

VSEBINSKI PRISPEVKI SLING PARTNERJEV

Naziv SLING partnerja: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo

Nazivi avtorjev: Matic Brank, Fakulteta za strojništvo, UL, laboratorij LECAD

Naslov prispevka SLO: Odlaganje moči plazme na prvo steno reaktorja ITER z algoritmom sledenja žarkov

Naslov prispevka EN: Plasma power deposition to first wall of ITER reactor with focus on ray-tracing

Odlaganje moči plazme na prvo steno reaktorja ITER z algoritmom sledenja žarkov

Ta študija se osredotoča na optimizacijo tehnik sledenja žarkom, ki se pogosto uporabljajo pri simulaciji pojavov jedrske fuzije, zlasti za oceno sevanja na površinah, izpostavljenih plazmi, in izračun signalov diagnostičnih sistemov za primerjavo z eksperimenti. Naša analiza predstavi študijo v tokamaku ITER, začenši z magnetnim ravnovesjem plazme, da bi prišli do toplotnega toka na komponentah, obrnjenih proti plazmi, zaradi delcev, ki se prevajajo vzdolž magnetnih silnic, z uporabo kode L2G [1]. Nato se s pomočjo OpenFOAM [2] reši toplotni model za pretvorbo toplotnih tokov v temperature. Nazadnje se lahko uporabi Monte Carlo tehnika sledenja žarkov za oceno sevanja iz plazme v kombinaciji s sevanjem s površin, obrnjenih proti plazmi, da se oceni skupna toplotna obremenitev na določeni površini. Predstavi se optimizacijska tehnika KD-tree razdelitve. Predstavljena je študija močnega in šibkega skaliranja za kodo sledenja žarkov Raysect [3].

Sledenje silnic polja

Glavni cilj je določiti, ali silnica polja seka posamezne komponente, obrnjenih proti plazmi. Zaradi oblikovanja ploščic PFC (komponente, obrnjene proti plazmi) silnice polja sekajo nekatere površine PFC, vendar ne vseh. Koda L2G rešuje enačbo silnic polja.

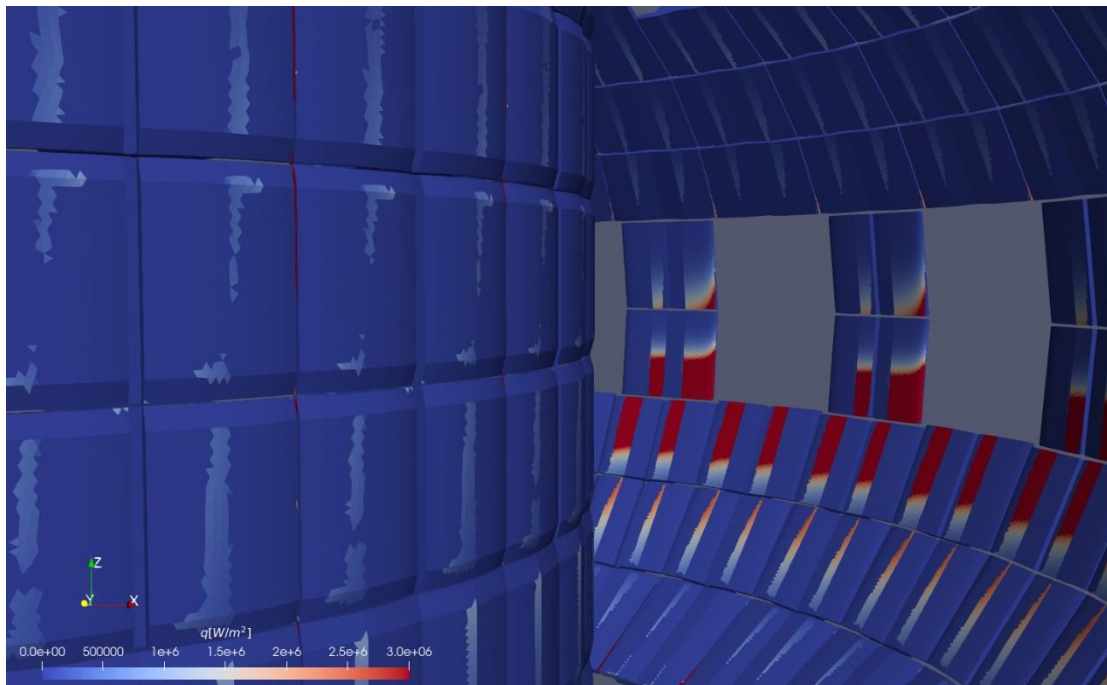
Standardna enačba silnic polja je podana kot:

$$\dot{x} = \frac{dx}{dt} = B(x)$$

Toplotni tok se izračuna preko:

$$Q = \frac{FP_{loss}}{2\pi R_m \lambda_m B_{pm}} \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} \exp\left(-\frac{(\psi - \psi_m)}{\lambda_m R_m B_{pm}}\right)$$

