

Fúzi jader lehkých atomů, jako 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 (USA, Hirošima 1945) a zprovozněním atomové elektrárny (SSSR, Obninsk 1954) uplynulo pouhých devět let. Když ale nebe nad Pacifikem rozzářil výbuch vodíkové nálože (USA, 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

Energií jádra lze tedy uvolnit dvěma způsoby, přičemž slučování se vyznačuje všemi dobrými vlastnostmi, na které si vzpomenete - nevyčerpatelné zásoby paliva rovnoměrně rozloženého po Zemi, vnitřní bezpečnost reaktoru, neradioaktivní odpad bez skleníkových plynů, slabá vybušená 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 nabitě částice. Teprve na vzdálenosti srovnatelné s rozměrem atomu, převládnu přitažlivé jaderné síly nad obrovskou odpudivou Coulombovskou 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



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

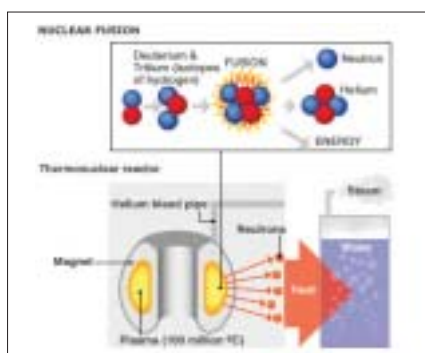
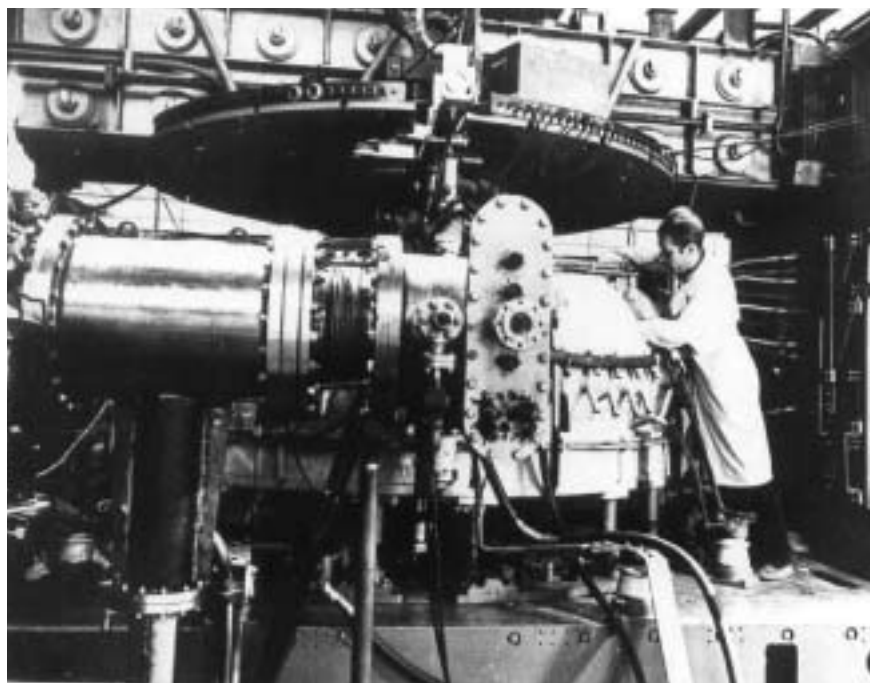


Schéma termojaderné elektrárny. (Zdroj: ITER organization)

transformuje v souladu s vztahem ekvivalence hmoty a energie $E = m \cdot c^2$ (Einstein, 1905) na pohybovou energii produktů reakce.

Tři skupenství hmoty obklopují lidský život odedávna, což umožnilo vědět 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 stávala 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. (Zdroj: ITER organization)

Urychlení

V roce 1932 v Cavendishově laboratoři za pomoci 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 proctví 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 elektrostatičké 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 Maxwelllova rozdělení používá monoenergetický svazek iontů. Pokud by byl tento přístup úspěšný, pak by „hrozila“ přímá přeměna fuzní energie na elektrickou, téměř „bez-neutronové“ 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 kritérium spojující teplotu T , hustotu n a dobu udržení energie daného typu plazmatu. $n\tau > \text{konst}(T)$

