3D full orbit částicové simulace pro podporu diagnostiky RE

Jaroslav Čeřovský

FJFI ČVUT

10 .Studenstký Workshop – Zimní škola fyziky plazmatu

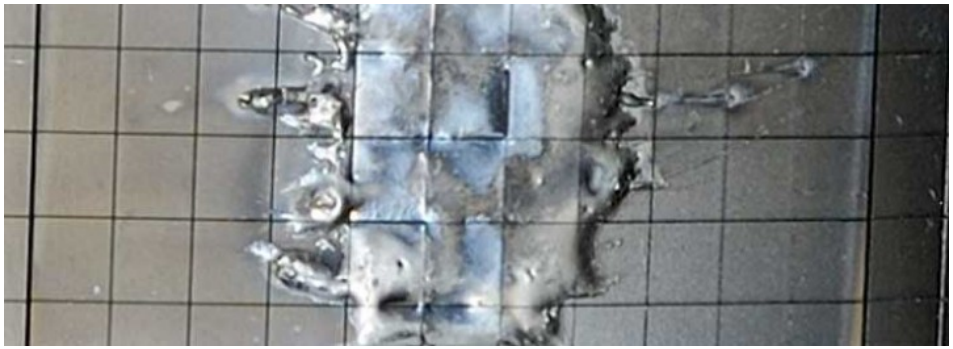
Obsah

1. Motivace
2. Výpočet trajektorií RE
- Integrátory
- Výpočet magnetického a elektrického pole
3. Schéma výspočtu
4. Validace modelu
- Trajektorie elektronů v magnetickém poli tokamaku
5. Závěr

Motivace

Ubíhající elektrony (RE):

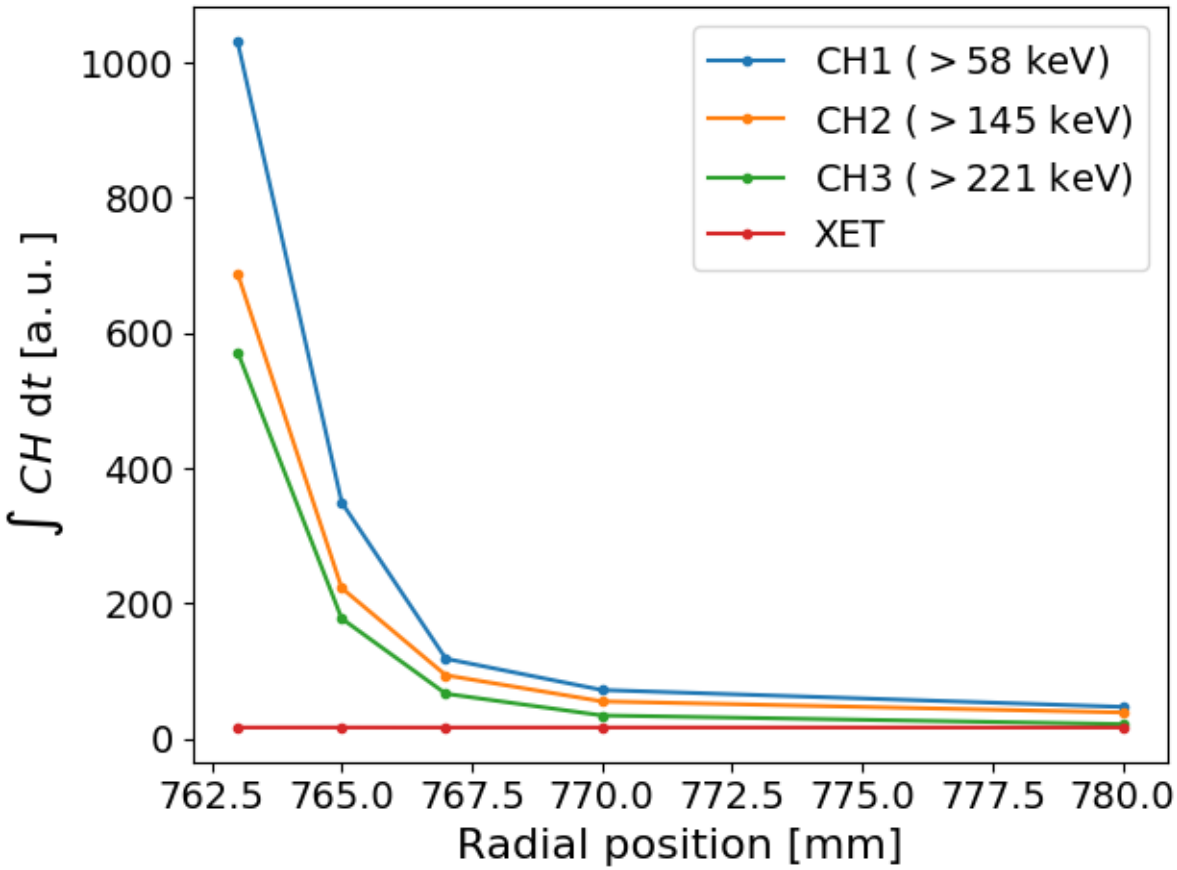
- Vysoko energetické částice
- Nebezpečí pro budoucí tokamaky

