



Středoškolská technika 2015

Setkání a prezentace prací středoškolských studentů na ČVUT

Termonukleární reaktory

Štěpán Klas

Gymnázium Zikmunda Wintra Rakovník

Náměstí Jana Žižky 186, 269 01 Rakovník

1 Resumé

Práce se zabývá problematikou fúzních jaderných reaktorů a dalšími tématy s nimi souvisejícími s cílem shrnout dostupné informace z různých zdrojů ve stručné formě, které bude možné dále upravovat na základě zacílení na určitou část veřejnosti.

2 Anotace

Tato práce se zabývá problematikou termionukleárních fúzních reaktorů, v první kapitole konkrétně fúzní reakcí přírodní pro celkové porozumění reakce, která následně probíhá v reaktoru, možnostech, výhodách či nevýhodách a potenciálu této reakce. V druhé kapitole se práce zabývá fúzí umělou s ohledem na udržení plazmatu ve třetí kapitole problematikou paliva a ve čtvrté skutečnými reaktory, které jsou či v blízké době budou funkční. Cílem je shrnout dostupné informace a případně dále upravit práci do srozumitelné formy pro cílové publikum. V cílové podobě by měla práce být srozumitelná minimálně pro veřejnost, která je obeznámena středoškolskou fyzikou. Může být dále zjednodušena pro širší publika

3 Klíčová slova

Fúze, deuterium, tritium, lithium jako palivo, magnetické udržení, toroidální, poloidální, inerciální, fúzní reaktor, fúzní palivo, energie.

4 Obsah

1	Resumé	1
2	Anotace	2
3	Klíčová slova	3
5	Úvod	5
6	Přirozená fúzní reakce	6
6.1.1	Fúze lehkých jader ve hvězdách	6
6.1.2	Fúze těžších prvků ve hvězdách.....	9
6.1.3	Použitelnost hvězdných fúzních řetězců v našich podmínkách	10
7	Umělá fúze.....	11
7.1	Magnetické udržení a tokamak	13
7.1.1	Konstrukce tokamaku.....	14
7.1.2	Nestability v plazmatu tokamaku	15
7.1.3	Ohřev plazmatu v tokamaku	16
7.1.4	L-mod a H-mod tokamaku.....	17
7.2	Inerciální udržení.....	17
7.2.1	Ohřev a stlačení terčíku.....	18
7.2.2	Přímé a nepřímé zapálení.....	19
7.2.3	Struktura terčíku.....	20
8	Problematika paliva	20
8.1	Deuterium	21
8.2	Tritium	21
9	Současná aktivní zařízení a plánovaná zařízení	22
9.1	ITER.....	23
9.2	JET.....	23
9.3	CASTOR/GOLEM	24
9.4	NIF.....	24
10	Závěr	25
11	Seznam literatury	26

5 Úvod

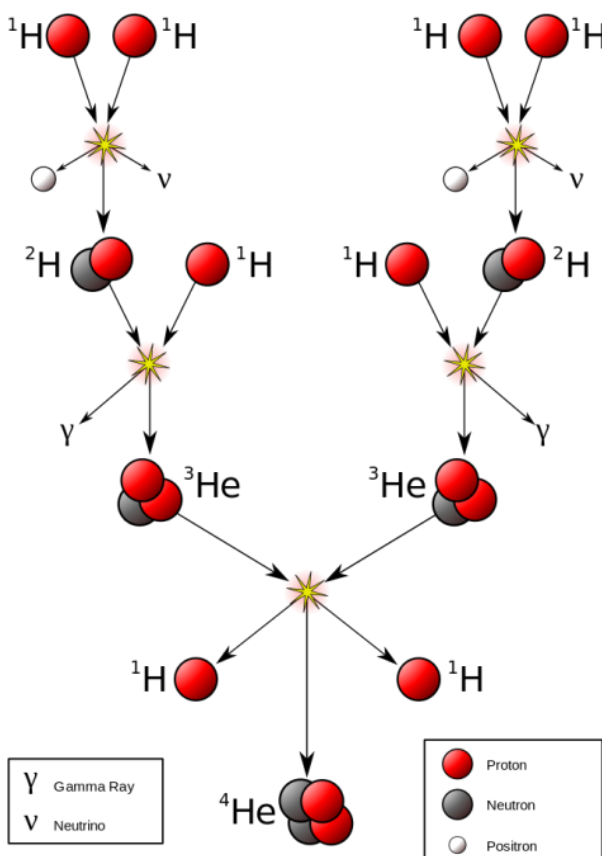
Tato ročníková práce se bude zabývat problematikou termonukleárních fúzních reaktorů, jejich paliva, principu funkce i mnoha dalším stránkám, které s daným tématem souvisí. Samotná práce má za cíl sumarizovat dostupné informace o fúzních reaktorech a informovat. Toto téma je zatím poměrně málo známé, neboť je tato technologie stále v raném stádiu vývoje, avšak vykazuje velice slibné pokroky. Cílem je tedy shrnout dostupné informace z dostupné literatury a dalších zdrojů ve stručné srozumitelné formě pro středoškolské publikum. Z výsledné práce by mělo být patrné na jaké úrovni je současný výzkum, využitelnost této technologie, dostupnost a vlastnosti paliva a další zásadní informace potřebné pro ucelený úsudek.