PRŮMYSLOVÉ ARMATURY PRO ENERGETIKU

- Regulační ventily Masoncilan®
- Pojistné ventily Consolidated®
- Vysokotlaké armatury PERSTA®
- Spojovací potrubí
- Autorizovaný servis průmyslových armatur



www.interfluid.cz

PARTNER VAŠICH ÚSPĚŠNÝCH PROJEKTŮ

Sídlo:

Moravia Systems a.s.
Brněnská 3497, 695 03 Hodonín
IČ: 269 151 89

HODONÍN:

tel: +420 518 344 111
fax: +420 518 321 122
e-mail: info@mtsystems.cz

PRAHA:

tel: +420 225 010 456
fax: +420 225 010 444
e-mail: intermos@intermos.cz



JSP Měření a regulace

Výrobce a dodavatel
měření a regulace
pro energetiku
a průmysl

JSP, s.r.o.
Raisova 547
506 01 Jičín
Česká republika

Tel: +420 493 760 811
Fax: +420 493 760 820
e-mail: jsp@jsp.cz
<http://www.jsp.cz>

- dodávky SKŘ "na klíč"
- úplný sortiment polní instrumentace
- projekty, dodávky, montáž, uvedení do provozu, servis
- snímače teploty, převodníky, jímky a další příslušenství

Unikátní publikace: **Proměny české energetiky**

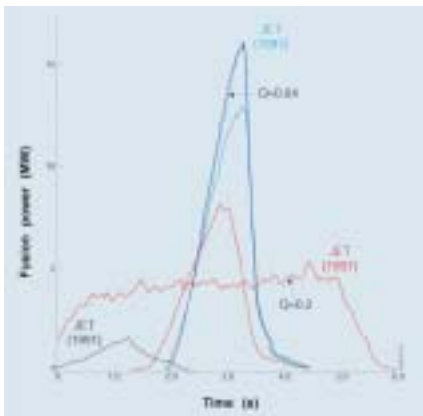
Představujeme vám unikátní publikaci, kterou vydal Český svaz zaměstnavatelů v energetice. Kniha je dílem **Ing. Miroslava Kubína, DrSc.**

Kniha se v osmi kapitolách zabývá postupným rozvojem československé elektrizační soustavy, popisuje vývoj jejích organizačních struktur a systémy jejího řízení i vývoj energetické legislativy. Autor nezapomíná ani na mezinárodní spolupráci v energetice a na vztah energie a životního prostředí. Je zde dokumentována i historie vývoje a výroby technických zařízení pro energetiku a postupné změny jejich technických parametrů, vývoj uhelných technologií i moderních zdrojů energie včetně vývoje jaderného výzkumu a jaderné energetiky. Jedinečná je stať o významných osobnostech, které se zasloužily o rozvoj, inovaci a spolehlivou funkci energetických systémů a jejich řízení, včetně významných pedagogů, kteří vychovali řadu špičkových energetických odborníků a podíleli se i na výzkumných pracích v oblasti energetického hospodářství.



Objednejte si publikaci **Proměny české energetiky** on-line na www.allforpower.cz

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. (Zdroj: ITER organization)