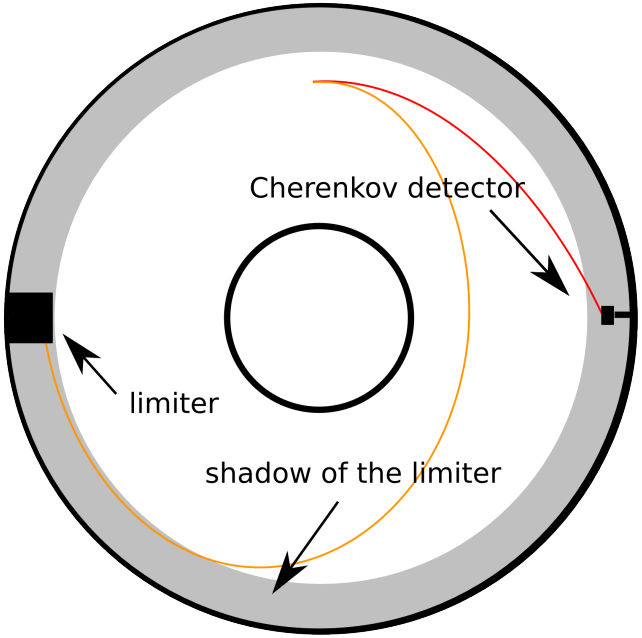


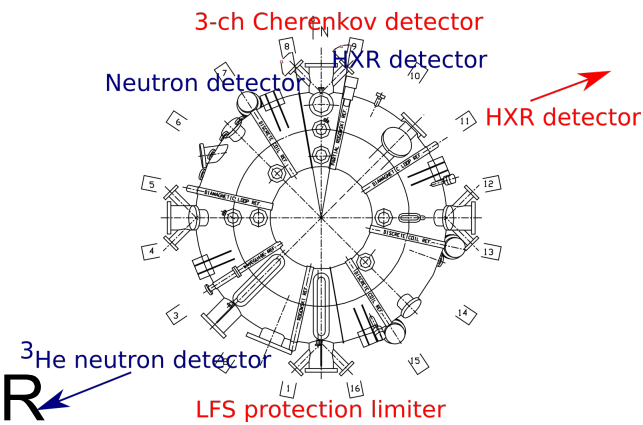
Čerenkovův detektor:

- Přímá detekce ubíhajících elektronů (RE)
- Detekce Čerenkovova záření dostatečně energetických e^- pohybující se skrz radiator - CVD diamant (n = 2.42)
- Odlišná vrstva molybdenu realizuje energetické prahy pro detekci: > 58 keV (bez Mo), > 145 keV (35 µm Mo), > 221 keV (70 µm Mo)

Motivace – intepretace dat







- Pozice LFS limiteru: 760 mm
- XET – stíněný fotonásobič monitorující HXR

Výpočet trajektorie RE

- „full orbit“ simulace, přesný popis Larmorovy rotace, n bodů na jednu rotaci → $dt = 0.01\, T_{gyro} = 0.01 \cdot 2\pi \frac{m\gamma}{qB} \approx 10^{-13}\, s$
- řádově 10^{10} iterací pro sledování částice po dobu několika ms
- vysoké nároky na integrátor → musí zachovávat fázový objem, chyby integrace poté závisí pouze na časovém kroku a řádu metody

Relativistická schémata:
Borisovo shcéma
Leap – frog
Vayů algoritmus
Highuerův algoritmus
VPA

Borisovo schéma:
- symplektické, jednoduché

$$\gamma_n = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v_n^2}{c^2}}} \qquad \boldsymbol{u}_n = \gamma_n \boldsymbol{v}_n \qquad \boldsymbol{u}_{n+1} = \tilde{\tilde{\boldsymbol{u}}} + \tilde{\boldsymbol{E}}$$

$$\tilde{\boldsymbol{E}} = \frac{q\,dt}{2m}\boldsymbol{E} \qquad \tilde{\boldsymbol{u}} = \tilde{\boldsymbol{E}} + \boldsymbol{u} \qquad \boldsymbol{v}_{n+1} = \frac{\boldsymbol{u}_{n+1}}{\sqrt{1+\frac{\boldsymbol{u}_{n+1}^2}{c^2}}}$$

$$\tilde{\boldsymbol{B}} = \frac{q\,dt}{2m\gamma_0}\boldsymbol{B} \qquad \tilde{\tilde{\boldsymbol{u}}} = \tilde{\boldsymbol{u}} + 2\frac{(\tilde{\boldsymbol{u}} + \tilde{\boldsymbol{u}} \times \tilde{\boldsymbol{B}}) \times \tilde{\boldsymbol{B}}}{1+\tilde{\boldsymbol{B}}^2} \qquad \boldsymbol{x}_{n+1} = \boldsymbol{x}_n + \boldsymbol{v}_{n+1}\, dt$$

Výpočet polí

- databáze tokamaku COMPASS (EFIT) → ψ = ψ(R,Z) a následný výpočet magnetického a elektrického pole