6.1.1 Fúze lehkých jader ve hvězdách

Termonukleární fúzní reakce je reakce, při které se spojí jádra dvou atomů a vytvoří se nové, těžší jádro. Tato reakce probíhá za vysokých tlaků a teplot, které pomáhají překonat síly, které tyto dvě jádra od sebe odpuzují, a přiblížit je k sobě natolik, aby bylo možné působení silné interakce mezi jádry a díky tomu následné spojení jader. Takto veliké tlaky a teploty se v přírodě vyskytují pouze na jednom místě a to v jádrech hvězd, kde k fúzní reakci dochází. Ta produkuje energii, která udržuje teplotu Slunce a navíc vyzařuje obrovské množství energie do okolního prostoru. Energie, která je vyzářena je obrovská, tak obrovská že by ji nedokázala uvolnit žádná chemická reakce. Původ této energie je ve vazebné energii, která je vyjádřena pomocí rovnice A. Einsteina $E=mc^2$. Hmotnost vstupních reaktantů a

produktu je rozdílná, přesto hmota nemůže zmizet, tento deficit se mění na energii právě podle zmíněné rovnice. Nové jádro je lehčí, vyžaduje menší energii na svoje vazby.

Obrázek 6-1
Znázornění řetězce reakcí probíhajících ve Slunci bez
příměsí těžších prvků



Slunce je tvořeno převážně vodíkem, takže hlavní část produkované energie pochází právě z reakcí probíhajících mezi jádry vodíku, ty se pojí v helium-4. Helium-4 má však atomovou hmotnost menší, než součet čtyř jader vodíku, které helium ve Slunci postupně vytvoří.

¹ Relativní atomová hmotnost vodíku [dále jen $A_r(\text{H})$] je 1,00797 a relativní atomová hmotnost helia-4 [dále jen $A_r(\text{He})$] je 4,0026. Výpočtem $4 \times A_r(\text{H}) - A_r(\text{He})$ zjistíme rozdíl hmotnosti těchto prvků, tedy

$$4 \times 1,00797 - 4,0026 = 0,029284$$

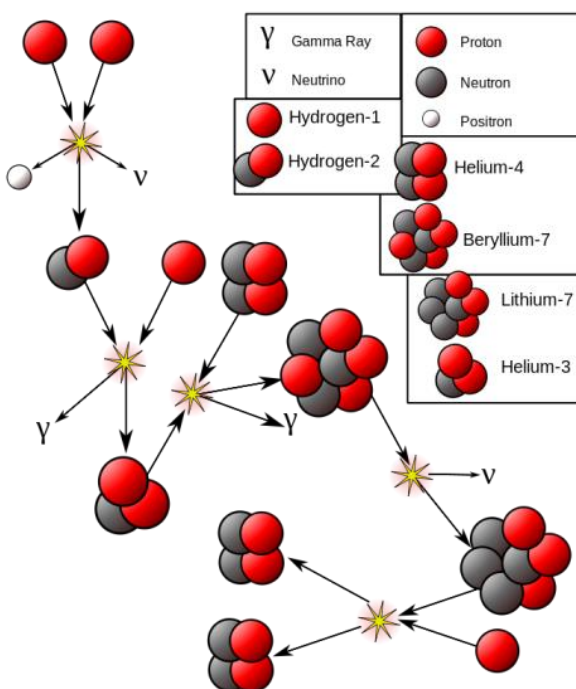
¹ The proton-proton chain dominates in stars the size of the Sun or smaller. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-12-10]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_fusion#mediaviewer/File:FusionintheSun.svg

což je po převedení (vynásobení atomovou hmotnostní konstantou) asi 4.8620×10^{-29} kg. Hmotnost ale nemůže zmizet, musí se tedy přeměnit v něco jiného, v tomto případě v energii podle Einsteinovy rovnice:

$$4.8620 \times 10^{-29} \text{kg} \cdot c^2 = 4.3697476 \times 10^{-12} \text{J}$$

Tato vyprodukovaná energie je dost veliká na to, aby umožnila fúzi dalších jader. Hmotnost, která se v této reakci přemění na energii je miniaturní, ale právě díky rovnici, kde se tato hmotnost vynásobí rychlostí světla na druhou, a množstvím reakcí, které se ve Slunci dějí najednou, nabývá tento maličký rozdíl hmotností hvězdných rozměrů.