F je delež izgubljene moči v cevi toka, $B \cdot n$ je skalarni produkt med normalo in magnetnim poljem, P_{loss} je izguba moči v plasti odrezkov, λ_m je dolžina razpada, R_m je radialna razdalja od zadnje zaprte magnetne silnice in ψ je magnetni tok.

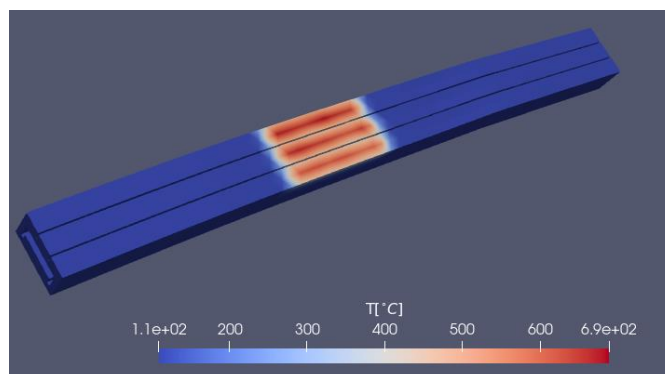


Toplotni tok na plazmi izpostavljenih komponentah.

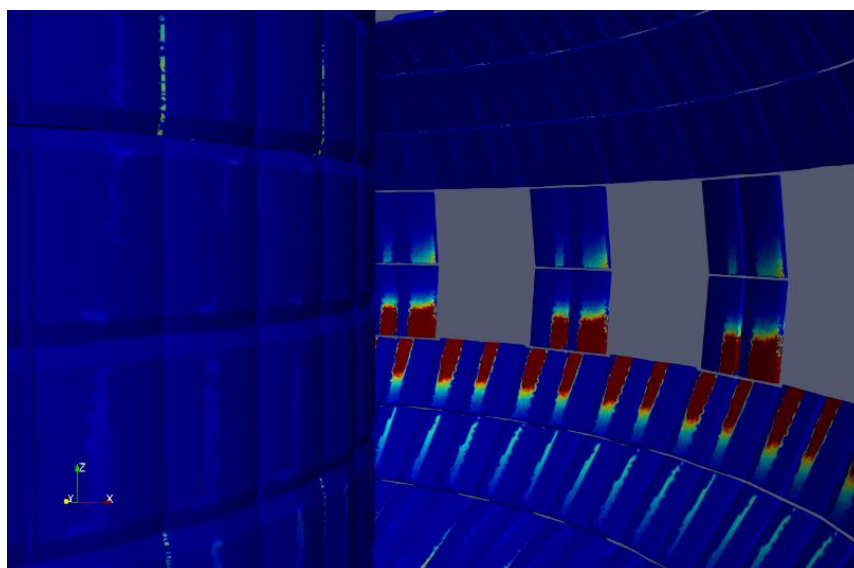
Prenos toplote

Prenos toplote se uporablja za izračun temperature iz toplotnih tokov plazme, ki so predpisani na površini kot robni pogoj. Upoštevajo se temperaturno odvisne lastnosti materiala (gostota $\rho [kg/m^3]$, toplotna kapaciteta $c_p [J/(kg \cdot K)]$, toplotna prevodnost $k [W/(m \cdot K)]$) za reševanje difuzijske enačbe na 3D mreži. Pri ITER-ju je prva stena sestavljena iz tako imenovanih prstov, narejenih iz berilija ali volframa, ki sta prva materiala, izpostavljena plazmi. Reši se difuzijska enačba:

$$q = -\kappa(T)\nabla^2 T, \quad \text{with } \kappa(T) = \frac{k(T)}{\rho(T)c_p(T)}$$



Porazdelitev temperature na enem izmed prstov, ki tvorijo prvo steno reaktorja.