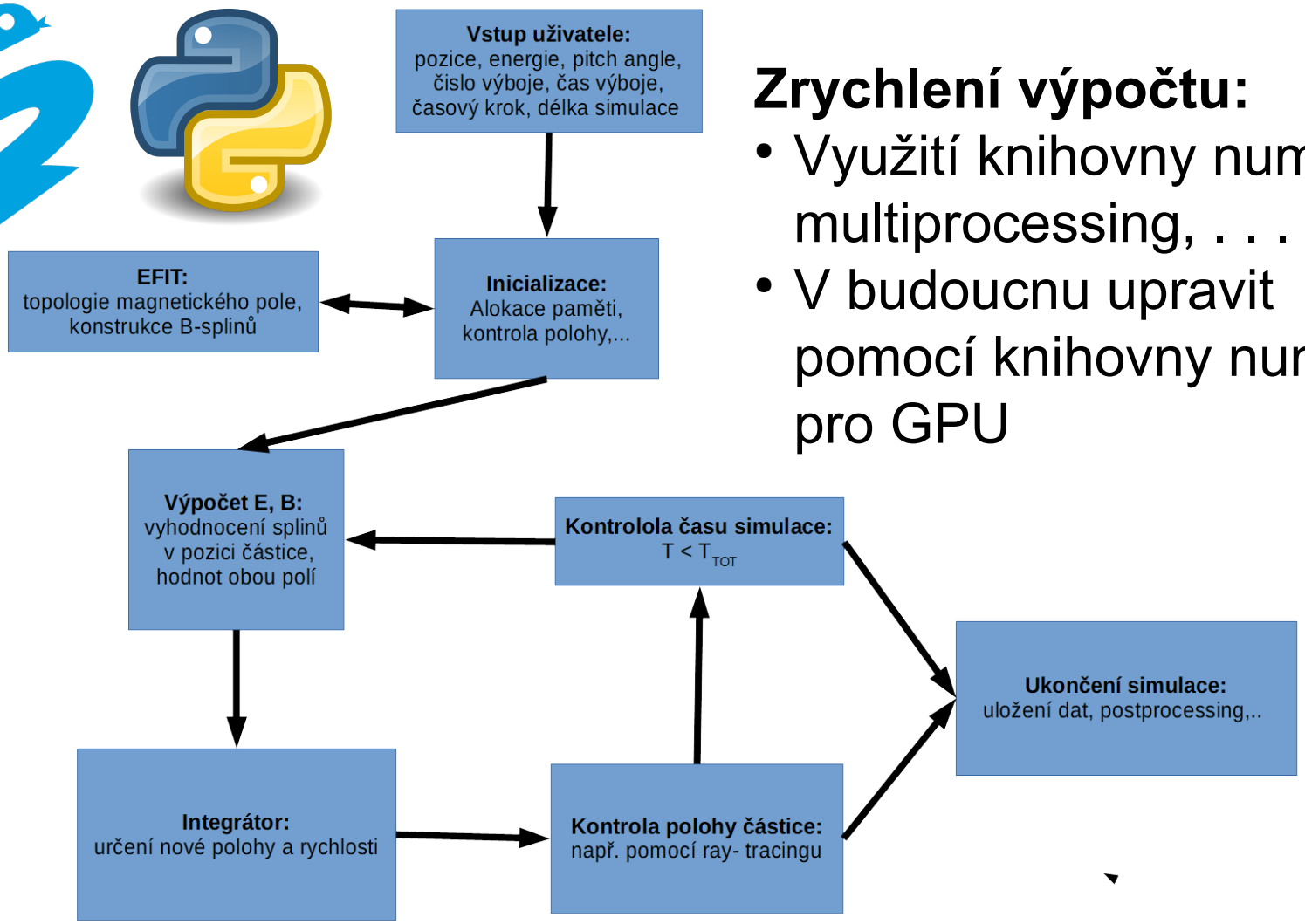
$$\boldsymbol{B} = \frac{1}{2\pi R}\left(-\frac{\partial \psi}{\partial z}, F(\psi), \frac{\partial \psi}{\partial R}\right)$$

- toroidální elektrické pole dáné vztahy

$$\psi = -R A_\phi \qquad \boldsymbol{E} = -\nabla \phi - \frac{\partial \boldsymbol{A}}{\partial t} \longrightarrow E_\phi = \frac{1}{R}\frac{\partial \psi}{\partial t}$$

- pole jsou reprezentována a také interpolována pomocí B-splinů $\boldsymbol{S}_{n,i}(x) = \sum_i \alpha_i B_{n,i}(x)$, kde $B_{n,i}$ představují bázové funkce

