

Posudek školitele k obhajobě disertační práce Ing. Matěje Tomeše, M.Sc.

„Dopředné a zpětné modelování spektroskopických diagnostik fúzního plazmatu“ (Forward and Backward Modelling of Spectroscopic Diagnostics in Fusion Plasmas)

Ing. Matěj Tomeš, M.Sc. absolvoval postgraduální studium v letech 2014-2024, do konce roku 2023 pod vedením dnes již zesnulého prof. RNDr. Jana Mlynáře, Ph.D. Původní téma jeho disertační práce bylo zaměřeno na návrh a využití diagnostiky pro spektroskopii jevů nábojové výměny na tokamaku COMPASS. I přesto, že na toto téma Ing. Tomeš publikoval jednu impaktovanou publikaci a několik konferenčních příspěvků, vzhledem k postupnému utlumování a nakonec úplnému ukončení provozu tokamaku COMPASS v roce 2021 bohužel nebylo možné tuto předchozí práci plně vytěžit. Těžiště doktorského studia se proto přesunulo k jednomu z podtémat původní práce – tvorbě syntetických spektroskopických diagnostik a jejich dopřednému a zpětnému modelování, s cílem umožnit efektivnější návrh nově budovaných diagnostik a zlepšit získávání fyzikálně relevantních informací z diagnostik již existujících.

V rámci tohoto tématu projevil Ing. Tomeš excelentní iniciativu a samostatnost. Ve velmi krátkém čase se stal expertem na jedny z klíčových kódů pro modelování spektroskopických diagnostik plazmatu – kódu pro sledování paprsků Raysect a kódu pro modelování vyzářování plazmatu Cherab, jejichž využití se následně stalo jádrem odevzdané disertační práce. Do jejich vývoje se také aktivně zapojil, např. vytvořením univerzálního modelu diagnostiky Thomsonova rozptylu. Postupně se dokonce stal jedním z hlavních vývojářů kódu Cherab a členem Cherab Technical Management Committee. Získané schopnosti efektivního modelování spektroskopických diagnostik následně našly široké využití jak v rámci domovského týmu při analýze stávajících a návrhu nových diagnostik pro tokamak COMPASS Upgrade, tak v rámci mezinárodní spolupráce při fyzikální analýze experimentů na evropském tokamaku JET. Kromě výše zmíněného bych rád vyzdvihl také zapojení Ing. Tomeše do tématu spektroskopických diagnostik na tokamaku ITER, kde se stal členem poradního panelu pro vývoj diagnostik ITPA Diagnostics Topical Group a samostatně v současné době pro ITER řeší projekt tvorby syntetické diagnostiky Thomsonova rozptylu.

Odevzdaná disertační práce je psána v angličtině, má celkem 159 stran a prolínají se v ní dvě hlavní témata - efektivní dopředné modelování optických diagnostik pomocí metod zpětného sledování paprsku a následná zpětná rekonstrukce stavu plazmatu s využitím bayesovských metod. Kromě velmi stručného úvodu do problematiky sledování paprsků se práce sestává ze tří samostatných částí, z nichž každá čtenáře zavede do jedné z oblastí aplikace syntetických diagnostik, k nimž autor přispěl.

První a nejobsáhlejší část, sepsaná v kapitole 2, se zabývá modelováním diagnostiky Thomsonova rozptylu a následnou zpětnou rekonstrukcí parametrů plazmatu. Autor vyvinul a vědecké komunitě v rámci otevřeného balíku Cherab poskytl model této diagnostiky a sám ho aplikoval na analýzu chyb vstupujících do měření Thomsonova rozptylu na tokamaku COMPASS. Klíčovým aspektem prezentovaného modelu je jeho přenositelnost na jiná zařízení a snadná rozšiřitelnost na další diagnostické metody založené na interakci laserového světla s plazmatem, díky čemuž vznikl cenný nástroj využitelný celou fúzní komunitou. Autor sám tento model aktuálně aplikuje kromě tokamaku COMPASS i na optimalizaci designu diagnostiky Thomsonova rozptylu pro tokamak COMPASS Upgrade a tvorbu syntetické diagnostiky pro tokamak ITER. Kromě samotné syntetické diagnostiky Thomsonova rozptylu je v práci navržen a otestován i bayesovský model řešící inverzní problém, tj. transformaci hrubých experimentálních dat do prostoru parametrů plazmatu. Ačkoliv se nejedná o první aplikaci bayesovských metod na zpětnou rekonstrukci profilů plazmatu z diagnostiky Thomsonova rozptylu, navržená metoda je unikátní v tom, že umožňuje zahrnutí i poměrně

komplexních instrumentálních efektů a chyb, které dokáže promítnout do nejistoty zrekonstruovaných parametrů plazmatu.

Ve druhé části autor využívá jím vytvořený syntetický model divertorové spektroskopie na tokamaku JET k určení koncentrace nečistot vstříkovaných do plazmatu. Výhodou navržené metody je oproti předchozím přístupům možnost zahrnutí odrazů, které mohou u zařízení s kovovou stěnou tvořit podstatnou část měřeného signálu, a bayesovský přístup k výpočtu nejistot. Metoda je v práci aplikována specificky na určení koncentrace neonu, nicméně obdobný model by bylo možné použít i na další nečistoty jako je dusík. Rozšíření práce v tomto směru je plánované na rok 2024 v rámci programu evropské fúzní spolupráce WPTE-JET-RT01. Vytvořený model také umožňuje validaci numerických transportních simulací získaných kódem SOLPS-ITER. Výsledky naznačují možný významný vliv nerovnovážného rozdělení ionizačních stavů nečistoty na experimentálně určené hodnoty její koncentrace a v práci je nastíněno možné řešení, jak toto omezení s využitím bayesovského přístupu v budoucnu obejít.

V třetí výsledkové kapitole pak autor předkládá inovativní přístup modelování synchrotronního záření ubíhajících elektronů v tokamaku. Oproti v oboru standardnímu přístupu numerického trasování částic emitujících záření a následného dopředného sledování paprsků, což je metoda přesná, avšak výpočetně velmi náročná, autor navrhuje tyto dva kroky oddělit a syntetický model dané diagnostiky parametrizovat tvarem distribuční funkce ubíhajících elektronů. Tento přístup je velmi flexibilní, neboť umožňuje abstrahovat od způsobu získání tvaru této distribuční funkce - může se jednat jak o plnou 6D distribuční funkci získanou numerickým trasováním částic, tak o libovolně analyticky odvozené 1D aproximace rozšířené do 6D s využitím předpokládaných symetrií. Druhou zásadní výhodou této metody je její rychlost, kdy lze s využitím metod zpětného trasování výrazně redukovat množství sledovaných paprsků a následně výpočetní náročnost řešení celého radiačního modelu. To umožňuje zahrnutí vícenásobných odrazů od vnitřních komponent tokamaku, které jsou, jak práce názorně demonstruje, v mnoha případech nezanedbatelné, a otevírá cestu k možnostem tvorby efektivního zpětného modelu diagnostiky, kdy je například na základě experimentálního měření získána (alespoň částečná) informace o tvaru distribuční funkce generující zachycené záření.

Přílohou práce je seznam autorských publikací, který obsahuje 23 článků publikovaných v impaktovaných časopisech, z nichž 3 jsou prvoautorské publikace, a dalších 13 příspěvků do konferenčních sborníků. Citační ohlas dle Web of science, po zahrnutí všech prací, kde je Ing. Tomeš uveden jako spoluautor, v současné době činí 619 citací a jeho autorský h-index je 12. Zmíněný výčet zahrnuje pouze články, kde je explicitně jmenován jako spoluautor. Pokud bychom započítali i články, do nichž přispěl v rámci týmu JET Contributors, byly by statistiky ještě výrazně vyšší.

Vzhledem k tomu, že většina doktorského studia Ing. Tomeše proběhla pod vedením prof. Jana Mlynáře, nemohu zcela zhodnotit celý průběh studia. Nicméně, na základě zkušeností posledních 4 let, kdy jsem působil na pozici konzultanta a v posledním období také jako školitel, a kdy vznikla většina obsahu disertační práce, bych rád vyzdvihl excelentní píli a iniciativu se kterou Ing. Tomeš k práci přistupoval a která i pro mne byla dlouhodobou inspirací. Výstupem práce je několik dopředných a zpětných modelů spektroskopických diagnostik, které jsou v řadě aspektů inovativní a budou-li v budoucnu adekvátně nasazeny a rozvíjeny, věřím, že mohou významně vylepšit možnosti spektroskopických diagnostik získávat relevantní a statisticky podložené informace o plazmatu nejen na tokamaku COMPASS Upgrade. Práci Ing. Matěje Tomeše, M.Sc. proto hodnotím pozitivně a doporučuji, aby mu byl po úspěšné obhajobě udělen titul Ph.D.

V Praze, 20.2.2024

Mgr. Jakub Seidl, Ph.D.