



Na Zemi je typická energie blesku 6×10^8 J, na Venuši 2×10^{10} J a na Jupiteru dokonce 3×10^{12} J.

Plazma je jako klubko hád'at

Od teorie plazmatu k jeho praktickému využití s profesorem Petrem Kulhánkem

Plazma tvoří více než 99% pozorované atomární hmoty vesmíru. Jde o ionizovaný plyn, složený z elektronů, iontů, neutrálních atomů a molekul, který vzniká odtržením elektronů z elektronového obalu atomů plynu či roztržením molekul ionizací. Aby byl ionizovaný plyn skutečně považován za plazma, musí vykazovat ještě kolektivní chování včetně kvazineutrálnosti. Otázky týkající se plazmatu jsme položili prof. RNDr. Petru Kulhánkovi, CSc., z Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze, který toto zvláštní skupenství hmoty studuje.

Pane profesore, čím vás plazma okouzlo?

„Především tím, že my lidé dokážeme vytvořit formu látky, která tu byla v průběhu Velkého třesku, a to je fantastické! Ale pokud bych měl definovat, čím mě vlastně plazma okouzlo, musel bych začít svou poněkud svízelnou cestou k astronomii. A ta započala v pražské Stromovce u plakátu na astronomický kurz. Proto jsem se rozhodl pro studium Matematicko-fyzikální fakulty Univerzity Karlovy. Vybral jsem si ale obor elektronika a vakuová technika, protože na obor astronomie přijímali tehdy ob rok jen dva studenty. Ve druhém ročníku jsem poté přestoupil na teoretickou fyziku, čímž jsem se dopracoval ke křížené astronomii. A u té jsem již zůstal

díky tomu, že jsem dostal příležitost zabývat se fyzikou plazmatu na Fakultě elektrotechnické ČVUT.“

Podle starořeckého filozofa Platona se svět skládá ze čtyř živlů: země, vody, vzduchu a ohně. Jak je tomu dnes a kolik skupenství hmoty vlastně v současné době známe?

„Nazveme-li skupenstvím formu látky s určitými vlastnostmi, tak počty skupenství jdou dnes již do stovek. S tradičními skupenstvími si již dnes zdaleka nevystačíme. Vezměme třeba obyčejný led, který považujeme za pevné skupenství. Ale led může krystalovat například v šesterečné nebo kubické soustavě a každá může být považována za určité látkové skupenství. Nebo takový Velký třesk, kdy vzniklo kvark-gluonové plazma a z něho hadronový plyn. To jsou opět látky s natolik odlišnými vlastnostmi, že je taktéž můžeme považovat za skupenství.“

Co přesně si lze představit pod pojmem plazma? Kdo je autorem tohoto názvu?

„Lidé si často myslí, že plazmatem lze nazvat jakýkoliv oheň, kupříkladu plamen svíčky. To je velký omyl. Abychom si plazma lépe přiblížili, museli bychom se vrátit do roku 1928, tedy do doby, kdy Irving Langmuir, americký chemik a fyzik, sledoval výboje ve vakuových trubicích v různých plynných prostředích. Byl první, kdo tuto látku pojmenoval. Traduje se,

že mu připomínala krevní plasmu, kterou takto prvně pojmenoval J. E. Purkyně. Poté svůj objev publikoval i spolu s vlastním ručním nákresem. Historici se dodnes dohadují, co ho k výběru slova plazma vedlo. Zda jej skutečně inspirovala určitá podobnost s krevní plasmou, tedy látkou, v níž se vyskytují volné nosiče nábojů, či skutečnost, že plyn, se kterým pracoval, sledoval tvar výbojové trubice, a protože byl vzdělaný v řečtině, pojmenoval jej plazmatem, neboť slovo plazma znamená v řečtině tvar.“

Jaké vlastnosti plazma má a jak by se dalo konkrétně definovat?

