

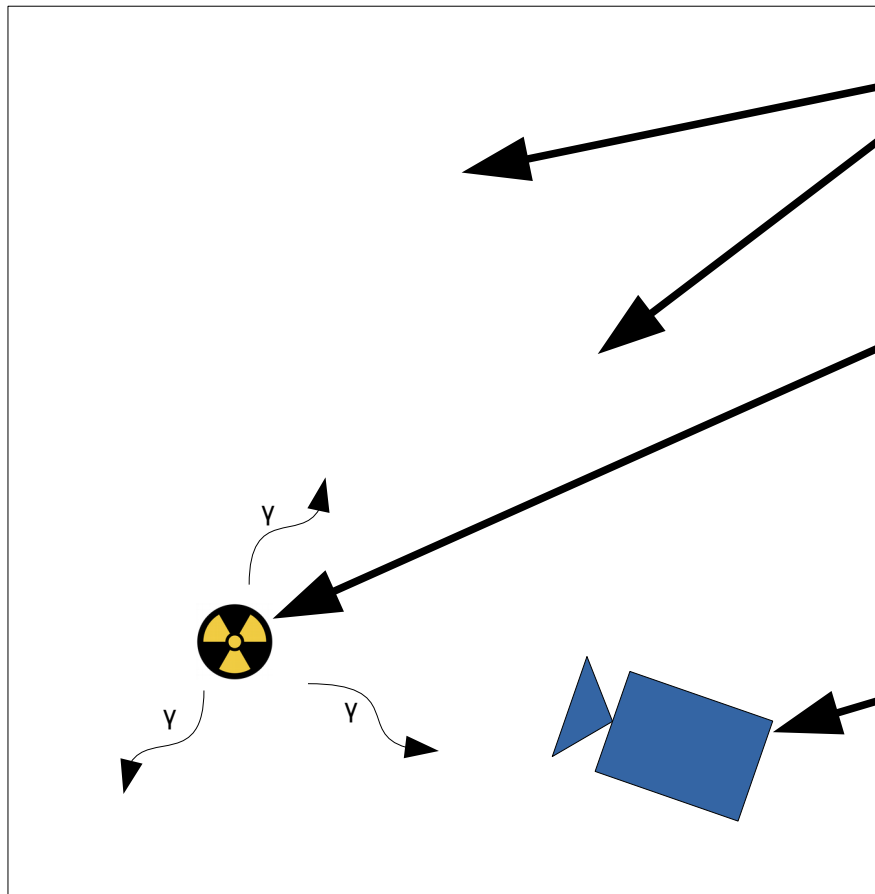
FACULTY
OF MATHEMATICS
AND PHYSICS
Charles University

System pro 3D lokalizaci zdrojů gamma záření Comptonovou kamerou založenou na detektorech Timepix3

Petr Mánek
pm@petrmanek.cz

Vedoucí práce: Filip Zavoral
zavoral@ksi.mff.cuni.cz

γ -kamera



(1) Prostředí (*domain*)

- dobře definovaná množina

(2) Zdroj

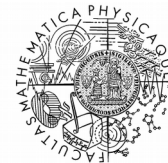
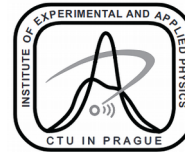
- vyzařuje γ záření (ionizující fotony)
- jeho poloha není přesně známa
→ chceme jí zjistit

(3) γ kamera

- citlivá na γ fotony,
- vytvoří obraz prostředí (v něm je zdroji přiřazena vysoká intenzita)

Ref.: 1959, Anger et al.
1974, Todd et al.
1977, Everett et al.

Timepix3

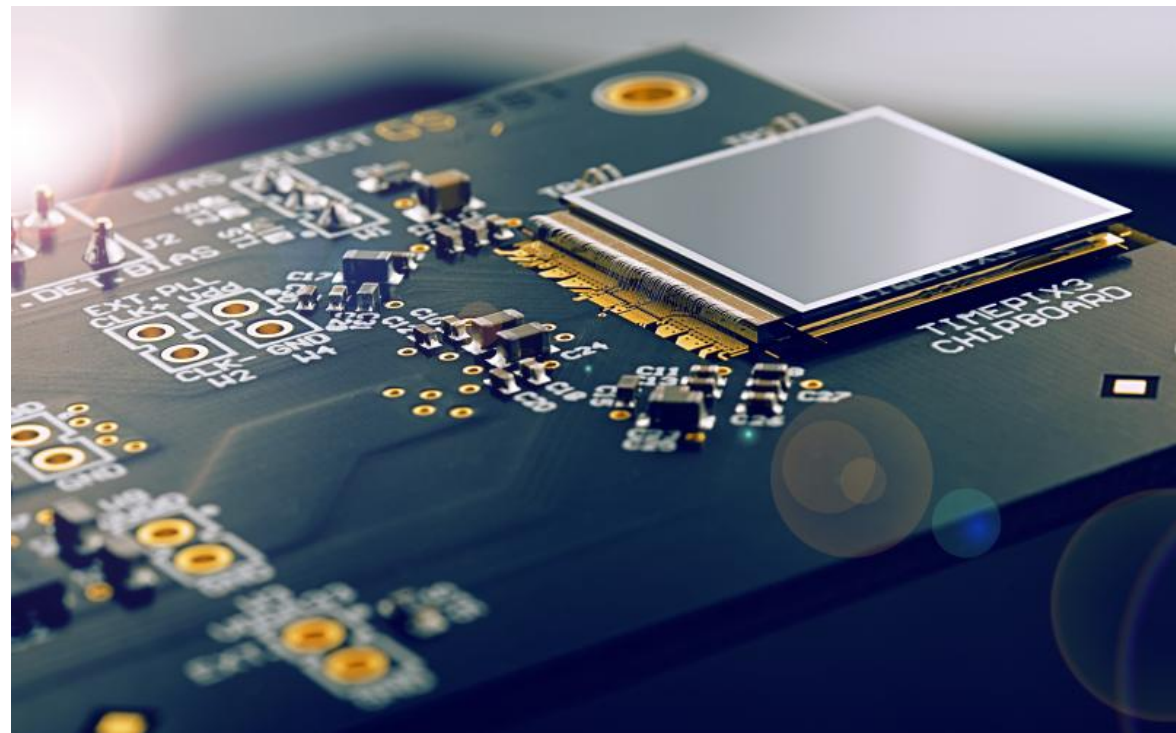
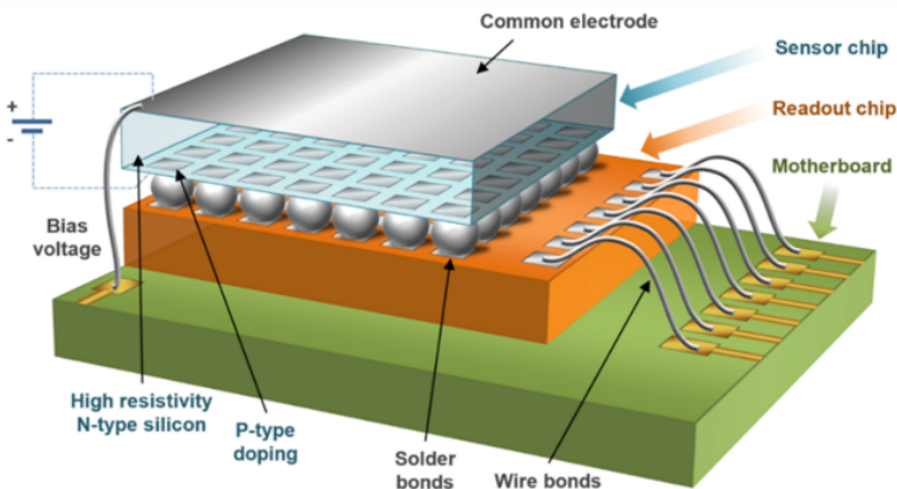


FACULTY
OF MATHEMATICS
AND PHYSICS
Charles University

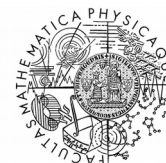
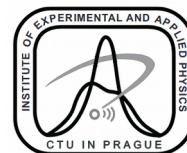
- Sensor: vrstva polovodiče < 1 mm (Si, GaAs, CdTe)
- 256 x 256 pixelů s rozestupem $55\ \mu\text{m}$ (rozměr $\sim 1,41$ cm)
- Detektor měří souvisle a postupně hlásí aktivní pixely.
- Každý pixel zaznamená:
 - a) časové razítko ($\pm 1,25$ ns),
 - b) deponovanou energii.

→ **výkyvy v množství dat,**
→ **velké objemy (až jednotky GB/s)**

Ref.: 2014, Poikela et al.



Rozdělení práce



FACULTY
OF MATHEMATICS
AND PHYSICS
Charles University

Schéma řídicího programu:

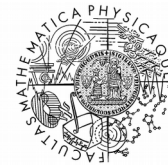
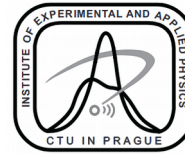
Timepix3

Timepix3

Timepix3

⋮

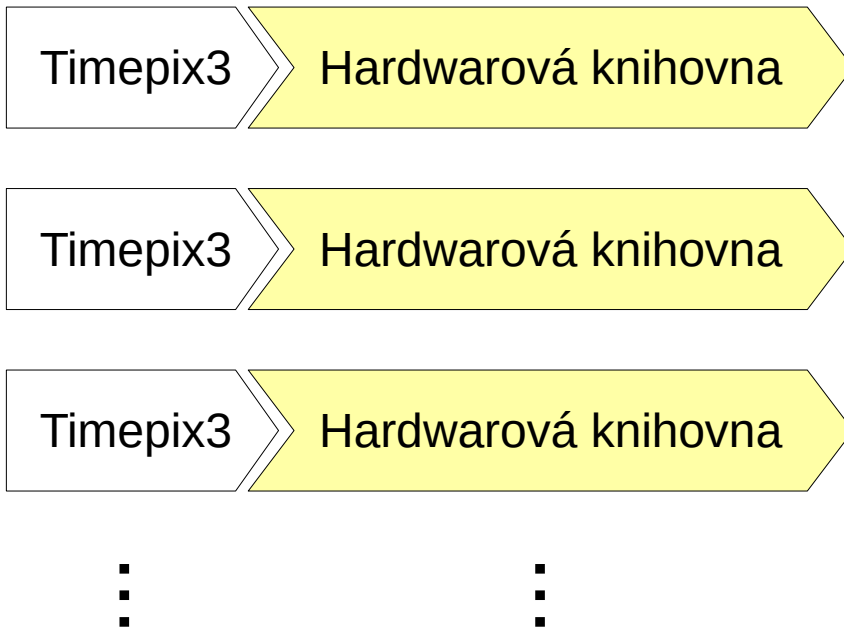
Rozdělení práce



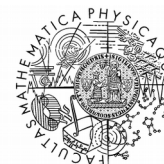
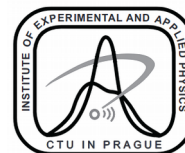
FACULTY
OF MATHEMATICS
AND PHYSICS
Charles University

1. Komunikace s detektorem,

Schéma řídicího programu:



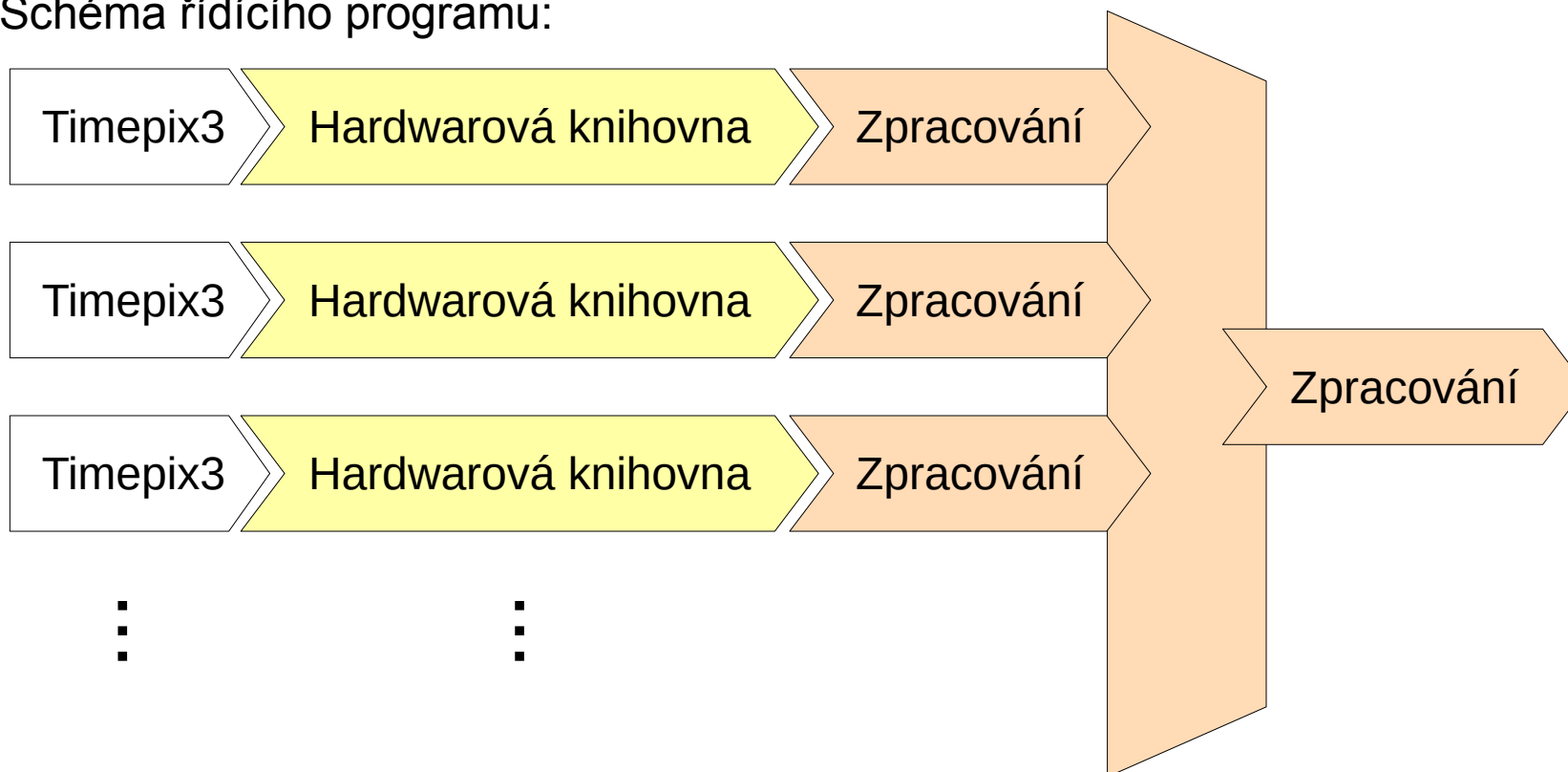
Rozdělení práce



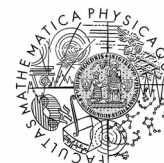
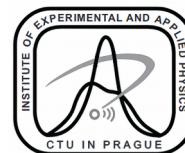
FACULTY
OF MATHEMATICS
AND PHYSICS
Charles University

