

Základní údaje

Soutěžní obor: **P3913 - Aplikace přírodních věd**Kategorie: **3T**Navrhovatel: **Lobko Lukáš Ing.**Pracoviště: **FJFI - 14102**Název česky: **Studium ubíhajících elektronů na tokamaku GOLEM**Název anglicky: **Study of Runaway Electrons at the GOLEM Tokamak**

Anotace česky:

Projekt cílí na stěžejní podporu vědeckého výzkumu v oblasti problematiky ubíhajících elektronů na dnes jediném aktivním zařízení na udržení vysokoteplotního plazmatu v ČR, tokamaku GOLEM, provozovaným FJFI ČVUT v Praze. Úspěšná realizace cílů projektu povede k významnému zlepšení nejen stávající, ale také veškeré budoucí vědecké produkce tohoto unikátního pracoviště.

Anotace anglicky:

The project aims at the pivotal support of scientific research in the field of runaway electrons at today's only active device for confining high-temperature plasma in the Czech Republic, the GOLEM tokamak, operated by the FNSPE CTU in Prague. The successful implementation of the project's goals will lead to a significant improvement not only in the current, but also in all future scientific production of this unique workplace.

Finance

Finanční prostředky v tis. Kč	2024	2025	2026	celkem
Neinvestiční náklady (NEI)	488	488	488	1464
Investiční náklady (INV)	0	0	0	0
Celkové náklady	488	488	488	1464

Zdůvodnění přihlášky

1 - Vědecká závažnost a aktuálnost:

Dnešní doba ve fúzním výzkumu je charakteristická tím, že se významně obměňuje repertoár používaných fúzních reaktorů. Ve výstavbě je mnoho nových výkonných zařízení, která posouvají provozní limity do neprobádaných oblastí. S tím jsou ale spojená významná rizika, která je třeba intenzivněji řešit.

Jedním z nich je riziko vzniku tzv. ubíhajících elektronů (RE - runaway electrons) v plazmatu uvnitř vakuové komory fúzního reaktoru. Platí, že čím výkonnější je reaktor, tím intenzivnější svazek RE může vzniknout. Takový svazek RE má potenciál významně poškodit první stěnu a divertor tokamaku. Výměna těchto vnitřních komponent tokamaku je a bude u velkých fúzních zařízení velmi časově náročná a u komerčních zařízení tím pádem i finančně velmi nákladná operace. Komerční fúzní elektrárna si tak nemůže dovolit nemít problematiku ubíhajících elektronů pod kontrolou. A proto je podpora výzkumu v této oblasti v dnešní době velmi žádoucí.

2 - Současný stav řešeného problému:

Problematika ubíhajících elektronů je již známá poměrně dlouhou dobu. Avšak fyzika, která se za tím skrývá, je velmi komplikovaná a jen některé situace jsou spolehlivě vysvětleny. Snahou je pracovat s plazmatem ve fúzním reaktoru ideálně tak, aby vůbec nedošlo ke vzniku ubíhajících elektronů. Aktuální situace je taková, že v některých klíčových fázích výboje nelze spolehlivě zamezit vzniku RE, aniž by to nebylo na úkor znehodnocení jiných klíčových charakteristik stability plazmatu. Například za kritickou fází výboje se obecně bere oblast počátečního růstu proudu plazmatu na potřebnou stabilní úroveň (tzv. ramp-up phase), kdy je vysoké riziko vzniku ubíhajících elektronů díky ideálním podmínkám pro tento jev.

Proto je velká snaha kladena na vývoj technik, jak už vzniklou populaci RE šetrně utlumit, aby potenciální poškození vnitřních komponent bylo nevýznamné, popř. zcela zlikvidovat celou populaci RE, pokud to je možné. Mezi tyto metody patří vstřík velkého množství pracovního nebo vzácného plynu (He, Ne, Ar), popř. vstřík malých pelet zmrzlého paliva. Také se pracuje s cíleným vytvářením poruch mag. pole (RMP). Avšak jak přesně tyto metody použít (tzn. kolik plynu použít, kdy je správný čas vstříku, jaký přesný účinek to bude mít, atd.) není vždy jasné.

I přes velké pokroky tak není problematika ubíhajících elektronů stále uspokojivě vyřešena, a proto je třeba i nadále pokračovat ve výzkumu hledání příčin vzniku RE, jejich chování a evoluce během výboje, studovat možnosti mitigace a podpořit tak dosavadní výzkum v těchto oblastech.