„Irving Langmuir definoval plazma jako formu látky, jež musí splňovat tři důležité vlastnosti. Jednak musí obsahovat volné nosiče nábojů – tedy elektrony a ionty vytvořené z neutrálních atomů a molekul odtržením elektronů z elektronového obalu atomů či roztržením molekul ionizací. Aby byl ionizovaný plyn skutečně považován za plazma, musí vykazovat ještě kolektivní chování (což je obrovská odlišnost od plynů) a také kvazineutrálnitu.“

Mohl byste tyto pojmy blíže vysvětlit?

„Kolektivním chováním se rozumí skutečnost, že elektrony a ionty společně reagují na elektrická a magnetická pole a společně je také vytvářejí. Někjaký vnější impuls může například způsobit, že plazma se jako celek rozvlí a vznikne elektrické a magnetické

pole. Na rozdíl od plynů jde o globální proces. Kvazineutralitu lze definovat jako rovnost kladného náboje iontů a záporného náboje elektronů v jakémkoli makroskopicky pozorovaném objemu plazmatu.“

Kde se s plazmatem můžeme setkat?

„Typickým příkladem je blesk. Když udeří, teplota v jeho kanálu je cca 30 000 K. Plazma se vyskytuje také v polární záři, uvnitř záři-

vek a neonů či v elektrickém oblouku. Pokud budeme postupovat od Země do vesmíru, nalezneme plazma v ionosféře, v magnetosféře a poté ve hvězdách, mlhovinách či hvězdném větru. Parametry plazmatu v těchto formách se liší o mnoho řádů a atomární látka ve vesmíru je z více než 99% ve formě plazmatu. Jedinými neplazmatickými ostrůvky o nepodstatné hmotnosti ve vesmíru jsou planety, planetky apod..“

Jak vypadá a z čeho je složena běžná hvězda, eventuálně jiné vesmírné objekty?

„Hvězdou rozumíme plazmové kulovité těleso, jež má termojaderný zdroj energie a drží jej pohromadě jeho vlastní gravitace. To znamená, že tlaková síla látky a záření se snaží hvězdu rozpínat a gravitace naopak smršťovat. Rovnováha obou sil zajistí kulatý tvar objektu. Ve chvíli, kdy vyhoří všechno její palivo (tedy všechny prvky až po železo, které jsou schopné slučování), nemá hvězda čím odolávat gravitaci a kolabuje. Proti tlaku gravitace se ale mohou postavit elektrony, a z hvězdy se tak stane bílý trpaslík, což je objekt, který je držen pohromadě degenerovaným elektronovým plynem se zcela specifickými vlastnostmi.“

Jaká situace by nastala u velmi hmotných hvězd?

„Pokud je hvězda hmotnější, elektrony tlaku gravitace neodolají, spojují se s protony a hvězda obsahuje vyšší množství neutronů. Jde o neutronovou hvězdu, v níž neutrony vytvářejí tlakovou sílu, která zastaví gravitační kolaps hvězdy. Povrch neutronové hvězdy je tvořen vrstvou elektronů s magnetickým polem, gravitačnímu tlaku odolávají neutrony v jejím vnitřku a její jádro je patrně tvořené kvark-gluonovým plazmatem.“

Dala by se takto popsat i černá díra? Jak vlastně vzniká?

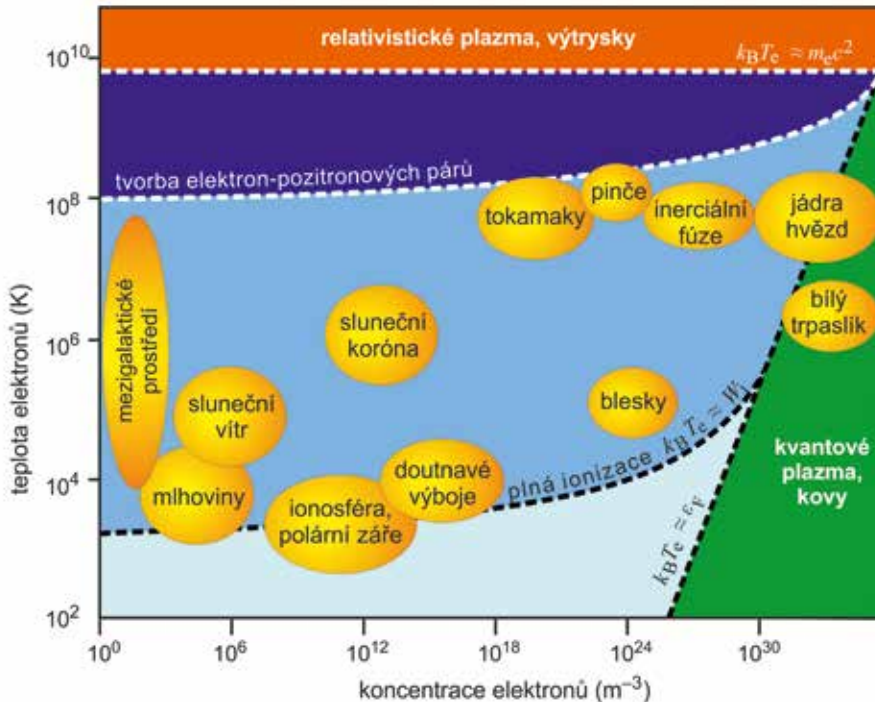
„Pokud neutrony nedokážou odolávat gravitačnímu tlaku, zhroutí se hvězda do černé díry. A my zatím nemáme žádnou možnost, jak zjistit, v jaké podobě se látka uvnitř černé díry nachází. Podle rovnic obecné relativity se uvažuje, že látka padá do centra, stává se hustší a hustší a v tomto prostředí již přestává obecná relativita platit. Předpokládá se, že děje uvnitř černé díry podléhají kvantovým zákonům, ale na společné vysvětlení kvantových a gravitačních jevů dosud nemáme teorii.“

Plazma je možno popsat pomocí tří základních dominantních parametrů, a to z hlediska koncentrace nabitých částic, teploty a magnetického pole. Mohl byste nám tyto parametry přiblížit?

„Jedním z nejdůležitějších parametrů, který určuje chování plazmatu, je koncentrace nabitých částic. Podle koncentrace můžeme mít řídké plazma například ve slunečním větru i extrémně husté plazma v termojaderném kotli nitra hvězd. S koncentrací také souvisí stupeň ionizace plazmatu. V slabě ionizovaném plazmatu je koncentrace nabitých částic zanedbatelně malá v porovnání s koncentrací neutrálních atomů a molekul. Takové poměry panují například v zemské ionosféře. Naproti tomu v silně ionizovaném plazmatu převládá koncentrace nabitých částic, jako je tomu v jiskře nebo v obloukovém výboji.“

Dalším parametrem je teplota. Jak ovlivňuje chování plazmatu?

„Podle teploty rozlišujeme vysokoteplotní a nízkoteplotní plazma. Jako nízkoteplotní plazma lze definovat kupříkladu některé kovy při pokojové teplotě. Na druhé straně můžeme hovořit o experimentech v CERN nazývaných Malým třeskem, při nichž se uvolní tak obrovská energie, že neutron a proton nevydrží pohromadě a vzniká kvark-gluonové plazma. Jeho teplota převyšuje 10^{12} K a je stotisíckrát vyšší než v nitru Slunce.“



Plazmatické skupenství dělíme podle nejrůznějších hledisek: teploty, hustoty, magnetického pole, různých projevů atd. Na obrázku je typické dělení pro astronomii.



Severní část pozůstatku po explozi supernovy v souhvězdí Plachet. K explozi došlo přibližně před 12 000 lety. Zobrazená oblast je velká 2,5 čtverečního stupně. Dobře patrná jsou vlákna typická pro plazmatické prostředí.

Mohl byste uvést příklady chladného a horkého plazmatu?

„Vysokoteplotní plazma má miliony kelvinů a víc. Nalezneme jej ve hvězdách a při experimentech s řízenou termonukleární syntézou. Nízkoteplotní plazma může mít i pokojovou teplotu, vyskytuje se například v zářivkách, v zařízeních pro nanášení plazmatu nebo v ionosféře. Je zajímavé, že v plazmatu může být teplota elektronů o několik řádů vyšší než teplota kladných iontů a neutrálních molekul.“

Důležitým parametrem kvalifikace plazmatu je jeho elektrická vodivost a magnetické pole. Mohl byste nám je přiblížit?

„Plazma obsahuje volné elektrické náboje, proto je za vysoké teploty vysoce vodivé a snadno reaguje na elektrické i magnetické pole. Magnetické pole přináší do plazmatu anizotropii, tj. plazma se chová jinak ve směru siločar a jinak kolmo na ně. Taková směrová závislost je typická například pro zvukové vlny šířící se plazmatem, ale také sluneční vítr, unikající ze Slunce podél siločar, má jinou rychlost, než když uniká kolmo na siločáry. Teplota plazmatu může být také jiná podél siločar a kolmo na siločáry, v plazmatu tedy rozlišujeme elektronovou teplotu, iontovou teplotu a každou z nich dělíme na teplotu podél a napříč siločar.“

V jakých formách se plazma vyskytuje z hlediska hustoty elektrického proudu?

„Plazma jakožto vodivé prostředí je vždy spojeno s pohyby nabitých částic, a tedy s tekoucím elektrickým proudem. Tekoucí proud vytváří magnetické pole, které svým magnetickým tlakem komprimuje plazma do charakteristických vláken a stěn. Někdy hovoříme o tzv. pinčovém efektu. Slovo pinč vzniklo počestěním anglického *pinch*, které znamená stisknout nebo stlačit. Elektrické proudy často tekou podél magnetických indukčních čar (tak se správně říká siločárám, ale málokdo tento umělý termín používá). Mají typický tvar zkroucený do šroubovic, který odpovídá minimální magnetické energii, a pokud má plazma dostatek času, vždy se jeho siločáry zkroutí do šroubovicové podoby.“

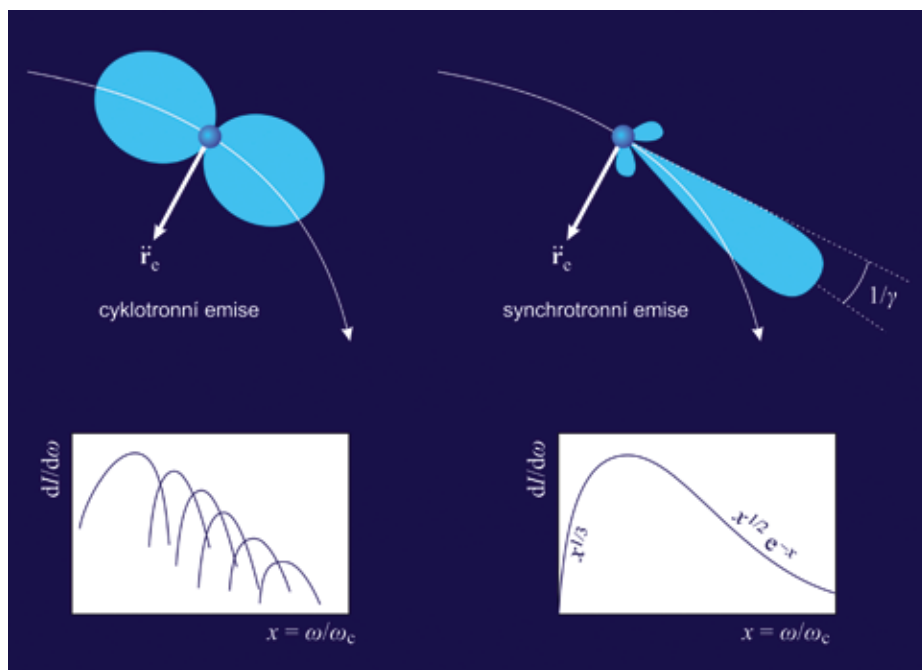
Využití plazmatu prostřednictvím termonukleární fúze je plánováno jako budoucí zdroj energie. Skutečně tedy „zapálíme Slunce na Zemi“?