1. Komunikace s detektorem,
2. Zpracování naměřených dat,

Schéma řídicího programu:



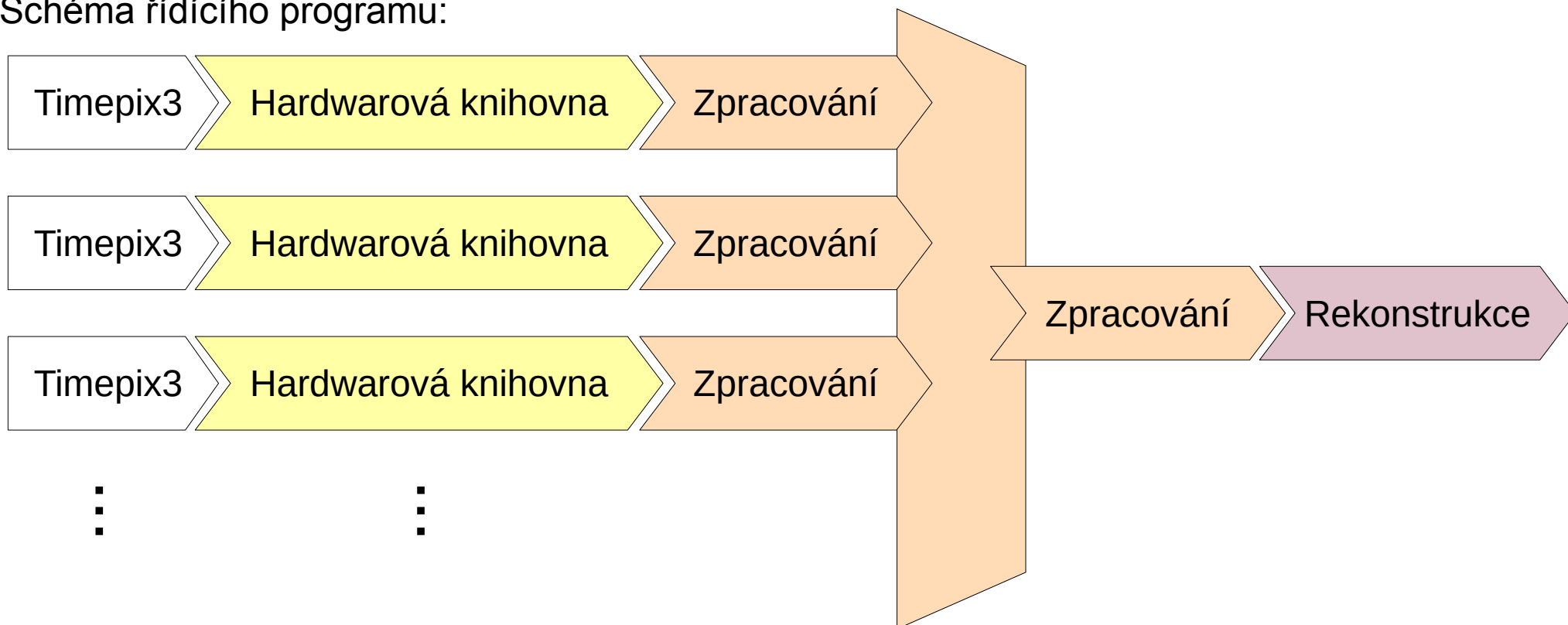
Rozdělení práce



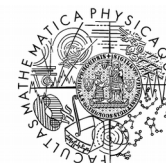
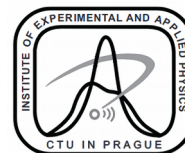
FACULTY
OF MATHEMATICS
AND PHYSICS
Charles University

1. Komunikace s detektorem,
2. Zpracování naměřených dat,
3. Rekonstrukce 3D obrazu,

Schéma řídicího programu:



Rozdělení práce



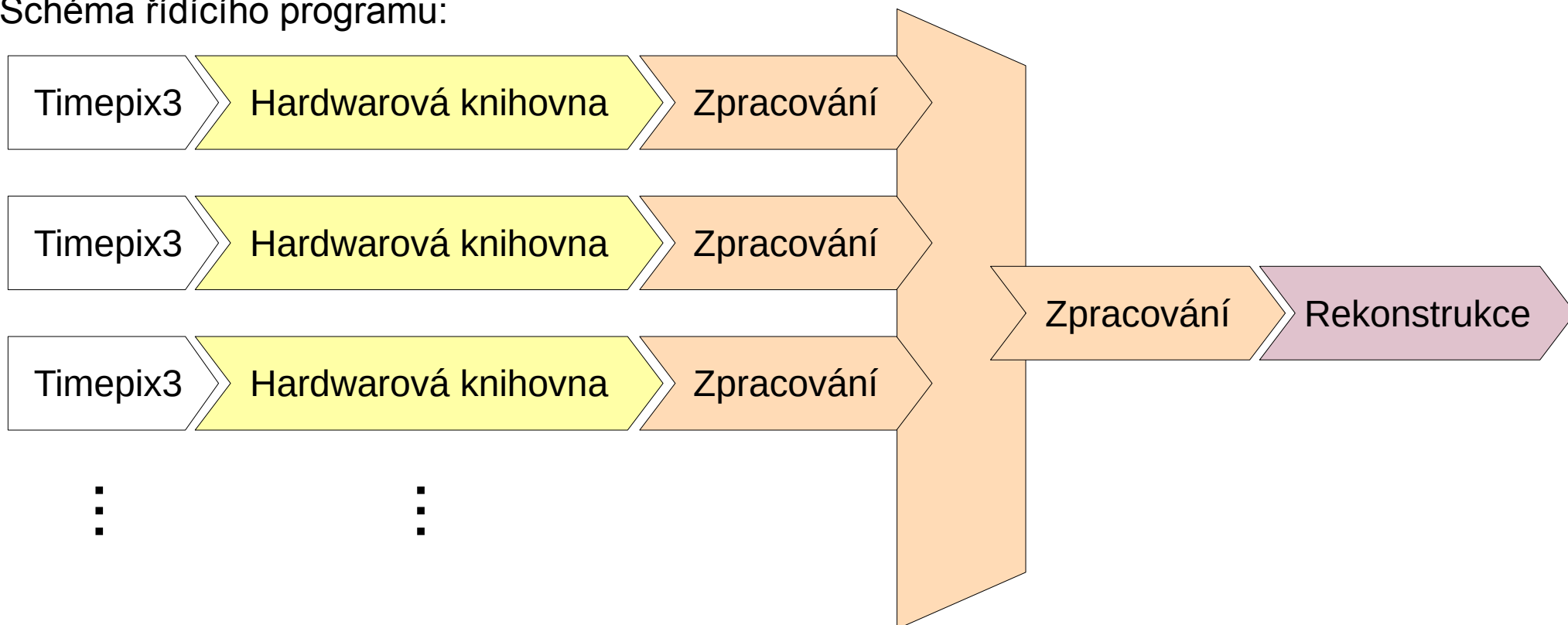
FACULTY
OF MATHEMATICS
AND PHYSICS
Charles University

1. Komunikace s detektorem,
2. Zpracování naměřených dat,
3. Rekonstrukce 3D obrazu,

+

4. Experimenty.

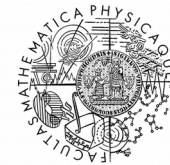
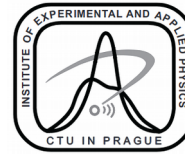
Schéma řídicího programu:



(1) Komunikace

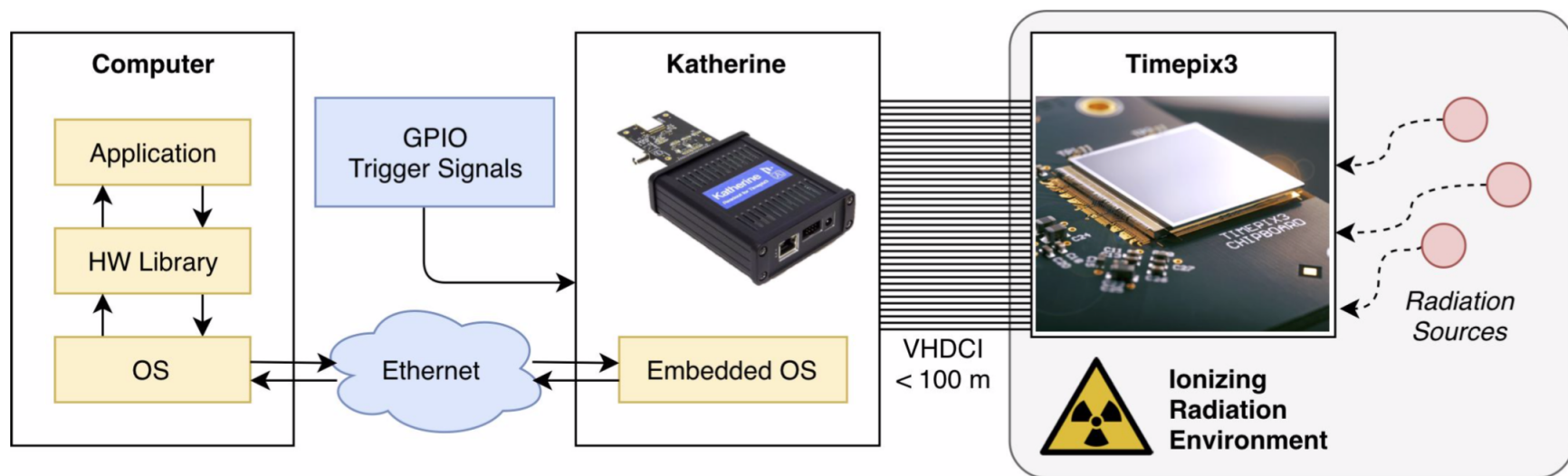


ZÁPADOČESKÁ
UNIVERZITA
V PLZNI

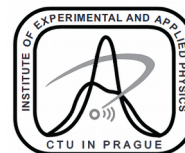


FACULTY
OF MATHEMATICS
AND PHYSICS
Charles University

- Řídící program $\leftrightarrow$ HW knihovna $\leftrightarrow$ Timepix3
- Implementována knihovna pro vyčítací zařízení Katherine (ZČU v Plzni)
- Knihovna umožňuje:
 - a) konfiguraci detektoru,
 - b) monitoring a řízení akvizice,
 - c) rychlé zpracování dat v asynchronním režimu (teoreticky až 15M px/s).



(2a) Zpracování měření



FACULTY
OF MATHEMATICS
AND PHYSICS
Charles University

- Cíl: pozorovat elektron, kterému foton předá energii
- V detektoru: elektron $\sim$ shluk pixelů (*cluster*)

- **Problém 1:** detektor pouze hlásí aktivní pixely
→ nutná morfologická agregace (seskupit sousedy)

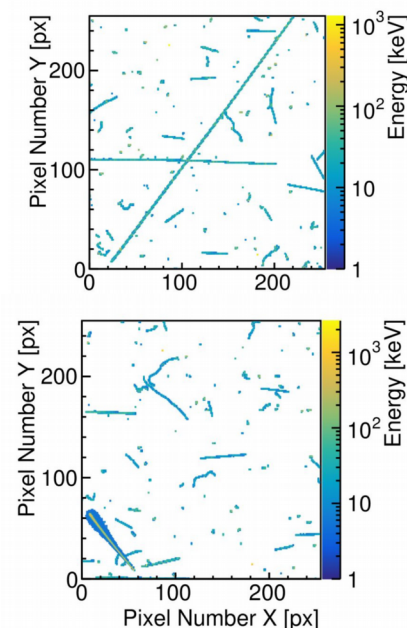


Timepix3

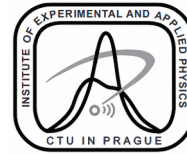
- **Problém 2:** pixely nemusí být nahlášeny ve správném pořadí
→ před seskupením je třeba chvíli počkat

- **Řešení:** shlukovací algoritmus

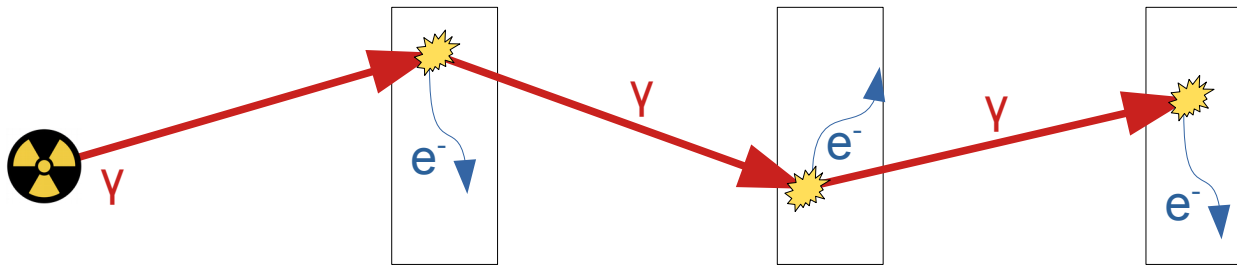
- pixely jsou nejprve seřazeny v prioritní frontě podle času,
- v geometrické DS jsou sousední pixely propojeny do shluků.