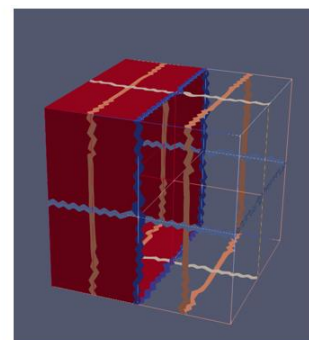
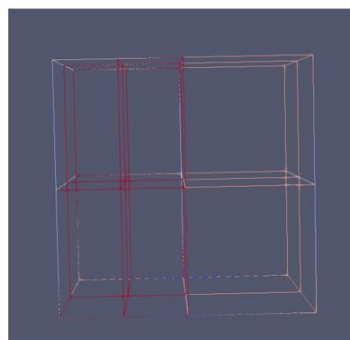
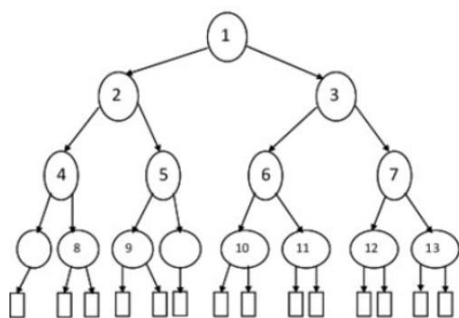


Porazdelitev temperature na vseh panelih. Največja temperatura je okrog 1000°C.

Sledenje žarkov

Zmogljivost kode za sledenje žarkov Raysect

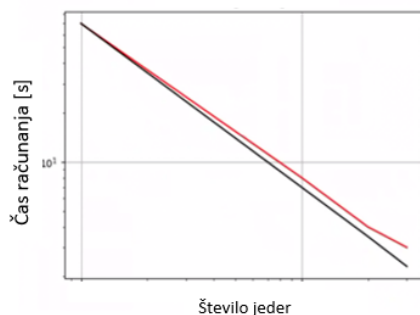
KD-tree razdelitev se uporablja za ločevanje računske mreže v škatle, ki vsebujejo več pod-škatel (drevesna struktura z več nivoji). Presečišče žarka z računsko mrežo se izvede samo za škatlo, kar pospeši process ugotavljanja preseka žarka s trikotniki.



(levo) Struktura KD-tree [4] (v sredini) Particija v omejevalne škatle (desno) Trikotna mreža, razdeljena v omejevalne volumne.

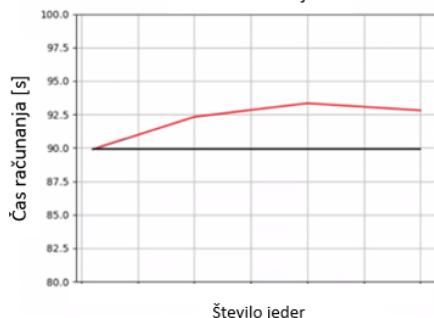
Pri sledenju žarkov se uporablja vzvratno sledenje žarkov, kar pomeni, da se žarki generirajo na objektu, ki ga obravnavamo. Žarki se projicirajo v računsko domeno, kjer se izračunajo preseki s trikotniki in vsi ostali fizikalni parametri. Primer za močno in šibko skaliranje vsebuje ~26k trikotnikov. Iz vsakega trikotnika je bilo naključno v prostor izstreljenih 40 žarkov in preverjeno presečišče z objekti v prizoru (skupaj ~1,41 milijona trikotnikov). Za šibko skaliranje je število trikotnikov enako, vendar je število žarkov na vsakem trikotniku ustrezno zmanjšano.