Fúze ve Slunci není jednoduchá a probíhá v řetězcích reakcí, z nichž jeden je znázorněn na obrázku (Obrázek 6-1). Dle obrázku je ale také vidět, že k heliu-4 vede několik kroků, ve kterých vznikají další částice. Kromě samotného záření energie také reakce vyprodukují antičástice elektronu - pozitron - ten se anihiluje s elektronem přítomným v jádru, a neutrino. Hmotnost neutrino je téměř nulová a je dnešními přístroji neměřitelná. Zbytek rozdílu hmoty přechází v energii, pouze neutrino z reakce uniká a je detekovatelné, byť těžší, s využitím speciálních detektorů.

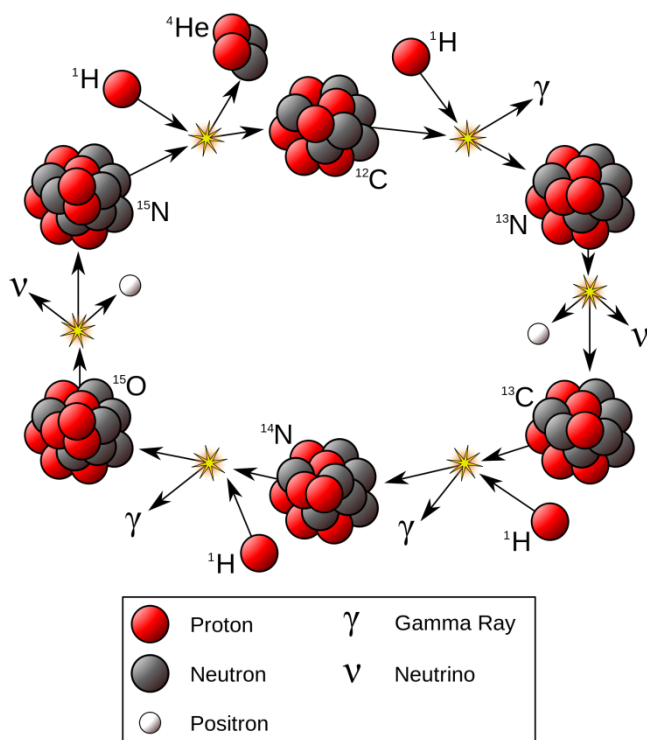


² Tento řetězec reakcí (Obrázek 6-1) není jediný, který ve Slunci probíhá. Znázorněný řetězec probíhal převážně v prvních hvězdách, které byly vytvořeny převážně z vodíku. Dnešní hvězdy dalších generací jsou znečištěny dalšími prvky, proto jsou v nich další reakční řetězce. Není však vyloučeno, že i zde probíhají reakce podle dříve zmíněného p-p řetězce.

Obrázek 6-2
Znázornění řetězce reakcí probíhající ve hvězdách s příměsí těžších prvků

² Znázornění pokročilé fáze jaderného slučování. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-12-10]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Termonukle%C3%A1rn%C3%AD_f%C3%BAze#mediaviewer/File:Proton-Proton_II_chain_reaction.svg

Obrázek 6-3
 Znárodnění reakce probíhající ve hmotnějších hvězdách s využitím uhlíku-12 jako katalyzátoru.



Další příklad řetězce probíhajícího ve hvězdách dalších generací je řetězec obsahující beryllium-7 a lithium-7, který je znázorněn zde (Obrázek 6-2). S fúzí těžších prvků nastává s postupně narůstajícím protonovým číslem problém. Čím větší je protonové číslo, tím větší je potřebná energie na překonání odpuzivých sil a získání energie je z toho důvodu menší. U železa je reakce natolik náročná na energii, že už není nadále možné se získáním jádra spojovat, u fúze těžších prvků se tedy energie pouze pohlcuje.

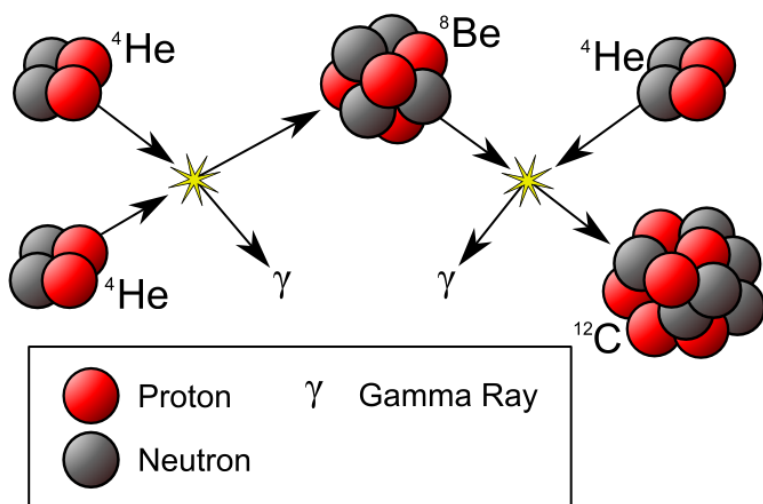
Proto prvky s větším protonovým číslem, než má železo, vznikají pouze při supernově.

Poslední příklad řetězce, kterým se bude práce zabývat je řetězec zahrnující uhlík-12 a proton. Tento fúzní řetězec probíhá ve hvězdách masivnějších než naše Slunce, pro tento řetězec je tedy třeba vyšších teplot a vyšší hustoty. Vstup a výstup je stejný jako v předešlých reakcích, vstoupí 4 protony a vystoupí jádro helia-4 a příslušná energie. Zajímavostí této reakce je, že používá uhlík-12 jako katalyzátor. Uhlík tedy do reakce vstoupí a je využit v reakcích a poté zase z reakce vystoupí jako uhlík-12. V samotné reakci se mění na dusík-13, uhlík-13, dusík-14, kyslík-15, dusík-15 a rozpadem zpět na uhlík-12 jak je znázorněno v obrázku (Obrázek 6-3)³. Uvolněná energie je rovna energii uvolněné v proton-protonovém řetězci.

3 The CNO cycle dominates in stars heavier than the Sun. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-12-10]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_fusion#mediaviewer/File:CNO_Cycle.svg

6.1.2 Fúze těžších prvků ve hvězdách

Pro dokreslení kompletního obrázku se bude práce ještě zabývat fúzí těžších prvků. Po přeměně většiny vodíku na hélium se u hmotnějších hvězd proces fúze, na rozdíl od lehčích hvězd jako je naše Slunce, nezastavuje a pokračuje dál spojováním atomů hélia v těžší prvky.



Obrázek 6-4
Trojný alfa proces
Fúze dvou jader helia-4 na berilium-8, které se sfúzuje se dalším heliovým jádrem a vytvoří uhlík-12

Činí tak díky procesu zvanému trojný alfa proces. Tento proces je velmi nepravděpodobný, ale s uvažováním astronomického měřítka času se stále děje. Spojením dvou jader helia-4 se vytvoří nestabilní jádro beryllia-8, jenž životnost menší než 10^{-17} sekundy, po rozpadu se dělí zpět na dvě jádra helia-4. Avšak pokud již hvězda spálila většinu svého paliva, pak se jádro začne hroutit a vytvoří podmínky, kdy se beryllium-8 tvoří rychleji, než se stačí rozpadat. Tím pádem je v jádře hvězdy nezanedbatelné množství beryllia-8, které se může dále spojit s jádrem helia-4 a vytvořit stabilní jádro uhlíku-12. (Obrázek 6-4) ⁴ Po vytvoření uhlíku v jádře hvězdy se začnou tvořit za zvyšujících se teplot a hustot těžší prvky spojováním jader helia-4. Tyto reakce produkují se zvyšujícím se protonovým číslem méně energie, protože roste jejich stabilita. Hvězda tyto prvky také spaluje rychleji a poslední prvky, které hvězda ještě touto fúzí dokáže vytvořit je železo-56, kobalt a nikl. Prvky těžší než železo vznikají supernovou, kde se fúzí energie pouze uloží. Supernova dodá určitou energii, která je potřebná pro fúzi, proběhne fúze a vyzáří se energie fúzí vytěžená. Vytěžená energie je však menší než energie dodaná. energii, kterou dnes získáváme ze štěpných reaktorů je tedy pouze pozůstatkem těchto masivních hvězd, které do štěpných paliv energii při supernově uložily.

⁴ Triple-alpha process. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-12-01]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Triple-alpha_process

6.1.3 Použitelnost hvězdných fúzních řetězců v našich podmínkách

Fúzní reakce probíhající ve hvězdách se však ukázaly pro naše poměry na Zemi nepoužitelné, neboť hvězdy jsou schopny vytvořit a hlavně udržet ve svém jádře obrovskou teplotu a tlak. Tak vysoké hodnoty těchto dvou veličin jsou nezbytně nutné pro zmíněné reakce, které jsou na tyto hodnoty velice citlivé. Proto se tyto reakce vyskytují opravdu pouze v jádrech hvězd, protože ve větších vzdálenostech od jádra se teplota a hustota snižují až do bodu, kde fúze není nadále možná. Například na 10% hodnoty poloměru hvězdy klesá výkon fúzních reakcí na 20% výkonu v jádře a na 20 % poloměru již žádné reakce neprobíhají pro nedostatečnou teplotu a hustotu.

Podmínky ve hvězdě nelze v našich podmínkách úplně napodobit, neboť hvězda využívá speciálního způsobu udržení plazmatu (tj. i teploty a hustoty), a to je udržení gravitační, samotná gravitační síla je vůči elektromagnetické síle, jenž brání fúzi, zanedbatelná, avšak hmotnost hvězd je obrovská a umožňuje tak udržet plazma v daných podmínkách na obrovskou dobu a udržení samotné nebere energii vyprodukovanou fúzí, gravitační vlastnosti nejsou ovlivněny. Gravitační udržení není možné v našich podmínkách ze zjevných důvodů napodobit. Navíc ve hvězdách probíhá fúze srážkou daných reaktantů přesně daným způsobem. Pravděpodobnost takové srážky je velice malá, ale díky vysokému počtu částic se tyto srážky dějí. Nízká pravděpodobnost srážek je důvodem dlouhého života hvězd. Můžeme jí vděčit za to, že hvězdy vydávají energii postupně, neboť kdyby byla pravděpodobnost vysoká, hvězdy by se spíše podobaly obrovským vodíkovým bombám, které by vyzářily energii v krátkém intervalu času a pak už jen vychládaly. Všechno palivo by se spálilo v jeden moment. V našich podmínkách, kdybychom chtěli tento model napodobit, by bylo nutné udržet plazma ve velkých časových úsecích, teplotách i hustotách, což není energeticky lukrativní.

Naše Slunce jako celek je v poměru výkon/objem velice neúčinné, dosahuje pouze 270 wattů na metr krychlový objemu. Požadavky pro komerční elektrárnu jsou v řádech megawattů na metr krychlový.

Slunce nám tedy může sloužit pouze jako inspirace, způsob udržení musíme hledat jiný. Fúzní řetězce se musí hledat jiné taktéž, neboť tyto reakce jsou závislé na stavbě jádra, na hustotě a dalších faktorech. Dále se také ukázalo, že jsou i reakce, kde je potřeba méně energie pro fúzi a tím pádem jsou vhodnější pro naše podmínky, kde si oproti hvězdám můžeme vybírat palivo.

7 Umělá fúze

Díky mnoha nevýhodám dříve zmíněných postupů bylo zapotřebí vyvinout nový způsob udržení plazmatu, neboť potřebná teplota plazmatu převyšuje veškeré technické limity současných látek i slitin, musíme ihned vyloučit jakékoliv použitelné udržení, které by využívalo kontakt materiál-plazma. Veškeré známé látky by se při kontaktu s plazmatem okamžitě vypařily a zároveň by kontaktem plazma zchladlo a tepelná energie by unikla. Plazma se tedy nesmí ničeho dotýkat, musí být uzavřeno ve vakuu a pokud možno neznečištěné. Tento problém se začal řešit v polovině 20. století. V historii výzkumu a vývoje je mnoho přístupů k udržení, práce se bude pro stručnost zabývat pouze dnešními přístupy, které vykazují slibné výsledky a případně jejich předchůdci.

Pro průběh úspěšné reakce je potřebné splnit určité podmínky, jednu z nich nazýváme podmínkou zapálení. Pokud je splněna podmínka zapálení (ignition), pak reaktor produkuje větší energii, než sám pohlcuje a je tedy v teorii energeticky soběstačný, nepotřebuje dodatečný ohřev. Plazma musí být drženo v určité hodnotě hustoty, v našem případě počtu částic na metr krychlový n , na určité teplotě T vyjádřenou v kiloelektronvoltech „Elektronvolt -značka eV- je jednotka práce a energie mimo soustavu SI. Odpovídá kinetické energii, kterou získá elektron urychlený ve vakuu napětím jednoho voltu.“⁵ (tato hodnota musí být v rozsahu 10-20 keV, aby tato rovnice byla platná a určitém čase udržení τ_E (doba udržení není pouze doba, kdy jsme schopni fyzicky držet plazma ale i tepelně, doba udržení je definována jako celková energie dělená rychlostí, kterou z reaktoru energie uniká), přičemž chceme, aby byla energie potřebná k dosažení tohoto kritéria co nejmenší, aby bylo zapálení efektivní.

$$nT\tau_E > 3 \times 10^{21} m^{-3} \cdot keV \cdot s$$

⁵ Elektronvolt. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-12-13]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektronvolt>

Tato rovnice je odvozena z původního Lawsonova kritéria s tím, že nepočítá s tím, že k ohřevu plazmatu se využívá 33% fúzní energie, ale pouze 20%, je tedy přísnější, co se týče ztrát tepla. Další je otázka paliva. V našich podmínkách nelze využít proton-protonového řetězce (dále jen p-p) protože slučování jejich jader je složité a dostat je do tak krátké vzdálenosti od sebe, aby se k sobě svázaly silnou interakcí (asi 10^{-15} metru) je energeticky