(2b) Zpracování měření



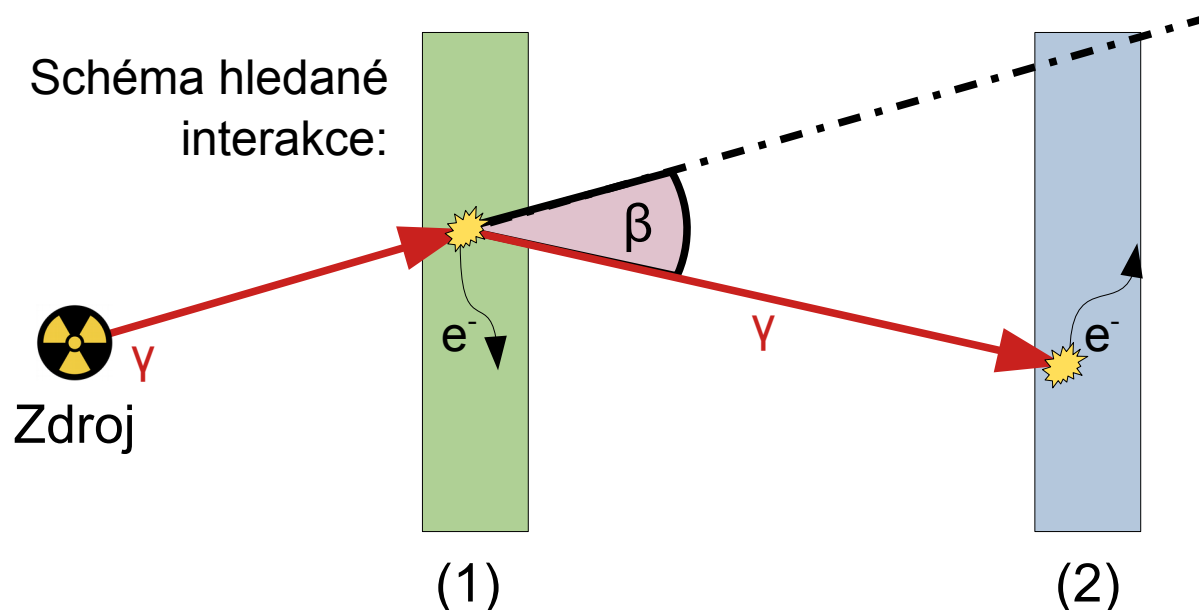
- **Problém 3:** jeden foton může zanechat energii ve více detektorech
→ je zapotřebí elektrony z více detektorů spárovat



- **Řešení:** synchronizace detektorů + párovací algoritmus
 - shlukování probíhá souběžně pro každý detektor zvlášť,
 - poté párování shluků s podobným časovým razítkem.
- Oba algoritmy:
 - dobře škálují (Katherine vyprodukuje až 15M px/s),
 - lze spustit *online* → jejich zřetězením získáme data pipeline,
 - umožňují filtraci za běhu → snížení složitosti a spotřeby paměti.

(3a) Rekonstrukce

- Cíl: určit polohu zdroje
- Hledáme fotony, které zanechaly energii alespoň ve dvou detektorech.
- Z energií určíme úhel β definující kuželovou plochu.



(1) Comptonův rozptyl

- γ foton předá část energie elektronu
- změní svojí trajektorii o známý úhel β

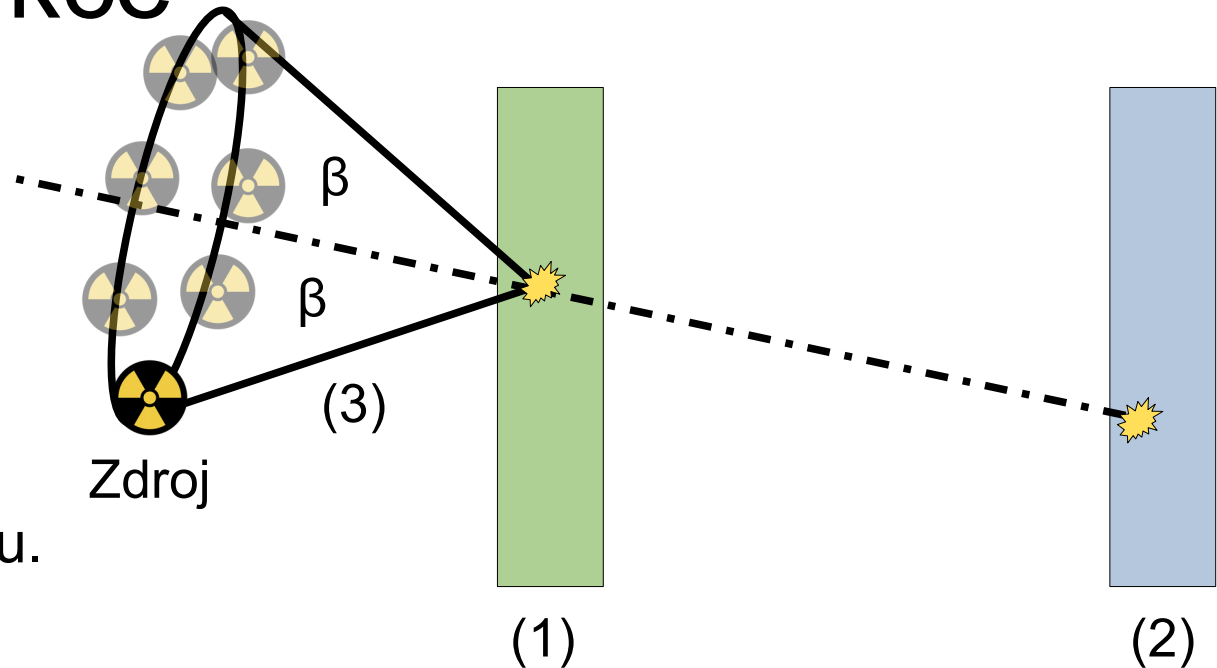
$$\cos \beta = 1 - m_e c^2 \left(\frac{1}{E'_\gamma} - \frac{1}{E_\gamma} \right)$$

(2) Fotoelektrická absorpce

- γ foton předá veškerou energii elektronu
- foton zaniká a v pohybu nepokračuje

(3b) Rekonstrukce

- Cíl: určit polohu zdroje
- Hledáme fotony, které zanechaly energii alespoň ve dvou detektorech.
- Z energií určíme úhel β definující kuželovou plochu.
- Zdroj se nachází *někde* na plášti kuželu (3)
 - potřebujeme více kuželů,
 - N určíme podle přesnosti



(1) Comptonův rozptyl

- γ foton předá část energie elektronu
- změni svojí trajektorii o známý úhel β

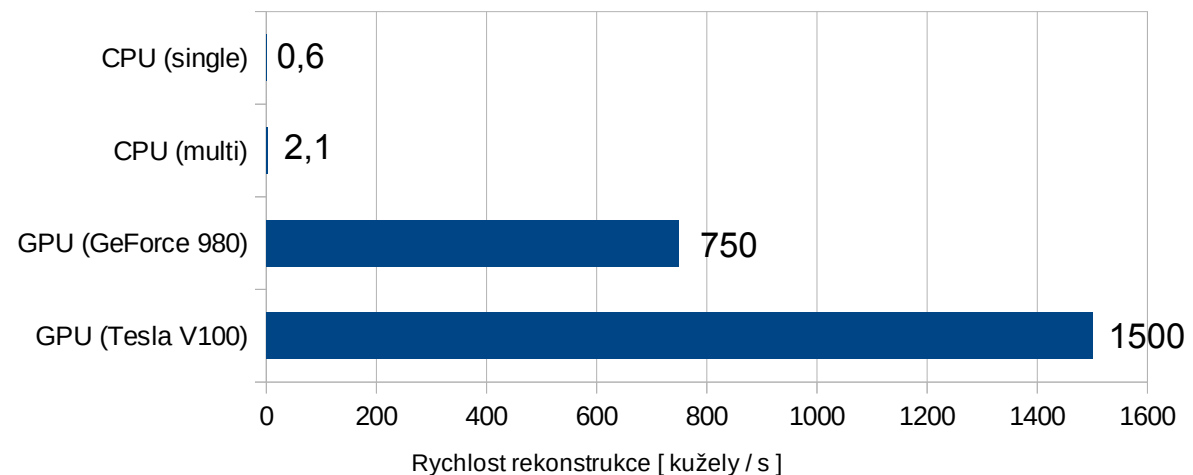
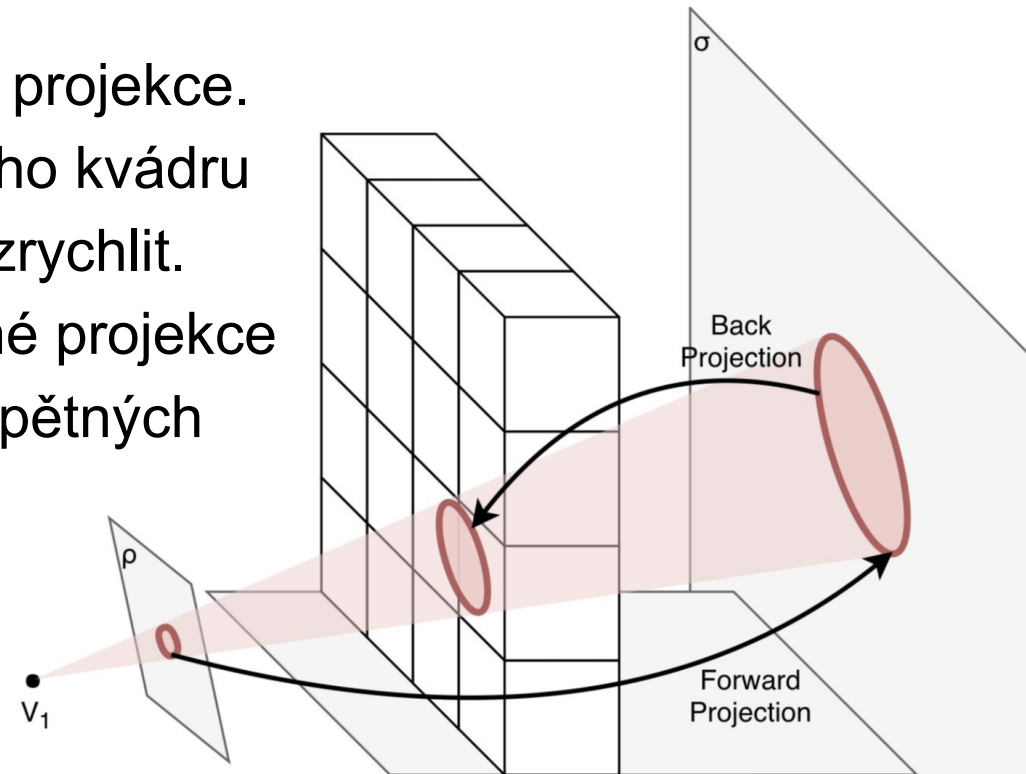
$$\cos \beta = 1 - m_e c^2 \left(\frac{1}{E'_\gamma} - \frac{1}{E_\gamma} \right)$$

(2) Fotoelektrická absorpce

- γ foton předá veškerou energii elektronu
- foton zaniká a v pohybu nepokračuje

(3c) Rekonstrukce

- Implementován algoritmus dopředné projekce.
 - promítne kužely do diskretizovaného kvádrů
- Projekce do rovnoběžných rovin lze zrychlit.
 - odvozen rychlejší algoritmus zpětné projekce
 - projekce kuželu: 1 dopředná + N zpětných
- Počet buněk roste rychle.
- $N = 300 \rightarrow 27\text{M}$ buněk (~ 100 MB)
- Další zrychlení:
 - paralelizace,
 - vyhledávací tabulky,
 - interpolace,
 - grafické karty (CUDA).



