

# Rozhledy matematicko-fyzikální

---

Daniela Kropáčková

Měření rotace plazmatu na tokamaku GOLEM

*Rozhledy matematicko-fyzikální*, Vol. 95 (2020), No. 1, 39–44

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/148128>

## Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 2020

Institute of Mathematics of the Czech Academy of Sciences provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This document has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://dml.cz>

pohybující stroj „perpetuum mobile“ bez podpory vnější energie sestrojít nemůžeme.

#### Literatura

- [1] Komenský, J. A.: *Physicæ Ad Lumen divinu reformandæ Synopsis*. Lipsiæ, Amsterodami, 1663 (Fyzika podle Božího světla opravená, neboli Přehled fyziky podle Božího světla opravené).
- [2] Soldát, H.: J. A. Komenského Fyzika. *Časopis pro pěstování matematiky a fysiky*, roč. 21 (1892), s. 256–296.
- [3] Šolcová, A.: Kapesní slovník astronoma v labyrintu Komenského spisů. *Říše hvězd*, roč. 4-5 (1992), s. 78–79.

## Měření rotace plazmatu na tokamaku GOLEM

*Daniela Kropáčková, Gymnázium Brno, Křenová*

V tomto článku se spolu podíváme na jednoho z nejnadějnějších adeptů na budoucí ekologický zdroj energie, tokamak. Tokamaky k zisku energie využívají tzv. jadernou fúzi, tedy slučování jader lehkých prvků do jader prvků těžších, přičemž dochází k uvolnění velkého množství energie. Nápad na toto zařízení se poprvé objevil v padesátých letech minulého století v tehdejší Sovětskému svazu. Od té doby se na jeho vývoji intenzivně pracuje v mnoha zemích světa, a to zejména na společném světovém projektu ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), který se právě staví ve Francii. Jedná se o vůbec nejdražší pozemský projekt na světě (nejdražším projektem světa je mezinárodní vesmírná stanice ISS) a jeho spuštění se očekává v roce 2025. Hlavním úkolem ITERu je ukázat, zda tokamaky dokáží vyprodukovat větší množství energie, než kolik jí je potřeba k zapálení jejich paliva. Pokud se projekt ukáže jako úspěšný, měla by započít výstavba elektrárny DEMO, která by zatím sloužila pouze vědeckým účelům a byla by tak „předskokankou“ budoucích fúzních elektráren.

To vše zní slibně, od vysněného cíle ale tokamak dělí mnoho nedořešených problémů, jedním z nich jsou i tzv. disrupce (náhlé vyvržení plazmatu na stěny komory). Pokud by k takové disrupci došlo na ITERu,

mohlo by to způsobit velké škody dosahující obrovských částek, což by projekt mohlo ohrozit. Je tedy velmi žádoucí tyto disrupce nějakým způsobem potlačit. A právě jednomu z předpokladů, díky němuž toho lze docílit, jsem se věnovala ve své práci SOČ, jejíž hlavní výsledky jsou zmíněny v závěru článku.

## Termojaderná fúze

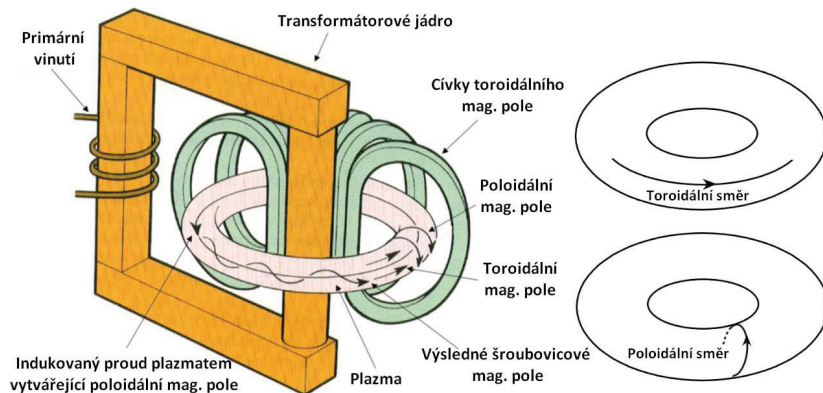
Pojďme se nejdříve podívat na reakci, kterou chceme k získání energie využít. Inspirací nám v tomto případě bylo naše Slunce, kde termojaderná fúze probíhá už po miliony let a bez ní bychom tu dnes nebyli. Termojaderná se nazývá proto, že vysoké teploty umožní jádrům dostat se dostatečně blízko k sobě, aby mohlo dojít k jejich sloučení, konkrétně u proton-protonové reakce, probíhající na Slunci, je to okolo 15 miliónů stupňů Celsia. Tuto reakci ale z praktických důvodů na Zemi nemůžeme využít, jelikož probíhá velice pomalu. Jako nejperspektivnější reakce pro průmyslové účely se jeví reakce deuteria s tritiem, zkráceně D-T. K získání maximální možné energie je však potřeba tuto reakci provozovat za teploty 150 miliónů stupňů Celsia. Je zřejmé, že při takových teplotách už nemluvíme o plynu, nýbrž o plazmatu. S tím jsou spojené i dva hlavní problémy, se kterými se vědci museli vypořádat: jak dosáhnout tak vysoké teploty a v čem následně plazma udržet tak, aby nedošlo ke kontaktu s okolními materiály. Bylo proto zkonstruováno mnoho nádob a provedeno nespočet pokusů, z nichž zatím nejúspěšněji vyšel právě tokamak.