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

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

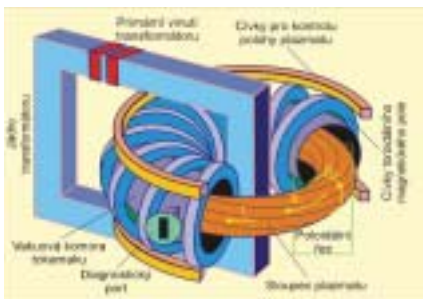


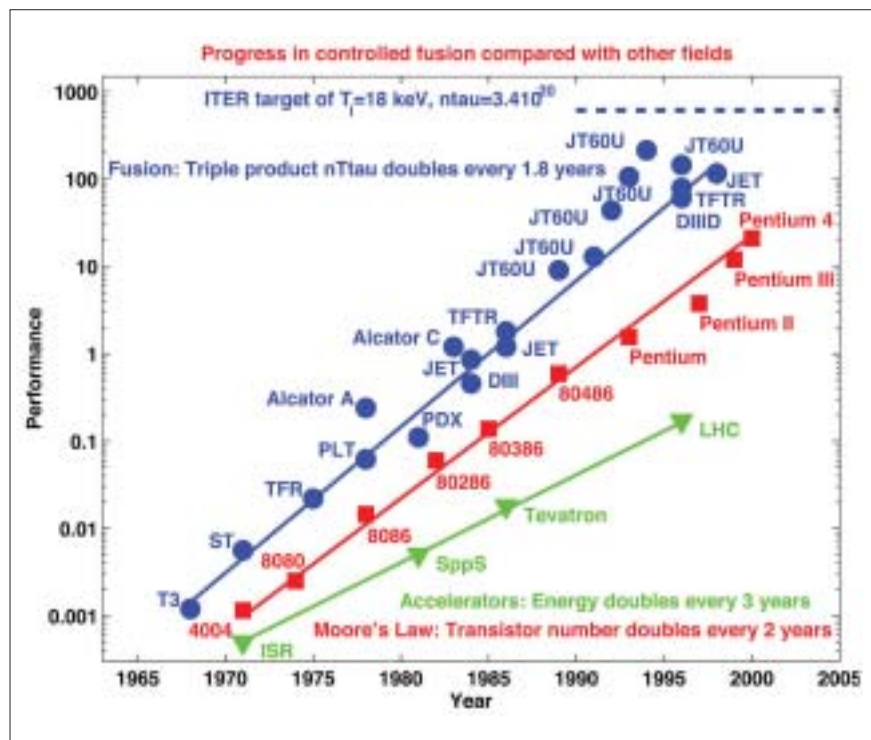
Schéma nejúspěšnějšího termojaderného zařízení – tokamaku (Торoidalная Камера и Магнитные катушки) - Sacharov, Tamm, Lavrentjev a Arcimovič. (Zdroj: ITER organization)



Reprezentant elektrostatického inerciálního udržení – zařízení Polywell WB-6 od společnosti EMC2 ze Santa Fe, USA. (Zdroj: EMC2)

Magnetické udržení pracuje od padesátých let minulého století s nejrůznějšími konfiguracemi magnetického pole, sloužící k izolaci horkého

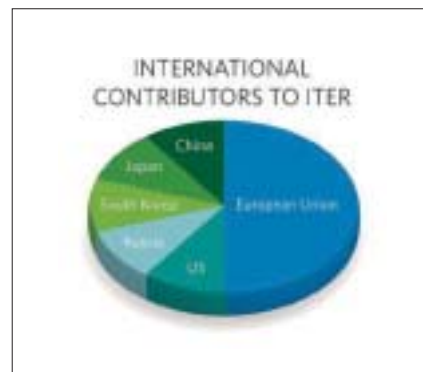
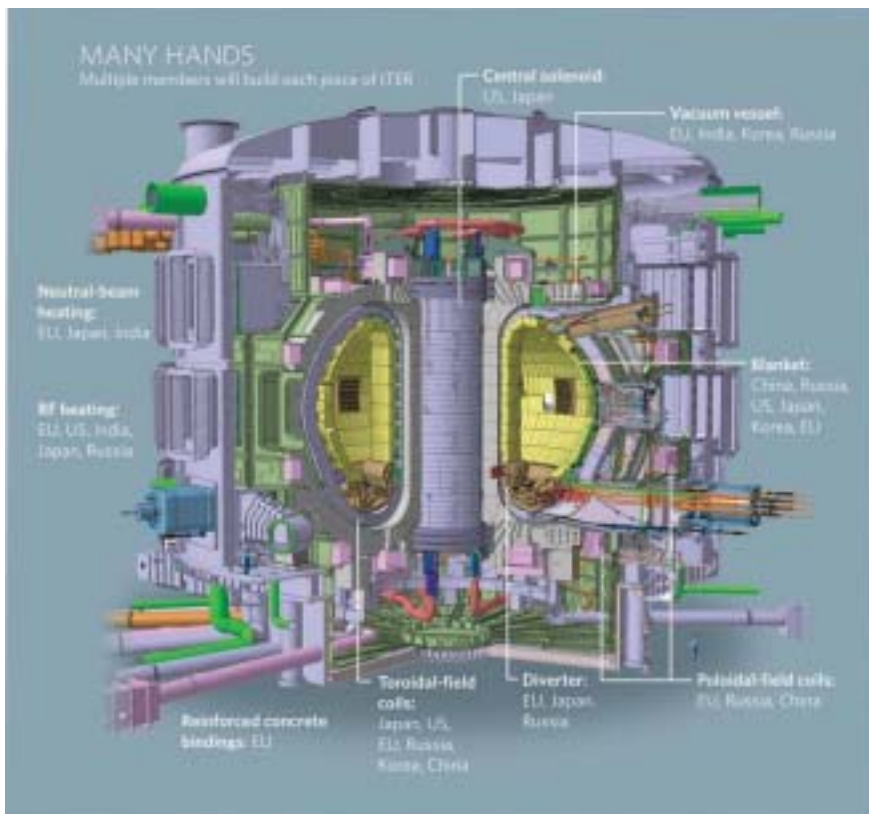
plazmatu od stěn výbojové komory. První fuzní neutrony předvedl theta pinč Scylla I (Los Alamos, 1958). Inerciální udržení muselo počkat na objev



Srovnání vývoje urychlovací energie, plošné hustoty tranzistorů a trojného součinu fúze. (Zdroj: ITER organization)



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. (Zdroj: ÚFP AV ČR, v.v.i.)



Rozdělení nákladů při stavbě mezinárodního tokamaku ITER. (Zdroj: ITER organization)

Lavrentěvem našel geniálního Sacharova, který se svým učitelem Tammem na počátku padesátých let předložili myšlenku tokamaku – transformátoru s jediným sekundárním závitem – proudem 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 chtěli

Schéma mezinárodního tokamaku ITER s vyznačenými komponenty a jejich dodavateli. (Zdroj: ITER organization)

laseru, jako zdroje energie dobře fokusovatelné na palivový terčik. 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 10⁶ GW, dobou pulsu několik nanosekund v Národním zapalovacím zařízení (NIF), spuštěném začátkem roku 2009 v Livermoru.

největších evropských laserových systémů ve společné laboratoři Ústavu fyziky plazmatu AV ČR, v.v.i. a Fyzikálního ústavu AV ČR, v.v.i.

Bližší 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

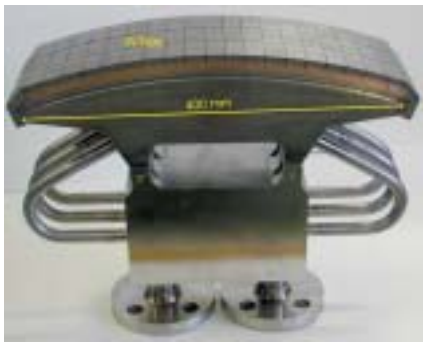
Optimisté předpokládají, že NIF dosáhne prvního milníku jaderné fúze – „zapálení plazmatu“, kdy fuzní zisk vyrovná výkon ohřevu. V Evropě se staví obdobný Laser Megajoule v Bordoux a připravují se ryze civilní zařízení HiPER a ELI. Poslední se dokonce zdá, že míří do Čech. V České republice funguje PALS – jeden z deseti



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. (Zdroj: ITER organization)



Schéma mezinárodního tokamaku ITER



Kupole divertoru pokryta wolframem. (Zdroj: ITER organization)

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

ITER, s fúzním výkonem 500 MW, desetkrát větším než přikon, by měl odpovědět především na několik technologických otázek, které se uplatní při stavbě vlastního reaktoru pro fúzní 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