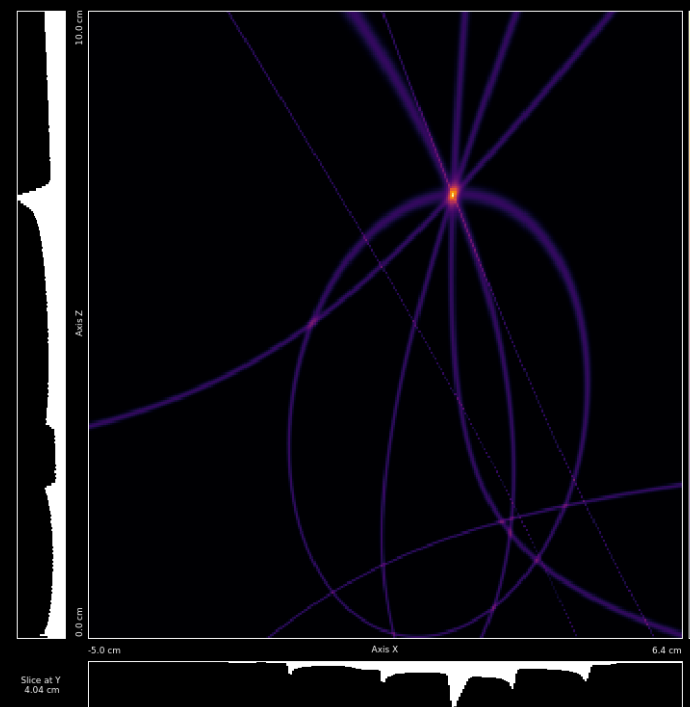
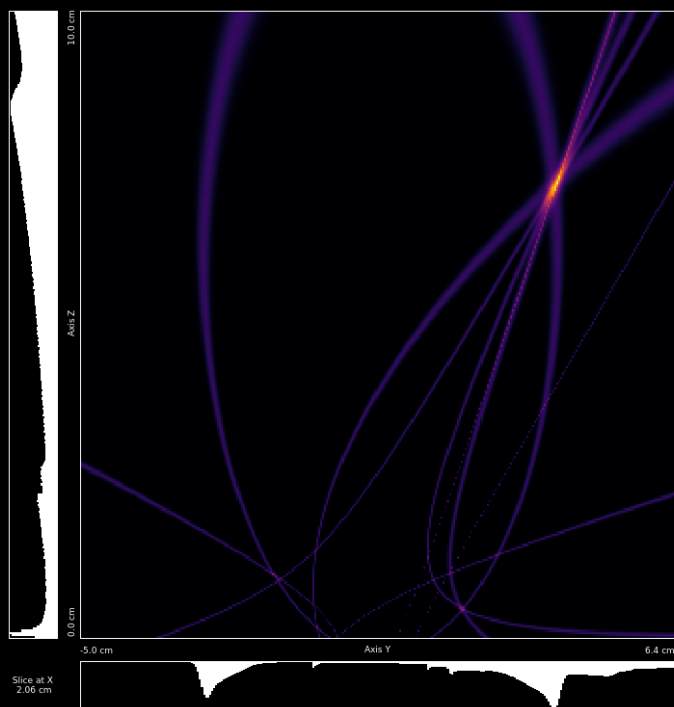
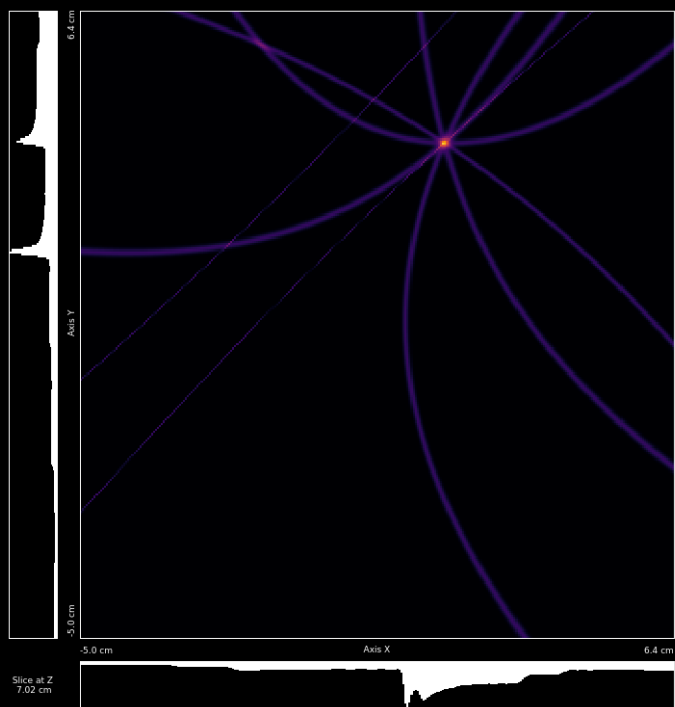
Ref.: 1984, Dudgeon et al.
2009, Herman

(3d) Rekonstrukce

Pohled zepředu (XY)

Pohled ze strany (YZ)

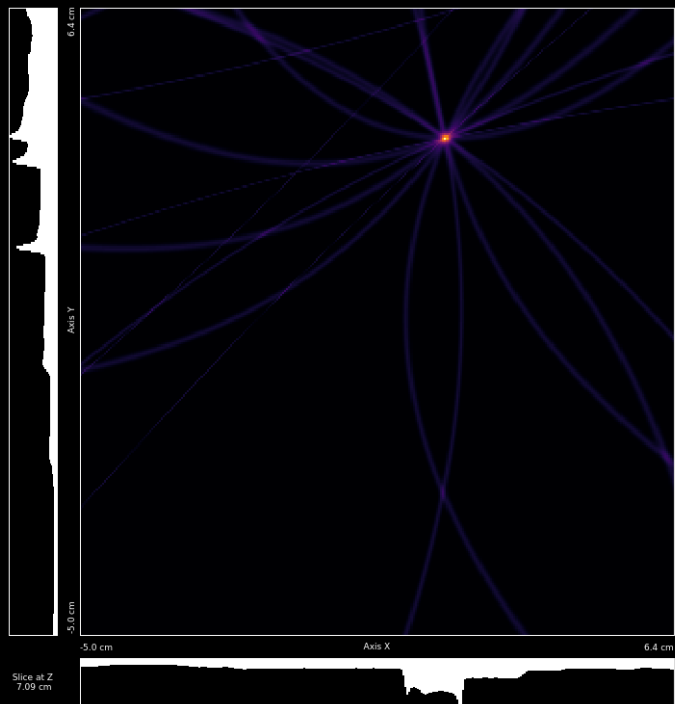
Pohled zvrchu (XZ)



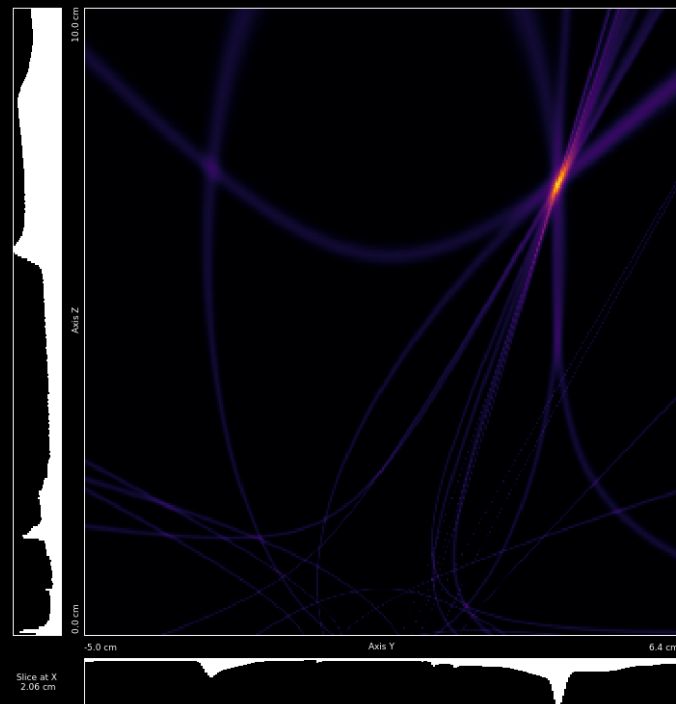
$N = 5$ kuželů

(3d) Rekonstrukce

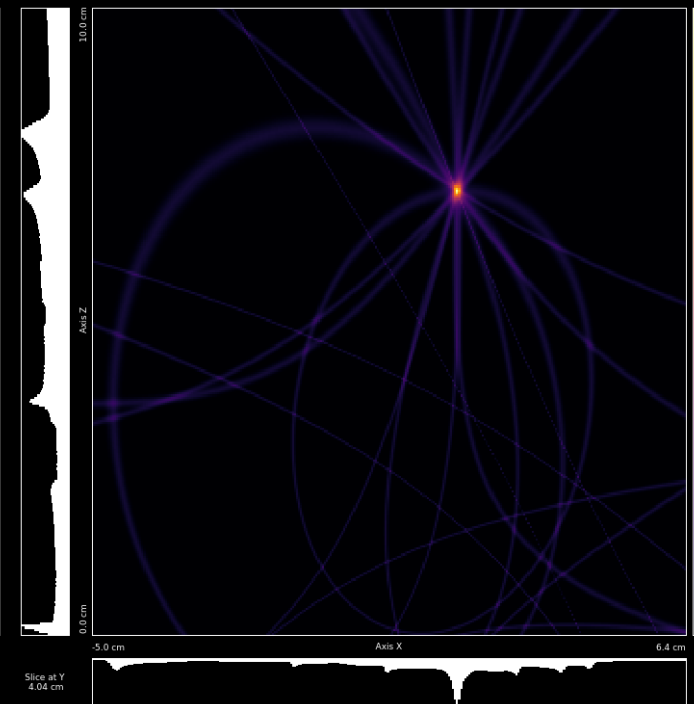
Pohled zepředu (XY)



Pohled ze strany (YZ)



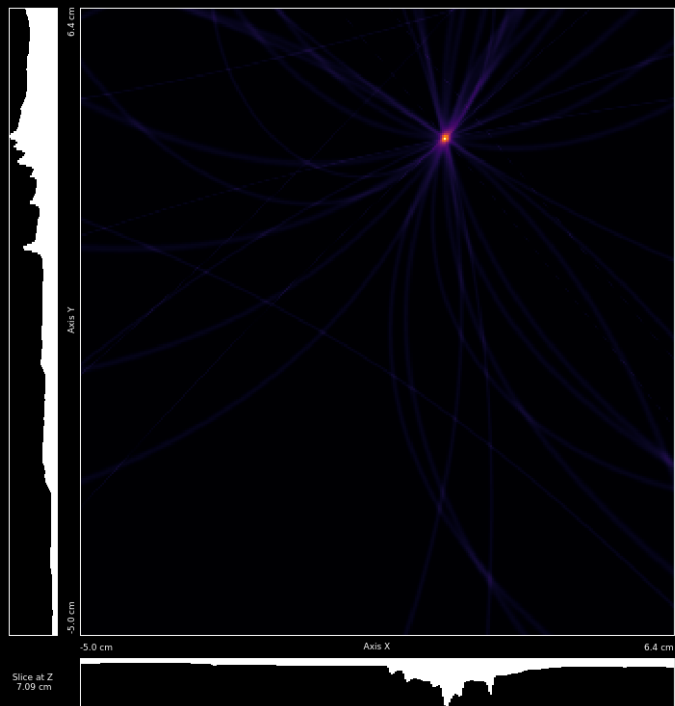
Pohled zvrchu (XZ)



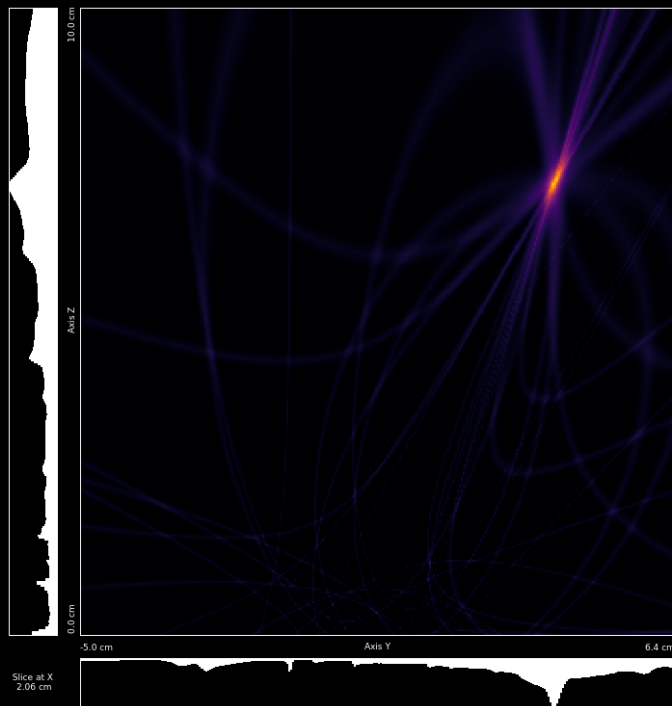
$N = 10$ kuželů

(3d) Rekonstrukce

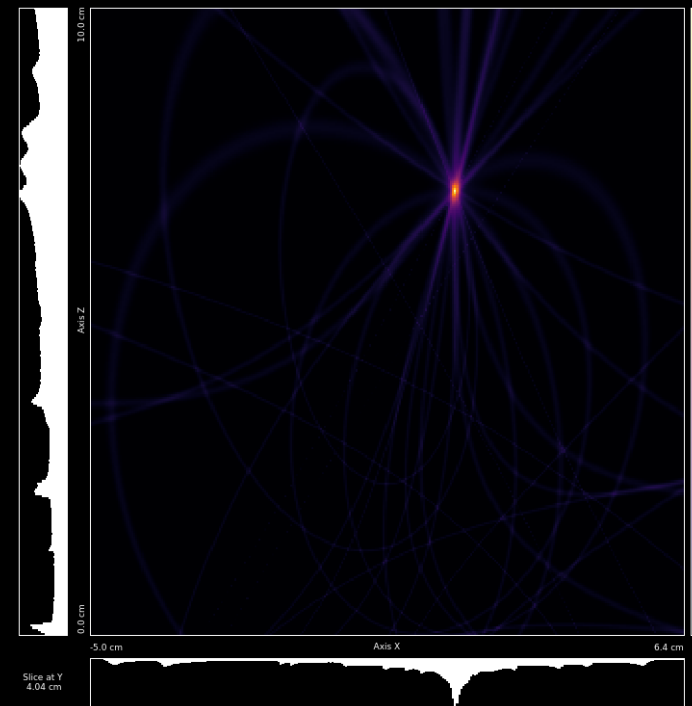
Pohled zepředu (XY)



