

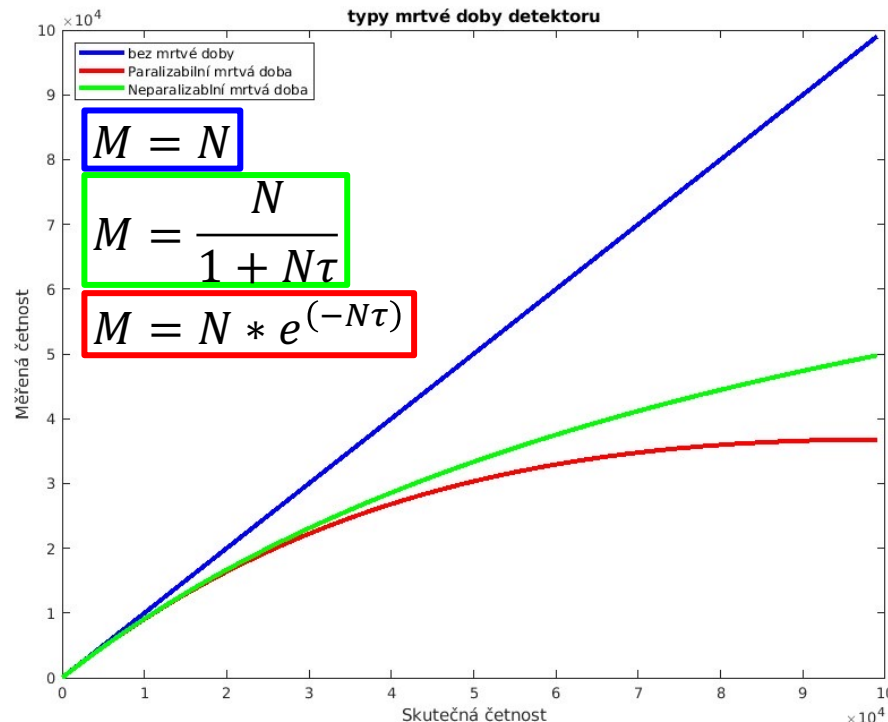
Vliv mrtvé doby při dozimetrii benigního onemocnění štítné žlázy

Samuel Šrobár, Pavel Solný



Mrtvá doba τ

- Doba, po kterou detektor po detekci částice není schopen detekovat další částici
- Paralizabilní mrtvá doba – pokud částice interaguje během mrtvé doby, prodlužuje dobu necitlivosti detektoru
- Neparalizabilní mrtvá doba – okno necitlivosti detektoru je fixní
- Pro terapeutické pacienty benigních onemocnění ŠŽ se snadno dostaneme do oblasti nelinearity
- Nutná korekce pro verifikační dozimetrické měření



M...měřená četnost

N...skutečná četnost

T...mrtvá doba detektoru

Parametry gamakamery udané výrobcem

- Krystal 9,5mm NaI(Tl)
- Energetické rozlišení $\leq 9,4\%$
- Rozsah energií 55-400keV
- Max cps bez rozptylu 250 000 s⁻¹
 s rozptylem 180 000 s⁻¹
- Počet fotonásobičů 14
- UFOV kruhové, průměr 21cm

Pozn. od 280 000 cps se nenavyšuje ani neklesá četnost, 250 000 cps je jako rezerva



Oblast linearity ^{99m}Tc

- ^{99m}Tc vhodný radionuklid:
- $T_{1/2} (^{99m}\text{T})=6\text{h} \Rightarrow$ možnost změření rozpadové křivky přes víkend
- $E_\gamma(^{99m}\text{Tc})=140,5\text{keV} \Rightarrow$ i případný pile-up efekt spadá do energetického rozsahu kamery

Oblast linearity ^{99m}Tc a ^{131}I - motivace

- ^{99m}Tc vhodný radionuklid:
- $T_{1/2} (^{99m}\text{T})=6\text{h} \Rightarrow$ možnost změření rozpadové křivky přes víkend
- $E_{\gamma} (^{99m}\text{Tc})=140,5\text{keV} \Rightarrow$ i případný pile-up efekt spadá do energetického rozsahu kamery

- $T_{1/2} (^{131}\text{I})=8,02$ dní $\Rightarrow$ nutno použít metodu několik aktivit ve stejné geometrii

• $E_{\gamma} (^{131}\text{I})$	intenzita
364 keV	81,5%
637 keV	7,16%
284 keV	6,12%
80 keV	2,62%
723 keV	1,77%

- Dvě gama linky jsou mimo energetický rozsah kamery. Je nutná korekce?

^{99m}Tc a ^{131}I - měření

- Všechna měření bez kolimátoru
- předpokládáme, že tvar spektra nemá vliv na pokles četnosti v důsledku mrtvé doby (! spoiler: zjistíme, že to asi není pravda)
- nemáme tak silné zdroje ^{131}I (během pracovních dní) abychom se dostali do oblasti nelinearity s nasazeným HPGE kolimátorem



Měření ^{99m}Tc – blízká geometrie

- Vzdálenost zdroj-krystal: 42cm
- Energetické okno ^{99m}Tc : 140 keV $\pm$ 10%
- Aktivita (začátek měření): 53,57MBq
- Doba snímku: 240s
- počet snímků: 720
- Celková doba (cca)
 $8 \cdot T_{1/2}(^{99m}\text{Tc})$ 48h =



Měření ^{99m}Tc – daleká geometrie

- Vzdálenost zdroj-krystal: 180cm
- Energetické okno ^{99m}Tc : 140 keV $\pm$ 10%
- Aktivita (začátek měření): 573MBq
- Doba snímku: 20s
- počet snímků: 720
- Celková doba (cca)
6,67 $\cdot$ T_{1/2}(^{99m}Tc) 40h =