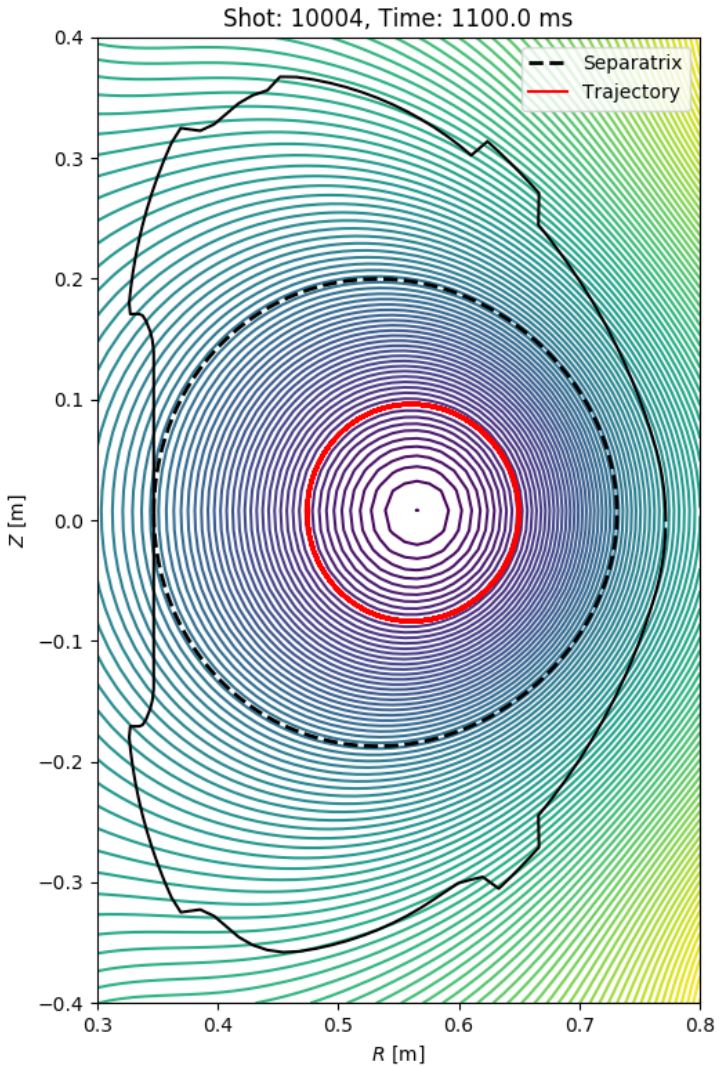
Schéma programu

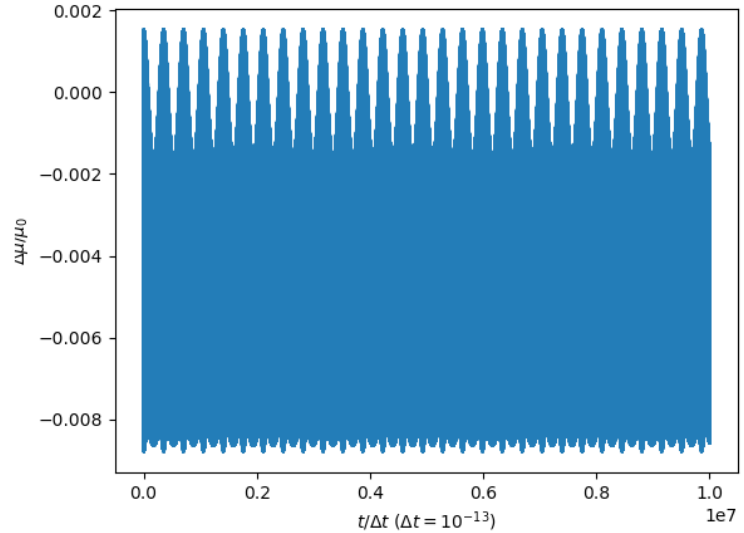


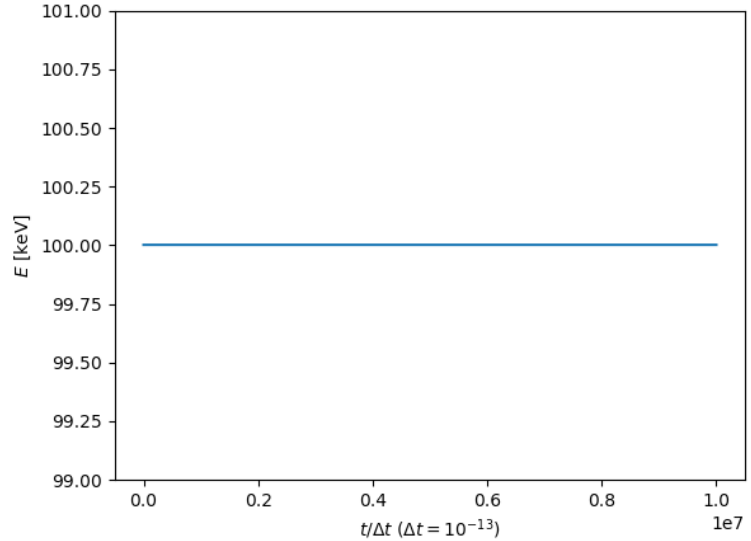
Zrychlení výpočtu:

- Využití knihovny numba, multiprocessing, . . .
- V budoucnu upravit pomocí knihovny numba pro GPU