Močno skaliranje



N proc	Dejanski čas (s)	Idealni čas (s)
1	70.7	70.7
10	8.4	7
20	4.7	3.5
30	3.9	2.33

Šibko skaliranje



Močno skaliranje za Raysect

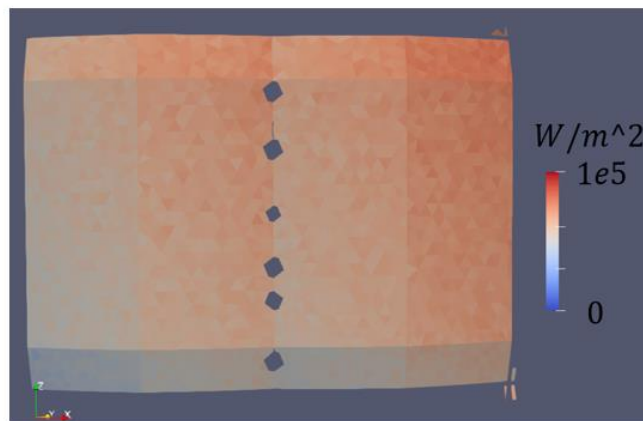
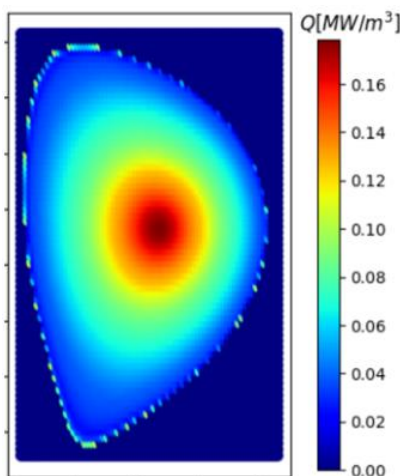
N proc	Dejanski čas (s)	Idealni čas (s)
1	89.89	89.89
10	92.32	89.89
20	93.34	89.89
30	92.8	89.89

Šibko skaliranje za Raysect

Skaliranje za Raysect.

V metodi Monte Carlo sledenja žarkov (MCRT) se radiativni prenos toplote izračuna z naključnim sproščanjem statistično velikega števila žarkov iz opazovalne geometrije in sledenjem njihovega napredovanja skozi prizor. Za določeno konfiguracijo plazme je definiran profil sevanja (bodisi kot moč $P \left[\frac{W}{m^3} \right]$ ali svetlost $I \left[\frac{W}{m^3 sr} \right]$). Iz temperature na površini se lahko svetlost izpelje iz Stefan-Boltzmannovega zakona. Skupna moč P_i , ki prihaja na opazovalno površino S_i , je definirana kot integral vpadne svetlosti $L_i(r, \omega)$ preko zbiralnega prostorskega kota Ω in površine A_i :

$$P_i = \int_{A_i} \int_{\Omega} L_i(r, \omega) \cos \theta \, d\omega dA$$



(levo) Primer sevalnega profila plazme v ITER-ju (jedrna plazma) (desno) Primer sevalnih toplotnih tokov na panelu 4 v ITER-ju (Jedrna plazma + sevanje površin)

Zaključek

Ta študija obravnava postopek za izračun sevanja na površini jedrskih naprav. Predstavljen je tudi koncept optimizacije metode sledenja žarkov. Trenutne algoritemske izboljšave so k-d drevesna razdelitev in algoritem ruske rulete za prekinjanje odbijajočih se žarkov. Implementirano je tudi vzorčenje po pomembnosti za učinkovitejše vzorčenje žarkov. Sledenje vsakega žarka se lahko izvaja sočasno, tj. sledenje posameznih silnic polja je neodvisno drug od drugega. Vhodni parametri, potrebni za to simulacijo, so porazdelitev plazme (to je običajno podano iz drugih simulacij fizike plazme, ki shranjujejo rezultate v integrirani bazi podatkov pri ITER - v binarnem načinu hdf5). Veliko število mrež, ki opisujejo fuzijski reaktor, je trenutno na voljo v ASCII VTK formatu.

Viri:

- [1] Gregor Simic, "Enhancements and applications of the SMITER magnetic field line tracing and heat load mapping code package," presented at the 30th IEEE Symposium on Fusion Engineering, Oxford, UK, 7 2023
- [2] T. Looby *et al.*, "A Software Package for Plasma-Facing Component Analysis and Design: The Heat Flux Engineering Analysis" *Fusion Sci. Technol.*, vol. 78, no. 1, pp. 10–27, Jan. 2022
- [3] Carr Matthew and Alex Meakins, "Raysect Python Ray-tracing package." [Zenodo]. Available: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1205064>
- [4] Yiang, Xiaoqian & Cheng, Samuel & Ohno-Machado, Lucila. (2011). Quantifying fine-grained privacy risk and representativeness in medical data. Proceedings of the ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining.