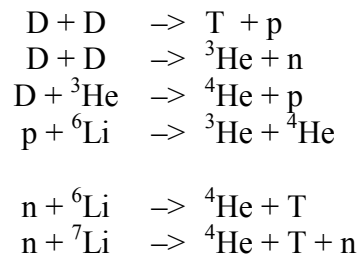


Termojaderná fúze

Jan Podmajerský, Tomáš Kurtin, Martin Fibrich

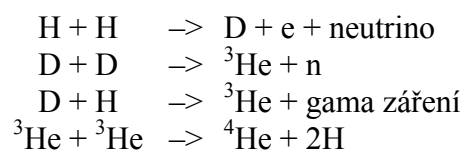
Podle všech teorií se zdá, že svět bude muset v druhé polovině tohoto století čelit energetické krizi. Situace je navíc komplikována globálním oteplováním, které pramení z naší závislosti na fosilních palivech. Je jen málo možností, jak tento stav řešit. Prakticky se zdá být nezbytné objevit nějaký nový zdroj energie, nebo stávající významně inovovat.

Jednou z nejpravděpodobnějších variant je termojaderná fúze, jejíž technologie je již značně propracovaná a nyní stojíme před stavbou prototypu termojaderného reaktoru.

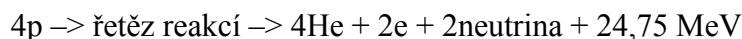


Princip se zdá být jednoduchý. Při sloučení dvou jader lehkých prvků dojde k hmotnostnímu úbytku vyváženému uvolněním energie. Problémem je, že jádra jsou kladně nabitá a při přiblížení se silně odpuzují. Nejschůdnější cestou k uskutečnění fúze je zahřátí na takovou teplotu, aby se k sobě jádra tepelným pohybem přiblížila na potřebnou vzdálenost. Látka zahřátá na tuto dostatečně vysokou teplotu je již ve stavu plazmatu, které je pro své zvláštní vlastnosti označováno jako čtvrté skupenství hmoty. Plazma je na Zemi značně neobvyklé, ale ve vesmíru je tomu jinak.

Většinu sluneční hmoty tvoří vodík. Při teplotě 13 mil °C je vodík ve stavu plazmatu. Sluneční hmota se tedy skládá ze směsi jakýchsi plynů tvořených volnými elektrony a „holými“ jádry vodíku, helia a jiných prvků. Vysoký tlak gravitačních sil stlačuje tuto směs horkých plynů tak, že mají obrovskou hustotu (větší než kterákoliv látka na Zemi). Za těchto podmínek (obrovského tlaku, hustoty, teploty) může na Slunci docházet k následujícím reakcím:



Celý popsany řetěz těchto jaderných reakcí se nazývá proton – protonový řetěz. Schematicky ho můžeme zapsat:



Proton – protonový řetěz ovšem není jediný způsob, kterým se na Slunci uvolňuje jaderná energie. Druhým způsobem je tzv. uhlíko – dusíkový cyklus, který je složitější.

Termojaderná fúze úzce souvisí i se vznikem hvězdy. Prvním počátečním stadiem rodící se hvězdy je oblak mezihvězdné hmoty – GLOBULE. Hustota látky v globuli je nesmírně nízká. Působením tlaku okolního záření se oblak hmoty pomalu smršťuje. Postupně se začínají uplatňovat i přitažlivé síly gravitační => plyný zárodek se začíná zahřívát. Po určité době (milióny nebo desítky miliónů let) dosáhne střed hvězdy dostatečně vysoké teploty, aby v něm mohly začít probíhat některé termonukleární reakce. Začíná vlastní život hvězdy.

Stadia vývoje hvězdy:

1. Teplota asi 1mil °C – ve hvězdě „hoří“ nejprve jádra D, Li, Be, B – jádra těchto prvků se spojují s protony na jádra helia mnohem snáze, než protony samy navzájem. Ve hvězdě je jich však poměrně málo => jejich zásoba se brzy vyčerpá.
2. Teplota asi 10mil °C – ve středu hvězdy začíná probíhat proton – protonový řetěz a při dalším zvýšení teploty i uhlíko – dusíkový cyklus. V tomto stadiu vydrží hvězda velmi dlouho, protože většinu mezihvězdné hmoty, ze které hvězda vznikla, tvoří vodík.
3. Teplota asi 100mil°C – poměrně pevná jádra helia se spojují na ještě pevnější a těžší => vznikají jádra uhlíku.
4. Teplota několik set miliónů °C – v nitru hvězdy se tvoří z heliových jader nejen uhlík, ale i kyslík, hořčík, křemík, síra, argon...
5. Při teplotě asi 3 miliard °C je syntéz jader uvnitř hvězdy tak prudká, že dojde ke gigantické termonukleární explozi => hvězda se stává supernovou. Syntézou vznikají jádra ještě těžší, jako železo apod. termonukleárním výbuchem vymrští hvězda většinu své hmoty do mezihvězdného prostoru, zůstane z ní jen malý, slabě zářící zbytek, tzv. bílý trpaslík. V tomto stadiu nemá hvězda vlastní zdroje energie => postupně vychládá a nakonec zhasne.

Termojaderná fúze je na Zemi obtížně uskutečnitelná a první výzkumy se proto týkaly Slunce. Na konci 20. let vznikla myšlenka, že Slunce „hoří“ v důsledku jaderných slučovacích reakcí.

V polovině 30.let (1934) Rutherford, Oliphant a Harteck jako první experimentálně dokázali existenci fúzní reakce. V následujících letech byl výzkum utajován a byl veden na vojenské bázi. Tento proces vyústil v pokusný výbuch tzv. vodíkové bomby (1952), ale v té době bylo již na světě velmi perspektivní zařízení s názvem TOMAMAK (**T**oroidalnaja **K**Amera i **M**Agnytyje **K**atuški – Andrej Sacharov a Igor Tamm).

Ve Velké Británii byl výzkum prováděn v Harwellu na zařízení ZETA, z něhož bylo počátkem r.1958 oznámena produkce jaderných fúzních neutronů. Později bylo toto odvoláno, jelikož se zjistilo, že neutrony vznikají zcela jiným mechanismem.

Až do roku 1958 byl veškerý výzkum týkající se jaderného slučování přísně utajován.

Zlom znamenala konference v Ženevě 1958. Skončilo utajování a výzkum termojaderné fúze se stal na dlouhá léta jediným pojítkem mezi Východem a Západem.

Po přelomových experimentech na zařízení tokamak v Ústavu atomové energie v Moskvě se značná část výzkumů soustředí právě na ně a řada dalších tokamaků byla postavena po celém světě (JET – Evropa, TFTR – USA, JT-60U – Japonsko).

I když tokamaky nejsou jediná zařízení na nichž probíhá výzkum jaderné fúze, nelze popřít, že právě tato jsou nejbližší komerčnímu využití. Podívejme se na základní vlastnosti jednotlivých typů experimentálních zařízení:

Tokamak

Magnetické pole se skládá ze dvou částí: sada cívek rozložených podél prstencové nádoby vytváří silné toroidální pole, proud tekoucí plazmatem indukuje slabší poloidální pole a výsledné siločáry tak mají tvar šroubovice. Elektrický proud tekoucí plazmatem je indukovan působením transformátoru a zároveň plazma ohřívá. Avšak v důsledku použití transformátoru nemůže pracovat v jiném než pulsním režimu. Pro potřebu trvalého provozu se vyvíjejí jiné (neinduktivní) metody generace proudu. Zatím však nejsou příliš účinné.

Při provozu tokamaku může docházet a dochází k poruchám značně ovlivňujícím fúzní reakci. Například jev nazývaný disrupce (přetržení sloupce plazmatu) - je-li při daném proudu plazmatem překročena jistá možná hustota, dochází k přetržení (rozpadu) prstence plazmatu. Udržení plazmatu

je náhle přerušeno a elektrický proud klesne na nulu během několika tisícín sekundy. Plazma je přitom vyvrhováno na stěnu, což vede ke značným mechanickým a tepelným rázům.

Stelarátor

Magnetická konfigurace stelarátoru je zcela vytvářena sadou cívek, bez jakéhokoliv elektrického proudu tekoucího plazmatem, což má za následek vznik osově nesymetrického pole. Nejen siločáry pole, ale i všechny cívky mají šroubovitý tvar a plazma i nádoba mají tudíž tvar šroubovicově zvlněného prstence.

Výhody stelarátorů:

- nedochází k přetržení sloupce plazmatu (neprotéká proud, není se co přetrhnout)
- plazma zůstává stabilní, není nutné řídit jeho polohu
- nepotřebují proud tekoucí plazmatem a tedy ani transformátor, který by jej generoval a jsou tedy vhodné pro provoz v kontinuálním režimu.

Pinče se zpětným polem

Pinč se zpětným polem je, stejně jako tokamak, osově symetrické zařízení, které potřebuje k udržení plazmatu velký toroidální proud. Rozdíl oproti tokamakům je v mnohem menším poměru velikostí toroidálního a poloidálního magnetického pole (v pinčích je jejich velikost zhruba stejná). Proudem v plazmatu je generováno nejen poloidální pole, ale i část toroidálního. To způsobuje, že směr toroidálního magnetického pole ve vnější oblasti plazmového prstence a v centru plazmatu je opačný. V ideálním případě by pinče mohly dosáhnout zapálení jen s použitím Jouleova ohřevu, tedy bez jakéhokoliv dodatečného ohřevu, aniž by navíc potřebovaly silné vnější magnetické pole. Obecně pracují pinče s plazmatem o vyšším tlaku a při nižších dobách udržení než tokamaky.

O tom, jak je obtížné přeměnit teorii v praxi svědčí i dosavadní osud projektu ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor). ITER je navrhován jako tokamak a to tak, aby jej bylo možno postavit na území kterékoli Smluvní strany. Fáze Koncepčního návrhu začala v roce 1988 a pokračovala do roku 1990. Fáze Technického návrhu začala v červenci 1992 na základě smlouvy podepsané Smluvními stranami ITERu (tj. Euratom, Japonsko, Rusko, USA), a měla trvat do r.1998. K projektu ITER se později připojila i Kanada. Smluvní strany ITERu ustavily Radu ITERu, jež je zodpovědná za celkový směr Technického návrhu. Její sídlo je v Moskvě. Náklady na stavbu a technické zázemí donutily USA a částečně Rusko stáhnout se z projektu. Další ranou pro ITER se zdá být výběr vhodného místa, který se nesmírně protahuje.

Existuje názor, že vše z technického hlediska je již zvládnuto, nebo tomu tak brzy bude, a jediné problémy, kterým je nutno čelit jsou ty politické. Snad budou veškeré komplikace zdárně odstraněny a projekt ITER bude moci nerušeně pokračovat, stejně jako rozvoj celé jaderné energetiky.

Literatura:

1. Luděk Pekárek – Termonukleární energie
2. František Žáček – Současný stav a perspektivy řízeného termojaderného slučování v tokamacích
3. Steve Fetter – Energy 2050 (The Bulletin of the Atomic Scientists – July/August 2000, www.puaf.umd.edu/papers/fetter.htm)
4. www.ipp.cas.cz