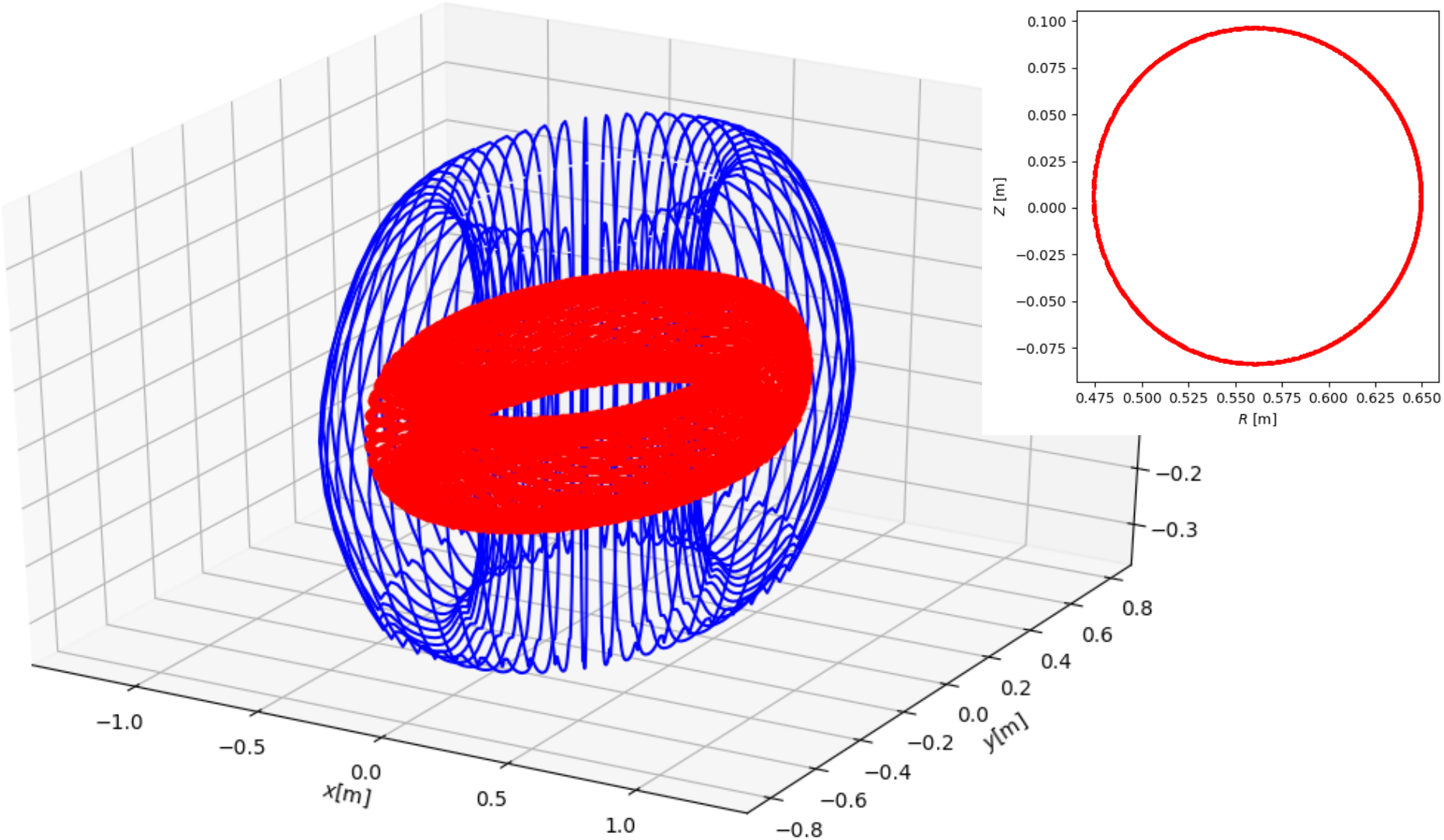
E = 100 keV, Θ = 0.8


Shot: 10004, Time: 1100.0 ms
Separatrix
Trajectory
Z [m]
R [m]

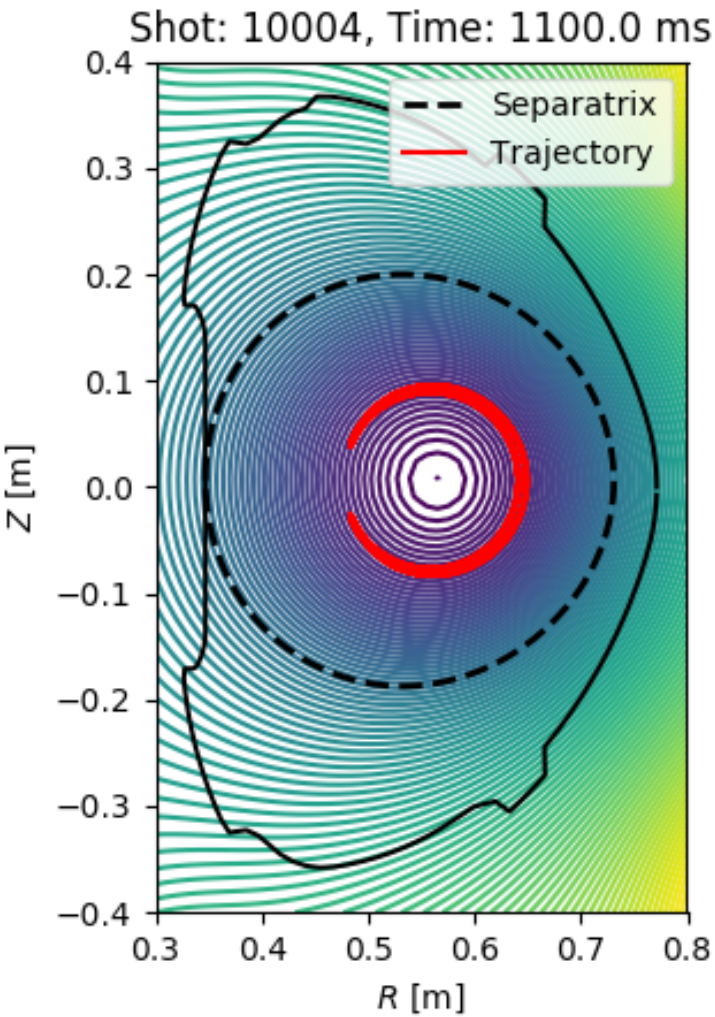

$\Delta\mu/\mu_0$
$t/\Delta t$ ($\Delta t = 10^{-13}$)
1e7

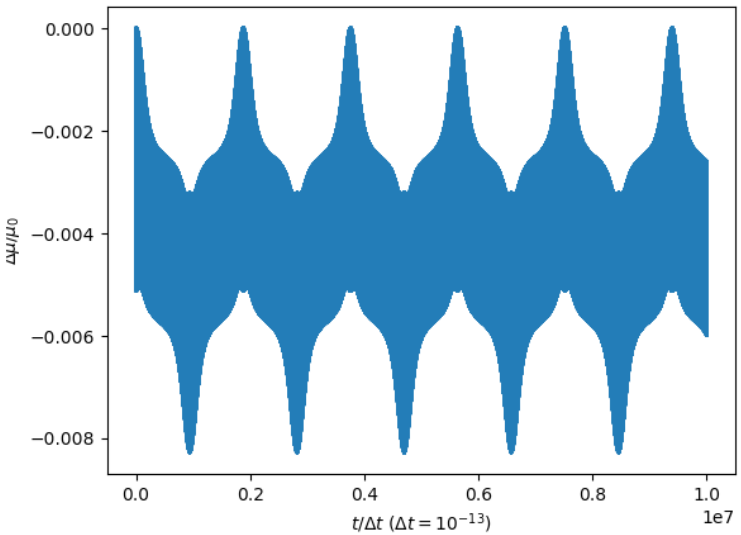

E [keV]
$t/\Delta t$ ($\Delta t = 10^{-13}$)
1e7

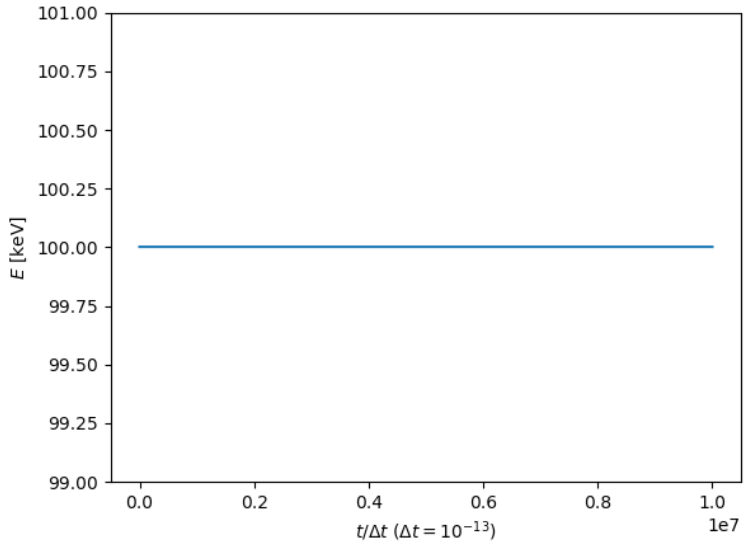
3D – procházející č.



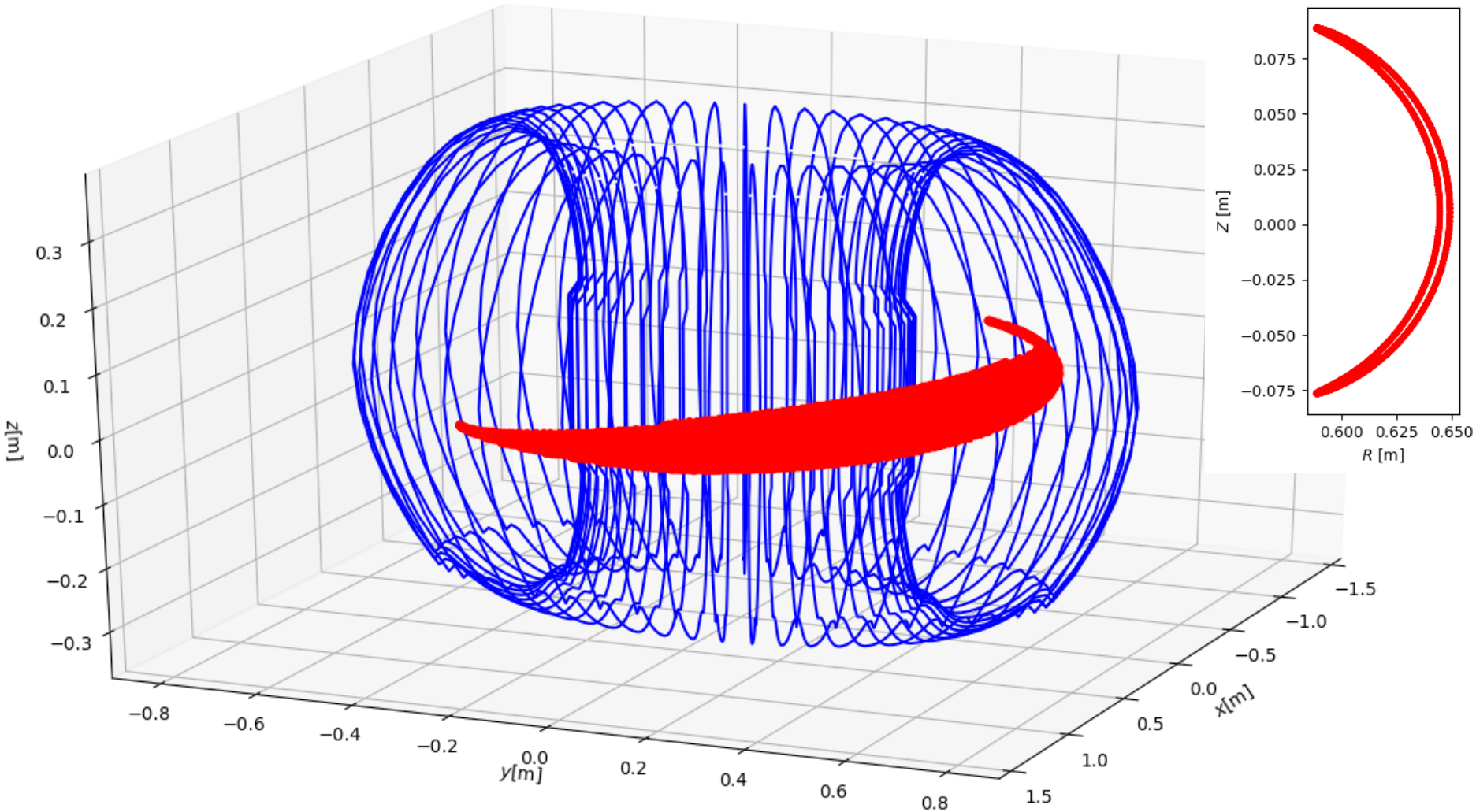
E = 100 keV, Θ = 0.5


Shot: 10004, Time: 1100.0 ms
Separatrix
Trajectory
Z [m]
R [m]
0.4
0.3
0.2
0.1
0.0
−0.1
−0.2
−0.3
−0.4
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8

