

Rozprava s GOLEMEM, poslem energie budoucnosti...

Jana Žďárská¹, Vojtěch Svoboda²

¹ Kosmologická sekce České astronomické společnosti, K Panskému poli 274 251 01 Světice

² Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT v Praze, Břehová 7, 115 19 Praha 1

Budova mezi Rudolfínem a Právnickou fakultou UK má své vlastní, osobité kouzlo. Zajímavě se zde setkává duch pravé mozkové hemisféry (Pražská konzervatoř) a levé mozkové hemisféry Fakulty jaderné a fyzikálně inženýrské (FJFI). Přicházím blíž a nadmíru se těším. Impozantním vchodem kráčí na místo, kde je instalován tokamak GOLEM – unikátní přístroj, jenž je schopen na jistou dobu napodobit podmínky pro řízenou termojadernou fúzi, tedy slučování jader lehkých prvků za uvolnění značného množství energie. Jmenovaný GOLEM v minulosti pracoval na Akademii věd, později však byl nahrazen modernějším prototypem a díky nesmírnému úsilí Ing. Vojtěcha Svobody, CSc., převezen na nové místo svého působení – právě sem, na FJFI. Inženýr Svoboda tokamak doslova postavil na nohy a od té doby GOLEM úspěšně slouží zdejšímu studentům k provádění četných experimentů. A jak inženýr Svoboda hrdě říká: „*Recept na energii budoucnosti už máme, teď ještě potřebujeme zhotovit nádobí a vychovat si dobré kuchaře...*“

Když jsem se chystala na toto zvláštní setkání, vytanul mi v paměti neobvyklý rozhovor, který jsem kdysi četla v časopise *Astropis*. Jeho autorem byl RNDr. Michael Prouza, Ph.D., který jej pojmenoval jako „*Rozhovor se skutečnou hvězdou*“. Jmenovanou hvězdou pak nebyl nikdo jiný než Mizar A ze souhvězdí UMa. Tímto inspirována, dovolila jsem si oslovit úctyhodného GOLEMa osobně.

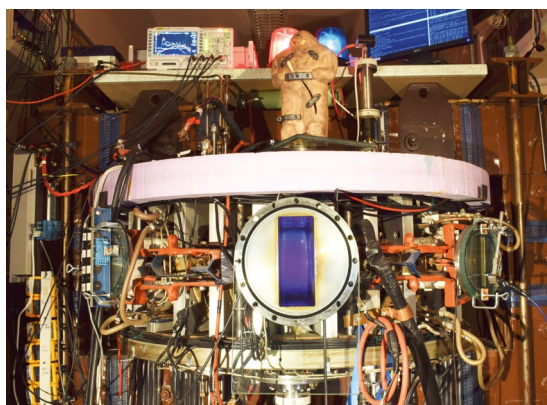
■ **Jana Žďárská:** *Otázka zajištění energetické soběstačnosti nabývá den ze dne větší důležitosti. Elektřinu jako velmi čistou formu energie lze dobře využívat ve měs-*



„Plazma spoutá a v toroidální komofo bezpečně uvězní magnetické pole šroubovicového charakteru.“

tech, kde bude zřejmě bydlet stále více a více lidí. V současné době přibližně 85 % vyrobené energie pochází z fosilních paliv. Přitom se předpokládá, že v roce 2035 bude třeba vyrábět až o 40 % elektřiny více než dnes, protože budeme potřebovat obrovský výkon pro průmysl a dopravu. Poptávka po elektřině neustále roste, v garážích designérů získávají své obrysy elektromobily, které budou vyžadovat také svůj díl. Jsme si vědomi toho, že v tomto století je třeba najít nějaké alternativní řešení, které by dokázalo fosilní paliva nahradit. A termojaderná fúze je způsob, jak takovou elektřinu vyrábět čistě. A právě proto jsem navštívila tokamak GOLEM, který pomáhá budoucím mladým vědcům pochopit základní principy fúzní technologie v konkrétních situacích. Milý GOLEME, mohl byste se nám prosím představit?

GOLEM: S potěšením! Podle Wikipedie jsem nejstarší funkční tokamak na světě a světlo světa jsem spatřil již v padesátých letech v Moskvě v Kurčatovském výzkumném ústavu. Mými duchovními otci byli Igor Jevgeněvič Tamm a Andrej Sacharov, kteří se inspirovali ideou ruského vojáka Olega Lavrentěva. Tenkrát jsem se ale jmenoval TM-1 (токамак малый). Možná budete mít pocit, že už mám svá nejlepší léta za sebou, ale díky modernizaci, kterou zcela profesionálně provedl inženýr Svoboda se svým kolegou Ing. Vondráškem a studenty FJFI, mohu i nadále vědět velmi dobře sloužit. Mimochodem, víte, co vlastně znamená název tokamak?



„Nejvíce žiju, když to ve mně vře statisíci stupni Celsia.“

■ **JŽ:** Vidím, že se nám role rychle vyměnily – najednou už se neptám já, ale vy. Díky inženýrovi Svobodovi se vám ale mohu pokusit odpovědět. Název tokamak je zkratkou ruského označení: „тороидальная камера с магнитными катушками“, což v překladu znamená toroidální komora s magnetickými cívkami. A mohu se vás, GOLEME, otázat, jak jste se vlastně na FJFI dostal?

