

Experiment s tekutým lithiem na tokamaku COMPASS

Jan Čečrdle

Vedoucí: Mgr. Jan Horáček

Zimní škola FTTF – Mariánská 22.1.2020

Outline

- Problém přehřátí divertoru
- Tekuté kovy jako PFC
- Kapilární porézní systém
- Simulace experimentu
- Analýza experimentu s tekutým lithiem na tokamaku COMPASS
- Plány do budoucna
- Závěr

Přehřátí divertoru tokamaku

LMD inclination	Steady q_{\perp}	Perpendicular heat shocks	Comment
COMPASS 45°	30 MW/m ² for 0.1 s	1.7 MJ m ⁻² s ^{-1/2} (ELM) [14]	Mo CPS heat-penetration depth = 2 mm/0.1 s
COMPASS Upgrade, 3°	20 MW/m ² for 1 s	$\sin(3^{\circ}) \times 1.6 \text{ MJ/m}^2(0.5 \text{ ms})^{-1/2} = 4 \text{ MJ m}^{-2} \text{ s}^{-1/2}$ (ELM)	Attached divertor [1, 15]
ITER 4.7° [2]	20 MW/m ² for 1000 s	66 MJ m ⁻² s ^{-1/2} [15] not mitigated ELM	W cracks at 20 MW/m ² [16] W melts at 55 MJ m ⁻² s ^{-1/2}
EU DEMO1 [3, 17, 18]	10 with seeding	128 MJ m ⁻² s ^{-1/2}	EUROFER-97 melts at 6 MJ m ⁻² s ^{-1/2}
	150 MW/m ² no seeding	(unmitigated disruption) ~10 MJ m ⁻² s ^{-1/2} (MGI-mitigated disruption)	
Magnum-PSI	18 MW/m ²	[9]	tin-CPS survived without damage
QSPA	–	224 MJ m ⁻² s ^{-1/2} [8]	Li-CPS survived without damage plasma gun with $(2-5) \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$
MK-200UG 10 ²¹ m ⁻³	–	2370 MJ m ⁻² s ^{-1/2} plasma gun [8]	Li-CPS survived without damage plasma gun with $(2-6) \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$

Tepelné toky a tepelné šoky pro různá zařízení a experimenty [Horáček,2018]

=> nutná implementace ochranných opatření (mitigace ELMů, seeding)

Tekuté kovy jako řešení problému přehřátí divertoru

Výhody tekutých kovů jako PFC:

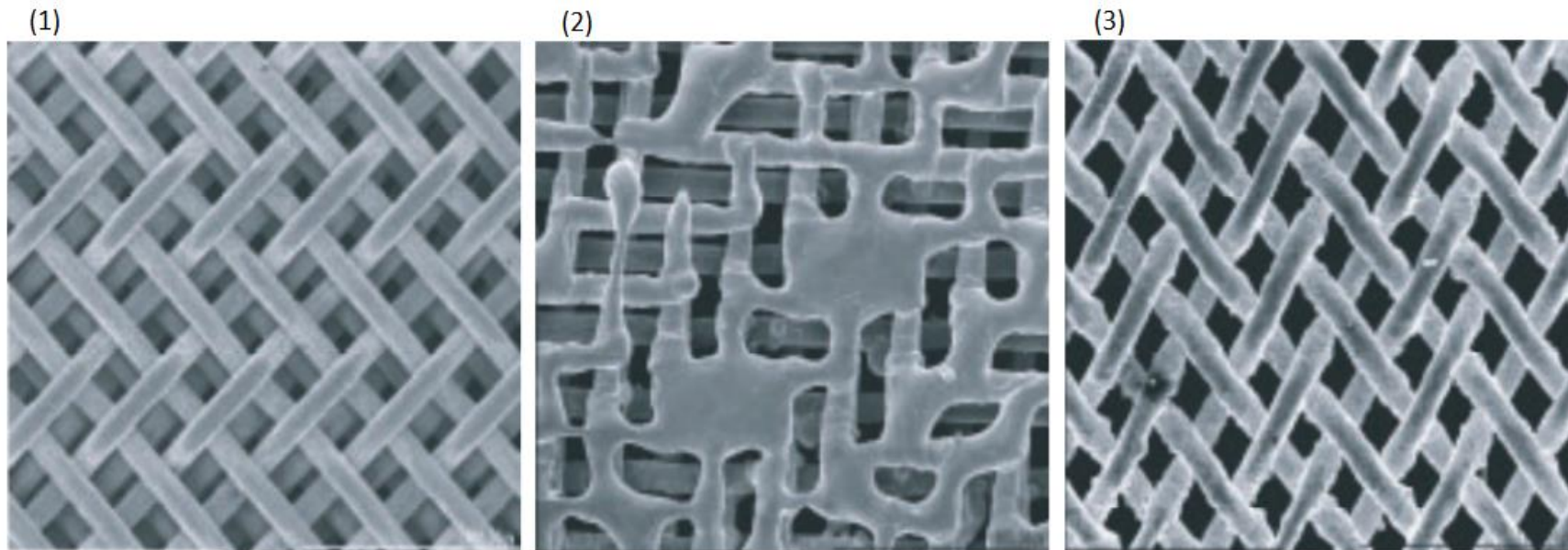
- Absence krystalické struktury
- Chránění výparem

Nevýhody:

- Udržení kapaliny
- Uvolňování materiálu z divertoru

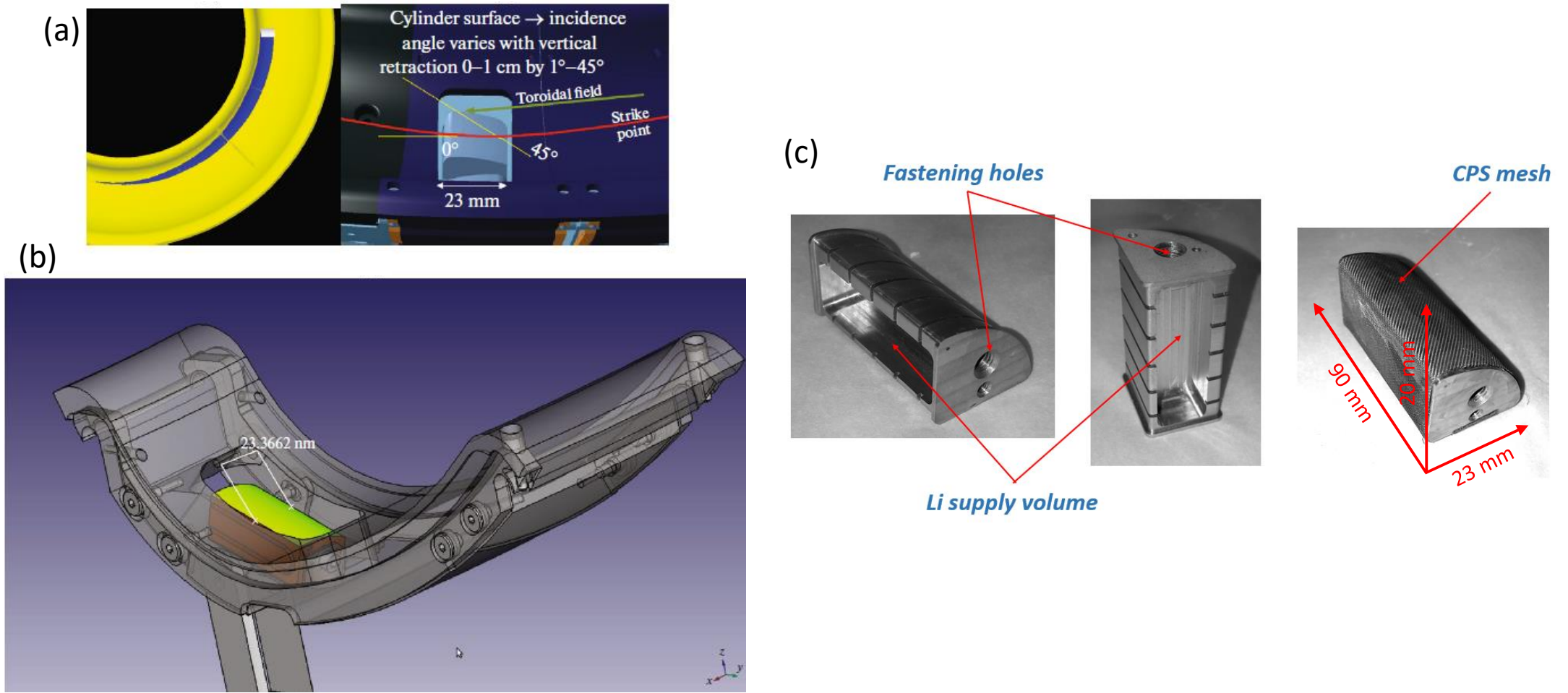
Capillary porous system

- Tekutý kov držen mezi póry pletiva z teplotně odolného materiálu (W,Mo)
- Doplnování uniklé tekuté složky kapilárami



(1) CPS pletivo bez TK, (2) CPS bez TK po jednom výboji $Q=4\text{MJ/m}^2$, $t=250\ \mu\text{s}$, (3) CPS s lithiem po 22 výbojích [Evtikhin et al., 2002]

Experiment s CPS na tokamaku COMPASS



(a) Schéma umístění LMD vzorku v tokamaku, (b) Model divertorové desky s LMD vzorkem, (c) Fotografie LMD vzorku

Model pro výpočet chlazení výparem

$$P_{vs} = (\Gamma_{sp}(T_{surf}, \Gamma_D) + \Gamma_{vap}(T_{surf})) (1 - R) (\epsilon_{cool}(T_e, \tau) + E_{vap})$$

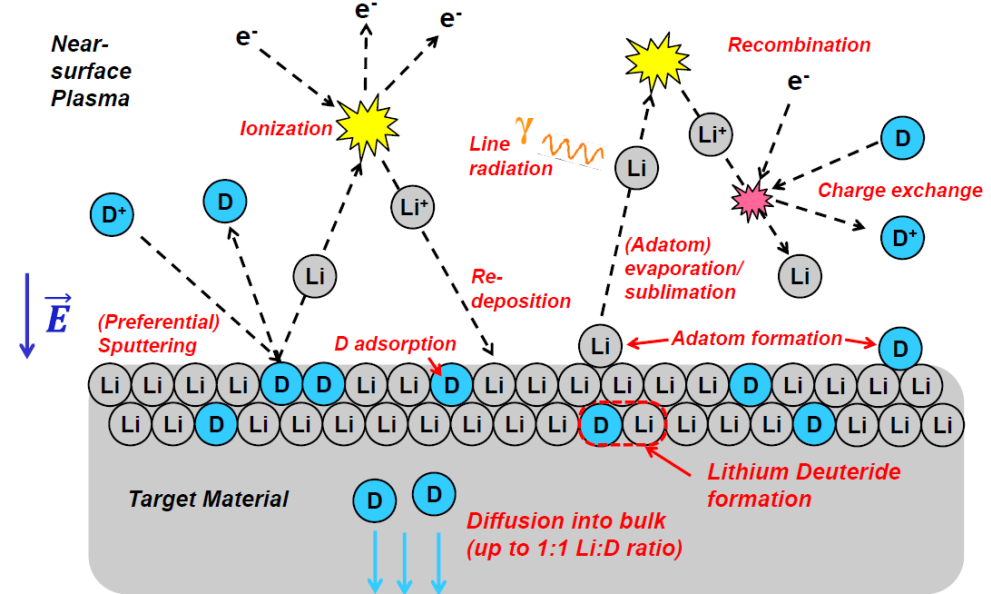
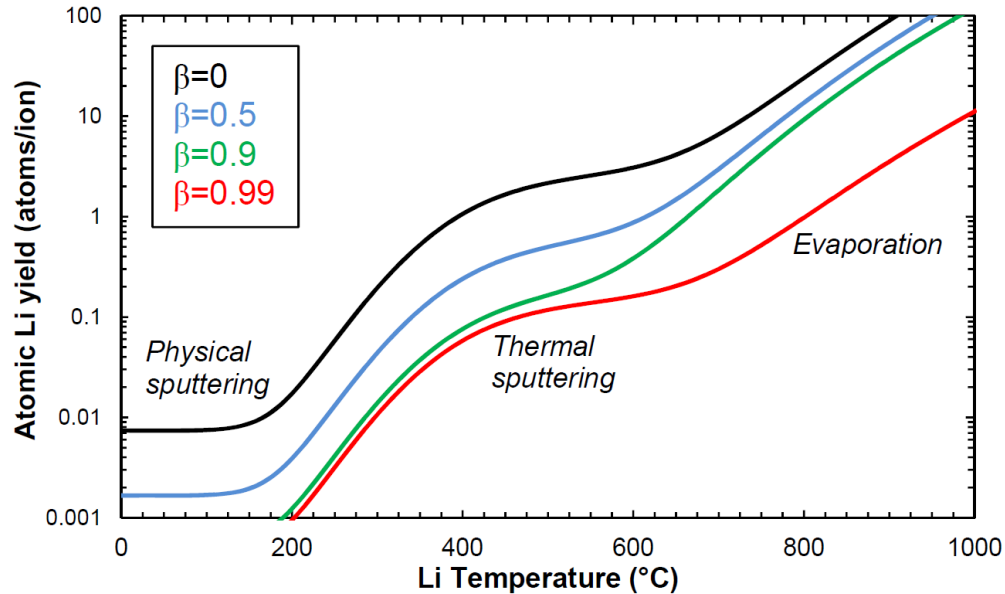
↑
Odprašování
(fyzikální + termální)

↑
Vypařování

↑
Redepozice

↑
Vyzářená energie

↑
Latentní teplo

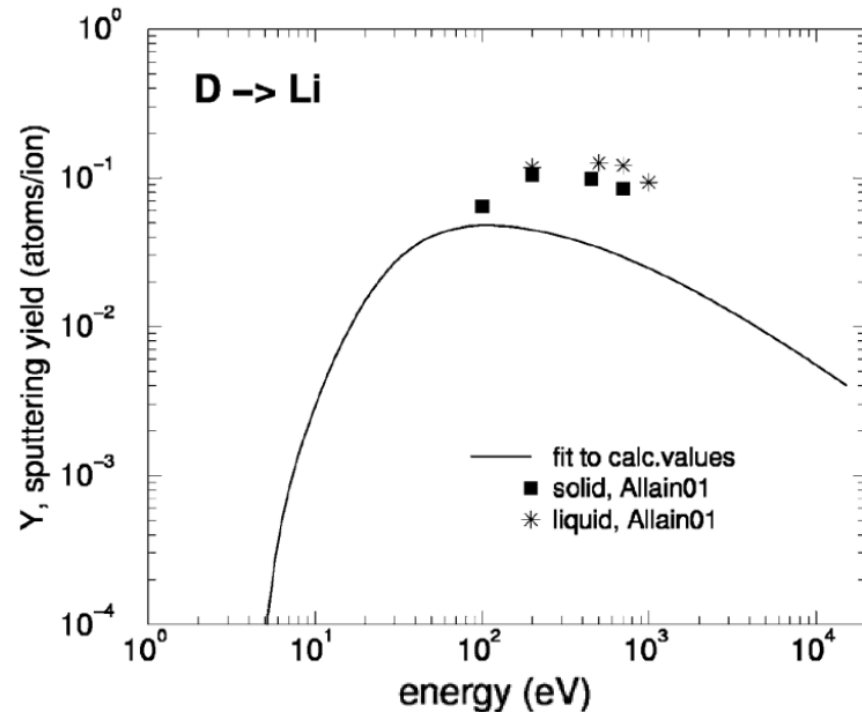


Množství uvolněných atomů lithia v závislosti na teplotě povrchu [Abrams,2015]

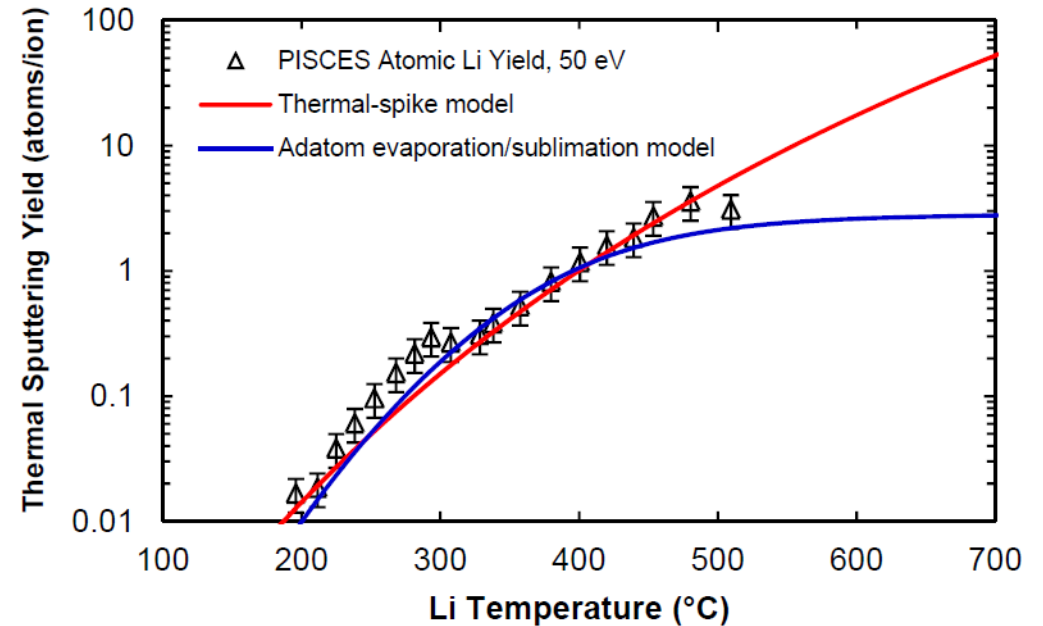
Schéma eroze lithia vysokoteplotním plazmatem [Abrams, 2015]

Fyzikální a termální odprašování

- $\Gamma_{sp} = \Gamma_D \left(Y_{phys} + \frac{Y_{ad}}{1 + A \exp\left(\frac{E_{eff}}{kT}\right)} \right), Y_{ad} = 2,9, A = 9,6 \times 10^{-6}, E_{eff} = 0,7 \text{ eV}$



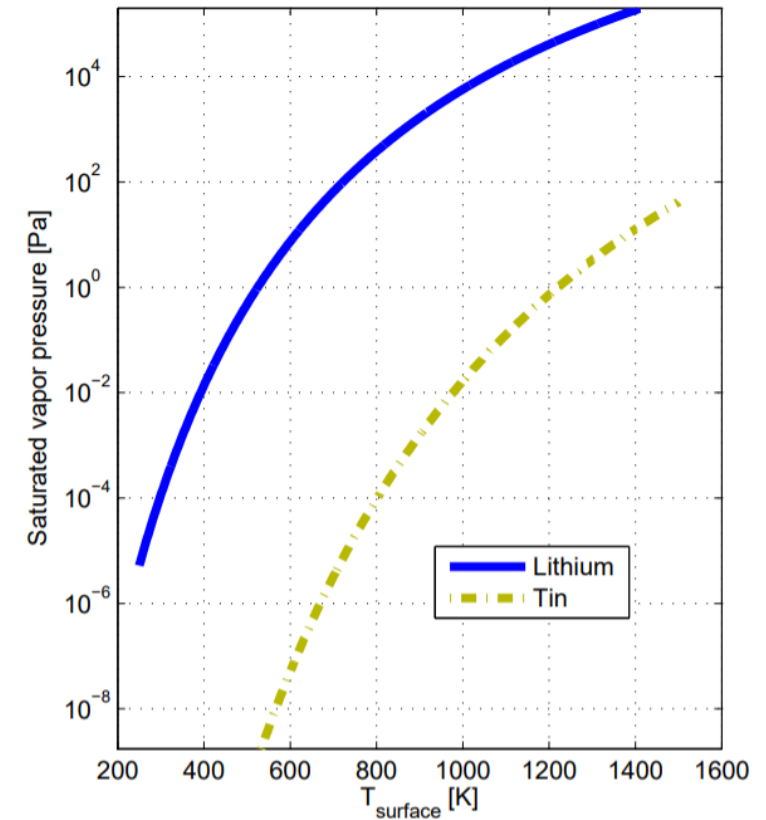
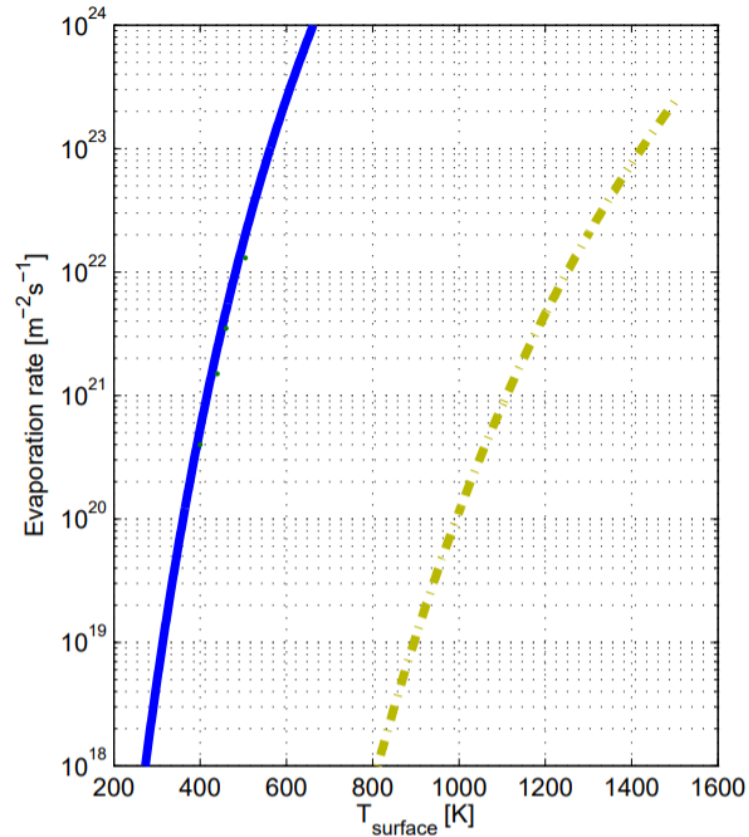
Závislost výtěžku fyzikálního rozprašování na energii částice [Eckstein, 2007]



Závislost výtěžku termálního rozprašování v závislosti na teplotě povrchu [Abrams, 2015]

Vypařování

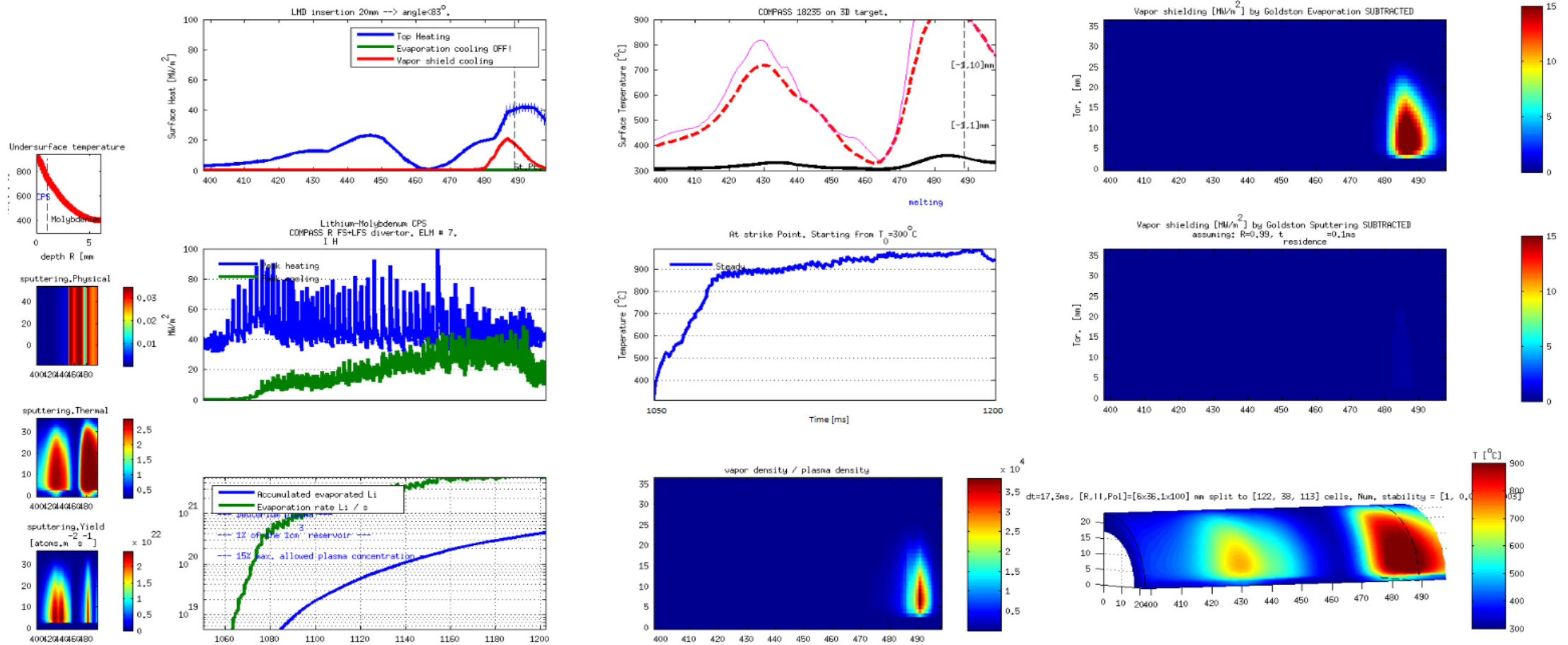
- $\Gamma_{\text{vap}} = \frac{p(T)}{\sqrt{2\pi m k T}}$



(a) Závislost míry vypařování Li (modrá) a Sn (žlutá) na teplotě povrchu (b) Závislost výparného tlaku Li a Sn na teplotě povrchu

#18235 — ELMy H-mode

#18235 — ELMy H-mode



Výsledky simulací před experimentem

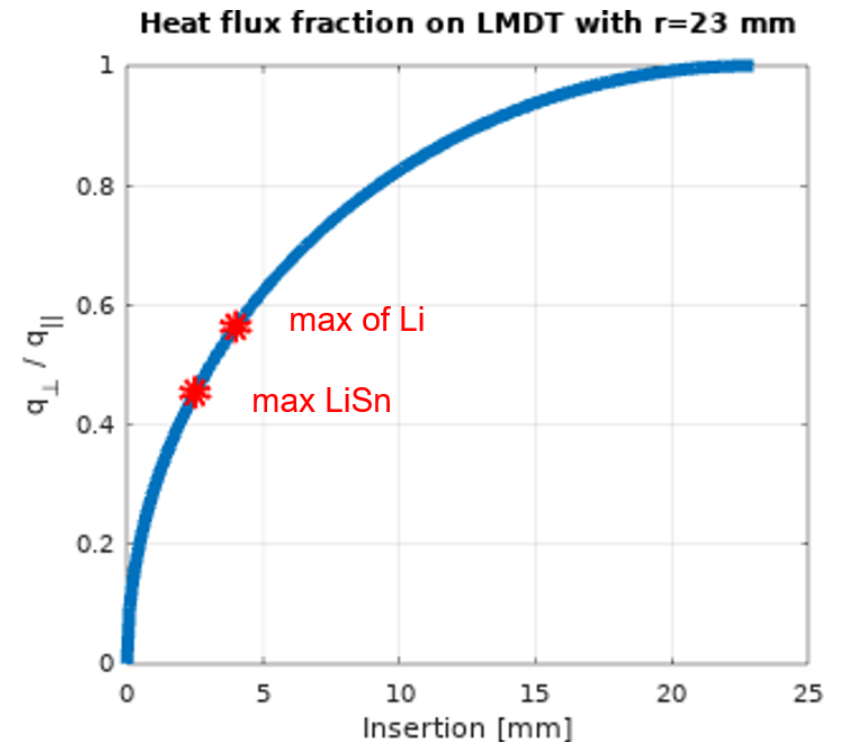
- Výsledky výpočtu chlazení výparem odpovídají teoretickým předpokladům (poměr rozprašování a výparu v závislosti na T_{surf})
- K přesnějšímu popisu experimentu bude potřeba lépe určit některé parametry (R, τ) a zejména přesně měřit T_{surf}

Výsledky experimentu

$q_{\perp} = q_{\parallel} * (r^2 - (r-h)^2)^{1/2} / r$, kde $r = 23$ mm je poloměr targetu a h je výška vysunutí

Maximální vysunutí targetu:

$h_{\text{Li}}^{\text{OK}}$	= 4 mm	$q_{\perp} \cong 14$ MW/m ²
$h_{\text{Li}}^{\text{damage!}}$	= 5 mm	$q_{\perp} \cong 16$ MW/m ²
h_{SnLi}	= 2.5 mm	$q_{\perp} \cong 10$ MW/m ²



Maximální dosažené poměry paralelního a kolmého tepelného toku pro Li a LiSn targety

Výsledky experimentu

- L-mode:

Vysunutí až o 7,5 mm, nepozorováno žádné poškození,
vrstva Li_2O na povrchu, pohybující se kapky tekutého Li na povrchu

- H-mode:

Vysunutí až o 4 mm \rightarrow 16 MW/m²

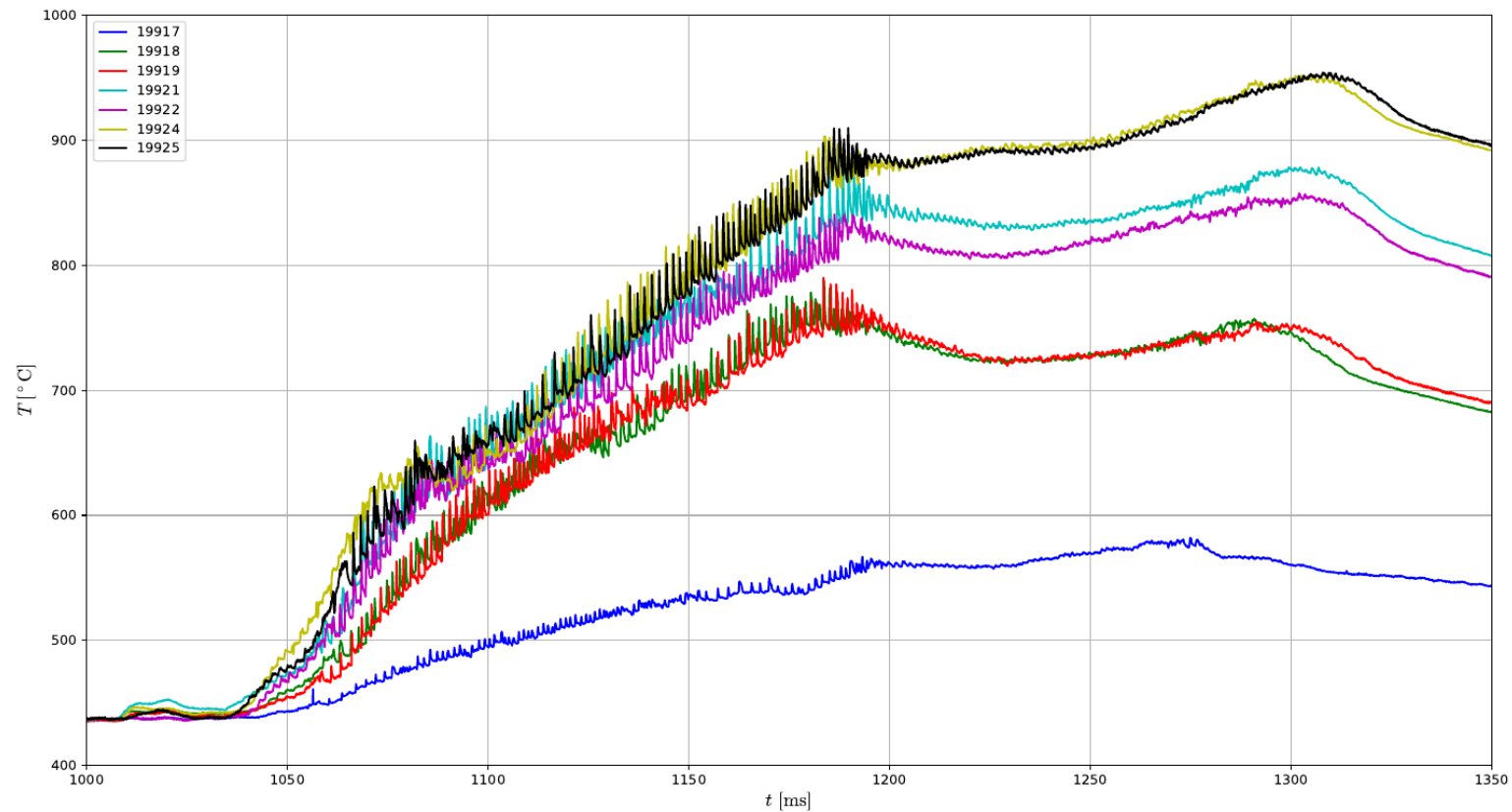
#19802 \rightarrow Uvolněno velké množství kapek \rightarrow disrupce

Při vysunutí o 5mm \rightarrow 19 MW/m²

#19805 \rightarrow mnoho kapek \rightarrow bez disrupce přestože

LMDT poškozen \leftarrow Teplota povrchu pravděpodobně >3000 K

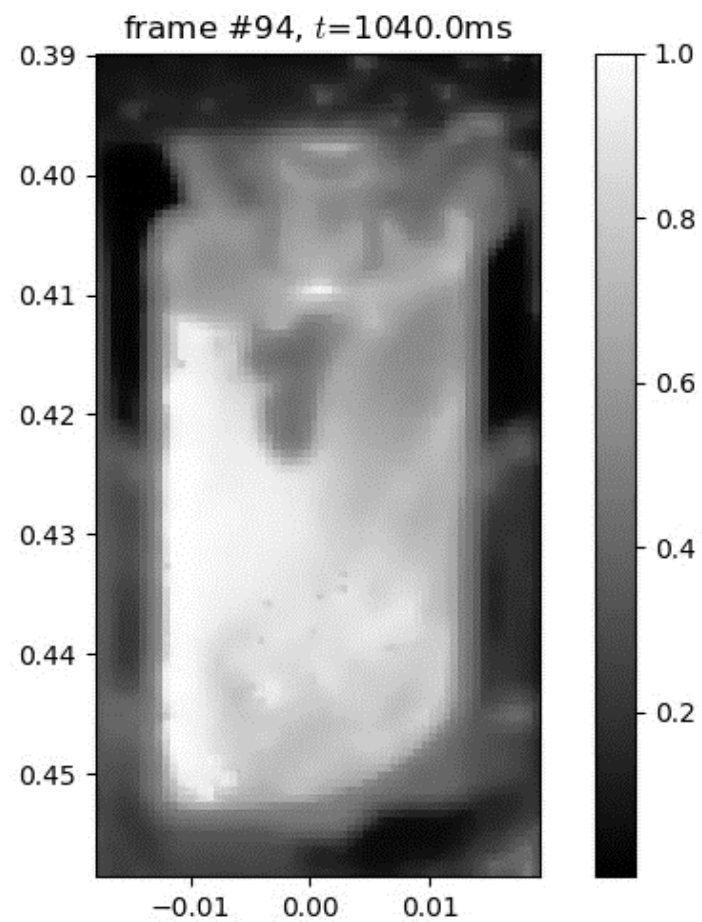
Výsledky experimentu



Maximální dosažené teploty targetu při výbojích 19917-19925 z měření infrakamerou

Pohybující se kapky na povrchu

#19773



Pohybující se kapky na povrchu

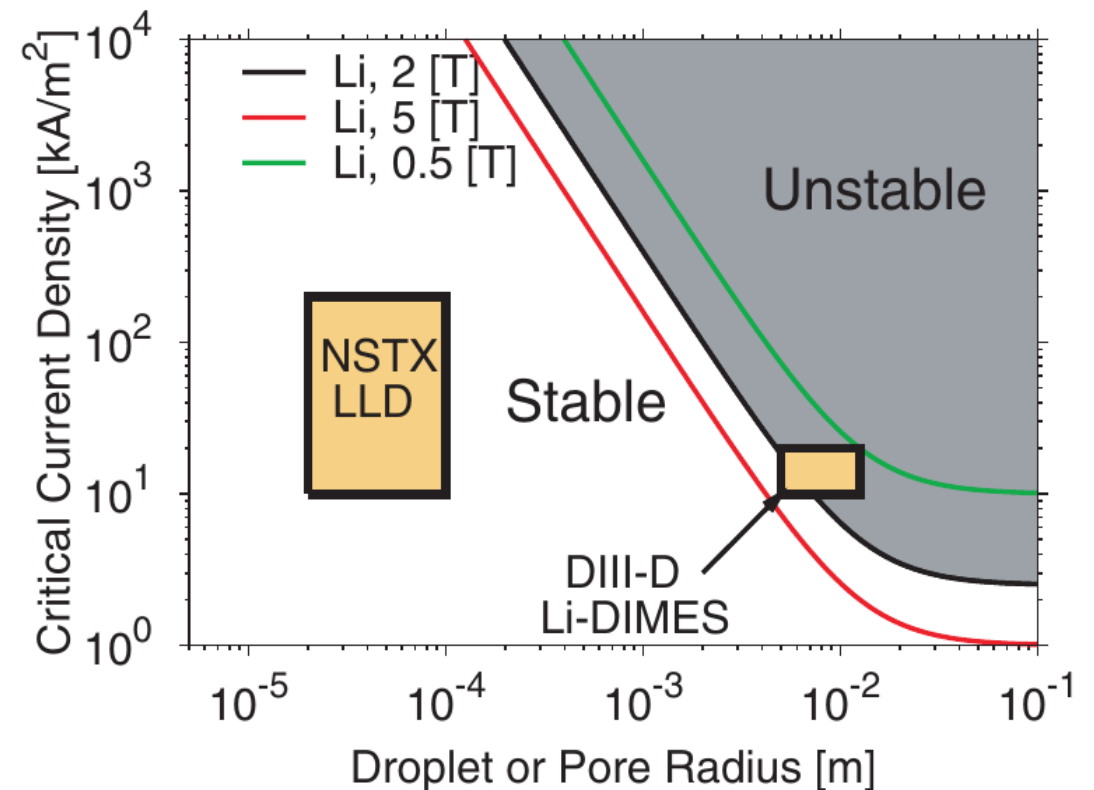
Vznikají na zoxidované vrstvě,
tzn. nejsou drženy v CPS.

Nebyl pozorován únik kapek z povrchu,
ale pouze z okrajů.

Pravděpodobný mechanismus úniku:
Kelvin-Helmholtzova nestabilita
pokud je povrchové napětí menší
než hustota $J \times B_{\text{tor}}$ síly.

Divertorové sondy měří $\approx 140 \text{ kA/m}^2$.

→ cca 1 mm kapky



Závislost stability na proudu, velikosti kapek a magnetickém poli [Jaworski, 2013]

Plány do budoucna

- Zpřesnění simulací – přesnější stanovení tepelných toků, tloušťky neutrálního oblaku atd.
- Analýza tepelných toků a teplot povrchu targetu - stanovení VS efektu
- Určení vlivu pokrytí stěny lithiem - pokles Z_{eff}
- Vyhodnocení experimentu s SnLi
- Případné pokračování SnLi kampaně

Závěr

- Ze simulací vyplývá, že k vyrovnání ohřevu výparným chlazením dochází při ≈ 900 °C
- Povrch targetu byl zahřát při některých výbojích v maximální hodnotě na teploty relevantní pro měření vapor shieldingu
- Lithiový target při L-mode nepoškozen
- Při H-mode poškozen (ne z důvodu vyschnutí CPS)
- Lithium způsobovalo radiační kolaps pouze při velkém uvolňování kapek
- Při dalších experimentech bude nutné odstranit zoxidovanou vrstvu

References

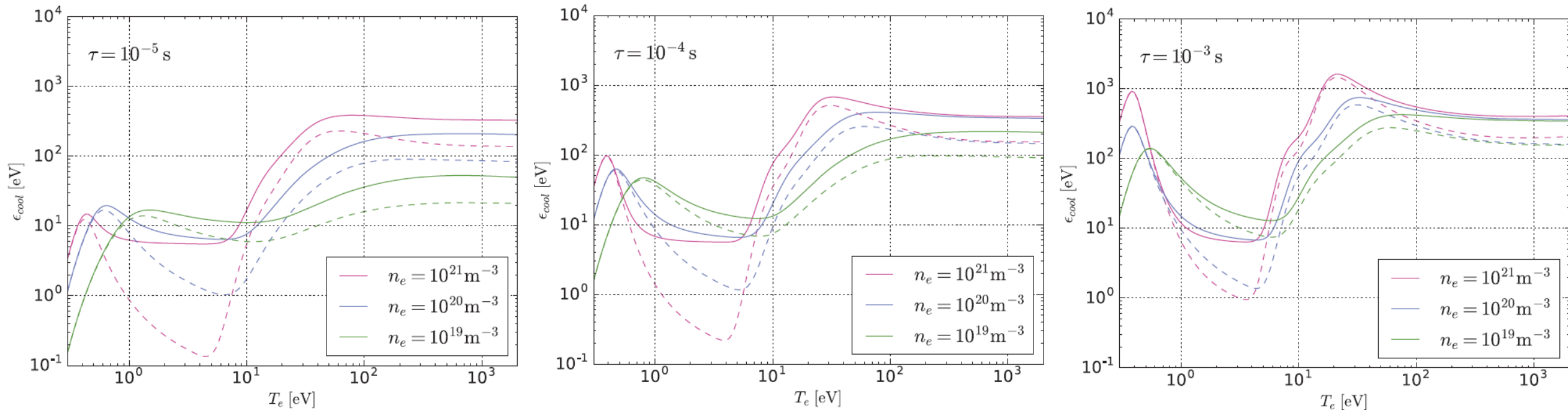
- Abrams T. W., Dissertation, Princeton, 2015
- Goldston R. J, Nuclear Materials and Energy 12 (2017) 1118–1121
- Rindt P., Nucl. Fusion **58** (2018) 104002 (5pp)
- M.A. Jaworski et al. Nucl. Fusion 53 (2013) 083032

Rezidenční čas τ

- Čas který částice stráví v neutrálním oblaku
- Z již proběhlých měření (viditelné kamery) – 1 cm (nejspíše více)
- Určeno z $\tau = \frac{d}{c_s} \rightarrow$ pro 1 cm $\approx 10^{-5}$ s
- [Goldston,2017] - $10^{-5} - 10^{-3}$ s
- [Rindt,2018] - $\epsilon_{cool} = 5,50,500$ eV

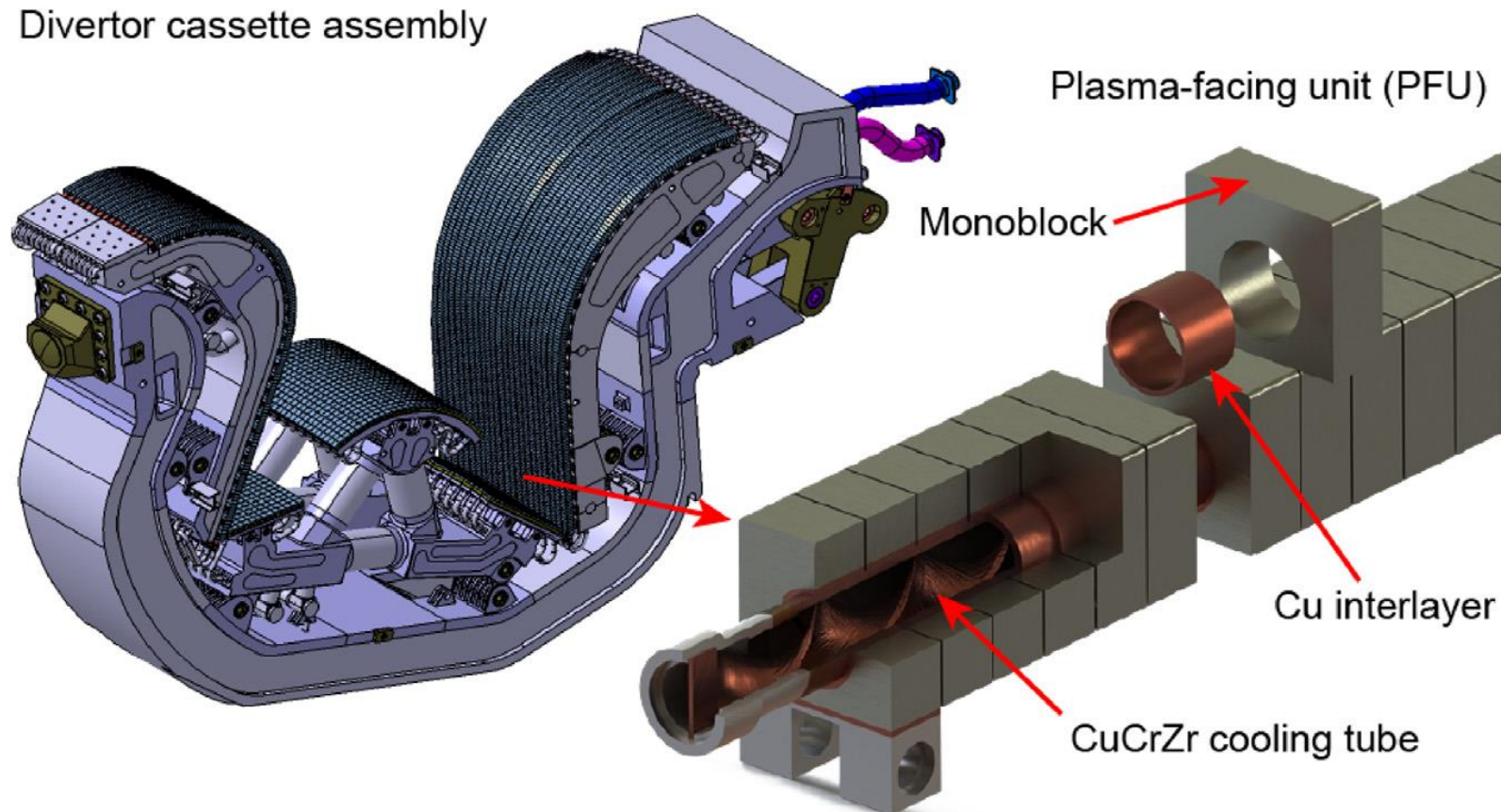
Rezidenční čas τ

- Vliv rezidenčního času na uvolněnou energii ϵ_{cool} - v oblasti 10-100 eV
silná závislost na T_e

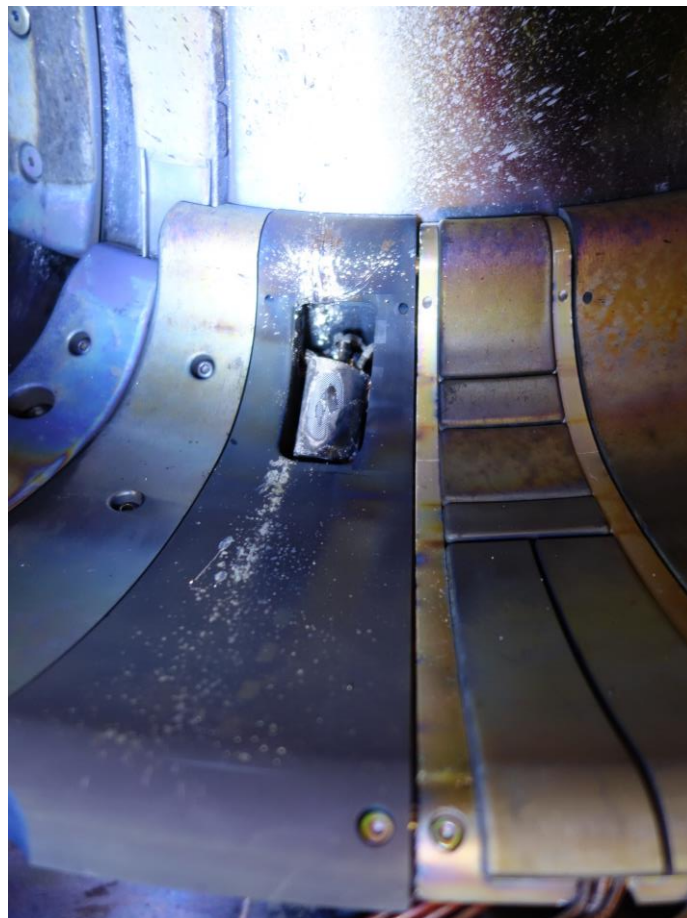


Grafy velikostí uvolněné energie ϵ_{cool} v závislosti na elektronové teplotě T_e , hustotě n_e a rezidenčním čase τ [Goldston, 2017]

Divertorové monobloky v tokamaku ITER



Model divertorové kazety a jednotlivých monobloků v tokamaku ITER [Pitts, Nuc. Mat. 2017]

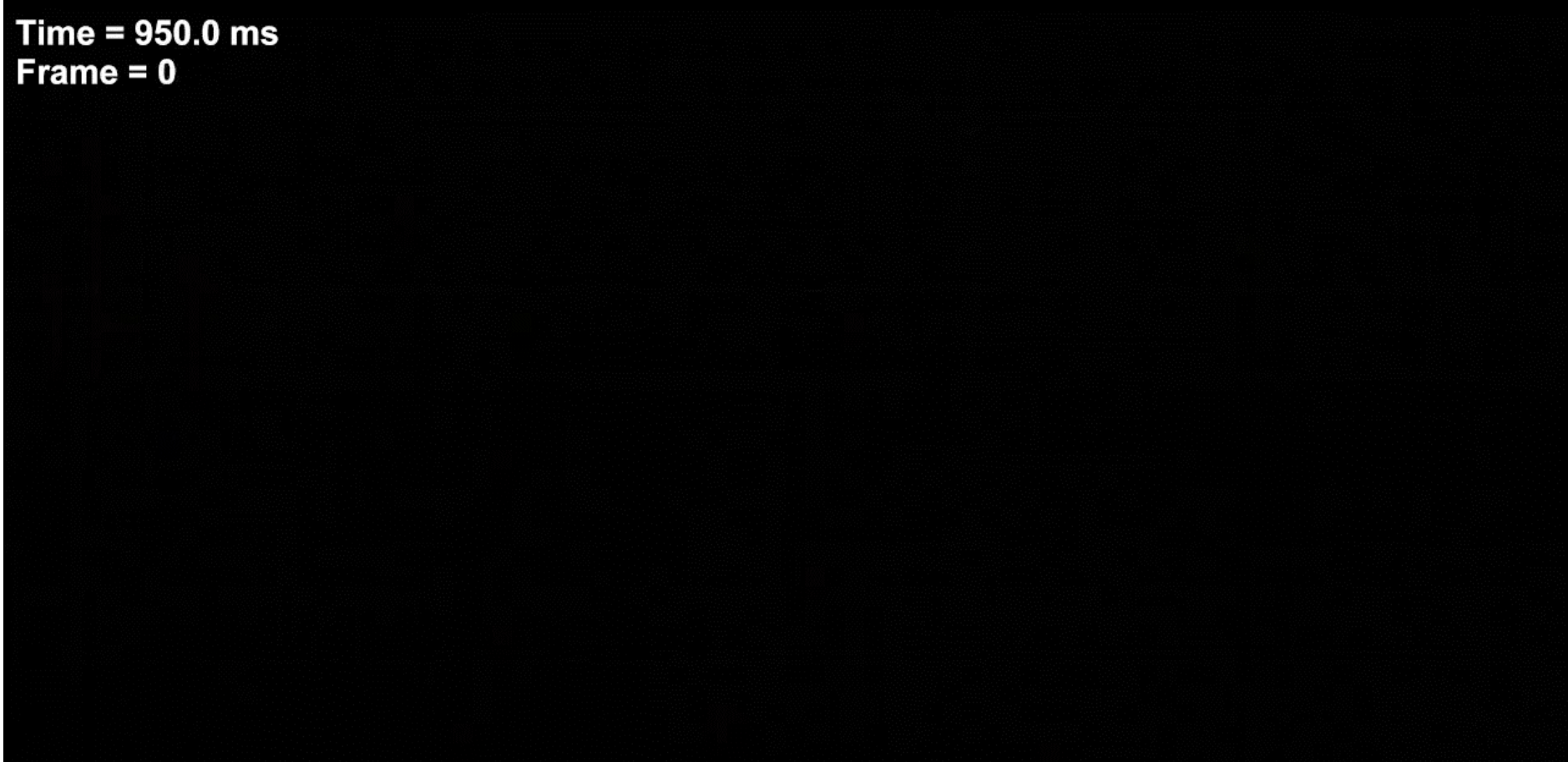






#19802 – h=4 mm ELM free H-mode (radiation collapse)

Time = 950.0 ms
Frame = 0



#19803 – h=4 mm, ELMy H-mode



#19805 – h=5 mm ELMy H-mode

Time = 950.0 ms
Frame = 0