## Tokamak

K vyřešení výše zmíněných problémů využívají tokamaky tzv. magnetické udržení plazmatu. Plazma je v komoře, tvaru toru (lze si představit jako americkou koblihu nebo pneumatiku), udržováno kombinací toroidálního a poloidálního magnetického pole, viz obr. 1. Pokud tato dvě pole sečteme, získáme výsledné šroubovicové magnetické pole, podél kterého se nabití částice plazmatu pohybují, přičemž navíc kolem magnetických indukčních čar opisují kružnici (tzv. Larmorova rotace). Tím je omezen pohyb částic napříč magnetickým polem, tedy směrem ven, a vzniká magnetické udržení plazmatu.

Princip tokamaků je založen na principu transformátorů, kde primárem jsou cívky toroidálního elektrického pole a sekundár tvoří samotná komora tokamaku. Pokud je napětí indukované na sekundáru a vzniklé toroidální elektrické pole dostatečně velké, dojde k průrazu neutrálního

plynu do plazmatu a vzniklý proud plazmatem kolem sebe následně vytváří poloidální magnetické pole. Toroidální magnetické pole je generováno soustavou cívek umístěných po obvodu komory.



Obr. 1: Základní schéma tokamaku

K ohřevu plazmatu se zpočátku využívá tzv. ohmický ohřev, který vzniká díky odporu plazmatu. Ten lze ale využít jen po omezenou dobu, jelikož jednou z vlastností plazmatu je i to, že s rostoucí teplotou klesá jeho odpor. K dodatečnému ohřevu plazmatu se proto dále využívá např. vstřelování svazků velmi urychlených částic.

## Tokamak GOLEM

Tokamak GOLEM je jedním ze dvou tokamaků na území ČR a zároveň se jedná o vůbec nejstarší dosud fungující tokamak na světě. Navštívit ho můžete v útrobách budovy FJFI ČVUT v Praze, kde už 10 let slouží studentům k jejich vzdělávání. Navíc si díky jeho webovým stránkám můžete iniciovat svůj vlastní výboj a to doslova kdykoliv odkudkoliv, stačí být připojen(a) k internetu. Na GOLEMovi se setkáme pouze s ohmickým ohřevem, který dokáže plazma ohřát na řádově stovky tisíc kelvinů. Nelze tedy mluvit o nějaké fúzi, navíc jako pracovní plyn GOLEM využívá pouze vodík a helium, žádné deuterium s tritiem. S D-T kampaněmi se setkáme jen občas, a to pouze na několika málo tokamácích. Po reakci s využitím nestabilního tritia (poločas rozpadu 12,3 let) se totiž komora stává dočasně radioaktivní a pracovníci do ní nemohou ručně instalovat potřebná diagnostická zařízení.

## Rotace plazmatu

Jak již bylo zmíněno na začátku, jednou z překážek pro úspěšné udržení plazmatu jsou tzv. disrupce, jejichž zdrojem mohou být proudové nestability. Proudových nestabilit existuje celá řada, většinu z nich ale můžeme potlačit systémem tzv. stabilizace. Ta může být buď aktivní, nebo pasivní. Pasivní stabilizace probíhá sama, nepotřebuje k tomu žádný lidský zásah. Probíhá díky tomu, že plazma v tokamacích rotuje. Jelikož jsou magnetické indukční čáry „vmrzlé“ do plazmatu, pohybují se spolu s ním a taktéž se pohybuje i zárodek vznikající magnetické nestability. Magnetické pole se tak mění a v okolních vodičích vznikají vířivé proudy. Ty kolem sebe vytváří vlastní magnetické pole, čímž vznikající nestabilitu vtlačují zpět do nitra plazmatu.

S aktivní stabilizací je to už o něco složitější. Na rozdíl od pasivní stabilizace neprobíhá sama, ale je k ní potřeba poměrně náročný počítačový výpočet, na základě něhož jsou do vnějších stabilizačních cívek pouštěny různě velké proudy. Kolem cívek vzniká magnetické pole a zárodek nestability je opět vtlačován zpět do plazmatu. Detekce nestability je zajištěna diagnostickými cívkami umístěnými uvnitř komory, kterým se magnetická nestabilita jeví jako periodicky se opakující proměnné magnetické pole.

