Fúzi lehkých atomů jako o zdroj nevyčerpatelné a nejčistší energie lidstvu napovědělo Slunce

Třicátá léta 20. století (Bethe, 1938) jednoznačně potvrdila slučovací termojaderný proces v centru Slunce, který přeměňuje jednu formu energie (hmotu) na jinou formu energie (pohyb a záření). Mezi výbuchem štěpné atomové bomby (US, Hirošima 1945) a zprovozněním atomové elektrárny (SSSR, Obninsk 1954) uplynulo pouhých devět let. Když ale nebe nad Pacifikem rozzářil výbuch vodíkové nálože (US, Marschalovy ostrovy, 1952), málokdo předpokládal, že vývoj termojaderné elektrárny bude trvat více jak padesát let.

Pokud je ve skutečnosti subatomová energie hvězd volně použitelná k udržení jejich výhně, zdá se, že jsme blíže k splnění našeho snu o využití této latentní energie pro lepší život lidské společnosti – nebo pro její sebevraždu.

***Arthur Eddington,** astronom, Cardif 1920*

Principy

Energii jádra lze tedy uvolnit dvěma způsoby, přičemž slučování se vyznačuje všemi dobrými vlastnosti, na které si vzpomenete - nevyčerpatelné zásoby paliva rovnoměrně rozloženého po Zemi, vnitřní bezpečnost reaktoru, neradioaktivní odpad bez skleníkových plynů, slabá vybuzená radioaktivita konstrukčního materiálu, vojensky nezneužitelná reakce. Energie fúze má jedinou vadu... Dosud žádná fuzní elektrárna nepracuje.

Zatímco ke štěpení vybraných jader atomů „stačí“ úder neutronem a rozběhne se řetězová reakce, při sloučení dvou jader musíte k sobě přiblížit souhlasně nabité částice. Teprve na vzdálenosti srovnatelné s rozměrem atomu, převládnou přitažlivé jaderné síly nad obrovskou odpudivou Coulumbovskou silou, jádra se spojí a vytvoří nový prvek. Kandidáti sloučení potenciální bariéru překonají, pokud mají dostatečnou rychlost, kterou získají buď v urychlovači, nebo v reaktoru. Úbytek hmotnosti jádra nového prvku (Aston, 1920) se transformuje v souladu s vztahem ekvivalence hmoty a energie $E = m.c^2$ (Einstein, 1905) na pohybovou energii produktů reakce.

Čtyři skupenství hmoty pohromadě – kombinace komory tokamaku ToreSupra s výbojem a bez výboje (Zdroj CEA)

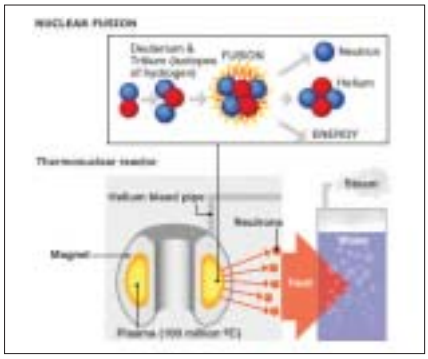
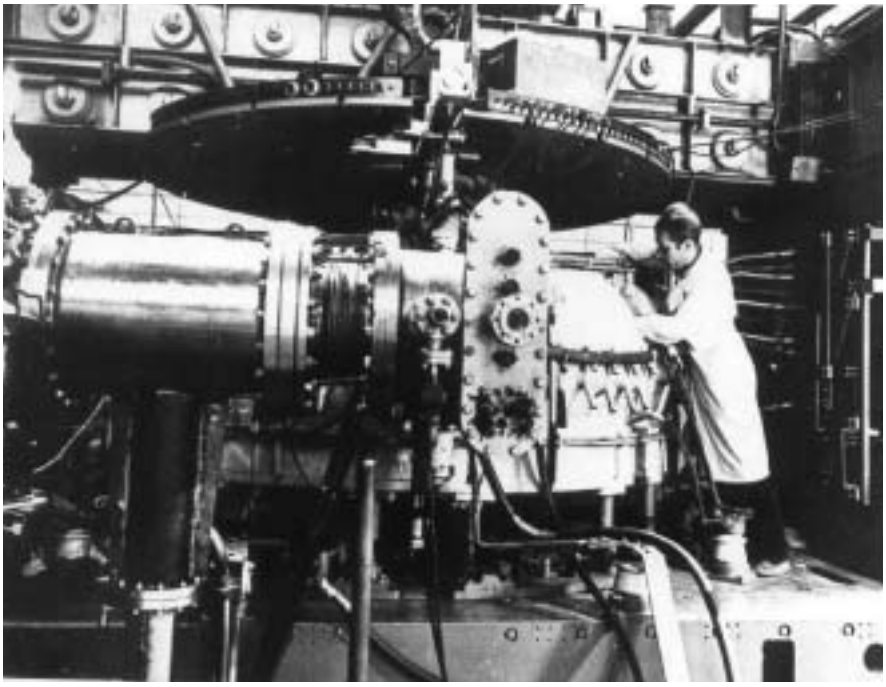