GOLEM: K vám do Československa jsem z bývalého Sovětského svazu přicestoval v roce 1977 a následujících třicet let jsem pod jménem CASTOR fungoval jako špičkové badatelské zařízení v Ústavu fyziky plazmatu na Akademii věd. V roce 2007 však Akademie věd získala z Velké Británie větší tokamak COMPASS (COMPact ASSEMBLY) a díky tomu jsem dostal možnost pracovat na jiné úrovni – mezi mladými studenty. Tato skutečnost mě velice potěšila, a to nejen proto, že jsem se díky tomu mohl setkat s mým znamenitým současným spolupracovníkem a partnerem – inženýrem Vojtěchem Svobodou. Někdy jsou události skutečně patřičně načasované. Přibližně v té době, kdy jsem putoval na FJFI, rozjížděl se zde nový studijní obor „termojaderná fúze“. A tak jsem mohl po krátkém zapracování začít úspěšně sloužit studentům při jejich působivých experimentech. Studentům, z nichž postupně vychováváme vynikající odborníky v oblasti jaderné energetiky. A já jsem velice poctěn možností být aktivně při tom.

■ **JŽ:** Když jsem se rozhlížela tady po stěnách laboratoře, všimla jsem si fotografií, které dokumentují váš převoz z Akademie věd na nové místo právě sem do laboratoře v Břehové. Mohl byste nám prosím přiblížit, jak takový náročný transport probíhal a kdy se podařilo váš zcela zprovoznit?

GOLEM: Samotné stěhování nebylo až tak složité, i když musím připustit, že jsem přeci jen trochu rozměrnější. Problém však nastal s elektroinstalací. Nejen proto, že nebylo možno využít výrobní dokumentaci,



„Termojaderná fúze je způsob, jak elektřinu vyrábět čistě a bezpečně.“

ale před samotným transportem bylo třeba veškerou kabeláž k mé energetické infrastruktuře odpojit. Je to nesmírná zásluha (okořeněná patřičnou dávkou potřebného štěstí) inženýra Svobody, který se intuitivně rozhodl opustit starý koncept TM1/CASTOR podpůrné technologie a vytvořil pro mě zcela novou elektroinstalaci tak bezchybně, že po mém usazení v laboratoři FJFI a jejím připojení jsem mohl začít ihned pracovat. Dokonce tak dobře, že už čtvrtý pokus o výboj byl úspěšný a dopadl na výbornou.

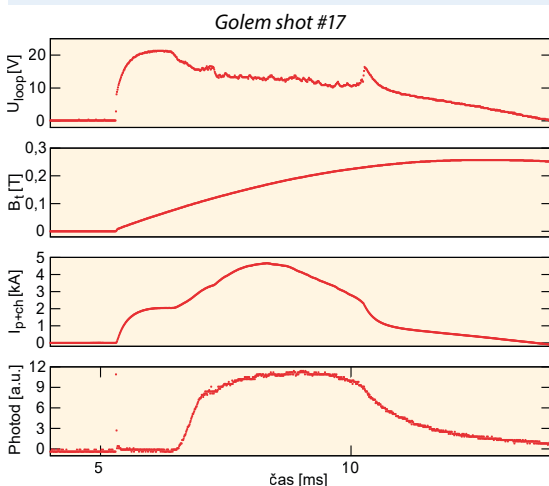
■ **JŽ:** Jak jste se již zmínil, vaše původní jméno bylo TM-1 a na Akademii věd jste pracoval pod jménem CASTOR. Mohu se otázat, jak jste vlastně přišel ke svému novému pojmenování „GOLEM“?

GOLEM: Toto vám vzhledem k inspirující historii velmi rád prozradím, protože právě tímto jménem jsem byl velice poctěn. Je v tom samozřejmě, jak asi tušíte, určitá symbolika. FJFI se nachází v budově v Břehové ulici na Starém Městě. Odtud je půvabný výhled na Starý židovský hřbitov, kde je podle pověsti pohřben rabín Jehuda Löw ben Becalel. Ten prý údajně kdysi roku 1580 vytvořil pro obranu a ochranu svého lidu nevidaného bojovníka Golema se skutečně nadlidskou silou, která pocházela z koncentrované vesmírné energie. Vraťme se nyní tedy na chvíli v čase a vzpomeňme na líbeznou českou pohádku Císařův pekař a Pekařův císař, v níž byl jmenovaný Golem skutečně nalezen. V tu chvíli bylo třeba stanovit, jak s ním a především jeho výjimečnou mocí naložit. V této pověsti figurovali mnozí zlí rádcové, kteří chtěli Golemovu obrovskou sílu zneužít pro své mocenské choutky. Rozum však nakonec přeci jen zvítězil. To když byla Golemova nevidaná síla využita pro dobro ostatních – v tomto případě pro pečení chleba.

■ **JŽ:** Ano, ten příběh je povšečně známý a stejně tak jako v této pověsti byla i první jaderná fúze (a zde se dá opravdu říci, že jde o základní energii vesmíru) iniciovaná člověkem zneužita pro mocenské účely. Stalo se tak v roce 1952, kdy explodovala první vodíková bomba Ivy Mike. Předvedla celému světu sílu jaderné fúze, která měla mít již brzy i své mírové využití.

GOLEM: Ano, této skutečnosti jsem si vědom nejen já, ale naštěstí i vědci celého světa. My bychom mnohem

Časové průběhy signálů zřetelně ukazují, že došlo k průrazu neutrálního plynu a k zformování plazmatu.



O tom svědčí:

1. Rychlý pokles napětí na závit v čase $t = 6-7$ ms a jeho malé fluktuace, které lze vidět až do času $t = 10,5$ ms
2. Nárůst proudu I_{p+ch} v tomtož čase
3. Nárůst signálu z fotodiody

Gratuluji k prvnímu plazmatu o délce cca 3 ms!

První plazma v tokamaku GOLEM na novém působišti na FJFI v Břehové (komentář dr. Stöckela – operátora předchozí verze tokamaku – CASTOR)...

raději pomocí termojaderné fúze nahradili fosilní či tradiční štěpná jaderná paliva v tepelných elektrárnách a takto vlastně „pekli lidem chleba“, tak jako v té milé pohádce. Jenomže to bohužel zatím ještě úplně nedokážeme, protože k jejímu zapálení a dlouhodobému udržení potřebujeme v pozemských podmínkách trvale napodobit stav, který panuje v centru hvězd, tedy minimálně teploty řádově desítek milionů stupňů Celsia. Současné největší tokamaky této teploty dosáhnout mohou, ale pouze na krátký čas. Já osobně jsem schopen v tuto chvíli vyvinout teplotu cca 400 tisíc stupňů Celsia a to také jen na krátký čas v řádu desítek milisekund. Snad je to tím, že nám chybí ten pověstný „šém“. S ním pak snad už dokážeme tuto teplotu v reaktoru udržet po dlouhá desetiletí tak, jak požadují parametry pro stavbu fúzních elektráren.

■ JŽ: Ano, máte pravdu, ten bájný šém, který ve jmenované pohádce snadno dokázal oživit kolosálního Golema. V této souvislosti jsem se však dočetla, že studenti FJFI považují za takový obdivuhodný šém právě inženýra Svobodu?

GOLEM: Ano, říká se to... Ale před inženýrem Svobodou to raději zmiňovat nebudeme, je totiž velice skromný. On naopak tvrdí, že šémem pro něj jsou a budou naši vynikající studenti – budoucí hvězdy jaderné energetiky a odborníci v oblasti fyziky a technologií termojaderné fúze. Velice šikovní jsou všichni, ale občas se mezi nimi najdou i tací, nad kterými se nám téměř tají dech.

■ JŽ: To zní báječně. Na webových stránkách jsem si všimla, že inženýr Svoboda se mladičkým talentům věnuje opravdu s velikým nasazením. A jejich dychtivé pohledy, když sledují jeho výklad a pokusy, slibují fakultě do budoucna jistě příval dalších talentovaných studentů. Mohl byste prosím našim čtenářům přiblížit některé z nich?



Poslední chvíle tokamaku CASTOR...



... a první chvíle tokamaku GOLEM.



Ovoce spolupráce Ing. Svobody s Dr. Stöckelem v podobě budoucích jaderných inženýrů. V tomto případě studentů z Technické univerzity v Eindhovenu, kteří operují tokamak GOLEM 646 km daleko vzdušnou čarou.

GOLEM: To skutečně velmi rád. Za všechny si dovoluji jmenovat vynikajícího studenta Ondřeje Grovera, který ve mně zanechal velmi znatelnou stopu – naprogramoval totiž řídicí sekvence podpůrných technologií potřebné pro vytvoření vysokoteplotního plazmatu v mých útrobach. Naši fakultu začal navštěvovat již jako středoškolák ze svého vlastního zájmu. Byl a je velice chytrý, bystrý, samostatný a motivovaný, dokázal v rámci svých možností obětavě pomoci a nyní se z něj rodí výborný vědec. Vědec, který v sobě výjimečně dobře kloubí všechny hlavní dovednosti badatele – teoretika, experimentátora a počítačového odborníka na vysoké úrovni. Nyní završil dlouholetá studia a nastupuje svoji vědeckou kariéru. A i když vím, že vědecký výzkum neuznává hranice a je společný pro všechny vědce na všech místech světa, přesto bych byl nadmíru rád, kdyby bádala a pracovala tady v Česku.

■ JŽ: Víme, že ke spuštění prvního skutečného prototypu fúzní elektrárny máme ještě drahý kus cesty. A i když asi většina našich čtenářů nepochybně jistotu představu o průběhu termojaderné fúze má, přesto bych si vás dovoluila požádat o popis reakce, kdy se snažíte přimět jádra izotopů vodíku, aby se spojovala dohromady. Imitujete tak vlastně proces, běžný zatím pouze v centrech hvězd, kde je tento děj zajištěn obrovským gravitačním tlakem. S tím však tady na Zemi počítat nemůžeme. Mohl byste nám prosím přiblížit vaše technické uspořádání a způsob, jakým k výboji dochází?

GOLEM: Rád vám tento proces představím. Mým srdcem je vakuová komora v toroidální geometrii připomínající velký prstenec. V ní se snažíme dosáhnout plazmatického stavu hmoty s extrémními teplotami v hustotách plynné fáze. Plánujeme, že teplota plazmatu bude velmi vysoká a těmto podmínkám neodolá žádný dosud známý materiál, ze kterého bychom mohli komoru či reaktor postavit. Proto plazma spoutá a v toroidální komoře bezpečně uvězní magnetické pole šroubovicového charakteru, které spolehlivě a stabilně zatlačí nabitě částice do osy komory tak, aby se pokud možno co nejméně dotýkaly vnitřního povrchu komory. Toto komplikované magnetické pole je tvořeno jednak proudem v cívkách navlečených na toroidální komoru (iniciováným v mém případě vybitím předem nabitě kondenzátorové baterie 80 mF na cca tisíc voltů) a jednak samotným proudem v plazmatu.

Tento proud se generuje induktivně pomocí elektromagnetické indukce podobně jako v transformátoru. Velice důležité je udržení velmi vysokého vakua v nádobě tokamaku, to dosahuje v mém případě hodnoty jen desetitisíciny pascalu. Vznik a udržení plazmatu se u mne zajišťuje výbojem v plynném vodíku, který se do mé vakuové komory vstříkne předem, podobně jako je tomu ve výbojových trubicích u doutnavého výboje, s pomocí elektrického pole. K tomu je potřeba, byť jen na kratičký okamžik (v řádu jednotek až desítek milisekund) dosáhnout jeho velmi vysokého výkonu. K potřebnému zkoncentrování energie je využívána opět kondenzátorová baterie, přičemž použité kondenzátory mají celkovou kapacitu 13 mF a jsou nabíjeny na napětí v řádu stovek voltů. Díky ní tak lze dosáhnout na krátký okamžik velmi vysokých proudů plazmatu v řádu kiloampér. Rád bych podotkl, že tento koncept je typický pro mne, ale v dnešní moderní době dosáhly technologie zajišťující provoz tokamaků určitých změn. V zásadě je to však podobné.

■ *JŽ: Jak už bylo řečeno, v nitrech hvězd dochází k termonukleární fúzi za podpory obrovského gravitačního tlaku. Vědci se jej v pozemských podmínkách pokusili nahradit tlakem elektromagnetických sil v kombinaci s různými „pozemskými“ způsoby ohřevu hmoty. Umožní v budoucnu tento způsob zahřát a dlouhodobě udržet plazma na požadované teplotě, kdy může docházet ke slučování jednotlivých jader izotopů vodíku?*

GOLEM: Na začátku je určité množství vysoko-teplotního plazmatu (tedy čtvrtého skupenství látky) tvořeného elektrony a lehkými jádry atomů izotopu vodíku: deuteria a tritia. Tyto částice se za vysoké teploty srážejí, pomocí jaderných sil se slučují dohromady a promíchávají si své základní stavební částice – protony a neutrony. Vzniká tak nové jádro hélia a neutron. A protože při tomto procesu dojde k přeskupení vazebné energie interagujících částic a pro výsledné produkty bude tato energie na jeden nukleon větší, tak v tomto důsledku budou tyto částice o mikropoznáni lehčí, než tomu bylo u vstupních elementů reakce. A jak říká základní fyzikální princip, tedy vztah mezi hmotou a energií $E = mc^2$, během fúzního procesu tedy dojde k malé ztrátě klidové hmotnosti a k relativně velkému uvolnění energie.

■ *JŽ: Hovoříte o deuteriu a tritiu. Mohl byste nám objasnit, jakým způsobem lze tyto izotopy vodíku získat a čím se od sebe liší?*

GOLEM: Deuterium je stabilní izotop, který nepodléhá radioaktivní přeměně. V přírodě se běžně



Naši studenti zvládají i „studenou“ termojadernou fúzi.



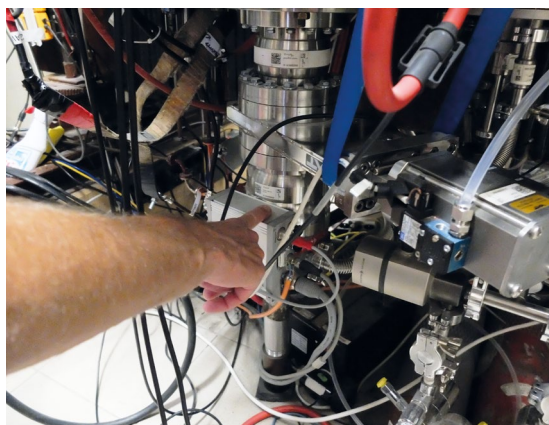
Osadit tokamak vlastními silami základní diagnostikou a vypreparovat z výsledků odhad proudu plazmatem, elektronovou teplotu a dobu udržení plazmatu je pro „jaderňáka“ skutečným vědeckým dobrodružstvím.

vyskytuje namísto lehkého vodíku. Deuterium se svým jedním protonem a neutronem se od běžného vodíku liší především svou atomovou hmotností. V průměru připadá na jeden atom deuteria zhruba 6 tisíc atomů normálního vodíku. Například ve spojení s kyslíkem tvoří deuterium těžkou vodu D_2O . Tritium je pak další izotop vodíku a se svým jedním protonem a dvěma neutrony v jádře se v přírodě díky krátkému poločasu rozpadu 12,3 roku vyskytuje v minimálním množství. Získání deuteria není příliš složité, vyskytuje se běžně v přírodě a stačí je jen oddělit. Získat tritium je poněkud náročnější, není to klasická přírodní surovina, k jeho vytvoření dochází jadernými reakcemi mezi atomy. Tritium bylo poprvé připraveno v roce 1934 bombardováním sloučenin deuteria deuterony. Vědci zjistili, že tritium je pro potřeby fúze možno efektivně vyrábět tak, že rychlé neutrony nechají srážet s lithiem za vzniku tritia a hélia. Předpokládá se tedy, že bychom tritium vyráběli přímo v budoucí fúzní elektrárně v tzv. blanketu za pomoci neutronů, které se budou uvolňovat přímo z fúzní reakce (produkty jsou He s energií 3,5 MeV a neutron s vysokou energií 14 MeV).

■ *JŽ: Děkuji vám za podrobné informace, deuterium a tritium už bychom tedy měli, ale kolik ho vlastně budeme potřebovat? Inženýr Svoboda zmiňoval, že k tomu, abychom mohli např. Prahu zásobovat elektrinou, potřebujeme v hypotetickém případě klasické tepelné elektrárny na uhlí zhruba jeden vlak uhlí denně. Proto bych se ráda zeptala, budeme-li tedy schopni v budoucnu vyrábět elektrickou energii „z vody“ a lithia, kolik takového paliva by dokázalo zabezpečit běžného člověka elektrickou energií na jeho celý život?*

GOLEM: Zde vám mohu odpovědět zhruba tímto příkladem: je dokázáno, že v jedné klasické lithiové baterii, kterou známe z našich mobilů či notebooků, a ve 100 litrech vody je společně dostatek energie na to, abychom mohli pokrýt spotřebu jednoho člověka po celý jeho život se vším všudy. Jde o celkovou globální spotřebu západně vyladěné společnosti na hlavu.

■ *JŽ: Mohu se ještě otázat, jakým způsobem bude docházet ve fúzní elektrárně k přeměně jaderné energie na elektrickou? Probíhá tento proces také pomocí parní turbíny jako v klasické tepelné či jaderné elektrárně?*



Ing. Svoboda s Ing. Vondráškem vytvořili pro GOLEMA zcela novou elektroinstalaci.

GOLEM: Ano, princip je obdobný – produkty fúze předají svou tepelnou energii vodnímu okruhu a takto pomocí ohřevu vody bude docházet k vytváření páry určené pro pohon parní turbíny. Tak dojde k řetězové přeměně původně jaderné energie přes tepelnou, tlakovou a kinetickou (rotující turbíny) na energii elektrickou, abychom si ji pak následně užili ve formách kinetické, tepelné a světelné energie v našem energeticky náročném životě a v konečném důsledku ji vlastně přetavili do tepelné energie prostředí.

■ **JŽ:** Při výrobě elektrické energie je zásadní to, jaký je výsledný parametr Q . Jedná se o účinnost celého systému, tedy jaký je poměr mezi energií vloženou a získanou. Optimální faktor by měl být $Q > 25$. Mohl byste nám prosím sdělit, jakého nejlepšího faktoru bylo zatím při termonukleární fúzi dosaženo?

GOLEM: V současných tokamacích je stále potřeba dodávat do zařízení více energie, nežli se následně vyprodukuje. Tento poměr by se měl zlepšovat s rostoucími rozměry jednotlivých zařízení. S tím však následně také vzrůstají finanční náklady a další technologické problémy. Abychom dosáhli například desetinásobného faktoru, budeme si muset ještě počkat, než se dostaví ITER (dříve *International Thermonuclear Experimental Reactor*, dnes se spíše užívá souhry s latinským překladem termínu *Cesta*). Cílem ITERu je ukázat, že lze nalézt vhodnou bezpečnou technologii, jak produkovat fúzní energii o výkonu 500 MW nepřetržitě po dobu 10 až 20 minut s fúzním ziskem $Q = 10$ a výhledově rozumnou cenou. Zatím bylo dosaženo nejvyššího faktoru $Q = 0,67$. Stalo se tak ve společném evropském fúzním reaktoru JET (*Joint European Torus*). V roce 1991 dosáhl JET jako první na světě uvolnění významného množství fúzní energie a v roce 1997 překročil fúzní výkon reaktoru 16 MW. Tím JET poskytl nezvratný důkaz o vědecké realizovatelnosti získávání energie pomocí jaderné fúze.

■ **JŽ:** Není na světě mnoho států, které se podílejí na vývoji poznání termonukleární syntézy. Česko mezi tyto země patří. Mohl byste nás prosím informovat i o tom, jaké jsou podmínky pro zajištění bezpečnosti takového zařízení?

GOLEM: Jedná se o tzv. inherentně bezpečný proces a bezpochyby jde o nejbezpečnější formu výroby energie z jádra. Není to ten typ případně nekontrolovatelné řetězové reakce a v okamžiku ostrého provozu bude v reaktoru přítomno nanejvýš pár gramů paliva. Ten-

to potenciál tedy může v případě mimořádné situace maximálně stačit na částečné poškození reaktoru, ale určitě se zcela minimálními možnými dopady na životní prostředí. Tritium je samozřejmě radioaktivní materiál, ten se může principiálně uvolnit do prostředí, ale jeho záření dokáže zastavit malá vrstva vzduchu, a tak by určité nebezpečí představoval pouze při požití či vdechnutí.

■ **JŽ:** Hovořili jsme o vyhlídkách termonukleární fúze do budoucnosti, ale pojďme se opět vrátit zpátky k vám. Víte, že býváte představován při různých akcích – např. Nocí vědců, Týdnech vědy a techniky, na exkurzích pro středoškoláky či vůbec pro veřejnost, workshopech, letních či zimních školách plazmatických a tokamakových technologií atp. V rámci těchto akcí bývá demonstrováno i provedení plazmatického výboje, který si účastníci exkurze mohou jednak nakonfigurovat, jednak po jeho provedení dohledat pod jeho číslem na webových stránkách. Kolik takových výbojů už vlastně bylo provedeno?

GOLEM: Počínaje rokem 2009, kdy jsem začal na FJFI pracovat, bylo provedeno cca 20 tisíc úspěšných výbojů. Zajímavé na tomto čísle je to, že při průměrné době výboje cca 12 ms jde o celkovou shrnující dobu výboje maximálně 240 sekund – to je tak délka jedné písničky. A přitom jde o období zhruba 9 let. Podle vakuové knihy jsem byl v provozu skoro 4000 hodin, z toho však pouze oněch 240 sekund opravdového plnohodnotného života s plazmatem v útrokách... Inu, tak se dneska věda dělá. Protože termonukleární fúze leckoho zajímá, exkurzí probíhá opravdu velké množství. Asi nejvíce atraktivní jsem však pro naše studenty. Inženýr Svoboda jim pokaždé rozdá různá měřicí zařízení a ponechá je, aby si mohli vše pěkně nastavit a proměřit. Osadit tokamak vlastními silami základní diagnostikou a vypracovat z výsledků odhad proudu plazmatem, elektronovou teplotu a dobu udržení plazmatu je pak pro „jaderňáka“ ve druhém roku studia skutečným vědeckým dobrodružstvím.

■ **JŽ:** Inženýr Svoboda o vás, milý GOLEME, dokonce tvrdí, že jste sice nejmenší a nejstarší tokamak, ale s největším velínem na světě. Mohl byste nám prosím tento pojem vysvětlit?

GOLEM: Samozřejmě, velmi rád. Jak jsem vám již sdělil, když mě sem na fakultu do Břehové stěhovali, inženýr Svoboda pro mě vybudoval zcela novou infrastrukturu. Díky tomu jsem nyní napojen na nejmodernější informační technologie a připojen k serverům,



„Chceme se stát centrem vzdělávání v oblasti tokamakové fyziky a plazmatu pro věhlasné evropské univerzity.“

což nám ve svém důsledku umožnilo napojit mé řízení i na internet. A díky tomu si na mě může iniciovat a vyzkoušet vývoj prakticky kdokoliv, kdo se s inženýrem Svobodou dohodne, a to odkudkoliv za pomoci počítače, notebooku nebo třeba jen chytrého telefonu napojeného na internet. Takto žádný jiný tokamak rutinně ve světě nefunguje. Nabízíme tuto možnost evropským i světovým univerzitám, které vychovávají novou generaci fyziků a technologů, kteří v budoucnu mohou tuto naši snahu o efektivnější výrobu energie dotáhnout do úspěšného konce. Jedinou nepsanou a nepovinnou podmínkou je, aby nám ti, co si vývoj vyzkouší, poslali z místa, odkud vývoj provedli, pohlednici. A jak asi vidíte, zde na této stěně jich už máme skutečně bezpočet. Dokonce máme napočítáno, že zhruba 1 500 výbojů bylo provedeno přes hranice České republiky.

■ **JŽ:** *Nedávno navštívil Českou republiku i generální ředitel ITERu Dr. Bernard Bigot. Dozvěděla jsem se, že s opravdovým nadšením navštívil právě vás zde v Břehové na FJFI. Čeho si na jeho návštěvě ceníte nejvíce?*

GOLEM: Dr. Bernard Bigot při své návštěvě zde v Břehové doslova řekl: „Golem mi dělá radost.“ Tak právě toto tvrzení považuji za velikou poctu a ocenění mé práce. Dr. Bernard Bigot pozitivně hodnotil i moji modernizaci. Pochvaloval si, jaký jsem fantastický nástroj pro výuku studentů, protože podle jeho názoru mohu pomoci mladým vědcům pochopit základní principy fúzní technologie v konkrétních situacích. S uspokojením také konstatoval, že studenti, kteří se termionukleární fúzi učí právě na mě, budou v době do-



Dlouholetá spolupráce je i díky Vojtovým houslím provázána působivým souzněním.

stavby ITERu v nejproduktivnějším věku a budou moci své takto získané zkušenosti uplatnit právě na ITERu, jehož budování on v tuto dobu řídí. S potěšením ocenil skutečnost, že díky mně vzniklo několik bakalářských a diplomových prací na velmi slušné úrovni.

■ **JŽ:** *A povíte nám, milý GOLEME, zdalipak si Dr. Bernard Bigot také inicioval svůj vlastní experimentální vývoj?*

GOLEM: Dr. Bernard Bigot si díky mě vyzkoušel svůj vlastní experiment. Za asistence inženýra Svobody si nastavil hlavní parametry výboje: předionizaci, intenzitu elektrického pole za účelem přeměny neutrálního pracovního plynu v plazma a jeho následný ohřev a intenzitu magnetického pole za účelem jeho udržení a stabilizace v centru komory. Určil pracovní plyn, se kterým se bude pracovat, a provedl samotný vývoj. V pořadu České televize Hyde Park Civilizace



„Recept na energii budoucnosti už máme, teď ještě potřebujeme zhotovit nádobí a vychovat si dobré kuchaře.“

pak o svém experimentu zasvěceně hovořil s moderátorem Danielem Stachem. Podotkl, že se v příštích dnech setká s generálním ředitelem Mezinárodní agentury pro atomovou energii Dr. Ammanem a doporučí mu, aby se taktéž zaregistroval a mohl si pak provádět svoje výboje. Připadalo mu fantastické mít možnost pomocí svého telefonu kontrolovat provoz takového zařízení, jako je tokamak.

■ **JŽ:** *Děkuji vám za zajímavé vyprávění, milý GOLEME. Mohu se ještě dotázat na zájem vašich studentů v současné době plně nevídaných možností? Zajímá se nastupující generace o nové technologie, potažmo o naši energetickou soběstačnost v budoucnosti?*

GOLEM: Musím bohužel říct, že mi připadá, že ten zájem v poslední době trochu klesá. A týká se to i zájmu o naši fakultu. Je pravda, že se zajímavými a nadanými studenty se setkávám v podstatě pořád. Prostředí vědy pro ně ale v počátcích může být i trochu frustrující, protože příprava pokusů je dlouhá a ty vzrušující momenty naopak velice krátké. Ale jsem třeba pyšný na to, že mě osobně pomáhají držet v provozu právě sami studenti. Což o nějakém zájmu snad svědčí. Třeba uživatelské rozhraní, do kterého se zadávají data, mi pomohl upravit jeden z mých studentů. To je pro mě pozitivní impulz.

■ **JŽ:** *Milý GOLEME, když jste osobně hovořil s generálním ředitelem ITERu Bernardem Bigotem, zdalipak jste se dozvěděl plánovaný termín dostavby ITERu, tedy termín, kdy vlastně započne nová etapa v získávání elektrické energie?*

GOLEM: Tuto informaci jsem skutečně dostal, Dr. Bernard Bigot hovořil o tom, že by spuštění reaktoru ITER (první plazma) chtěli stihnout v prosinci roku 2025. Na výsledky tohoto projektu by měl pak navázat další projekt DEMO, který by měl dodávat energii do elektrické sítě nepřetržitě. A to bychom rádi stihli do roku 2050.

■ **JŽ:** *Jméno inženýra Svobody se prolíná naším rozhovorem jako zlatá nit. On je tak trošku skryt za vašim většinou, což přičítám jeho skromnosti. Přesto bych vás, milý GOLEME, ráda požádala, zda byste nám jej mohl alespoň trochu představit. Je to evidentně člověk na svém místě, s úžasnými znalostmi, o něž se neváhá podělit se svými studenty, kteří na něj nedají dopustit. Jak se vlastně k jaderné fyzice dostal? Bylo to jeho tajné přání, nebo jej z Ostravy do Prahy zavála jen pouhá náhoda?*

GOLEM: Inženýr Svoboda skutečně pochází až z Ostravy. Z jeho vyprávění mě asi nejvíce zaujalo, jak odlišný je to kraj. Ostravsko – to je území těžařů a ocelářů, tvrdých chlapů. Jeho táta byl jedním z nich, zabýval se hutnictvím železa a někdy bral Vojtu s sebou do laboratoře. Měřili tam spektra a teplotu ingotů, což Vojtu tehdy náramně bavilo. Občas vzpomene, jak mu táta věnoval elektrostavebnici Voltík, ze které postavil takovou malou napodobeninu procesního jádra mikroprocesoru. Tento Vojtův zájem o exaktní vědy poté na gymnáziu podpořila mladá sličná profesorka. Byla přímo po škole, plná nadšení a pedagogických ideálů. Občas prý měli společnou cestu, a tak jej nepřímo k přírodním a technickým vědám nasměrovala. A dalším impulzem byla pozvánka na den otevřených dveří na FJFI do Prahy. Právě tehdy nastal bod zlomu, životní výhybka, kdy si jej věda lehce zahákla drápkem a už nepustila. Na pozvánce prý byl i symbol citronu jako asociace náročnosti studia, které člověka dokonale vymačká až na dřev. Při návštěvě odborných pracovišť byl však Vojta natolik ohromen, že *citron necitron*, už dál neváhal. A tak se vydal za studiem až do Prahy. Byl to prý opravdu veliký krok do neznáma. Studentský život, strahovské koleje, první zkoušky. Na stýskání prý ani nezbyl čas, vědecký zápal jej plně pohltil a po státnicích jej vypustil do světa jako zaníceného odborníka.

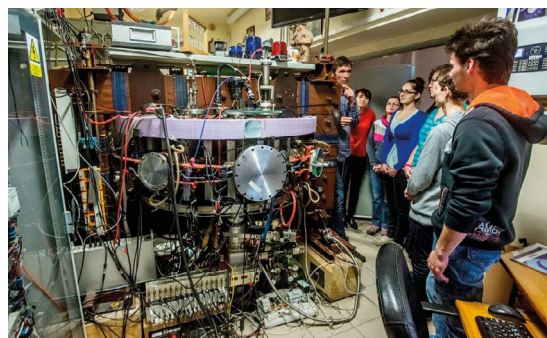
■ *JŽ: Na začátku rozhovoru jste se krátce zmínil o tom, jak jste se s Vojtou vlastně setkali, mohl byste nám tuto skutečnost více přiblížit? Souhrou několika náhod tehdy došlo k velmi zásadnímu profesnímu setkání, které následně významnou měrou ovlivnilo praktické vzdělávání studentů. Na které pomyslné životní křižovatce jste se vlastně potkali?*

GOLEM: Zlomovým bodem se stal dozajista rok 2006, kdy došlo k podpisu smlouvy o stavbě ITERu. Česká republika tehdy obdržela nabídku na získání středně velkého tokamaku COMPASS z Anglie. Přemýšlelo se, co tedy dál se mnou: do šrotu, do muzea, či někam do Indie? Zároveň však rozhodnutí o stavbě ITERu vyvolalo velkou poptávku po vzdělávání budoucích odborníků z oblasti fyziky plazmatu a fúzních technologií. Vojta tehdy říkal: „*Vane vítr, je potřeba naplnout plachty*“ – a společně s dnes doc. Janem Mlynářem založili studijní specializaci *Fyzika a technika termojaderné fúze*. A tak, jak jsem předeslal již na počátku



Ing. Svoboda s doc. Janem Mlynářem založili na Jaderce studijní specializaci „Fyzika a technika termojaderné fúze“.

<http://ccf.fzu.cz>



Vyprávění o tom, jak postavit malé Slunce v pozemských podmínkách je u nás častou záležitostí. Nevýjímaje hluboké večery v rámci *Noci vědců*.

rozhovoru, po mnoha náročných úpravách se ve mně v červenci 2009 opět probudil život tady na FJFI. Na tomto místě se sluší poděkovat, že přesunu a mému působení na novém místě fandilo a dalo svoji podporu jak minulě, tak současně vedení katedry fyziky a Jaderné fakulty samotné. Bez toho by to bylo nemyšlitelné.

■ *JŽ: Milý GOLEME, zajímalo by mě, zdali se také zakládá na pravdě informace o tom, že vám inženýr Svoboda hrává na housle? To on si jen tak odskočí od superhorkého plazmatu k mámvým zvukům houslí?*

GOLEM: Hmmm, tak zkuste jen maličko našpícovat uši – ozvěnou jeho líbezných hry občas lehounce zazní i stěny laboratoře. Vojta ve vztahu ke své houslové hře často a rád parafrázuje Salieriho z Amadea: „*Bůh mi dal touhu, zapomněl trochu na nadání*.“ Víte, hrát na housle je ale nakonec velmi podobné jako počítat neutrony při jaderné fúzi. Je k tomu potřeba naprosté soustředění, cit i talent. A to všechno inženýr Svoboda evidentně má. Tuším, že vám to zní trochu jako z říše pohádek, ale snad i díky jeho neobvyklému koníčku je naše dlouholetá spolupráce provázena působivým souzněním.

■ *JŽ: Děkuji vám za atraktivní informace, milý GOLEME, a závěrem mi dovoluete poslední otázku. Mohl byste nás seznámit s vašimi plány do budoucna?*

GOLEM: S inženýrem Svobodou se chystáme prodloužit vývoj ze současných 25 na ideálních 50 milisekund a dosáhnout tak teploty plazmatu blízko magického milionu stupňů Celsia. Rádi bychom dobudovali moji infrastrukturu tak, aby byla vhodná pro nácvik nápadů a idejí budoucích vědeckých výzkumníků. Moje velikost je totiž vhodná právě pro experimenty v malých měřítkách, které je pak následně možno testovat na velkých vědeckých zařízeních typu COMPASS či ITER. Chceme se stát centrem vzdělávání v oblasti tokamakové fyziky a plazmatu pro věhlasné evropské univerzity. Zároveň cítíme, že pro naplnění našich velkých cílů je potřeba velká podpora u široké světové veřejnosti. Proto se chystáme jednou za čtvrt roku nabídnout mé řízení v nejprostší podobě do bezbřehé internetové sítě tak, aby si svůj vlastní vývoj mohl vyzkoušet každý zájemce kdekoli na světě. Prostě bych tu nerad jen tak nečinně stál, nejvíce žiju, když to ve mně vře statisíci stupni Celsia.

■ *JŽ: Velice vám děkuji za inspirativní rozhovor, bylo mi ctí se s vámi setkat. Děkuji také za předvedení experimentálního výboje a za váš čas, který jste mi věnoval.*

Další informace o diskutovaném zařízení jsou dostupné na WWW: <http://golem.fjfi.cvut.cz/cscasfyz>.