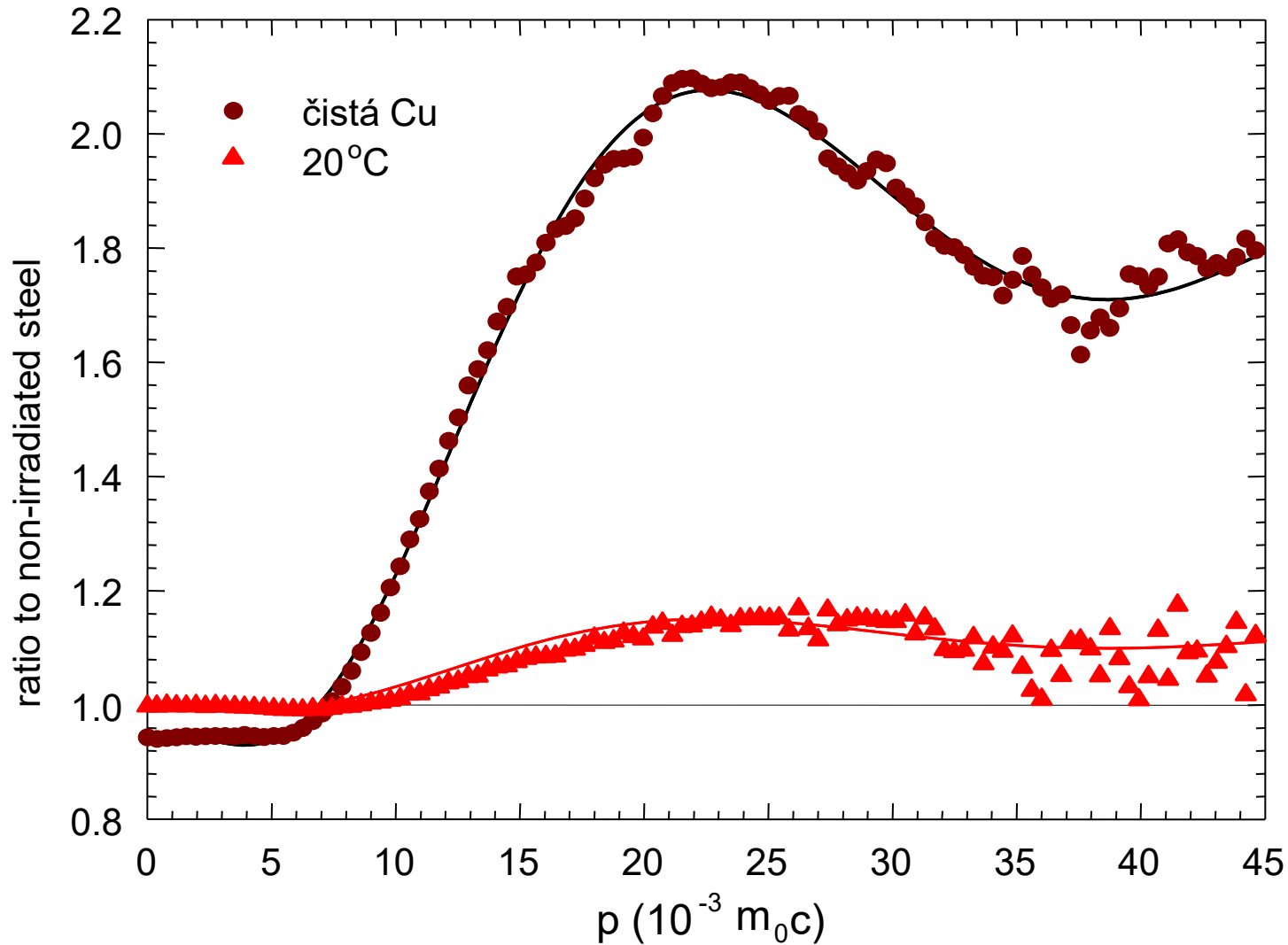
M.K. Miller, et al.