3 - Původnost navrhovaného řešení:

Představený výzkumný projekt cílí na studium ubíhajících elektronů na tokamaku GOLEM, provozovaným FJFI ČVUT v Praze. Jedná se momentálně o jediné pracoviště se zařízením na udržení vysokoteplotního plazmatu v ČR, a tak je zde zvýšený zájem o širší a komplexnější zapojení tokamaku GOLEM do vědeckého bádání okolo problematiky ubíhajících elektronů mimo jiné i proto, že má tokamak GOLEM některé skvělé vlastnosti k tomuto účelu, jako je vysoká opakovatelnost výbojů a možnost tak statisticky zpracovávat rozsáhlé kampaně. Zároveň velká výhoda u malých tokamaků s nízkým výkonem je, že populace RE obvykle nemá dostatečnou energii, aby mohla způsobit významné poškození komponent reaktoru a experimenty tak lze provádět skutečně v širokém rozsahu.

Různé, zpravidla menší a úzce fokusované experimenty více či méně spojené se studiem ubíhajících elektronů probíhaly na tokamaku GOLEM před několika lety. Navrhovaný projekt tak zčásti navazuje na předchozí odvedenou práci v posledních letech vznikající RE skupiny na tokamaku GOLEM. Avšak díky značně rozšiřující se diagnostice a celkově výrazně vylepšenému technickému a provoznímu zázemí tokamaku za poslední roky je zde možnost uskutečnit rozsáhlé kvalitní výzkumné kampaně ubíhajících elektronů jako nikdy předtím.

4 - Koncepce, způsob a metodika řešení:

Studium ubíhajících elektronů bude provedeno zejména pomocí rozsáhlého diagnostického setu, který doposud neměl na tokamaku GOLEM obdoby.

Plná sestava "RE diagnostiky" bude tvořena sadou scintilačních detektorů různých typů (NaI(Tl), CeBr, YAP, LYSO) použitých v různých režimech měření a v rozdílných konfiguracích, dále polovodičovými detektory s odlišnými schopnostmi jako jsou Timepix sensory pro vytvoření Comptonovy kamery a strip detektor měřící přímo uvnitř vakuové komory. Součástí je také robustní diagnostika pro měření cyklotronního záření elektronů (ECE) a v plánu je zcela nový typ diagnostiky - scintilační ring uvnitř vakuové komory pro získání prostorového rozlišení dopadu svazku ubíhajících elektronů na limiter.

Dále bude využito setu dalších diagnostik plazmatu, které jsou neméně důležité jako samotné "RE diagnostiky" pro správnou interpretaci naměřených dat a hledání vzájemných korelací s fyzikou plazmatu. Do této skupiny patří cívka měřící napětí na závit, Rogowského cívka pro měření proudu plazmatem, fotodioda, cívka pro měření magnetického pole, nově instalované magnetické diagnostiky uvnitř komory jako je vnitřní rog. cívka, diamagnetická diagnostika, cívky pro měření toroidálního mag. pole na pozicích HFS a LFS. Pro sledování MHD aktivity, nestabilit a dalších jevů bude využito MHD ringu a Mirnovových cívek. Pro sledování polohy plazmatu slouží rychlé kamery a další. V neposlední řadě je tokamak vybaven také sadou různorodých Langmuirových sond pro měření chování okraje plazmatu.

5 - Cíle řešení projektu:

Prvním cílem tohoto projektu je zásadně vylepšit stávající diagnostický set na fakultním tokamaku GOLEM tak, aby bylo možné pozorovat komplexní chování ubíhajících elektronů s vysokým časovým rozlišením a vytvořit tak podmínky pro kvalitní studium fyziky ubíhajících elektronů a hledání řešení problémů, kterým musí dnešní velké tokamaky kvůli tomuto fenoménu čelit.

Velká část z výše zmíněného diagnostického setu již je v nějaké fázi implementována na tokamaku GOLEM. V první fázi tohoto projektu tak bude velké množství času řešitelského týmu investováno do vylepšení/zprovoznění/kalibraci jmenovaných diagnostik pro získání co nejkvalitnějšího diagnostického aparátu pro následné RE kampaně.

Druhým cílem projektu je realizace různorodých velmi rozsáhlých kampaní (stovky výbojů s komplexní sadou detektorů) pro statistickou charakterizaci chování ubíhajících elektronů, jmenovitě vznik ubíhajících elektronů v ramp-up fázi výboje, stabilita a vývoj svazku RE během výboje. V posledních měsících dochází k výraznému zlepšení systému stabilizace plazmatického prstence na tokamaku GOLEM, což umožní studovat chování ubíhajících elektronů v pravděpodobně rekordně dlouhých výbojích.

V neposlední řadě se na tokamaku GOLEM začíná testovat vstřik plynu během výboje, a tak třetím cílem projektu je realizovat kampaně pro studium celé nové velké oblasti fyziky RE, jak nejen záměrně generovat velké toky RE vstřikem vzácného plynu v typicky ramp-up fázi výboje, ale také testovat možnosti mitigace populace RE vstřikem velkého množství pracovního plynu a tak podpořit výzkum v této oblasti prováděný na velkých tokamacích a získat jiný úhel pohledu.