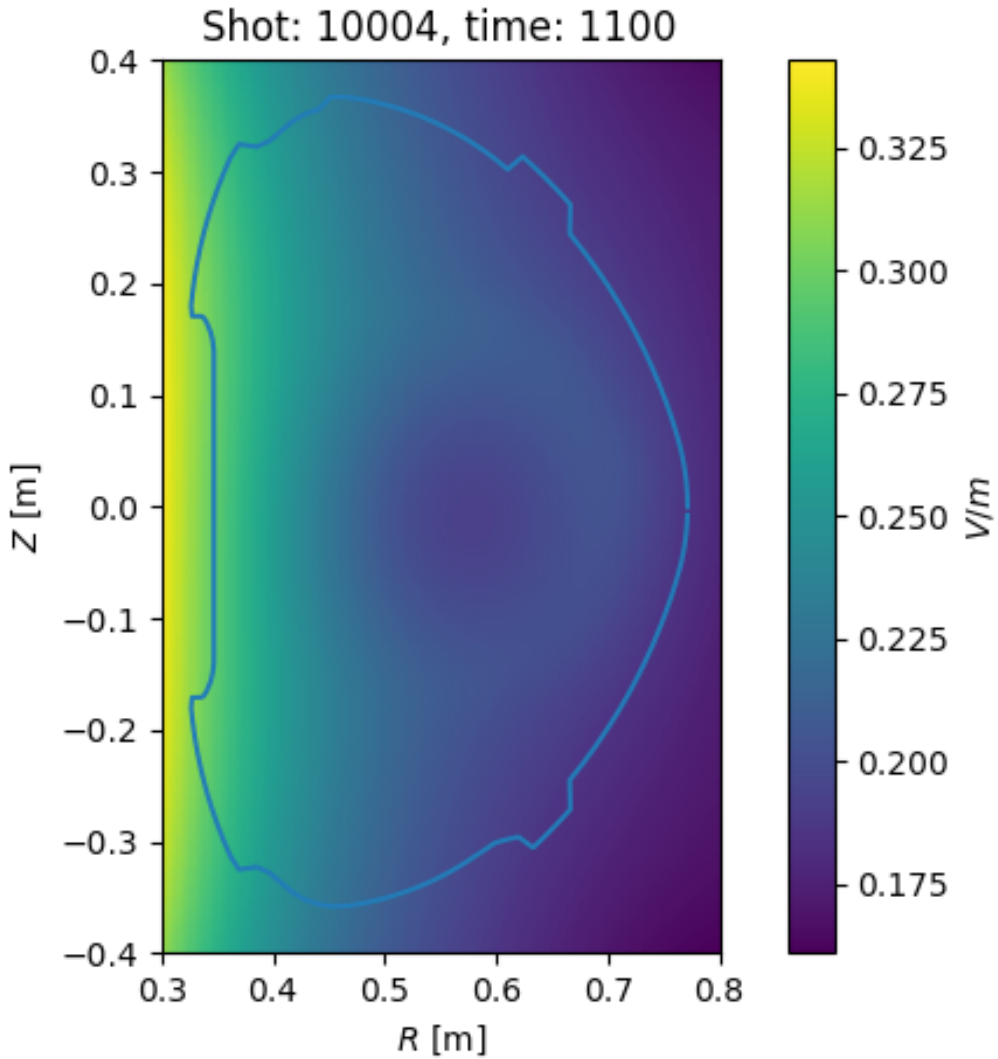

0.000
−0.002
−0.004
−0.006
−0.008
$\Delta\psi/\mu_0$
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
1e7
$t/\Delta t$ ($\Delta t = 10^{-13}$)

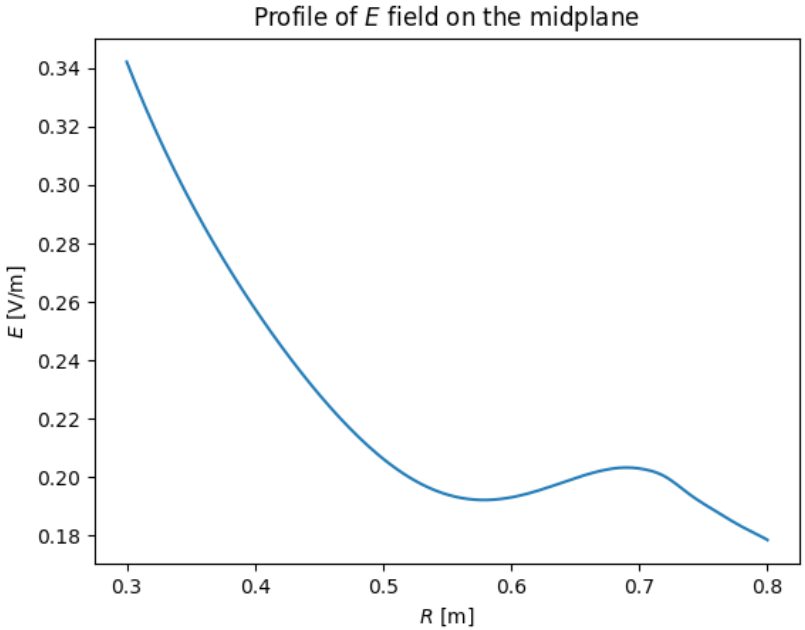

101.00
100.75
100.50
100.25
100.00
99.75
99.50
99.25
99.00
E [keV]
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
1e7
$t/\Delta t$ ($\Delta t = 10^{-13}$)

3D – banánová traj.