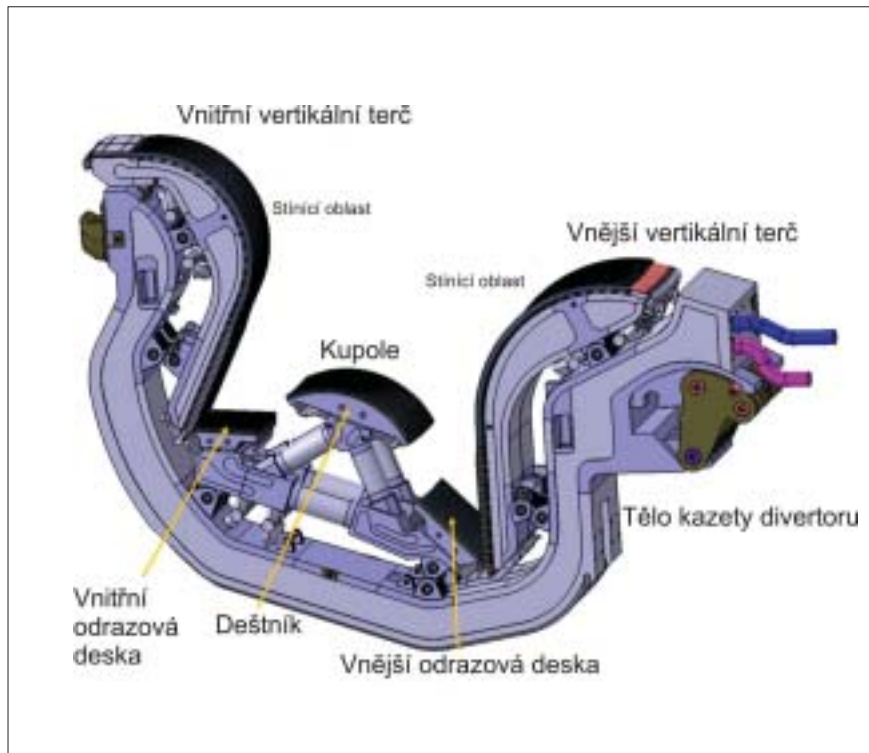


Schéma divertoru, který v tokamaku ITER bude čistit plazma a regulovat jeho výkon. Divortor je nejvíce tepelně namáhanou částí výbojové komory – 20 MW/m². (Zdroj: ITER organization)

v Cernu (170 t, 1 320 t, 20,5 kA, 4,1 T). Dnes už pro ITER pracují nejkvalitnější průmyslové firmy. Jejich koordinaci řídí Jacques Farineau, který ve stejné funkci stavěl Airbus 380. Mimochodem ITER má stokrát více součástek než Boeing 747.

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 Indonésii? Dřevěné uhlí ze slupek ořechů je zatím nejlepším materiálem pro adsorpční 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 cívkové průřez výbojové komory ve tvaru písmene D, dodatečně ohřevy pomocí mikrovln a svazků neutrálních částic.

Závěr

Fúzní 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,



Moderní tokamak COMPASS původem z anglického Culham Science Centre v Ústavu fyziky plazmatu AV ČR. (Foto: Milan Řípa)

keré by ve výbojové komoře vyráběly fúzní neutrony a ty by v obalu ze štěpitelného materiálu vyráběly energii. Vloni 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 univerzitě v Austinu a vlnajkového 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, CSc.,

Vědecko-technické informace a popularizace
Ústav fyziky plazmatu Akademie věd
České republiky, v.v.i.,
řipa@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. (Foto: Milan Řípa)

The Sun helped mankind to understand the fusion of light atoms nuclei 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 fission 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 thermonuclear 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 – tokamak ITER. He also explores the possibility of using thermonuclear fusion for the disposal of radioactive waste from the fission of the nuclei in existing nuclear power plants.

Фузия легких атомов, как источник неисчерпаемой энергии – эту идею человечеству подсказало Солнце

Тридцатые годы 20-го столетия (Ганс Альбрехт Бете, 1938 г.) однозначно подтвердили процесс термоядерного синтеза в центре Солнца, который изменяет одну форму энергии (вещество) в другую форму энергии (движение и излучение). Между взрывом расщепленного атома в бомбе (США, Хиросима, 1945 г.) и пуском атомной электростанции (СССР, Обнинск, 1954) прошло всего лишь 9 лет. Но когда небо над Тихим океаном озарил взрыв водородной бомбы (США, Маршалловы острова, 1952 г.), мало кто предполагал, что развитие и введение термоядерной электростанции будет длиться более 50-ти лет. Автор статьи описывает принципы и теорию термоядерного синтеза, рассказывает о существующих в данный момент научно-исследовательских программах и подробнее занимается новейшим проектом – ТОКАМАК ITER. Рассматривает и проблему использования термоядерного синтеза для ликвидации радиоактивных отходов, которые возникают при расщеплении ядра на современных ядерных электростанциях.

all·for **power** 2010
conference

25. – 26. 11. 2010

Clarion Congress Hotel Prague, Freyova 33, Praha 9
mezinárodní odborná konference
Výstavba jaderných a klasických elektráren



Organizátor:

AF Poweragency

manažer konference: **Norbert Tuša**, AF POWER agency a. s., www.afpower.cz