6 - Předpokládané výstupy řešení:

J - Recenzovaný odborný článek

7 - Předpokládaná prezentace výsledků:

Získané výsledky budou prezentovány na typických fúzních vědeckých konferencích, jmenovitě EPS Conference on Plasma Physics, SOFT (Symposium on Fusion Technology), FuseNet PhD event, SPPT (Symposium on Plasma Physics and Technology) a další.

Výsledky budou následně sepsány nejčastěji ve formě vědeckých článků v impaktovaných mezinárodních fúzních časopisech, jako je Nuclear Fusion, Journal of Fusion Energy, Journal of Instrumentation, Fusion Engineering and Design.

8 - Charakteristika týmu:

Jádro řešitelského týmu sestává z 5 doktorandů, přičemž všichni již mají potřebné bohaté zkušenosti s fyzikou a diagnostikou ubíhajících elektronů z předešlých let.

Práce doktorandů bude probíhat pod dohledem prof. Ing. Jana Mlynáře, RNDr., Ph.D a Ing. Ondřeje Fickera, Ph.D., kteří mají dlouholeté zkušenosti v oblasti problematiky ubíhajících elektronů z experimentů na tokamaku COMPASS a evropských tokamacích včetně největšího světového tokamaku JET. Veškerý provoz tokamaku bude řízen pod dohledem vedoucího tokamaku GOLEM, Ing. Vojtěchem Svobodou, CSc.

Vyjádření školitele

Školitel (je-li navrhovatel studentem): **prof. RNDr. Jan Mlynář, Ph.D.**

Slovní vyjádření:

Ing. Ondřej Ficker, Ph.D., školitel specialista:

Téma projektu je vysoce aktuální a zásadní pro výzkum termojaderné fúze. Zároveň navazuje na předchozí SGS projekty. Ubíhající elektrony představují pravděpodobně nejhorší havarijní scénář pro zařízení typu tokamak ? v budoucích fúzních elektrárnách mohou způsobit významné poškození první stěny reaktoru. Z tohoto důvodu jsou ubíhající elektrony jedním z důležitých témat studovaných v rámci koordinovaného evropského výzkumu fúze z magnetických udržení a k tomuto výzkumu významným způsobem přispívají české instituce. Konkrétně FJFI ČVUT vychovává úspěšné odborníky v tomto oboru, ale navíc umožňuje experimenty na úrovni malého bezpečného zařízení na tokamaku Golem. Experimenty na tomto fakultním zařízení jsou relevantní velkým tokamakům především pokud jde o ubíhající elektrony vznikající při průrazu proudu plazmatem, tedy na počátku výboje.

V tokamaku Golem byl tento jev již mnohokrát pozorován, nicméně aby byly výsledky z těchto experimentů relevantní, je nutné vylepšit diagnostiku ubíhajících elektronů a také parametrů termálního plazmatu na tomto zařízení. Právě upgrade diagnostik, jejich syntéza a pokročilé zpracování je prvním cílem předkládaného projektu. Druhým cílem je provedení dostatečného počtu výbojů a statistického zpracování výsledků, tak aby bylo možné odhalit fyzikální závislosti a trendy i přes značné fluktuace parametrů plazmatu a velkou citlivost generace ubíhajících elektronů na změny těchto parametrů.

Pokud se podaří oba tyto vytyčené cíle dosáhnout, může projekt značnou měrou přispět k fyzikálnímu porozumění dějům probíhajícím i ve velkých zahraničních zařízeních. Řešitelský tým považují za dostatečně kompetentní pro provedení experimentů a dosažení cílů popsaných v projektu. Doktorand Lukáš Lobko prokázal již při vypracování své diplomové práce a v prvním roce doktorského studia, že je schopen samostatné vědecké práce.

Vyjádření vedoucího pracoviště

Vedoucí pracoviště: **doc. Ing. Martin Štefaňák, Ph.D.**

- Soulad řešeného projektu s celkovou koncepcí a zaměřením pracoviště: **ano**
- Zajištění podmínek pro řešení projektu na pracovišti: **v plném rozsahu**
- Vyjádření k řešitelskému týmu: **schopen projekt úspěšně řešit**

Případné slovní vyjádření:

Projekt je plně v souladu se zamerem katedry ve výzkumu a vedení studentu v oblasti fúze.

Registrační číslo: **OHK4-030/24**

Vyjádření děkana (ředitele ústavu)

Děkan (ředitel ústavu):

doc. Ing. Václav Čuba, Ph.D.

- Soulad projektu se záměry fakulty - součástí: **ano**
- Finanční podpora projektu: **ano (v plném rozsahu, projekt podpořit)**

Případné slovní vyjádření: