

Tokamak GOLEM:

vzdělávání jako klíč k úspěchu k dosažení velkých cílů

Ing. Vojtěch Svoboda, CSc.

FJFI ČVUT v Praze

62

Tokamak GOLEM (dříve CASTOR) se stal vzdělávacím zařízením pro domácí i zahraniční studenty prostřednictvím vzdáleného přístupu. Pracuje rutinně už více než 10 let ve skromném rozsahu technologických parametrů $B_t < 0,5 \text{ T}$, $I_p < 8 \text{ kA}$, době výboje $< 15 \text{ ms}$ a s omezenou sadou diagnostik. Budoucí specialisté v oblasti fúzních technologií zde mohou studovat širokou škálu úloh s různou úrovní složitosti pokrývající fyziku, technologii a operování reálného tokamaku.

The GOLEM tokamak, (formerly CASTOR), became an educational device for domestic as well as for foreign students via remote participation/handling. It operates routinely for more than 10 years at modest range of parameters $B_t < 0.5 \text{ T}$, $I_p < 8 \text{ kA}$, discharge duration $< 15 \text{ ms}$, and with a limited set of diagnostics. Wide range of tasks with varying levels of complexity covering tokamak physics, technology and operation can be studied by the future fusion specialists.

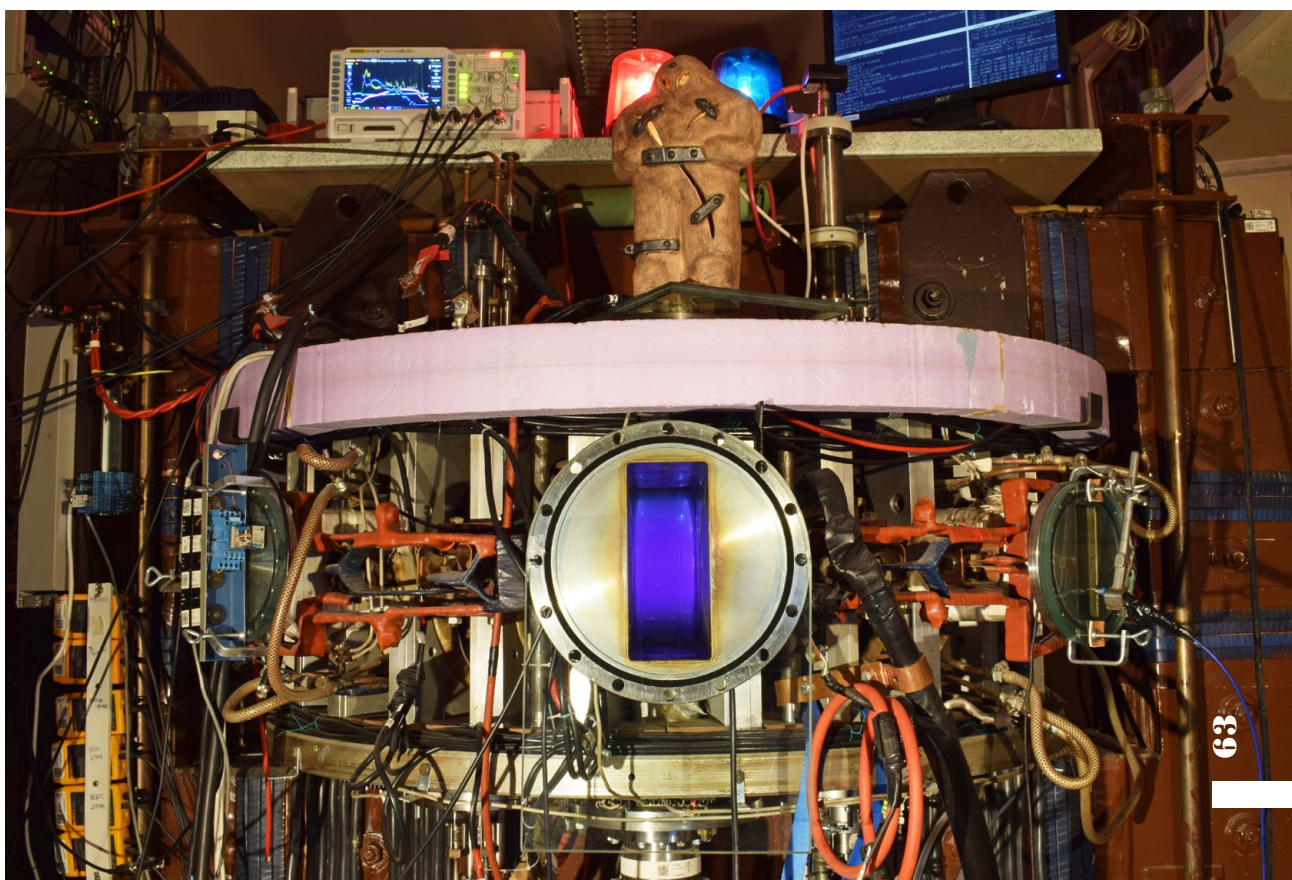
"The EUROfusion consortium has taken note of the systematic and successful efforts of the FNSPE CTU in the field of education of future fusion experts, with a significant impact on the European level. Remote experiments on the GOLEM tokamak in Prague are in the curriculum of several European summer schools..."

prof. Tony Donné, EUROfusion Programme Manager

MOTIVACE

V červnu 2005 bylo rozhodnuto o umístění mezinárodního vědecko-technologického experimentu, tokamaku ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), do střediska Cadarache v jižní Francii. Tímto krokem vznikla velká poptávka po schopných inženýrech a vědcích ve velkém časovém horizontu, což následně podnítilo masivní podporu v oblasti fúzního vzdělávání prakticky

v celém světě. Česká republika se pak ihned zapojila do evropského projektu FUSENET (European Fusion Education Network), což dnes představuje konsorcium 36 evropských škol a laboratoří z 18 zemí EU s cílem koordinovat fúzní vzdělávání v Evropě. Z České republiky jsou v konsorciu tři subjekty – ČVUT prostřednictvím FJFI, ÚFP AV ČR, v. v. i., a Univerzita Karlova prostřednictvím MFF.



Obr. 1: Tokamak GOLEM zachycený v okamžiku výboje

Jakékoliv experimenty v oblasti vysokoteplotního plazmatu a potažmo termojaderné fúze jsou velmi náročné a drahé, a proto se zde od počátku hledaly cesty, které by umožnily doplnit teoretickou výuku o praktickou část způsobem, který by umožnil sdílení pro skupiny studentů z různých zemí Evropy. Ideálně tedy vzdálené experimenty říditelné přes internet.

HISTORIE

Tokamak GOLEM byl původně postaven jako TM-1 v Moskvě v roce 1960 a je to tedy nejstarší stále funkční tokamak na světě. Díky spolupráci mezi Československem a Sovětským svazem byl v roce 1977 přeinstalován do Prahy jako TM-1MH, kompletně zrenovován a v roce 1984 uveden do provozu jako CASTOR, zde sloužil ke studiu turbulen-

cí v okrajovém plazmatu a tažení proudu plazmatem vysokofrekvenčním elektromagnetickým polem. V Ústavu fyziky plazmatu Praha byl provozován do roku 2007, kdy jej zde vystřídal větší a modernější britský tokamak COMPASS. Přestěhoval se pak tedy znovu, nyní z půdy Akademie věd do prostor Českého vysokého učení technického a po druhé rekonstrukci zde začal sloužit vzdělávání budoucích odborníků v oblasti fyziky, technologie a diagnostiky vysokoteplotního plazmatu v magnetickém udržení.

TOKAMAK GOLEM

je skromné termojaderné zařízení malých rozměrů, hlavní poloměr vytvořeného plazmatického prstence je 40 cm, malý pak zhruba 8 cm. Vybaven je pouze základní technologií



Obr. 2: Studenti z Technické univerzity v Eidhovenu operující tokamak na dálku cca 650 km vzdušnou čarou

žehnout a po nějakou dobu zhruba do 25 ms udržet plazmatický výboj. Možná frekvence opakování takovýchto plazmatických výbojů je poměrně vysoká, jeden výstřel za ~ 2-3 minuty, proto je to ideální zařízení pro různá systematická studia, která lze snadno provést během několika vyučovacích hodin. Při reinstalaci na ČVUT se podařilo přebudovat řídicí infrastrukturu tohoto tokamaku a napojit na moderní styl řízení přes současné progresivní informační technologie a tím získal tento tokamak jedinečnou schopnost být ovládán vzdáleně přes standardní internet z libovolného prohlížeče.

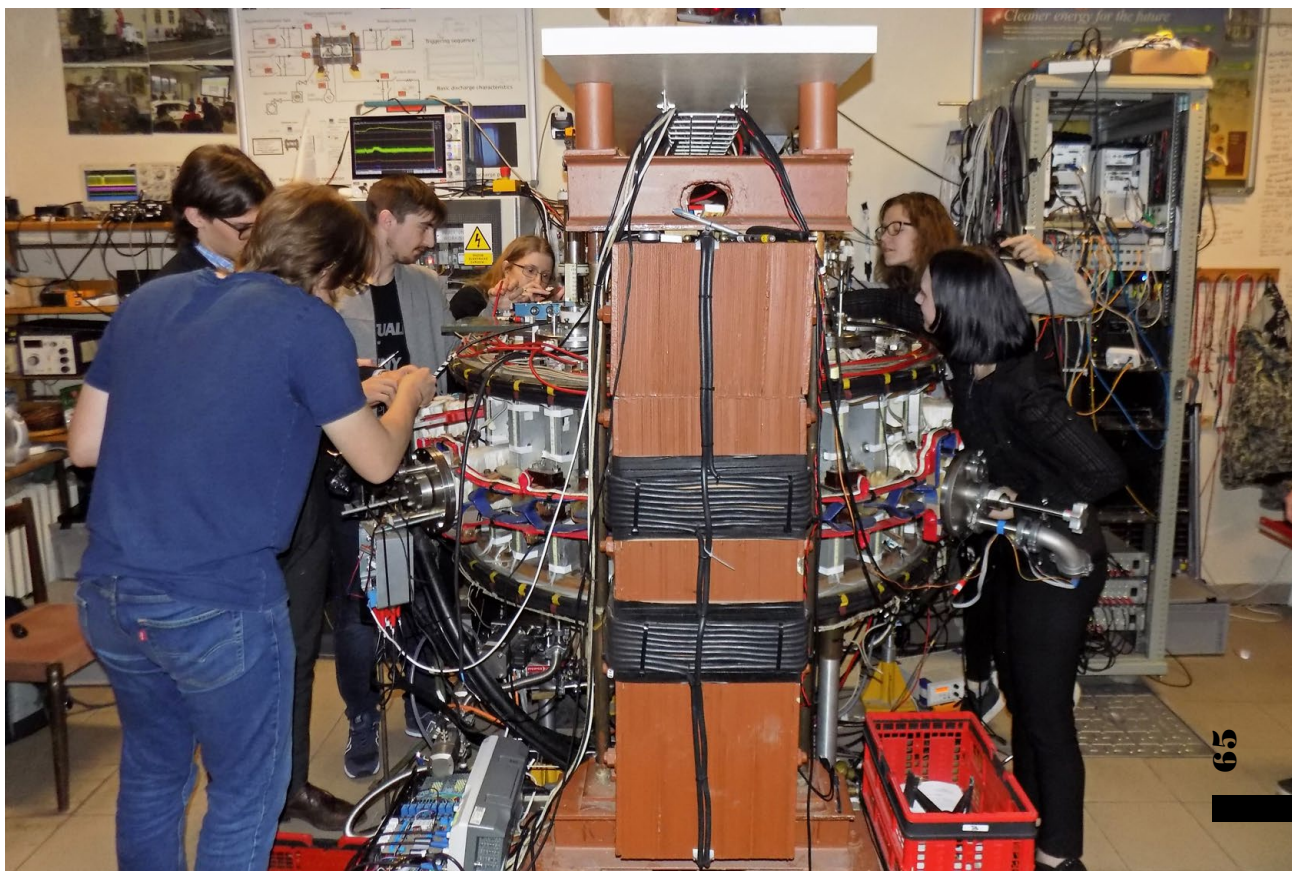
VZDĚLÁVACÍ MISE

Tokamak Golem tedy funguje ve dvou vzdělávacích režimech: kontaktním – „hands-on“ (experimenty přímo na tokamaku) a distančním – remote (experimenty vzdáleným řízením). Během hands-on experimentů studenti provádí v rámci svých bakalářských či diplo-

a diagnostikou, což znamená v důsledku snadný a robustní provoz, nezbytný pro vzdělávací zařízení. Minimalistickým cílem tohoto zařízení je generace toroidálního elektrického pole E_t k urychlování částic, a tedy vlečení proudu plazmatem $I_p < 10$ kA za účelem jeho ohřevu a toroidálního magnetického pole $B_t < 0,5$ T za účelem jeho udržení v typické prstencové konfiguraci. K tomuto se na tokamaku GOLEM před výbojem po jistou dobu nabíjí dvě kondenzátorové baterie a současně se plní komora pracovním plynem – hlavně vodíkem. Takto uložená energie v první baterii kondenzátorů se impulzně během několika desítek milisekund realizuje proudem v 28 cívkách toroidálního magnetického pole B_t a téměř současně energie z druhé kondenzátorové baterie taktéž proudem do cívek primáru transformátorového jádra generujícího toroidální elektrické pole E_t . Takto se vytvoří potřebná, pro tokamak charakteristická konfigurace elektromagnetického pole, jejímž působením se může v pracovním plynu za-



Obr. 3: Sněhová kreace studentů Zaměření fyzika a technika termojaderné fúze na specializovaném zimním workshopu



Obr. 4: Studenti základního kurzu fyziky na Jaderné fakultě osazují tokamak jednoduchými základními diagnostikami, umožňujícími v závěru změřit elektronovou teplotu plazmatického výboje

mových prací, ale i středoškolských SOček, přímo na tokamaku vlastní experimenty anebo různá technologická vylepšení. V distančním módu je možné řídit a nastavovat technologické parametry výboje na tokamaku Golem přes internetové rozhraní z jakéhokoliv počítače, tabletu nebo chytrého telefonu odkudkoli na světě. Tato vlastnost se nám velmi hodila v dobách pandemického lockdownu, kdy jsme byli studenty schopni důstojně učit experimentálními technikám i na dálku. Tento režim vzdáleného řízení nabízíme i ostatním univerzitám jako ten druhý (remote či vzdálený) přístup. Toho už využila celá řada škol z České republiky, ale i různé univerzity, workshopy, letní či zimní školy fyziky a technologie tokamakového plazmatu z Německa, Francie, Maďarska, Bulharska, Holandska, Dánska, Polska, Itálie, Thajska, Pákistánu, Indie, Austrálie a z řady dalších

zemí světa. Dá se říci, že přes 3 000 výbojů na tokamaku Golem bylo nakonfigurováno zpoza hranic České republiky.

Nejčastějším cílem tréninkových kurzů, ať už v kontaktním anebo distančním módu, je základní seznámení s fyzikálně-technologickou problematikou generace vysokoteplotního plazmatu v nádobách s magnetickým udržením – tokamacích – a změření základních fyzikálních parametrů popisujících plazma: proud plazmatem I_p , elektronovou teplotu T_e , dobu udržení elektronové energie τ_e a parametry, při nichž dochází k průrazu neutrálního plynu do plazmatu. Úloha také slouží k nácviku dálkového řízení komplexního experimentálního zařízení, správnému časovému rozvržení experimentu a výtěžení užitečné informace z velkých objemů experimentálních dat.



Obr. 5: Studenti exotického tréninkového kurzu 4th ASEAN School on Plasma and Nuclear Fusion, Chiang Mai University, Thailand pod odborným vedením francouzských profesionálů termojaderného výzkumu řídí vzdáleně (~ 8 500 km) tokamak Golem

Kromě této základní úlohy se studenti mohou věnovat komplexnějším tématům, jako jsou a) porovnání režimů výbojů tokamaku v různých pracovních plynech, b) úprava první stěny, vypékání komory a doutnavý výboj ovlivňující následně režim plazmatických výbojů, c) diagnostika ubíhající elektronů v různých režimech výboje pomocí tvrdého rentgenového záření, d) pozorování magnetohydrodynamické aktivity plazmatu pomocí magnetických diagnostik, e) měření radiálního profilu plovoucího potenciálu a hustoty plazmatu, f) určení radiálního elektrického pole a poloidální rychlosti plazmatu, role vnějších magnetických polí na režim plazmatu, f) spektroskopické studie a další.

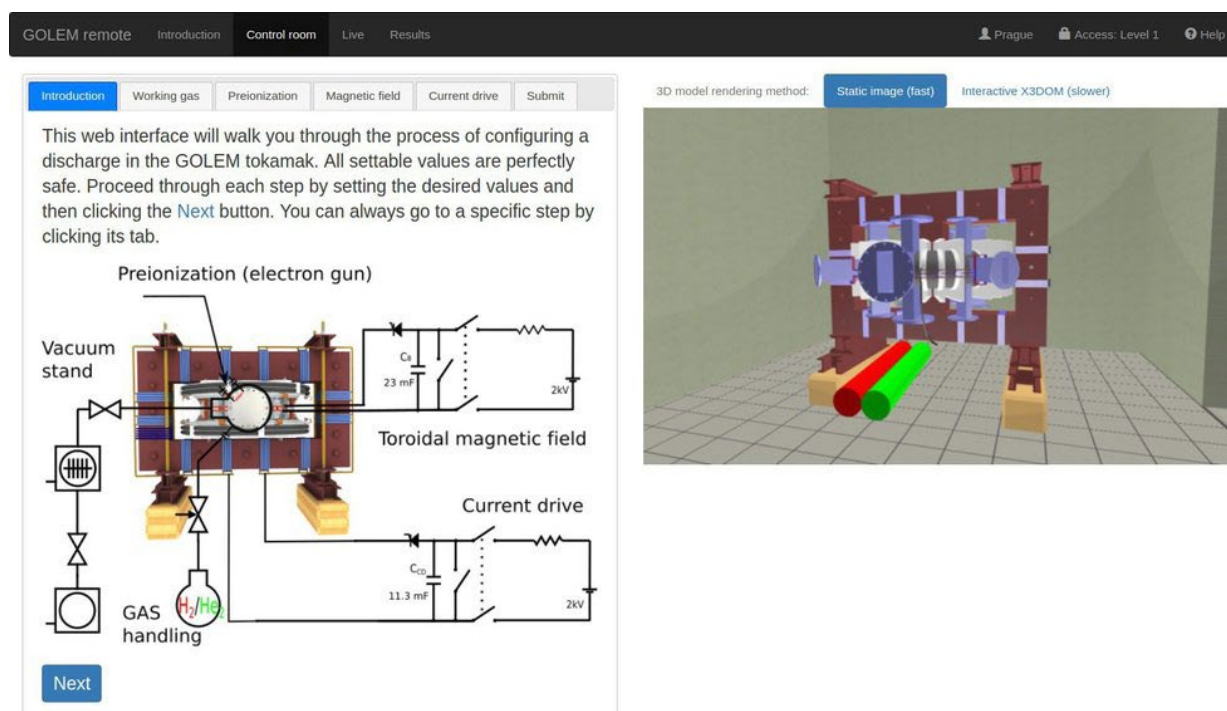
PROČ JMÉNO GOLEM?

Pro český národ je notoricky oblíbený film Císařův pekař a pekařův císař. Tam je Golem jako postava, do které byla vtělena jeho tvůrcem rabi Löwem mocná vesmírná energie na obranu židovské komunity v Praze. Co jiného může být vesmírná energie než fúze, princip, na kterém běží hvězdy produkující základní

životní energii pro všechny biologické systémy na naší planetě a velmi pravděpodobně i na všech dalších „živých“ exoplanetách ve vesmíru mimo naši sluneční soustavu. V té pohádce byli známí rádci, kteří chtěli Golemovu energii zneužít pro mocenské účely. Technologii využití fúze v pozemských podmínkách pro vojenské účely už dobře známe – je jí vodíková bomba. Ale aby se pomocí fúze mohl péct chléb jako v té filmové pohádce, to ještě neumíme. A toto zařízení slouží k tomu, abychom zkoumali, jak bude možné v pozemských podmínkách využít fúzi k výrobě energie, která nám pomůže mimo jiné upéct ten chleba (a jak trefně říká jeden můj kolega: „a uvařit pivo“ :-)).

ZÁVĚREM

Tokamak GOLEM si klade za cíl poskytnout studentům příležitost tím, že nabídne k obecnému použití sice staré, ale jednoduché skutečné tokamakové zařízení dostupné pro online experimentování přes internet. Jeho jednoduchost a stáří oproti moderním tokamakovým zařízením s komplikovanější-



Obr. 6: Ukázka webovského rozhraní, přes které se tokamak GOLEM vzdáleně ovládá

mi tvary komor je vlastně výhodou pro vzdělávací účely, protože studenti mohou přímo aplikovat základní teorii, která se nachází ve většině učebnic. Všechny hlavní komponenty a diagnostika zařízení je také přímo viditelná a ovladatelná a data a výsledky jsou snadno dostupné ve formě shot homepage. Od roku 2009 tedy slouží tento v podstatě nejstarší funkční tokamak na světě studentům jako výukové a experimentální zařízení v oblasti termojaderné fúze.

"First of all, we would like to express our gratitude for this remarkable opportunity. To perform a remote measurement on a tokamak, and to be part of such an international operation for the first time in our life, is way beyond our earlier expectations as physics students. We wish you luck for the future, and lots of plasma :)"

Andras Karman, Gergely Klujber,
Mate Ferenczy and Peter Nemetvarga
(studenti Budapest University
of Technology and Economics)

Ing. Vojtěch Svoboda, CSc.

vojtech.svoboda@fjfi.cvut.cz



Vystudoval Fakultu jadernou a fyzikálně inženýrskou ČVUT v Praze, v roce 2001 získal titul kandidáta fyzikálně-matematických věd na Ústavu fyziky plazmatu AV ČR za práci v oblasti numerického modelování difúze částic v okrajovém plazmatu. V letech 2006–2009 se zásadně podílel na reinstalaci tokamaku GOLEM jako evropského vzdělávacího centra experimentální výuky v oblasti termojaderné fúze na půdě FJFI ČVUT v Praze. Věří, že v něm bude mít lepší plazmatický režim, pokud mu bude hrát na housle :-)

Reference:

- [1] Jana Žďárská. Rozprava s Golemem, poslem energie budoucnosti. Československý časopis pro fyziku (5/2017)
- [2] Vojtěch Svoboda, Jan Mlynář, Jan Stöckel, Igor Jex. Vzdělávání v oblasti termojaderné fúze v ČR (4/2009)