J. Nucl. Mater. Vol. 282 (2000), p. 83.



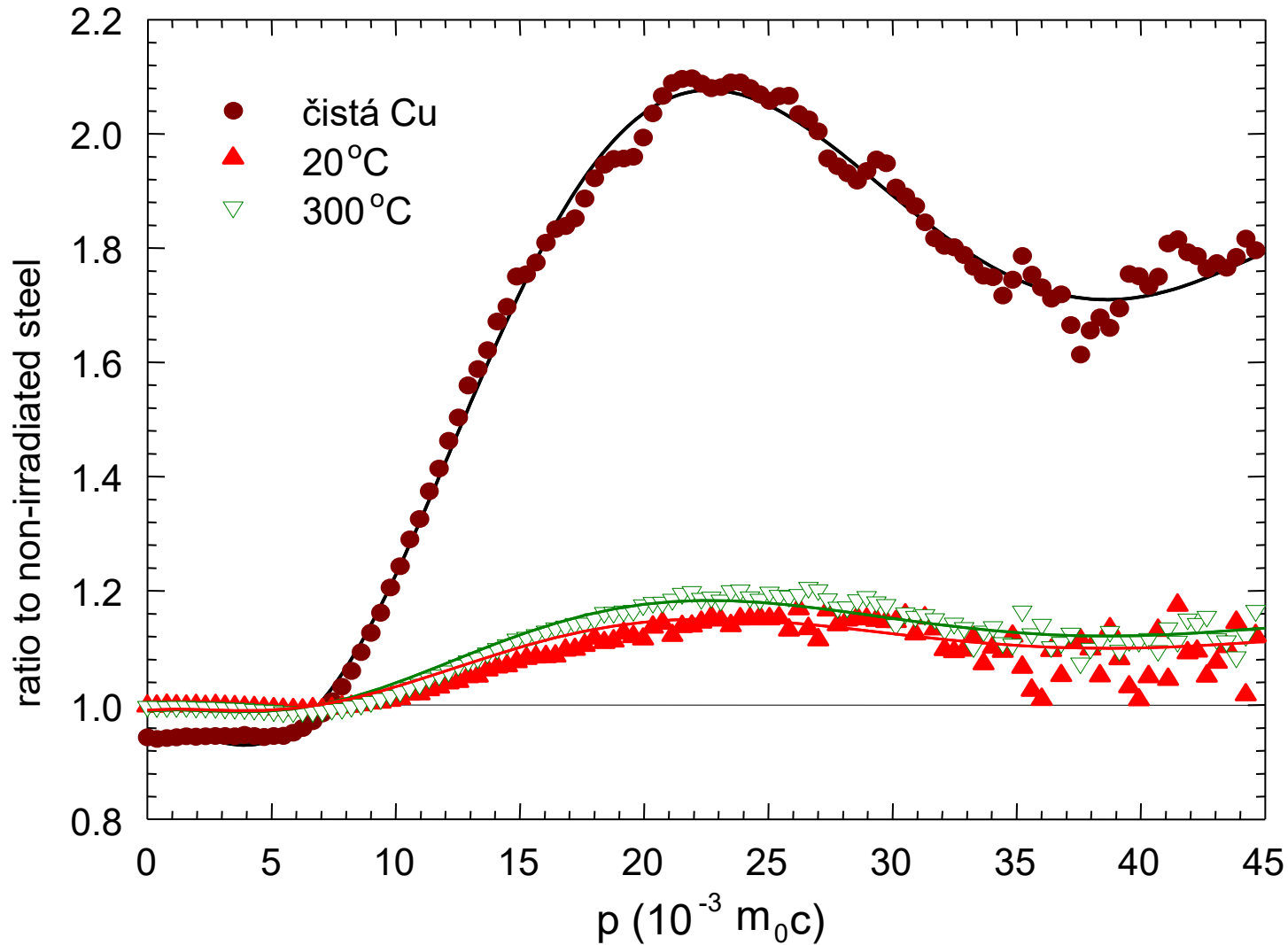
Teplotní vývoj mikrostruktury - CDB

- 15Kh2MFA Cr-Mo-V ocel, materiál ozářený 3 roky



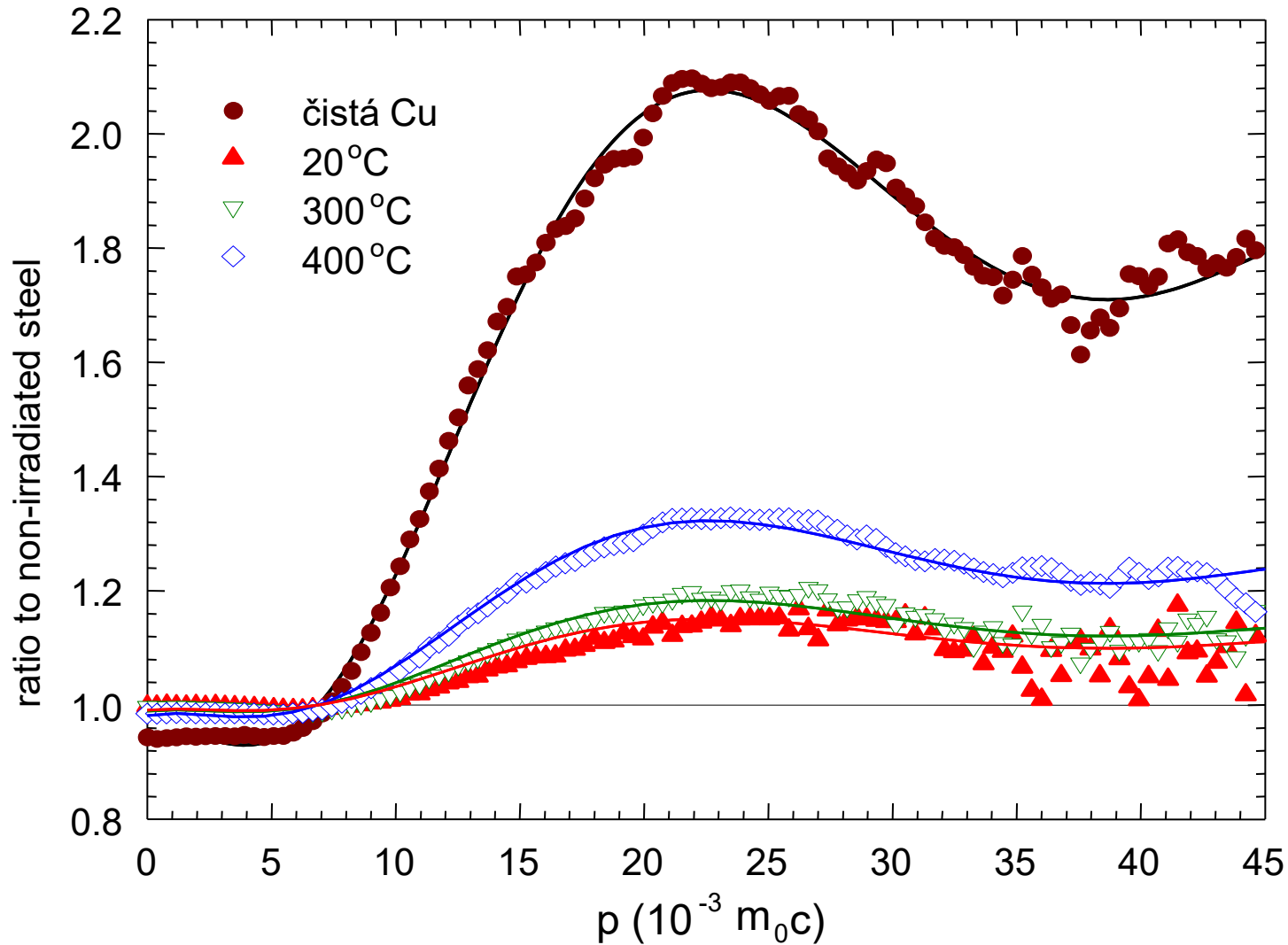
Teplotní vývoj mikrostruktury - CDB

- 15Kh2MFA Cr-Mo-V ocel, materiál ozářený 3 roky



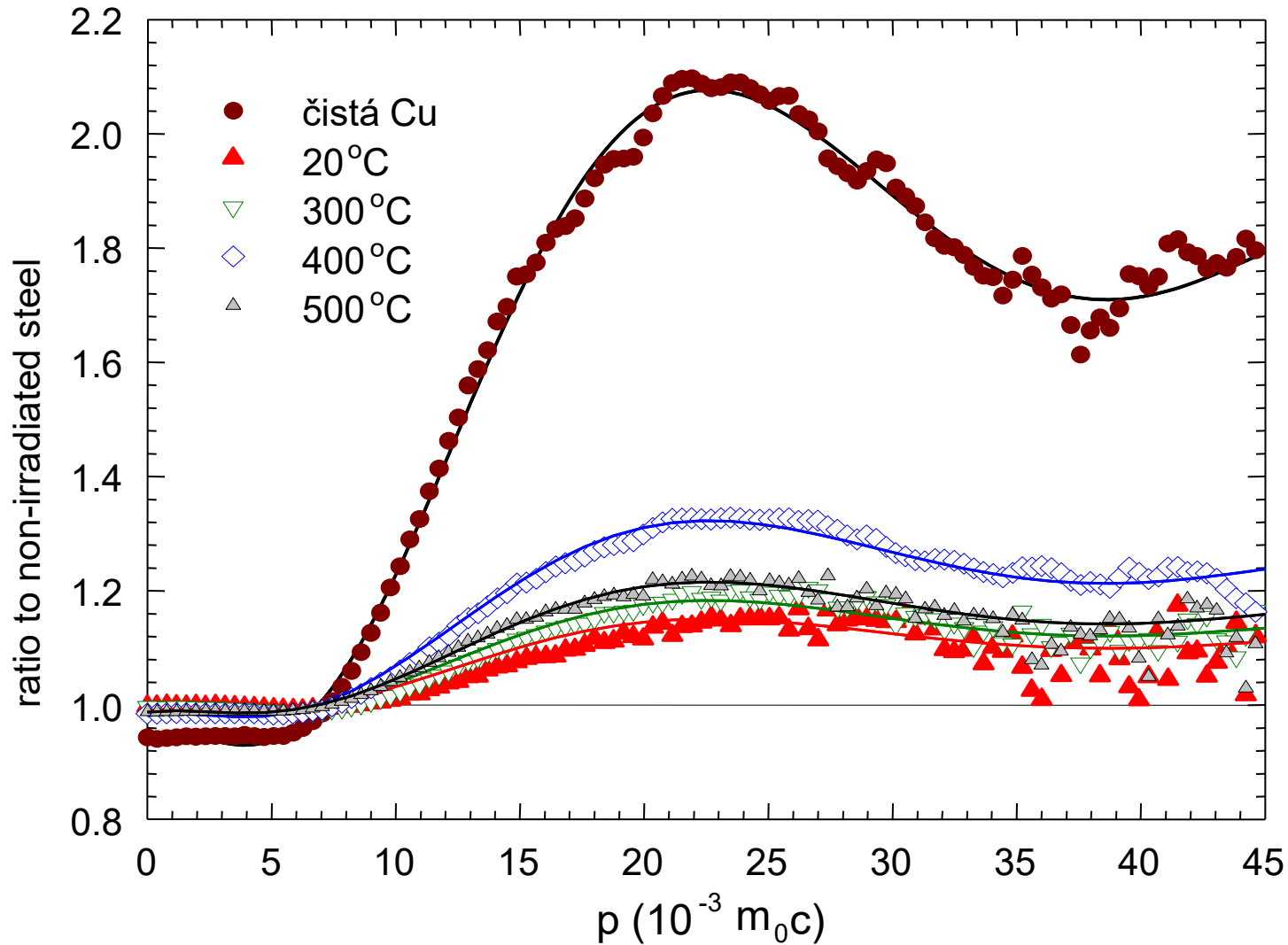
Teplotní vývoj mikrostruktury - CDB

- 15Kh2MFA Cr-Mo-V ocel, materiál ozářený 3 roky



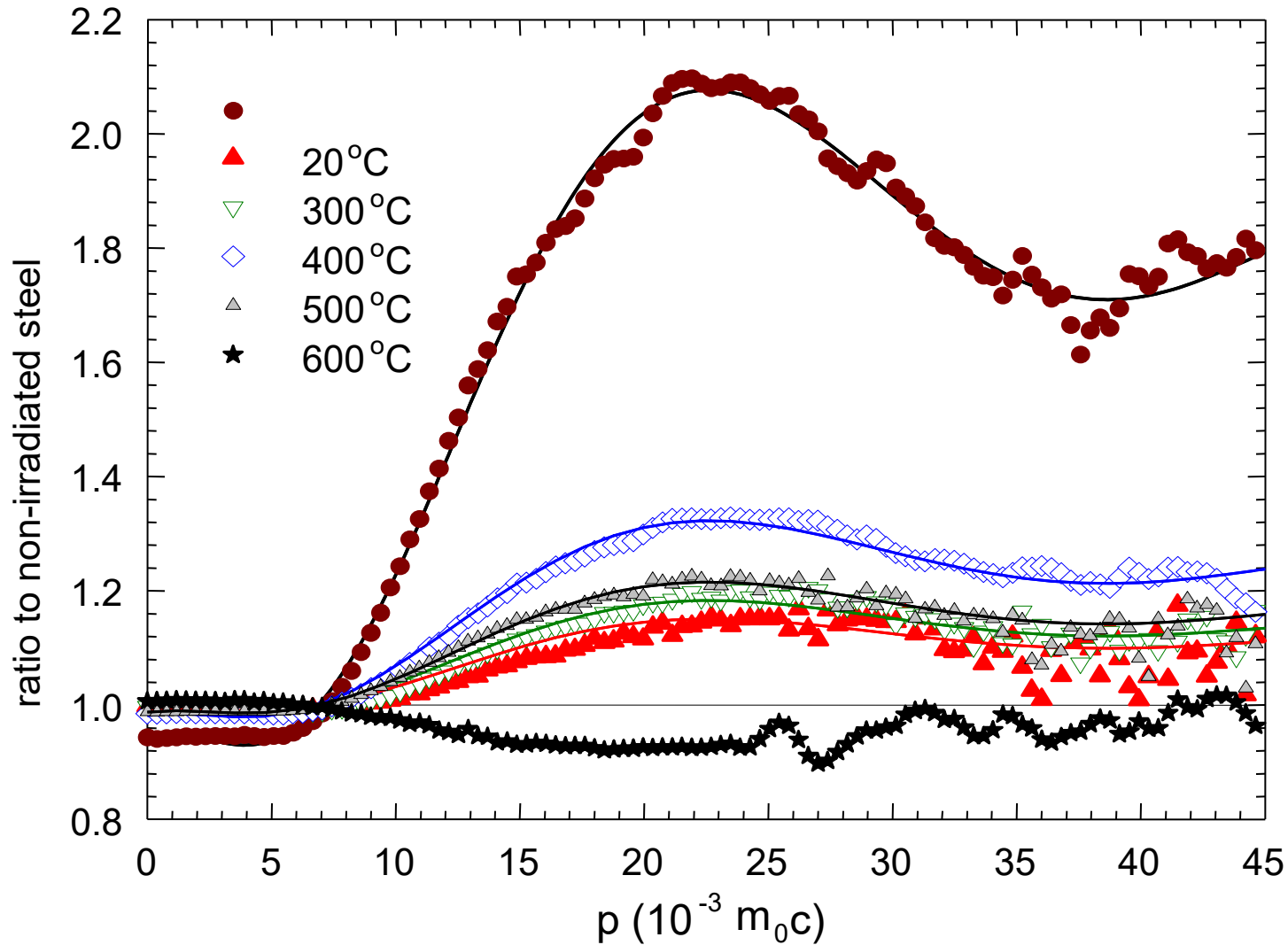
Teplotní vývoj mikrostruktury - CDB

- 15Kh2MFA Cr-Mo-V ocel, materiál ozářený 3 roky