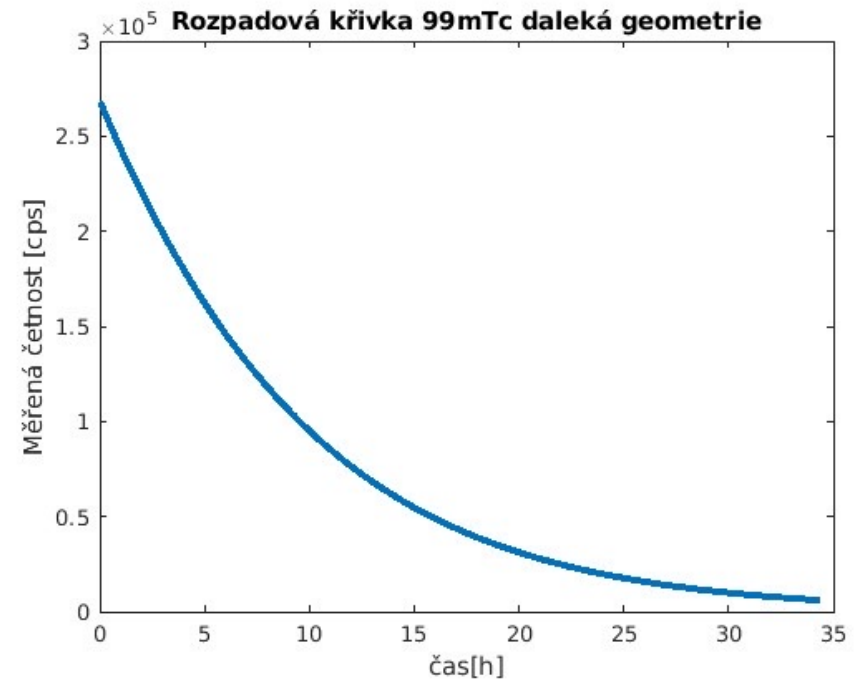
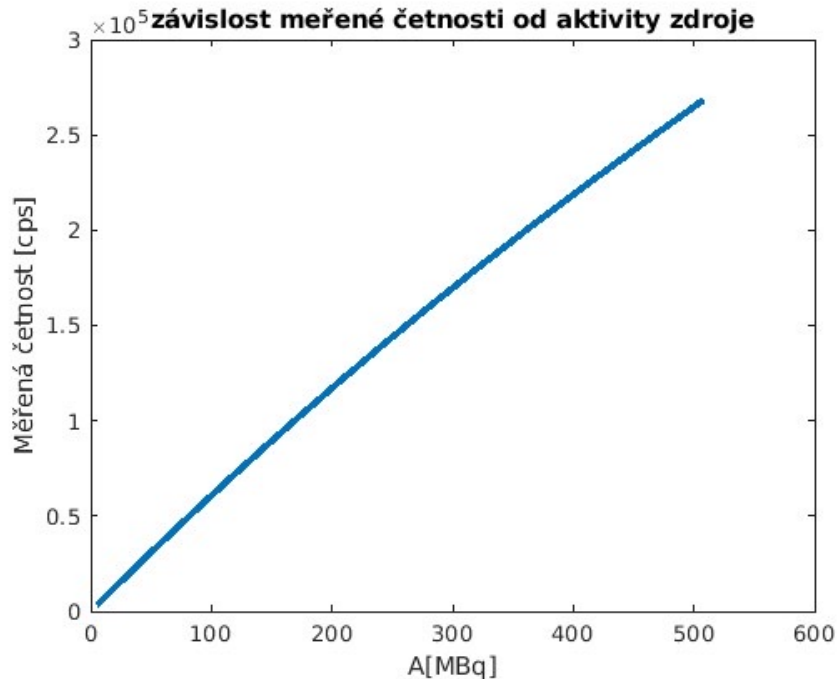
Měření ^{131}I – blízká geometrie

- Vzdálenost zdroj-krystal: 42cm
- Energetické okno ^{131}I : 364 keV $\pm$ 10%
- Doba měření : 40s
- Jako zdroje použito 10 kapslí o aktivitě 2,19–2,38 MBq různě nakombinovány
- měřená aktivita od do: 2,373 – 21,438 MBq



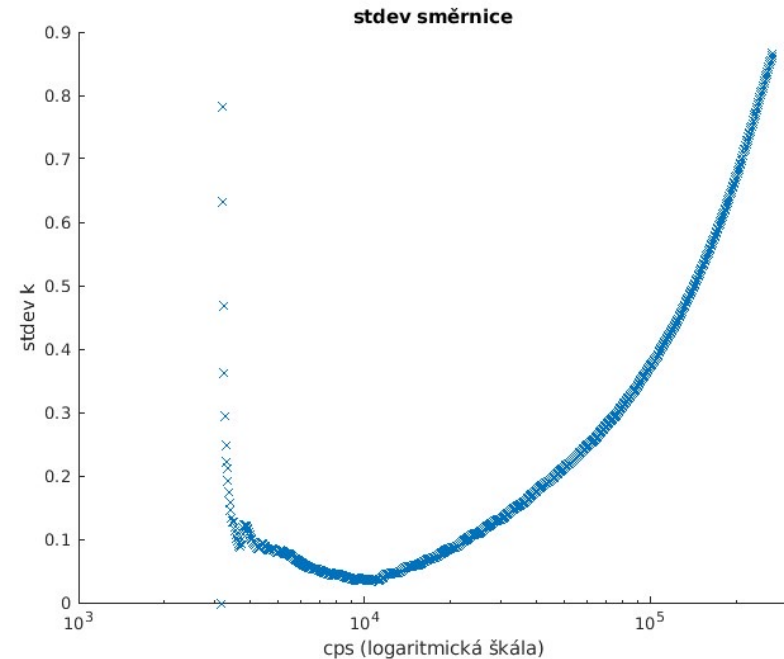
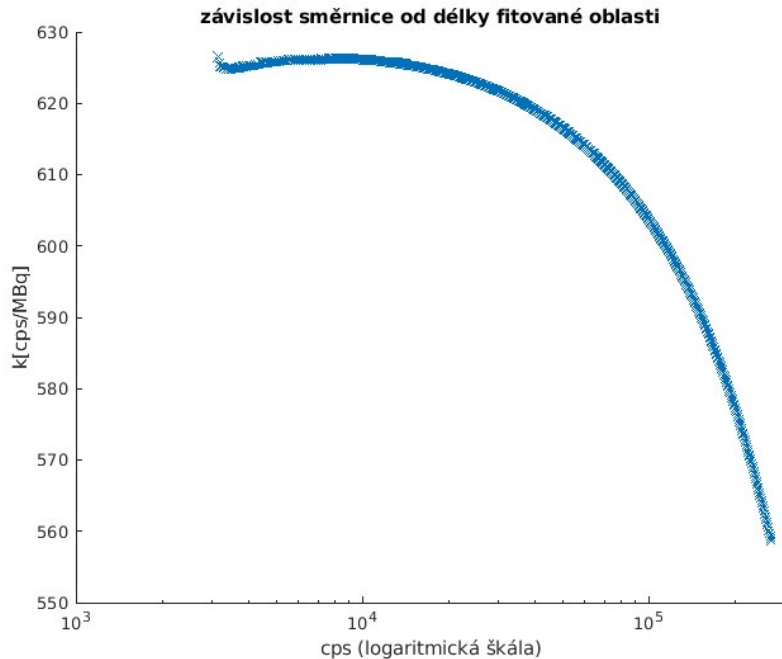
Výsledky ^{99m}Tc – daleká geometrie

