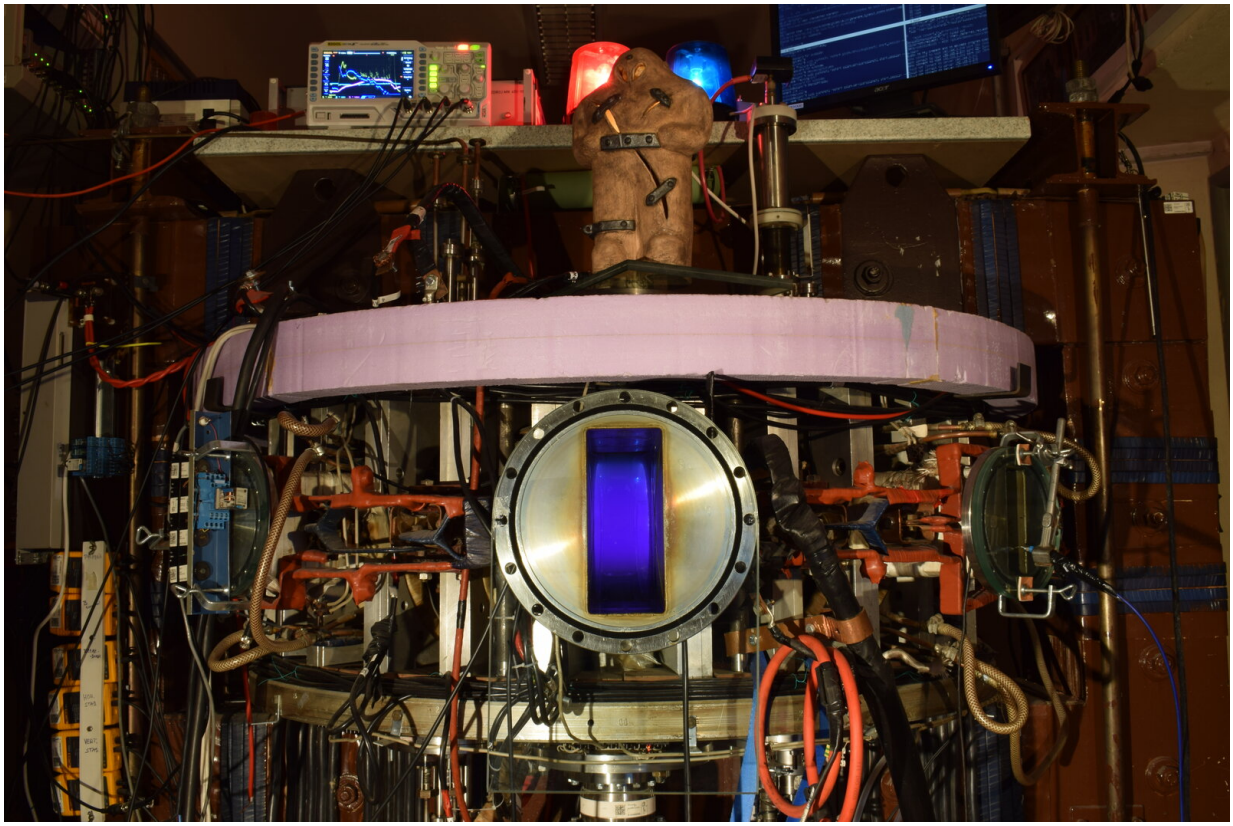


Podoba Tokamaku GOLEM zachyceného ve chvíli výboje vysokoteplotního plazmatu

Unikatní vlastností tokamaku GOLEM je možnost jeho vzdáleného řízení. Mapa ilustruje místa odkud byl tento tokamak řízen v rámci vzdělávacích kurzů.

18 let tokamaku GOLEM ve službách vzdělávání a výzkumu

Tokamak GOLEM hraje významnou roli ve vzdělávání nové generace odborníků na jadernou fúzi. Jeho otevřený a flexibilní charakter umožňuje jak lokální, tak mezinárodní využití ve výuce a výzkumu napříč všemi stupni odbornosti. Studenti nejen z ČVUT, ale i z dalších evropských a světových univerzit mají možnost realizovat experimenty v oblasti technologií a diagnostiky vysokoteplotního plazmatu v magnetickém udržení.