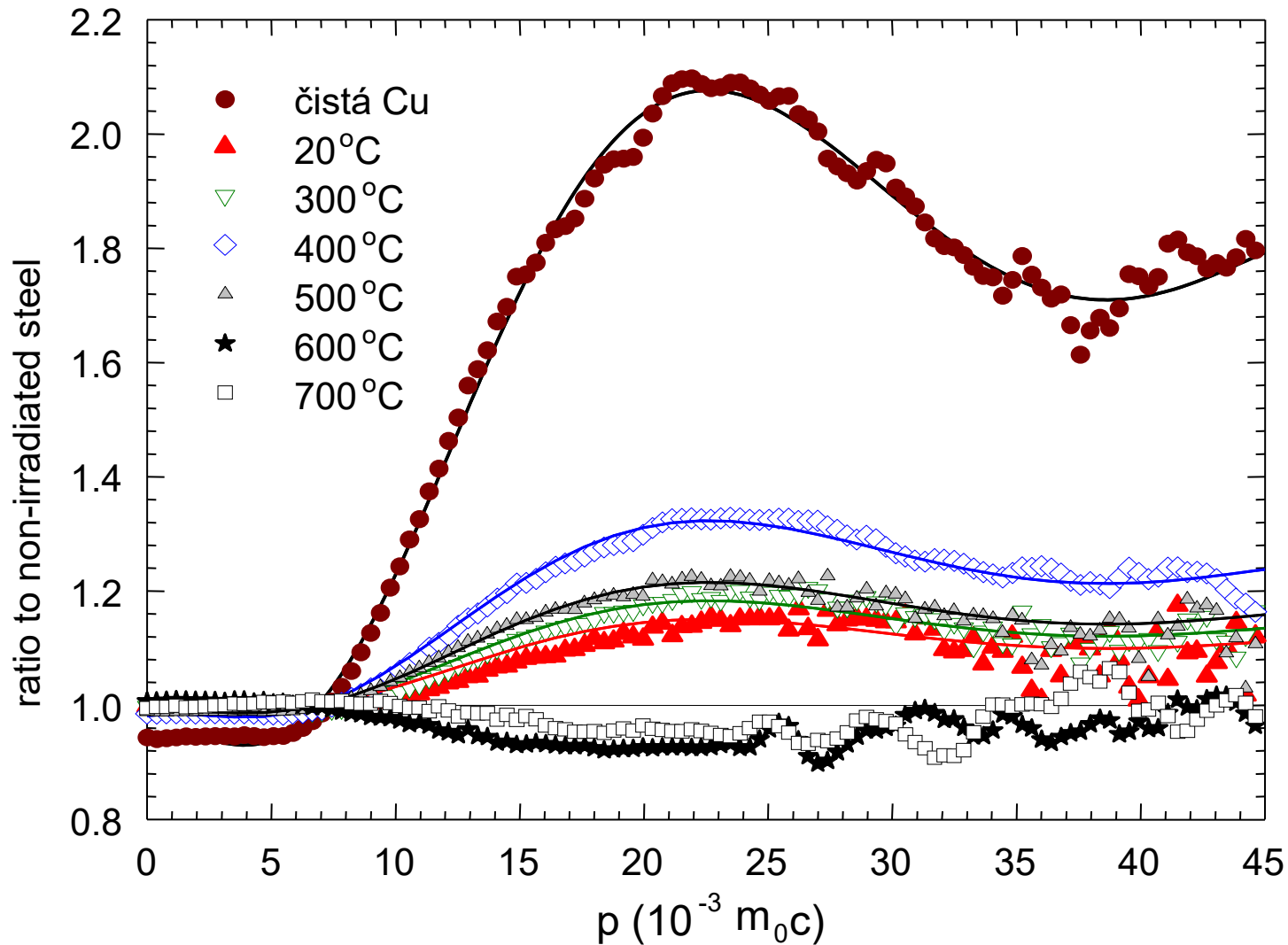
Teplotní vývoj mikrostruktury - CDB

- 15Kh2MFA Cr-Mo-V ocel, materiál ozářený 3 roky



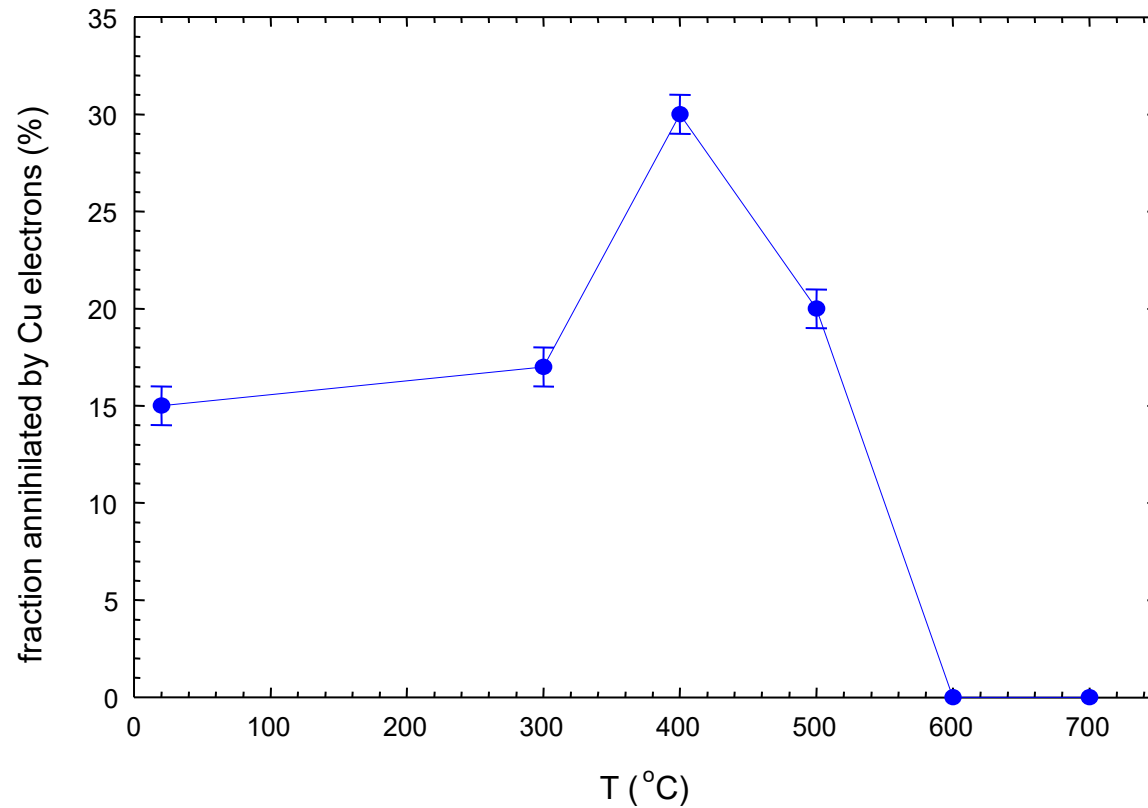
Teplotní vývoj mikrostruktury - CDB

- 15Kh2MFA Cr-Mo-V ocel, materiál ozářený 3 roky



Teplotní vývoj mikrostruktury - CDB

- 15Kh2MFA Cr-Mo-V ocel, materiál ozářený 3 roky
- frakce pozitronů, které anihilovaly s Cu elektrony



Teplotní vývoj mikrostruktury - CDB

- 15Kh2MFA Cr-Mo-V ocel, materiál ozářený 3 roky

CDB

podíl: ozářený/neozářený

klastry Cu