Reakce	Energie
${}^2\text{H}_1 + {}^2\text{H}_1 \rightarrow {}^3\text{He}_2 + {}^1\text{n}_0$	3,13 MeV
${}^2\text{H}_1 + {}^2\text{H}_1 \rightarrow {}^3\text{H}_1 + {}^1\text{H}_1$	4,03 MeV
${}^2\text{H}_1 + {}^3\text{H}_1 \rightarrow {}^4\text{He}_2 + {}^1\text{n}_0$	17,6 MeV
${}^1\text{H}_1 + {}^3\text{H}_1 \rightarrow {}^4\text{He}_2$	19,9 MeV
${}^2\text{H}_1 + {}^3\text{He}_2 \rightarrow {}^4\text{He}_2 + {}^1\text{H}_1$	18,4 MeV
${}^2\text{H}_1 + {}^6\text{Li}_3 \rightarrow {}^4\text{He}_2 + {}^4\text{He}_2$	22,4 MeV

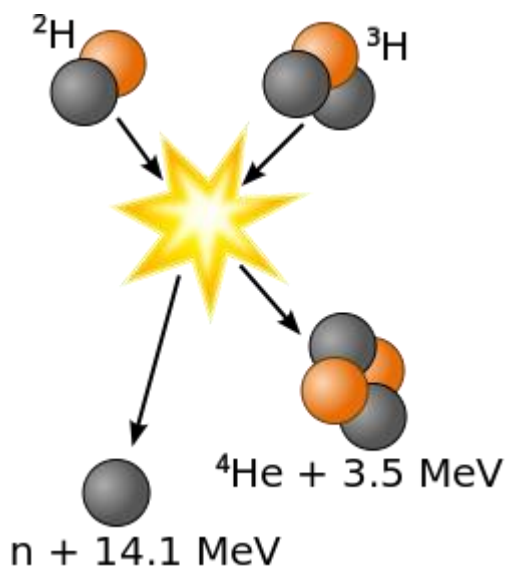
Obrázek 7-1 Tabulka s fúzními řetězci a energiemi, které vyprodukuje.

deuterium tritium (DT)

se ukázala být z hlediska potřebné energie a na sloučení a energie produktů nejpříznivější pro naše záměry (Obrázek 7-2 ⁶). Tabulka ukazuje ⁷ (Obrázek 7-1) fúzní reakce s uvedenými hodnotami energie, které vyprodukuje. Avšak experimenty s DT směsí paliva nejsou tak časté a nepoužívají se všude, ale

pouze na zařízeních k tomu připravených. DT reakce totiž lehce aktivuje materiály, které potom září. Toto záření je nesrovnatelně méně škodlivé, než ve štěpných reaktorech a odezní po nesrovnatelně kratší době, tj. maximálně sto let, kdy zbývá pouze zanedbatelné množství záření. Většinou se pracuje s deuteriem nebo obyčejným vodíkem, případně heliem pro záměrné utlumení fúze. Experimenty bez tritia se zaměřují na různé aspekty problematiky fúzních reaktorů jako například diagnostika.

neefektivní. Cesta zavedla výzkumníky k izotopům vodíku, deuteriu a tritiu. Experimentovalo se s deuterium-deuterium fúzí, ale fúze



Obrázek 7-2 Diagram DT fúze

⁶ Diagram DT fúze. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-12-03]. Dostupné z: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/3b/Deuterium-tritium_fusion.svg

⁷ Tabulka energií. Osel.cz [online]. [cit. 2014-12-03]. Dostupné z: <http://www.osel.cz/popisek.php?popisek=10907&img=1228259814.jpg>

7.1 *Magnetické udržení a tokamak*

Jednou z možností udržení plazmatu, které bylo navrženo, je udržení magnetickým polem. Toto magnetické pole se generuje elektrickým proudem, který je veden samotným plazmatem uvnitř toroidu. Toto pole odtrhává plazma od stěny nádoby a stlačuje ho. Plazma v tomto udržení je ale vysoce nestabilní, kroutí se a vychyluje, dokud se nedotkne stěny a nezchladne. Dále se také zaškrcuje, dokud nedojde k úplnému přeškrčení, kdy se plazma oddělí a tím pádem zanikne i elektrický proud a magnetické pole jemu náležící, což má za následek zánik plazmatu. Tyto projevy nestability se dají do jisté míry omezit tím, že se okolo toru navine cívka takzvaného toroidálního vinutí, které následně generuje toroidální proud (tj. ve směru kruhu uvnitř dutiny toru), který stabilizuje plazma. Toto stabilizační pole je slabé v poměru s polem, které stlačuje plazma směrem od stěny komory (tzv. poloidální pole). Takto sestavená zařízení se nazývají toroidální pinče.

Další přístup k udržení plazmatu v toroidu je princip stellarátoru. Stellarátor pracuje na podobném principu jako toroidální pinče, které využívají pro udržení plazmatu pouze poloidální magnetické pole a stabilizační cívky, avšak s hlavním rozdílem v tom, že samotné plazma je drženo toroidálním polem, které tvoří toroidální cívky. Plazmatem neprotéká proud. Toto samotné však nestačí a magnetické pole musí být dále upraveno spirálovým vinutím pod cívkami toroidálního pole, které vytvářejí stabilizační poloidální pole. Stellarátory jako zařízení jsou velice nákladné díky složité konstrukci. V dnešní době zůstávají pouze jako experimentální zařízení s téměř nulovou šancí na použitelnost v budoucím energetickém průmyslu.

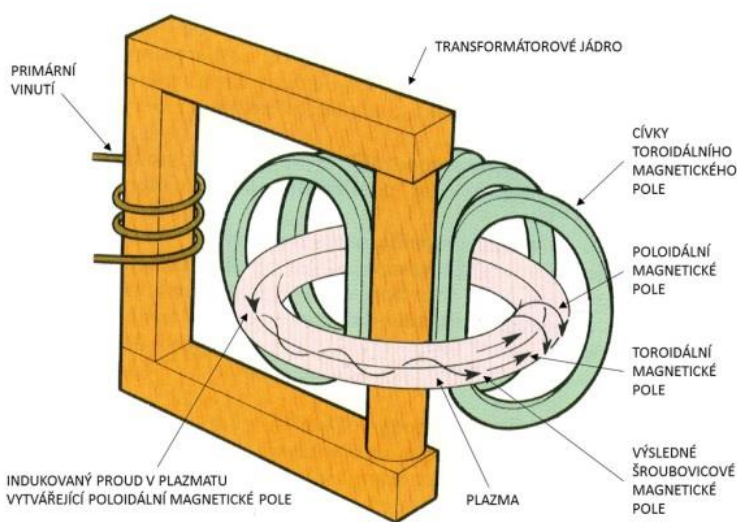
Úspěšnějším příbuzným předchozích zařízení s magnetickým udržením je tokamak. Tokamak je taktéž zařízení toroidálního tvaru, který používá jak vnější toroidální cívky, tak poloidální pole vytvořené tokem elektrického proudu ionizovaným plazmatem. Toto poloidální pole je využíváno na zkroucení toroidálního pole do šroubovice ve směru toru a díky součtu těchto sil následnou stabilizaci plazmatu uvnitř toru tokamaku. Konstrukcí se zdá být velice podobný dříve zmíněnému toroidálnímu pinči, ale liší se použitím výrazně silnějšího toroidálního magnetického pole oproti poli poloidálnímu. „Toroidální pole dané vnějšími cívkami je obvykle asi desetkrát silnější než pole poloidální, které je vytvářeno elektrickým proudem v plazmatu.“⁸ Toroidální pole samotné má za účel stabilizaci plazmatu,

⁸ MCCRACKEN, Garry M a Peter E STOTT. Fúze: energie vesmíru. Vyd. 1. Praha: Mladá fronta, 2006, s. 164. ISBN 80-204-1453-3.

zatímco pole poloidální samotné fyzické udržení plazmatu a tudíž zamezení kontaktu se stěnou nádoby. Přítomnost kombinace těchto polí nedává tolik prostoru k fluktuacím plazmatu uvnitř toru a následným nestabilitám z toho plynoucích, které by komplikovaly udržení a snižovaly účinnost a dobu udržení plazmatu.

7.1.1 Konstrukce tokamaku

Samotná konstrukce tokamaku je jednodušší než konstrukce stellarátoru, která vyžaduje drahé cívký a extrémní přesnost. Původ toroidálního magnetického pole leží v cívkách vinutých okolo toru tokamaku, kterými protéká proud, a díky tomu generují příslušné magnetické pole. Poloidální magnetické pole má původ v elektrickém proudu, který protéká ionizovaným plazmatem. Plazma je vlastně sekundárním vinutím transformátoru, jehož jádro je uloženo ve středu tokamaku. Primární vinutí je vyvedeno mimo a je skrz něj přiváděn elektrický proud. Celá konstrukce je znázorněna na obrázku. (Obrázek 7-3 Schéma tokamaku) Toto poloidální magnetické pole je běžně asi desetkrát slabší než pole toroidální, jak jsem již dříve zmínil v citaci.



Obrázek 7-3 Schéma tokamaku

7-3 Schéma tokamaku), kde průřez kopíruje tvar cívký toroidálního magnetického pole. Tyto úpravy umožnily zavedení limiterů a divertorů.

Původní tvar průřezu tokamakem byl kruhový, avšak další konstrukční prvky s sebou přivedly nutnost změnit tvar vakuové komory, kvůli implementaci oněch prvků. Tvar přešel z kruhu na tvar oválný, zploštělý ze strany jádra transformátoru, tedy od středu. Tvar je vidět na obrázku (Obrázek

Limiter je místo uvnitř vakuové komory tokamaku, kde se počítá díky konstrukci magnetických polí s kontaktem plazmatu s komorou a taky tyto místa mohou být pro tento předpoklad upravena, aby tento nápor vydržela. Tímto limituje objem plazmatu v tokamaku. Materiálově se používaly dříve buď těžké kovy, jako je například wolfram nebo molybden, avšak s těmito je problém, protože jejich atomy mají velký počet elektronů, které

musí uvolnit, aby mohly přejít do skupenství plazmatu. Vytržení elektronů vyžaduje velké množství energie a tím pádem zvyšuje ztráty a snižuje efektivitu, neboť i samotný kovový iont zpomaluje reakci. Dnes se ale využívá lehčích prvků jako uhlík nebo beryllium, které neprodukuje takové ztráty, ale nesou si s sebou řadu dalších problémů. Zatím neexistuje ideální volba materiálu pro limity.