- Skutečná četnost $N=k \cdot A$. Směrnici „k“ získáme lineární regresí oblasti s nízkou měřenou četností
- Fitujeme lineární závislosti postupně od nejnižší četnosti po nejvyšší.



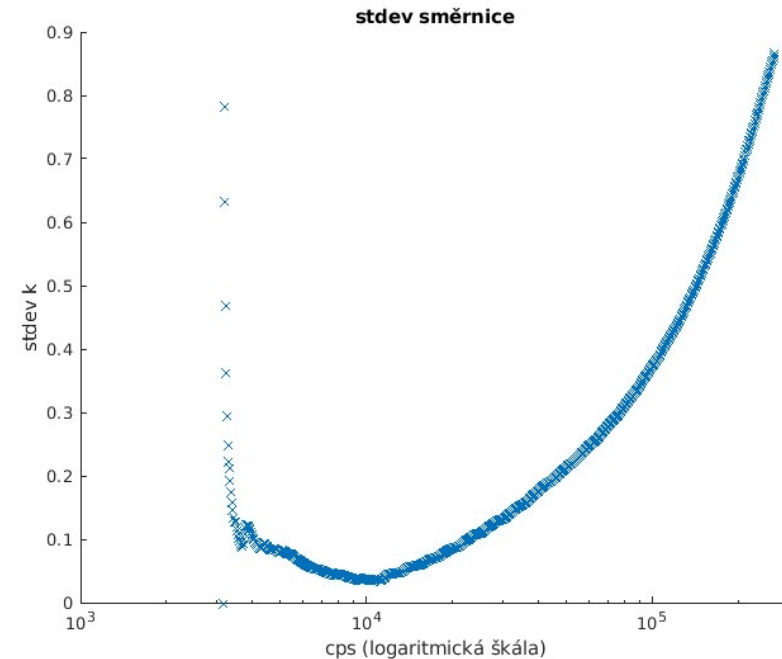
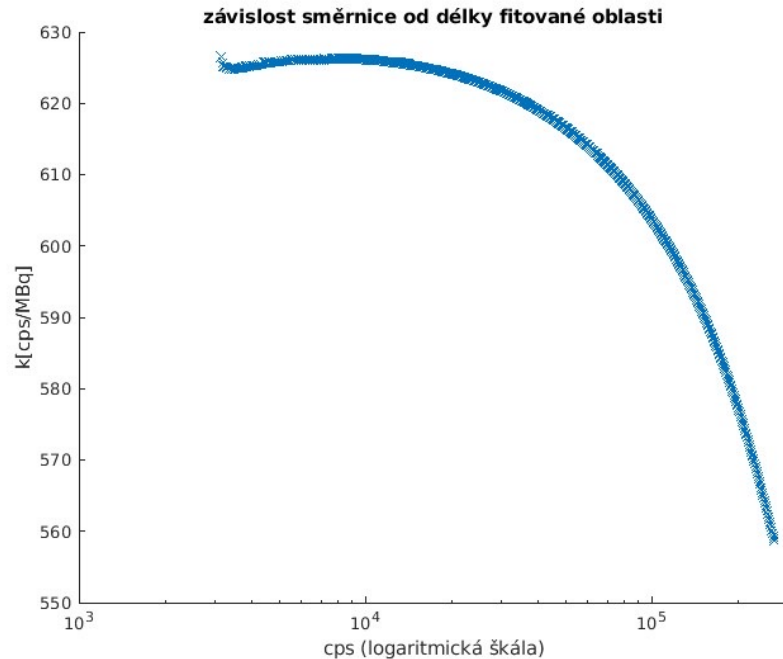
Oblast linearity ^{99m}Tc – daleká geometrie

- Skutečná četnost $N=k \cdot A$. Směrnici „k“ získáme lineární regresí oblasti s nízkou měřenou četností
- Fitujeme lineární závislosti postupně od nejnižší četnosti po nejvyšší.



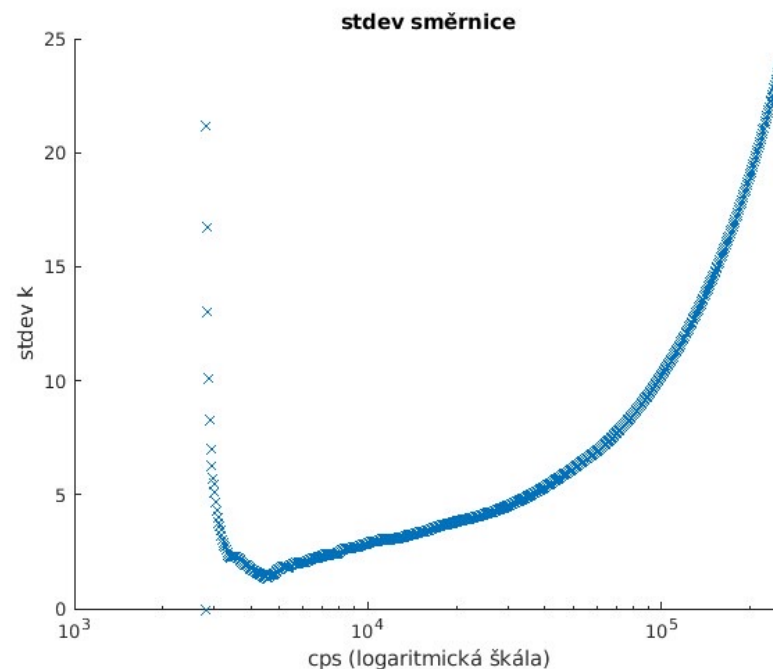
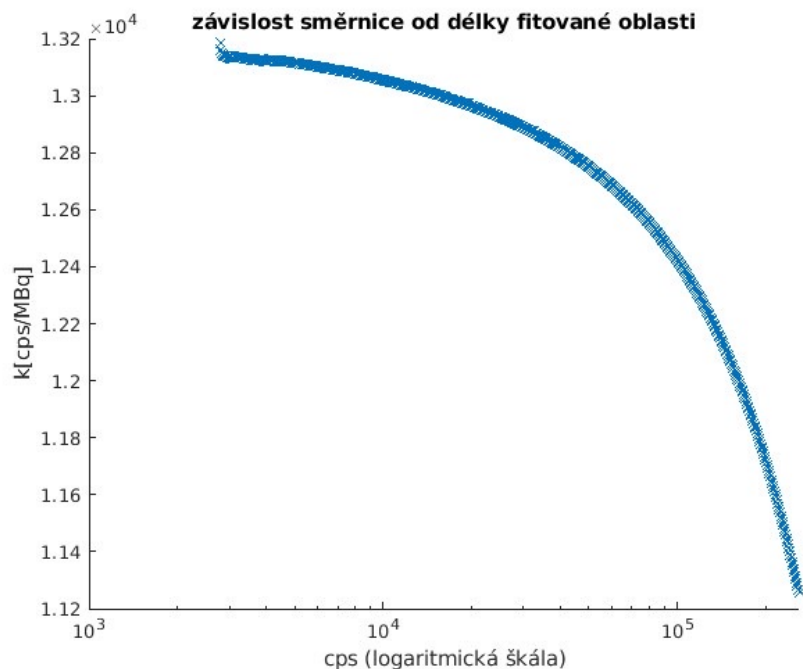
Výsledky ^{99m}Tc – daleká geometrie

- V oblasti měřené četnosti 5 000-12 000 cps se směrnice fitu mění jen málo a nejnižší nejistotu má pro četnost 11 000 cps. To určíme jako optimální oblast pro stanovení přepočtu mezi aktivitou A a skutečnou četností $N=k \cdot A$, $k=626,16 \pm 0,036$



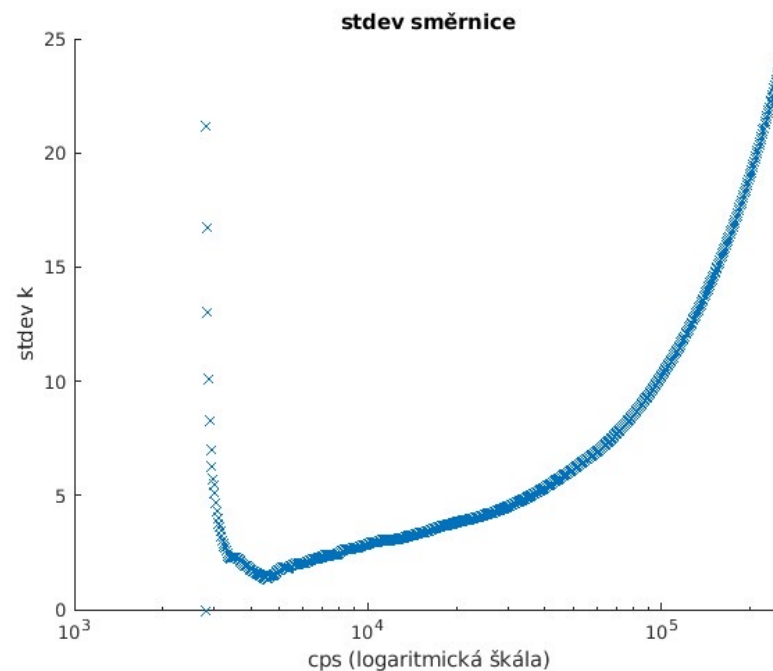
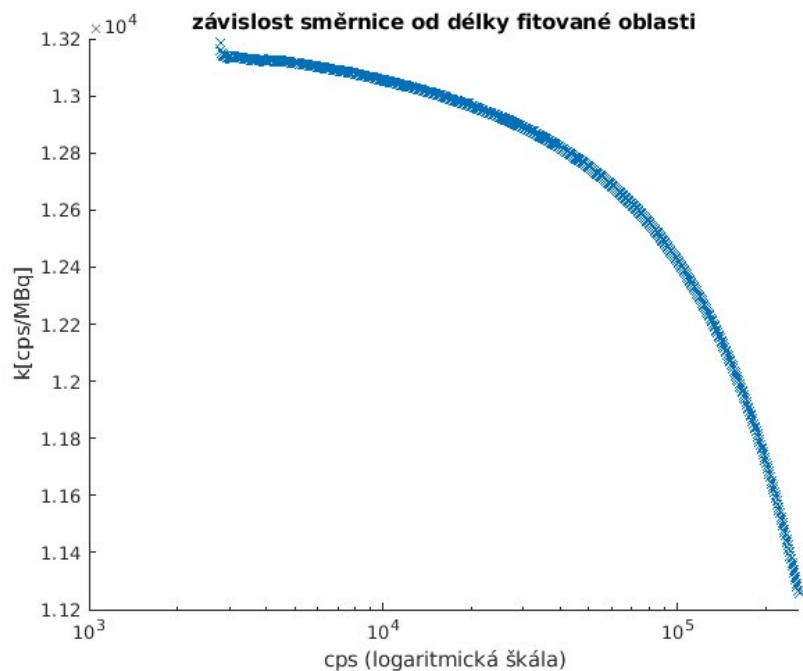
Výsledky ^{99m}Tc – blízká geometrie

- Pro dalekou geometrii OK. Co blízká? Analogickým postupem dostáváme tyto výsledky
- „Plató“ pro směrnici i minimum nejistoty se posunulo k nižším četnostem



Výsledky ^{99m}Tc – blízká geometrie

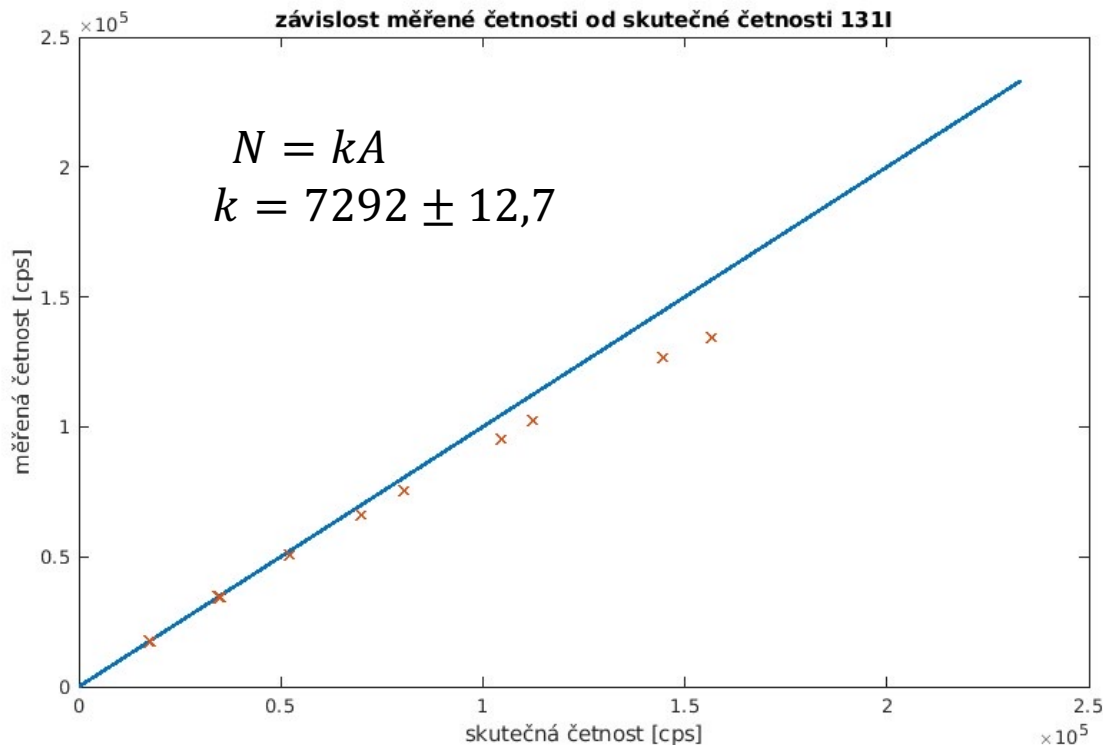
- Optimum je fitovat četnost lineárně do 5 000 cps. Pro přepoččet $N=A*k$ dostáváme $k= 13119,6 \pm 1,76$
- Fitem do 20 000 cps dostávámé $k= 12968,2 \pm 3.82$ což se liší jen o 1,2% takže stále dobré



Výsledky ^{131}I – blízká geometrie

- U $^{99\text{m}}\text{Tc}$ sme dosahovali najnižších čítností kolem 3 000 cps. U ^{131}I je minimální čítností 17 000 cps.

A[MBq]	Cps-pozadí
2,373	17 327
4,756	34 234
7,137	50 855
9,518	66 146
9,524	66 277
10,98	75 831
14,28	95 738
15,37	102 685
19,77	126 716
21,44	134 582



Mrtvá doba ^{131}I

- 4 modely: neparalizabilní (NeparMD), paralizabilní (ParMD) a škálované verze (ParMD-š, NeparMD-š)

