

# Jaderná fúze – energie budoucnosti

Fúze probíhala ve velmi raném vesmíru v jedné z počátečních fází Velkého třesku, kdy vznikaly jen ty nejjednodušší prvky. Zažehnout pomyslné „Slunce na Zemi“ se nyní snaží i člověk. Bez něj – tedy bez jaderné fúze – nelze s konečnou platností vyřešit energetické potřeby civilizace a ani případné cesty k nejbližším hvězdám. Více se dozvíte z rozhovoru s RNDr. Vladimírem Wagnerem, CSc., z Ústavu jaderné fyziky AV ČR v Řeži.

**Již dlouhodobě se zabýváte jadernou energií. Co vás na ní fascinuje?**

„Jaderná energie je hlavně velmi koncentrovaná. Na rozdíl od chemických reakcí se její průběh a uvolnění vazebné energie projeví i na hmotnosti zúčastněných objektů (jader a částic), a to přesně podle speciální teorie relativity. A jak bude podrobněji popsáno dále, jaderné reakce stojí za tvorbou prvků a jsou také nejefektivnějšími zdroji energie v přírodě i u naší civilizace. Jaderná energie je tedy ta, která by mohla zajistit dlouhodobý udržitelný rozvoj naší civilizace a v budoucnu i její expanzi do vesmíru a k dalším hvězdám.“

**Čím jste chtěl být jako malý kluk?**

„Jako kluka mě nejsilněji ovlivnila umělecká díla a události ze dvou oblastí. První byla knížka *Do blízkého a vzdáleného vesmíru*, která popisovala tehdejší znalosti o vesmíru. Velmi silně pak na mě zapůsobil sci-fi film Stanleye Kubricka *2001 – Vesmírná Odysea*, který jsem viděl jako osmiletý. Ve stejné době jsem opravdu silně prožíval i přistání Apolla 11 na Měsíci. Druhou oblastí, která mě v té době fascinovala, byla paleontologie. To bylo hlavně díky filmu *Cesta do pravěku* a knihám profesora Josefa Augusty s obrázky Zdeňka Buriana. Takže jsem v dětství chtěl být astronomem nebo paleontologem. Nakonec to vyhrála ta astronomie a fyzika, i když o paleontologii se zajímám pořád.“

**Kdo vás k zájmu o přírodní vědy nasměroval? Podporovali vás rodiče?**

„Maminka byla učitelkou a tatínek strojní zámečnický a v mých zájmech mě podporovali. Maminka mi v dětství koupila odlitek trilobity, který dodnes mám. A táta mi pomohl podle ‘ábíčka’ udělat malý čočkový dalekohled a později zrcadlové dalekohledy. Takže u babičky v Kelči u Valašského Meziříčí, kde byly lepší světelné podmínky a docela často jsme tam jezdili, jsem pak na zahradě pozoroval planety, hvězdy a další astronomické objekty.“

**Vystudoval jste jadernou fyziku na Matematicko-fyzikální fakultě Univerzity Karlovy. Proč jste si vybral právě tento obor?**

„O této fakultě jsem uvažoval po celou střední školu. Chtěl jsem studovat astronomii, ale tento obor se otevíral jednou za dva roky, a tak jsem se přihlásil na jadernou fyziku, která je s astrofyzikou propojená.“

**Působíte na Ústavu jaderné fyziky AV ČR v Řeži i na Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT. Čím se na těchto pracovištích zabýváte?**

„Tady to mám jasně oddělené. V ústavu dělám vědeckou práci a na fakultě se věnuji práci pedagogické, přednáším a jsem členem různých státnicových komisí. Takové propojení činnosti v ústavu a na škole se mi moc líbí. Mám stále kontakt s mladými lidmi, kteří se stejně nadšeně jako v mládí já seznamují se světem vědy. Zároveň i díky tomu mám stále diplomanty a PhD studenty.“

**Váš názor na jadernou fúzi?**

„Přírodní fúze probíhala ve velmi raném vesmíru v jedné z počátečních fází Velkého třesku, kdy vznikly jen ty nejjednodušší prvky. Těžší prvky vznikaly následně při evoluci hvězd. Jaderná fúze je tak zodpovědná za tvorbu prvků ve vesmíru i za produkci energie v něm. Bez ní bychom nemohli existovat. Zároveň se nyní snažíme o využití jaderné fúze jako zdroje energie. V této oblasti se dosáhlo obrovského pokroku. Jde však o extrémně náročný úkol, podle mě jeden z nejdůležitějších, které před sebou máme. Nelze vyloučit nějaký nečekaný

technologický zvrat, který by cestu k termojaderné elektrárně urychlil. Ovšem s největší pravděpodobností budou komerční termojaderné elektrárny k dispozici až v druhé polovině tohoto století. Cesta k termojaderným raketovým motorům bude ještě náročnější.“

**Při termonukleární fúzi se slučují jádra izotopů vodíku v centrech hvězd díky obrovskému gravitačnímu tlaku. Proč nám to nejde na Zemi?**

„Základní výhodou hvězd je, že mají pro fúzi obrovské objemy, které zajišťují, že i při extrémně malé pravděpodobnosti reakce jich díky velkému objemu nastává dostatečně velké množství. Velký objem zároveň znamená i velkou hmotnost, a tedy i velmi intenzivní gravitační pole a tlak uvnitř takového objektu. Je třeba si uvědomit, že při přeměně čtyř jader vodíku na jádro helia musíme dva protony přeměnit na neutrony. Na elementární úrovni Standardního modelu hmoty a interakcí to znamená přeměnu jednoho kvarku na jiný kvark. A to dokáže pouze slabá interakce, silná a elektromagnetická mají takovou přeměnu zakázanou. V cyklech hvězdných reakcí tato přeměna kvarku slabou interakcí probíhá buď při reakci dvou protonů s jejich přeměnou na deuteron, nebo při rozpadu beta plus.“

**Jak termonukleární fúze probíhá?**

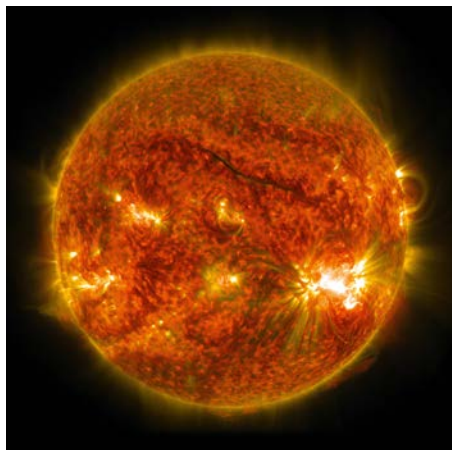
„Teď je třeba oddělit situaci, která probíhá ve hvězdách od té, kterou předpokládáme ve fúzních reaktorech na Zemi. Při produkci helia 4 ve hvězdách musí probíhat celé cykly reakcí, ve kterých se střídají slučovací reakce probíhající silnou jadernou interakcí, kdy jde čistě o ‘slepování’ nukleonů, a již zmíněné reakce probíhající slabou interakcí, ve kterých probíhá přeměna protonu na neutron buď při slučování, nebo beta plus rozpadu. Těžší prvky pak vznikají ve hvězdách zase střídáním reakcí slučování nukleonů silnou jadernou interakcí a beta rozpadu, při kterém se s využitím slabé interakce mění proton na neutron nebo neutron na proton. V termojaderných reaktorech se předpokládá využití pouze slučování



Pozorování u babičky v Kelči prvním zrcadlovým dalekohledem, který jsme s tátou udělali, o průměru 10 cm, druhý pak měl 15 cm.



Jako kluk jsem putoval po českých hvězdárnách. Kterápak je ta na snímku?



*Přírodním termojaderným reaktorem je i Slunce, na snímku pořízeném sondou NASA vidíme jeho aktivitu. (Foto NASA)*

nukleonů toliko silnou jadernou silou. Tyto reakce mají dostatečnou pravděpodobnost, aby se daly využít. Může se tak zužitkovat pouze omezený počet specifických vhodných reakcí a ani v budoucnu v něm nebudou probíhat cykly reakcí, které by z protonů dokázaly vytvořit jádro helia 4. Vhodnými reakcemi pro využití v termojaderných reaktorech jsou ty nejnámější, kterými je slučování deuteria s tritiem za vzniku helia 4 a neutronu nebo deuteria s heliem 3 za vzniku helia 4 a protonu. Případně sloučení dvou jader deuteria. K tomu, aby mohlo dojít k reakci jader prostřednictvím silné jaderné interakce, která má velmi krátký dosah, se musí jádra přiblížit velmi blízko k sobě. To je docela problém, protože jsou obě kladně nabitá a elektricky se odpuzují. Čím mají vyšší rychlost, a tím i kinetickou energii, tím se k sobě dostanou blíže.

To je důvod toho, že jsou potřeba vysoké teploty plazmatu. I tak ovšem nedokáží překonat energetickou bariéru vytvořenou elektrickým odpuzováním a k sobě se dostávají pouze kvantovým jevem tunelování. I to snižuje pravděpodobnosti těchto reakcí.“

**Je termonukleární fúze ve stádiu testování, nebo je vyvíjen už i prototyp fúzní elektrárny?**

„Ano, termojaderná fúze je zatím ve stádiu testování a je třeba říci, že ten současný stupeň se zatím dominantně zaměřuje na studium chování plazmatu v magnetické pasti. Takže většina současných tokamaků, což jsou nejtýpější magnetické pasti využívané pro studium fúze, nevyužívá směs deuteria a tritia, ale vystačí s lehčími izotopy vodíku. I nově budovaný ITER, který by měl být předstupněm možné prototypové termojaderné elektrárny, bude v prvních několika letech pracovat bez tritia a studovat pouze vlastnosti plazmatu a jeho udržení. Teprve po vyladění se začnou testovat i fúzní reakce a plazma, ve kterém dochází k termojaderným reakcím. A ITER, což bude zařízení, které bude mít nejbližší k termojaderné elektrárně, touto nebude. Nebude mít možnost přeměňovat teplo na elektřinu, nebude mít turbínu. Navíc nebude mít ještě jednu velmi důležitou komponentu termojaderné elektrárny využívající slučování deuteria a tritia. To je produkce tritia z lithia ozařováním neutrony produkovanými v termojaderné fúzi. Prototypovou termojadernou elektrárnou by se měl stát až následník tokamaku ITER, který se předběžně označuje jako DEMO.“

**Je největším problémem slučování jader vodíku právě to, že se nám nedaří nahradit gravitační tlak při reakci?**

„Kritické je především to, že v laboratoři mů-

žeme mít na rozdíl od hvězdy jen velmi malý objem plazmatu. A zároveň i tím je způsobeno, že se plazma daří držet jen po omezenou dobu. Například, právě zvětšení velikosti tokamaku a tím i objemu plazmatu je jedním z hlavních důvodů, proč už bude ITER produkovat dostatečný počet fúzních reakcí a energie.“

**Podařilo se gravitační tlak v pozemských podmínkách nějak nahradit? Je pravdou, že se jej vědci pokoušejí nahradit tlakem elektromagnetických sil v kombinaci s různými „pozemskými“ způsoby ohřevu hmoty?**

„Pro udržení plazmatu nejen v tokamaku, ale i v dalších magnetických pastech se využívá vhodně tvarované magnetické pole, které je částečně produkováno i proudy v plazmatu. Jinak je dominantně vytvářeno pomocí elektromagnetů s vysokou magnetickou indukcí. Dnes jde téměř výhradně o supravodivé elektromagnety. Pro ohřev existuje několik možností. V budoucnu bude klíčovým zdrojem termojaderná fúze, dnes je to ohřev pomocí zmíněných proudů v plazmatu, vstřikováním iontů a mikrovlnným zářením.“

**Umožní v budoucnu tento způsob zahřát a dlouhodobě udržet plazma na požadované teplotě, kdy může docházet ke slučování jednotlivých jader izotopů vodíku?**

„Už nyní v případě, že se do současných velkých tokamaků vstříkne k deuteriu tritium, dochází k fúzním reakcím deuteria a tritia. Ovšem pravděpodobnost reakce, a hlavně jejich počet, nestačuje k produkci dostatečného množství energie. Zde je třeba říci, že závislost pravděpodobnosti reakce na teplotě je pro různé fúzní reakce velmi rozdílná. Některé další, oproti té zmíněné, vyžadují vyšší teploty pro dosažení podobných pravděpodobností reakce. Možné je například slučová-



*Termojaderným reaktorem na Zemi bude zařízení ITER, které se buduje ve francouzském městě Cadarache. (Foto ITER)*

ni deuteria a helia 3 nebo slučování deuteria s deuteriem. Při zvládnutí podmínek pro tu druhou bychom nepotřebovali tritium nebo helium 3 a dostali bychom opravdu neomezený zdroj energie s obrovskými zásobami paliva.“

**Kolik je potřeba tohoto „paliva“ (na výrobu 1 kilowatthodiny?) nebo kolik energie bychom z něj získali při porovnání třeba s uhlím?**

„Pro produkci 1 kWh jsou potřeba pouze jednotky až desítky mikrogramů deuteria a tritia. Pokud jde o uhlí, tak u něj jsou potřeba stovky gramů. Pochopitelně, přesná čísla závisí na přesných parametrech používaného uhlí a efektivitě dané elektrárny, ale v každém případě jde o rozdíl v hmotnosti zhruba sedm řádů.“

**Při výrobě elektrické energie je důležitý podíl výkonu produkovaného fúzí a výkonu potřebného pro ohřev plazmatu. Jaký je parametr Q nyní?**

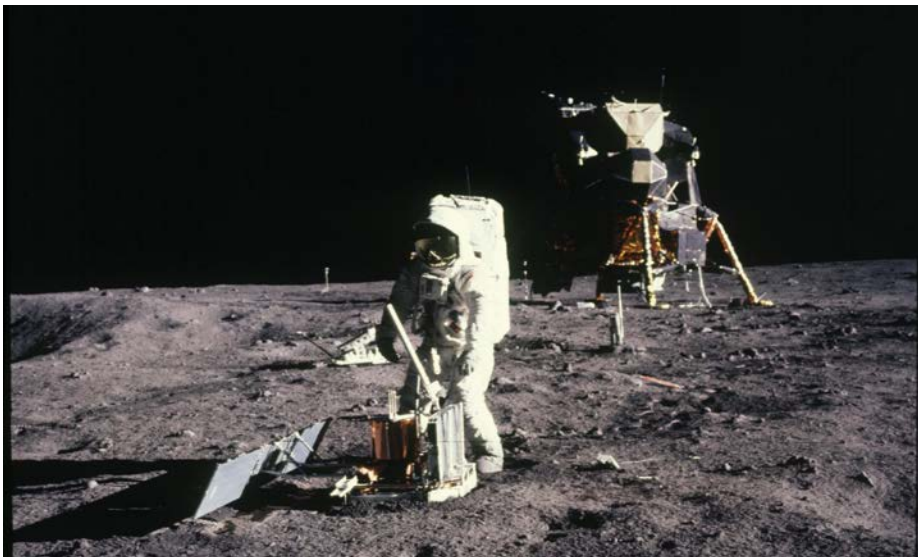
„Pokud bude energie produkovaná při fúzi stejná jako energie realizovaná na ohřev, bude Q rovné jedné. Je však třeba připomenout, že značná energie se spotřebuje na celé zařízení, které zajišťuje fungování tokamaku a celého provozu případné termonukleární elektrárny. Proto musí mít termonukleární elektrárna hodnotu veličiny Q násobně až řádově vyšší než jedna. K nejvyšším dosaženým hodnotám u současných tokamaků patří například hodnota, překračující 0,65, dosažena na evropském tokamaku JET. Tokamak ITER by měl překročit hodnotu deset.“

**Jak na tom v budoucnu bude zajištění bezpečnosti fúzní elektrárny? Jedná se o nebezpečný provoz?**

„V termojaderné elektrárně budou pochopitelně také rizika, pracuje se tam se silnými magnetickými i elektrickými poli a vysokými elektrickými proudy. Při její činnosti se produkují radioaktivní izotopy i velmi vysoké emise záření. Vznikají také velmi vysoké teploty. Takže má svá rizika – ostatně stejně jako jiné průmyslové podniky včetně tepelných elektráren. Dramatický rozdíl oproti štěpným jaderným systémům však spočívá ve velmi omezené možnosti úniku radioaktivity do širšího okolí. To je dáno tím, že v termojaderné elektrárně bude v daném okamžiku jen velmi malé množství paliva a nehromadí se vyhořelé palivo v podobě dlouhodobě radioaktivních prvků. Nelze tedy vyloučit havárii ani dramatické dopady na zařízení v areálu elektrárny, na její okolí to však bude mít zanedbatelný dopad.“

**Na vývoji termonukleární syntézy se podílí i Česko. Proč byla do tohoto programu vybrána právě naše země?**

„Česko se do studia možnosti využití termojaderné fúze zapojilo velmi brzy. Využilo to, že mohlo přivést z tehdejšího Sovětského svazu tokamak. Stalo se tak jedním z prvních států, kde mohli s tímto zařízením fyzikové experimentovat. Zařízení pod názvem CASTOR sloužilo v Ústavu fyziky plazmatu AV ČR až do roku 2006, kdy bylo nahrazeno novým, větším tokamakem COMPASS z Velké Británie. Tokamak CASTOR byl převezen na Fakultu jadernou a fyzikálně inženýrskou



*K astronomii mě přilákalo přistání Apolla 11 na Měsíci. I při něm využívali astronauté jaderné zdroje. Přístroje, které na povrchu Měsíce nechali, napájel radionuklidový zdroj. (foto NASA)*

ČVUT, kde pod novým názvem GOLEM slouží při výuce a experimentech studentům. Tokamak COMPASS má velkou výhodu v tom, že jde o stejný, pouze menší typ tokamaku, jakým bude ITER. Dají se tam proto dělat studie přímo pro ITER. V současné době probíhá jeho kompletní přebudování a vylepšení. Čestí fyzici mají ve fúzní komunitě velmi silnou pozici.“

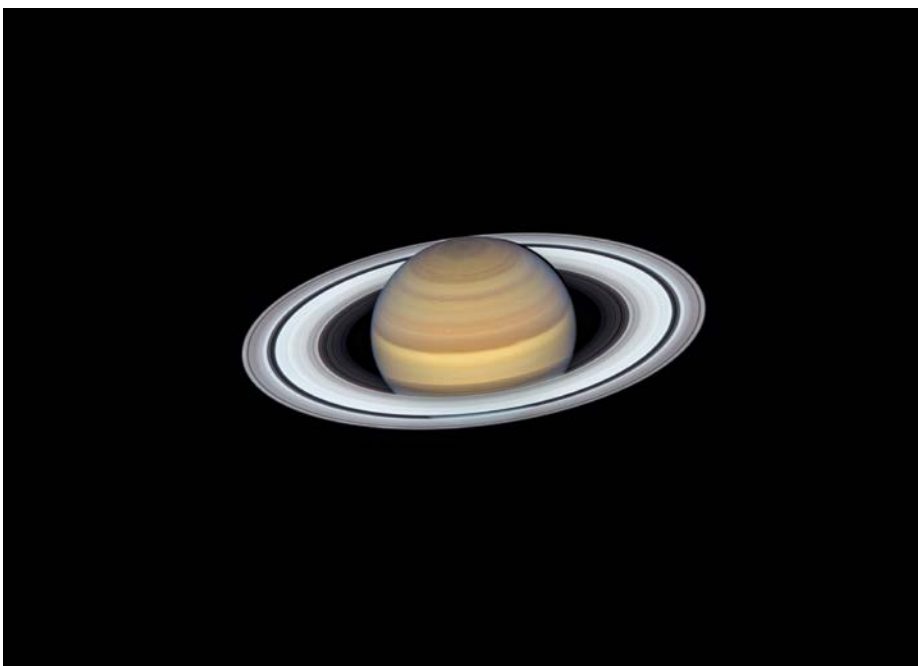
**Kdy by mohla začít výroba elektrické energie prostřednictvím termonukleární fúze?**

„Tokamak ITER by měl být dokončen v letech 2025 až 2026. V té době by se v něm mělo začít studovat plazma. Experimentování s fúzními reakcemi deuteria a tritia by mělo být zahájeno v roce 2035. Teprve po získání potřebných zkušeností by se mělo začít s budováním prototypu reálné fúzní elektrárny, tedy projektu DEMO. Ten by tak mohl být dokončen v po-

lovině století. Teprve na základě zkušeností s ním budou moci jednotliví výrobci začít pracovat na svých modelech komerčních termojaderných reaktorů. Takže ty by pak byly až v druhé polovině tohoto století. Není sice vyloučen dřívější technologický průlom a urychlení, ale nedá se na něj spoléhat.“

**Co bychom potřebovali k urychlení vývoje?**

„Důležité je investovat zdroje do výzkumu v celé řadě oblastí, které s danou problematikou souvisí. Ať už jde o studium vlastností plazmatu za různých podmínek nebo o vývoj supravodivých magnetů. Zde by například mohlo být technologickým zlomem, kdyby se podařilo vyvinout a uvést do praxe levné elektromagnety založené na vysokoteplotní supravodivosti. Další důležitou oblastí je hledání a vývoj materiálů, odolných proti vysokým teplotám a radiaci. Pochopitelně, že



*Silně mě ovlivnila i Odyssea 2001, kde velkou úlohu hraje planeta Saturn. K té se zatím dostaly pouze automaty. I u nich by to nešlo bez jaderných zdrojů v podobě radionuklidových generátorů. (Foto NASA)*



*I na našem novém cyklotronu se buduje neutronový zdroj, který bude zkoumat reakce neutronů pro pokročilé štěpné i fúzní technologie (Foto ÚJF AV ČR).*

klíčovým je i znalost jaderných reakcí neutronů s relativně vysokými energiemi, které se ve fúzi produkují, s materiály fúzního reaktoru, a hlavně jeho blanketu. Jak jsem se už zmínil, na těchto potřebných studiích se podílíme i my s využitím neutronových zdrojů na cyklotronech našeho ústavu. Je důležité dokončit tokamak ITER, ale zároveň by se měla stavět i zařízení, která se snaží dosáhnout udržení plazmatu jiným způsobem. Připomeňme německý stelarátor Wendelstein 7-X, nebo americké zařízení NIF (National Ignition Facility). To se snaží o inerciální udržení plazmatu, kdy laserové paprsky stlačí plazma na extrémní hustoty, i když na velmi krátký čas. Tato metoda je klíčová třeba pro hledání možnosti, jak konstruovat termojaderné pohony vesmírných plavidel. Podpořit je třeba i hledání cesty na menších zařízeních. Jak bylo zmíněno, nejbližší mají zatím k termojaderné elektrárně tokamak, ale studium jiných možností přináší šanci nečekaného technologického zlomu s potenciálem nalezení rychlejší cesty.“

**Výrazně se angažujete v oblasti energetiky, kde jste založil sdružení Realistická energetika a ekologie. Co je jeho cílem?**

„Je pravda, že jsem byl jedním ze spoluzakladatelů tohoto sdružení. Oblast energetiky je kritická pro rozvoj naší civilizace a její životní i sociální úroveň. Zároveň je v ní dlouhodobě



*Let i k nejbližším hvězdám se neobejde bez termojaderných pohonů. Nejbližší hvězdou je Proxima Kentaura. Jde o rudého trpaslíka s exoplanetami. (Foto NASA)*

tendence nabízet čistě ideologická řešení, která se neopírají o realitu a fakta. Velmi často dokonce přímo odporují přírodním zákonům a technologickým možnostem. Tyto trendy jsou nejen u nás, ale i v celé Evropské unii. Naši předchůdci vybudovali velmi robustní a spolehlivou energetickou soustavu, která je základem naší životní, technologické i ekonomické úrovně. Ovšem ta už nyní stárne a dosluhuje. Je tak potřeba ji obnovit. A tato obnova by měla probíhat na základě faktů, čísel a se znalostí přírodních, technologických i ekonomických zákonitostí. A právě k tomu, aby se diskuse okolo energetiky oprostila od ideologie, nebo ji alespoň dokázala čelit, by mělo přispět

toto sdružení.“

**Myslíte si, že je rozumné začít rušit uhelné elektrárny a pokud ano, tak kdy?**

„Určitě je rozumné nestavět nové uhelné bloky a odstavovat ty dosluhující a ty s vysokými emisemi. Dále je také velmi rozumné omezovat celkovou výrobu elektřiny z uhlí. Zvláště v situaci, kdy poměrně velkou část své výroby elektřiny vyvážíme. Ovšem, uhelné elektrárny mají zatím nezastupitelnou úlohu při vykrývání výkyvů v produkci elektřiny z jiných zdrojů a změn ve spotřebě. Než se tedy budou moci uhelné elektrárny odstavit, bude potřeba je nahradit jinými zdroji, které je zastoupí. Můžeme tak již nyní snižovat celkovou výrobu elektřiny z uhlí, ale měli bychom zatím ponechat v záloze dostatek uhelných zdrojů, aby nám nechyběl potřebný výkon i v době zimní inverze, kdy větrné a fotovoltaické zdroje téměř žádnou elektřinu nedodávají, a to u nás ani u sousedů. Pokud ale chceme odstavováním snižovat emise oxidu uhličitého, nemohou být náhradními zdroji elektrárny plynové. U nich, zvláště v případě, že se započítají i emise skleníkových plynů při těžbě a dopravě zemního plynu, nejsou celkové emise o moc nižší, než je tomu u zdrojů uhelných. Odstavování uhelných zdrojů by tak mělo být sladeno s tím, jak se nám bude dařit budovat jejich nízkoemisní náhradu.“

**Čím by se daly zrušené uhelné elektrárny plnohodnotně nahradit?**

„V našich geografických podmínkách máme k dispozici dvě možnosti. Než si je popíšeme, připomeňme, že uhelné elektrárny mají v našem energetickém mixu dvě klíčové funkce, neboť dodávají ročně přes 40% elektřiny. Zároveň mají velmi důležitou úlohu při regulaci energetické sítě. Elektřinu a energii zatím dokážeme ukládat pouze ve velmi omezené míře. Spotřeba a výroba elektřiny tedy musí být v každém okamžiku vyrovnána. Uhlenné elektrárny se v dominantní míře podílejí na vyrovnávání výkyvů v její spotřebě a výrobě, které jsou dány například tím, že větrné a fotovoltaické zdroje jsou závislé na počasí. Náhradou v našich geografických podmínkách nemohou být čistě obnovitelné zdroje, pro-

tože větrné turbíny a fotovoltaika nedokážou regulační funkce uhelných zdrojů plně nahradit. První možností je tedy kombinace plynových a obnovitelných zdrojů. Ta však není nízkoemisní a vede jen k omezenému snížení emisí skleníkových plynů. Druhou je kombinace jaderných a obnovitelných zdrojů. Tato cesta je v současné době jedinou možností, jak u nás dosáhnout nízkoemisního mixu.“

**Uvažuje se o vybudování další nebo dalších jaderných elektráren? Je to cesta? Nebo je snazší navyšovat jaderné výrobní bloky v již stávajících elektrárnách?**

„Pro výstavbu velkých reaktorů III. generace je v současné době nejrozumnější cestou nahradit postupně dosluhující bloky novými v jaderné elektrárně Dukovany a realizace dvou nových v Temelíně, což podporují i tamní obyvatelé. Teprve pak má smysl uvažovat případně o nějaké další nové jaderné elektrárně. Ta by případně mohla využívat malé modulární reaktory, které by mohly být využitelné i jako teplárny. To však v případě, že se podaří je ve světě zavést a zajistit vhodný model jejich licencování.“

*Jana Žďárská, Fyzikální ústav AV ČR*



**RNDr. Vladimír Wagner, CSc. (\*1960)** je vědeckým pracovníkem Ústavu jaderné fyziky Akademie věd ČR. Vystudoval Matematicko-fyzikální fakultu Univerzity Karlovy. Po absolvování začal pracovat v Ústavu jaderné fyziky AV ČR, kde získal doktorát za práce v oblasti studia struktury jader pomocí jaderné spektrometrie. Zabývá se studiem velmi horké a husté jaderné hmoty pomocí srážek relativistických jader a možností využití urychlovačem řízených transmutorů pro spalování jaderného odpadu. Zde jsou důležitou oblastí studia reakce neutronů s materiály, podobně jako u fúzních systémů. Zajímá ho energetika a popularizace vědy, obzvláště fyziky. Právě za ni dostal v minulém roce Cenu předsedkyně AV ČR.