„Termonukleární fúze je rozhodně ten správný směr vývoje, je to budoucí energie pro lidstvo – tedy vize energie, která funguje v nitru hvězd a je ověřena. Dříve o fúzi skutečně koloval slogan: 'Zapálíme Slunce na Zemi'. Jenže my jsme na Zemi v poněkud odlišných podmínkách než na Slunci, a proto bude tato reakce probíhat jinak. Nemůžeme začít slučováním dvou protonů, jak je tomu v nitru Slunce, protože jde o velmi pomalou reakci. Namísto toho budeme slučovat buď dvě jádra deuteria, nebo jádro deuteria s jádrem tritia, neboť tyto reakce probíhají mnohem rychleji. V největším budovaném zařízení je koncentrace vstupních látek, deuteria a tritia, plánována na 10^{20} částic v m^3 , teplota by měla přesáhnout 100 milionů kelvinů. To je rozhodně více než v nitru Slunce, ale protože v pozemských podmínkách nedokážeme vytvořit tak vysokou koncentraci vstupních částic, doháníme fúzní parametry teplotou.“

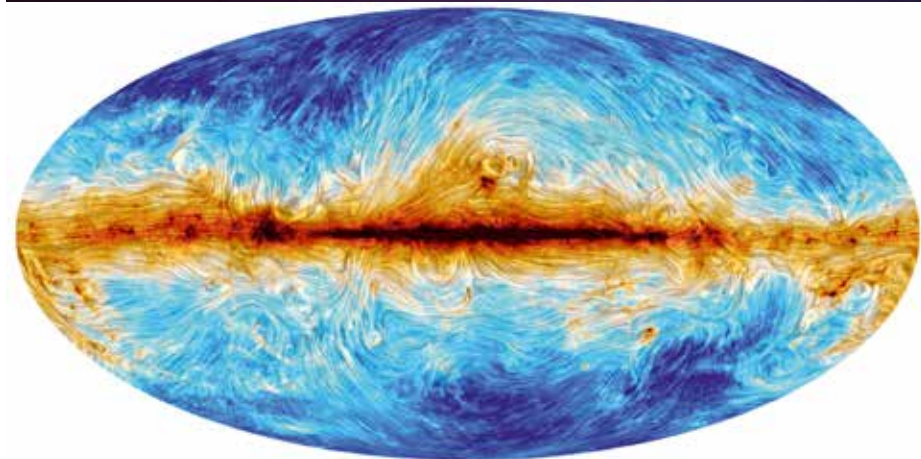
Plazma ve formě plazmového prstence bude využívat ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), který by se měl stát předstupněm komerčního využití termonukleární fúze v energetice. Jakým způsobem se zde bude elektrina vyrábět?

„ITER je zařízení pro udržení a ohřev plazma-

tu, které patří do rodiny tokamaků a staví se pod hradem Cadarache v jižní Francii. V komoře o průměru 6 m se budou slučovat jádra deuteria s jádrem tritia. Energie, která takto vznikne, bude odváděna chladicím systémem, v jehož trubkách bude kolovat kapalné lithium. Lithium se uvnitř reaktoru částečně změ-



Cyklotronní a synchrotronní záření. Gama označuje Lorentzův faktor $1/(1-v^2/c^2)^{1/2}$.



Mapa magnetického pole Galaxie pořízená sondou Planck v roce 2015.

ni na tritium, které bude vráceno do reakce. Odvedené teplo vyrobí v parogenerátoru páru a dále se bude postupovat standardním způsobem jako v jakékoli jiné tepelné elektrárně, tedy následuje turbína a dynamo. ITER ještě samozřejmě není elektrárna, ale pouhý prototyp, experimentální reaktor, který nebude dodávat energii do sítě. První experimentální fúzní elektrárnou by se tak měl stát až tokamak DEMO a teprve po něm by mohla nastoupit rutinní stavba termojaderných elektráren.“

V ITERu je plánována velikost magnetického pole 5,3 T. Ale nejde pouze o jeden typ magnetického pole. Jaké typy polí se zde budou vyskytovat?

„V ITERu budou tři typy magnetických polí: toroidální (ve směru osy komory), poloidální (kolem osy komory) a vertikální; teprve souhra těchto polí dokáže bezpečně udržet plazma v centru výbojové komory. Kombinace polí například udržuje pohyb částic v toroidu, kde se pohybují po šroubovicích a jsou fokusovány k ose komory. Nesmírně důležité je po-

tlačování nestabilit či vyřešení problému ubíhajících elektronů, jež by mohly získat obrovskou energii a eventuálně poničit stěnu komory.“

Jak to bude s bezpečností elektromagnetické fúze?

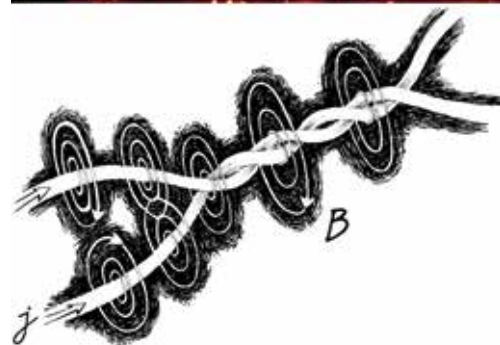
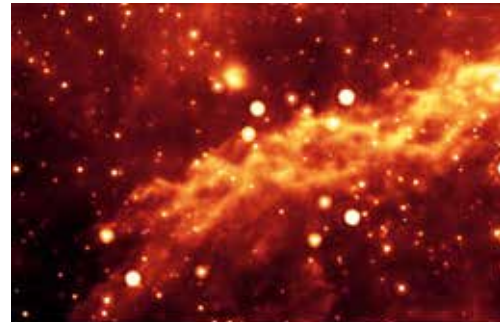
„Jde o primárně velmi bezpečné zařízení. K havárii ani vlastně nemůže dojít, a k úniku nějaké hypotetické radioaktivity do okolí už vůbec ne. A i kdyby, zamoří se maximálně desítky či stovky metrů kolem. Jediné, co může nastat, je zastavení reakce, a my tak nevyrobíme žádnou energii. Po odzkoušení popisovaných reakcí v ITERu, pokud se neobjeví nové druhy nestabilit či jiné neočekávané problémy, se bude fúze testovat v zařízení s označením DEMO. To už by měla být klasická elektrárna. Pokud i tam bude všechno v pořádku, začnou se budovat běžné elektrárny a jejich propojení s elektrickou sítí.“

Dalo by podle vás urychlit využití termojaderné fúze v praxi?

„Ovládnutí termojaderné fúze je natolik komplexní proces, že nepředpokládám, že by ho bylo možné nějak urychlit. Jde o dlouhodobý systematický výzkum, po něm zvládnutí nových technologií, a až nakonec přijde stavba skutečné elektrárny. Takový proces bude trvat minimálně půl století, ať se nám to líbí, nebo ne. Je před námi ještě velký kus práce.“

Tou prací je především výzkum potlačování nestabilit v plazmatu. Co všechno se tam může stát?

„Plazma je jako klubko hádat; jakmile může někam uniknout, udělá to. V laboratořích nám utíká právě tam, kam nechceme. Mohou za to různé druhy nestabilit plazmatu, které se ve vesmíru často rozvinou ve velmi zajímavé útvary. O nestabilitách hovoříme tehdy, jestliže vlivem malé události (náhodné fluktuační poruchy způsobené vnějšími vlivy atd.) dojde k úplné změně konfigurace plazmatu. Uvedme několik příkladů. Pokud se jednotlivé druhy částic v plazmatu vůči sobě pohybují, může dojít k rozvoji Bunemanovy nestability, která vede k postupnému převodu kinetické energie pohybu na tepelnou, tzv. termalizaci. Na rozhraní dvou druhů plazmatu nebo na rozhraní plazmatu a plynu se může rozvinout Rayleighova–Taylorova nestabilita s charakteristickými houbovitými útvary. Krásně je vidět v Krabí mlhovině, která vznikla explozí plazmatu do okolního prostředí. Na rozhraní dvou různých se pohybujících prostředí může dojít k rozvoji Kelvinovy–Helmholtzovy nestability. Například sluneční vítr obtékající magnetosféru Země vytváří díky této nestabilitě na jejích bocích obří víry o trojnásobném průměru, než má samotná Země. Další typy nestabilit jsou spojeny s plazmovými vlákny. Zaškrcení vlákna může vést na korálkovou nestabilitu a rozpad vlákna na menší plazmové útvary. Náhodné vybočení vlákna se může prohlubovat a vést k rozvoji tzv. smyčkové nestability. Jiné nestability vedou ke změně topologie magnetického pole, přepojení jeho siločar, následnému vzniku magnetických ostrovů a uvolnění velkého množství energie,



Mlhovina Dvoušroubovice v souhvězdí Hadonoše se nachází pouhých 300 světelných let od obří černé díry sídlící ve středu naší Galaxie. Fotografie byla pořízena v infračerveném oboru spektra dalekohledem SST. Snímek je v nepravých barvách. Vlákny teče proud generující magnetické pole.

často v podobě rentgenového záblesku; k takovým jevům dochází například na Slunci, kde hovoříme o rentgenovém vzplanutí. Různorodost nestabilit v plazmatu je enormní a jejich výzkum probíhá v mnoha špičkových laboratořích světa. Zvládnutí termojaderné fúze v pozemských podmínkách závisí především na zkrocení nestabilit, které způsobují rozpad plazmatu a jeho únik z reaktoru.“

Známe dnes všechny typy nestabilit, nebo by nás ještě nějaké nové mohly překvapit?

„Nestability, které dnes známe, jsou popsány při reakcích v tokamacích o průměru komory 2 m. Proto pro nás bude náročný právě přechod do komory ITERu o průměru 6 m. Nikdo zatím netuší, zda tato změna rozměrů nepovede ke vzniku nových nestabilit, jež zatím vůbec neznáme. Pokud by došlo k dalším nestabilitám, bude třeba je řešit, aby později neohrožily již fungující elektrárny.“

Jaké je další uplatnění plazmatu mimo energetiku?

„Jeho uplatnění se rozvíjí velmi bouřlivě, především v medicíně. Ale s plazmatem se setkáváme doslova na každém kroku. Vezměte si třeba stříčku nože – její ostrost způsobuje tenká vrstvička plazmatu. Nebo PET lahev – kdyby nebyla ošetřena plazmatem, po několika týdnech by nápoj v ní ztratil většinu oxidu uhličitého a asi by nám nechutnal. Plazma způsobuje měkkost a poddajnost tkanin (tímto využitím plazmatu se zabývá vývojové pracoviště na Technické univerzitě v Liberci) a nezastupitelné je plazma především v průmyslu v podobě plazmového řezání či sváření.“

Jana Žďárská

Fyzikální ústav AV ČR, Praha

Zdroje obrázků: NASA, NASA/UCLA/CALTECH, ESA, DON GOLDMAN



Prof. RNDr. Petr Kulhánek, CSc. (*1959) vystudoval Matematicko-fyzikální fakultu Univerzity Karlovy, obor matematická fyzika. Kandidátem věd se stal v roce 1987 po dokončení práce „Urychlovače plazmatu“. Docentem se stal v roce 1996 („Teoretické modely z-pinčů“) a profesorem aplikované fyziky v roce 2005 („PIC simulace plazmových vláken“). Přednáší na Fakultě elektrotechnické ČVUT a Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT, a také na Přírodovědecké fakultě Univerzity Palackého v Olomouci. Je členem Rady Centra teoretické astrofyziky AV ČR, autorem mnoha skript, učebních textů a odborných publikací. Od roku 1999 vedl sedm expedic s cílem pozorovat plazma ve sluneční koróně a v horních vrstvách atmosféry Země. Je členem Mezinárodní astronomické unie IAU. V lednu 2010 byl ministryní školství jmenován do Českého výboru PRODEX. Petr Kulhánek dlouhodobě popularizuje fyziku, astrofyziku a astronomii. Je zakladatelem sdružení Aldebaran Group for Astrophysics a koordinuje myšlenkovou náplň popularizačního serveru Aldebaran.cz. Již od dob svých studií spolupracuje se Štefánikovou hvězdárnou v Praze. V roce 2010 mu Česká astronomická společnost udělila cenu Littera Astronomica za významný příspěvek k popularizaci astronomie v Česku.

FOTO TV NOE/ASTRO.CZ