Schéma termojaderné elektrárny

Tři skupenství hmoty obklopují lidský život odedávna, což umožnilo vědě vstřebávat poznatky nesrovnatelně déle než u skupenství čtvrtého – plazmatem se vědci začali důkladně zabývat až počátkem dvacátého století. Jinými slovy termojaderná fúze zastihla fyziku nepřipravenou. To byl důvod počátečních neúspěchů, kdy se zbrkle stavěla experimentální zařízení bez hlubšího teoretického zdůvodnění.



Tokamak T-3 z Ústavu pro atomovou energii I. V. Kurčatova v Moskvě zahájil v roce 1968 vítěznou pouť ruského termojaderného zařízení světem

Urychlení

V roce 1932 v Cavendishově laboratoři za pomocí Cockroft-Waltonova urychlovače přeměnili Rutherford, Cockroft a Walton lithium pomocí odstřelování protony na helium. O dva roky později se podařilo sloučit jádra deuteria. Mezi tím pronesl nositel Nobelovy ceny Rutherford známé proroctví o nemožnosti využití jaderné energie pro potřeby společnosti. Zdálo se, že zanedbatelný energetický zisk fúze vzhledem k její iniciaci pomocí urychlovače tento způsob odsune na slepou kolej.

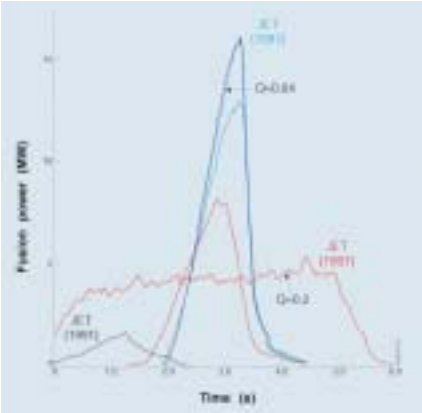
Nicméně jistou naději skýtá inerciální elektrostatické udržení (IEC), které místo lineárního urychlovače používá urychlovač sférický. Inerciální ve smyslu zachování počtu částic a energie. Nezávisle na IEC pracovali v bývalém Sovětském svazu (Lavrentěv) a v USA (Farnsworth, Hirsch, Bussard, Nebel). Rusko výzkum zastavilo a v Los Alamos práce pokračují. Zařízení Polywell na rozdíl od termojaderné fúze fungující na nejrychlejších iontech Maxwellova rozdělení používá monoenergetický svazek iontů. Pokud by byl tento přístup úspěšný, pak by „hrozila“ přímá přeměna fuzní energie na elektrickou, téměř „bezneutronové“ slučování protonu a boru, relativně malý a tudíž i laciný reaktor schopný pohánět kupříkladu rakety. Mimochodem, co připomíná název společnosti produkující Polywell a podporované US NAVY – „EMC2“?

Teplo

Konečnou stanicí při zahřívání hmoty je plazma. Kvasineutrální soubor částečně či plně ionizovaných atomů vykazujících kolektivní chování. Aby fuzní reakce, v tomto případě termojaderná, mohla vyrábět elektřinu, musí plazma splňovat Lawsonovo kriterium spojující teplotu T, hustotu n a dobu udržení energie daného typu plazmatu.

$n\tau > konst(T)$

Nejnižší zápalnou teplotu má fuzní reakce izotopů vodíku deuteria a tritia. Při ní vznikne jádro helia a neutron s pohybovými energiemi 3,5



Fuzní výkon uvolněný při dvou D-T kampaních na tokamaku JET v letech 1991 a 1997

resp. 14,1 MeV. S touto reakcí se počítá pro první fuzní reaktory.

Lawsonovo kriterium nabízí dva přístupy jak podmínku energetického zisku fúze splnit. Velké n ($\approx 10^{29}$ m^{-3}) a malé τ ($\approx 10^{-10}$s), či malé n ($\approx 10^{19}$ m^{-3}) a velké τ ($\approx$ s). Husté plazma a krátká doba udržení energie charakterizuje takzvané inerciální udržení (IC), zatímco řídké plazma a s dobrým udržením energie je znakem magnetického udržení (MC). Nabízí se analogie Lincolnova bonmotu: *„Hodně lidí dokážete balamutit krátkou dobu a málo lidí dlouhou dobu.“*

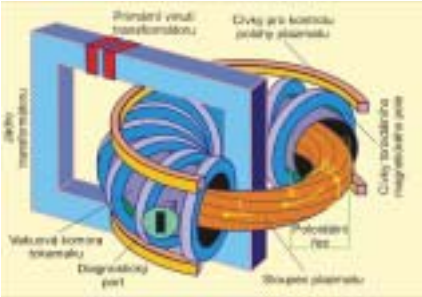
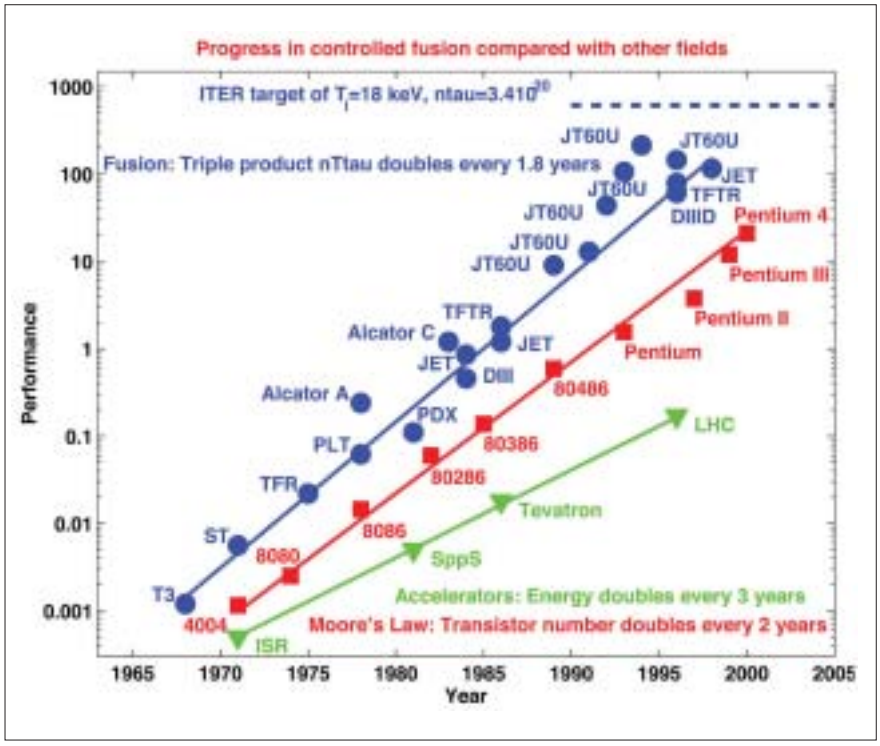


Schéma nejúspěšnějšího termojaderného zařízení – tokamaku (TOroidalnaja KAma i MAnitnyje Katuški). Autoři - Sacharov, Tamm, Lavrentěv a Arcimovič

Reprezentant elektrostatického inerciálního udržení – zařízení Polywell WB-6 od společnosti EMC2 ze Santa Fe, USA

Magnetické udržení pracuje od padesátých let minulého století s nejrůznějšími konfiguracemi magnetického pole, sloužící k izolaci horkého plazmatu od stěn výbojové komory. První fuzní neutrony předvedl theta pinč Scylla I (Los Alamos, 1958). Inerciální udržení muselo počkat na objev



Srovnání vývoje urychlovací energie, plošné hustoty tranzistorů a trojného součinu fúze

Tokamak T-7 z Ústavu pro atomovou energii I. V. Kurčatova v Moskvě zahájil v roce 1981 éru supravodivých tokamaků. Část vybavení tokamaku T-7 dodal Ústav fyziky plazmatu ČSAV

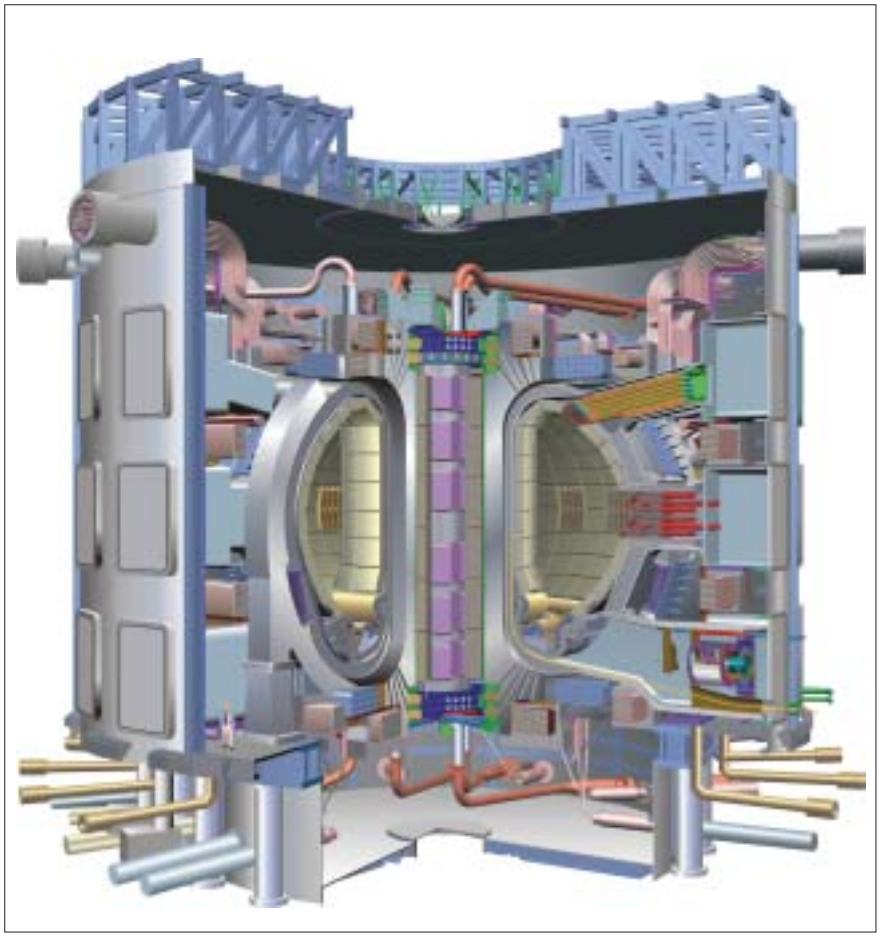
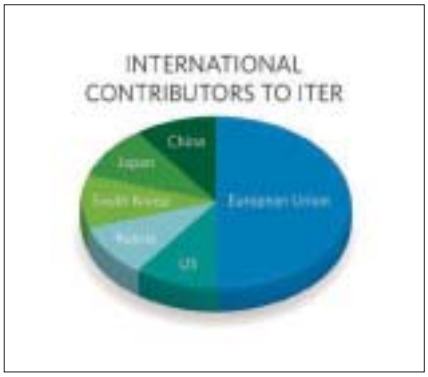


Schéma mezinárodního tokamaku ITER



Rozdělení nákladů při stavbě mezinárodního tokamaku ITER

laseru, jako zdroje energie dobře fokusovatelné na palivový terčík. První fuzní neutrony v Moskvě vyrobilo zařízení Kalmar již v roce 1971, ale do dnešní doby se tento způsob potýká s nízkou účinností laseru, malou opakovací frekvencí a příliš drahým terčíky. IC kulminovalo laserovým systémem s 192 svazky a energií 1,8 MJ, výkonem 10^6 GW, dobou pulsu několik nanosekund v Národním zapalovacím zařízení (NIF), spuštěném začátkem roku 2009 v Livermoru.

Optimisté předpokládají, že NIF dosáhne prvního milníku jaderné fúze – „zapálení plazmatu“, kdy fuzní zisk vyrovná výkon ohřevu. V Evropě se staví obdobný Laser Megajoule v Bordoux a připravují se ryze civilní zařízení HiPER a ELI. Poslední se dokonce zdá, že míří do Čech. V České republice funguje PALS – jeden z deseti největších evropských laserových systémů ve společné laboratoři Ústavu fyziky plazmatu AV ČR, v.v.i. a Fyzikálního ústavu AV ČR, v.v.i.

Blíže k cíli, to je ke komerční fuzní elektrárně, je magnetické udržení. V roce 1968 svými výsledky přesvědčilo svět zařízení tokamak. Výzkum iniciovaný seržantem Rudé armády Lavrentěvem našel geniálního Sacharova, který se svým učitelem Tammem na počátku padesátých let předložili myšlenku tokamaku – transformátoru s jediným sekundárním závitem – provazcem plazmatu ve výbojové komoře ovinuté elektromagnetem. V roce 1997 na největším tokamaku na světě, evropském JET, bylo uvolněno rekordních 16 MW fuzního výkonu a 22 MJ energie. Evropa je dnes na špičce výzkumu řízené termojaderné reakce.

ITER

V současné době funguje na světě více jak sto tokamaků nejrůznější velikosti a s nejrůznějšími úkoly. Řada z nich pracuje pro mezinárodní tokamak ITER, který staví šest států a Evropská unie ve francouzské Cadarache. Ze sedmi jsou čtyři státy z Asie. Nejlidnatější státy světa Japonsko, Čína, Jižní Korea a Indie pokládají fúzi za řešení blížícího se smrtícího nedostatku energie. EU, Rusko, USA a Japonsko původně chtěly

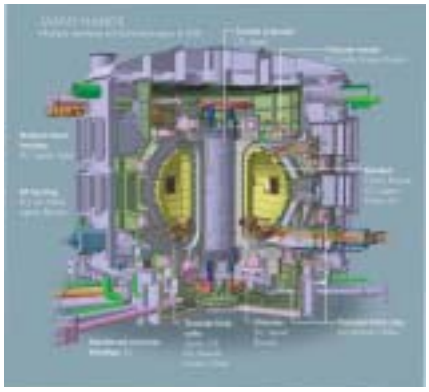
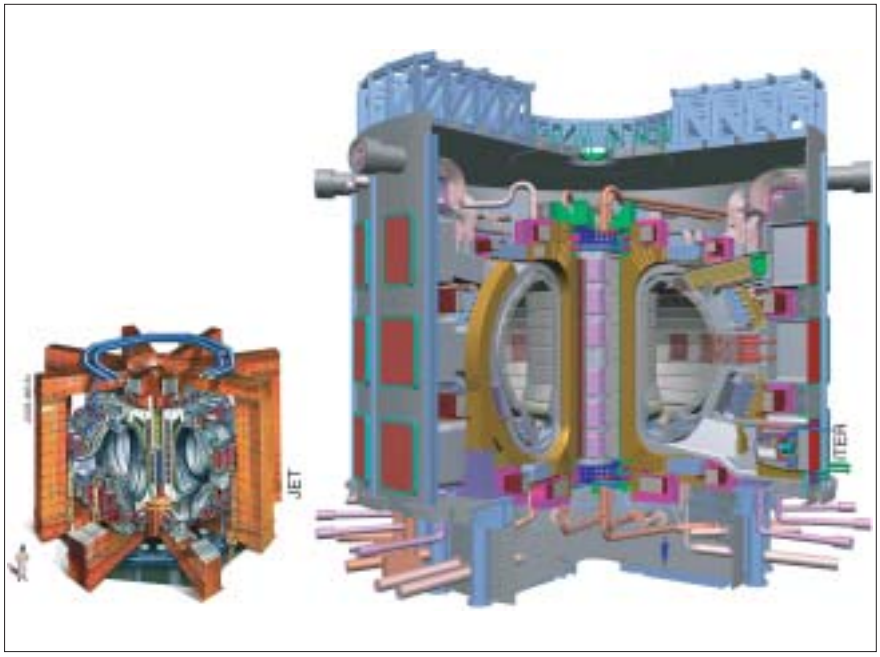
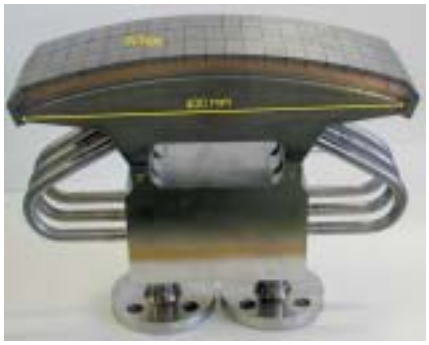


Schéma mezinárodního tokamaku ITER s vyznačenými komponenty a jejich dodavateli



Srovnání současného největšího tokamaku na světě – evropského JET a mezinárodního tokamaku ITER
V roce 2010 zde, v lokalitě Cadarache na jihu Francie, ztuhnou první tuny betonu pro halu skrývající tokamak ITER



Dom divertoru pokrytý wolframem

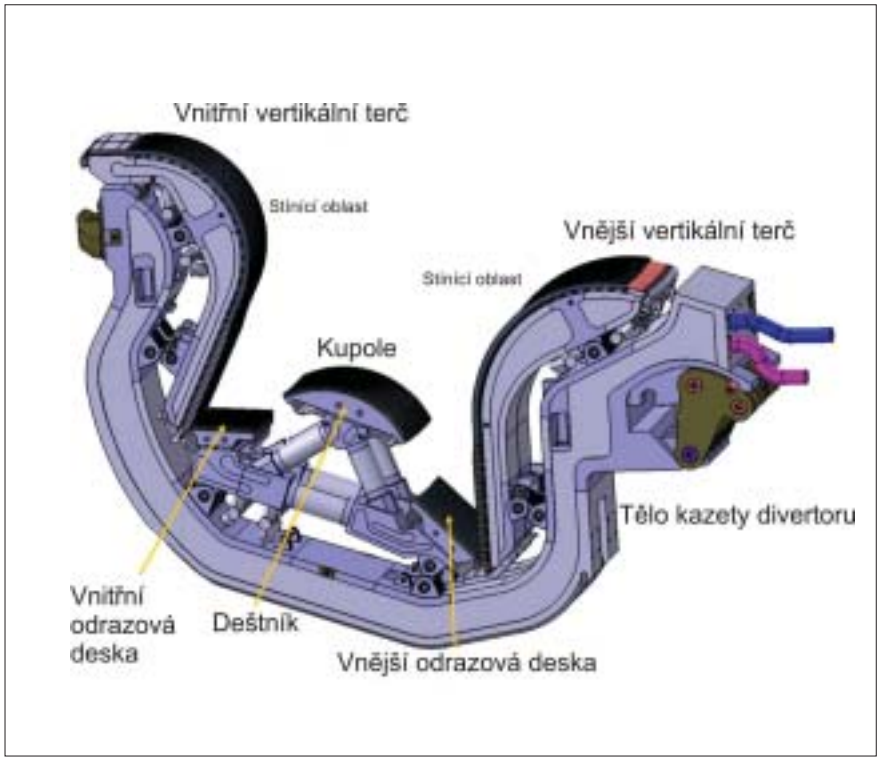


Schéma divertoru, který v tokamaku ITER bude čistit plazma a regulovat jeho výkon. Divertor je nejvíce tepelně namáhanou částí výbojové komory – 20 MWm^{2}.

demonstrovat spolupráci různých politických zřízení a dnes za úkol číslo jedna považují ekologickou a surovinově zabezpečenou výrobu jaderně bezpečné energie.

ITER, s fúzním výkonem 500 MW, desetkrát větším než příkon, by měl odpovědět především na několik technologických otázek, které se uplatní při stavbě vlastního reaktoru pro fuzní elektrárnu. Volba koncepce plodícího obalu, kde se neutronovým bombardem lithia bude vyrábět složka paliva – tritium. Volba materiálu stěny, která „vidí“ plazma. Volba vhodného režimu plazmatu.

ITER je svými 12 miliardami eur nejdražší vědecko-technický pozemský projekt na světě. Po dokončení bude rázem držitelem několika světových rekordů. Za všechny jmenujme největší magnet se supravodičem hmotnosti 810 tun v cívkách o hmotnosti 6 540 tun, v němž proud 68 kA vytvoří magnetické pole 11,8 Tesla. Dosud kraloval detektor Atlas, koncem roku 2009 podruhé spuštěném v obřím urychlovači LHC v Cernu (170 t, 1 320 t, 20,5 kA, 4,1 T). Dnes už pro ITER pracují nejzkušenější průmyslové firmy. Jejich koordinaci řídí Jacque Farineau, který ve stejné funkci stavěl Airbus 380. Mimochodem ITER má stokrát více součástek než Boeing 747.

Moderní tokamak COMPASS původem z anglického Culham Science Centre v Ústavu Ústavu fziky plazmatu AV ČR

Mezi 15 miliony stupňů jádra Slunce a téměř absolutní nulou vesmíru je 700 000 km, ITER musí pokles 150 milionů stupňů plazmatu k čtyřem stupňům kapalného helia zvládnout na 2 metrech! Další rekord, tentokrát celého známého vesmíru! Fyzika plazmatu uvnitř 23 000 tun oceli a 150 000 kilometrů supravodivých drátů! Víte, že ve Výzkumném centru Karlsruhe čeká na ITER uskladněno několik tun kokosových ořechů ze sklizně 2002 v Indonesii? Dřevěné uhlí ze slupek ořechů je zatím nejlepším absorbérem pro kryopumpy (vakuové pumpy).

ITER bude potřebovat vědce i inženýry. Není bez zajímavosti, že šance získat potřebnou kvalifikaci najdete i v České republice. Úzká spolupráce Fakulty jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT a Ústavu fyziky plazmatu AV ČR, v.v.i. vyústila kromě jiného do dvou projektů: semestrální kurs přednášek špičkových odborníků Fyzika a technika jaderného slučování a magisterské studium (první absolventi v roce 2009) Fyzika a technika termojaderné fúze. Praxi získávají diplomanti na školním tokamaku Golem na FJFI a doktoranti na moderním tokamaku COMPASS v ÚFP. COMPASS je desetkrát menší, ale především podobný ITER. COMPASS má všechny atributy moderního tokamaku až na supravodivé cívky: průřez výbojové komory ve tvaru písmene D, dodatečné ohřevy pomocí mikrovln a svazků neutrálních částic.

Závěr

Fuzní komunita pevně věří, že ITER bude úspěšný. Věřit musí, protože si málokdo dokáže představit, co by se stalo, kdyby ITER zklamal. Nastoupil by snad Polywell?

Je tu ještě jedna možnost. V osmdesátých letech se uvažovalo o hybridních reaktorech, které by ve výbojové komoře vyráběly fuzní neutrony a ty by v obalu ze štěpitelného materiálu vyráběly energii. Letos se objevily hned tři projekty, které by energetickými fúzními neutrony především likvidovaly nebezpečný odpad štěpných elektráren. Dva vycházely z tokamaků: Compact Fusion Neutron Source v Texaské universitě v Austinu a vlajkového zařízení Spojených států tokamaku DIII-D patřící General Atomic ze San Diega a jednoho laserového systému – Laser Inertial Fusion-Fission v Livermoru opírající se o nedávno spuštěný laserový gigant – NIF. Existuje i supravodivý stelarátor Wendelstein W7-X v Greifswaldu, dále Z facility – lineární pinč v Sandia National Laboratory a dále...opravdu, nemusíme mít obavy, že budoucnost fúze stojí a padá s ambiciózním tokamakem ITER.

Ing. Milan Řípa, Ph.D.,
Scientific Information and Popularization
Institute of Plasma Physics, Academy of
Sciences of the Czech Republic, v.v.i.,
ripa@ipp.cas.cz

GOLEM - třetí název druhého nejstaršího tokamaku na světě. TM-1 VČ fungoval do roku 1975 v Ústavu pro atomovou energii I. V. Kurčatova v Moskvě, od roku 1985 do 2006 pod názvem CASTOR v Ústavu fyziky plazmatu AV ČR v Praze a nyní slouží jako výukové zařízení na Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT v Praze.

The Sun helped mankind to understand the fusion of light atoms as a source of inexhaustible and the cleanest possible energy
The 1930s (Bethe, 1938) uniquely confirmed the existence of the combination thermonuclear process in the centre of the Sun, which converts one form of energy (mass) into another form of energy (movement and radiation). Only 9 years passed between the explosion of the fissile atom bomb (US, Hiroshima 1945) and the commissioning of the nuclear power plant (USSR, Obninsk 1954). When the sky above the Pacific Ocean was lit up by the explosion of a thermonuclear warhead (US, Marshall Islands, 1952), hardly anybody supposed that the development of the thermo nuclear power plant would continue for more than 50 years. The author of this article describes the principles and theory of thermonuclear fusion, describing existing research and development programmes and dealing in detail with the latest project – ITER. He also explores the possibility of using thermonuclear fusion for the disposal of radioactive waste from the fission of the nucleus in existing nuclear power plants.

По Рускы.....
xxxxxxxx xxxx x xxxxxxxxx xxxxxx xxx x xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx x x xxxxxxxx xxxxxxx xxx x xxxxxxxxxxxx xxxxxxx xxxxxxxx xxxxx xx xxxxxxxx xxxxxxxx xxxx x xxxxxxxxx xxxxxx xxx x xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx x x xxxxxxxx xxxxxxx xxx x xxxxxxxxxxxx xxxxxxx xxxxxxxx xxxxx xx xxxxxxxx xxxxxxxx xxxx x xxxxxxxxx xxxxxx xxx x xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx x x xxxxxxxx xxxxxxx xxx x xxxxxxxxxxxx xxxxxxx xxxxxxxx xxxxx xx xxxxxxxx xxxxxxxx xxxx x xxxxxxxxx xxxxxx xxx x xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx x x xxxxxxxx xxxxxxx xxx x xxxxxxxxxxxx xxxxxxx xxxxxxxx xxxxx xx xxxxxxxx xxxxxxxx xxxx x xxxxxxxxx xxxxxx xxx x xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx x x xxxxxxxx xxxxxxx xxx x xxxxxxxxxxxx xxxxxxx xxxxxxxx xxxxx xx xxxxxxxx xxxxxxxx xxxx x xxxxxxxxx xxxxxx xxx x xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx x x xxxxxxxx xxxxxxx xxx x xxxxxxxxxxxx xxxxxxx xxxxxxxx xxxxx xx xxxxxxxx