Role elektrického pole





- délka simulace v řádu ms → urychlování způsobuje zvětšování poloměru trajektorie RE → náraz

Interpretace diagnostiky

Jaké elektrony může detekovat Čerenkovův detektor?

- předchozí studie nasvědčují, že podstatnou roli hraje vzájemná pozice Čerenkovova detektoru a LFS limiteru

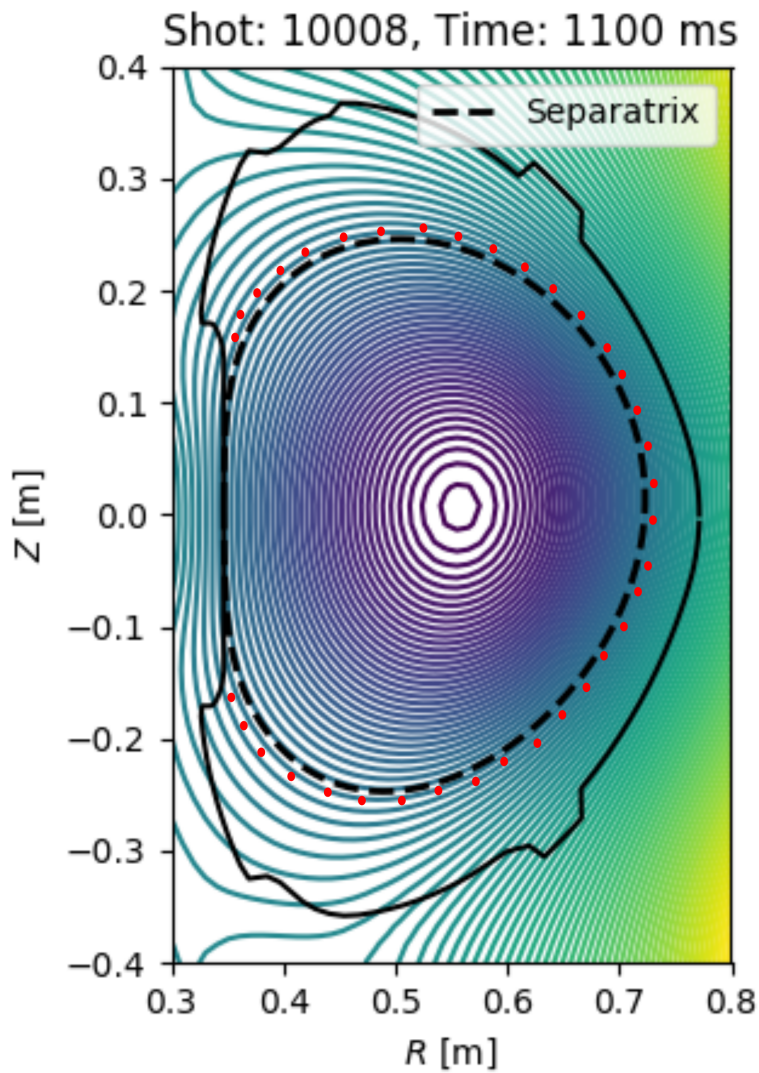
- **Jaký vliv má vzájemná orientace E a B a také magnetická topologie na detekci RE?**
- rozdílné signály pro různé konfigurece plazmatu

Jak vysvětlit velmi podobné (až shodné) trendy na jednotilivých kanálech Čerenkovova detektoru?

- interakce HXR žáření s detektorem nebo do detektoru jsou schopny doletět pouze elektrony s vyššími energiemi

Jaký je vliv velikosti Larmorova poloměru?

Jak simulovat?



- Urychlování elektronů → “pomalý” drift a následný náraz
- Zajímáme se především o konec simulace

Zjednodušení:

- “Přeskočíme” 99,9% simulace
- Simulujeme elektrony od okamžiku, kdy opouští plazma
- Nemusíme uvažovat srážky a jiné efekty . . .
- Scan přes různé parametry: energy, pitch angle, pozice, . . .

Současný model

Současný model zahrnuje:

- Axisymetrické 3D magnetické pole
- elektrické pole
- implementovány relativistické integrátory

Nezahrnuje:

- srážky relativistických elektronů
- poruchy magnetického pole (ripply, …)
- relativistické efekty (ALD síla, . . .)

Závěr

- implementovány relativistické integrátory počítající “full orbit” trajektorie ubíhahícíjích elektronů
- model urychlování RE implemntován v jazyce Python, zrychlení výpočtů díky modulu Numba
- validace implementovaných rovnic v 3D magnetickém poli tokamku COMPASS

Použitá literatura

[1] Čeřovský J., The Role of the Cherenkov detector in investigation of Runaway electrons in tokamak, 2017
[2] QIN, Hong, et al. Why is Boris algorithm so good?. Physics of Plasmas, 2013, 20.8: 084503.
[3] SOMMARIVA, C., et al. Test particles dynamics in the JOREK 3D non-linear MHD code and application to electron transport in a disruption simulation. Nuclear Fusion, 2017, 58.1: 016043.