

Jak horké je horké plazma?

K. Svačinová, Gymnázium Voděradská, Praha,
kacenska.svacinova@gmail.com

A. Šebek, SPŠ Chemická, Brno,
adamsebek.chem@gmail.com

J. Buben, Gymnázium Jana Nerudy, Praha,
jachym.buben@outlook.cz

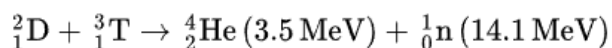
Abstrakt:

Cílem našeho miniprojektu je seznámit se s problematikou termojaderné fúze, jejího využití v tokamaku a s měřením teploty plazmatu pomocí Langmuirovy metody sondou. Nejdříve jsme si vysvětlili teoretické záležitosti měření velmi vysoké teploty a následně jsme analyzovali data ze simulací sond přes program, vytvořený v programovacím jazyce Python. Při analýze jsme použili čtyřparametrické fitování, a ukázali jsme jeho výhody oproti fitování bez lineárního členu.

1. Úvod

V moderní době, kdy pořád narůstá poptávka po elektřině, která se zároveň neustále zdražuje, je na místě začít hledat nějaký další zdroj elektrické energie. Tento nový zdroj by měl být hlavně efektivní, ale také šetrný k našemu životnímu prostředí. Jedním z takových řešení je právě tokamak. Slovo tokamak pochází z ruštiny a je to akronym pro toroidní komoru v magnetických cívkách. Jedná se o fúzní reaktor, který by měl být schopen vytvářet energii pomocí nukleární fúze.

Termonukleární fúze probíhající v plazmatu v budoucích fúzních elektrárnách bude představovat nejúčinnější, stabilní, bezpečný, téměř nevyčerpatelný a zároveň nízkoemisní způsob výroby elektrické energie. Při termojaderné fúzi dochází k slučování atomových jader lehčích prvků v jádra prvků těžších a při tom se uvolňuje energie. Přesně takhle to funguje ve hvězdách, ale jak se zdá, není tak lehké si pořídit jednu takovou hvězdu k nám na Zemi. Uvnitř tokamaku dochází k sloučení deuteria a tritia a vzniká helium a neutron. Vzniklý neutron vyletí ven a předá energii chladicímu médiu (divertor). Ta odvede teplo a předá jej vodě, která v plynném skupenství pohání turbínu.



Plazma je čtvrté skupenství hmoty které známe a je nejrozšířenější ve vesmíru. Je to kvazineutrální plyn složený z nabitých a neutrálních částic, který vykazuje kolektivní chování [1]. Tento plyn má velkou teplotu a je elektricky vodivý z důvodu, že obsahuje volné nosiče náboje, které mohou elektrický proud vést. Plazma, které se uvnitř tokamaku nachází ve vakuové komoře tvaru prstence, potřebuje určité podmínky ke své existenci. Je zapotřebí velká

teplota, vysoký tlak a určitá doba udržení fúze, což je právě důvod, proč je to tak náročné. V přírodě stačí obrovský tlak v nitru hvězd, ale na Zemi musíme zvolit jinou taktiku a to zahřát plazma na vysokou teplotu. Tyto podmínky určuje tzv. Lawsonovo kritérium [2]. To nám vyjadřuje energetickou bilanci reakce jaderné fúze. Jde vlastně o to, aby tokamak vytvářel více energie než přijímá a také aby se plazma v něm dokázalo “zapálit” a běžel bez dalších impulzů.

2. Měření teploty plazmatu

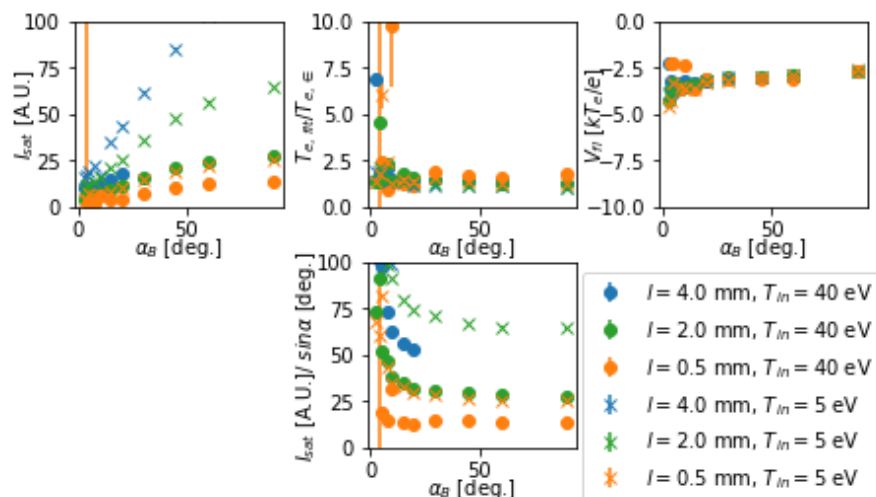
Teorie

V plynu v tepelné fázi se vyskytují částice všech rychlostí a pravděpodobnostní rozdělení těchto rychlostí je známo jako Maxwellovo rozdělení. Šířku tohoto rozdělení můžeme charakterizovat konstantou T , kterou nazveme teplota. Po vyjádření z několika základních fyzikálních vztahů a integrálních rovnic získáváme převodní faktor: $1 \text{ eV} = 11\,600 \text{ K}$. [1] Jednotka elektronvolt usnadňuje práci vědcům zkoumajícím vlastnosti plazmatu, neboť se za ni mohou schovat vysoké hodnoty teplot v kelvinech. Teplotu plazmatu lze měřit několika způsoby: sondovým měřením (Langmuirova metoda) [3], optickými metodami [4,5], za pomoci hmotového spektrometru (korpuskulární diagnostika) [6]. Náš projekt se věnuje sondovému měření a zpracování dat vzniklých počítačovou simulací takového měření.

Sondové měření je nejstarší metoda pro zkoumání teploty a vlastnosti plazmatu, vyvinuta Langmuirem a Mott-Smittem. Spočívá v tom, že speciálně upravenou elektrodu, tzv. sondu, vložíme do plazmatu v elektrickém poli. [3] Měření probíhá na okraji plazmatu [4]. Jedná se o metodu aktivní, a proto jsou kladeny nároky na tvar, velikost a vlastnosti materiálu, z něhož je vyrobena, protože sonda interaguje přímo s plazmatem.

Zpracování dat

Jak již bylo výše zmíněno, naše data pochází z počítačové simulace provedené modelem sondy SPICE2 garantem našeho miniprojektu [8]. Z nich jsme získali data o normalizovaném potenciálu (napětí) na sondě a o celkovém proudu, který měří sonda. Na rozdíl od normálních měření na tokamaku, v simulaci získáváme i hodnotu proudu kladných iontů (tedy kladná hodnota) a elektronů (tedy záporná hodnota) (viz graf 2). Součtem těchto dvou veličin získáme celkovou hodnotu proudu (který měří sonda). Také si nasimulujeme délku sondy a teplotu plazmatu.



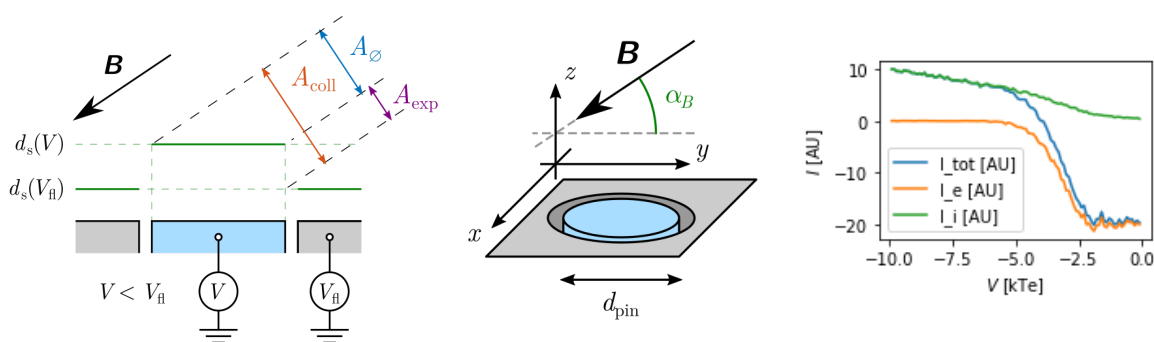
Graf 1 - Závislosti veličin na úhlu mag. pole při různých teplotách plazmatu a délkách sondy

Nyní použijeme tato data na voltampérovou charakteristiku a tím se získá specifický graf (graf 2). Z predikcí vyplývá vztah:

$$I(V) = I_{sat} \left[1 - \exp\left(\frac{e(V - V_{fl})}{k_B T_e}\right) \right]$$

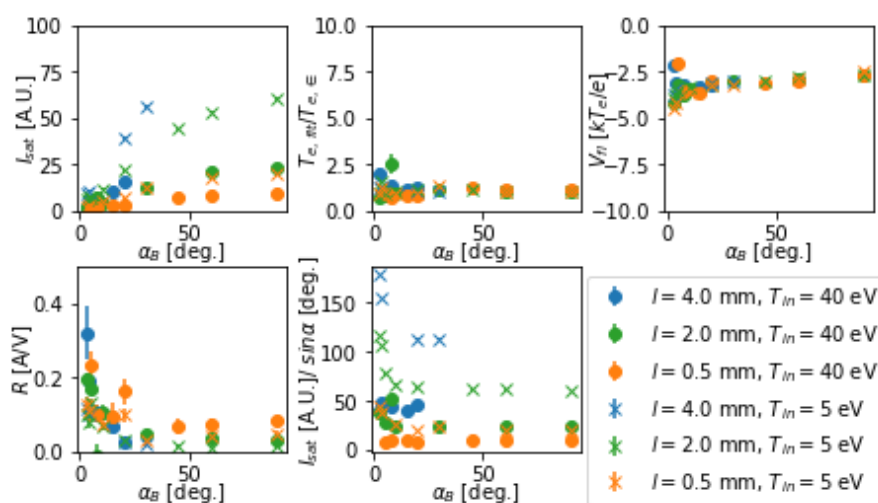
Kde I je měřený proud, I_{sat} je saturevaný proud iontů (na který se proud ustaluje při snižování napětí na sondě), e je elementární náboj, V_{fl} plovoucí potenciál, V je napětí na sondě, k_B je Boltzmannova konstanta a T_e je elektronová teplota.

Z výše zmíněných hodnot nás budou zajímat hlavně I_{sat} , T_e a V_{fl} . Jelikož máme funkční hodnoty a známe teoretický předpis, použijeme fitovací program (v Pythonu, v knihovně *scipy*), který nám vrátí hodnoty parametrů (tedy předpis funkce přibližně odpovídající funkčním hodnotám). Z nich získáme hodnotu saturevaného proudu iontů, elektronovou teplotu a hodnotu potenciálu, při kterém se vyrovná iontový a elektronový proud (plovoucí potenciál). Z těchto hodnot jsme schopni vypočítat modely vztahů jednotlivých veličin (viz graf 1).



Obr. 1 - Úhel magnetického pole, průřez a v prostoru, převzato z [8].

Graf 2 - voltampérová charakteristika sondy.



Graf 3 - Závislost veličin na úhlu mag. pole po použití čtyřparametrického fitování

Zde je dobré si všimnout prvního a čtvrtého grafu. Ve čtvrtém grafu vidíme, že u úhlů blízkých nule jsou velké nepřesnosti ve velikosti saturevaného proudu (hodnoty stoupají). Čtvrtý graf používá stejné hodnoty jako první, ale dělí je sinem úhlu, pod kterým je mag. pole otočeno k sondě. Tím se odstraňuje efekt rozdílu ploch na které dopadá plazma (viz obr. 1),

který způsobuje nerovnost proudu na sondě (kontakt s více částicemi). Rozdíl ploch je způsoben rozdílem plovoucího napětí a napětí na sondě, který potom vytváří delší stěnovou vrstvu (výběžek vpřed)(ve které se urychlují ionty a odráží elektrony) v plazmě. Nerovnoměrné rozdělení zrychlení elektronů a iontů ale způsobuje, že při snižování potenciálu na sondě níže od plovoucího potenciálu se proud neustaluje na saturovaném proudu iontů, ale lineárně stoupá (viz. nízké hodnoty grafu 2). Proto jsme pokročili k dalšímu kroku, kdy měníme teoretický předpis na:

$$I(V) = I_{sat} \left[1 - \exp\left(\frac{e(V-V_{fl})}{k_B T_e}\right) \right] + R(V - V_{fl})$$

Tedy přičítáme lineární funkci, která nám lineární nárůst odstraní [9] (čtyřparametrické fitování). V grafu 3 je tato úprava zohledněna, rozdíl veličin bez úpravy je ukázán v grafu 1. Zde můžeme přidat i koeficient R (sklon lineární závislosti), která v grafu 2 nevystupuje.

3. Shrnutí

Z nasimulovaných dat jsme analýzou v programovacím jazyce Python spočítali hodnoty koeficientu R v různých podmínkách. Ukázali jsme, že použití čtyřparametrického fitování výrazně zpřesní hodnoty veličin měřených sondou a to zejména teploty a saturovaného proudu oproti použití bez koeficientu R .

Poděkování

Děkujeme FJFI za možnost se zúčastnit Týdne vědy, našemu vedoucímu projektu Aleši Podolníkovi za seznámení s tématem, poskytnutí materiálů a pomoc s programováním a v neposlední řadě také panu Svobodovi za skvělou přednášku o prezentování a zpracovávání vědeckých článků.

Reference

- [1] F. F. Chen. *Úvod do fyziky plazmatu*. Academia, ČSR, 1977.
- [2] J. D. Lawson 1957 *Proc. Phys. Soc. B* **70**, 6–10
- [3] H. M. Mott-Smith, I. Langmuir 1926 *Phys. Rev.* **28** 727
- [4] R. J. Fonck et al. 1983 *Appl. Phys. Lett.* **42** 239
- [5] P. Bilkova et al. 2018 *JINST* **13** C01024
- [6] R. Ochoukov et al. 2020 *Rev. Sci. Inst.* **91** 063506
- [7] L. Schmiedt, M. Jílek: *Diagnostika plazmatu* [online]. In: *Úvod do fyziky plazmatu MFF UK*. Dostupné z: <https://physics.mff.cuni.cz/kfpp/s4r/plazma/>
- [8] A. Podolník. *Study of probe diagnostics of tokamak edge plasma via computer simulation*, disertační práce. Praha, MFF UK, 2019.
- [9] J. P. Gunn et al. 1995 *Rev. Sci. Inst.* **66** 154