Pohled ze strany (YZ)



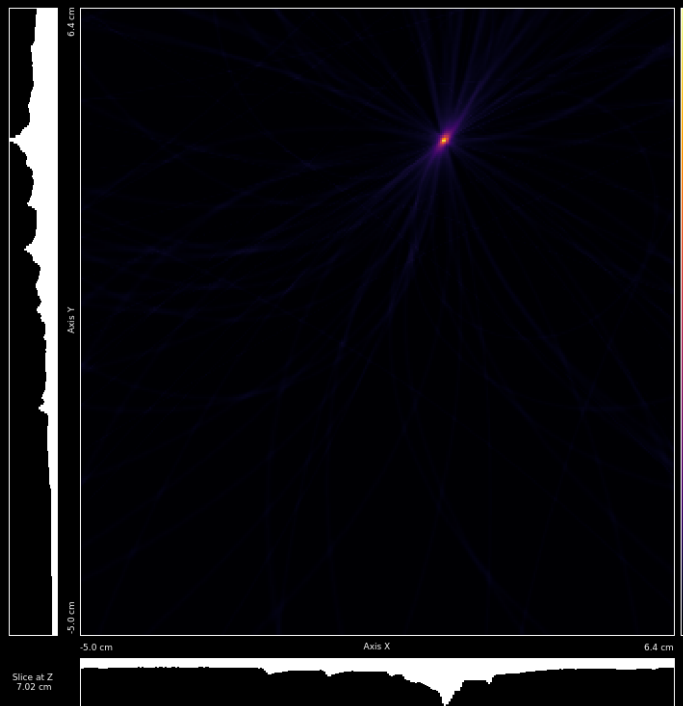
Pohled zvrchu (XZ)



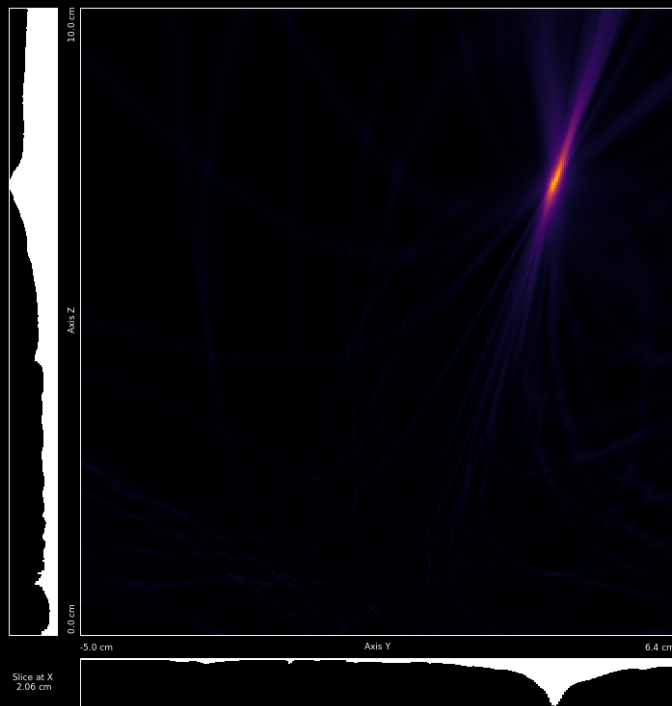
$N = 20$ kuželů

(3d) Rekonstrukce

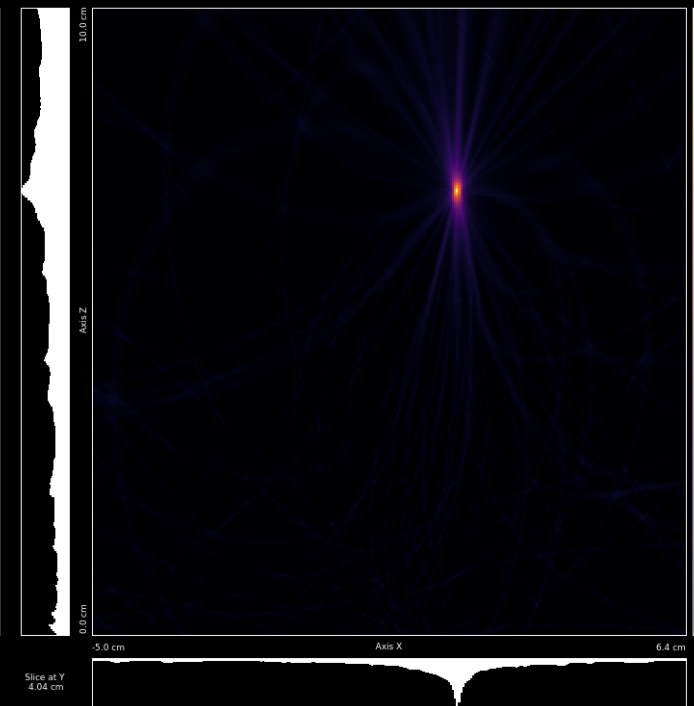
Pohled zepředu (XY)



Pohled ze strany (YZ)



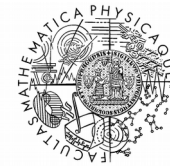
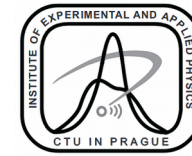
Pohled zvrchu (XZ)



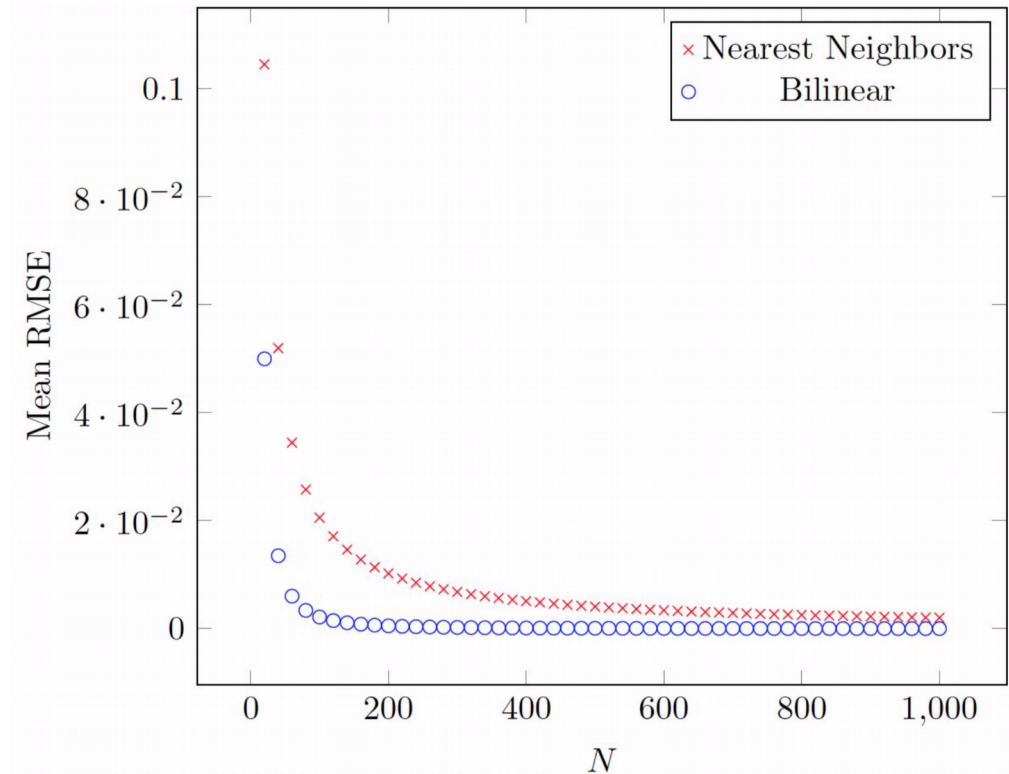
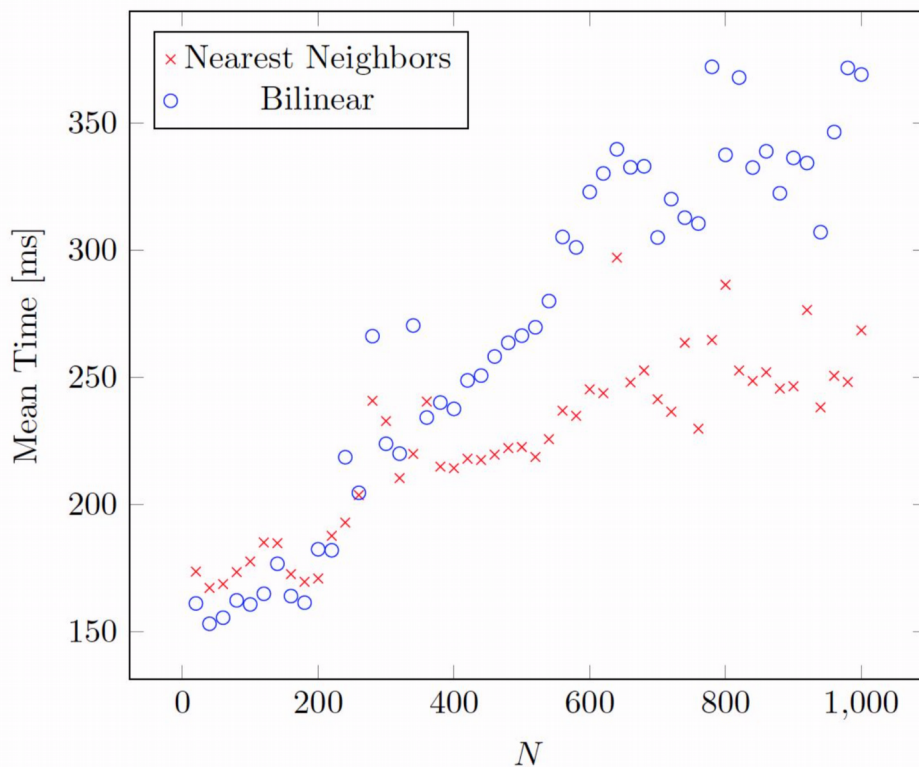
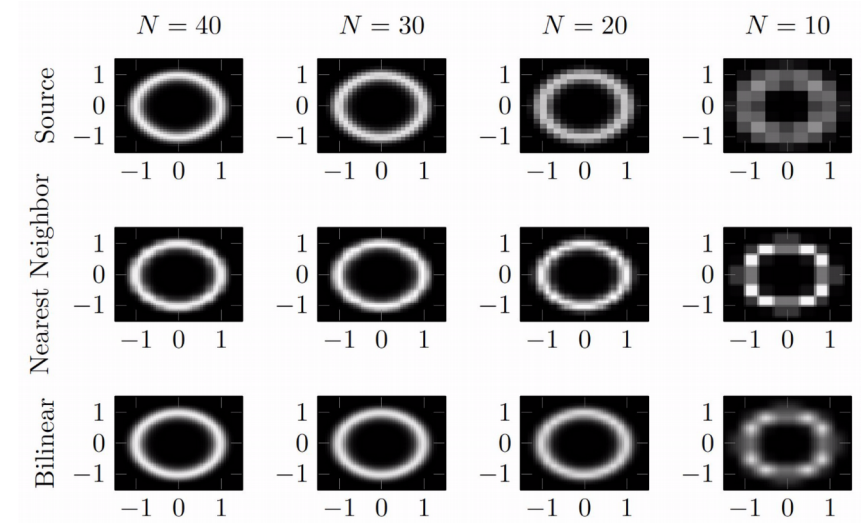
$N = 50$ kuželů

(4a) Experimenty

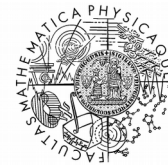
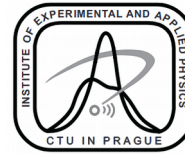
- Vyhodnocení interpolační chyby,



FACULTY
OF MATHEMATICS
AND PHYSICS
Charles University



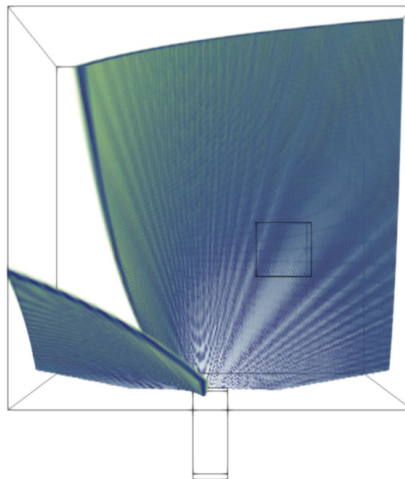
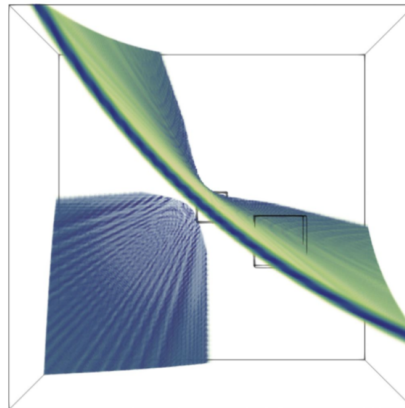
(4b) Experimenty



FACULTY
OF MATHEMATICS
AND PHYSICS
Charles University

- Vyhodnocení interpolační chyby,
- Rekonstrukce simulovaného bodového zdroje,

1 kužel:



5K kuželů:

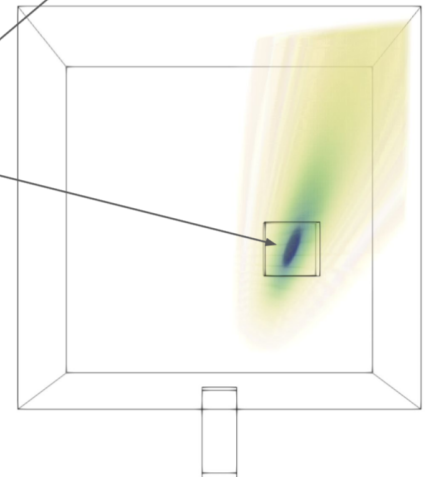
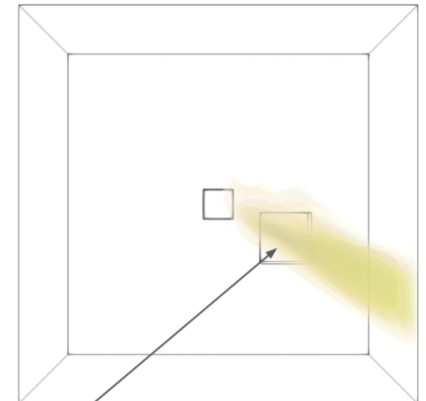
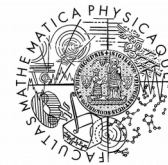
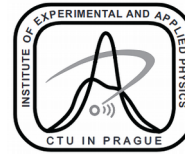


Schéma simulace



Simulovaný
zdroj

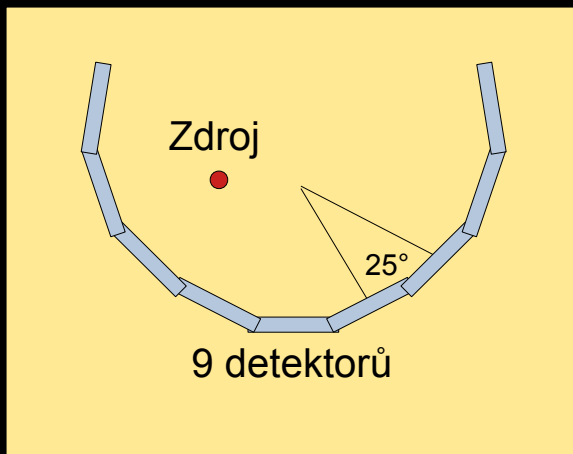
(4c) Experimenty



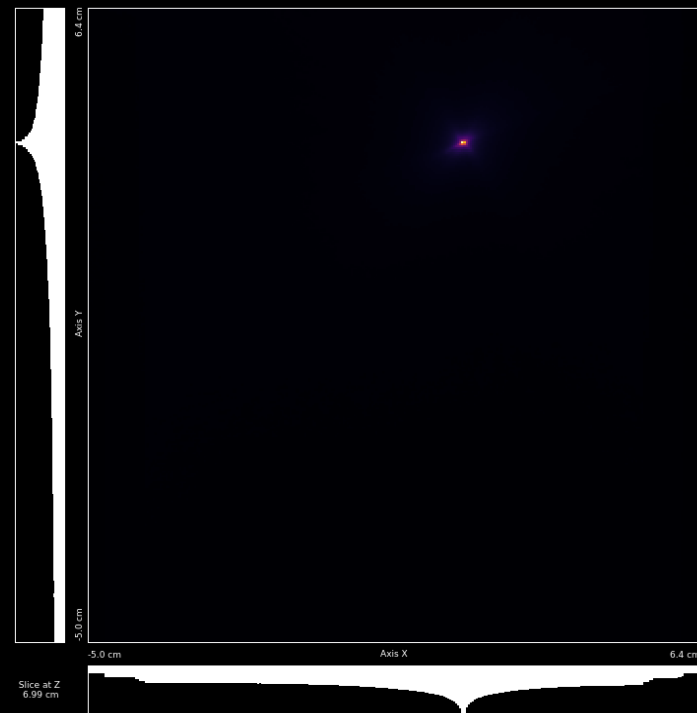
FACULTY
OF MATHEMATICS
AND PHYSICS
Charles University

- Vyhodnocení interpolační chyby,
- Rekonstrukce simulovaného bodového zdroje,
- Rekonstrukce simulovaného bodového zdroje z více úhlů pohledu,

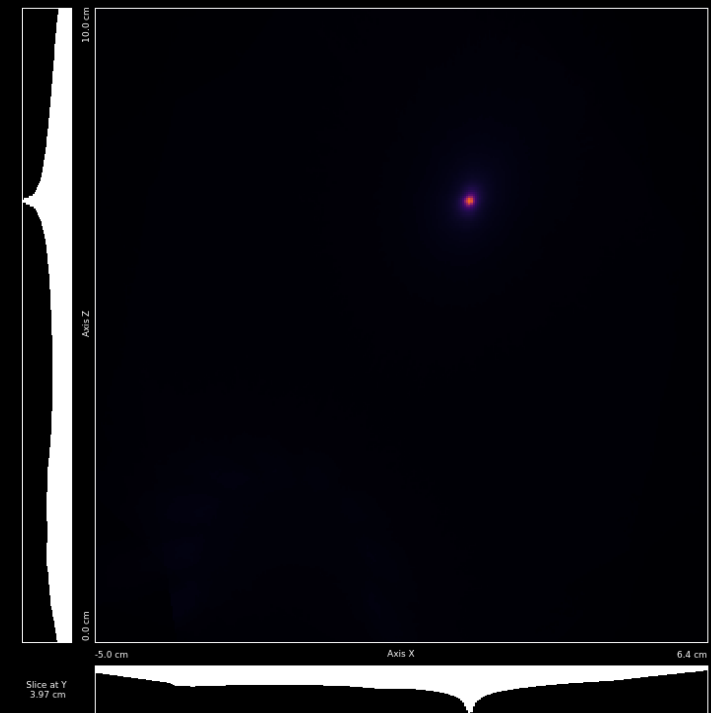
Schéma simulace



Pohled zepředu (XY)



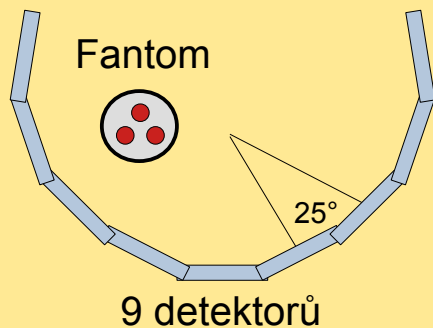
Pohled zvrchu (XZ)



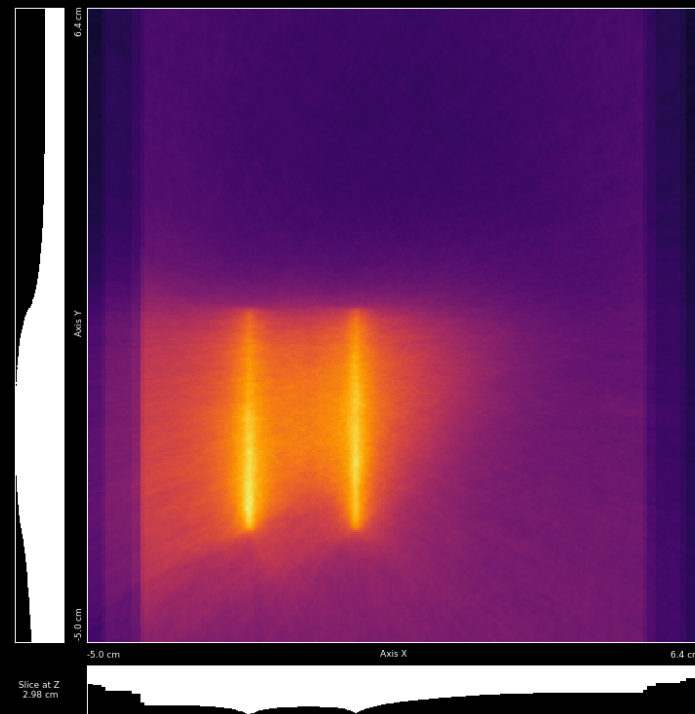
(4d) Experimenty

- Vyhodnocení interpolační chyby,
- Rekonstrukce simulovaného bodového zdroje,
- Rekonstrukce simulovaného bodového zdroje z více úhlů pohledu,
- Rekonstrukce simulovaného fantomu s kapilárami,

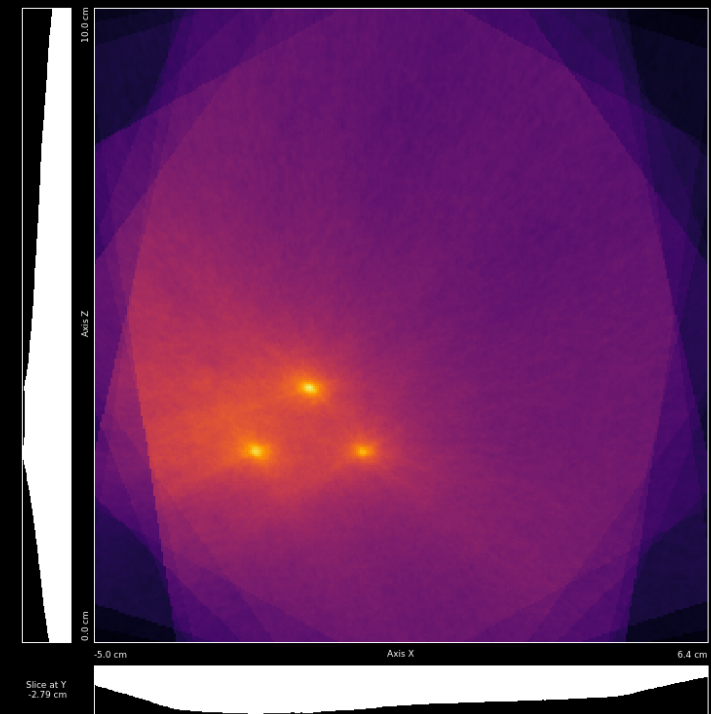
Schéma simulace



Pohled zepředu (XY)



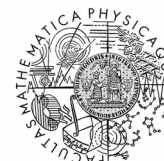
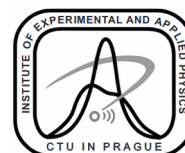
Pohled zvrchu (XZ)



(4e) Experimenty



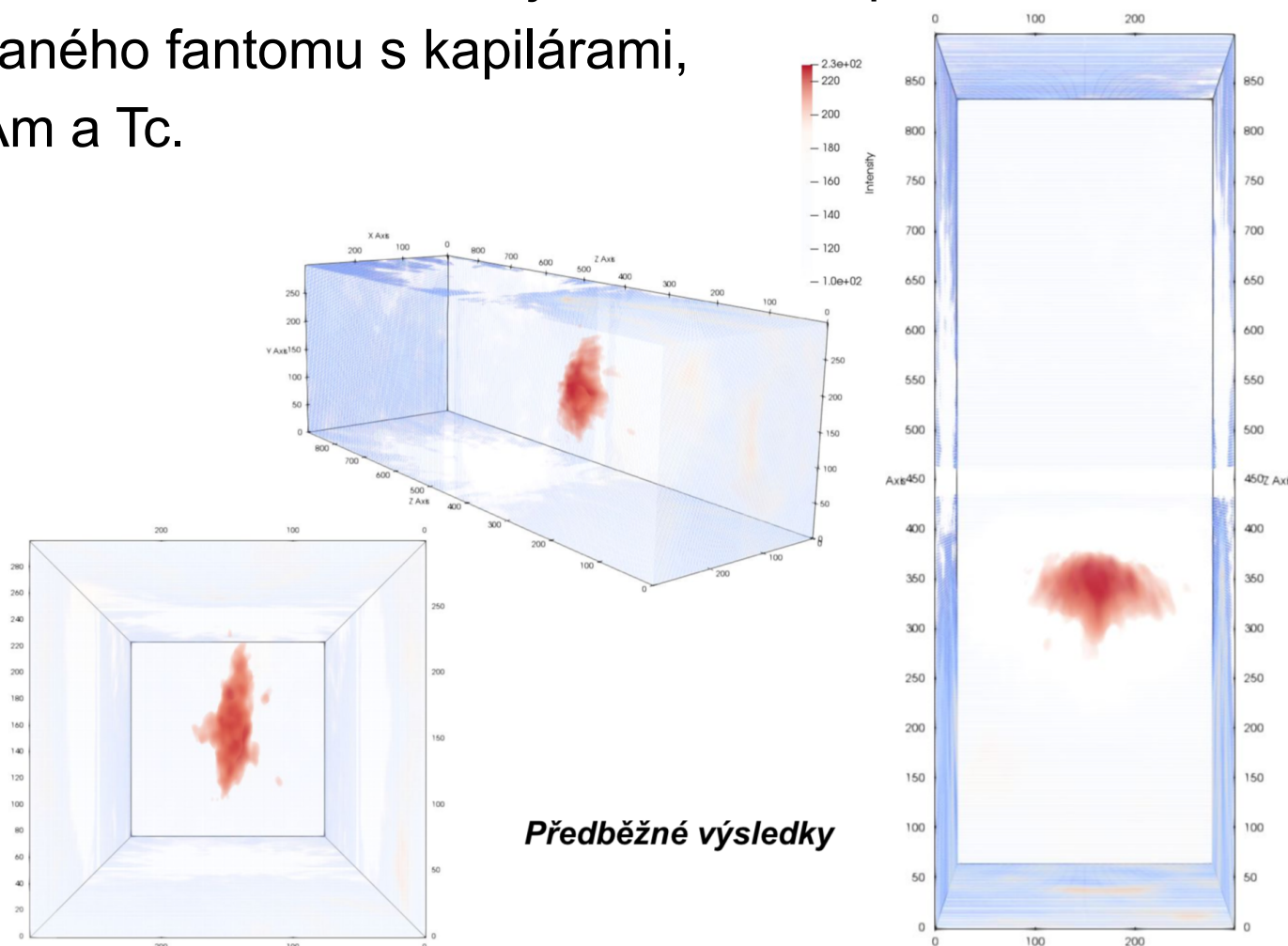
UNIVERSITÄTS
KLINIKUM
FREIBURG



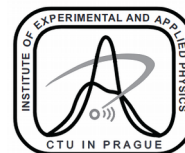
FACULTY
OF MATHEMATICS
AND PHYSICS
Charles University

- Vyhodnocení interpolační chyby,
- Rekonstrukce simulovaného bodového zdroje,
- Rekonstrukce simulovaného bodového zdroje z více úhlů pohledu,
- Rekonstrukce simulovaného fantomu s kapilárami,
- Rekonstrukce zdroje Am a Tc.

Schéma měření



Shrnutí



FACULTY
OF MATHEMATICS
AND PHYSICS
Charles University

- Navržena nová γ -kamera, má potenciál překonat state-of-the-art.
- V rámci práce:
 - vytvořen SW pro vyčítání z Timepix3 (lze využít i pro další aplikace),
 - implementovány rychlé redukční a agregační algoritmy,
 - odvozen a implementován algoritmus pro rekonstrukci 3D obrazu,
 - provedena řada experimentů pro ověření správnosti.
- Podzim 2018:
 - zkonstruovány prototypy s detektory Si-Si, Si-GaAs,
 - veškerý SW převeden do paralelní podoby (CPU i GPU),
 - provedena základní měření v Praze a Freiburgu.

Kamera nevyžaduje mechanické usměrnění → **je menší, lehčí, účinnější.**
Vyšší energetické rozlišení Timepix3 → **vyšší úhlová přesnost kamery.**

Aplikace

(1) Lékařské zobrazování (SPECT)

- Zdroj: radioaktivní kontrastní látka
- Délka zobrazování ~ poškození pacienta.

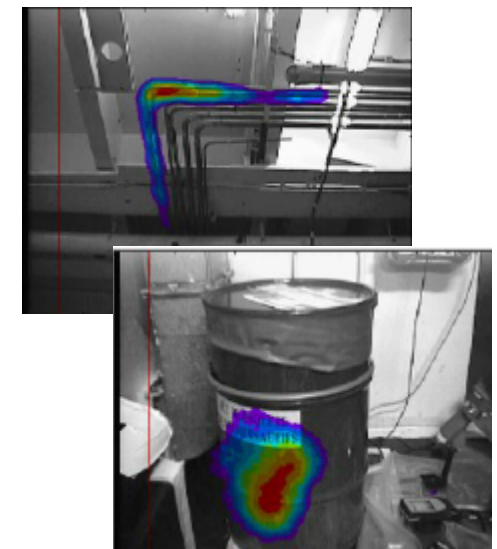
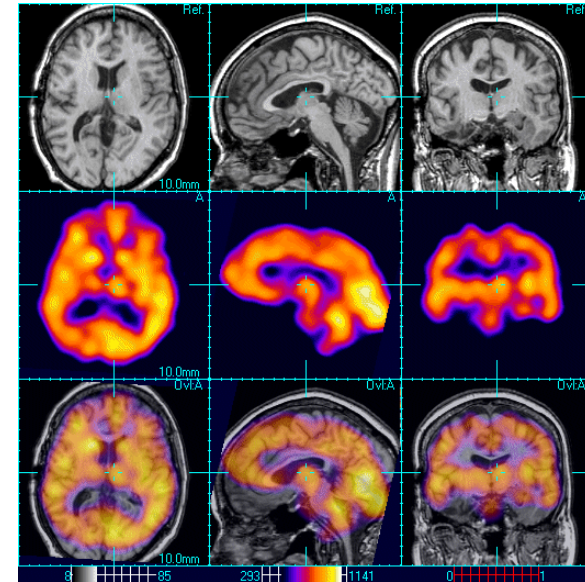
(2) Dekontaminace radioaktivních pracovišť

- Zdroj: škodlivá látka, kterou je třeba odstranit
- Není nutná přesná lokalizace (stačí směr).

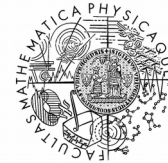
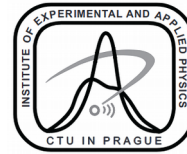
(3) Bezpečnost (letiště, armáda, apod.)

- Zdroj: jaderné zbraně, palivo, nepovolené zářiče
- Klasifikační úloha: nachází se zdroj v prostředí?

(4) Kontrola kvality jaderného paliva

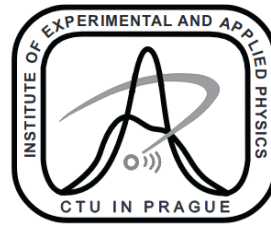


Pokračování



FACULTY
OF MATHEMATICS
AND PHYSICS
Charles University

- Konstrukce prototypu Si-CdTe, použití více vrstev, oblouku.
 - zvýšení účinnosti.
- Algoritmus LM-MLEM
 - nižší časová složitost, zvýšení kontrastu (CNR).
- Testování se skutečným systémem SPECT
 - objektivní porovnání, studie rozlišení systému,
 - test zobrazení standardních fantomů a malých savců.
- Spojení s viditelným obrazem, miniaturizace.
 - měřicí jednotka „do ruky“.
- Integrace s ROS a drony.
 - otázka napájení a komunikace,
 - autonomní jednotka pro mapování (SLAM).



FACULTY
OF MATHEMATICS
AND PHYSICS
Charles University

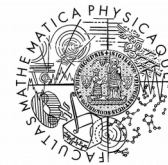
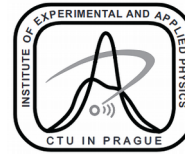
Děkuji za pozornost!

Petr Mánek
pm@petrmanek.cz

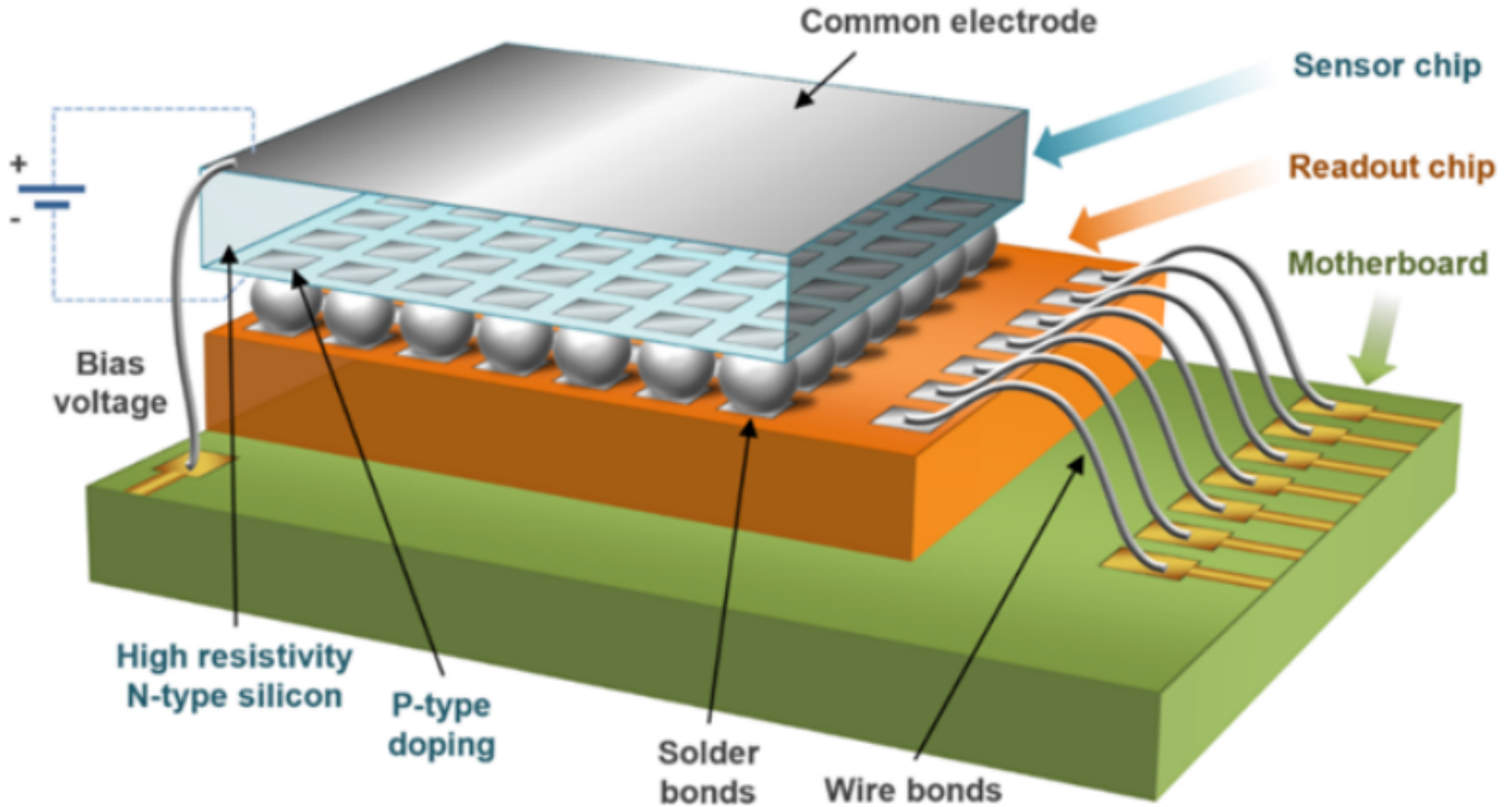
Vedoucí práce: Filip Zavoral
zavoral@ksi.mff.cuni.cz

Poděkování: Martin Pichotka, Benedikt Bergmann, Moritz Weigt,
Petr Burian, Martin Kruliš, Jakub Yaghob

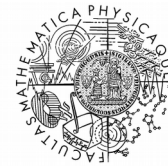
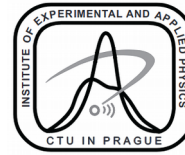
Backup



FACULTY
OF MATHEMATICS
AND PHYSICS
Charles University



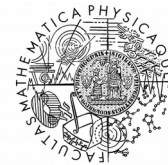
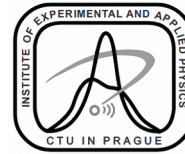
Backup



FACULTY
OF MATHEMATICS
AND PHYSICS
Charles University



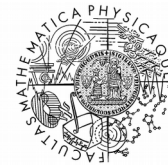
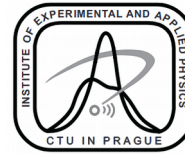
Backup



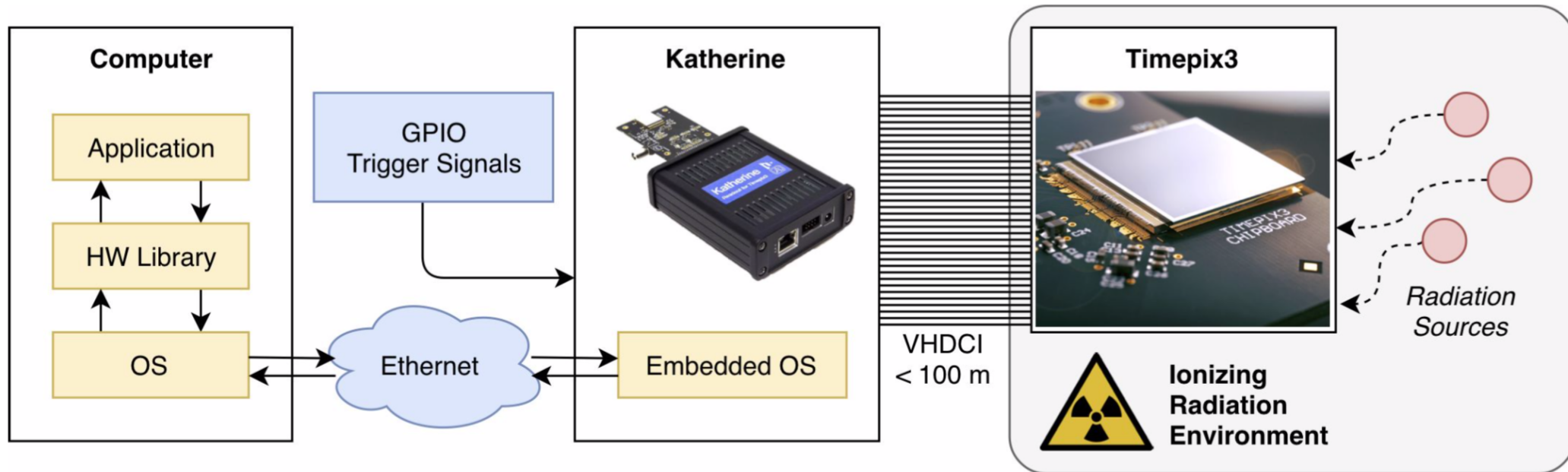
FACULTY
OF MATHEMATICS
AND PHYSICS
Charles University



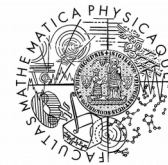
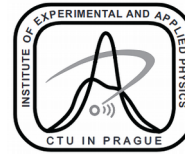
Backup



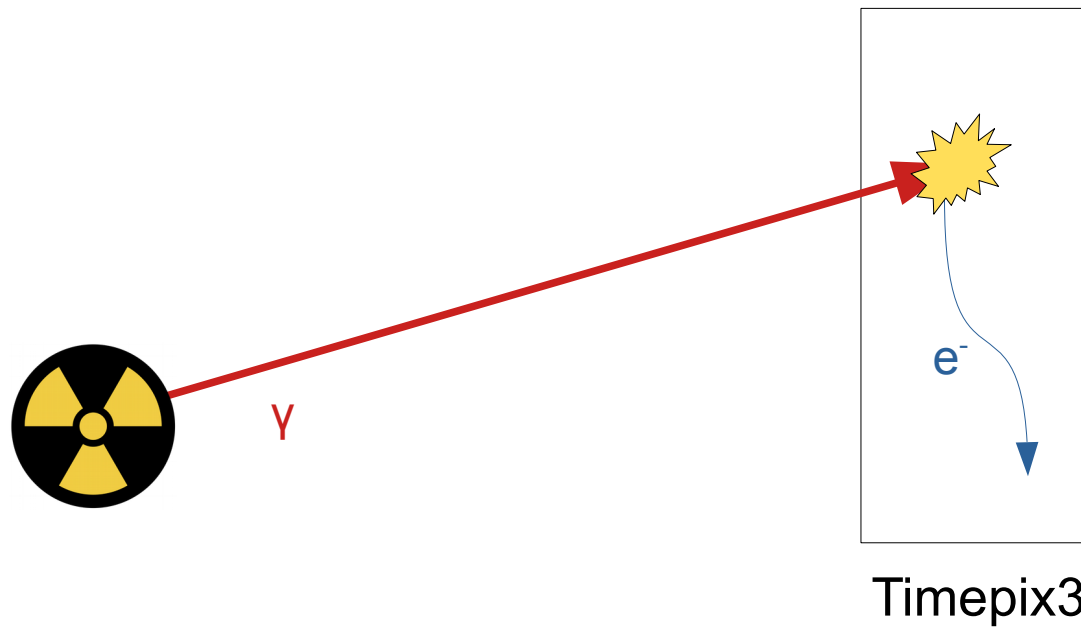
FACULTY
OF MATHEMATICS
AND PHYSICS
Charles University



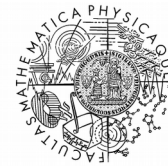
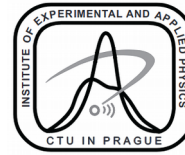
Backup



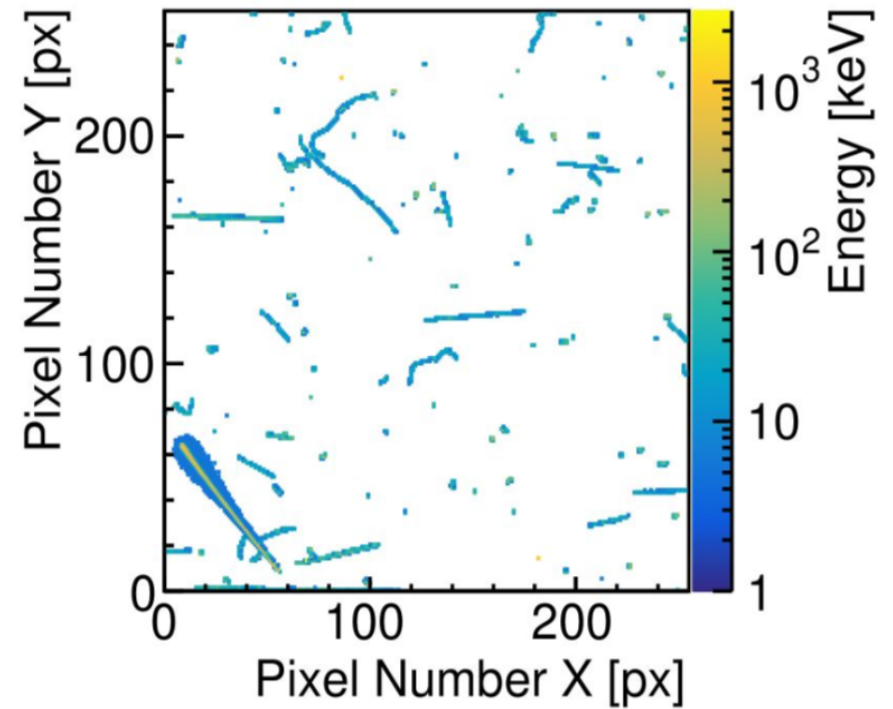
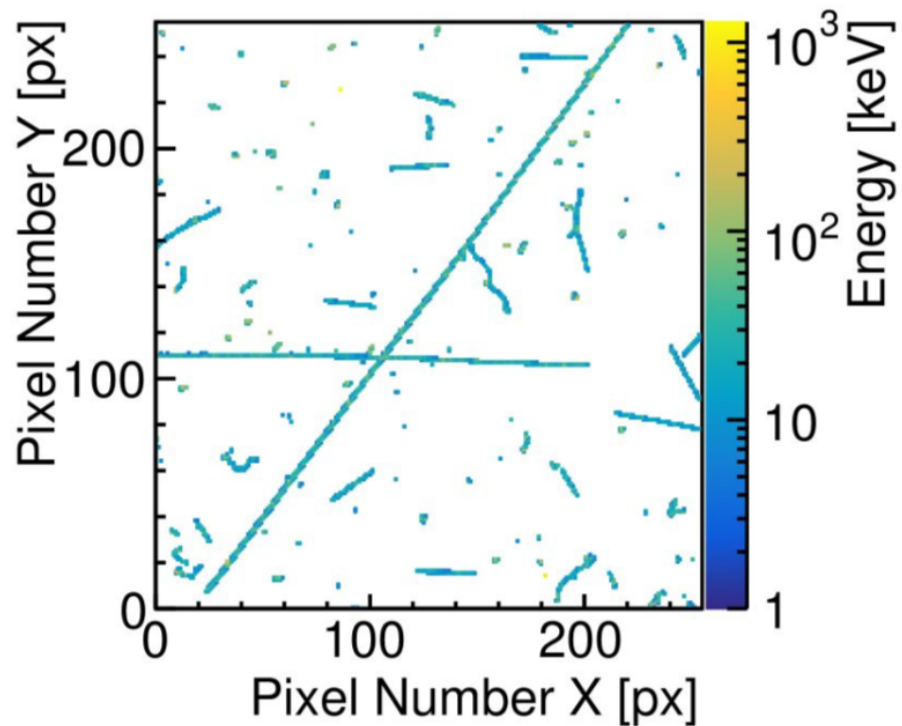
FACULTY
OF MATHEMATICS
AND PHYSICS
Charles University



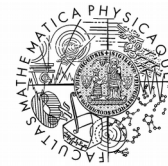
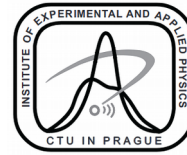
Backup



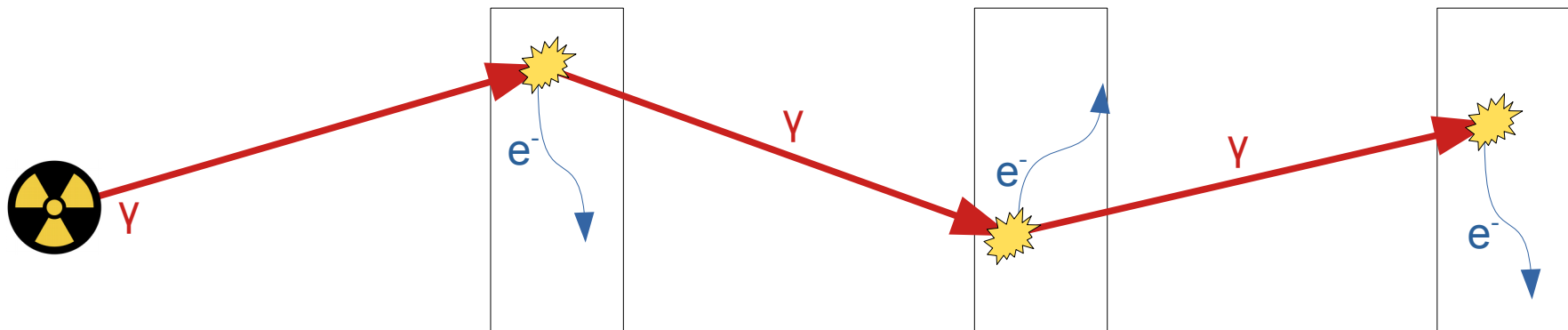
FACULTY
OF MATHEMATICS
AND PHYSICS
Charles University



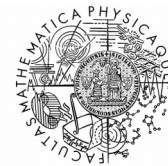
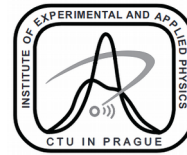
Backup



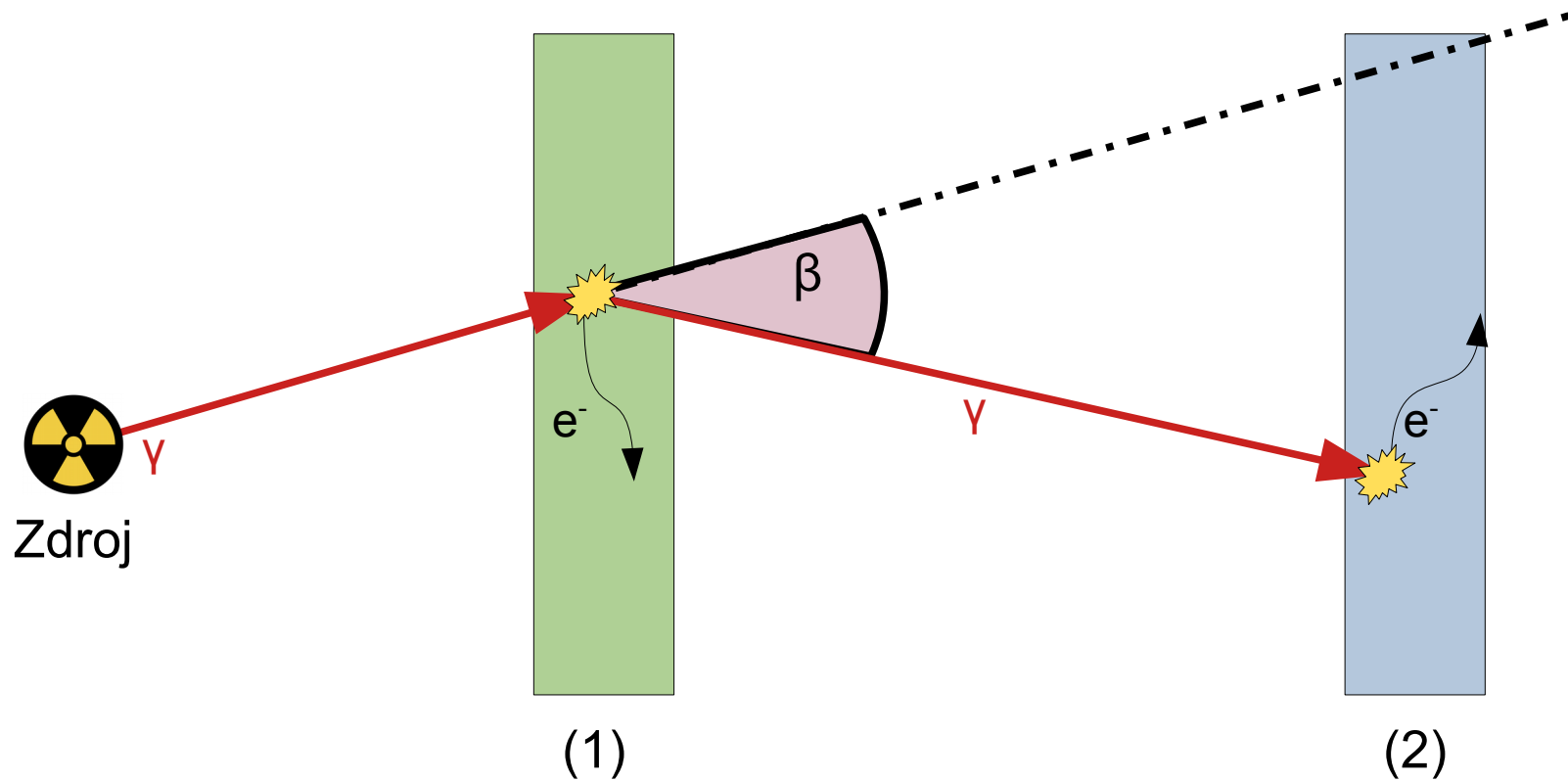
FACULTY
OF MATHEMATICS
AND PHYSICS
Charles University



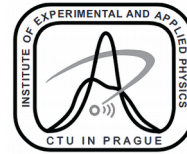
Backup



FACULTY
OF MATHEMATICS
AND PHYSICS
Charles University



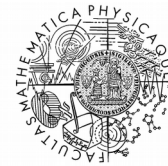
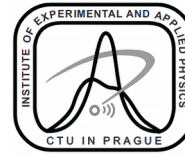
Backup



FACULTY
OF MATHEMATICS
AND PHYSICS
Charles University

$$\cos \beta = 1 - m_e c^2 \left(\frac{1}{E'_\gamma} - \frac{1}{E_\gamma} \right)$$

Backup



FACULTY
OF MATHEMATICS
AND PHYSICS
Charles University