- NeparMD

$$M = \frac{N}{1 + N\tau}$$

- ParMD

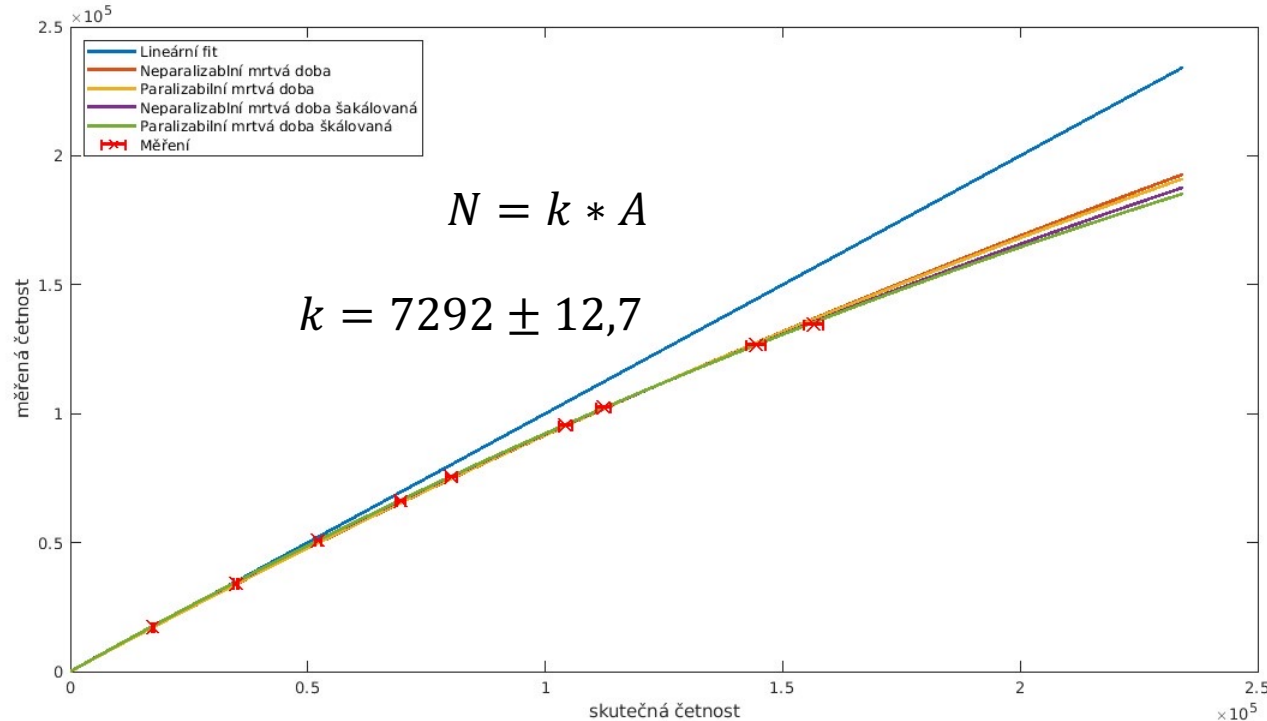
$$M = N * e^{(-N\tau)}$$

- NeparMD-š

$$M = \frac{sN}{1 + sN\tau}$$

- ParMD-š

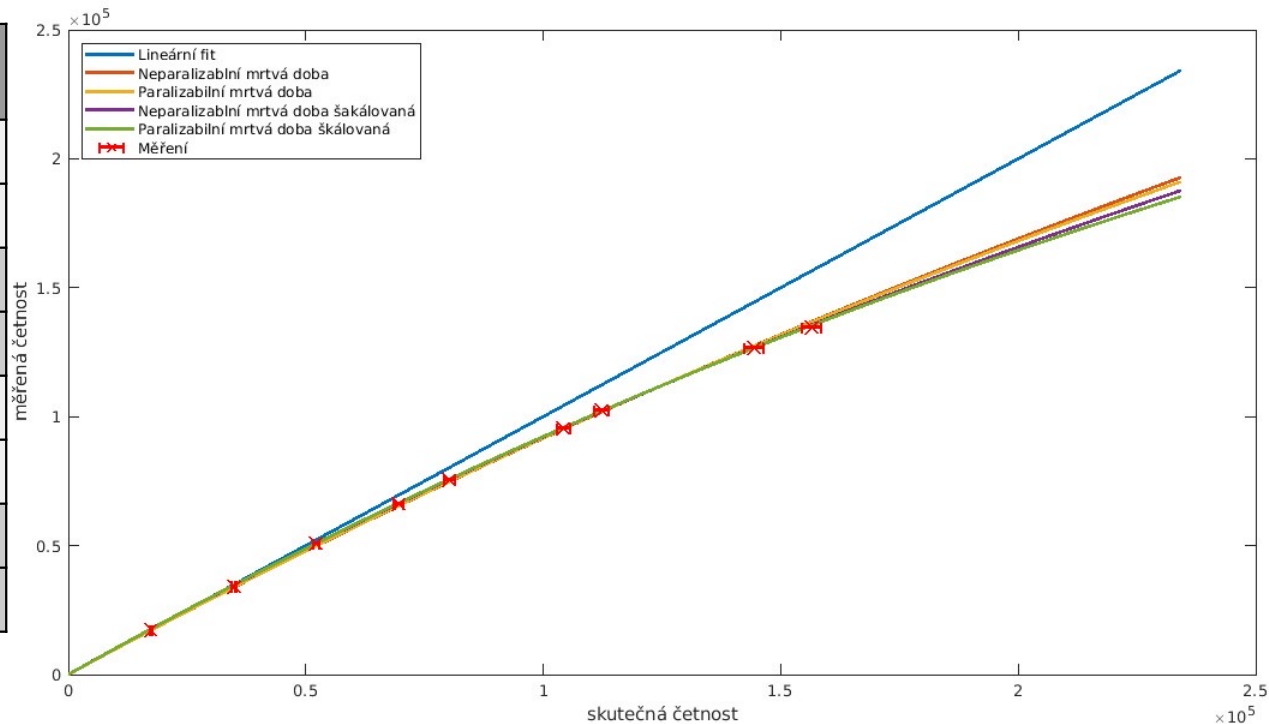
$$M = sN * e^{(-sN\tau)}$$



Mrtvá doba ^{131}I

- 4 modely: paralizabilní (ParMD), neparalizabilní (NeparMD) a škálované verze (ParMD-š, NeparMD-š)

Model	Parametry modelu	
NeparMD	T	$932,2 \pm 33,87 \text{ ns}$
	S	1 (z definice)
ParMD	T	$879,9 \pm 27,30 \text{ ns}$
	S	1 (z definice)
NeparMD-š	T	$1245,2 \pm 44,81 \text{ ns}$
	S	$1.041 \pm 0,0058$
ParMD-š	T	$1109,6 \pm 29,80 \text{ ns}$
	S	$1.035 \pm 0,0048$



Mrtvá doba ^{131}I

- Výběr nejsprávnějšího modelu podle AIC (Akaike information criterion)-závisí od počtu parametrů V a logaritmu maximální věrohodnosti (likelihood):

$$AIC = 2V - 2\ln(\hat{L})$$

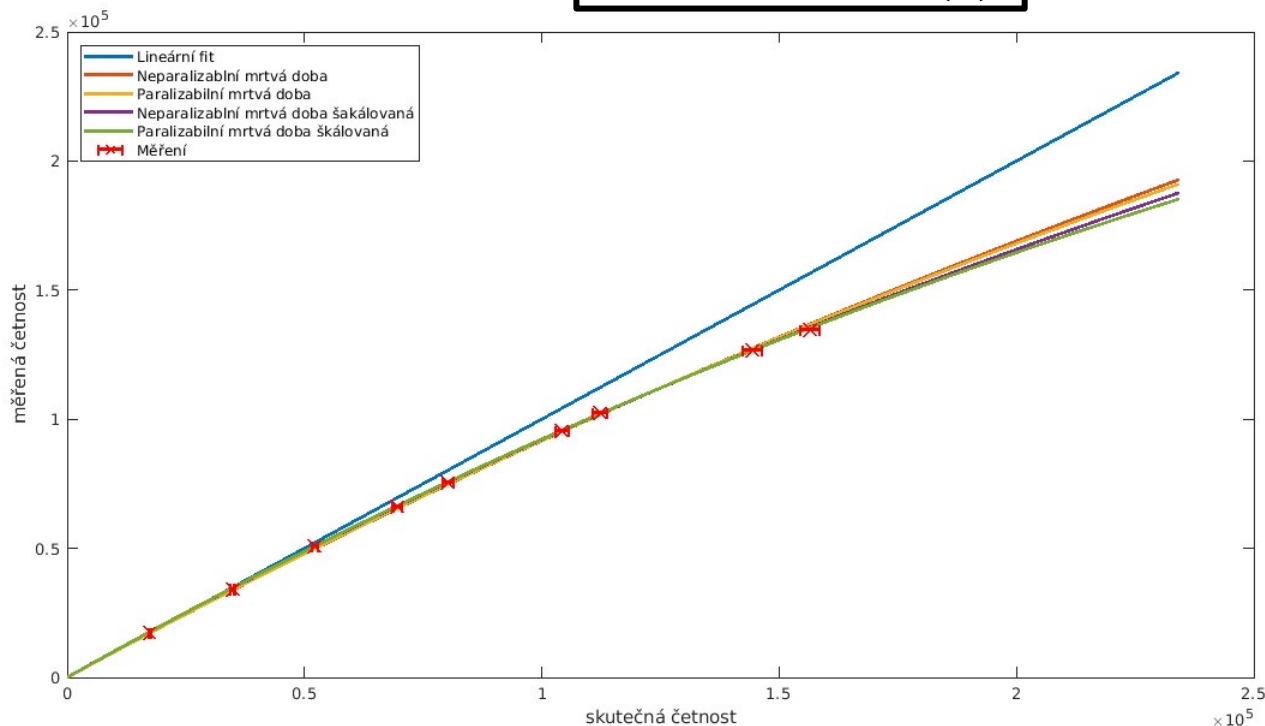
Model	AIC	Porovnání modelů
NeparMD	217,430	$3,120 \cdot 10^{-06}$
ParMD	214,902	$1,132 \cdot 10^{-05}$
NeparMD-š	196,312	0,123
ParMD-š	192,125	1

Relativní porovnání modelů na základe AIC:

$$e^{([AIC_{min} - AIC_n]/2)}$$

AIC_{min} ...nejmenší AIC

AIC_n AIC pro n-tý model



Mrtvá doba ^{131}I a $^{99\text{m}}\text{Tc}$ porovnání

- Optimální model – škálovaná paralizabilní MD
- Porovnání s $^{99\text{m}}\text{Tc}$ – škála vychází prakticky $s=1 \Rightarrow$ u $^{99\text{m}}\text{Tc}$ platí klasický vztah pro paralizabilní MD
- Odpovídá předpokladu, že u měření $^{99\text{m}}\text{Tc}$ nedopadá na kameru nic mimo jejího energetického rozsahu
- U ^{131}I je skutečná četnost impulzů o 3,5% vyšší kvůli $E_\gamma=637$ keV o intenzitě 7,16%. Po přepočtu uvážení účinností by měl být příspěvek 5,2% ale něco po Comptonovském rozptylu přispěje do energetického okna – problém pro MC simulace

měření	T	s
^{131}I blízko	1110 ± 30 ns	$1,035 \pm 0,005$
$^{99\text{m}}\text{Tc}$ blízko	$693,8 \pm 0,1$	$1,000 \pm (2,7 \cdot 10^{-5})$
$^{99\text{m}}\text{Tc}$ daleko	$5,460 \pm 0,35$	$1,001 \pm (8,7 \cdot 10^{-5})$

Mrtvá doba ^{131}I a $^{99\text{m}}\text{Tc}$ porovnání

- Mrtvá doba **není stejná pro různé konfigurace**, závisí na geometrii (nehomogenní zatížení fotonásobičů?) a radionuklidu (od maximální energie nebo od tvaru spektra?) – pro klinické využití nutno měřit pro danou geometrii, nuklid a kolimátor, **nemůžeme si to (moc) zlehčovat**

měření	T	S
^{131}I blízko	$1109,6 \pm 29,80 \text{ ns}$	$1,035 \pm 0,0048$
$^{99\text{m}}\text{Tc}$ blízko	$693,8 \pm 0,11$	$1,000 \pm (2,7 \cdot 10^{-5})$
$^{99\text{m}}\text{Tc}$ daleko	$5,460 \pm 0,35$	$1,001 \pm (8,7 \cdot 10^{-5})$

Příspěvek k četnosti od 637 keV

E_γ [keV]	$\mu[\text{cm}^{-1}]^{(1)}$	Intensity %	$P(\text{interakce})^{(2)} [\%]$	Příspěvek ⁽³⁾ [%]
284	0,651	6,12	46,140	8,702
364	0,475	81,5	36,349	91,298
637	0,287	7,16	23,839	5,260

(1) zdroj: W.Mannhart and H.Vonach : Gamma-ray Absorption coefficient for NaI(Tl)

(2) pravděpodobnost úplné absorpce v krystalu NaI(Tl) o tloušťce $d=9,5\text{mm}$ podle:

$$P(\text{interakce}) = (1 - e^{(-\mu d)})$$

(3) příspěvek je normovaný na součet intenzity a $P(\text{interakce})$ od 284keV a 364keV – ty spadají do energetického rozsahu (jejich příspěvky v součtu=100%)

- U ^{131}I je skutečná četnost impulzů o 3,5% vyšší kvůli $E_\gamma=637\text{ keV}$ o intenzitě 7,16%. Po přepočtu uvážení účinností by měl být příspěvek 5,26% ale něco přispěje do energetického okna po comptonovském rozptylu – problém vyžadující MC simulace
- Neuvažujeme sumace impulzů mimo energetické okno

Korekce

Korekce **C** převádí měřenou četnost **M** na skutečnou četnost **N** a je funkcí **M**

$$N = C(M)M$$

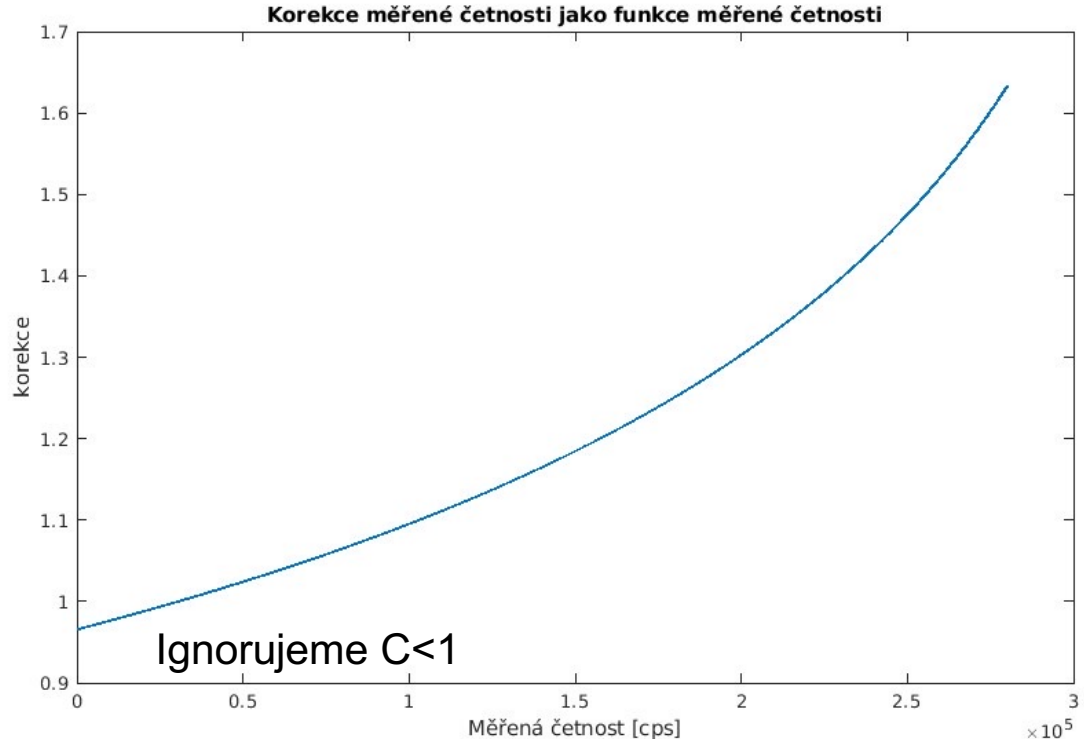
$$M = sNe^{(-sN\tau)} = sC(M)Me^{(-sCM\tau)}$$

Řešením funkce tvaru $x = xe^x$ je lambertova W funkce, která není elementární funkcí

Pro náš případ má korekce potom tvar:

$$C(M) = \frac{-W(-sM\tau)}{(sM\tau)}$$

Nebo můžeme body interpolovat...



Demonstrace vlivu korekce na verifikaci dávky

$$fit = cps_0 * \exp\left(\frac{-\ln(2) * t}{T_{ef}}\right) - \exp\left(\frac{-\ln(2) * t * T_{ef} + T_{up}}{T_{ef} * T_{up}}\right)$$

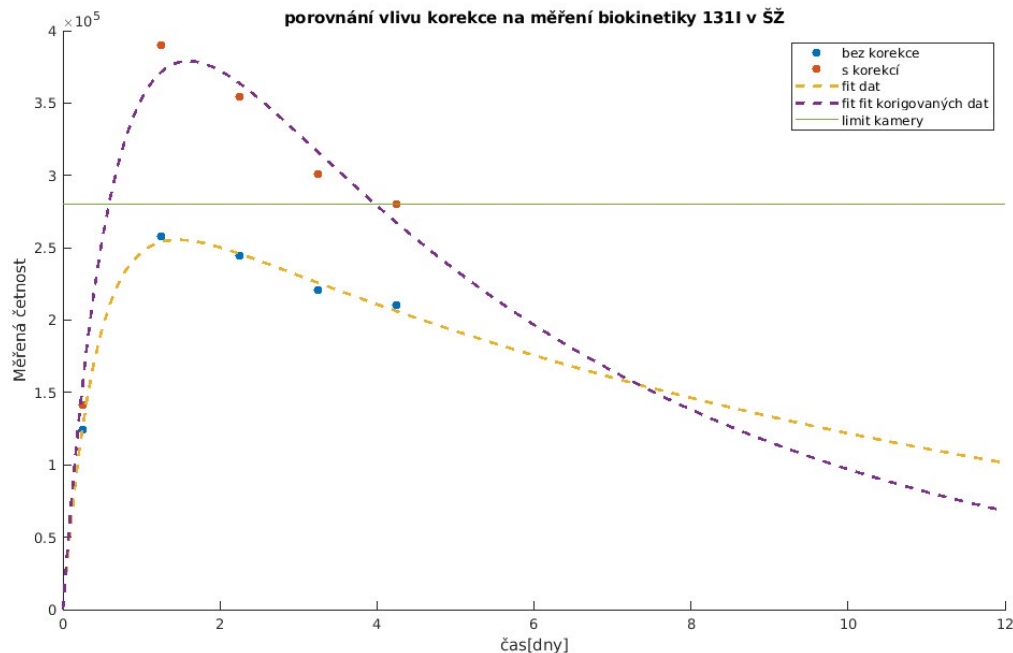
	Bez korekce	S korekcí
cps ₀	465347±61014	277919±8750
T _{ef} [d]	5,58±1,78	10,33±1,60
T _{up} [d]	0,405±0,098	0,267±0,019

Poměr ploch pod křivkou nekorigovaného fitu ke korigovanému je 86,5%. Dávka je přímo úměrná ploše pod křivkou. Jinými slovy, bez korekce by jsme podhodnotili dávku o 13.5%.

U nekorigovaných dat dokonce v tomto případě dostáváme nefyzikální efektivní poločas.

$$T_{1/2}(^{131}\text{I})=8,02\text{d}$$

Vygenerované data měření pacienta pro T_{ef}=6d, T_{up}=0,3d a cps₀=300 000 (±randomizace hodnot)



Závěr

- Korekce nutná pro měření pacientů se SŽ kterým byla podána terapeutická aktivita (u CA se v zorném poli kamery tolik aktivity nenachází)
- **POUŽÍVAT HEGP na měření radiojódu**, pro MEGP se snadno dosáhne oblast nelinearity
- Nutno prozkoumat vliv kolimátoru, geometrie – jak moc to ovlivní korekci?

Dotazy?

Děkujeme za pozornost

