

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská

Czech Technical University in Prague
Faculty of Nuclear Sciences and Physical Engineering

doc. RNDr. Jan Mlynář, Ph.D.

Ubíhající elektrony v tokamacích

Runaway electrons in tokamaks

Anotace

Tato přednáška je zaměřena na vysvětlení metod, našich příspěvků a na fyzikální motivaci pro experimentální výzkum jevu ubíhání elektronů v elektrickém poli tokamaků. Vysvětluje základní specifika tohoto výzkumu, zejména s ohledem na možnosti útlumu a diagnostiky ubíhajících elektronů. Ukazuje, že jde o výzkum, který je dobrým příkladem evropské spolupráce ve fúzním výzkumu, jehož cílem je včasná podpora scénářů pro bezpečný provoz fúzního reaktoru ITER. Přednáška zdůrazňuje, jakou roli při tomto výzkumu dosud hrály české tokamaky COMPASS a GOLEM. V neposlední řadě věnuji pozornost i perspektivám akademické práce v termojaderné fúzi na ČVUT a předpokládané strategii dalšího rozvoje tohoto atraktivního a mladého studijního oboru.

Summary

The lecture covers methodology and our contributions to research of Runaway Electrons (RE) generated in tokamaks. It explains the specific features of the research, in particular with respect to mitigation and diagnostics of RE. It details why this research exemplifies the European co-operation in fusion research, which aims at timely support of scenario development for safe operation of the fusion reactor ITER. The contribution also points out the important role of the Czech tokamaks COMPASS and GOLEM in this research domain. Last but not least the contribution discusses perspectives of academic work in the magnetic confinement fusion at the Czech Technical University in Prague, and recommends strategy for further development of this attractive and young curriculum.

Klíčová slova

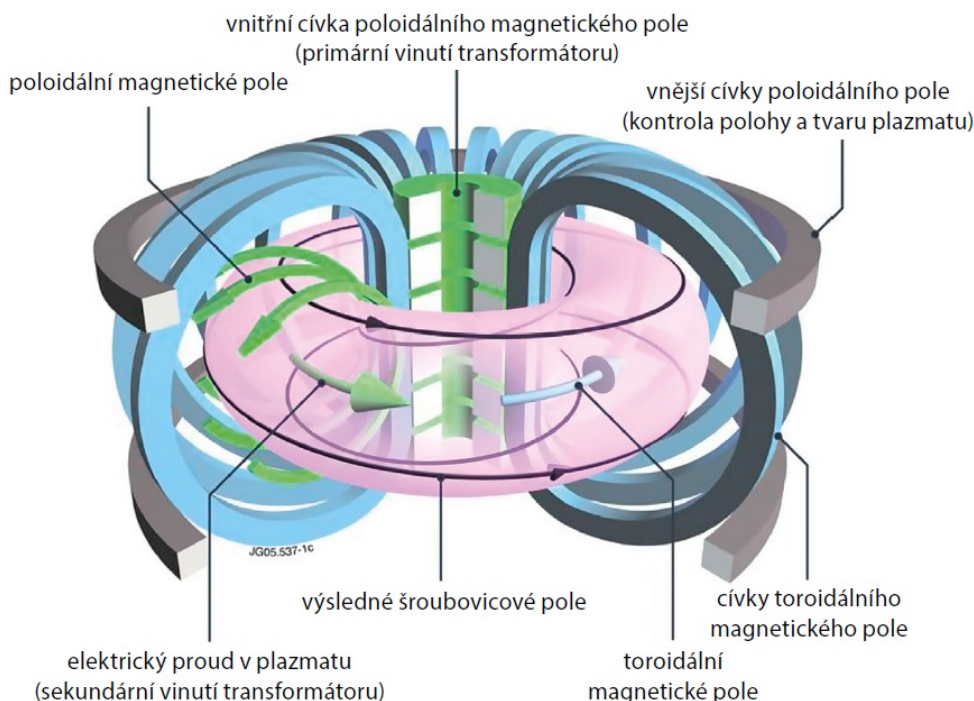
termojaderná fúze, tokamak, ubíhající elektrony, diagnostika plazmatu.

Keywords

thermonuclear fusion, tokamak, runaway electrons, plasma diagnostics.

Obsah

Úvod	4
Generování ubíhajících elektronů v tokamacích	5
Mitigace RE	7
Vývoj diagnostiky RE	10
Modelování ubíhajících elektronů v plazmatu	12
Perspektivy oboru a strategie jeho rozvoje na ČVUT	12



Obrázek 1: Základní konfigurace tokamaku. Převzato z [1]

Úvod

Maxwellovo-Boltzmannovo rozdělení rychlostí částic ve vysokoteplotním plazmatu tokamaků může být narušeno, mimo jiné, působením vnějšího elektrického pole, které ve složce podél magnetického pole urychluje především velmi lehké elektrony silou $\vec{F} = q\vec{E}$. U tokamaků je přitom nutnou podmínkou jejich fungování - alespoň ve standardních režimech provozu - existence toroidálního elektrického pole \vec{E}_Φ .

Toto pole je v tokamaku indukováno změnou proudu v primárním vinutí tokamaku, viz obr. 1, které je dnes z konstrukčních důvodů nejčastěji označováno jako centrální solenoid. Do určité intenzity elektrického pole je naštěstí při dané hustotě a teplotě plazmatu účinek anizotropního urychlování zcela potlačen srážkami mezi elektrony. Tento proces vede jen na žádoucí ohmický (jouleův) ohřev plazmatu. Existuje nicméně tzv. kritické elektrické pole, při kterém srážky už nezabrání postupnému zvyšování rychlosti těch elektronů, které díky chaotickému tepelnému pohybu získaly vysoce nadprůměrnou rychlost ve směru elektrického pole. Tento základní proces primárního urychlování tzv. ubíhajících elektronů (angl. Runaway Electrons, RE) je často v odborné literatuře označován jako proces Dreicerův [2]. Podle klasického výpočtu, který je plně relativistický [3] lze pak odvodit kritickou hodnotu elektrického pole:

$$E_c = \frac{e^3 n_e \ln \Lambda}{4\pi\epsilon_0^2 m_e c^2}. \quad (1)$$

Kritické pole tedy roste přímo úměrně s hustotou plazmatu n_e , a je pouze slabou funkcí teploty prostřednictvím Coulombova logaritmu $\ln \Lambda$.

Jev ubíhání elektronů se ukazuje jako klíčový například ve fyzice blesků [4]. V případě

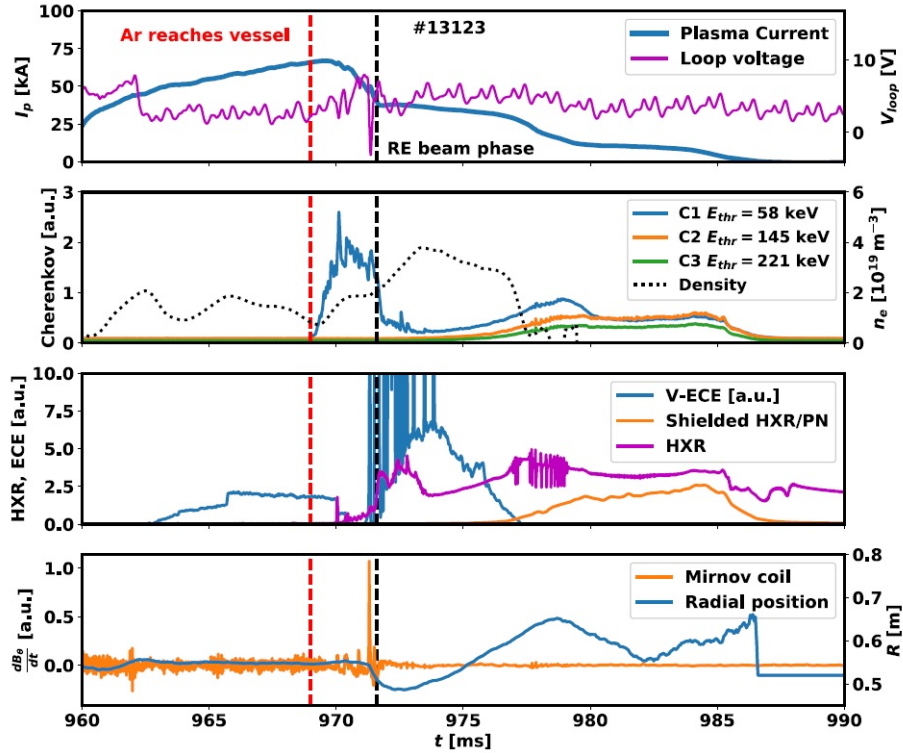
blesků se navíc ukazuje, že klíčový význam má i tzv. druhotné (lavinové, angl. avalanching) generování RE, kdy urychlovaný elektron (čili elektron s nadkritickou energií) v důsledku srážky s jiným elektronem plazmatu vyrazí další elektron do oblasti nadkritické energie, a sám neztratí dost energie na to, aby se stal podkritickým a přestal být urychlován [5]. Tento mechanismus sekundárního generování RE může hrát v závislosti na parametrech plazmatu zásadní roli i v tokamacích a může způsobovat nárůst toku RE o mnoho řádů [6].

Generování ubíhajících elektronů v tokamacích

Při experimentálním provozu tokamaků lze pozorovat vznik ubíhajících elektronů nejčastěji ve třech separátních fázích výboje plazmatu:

1. Během průrazu plazmatu. Průraz plazmatu je v tokamacích zpravidla realizován rychlou změnou proudu v primárním vinutí (v centrálním solenoidu). Tím se transientně zvyšuje toroidální elektrické pole, zatímco ve vakuové nádobě je velmi nízká hustota plazmatu a pouze primární ionizace získaná např. termoemisí elektronů. V experimentech jsme prokázali, že tyto rané ubíhající elektrony lze spolehlivě potlačit vhodným průběhem napouštění plynu na počátku výboje.
2. Při výbojích s extrémně nízkou hustotou plazmatu. V takovém případě se tokamak do určité míry mění na betatron, v plazmatu tokamaku pak lze pozorovat poměrně nezávislý svazek rychlých elektronů. Experimenty v tomto režimu ovšem rozhodně nemohou být z hlediska provozu tokamaku považovány za provozně přijatelné, protože se tokamak stává velmi intenzivním zdrojem tvrdého rentgenového záření. To vzniká v důsledku kolizí RE se stěnou tokamaku, které mohou materiál stěny i nevratně poškodit. Svazek RE, který má z hlediska konfigurace tokamaku téměř zanedbatelný elektrický odpor, postupně přebírá indukovaný elektrický proud v plazmatu až do té míry, že je tokamak schopný výrazně prodloužit dobu trvání výboje. Na druhou stranu, přítomnost svazku RE v plazmatu nesplňuje podmínky rovnováhy plazmatu a magnetického pole, proto se objevují výrazné kinetické nestability (tzv. vějířové [7]).
3. V důsledku disrupce plazmatu. Při disrupci plazmatu dochází k přerušení plazmatického sloupce, plazma přestává vést elektrický proud. Při disrupci nejprve okamžitě vychládá plazma (tzv. tepelný kolaps, angl. thermal quench) a vzápětí klesá i toroidální elektrický proud (tzv. proudový kolaps, angl. current quench). Protože pomalejší částice Maxwellovy-Boltzmannovy distribuční funkce jsou termalizovány výrazně rychleji než nadteplné elektrony (srážková frekvence v plazmatu klesá se třetí mocninou rychlosti částic) je možné si představit, že ještě během proudového kolapsu je ve vakuové komoře poměrně velká populace nadteplných elektronů z vyhasínajícího plazmatu. V důsledku velmi prudkého poklesu vodivosti plazmatu prudce vzrůstá toroidální elektrické pole indukované centrálním solenoidem. Toto vyšší elektrické pole může při disrupci generovat z chladnoucích nadteplných elektronů velké množství RE. Proces je výrazně posílen druhotnou, lavinovou generací RE [6]. Vznik svazku RE během disrupce plazmatu je natolik specifickým procesem, že je dnes považován za zvláštní fyzikální mechanismus generace RE, tj. druhý, nezávislý způsob primární generace RE, který získal v angličtině název "hot-tail population".

První dva uvedené mechanismy jsou vlastně jen variantou klasického Dreicerova mechanismu primární generace RE. Obecně jsou RE dnes považovány za vážné nebezpečí pro spolehlivý provoz budoucích fúzních reaktorů, protože svazek RE může převzít podstatnou část elektrického proudu plazmatu (ve velkých tokamacích řádově MA), při energii dosahující mnoha MeV na elektron a



Obrázek 2: Průběh základních veličin v plazmatickém výboji na tokamaku COMPASS při generaci svazku RE pomocí napuštění argonu (červená svíslá přerušovaná čára). Černá svíslá přerušovaná čára vyznačuje okamžik tepelného kolapsu plazmatu. Převzato z [8]

tím pádem svazek RE celkově nese natolik vysokou energii, že může snadno lokálně poškodit vnitřní stěnu tokamaku. V případě aktivně chlazené stěny reaktoru to může v limitním případě způsobit i poměrně vážnou nehodu spojenou s únikem chladicí vody do vysokého vakua. Velké tokamaky mají ale takové parametry standardního provozu, že se prakticky nemusejí obávat RE generovaných během výboje a pozornost proto věnují jen RE vznikajícím v důsledku sice nestandardní, ale těžko předvídatelné disrupce plazmatu.

Na tokamaku COMPASS v Ústavu fyziky plazmatu AV ČR, v.v.i., jsem stál u zrodu experimentálních kampaní věnovaných čistě výzkumu RE od roku 2014 [9]. V rámci těchto experimentů se nám podařilo dosáhnout postupně všech standardních způsobů generace RE [10],[11]. Bohužel, ten nejzajímavější mechanismus související s tepelným kolapsem plazmatu se na našem menším tokamaku ukázal jako těžko reprodukovatelný a nespolehlivý pro systematický výzkum. Proto se nakonec páteřním provozním scénářem výzkumu RE stal speciální scénář, vyvinutý ve spolupráci se švýcarským tokamakem TCV. Scénář vychází ze standardního scénáře výboje s relativně nízkou hustotou plazmatu a se zárodečnými RE z fáze průrazu plazmatu, během kterého je náhle teplota - tj. vodivost - plazmatu snížena krátkým a intenzivním napuštěním nečistoty (zpravidla argonu nebo neonu) [8], viz obr. 2. Po tomto napuštění nečistoty je pozorován prudký pokles teploty plazmatu (fakticky její kolaps) a nárůst populace RE, která přebírá elektrický proud v plazmatu U této populace RE pak zkoumáme její interakci s poruchami magnetického pole, s vertikálním magnetickým polem, s dalším masivním napuštěním plynu atp.

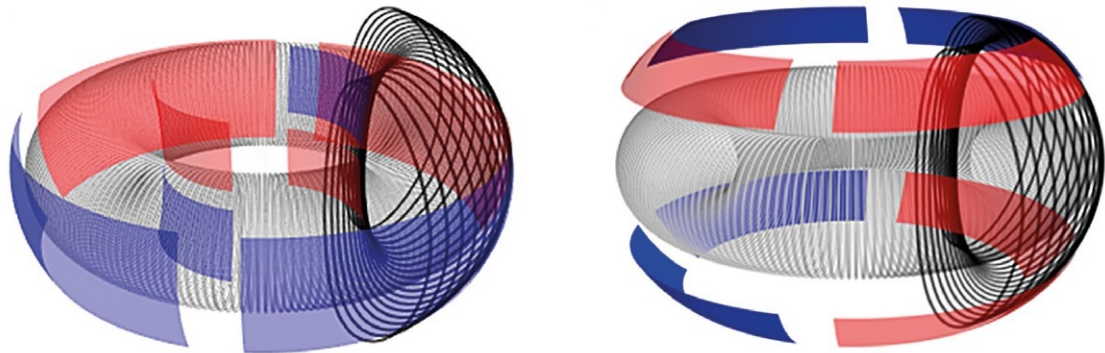
Další velmi zajímavou kapitolou fyziky RE je skutečnost, že RE v tokamacích generují synchrotronní záření. Toto záření, jak název napovídá, vzniká v důsledku dostředivého zrychlení relativistických elektronů obíhajících tokamak ve směru toroidálního elektrického pole. Podobně jako u dedikovaných zdrojů synchrotronního záření, určených především pro výzkum struktury složitých molekul (např ESRF v Grenoblu, nebo Diamond v Harwellu ve Spojeném království), se u synchrotronního záření v tokamacích projevuje výrazný headlight efekt, v důsledku kterého je možné toto záření pozorovat (v závislosti na energii elektronů buď ve viditelné nebo infračervené oblasti spektra) jen ve směru pozorování proti toku RE (tj. po směru elektrického proudu). Na rozdíl od dedikovaných zdrojů má ovšem synchrotronní záření tokamaků podstatně širší úhlový rozptyl záření, jako kdyby byl headlight efekt potlačen. Je tomu tak v důsledku sekundárních RE vznikajících lavinovým efektem, které mohou snadno mít relativistickou rychlost nejen ve složce pohybu v toroidálním směru, ale také v důsledku tečné srážky s rychlým elektronem též ve směru cyklotronní rotace kolem vektoru magnetické indukce. Synchrotronní záření je pak vlastně kombinací synchrotronního a relativistického cyklotronního záření. Synchrotronní záření je také spolu s drifts rychlých elektronů jednou z hlavních příčin toho, proč je pozorován horní limit nejvyšší možné energie RE v tokamacích. V případě tokamaku COMPASS jsou maximální změřené energie RE kolem 10 MeV [12], na větších tokamacích mohou být i dvakrát větší.

Mitigace RE

Hlavní motivací experimentálního výzkumu RE na tokamacích rozhodně nejsou otázky původu a generování RE. Z vědeckého i technického výzkumu jsou mnohem významnější možnosti tzv. mitigace (čili fakticky potlačování, zeslabování) svazku RE, vývoj diagnostiky vhodné pro jeho experimentální studium a v neposlední řadě i benchmarking fyzikálních simulací - tj. srovnávání výsledků měření s fyzikální předpovědí počítačových modelů. Všechna tato tři témata se záhy po zvládnutí standardního a spolehlivého způsobu generování svazku RE na tokamaku COMPASS stala i u nás stěžejními tématy výzkumu.

Výzkum mitigace RE je samozřejmě prioritní především z důvodu možnosti zajištění bezpečného provozu velkých fúzních zařízení i v případě vzniku svazku RE po disrupci. Existuje jen několik málo možností, jak na již existující svazek RE aktivně působit:

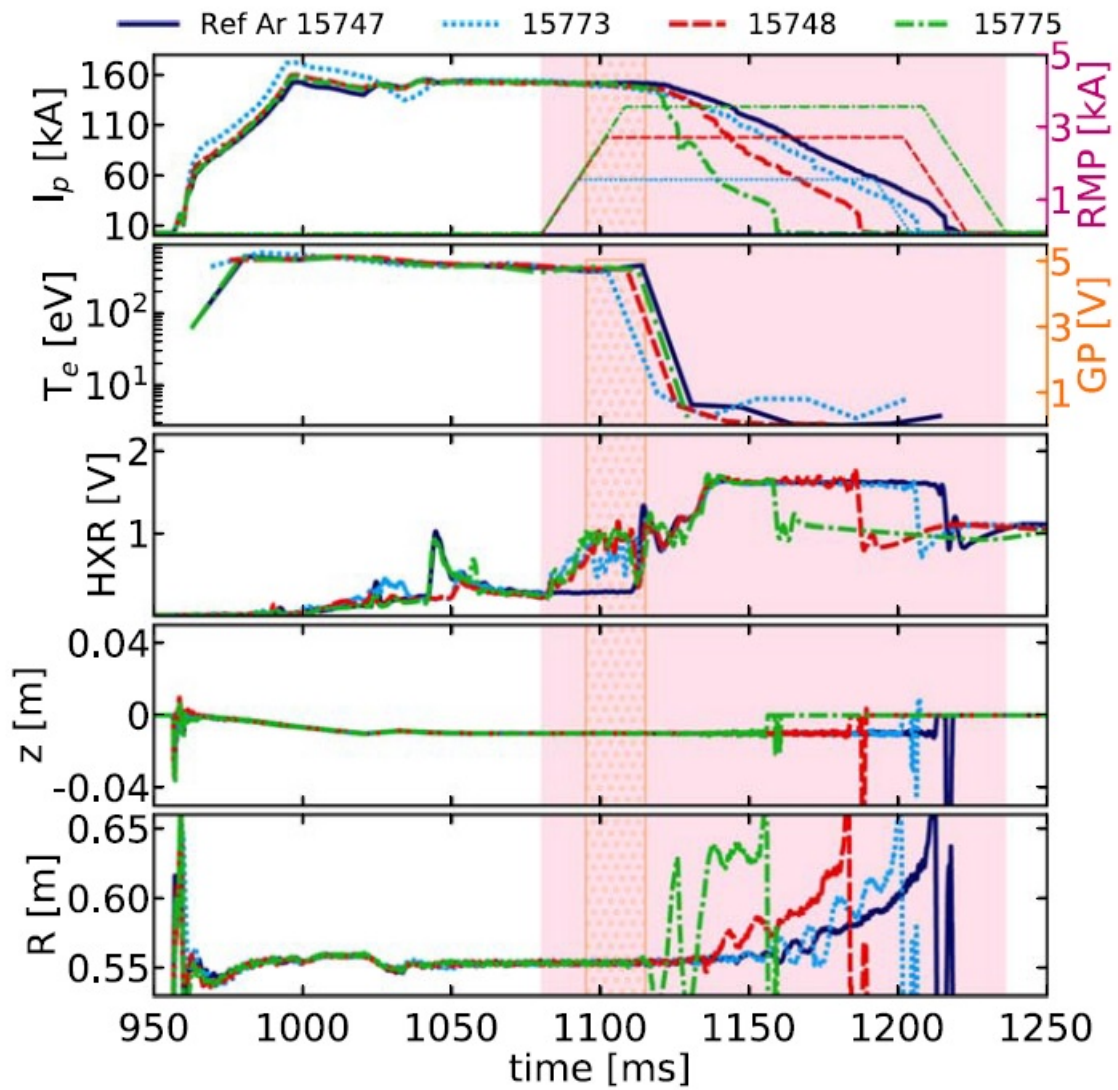
1. Řízením polohy svazku RE. Je zajímavé, že aktivním řízením polohy svazku se experimentálně zabývalo jen několik málo pracovišť a lze říci, že tokamak COMPASS se mezi ně zařadil hlavně díky inovativnímu přístupu doktoranda Ondřeje Fickera [8], [13], který především opustil standardní předpis pro indukci vertikálního pole založený na předpokladu rovnováhy toroidálního plazmatu a magnetického pole. Tento předpoklad je s ohledem na význam elektrického proudu neseného relativistickými elektrony příliš silný, je třeba intenzivnější vertikální pole, odpovídající vyšším energiím elektronů. Při řízení polohy RE svazku by principiálně bylo možné uvažovat o navedení svazku RE na bezpečný cíl, čili o rozložení výkonu jeho interakce s materiálem v prostoru a čase. V realitě se takový přístup bohužel jeví jako technicky neuskutečnitelný s ohledem na vysokou rychlost procesů a na velkou indukčnost cívek vertikálního pole v případě velkých reaktorů.
2. Ergodizací magnetického pole pomocí sedlových cívek (tzv. RMP coils - Resonant Magnetic Perturbation coils), viz obr. 3. Tyto cívky způsobují poruchu magnetických povrchů v tokamaku v radiální složce magnetického pole (v této složce by v rovnovážné konfiguraci mělo být magnetické pole nulové). Ergodizace pole se při experimentech na tokamacích ukázala jako velmi efektivní pro potlačování nestabilit okraje plazmatu. To se stalo hlavní motivací



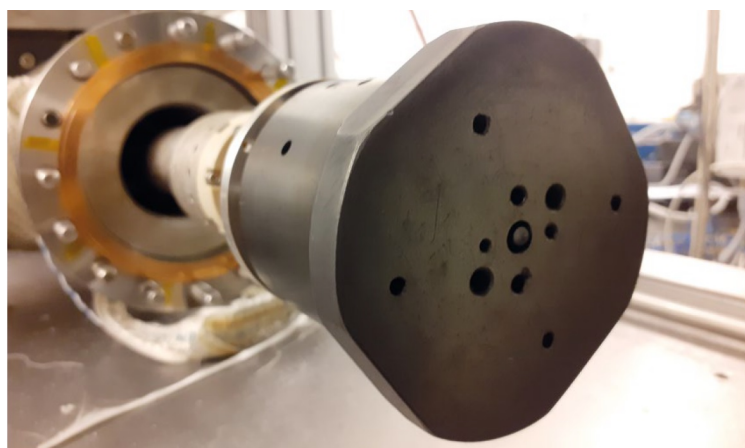
Obrázek 3: Konfigurace RMP cívek na tokamaku COMPASS při experimentech s ubíhajícími elektrony. Barevné plochy ohraničují radiální perturbaci pole, barevně je rozlišena orientace této perturbace. Převzato z [1]

pro jejich instalaci v reaktoru ITER. Odsud byl pak jen krůček k myšlence využití RMP pro mitigaci RE. Právě v tomto směru jsme na tokamaku COMPASS (který byl velmi dobře vybaven RMP cívkami) provedli řadu klíčových experimentů, viz např. obr. 4, který je podrobněji vysvětlen v [9]. Na tokamaku COMPASS je oproti větším tokamakům perturbace pole poměrně velká a hlavně zasahuje hluboko do nitra plazmatu. I když takový experimentální výzkum není bezprostředně relevantní pro fúzní reaktory velikosti ITER, kde je velikost magnetického pole od RMP v centru plazmatu zanedbatelná, přínos pro testování věrohodnosti počítačových modelů je nesporný. Právě s ohledem na ergodizaci jen velmi tenké vrstvy okraje plazmatu u větších zařízení se dnes považuje přinejmenším za sporné, zda u fúzních reaktorů bude možné RMP k mitigaci RE vůbec použít, některé novější publikace přesto upozorňují na zanedbatelný pozitivní vliv RMP v případě disrupce ITER [14].

3. Masivní napuštění plynu (massive gas injection, MGI). Projekt ITER poměrně dlouho společně s využitím MGI pro potlačení svazku RE. Přitom je nutné zmínit i skutečnost, že MGI má být zároveň využito i jako spouštěče relativně bezpečné disrupce v případě vážných provozních problémů během výboje. MGI tak i během experimentů např. na tokamacích JET a ASDEX pracuje dvakrát, jednou jako umělá příčina záměrné disrupce a jen o pár milisekund později podruhé jako nástroj potlačení RE vzniklých při tepelném kolapsu plazmatu. Ukazuje se, že pro účinnost MGI při potlačování RE hraje zásadní roli jak správné načasování rychlého napuštění plynu, tak i jeho složení. Např. vodík se šíří rychle a může snadno dosáhnout centrálních oblastí plazmatu, těžší plyny (např. argon) mají s ohledem na radiační ochlazování větší účinek, ale pomaleji se šíří. Jako nejlepší se proto jeví použití optimalizované směsi dvou plynů s velkým rozdílem atomové hmotnosti [15].
4. Použití tzv. Shattered pelets injection (SPI) [16]. V posledních letech se tato metoda dostala do čela pozornosti z hlediska nejvhodnějšího systému pro potlačení svazku RE vzniklého po disrupci. Na rozdíl od MGI používá peletku zmrzlého plynu např. argonu, která je po disrupci vystřelena (podobně jako během zásobování tokamaku palivem zmrzlými peletkami paliva) do svazku RE. Experimenty zatím ukazují, že tento systém je z hlediska proniknutí radiačního ochlazování do dostatečné hloubky plazmatu nejúčinnější. Peletka se během interakce se zbytkovým plazmatem v komoře tokamaku rozpadá na úlomky, což je z hlediska



Obrázek 4: Vliv RMP na svazek RE v tokamaku COMPASS. Je patrné, že zvyšování perturbace pole zrychluje pokles elektrického proudu, který je po vstříku argonu nesen jen RE svazkem. Převzato z [9]



Obrázek 5: Grafitový limiter s tepelnými čidly, zkonstruovaný pro tokamak COMPASS. Převzato z [1]

mitigace RE výhodné. Podobné experimenty jsou ovšem pro malá zařízení jako je tokamak COMPASS z hlediska finančních a lidských zdrojů nedostupné.

Vývoj diagnostiky RE

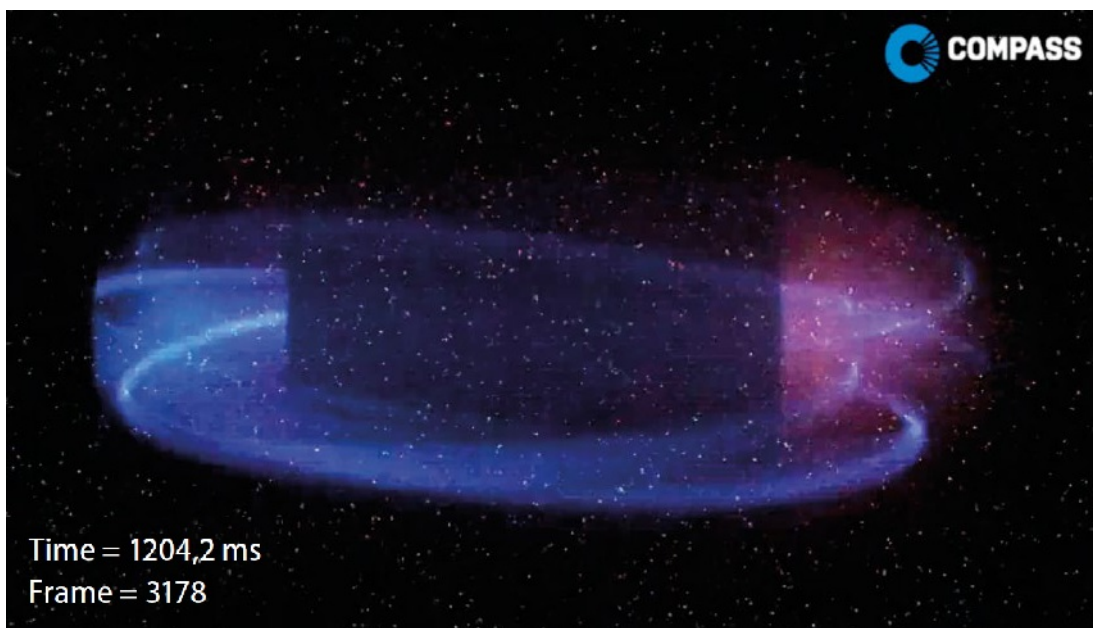
Menší tokamaky mají z hlediska experimentálního výzkumu RE ještě jeden důležitý potenciál, který v České republice bohatě využíváme, a to na rozdíl od studia mitigace RE v širší mezinárodní spolupráci a navíc s velmi vítaným zapojením malého tokamaku GOLEM, který pracuje na FJFI ČVUT. Tímto potenciálem je vývoj co nevhodnějších systémů pro diagnostiku ubíhajících elektronů. Měření ubíhajících elektronů se totiž svou podstatou hodně liší od ostatních měření na tokamaku. Tato měření jsou v první řadě velmi bohatá na ionizující tvrdé rentgenové záření (hard X-Rays, HXR), které zpravidla působí rušivě. HXR vzniká interakcí rychlých elektronů se stěnou tokamaku a často vede i k excitaci jader materiálů stěny, která se tak stává i poměrně intenzivním, dobře měřitelným zdrojem fotoneutronů.

Zdále nejkomplexnějším systémem, který se podařilo na tokamaku COMPASS integrovat do systémů diagnostiky RE svazku, byl zdroj pevných, zpravidla grafitových, pelet [17]. Jejich vystřelení do svazku ubíhajících elektronů dává jedinečný optický signál, který poskytuje nejen informaci o lokalizaci svazku, ale implicitně i o jeho energii. Data z úspěšných experimentů se dosud zpracovávají v rámci řešení doktorské disertace Ing. Jaroslava Čerovského.

Dalším poměrně jednoduchým měřením, které vzniklo v rámci řešení magisterské práce Mgr. Jakuba Čalouda bylo měření ohřevu speciálního limiteru s instalovanými tepelnými čidly [18], viz obr. 5. V kombinaci s jednoduchým modelem se Jakubovi podařilo stanovit energii svazku. V současné době jako náš doktorand připravuje obdobné měření pro tokamak GOLEM.

Další doktorand Ing. Michal Farník se úspěšně věnoval myšlence měření zvýšeného vyzařování elektronové cyklotronové frekvence v důsledku sekundární (lavinové) generace ubíhajících elektronů [19]. Před nedávnem se v důsledku odstavení tokamaku COMPASS podařilo radiometr zapůjčit na tokamak GOLEM.

Doktorand Ing. Ondřej Ficker (laureát Ceny Josefa Hlávky) stojí za úspěšným změřením synchrotronního záření ubíhajících elektronů pomocí maticových kamer, a to nejen na tokamaku COMPASS pomocí infračervených kamer (kde se historicky první měření zdařila už doktorandovi



Obrázek 6: Snímek svazku ubíhajících elektronů v reálných barvách během výboje v tokamaku COMPASS. Dobře patrné jsou filameny, napouštění vodíku na pravé straně i zrnění způsobené tvrdým rentgenovým zářením. Převzato z [1]

Mgr. Miloši Vláníčovi [20]), ale i v průkopnické analýze dat maticových kamer na společném evropském tokamaku JET [21]. Obecně skutečnost, že tokamak COMPASS byl kvalitně vybaven rychlými maticovými kamerami přinesla řadu jedinečných informací o chování a vývoji RE v čase, zejména odhalila jejich silnou tendenci k filamentaci, viz obr. 6.

Na tokamaku COMPASS se kromě toho podařilo ve spolupráci s polskými odborníky z Národního Ústavu jaderné fyziky ve Swierku testovat měření toku ubíhajících elektronů na okraji plazmatu pomocí Čerenkovova záření generovaného v syntetickém diamantu [22]. Podobně se ve spolupráci s italskými partnery podařilo na tokamaku COMPASS zapůjčit v době pandemické krize speciální kameru pro měření infračervených spekter ubíhajících elektronů REIS-E [23], ze které se nyní výsledky zpracovávají.

Ve spolupráci Katedry fyziky s Katedrou dozimetrie FJFI ČVUT jsou na obou tokamacích testovány různé scintilátory k měření ionizujícího záření. Vedle toho testujeme i detektory s prostorovým rozlišením známé jako TimePix [24].

V současné době je jediným provozovaným tokamakem v ČR malý tokamak GOLEM na FJFI ČVUT. Ten je díky svým parametrům celkem spolehlivým, i když relativně dosti slabým zdrojem RE, které jsou generovány Dreicerovým mechanismem. V rámci několika projektů, zejména pak v rámci projektu OP VVV Centrum pokročilých aplikovaných věd je podporován právě výzkum uplatnění různých scintilačních sond, a také polovodičových stripových detektorů [12].

Modelování ubíhajících elektronů v plazmatu

Vedle dedikovaných experimentálních kampaní, vývoje diagnostiky a zpracování dat představuje modelování intrakce svazku RE s plazmatem tokamaku třetí pilíř výzkumu. Osobně mi tento pilíř přijde nejvíce odtažitý od aplikované fyziky, proto jsem v rámci jeho rozvoje a rozšíření existujících softwarových nástrojů na naše tokamaky prosazoval především silnou spolupráci se zahraničními experty. Klíčová je v tomto ohledu návaznost na odbornou skupinu vedenou prof. Tünde Fülöp na švédské Chalmers university of Technology. Po průkopnickém doktorátu Dr. Miloše Vlaniče byla na problematiku simulace přijata jako postdoc Dr. Eva Macúšová [9],[25], která s tímto tématem získala v roce 2021 zvanou přednášku na konferenci EPS fyziky plazmatu s důrazem na možnost bezprostředního srovnání simulací s měřitelnými daty. Podporujeme i přísně analytický přístup, kterému se v rámci řešení projektu věnovali Dr. David Břeň a prof. Petr Kulhánek [26]. Ostatně správnost našeho přístupu k otázce teorie a modelování RE potvrzuje i fakt, že Ústav fyziky plazmatu AV ČR, v.v.i. v současné době provedl reorganizaci, v rámci které vzniklo zcela nové oddělení teorie a modelování plazmatu.

Perspektivy oboru a strategie jeho rozvoje na ČVUT

Akademická práce v oboru fyziky plazmatu a termojaderné fúze s magnetickým udržením plazmatu je pro naši univerzitu bezpochyby velmi perspektivní oblastí, ve které se bude ještě mnoho let nabízet možnost extenzivního rozvoje i bezproblémového uplatnění pro kvalitní absolventy. Současná příznivá situace v oboru je dána řadou objektivních faktorů:

- Evropská unie je hlavním partnerem mezinárodního projektu ITER, realizace stavby probíhá ve Francii a koncem desetiletí se očekává postupné zprovoznování tohoto velkého fúzního reaktoru,
- Evropský fúzní výzkum potřebuje velmi rozsáhlý doprovodný výzkum, například projekty SPIDER v Itálii, IFMIF-DONES ve Španělsku, smluvní výzkum na velkém japonském tokamaku JT-60SA, doprovodný výzkum k přípravě koncepčního projektu fúzní elektrárny DEMO a další,
- Akademie věd České republiky má ve fúzním výzkumu velmi ambiciózní program, zejména v podobě nového tokamaku COMPASS Upgrade, který je nyní ve výstavbě v Ústavu fyziky plazmatu AV ČR, v.v.i. Tento ústav má také bohaté zkušenosti s vedením českých i zahraničních studentů [27]. Silný smluvní program fúzního výzkumu má i Centrum výzkumu Řež, s.r.o.,
- sami máme s výukou v oboru již více než deset let zkušeností. Stejnou dobu velmi úspěšně provozujeme na FJFI ČVUT tokamak GOLEM, který získal díky možnosti vzdáleného přístupu přes internet věhlas doslova na celém světě. Obor je pro české studenty stabilně přitažlivý a naši absolventi se úspěšně prosazují nejen v ČR, ale i v zahraničí,
- ČVUT již v oboru dosáhla poměrně vlivné postavení. Máme silnou pozici v evropském konsorciu pro fúzní vzdělávání FUSENET, jsme tzv. core member v Evropskou unii podporovaném programu společného magisterského studia Fusion-EP [28] (v roce 2023 budeme v rámci Fusion-EP vést tři diplomové práce), jsme třetí stranou konsorcia fúzních výzkumných center EUROfusion a máme společný doktorský program s belgickou univerzitou v Gentu,
- znalosti a zkušenosti ve výzkumu fúze s magnetickým udržením plazmatu má dnes nejen FJFI, ale také Katedra fyziky na FEL ČVUT a Ústav energetiky FS ČVUT.

I přes tuto mimořádně příznivou situaci se obávám, že je nadále třeba obor rozvíjet s mimořádnou pečlivostí zejména s ohledem na jeho udržitelnost a konkurenceschopnost. Náš poměrně malý tým akademicko-pedagogických pracovníků trpí v první řadě velmi nízkou vědeckou produktivitou, která je do značné míry důsledkem časové náročnosti provozu tokamaku i nové laboratoře a pedagogickými nároky na rozvoj a kvalitu výuky. Hlavně z důvodu relativně nízké vědecké produktivity nejsou dosud mí nejblížeji spolupracovníci habilitováni. Velkou podporou a motivací je pro nás všechny účast v projektu ČVUT CAAS, kde zejména využíváme vědecké prestiže naší fakulty v oborech výzkumu a vývoje diagnostik rentgenového záření. V této situaci se snažíme naši vědeckou produktivitu postupně zvyšovat cestou podpory tvůrčí vědecké práce v našem týmu zdola, tj. především pomocí zvyšování počtu doktorandů a postdoktorandů, u kterých je výchova k úspěšné vlastní vědecké produkci hlavním předpokladem pro další osobní profesionální rozvoj.

Proto jsme poměrně záhy po získání zkušeností s pregraduální výukou v rámci reakreditace doktorského programu Jaderné inženýrství rozšířili doktorské studium o oblast termojaderné fúze (v roce 2014) a v roce 2020 jsme získali akreditaci pro společný doktorský program Fyzika vysokoteplotního plazmatu a termojaderné fúze s prestižní univerzitou v Gentu. Nový doktorský obor má potenciál rychle zvednout vědeckou produkci ČVUT v oblastech analýzy dat magneticky udržovaného plazmatu (zejména v tokamacích) i ve vybraných oblastech techniky termojaderné fúze (v návaznosti na belgické jaderné středisko SCK CEN). Belgie nicméně nemá takovou šíři experimentálního vybavení v oboru jako Česká republika, zejména společný obor neřeší naše možnosti v oblasti výzkumu vysokoparametrového laserového plazmatu. Proto se domnívám, že je nutné nadále nabízet, a v nejbližších letech znovu akreditovat, i naše národní doktorské studium, a to s ohledem na jeho více fyzikální povahu napříště v oboru Fyzikální inženýrství.

Doktorandy se zásadně snažím co nejrychleji zapojit do vědecké práce na velkých zahraničních infrastrukturách, a to hlavně proto, že z těchto pracovišť mám sám pozitivní zkušenosti. Pracuje v nich celá řada specialistů, kteří mají často bohaté zkušenosti s tím, jak vysvětlit aktuální fyzikálně-inženýrské výzvy fúzního výzkumu. Zkrátka a dobře, přeci jen je znát, že se u nich na špičkové úrovni v našem oboru pracovalo nejméně o jednu generaci déle. První úspěchy se dostávají, někteří doktorandi publikovali v rámci plnění úkolů v zahraničí velmi významné výsledky, připomenout bych zde měl mimořádné příspěvky svého doktoranda Ing. Ondřeje Fickera právě v oboru studia RE v rámci konsorcia EUROusion, za které se stal v loňském roce za ČVUT laureátem Ceny Josefa Hlávky.

Vedle doktorského studia je z mého hlediska ještě větším povzbuzením pro špičkovou výzkumnou činnost menšího akademického týmu přítomnost postdoků na pracovišti. Proto jsme loni zažádali o pozici postdoc v rámci EURAXESS Czech republic, a tu jsme také získali. Naše nová postdoc Dr Sara Abbasi v současné době již připravuje první konferenční příspěvek (s recenzovaným sborníkem) o aplikaci rychlých kamer na tokamaku GOLEM. Podobně letos usilujeme o získání další postdoc pozice v rámci projektu EU Horizon MSCA (CROP).

Z dlouhodobější perspektivy bude samozřejmě klíčové, zda se nám podaří včas vyhledat a zaškolit nové osobnosti pro další rozvoj oboru na fakultě. Myslím, že není žádným tajemstvím, že s mimořádně perspektivními studenty na toto téma otevřeně hovoříme. Ostatně, v ideální situaci by mělo být možné klíčová místa obsazovat i v rámci mezinárodního výběrového řízení. Naše vlastní zkušenosti např. z EURAXESS bohužel ukazují, že ČVUT v tomto směru stále není pro mladé mimořádné vědecko-pedagogické talenty konkurenceschopná, stále jsme svědky značného vnitřního i vnějšího brain-drain, a tak nám nezbývá, než přemýšlet o dalších příležitostech, kterými bychom naše vlastní talenty mohli zaujmout. Alespoň v rámci České republiky vidím tři velké, dosud ne zcela využívané, přednosti našeho oboru na naší univerzitě:

- Žádný mladý talentovaný český postdok se u nás určitě nemusí ocínout v situaci, kdy na něj z mnoha nejrůznějších důvodů (nejčastěji právě z důvodu okamžitého nedostatku

zkušených expertů) působí snahy zaměstnavatelů o tzv. inbreeding. Snažíme se, aby každý kvalitní absolvent doktorského studia naopak dostal jasné povzbuzení i podporu naší odborné komunity k tomu, aby strávil alespoň dva roky na stáži v zahraničí.

- My se naopak zcela jistě nebráníme možnostem střednědobých pobytů zahraničních absolventů na našem pracovišti. Přináší to jak tvůrčí obohacení našich metod práce, tak věhlas našemu pracovišti.
- V neposlední řadě musím navzdory optimističtějším stanoviskům některých vedoucích pracovníků stále připomínat, že na základě mých osobních zkušeností je český fúzní výzkum stále do značné míry národně sebestředný, a že ani zdaleka nevyužívá existující odborný a finanční potenciál pro soustředěnou spolupráci se zahraničními centry výzkumu tak, jako to dokáží třeba kolegové v částicovém výzkumu. Z dlouhodobého hlediska se mi jeví možnosti účasti naší univerzity na koordinaci vědecko-výzkumné činnosti naší země v rámci spolupráce např. s mezinárodní organizací ITER nebo v návaznosti na naše příspěvky k projektu první fúzní elektrárny DEMO jako prakticky neomezené.

Literatura:

Reference

- [1] Mlynář J., *et al.* 2020 *Československý časopis pro fyziku* **6** 392
- [2] Dreicer H., 1959 *Phys. Rev.* **115** 238
- [3] Connor J.W., Hastie R.J., 1975 *Nucl. Fusion* **15** 415
- [4] Gurevich A.V., Milikh G.M., Roussel-Dupre R. 1992 *Phys. Lett. A* **165** 463
- [5] Rosenbluth M.N. and Putvinski S.V., 1997 *Nucl. Fusion* **37** 1355
- [6] Eriksson, L.-G., 2004. *Phys. Rev. Lett.* **92** 205004
- [7] Pavel Aleynikov P. and Breizman B., 2015 *Nucl. Fusion* **55** 043014
- [8] Ficker O., *et al.* 2019 *Nucl. Fusion* **59** 096036
- [9] Mlynar J. *et al.* 2019 *Plasma Phys. Control. Fusion* **61** 014010
- [10] Vlainic M. *et al.* 2015 *Nukleonika* **60(2)** 249
- [11] Vlainic M. *et al.* 2015 *J. Plasma Phys.* **81** 475810506
- [12] Cerovsky J. *et al.* 2022 JINST 17 C01033
- [13] Ficker, O. *et al.* 2021 *Proc. 47th EPS Conference on Plasma Physics (remote)*, ECA **45A** P3.1034
- [14] Smith H. M., *et al.* 2013 *Phys. Plasmas* **20** 072505
- [15] Reux C. *et al.* 2015 *Nucl. Fusion* **55** 093013
- [16] Shiraki D. *et al.* 2018 *Nucl. Fusion* **58** 056006
- [17] Cerovsky J. *et al.* 2020 *Proc. 9th International Workshop and Summer School on Plasma Physics (IWSSPP) Kiten, Bulgaria (remote)*
- [18] Čaloud J.: Diplomová práce. Masarykova univerzita, Brno 2020. Dostupné z: https://is.muni.cz/th/cieje/DP_final_zp.pdf
- [19] Farnik M., *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* 90, 113501 (2019). (*open access*)
- [20] Vlainic M. *et al.* 2015 *Proc. 42nd EPS Conf. Plasma Phys. (Lisbon)* ECA Vol. **39E** P4.108
- [21] Sommariva, C. *et al.* 2021 *Proc. 47th EPS Conference on Plasma Physics (remote)*, ECA **45A** P3.1041
- [22] Rabinski M., *et al.* 2017 JINST **12**, C10014 (*open access*)
- [23] Causa F. *et al.* 2019 *Rev.Sci.Instrum.* **90** 073501
- [24] Svihra P. *et al.* 2019 *Fusion Eng. Design* **146** 316
- [25] Macúšová, E. *et al.* 2017 *Proc. 44th EPS Conference on Plasma Physics (Belfast)*, ECA **45A** P4.141

- [26] D. Břeň, P. Kulhánek 2020 *Pokroky mat. fyz. astron.* **65**, 3
- [27] Stockel J. *et al.* 2021 *Eur. J. Phys.* **42** 045703
- [28] Van Oost G. *et al.* 2021 *Eur. J. Phys.* **42** 024002

doc. RNDr. Jan Mlynář, Ph.D. – odborný životopis

Datum a místo narození: 2. listopadu 1966, Praha
Rodinný stav: ženatý, děti Barbora (20) a Tomáš (18)
e-mail: jan.mlynar@fjfi.cvut.cz

Odborná praxe a vzdělání:

2007 – Katedra fyziky FJFI ČVUT
Břehová 7, 115 19 Praha 1
vědecký pracovník, docent od 2014
2003 – ÚFP AV ČR, v.v.i., Za Slovankou 3, 182 00 Praha 8
Vědecký pracovník (od 2012 vedoucí vědecký pracovník)
2003 – 2007 Dlouhodobě vyslán na Společný evropský torus
EFDA JET, Culham Science Centre, Abingdon, UK
1997 – 2002 Vědecký asistent (postdoc) v Centru výzkumu fyziky plazmatu
CRPP EPFL, Lausanne, Švýcarsko
1995 – 1997 ČEZ, a. s., Jungmannova 21, Praha 1
1990 – 1994 doktorandské studium, fyzika plazmatu, MFF UK, Praha
1985 – 1990 magisterské studium, jaderná fyzika, MFF UK, Praha

Organizační činnost a odborná sdružení:

2020 – garant magisterského programu Fyzika
plazmatu a termojaderné fúze
2020 – garant mezinárodního doktorského programu Fyzika
vysokoteplotního plazmatu a termojaderné fúze
2019 – člen akademické rady (Collegio Docenti) doktorského studia
Fusion Science and Engineering, Padua University, Itálie
2018 – člen akademické rady Evropského magisterského studia
Nuclear Fusion and Engineering Physics
(EM joint programme, Fusion-EP, koordinátor UAM, Francie)
2013 – člen Vědecké rady Technické fakulty ČZU Praha
2014 – 2022 předseda České fyzikální společnosti JČMF
člen rady Evropské fyzikální společnosti (EPS)
2019 – 2021 člen programového výboru 47th Conference on Plasma Physics EPS
2019 – 2020 předseda programového výboru 20. konference českých a slovenských fyziků
MFF UK v Praze (proběhla v září 2020 hybridní formou)
2017 – 2018 vědecký koordinátor evropského výzkumu ubíhajících elektronů
v koordinaci EUROfusion MST (Medium Sized Tokamaks)

Člen redakčních rad časopisů Pokroky matematiky, fyziky a astronomie (PMFA) a Československý časopis pro fyziku.