> „*The EUROfusion consortium has taken note of the systematic and successful efforts of the FNSPE CTU in the field of education of future fusion experts, with a significant impact on the European level. Remote experiments on the GOLEM tokamak in Prague are in the curriculum of several European summer schools. Last year, FNSPE organised in Prague the successful FuseNet PhD event for 130 doctoral students in nuclear fusion coming from across whole Europe. This event was possible thanks to a grant from EUROfusion. Many former students of FNSPE continue their careers in fusion either in their own country (e.g. on the COMPASS tokamak) or abroad, while foreign students (e.g. from Serbia) have developed expertise and enthusiasm in fusion research at FNSPE and IPP Prague.*“
>
> Prof. Dr. Tony Donné, Ph.D.
> EUROfusion Programme Manager
> (v dopise ze dne 4.6.2016)

Vzdělávání

Na Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT v Praze je tokamak GOLEM pevně začleněn do výuky fúzních technologií a fyziky plazmatu. Studenti bakalářského i magisterského stupně zde absolvují **specializované laboratoře** zaměřené na řízení výbojů, práci s diagnostikami a analýzu dat. GOLEM je zároveň často využíván jako experimentální základna pro diplomové a disertační práce, v nichž studenti řeší konkrétní úlohy související s provozem, měřením či interpretací výbojů. Jako otevřená a dostupná platforma se tokamak osvědčil i ve středoškolském prostředí, kde umožňuje zapojení studentů do soutěží typu SOČ. Ti si pod vedením vysokoškolských mentorů mohou poprvé vyzkoušet skutečnou vědeckou práci.

Význam tokamaku GOLEM přesahuje hranice České republiky. Díky svému **online řídicímu systému** patří mezi první zařízení svého druhu, která umožňují vzdálené řízení výbojů. Tato vlastnost otevřela cestu k praktickým experimentům stovkám studentů z evropských i mimoevropských univerzit, a to bez nutnosti fyzické přítomnosti v laboratoři. GOLEM se tak stal součástí mezinárodních vzdělávacích aktivit, zejména v rámci sítě FUSENET, podporované organizací EUROfusion. Experimenty na GOLEMu jsou pravidelně zařazovány do letních škol, workshopů a dalších výukových programů. Studenti zde nejen opakují referenční výboje, ale navrhují i vlastní experimenty, vyhodnocují jejich výsledky a porovnávají je s teoretickými předpoklady. Díky těmto možnostem se GOLEM stal důležitým pilířem mezinárodního vzdělávacího systému a zároveň inspirací pro vývoj podobných nástrojů v dalších oblastech vzdělávání.

Vědecká aktivita

Tokamak GOLEM slouží vedle výuky také jako experimentální platforma pro realizaci výzkumných projektů pokrývajících široké spektrum témat současné fúzní fyziky. Díky své otevřenosti, dostupnosti a technické flexibilitě je ideálním prostředím pro návrh, testování a ověřování diagnostických metod a interpretaci jevů v plazmatu.

Mezi klíčové výzkumné oblasti patří **fyzika a diagnostika ubíhajících elektronů**, které představují potenciální riziko pro konstrukci budoucích fúzních zařízení. Na GOLEMu byly realizovány experimenty využívající scintilační detektory, ale i moderní polovodičové technologie, například stripové detektory a systémy s čipem Timepix3. Tyto nástroje umožnily sledování energetického spektra a prostorovou lokalizaci výskytu ubíhajících elektronů.

V oblasti zobrazování plazmového záření se osvědčila aplikace technik strojového učení, především neuronových sítí pro **tomografickou rekonstrukci** emisních profilů ve viditelné oblasti. Modely trénované na syntetických datech a ověřované na reálných výbojích vykazují vysokou přesnost a výrazné zrychlení výpočtu oproti klasickým algoritmům. Kombinace rychlých kamer a pokročilé numeriky tak umožňuje vyhodnocování experimentů v reálném čase.

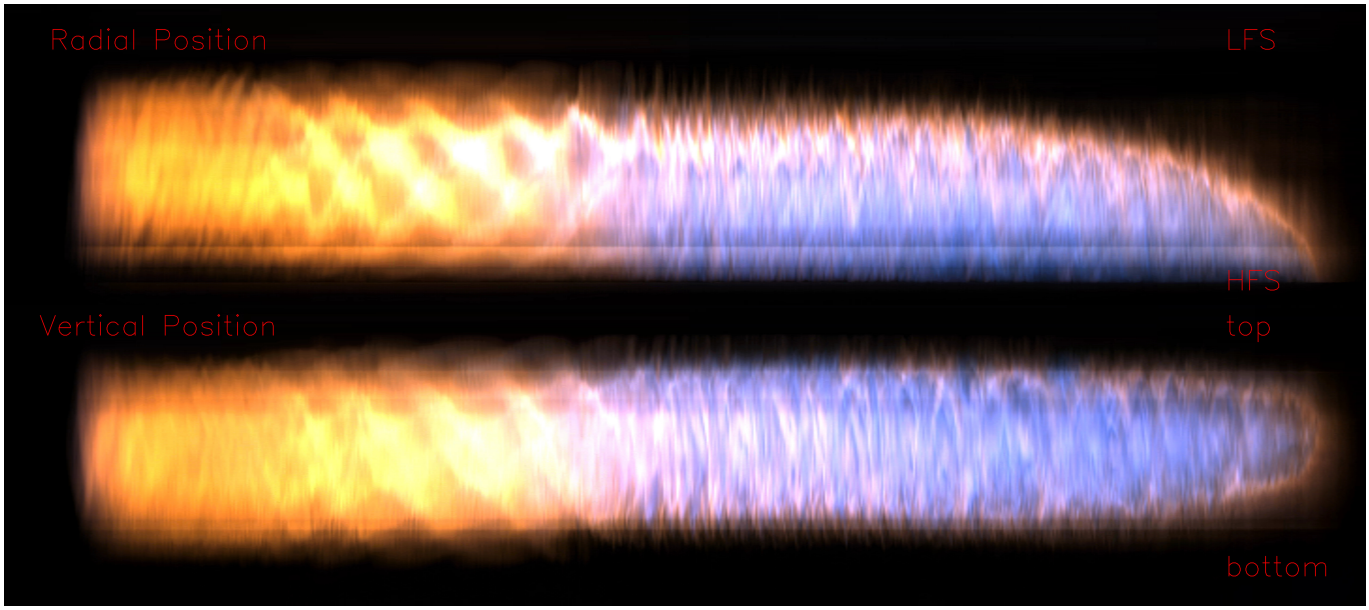
Zvláštní pozornost je věnována **fyzice a diagnostickým technikám okrajové oblasti plazmatu**, kde probíhá interakce mezi jádrem výboje a komorovým prostředím. Elektrické a magnetické sondy odhalily výskyt zonálních proudů a dlouhodobých korelací v nízkofrekvenčním pásmu, které se podílejí na turbulentním transportu. Studie bi-Maxwellovských elektronových distribucí ve scrape-off vrstvě potvrdily souvislost s ionizačními procesy závislými na druhu pracovního plynu.

V oblasti globální stability výboje přinesl GOLEM nové poznatky o **magnetohydrodynamické aktivitě plazmatu**. Byly analyzovány nestability, jejich spektra i souvislosti s parametry výboje. Mezi nejvýznamnější výsledky patří první experimentální pozorování spontánního vzniku transportní bariéry v heliovém plazmatu na tokamaku s kruhovým limiterem – bez použití externí polarizace, jaká je běžná na větších zařízeních s divertorem.

Samostatnou oblastí výzkumu jsou **izotopické studie**, které porovnávají chování výbojů ve vodíku a heliu. Experimenty na GOLEMu umožnily sledovat rozdíly ve spouštění, délce výboje, profilech teploty i fluktuacích. Tyto výsledky přispívají k hlubšímu porozumění transportním procesům a mají přesah i pro větší fúzní zařízení.

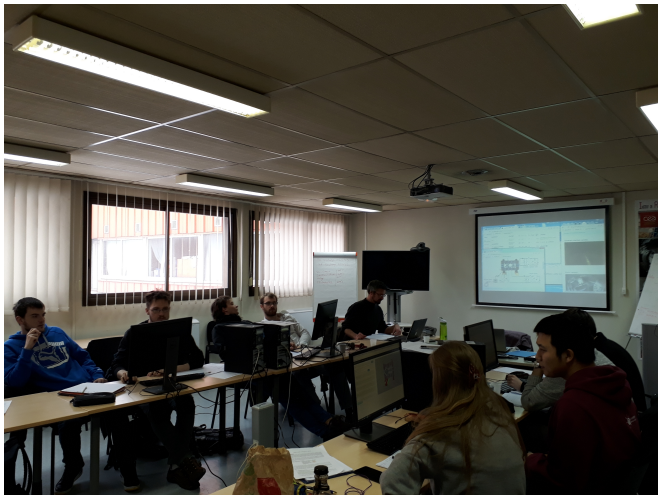
GOLEM sloužil rovněž jako testovací zařízení pro nové technologie, například v oblasti vysokoteplotních supravodičů. Díky možnosti rychlé iterace umožňuje efektivní ověřování nových komponent přímo v experimentálním provozu.

Publikované výsledky výzkumu na GOLEMu se pravidelně objevují ve vědeckých časopisech a na konferencích. Mnohé z nich vznikají v rámci diplomových, disertačních či mezinárodních studentských projektů. Tokamak GOLEM se tak stal přirozeným mostem mezi vzdělávací a výzkumnou činností v oblasti jaderné fúze.

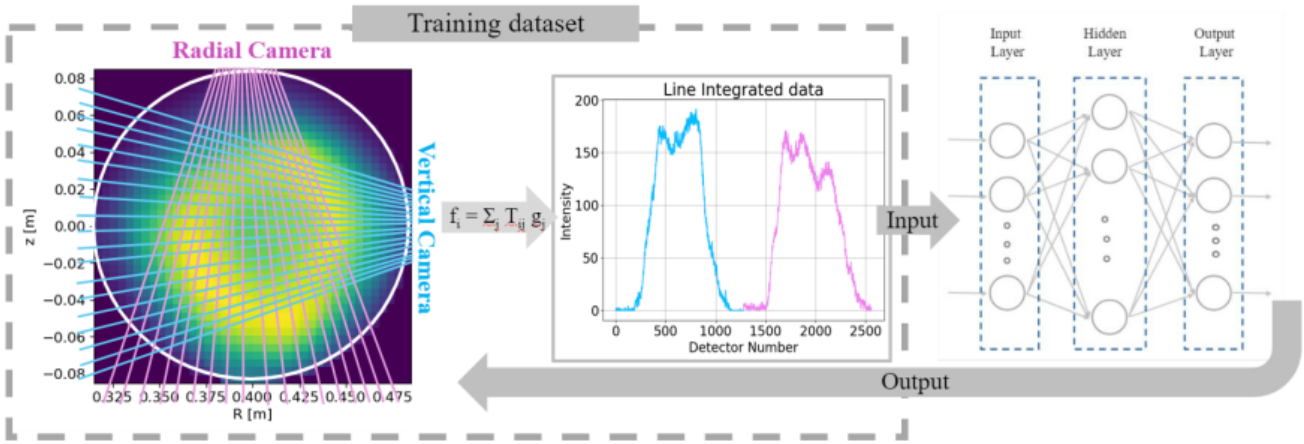


Formování transportní bariéry v Heliovém plazmatu

Příprava měření úlohy "Magnetic confinement of high temperature plasma at the GOLEM tokamak"v rámci praktik fyziky plazmatu



Vzdálené řízení tokamaku GOLEM studenty "European Master of Science in Nuclear Fusion and Engineering Physics"z Francie



Schématický diagram modelu neuronové sítě realizovaného na tokamaku GOLEM.