Pro uplatnění obou těchto stabilizací je proto velice žádoucí, aby plazma v tokamacích rotovalo. Abychom v budoucnu tuto rotaci v tokamacích zajistili, je nejdříve potřeba porozumět jevům, které rotaci způsobují a které ji mohou ovlivňovat. S tím nám mohou pomoci diagnostické sondy, jakou je např. dvojitá tunelová sonda zobrazená na obr. 2.



Obr. 2: Dvojitá tunelová sonda

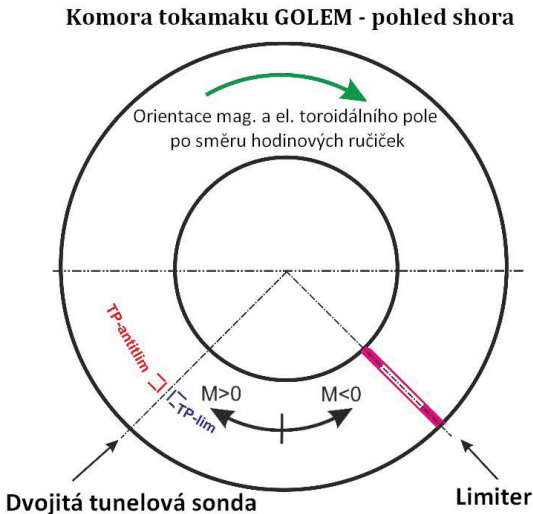
## Dvojitá tunelová sonda

Z měření dvojité tunelové sondy lze určit tzv. Machovo číslo, což podobně jako v letectví i v plazmatu představuje poměr rychlosti plazmatu k iontozvukové rychlosti. Díky tomu, že je sonda dvojitá (dvě sondy

k sobě připevněné zády), můžeme kromě toho, jestli se plazma pohybuje nadzvukovou či podzvukovou rychlostí, také určit směr, kterým se plazma ubírá.

## Měření na tokamaku GOLEM

Měření Machova čísla jsme vyzkoušeli i na tokamaku GOLEM, kde jsme zkoumali, jaký vliv bude mít obrácení magnetických polí tokamaku na rotaci plazmatu. Obrácení toroidálního pole jsme dosáhli jednoduchým přepólováním cívek toroidálního pole a obrácení poloidálního pole přepólováním transformátoru a indukci proudu plazmatem v opačném směru. Vždy byla obrácena obě dvě pole zároveň. Pokud bychom se na tokamak podívali shora, mělo by toroidální magnetické pole i proud plazmatem směr buď po směru hodinových ručiček, nebo proti směru hodinových ručiček, viz obr. 3. Sonda byla umístěna 90 stupňů toroidálně od limiteru (kruhová clona omezující velikost plazmatického sloupce) a během experimentu byla nabíjena na záporný potenciál, díky čemuž byly elektrony od sondy odpuzovány a na sondu dopadaly pouze ionty. Ze získaných dat jsme následně určili Machovo číslo. Zároveň byla sonda výboj od výboje zasouvána hlouběji do plazmatu, což umožnilo proměření radiálních profilů Machova čísla.



Obr. 3: Uspořádání experimentu

Zde jsou hlavní závěry z tohoto měření:

1. Plazma má tendenci měnit směr své toroidální rotace se změnou orientace polí a středová část plazmatu se pohybuje proti směru proudu plazmatem.
2. Blíže středu plazmatického sloupce se plazma pohybuje jiným směrem než na svém okraji.

Zajímavým úkazem bylo to, že u výbojů s orientací polí proti směru hodinových ručiček bylo Machovo číslo téměř vždy o něco vyšší než u výbojů s opačnou orientací. Vysvětlení, proč tomu tak bylo, ale zůstává zahaleno tajemstvím a spolu s dalšími nevyřešenými problémy čeká na své budoucí řešitele.

Pokud vás téma zaujalo, můžete si o něm přečíst více v [1].

### Poděkování

Za cenné připomínky k textu děkuji vedoucí mé práce SOČ Ing. Kateřině Jirákové.

### Literatura

- [1] Kropáčková, D.: *Měření rotace plazmatu na tokamaku GOLEM*. 1963, dostupné z: <http://golem.fjfi.cvut.cz/wiki/Library/GOLEM/SOČky/19Kropackova.pdf>.
- [2] Řípa, M.: *Řízená termojaderná fúze pro každého*. Svět energie, Praha, 2011.
- [3] *Tokamak GOLEM wiki*, dostupné z: <http://golem.fjfi.cvut.cz/wiki/>.

## Slyšené slovo pomíjí, napsané trvá

*Ivo Kraus, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, ČVUT, Praha*

Vox audita perit, littera scripta manet<sup>1)</sup>

**Abstrakt.** Článek je věnován náhodně získané informaci doplňující fakta z pobytu Alberta Einsteina v Praze v letech 1911–1912. Díky svědectví pamětníků se okruh jeho pražských kolegů a obdivovatelů, jako byl např. matematik

---

<sup>1)</sup>Základem vědeckého výzkumu dějin člověka a jeho civilizace jsou především písemné prameny.