Divertor je místo v tokamaku (často ve spodní části), kam se záměrně vychýlí siločáry a tento prostor je určen pro kontakt s plazmatem. Na rozdíl od limiteru se odchýlené plazma nevrací zpět do uzavřeného plazmatu ve středu tokamaku, neboť má cestu zpět ztíženou úzkou škvírou mezi prostorem divertoru a hlavním prostorem toroidu a také tím, že proud plazmatu sráží částice zpět do divertoru, pokud se dostanou přes škvíru ven. Díky tomu se částice sráží s komorou mimo hlavní část plazmatu a neznečišťují tak plazma, ale jsou ihned odčerpávány pryč z komory.

Celkově však tyto dva prvky tokamak komplikují stavbu, zvyšují cenu, ale také snižují účinný objem komory pro plazma. Konečným argumentem, který zavedl potřebu divertoru v budoucích zařízeních, je fakt, že shořelé palivo se musí odčerpat z reaktoru, neboť by reakci zpomalovalo. Tuto funkci divertor splňuje, neboť je plazma z divertoru odčerpáváno.

7.1.2 Nestability v plazmatu tokamaku

Díky fundamentálním vlastnostem plazmatu je udržení velice komplikované a vzniká řada nestabilit, které udržení dělají obtížnějším, či reakci zastaví za případně destruktivních vlivů na zařízení. Plazma se snaží z magnetického pole vždy uniknout, jakákoliv výchylka exponenciálně narůstá. Nestability však nelze vnímat jako katastrofické scénáře srovnatelné s roztavením palivových tyčí štěpného reaktoru, pouze jako jev, který je uzavřen uvnitř reaktoru a reakci buď komplikuje, nebo přímo zastaví. Jedna z těchto nestabilit se nazývá disrupce.

Disrupce je dramatický jev, kdy tokamakovým plazmatem přestane téct elektrický proud, tím dojde ke ztrátě poloidálního magnetického pole a okamžité ztrátě plazmatu. Tomuto jevu však předchází dobře známý řetězec událostí v tokamaku.

V první fázi neobvykle vzroste hustota nebo proud, což není jednoduché sledovat, po nabytí kritické hodnoty přechází události do druhé fáze, kdy po dobu řádově desítek milisekund rostou fluktuace magnetického pole v plazmatu. Poté se dostáváme do třetí fáze, kdy se během několika milisekund hroučí udržení a teplota strmě klesá. Tvar plazmatu se

zplošťuje a rychlá změna indukčnosti vyvolá impulz záporného napětí, které až o dva řády převyší běžné tokamakem používané napětí v plazmatu. Jako poslední vyhasne proud, který se zhroutí k nule rychlostí až 100MA/s. „Disrupce vedou k mohutným silovým rázům na vakuovou komoru, přičemž velikost takových sil roste s velikostí zařízení. Na velkých tokamacích byly změřeny síly odpovídající stovkám tun.“⁹ Budoucí elektrárny musí s tímto nepříznivým scénářem počítat a tak jejich vakuové nádoby musí být konstruovány na síly nejméně o řád vyšší, než jaké může disrupce v dané zařízení vyvinout.

Jedna z hodnot, která ovlivňuje to, kdy se dostaví disrupce je parametr q . Parametr q je hodnota, která označuje strmost stáčení magnetických siločar. Nazývá se také bezpečnostní faktor. Udává počet ovinutí magnetické siločáry v toroidálním směru toru potřebný k dokončení oběhu ve směru poloidálním. Takže vysoké q značí malou strmost a naopak malé q vysokou strmost, přičemž nestabilita začíná převládat při $q < 3$ na okraji plazmatu. Pokusy se zvládnutím disrupcí zatím dokázaly pouze nepatrně prodloužit třetí fázi. Disrupce je třeba vyřešit, neboť by finalní elektrárna měla fungovat bez disrupcí. V případě, že se řešení nenajde, se uvažuje o zabudování mechanismu, který reakci zastaví (ochladí, díky čemuž se plazma neškodně rozplyne) ještě před pádem proudu a zabrání tak jakémukoliv poškození díky rázům.

7.1.3 Ohřev plazmatu v tokamaku

Plazma v tokamaku je nejdříve nutné ohřát, aby byla reakce možná. Prvním principem ohřevu je ohřev ohmický tj. elektrickým odporem plazmatu, takto se zahřívala starší experimentální zařízení. Avšak při vyšších teplotách nastává s tímto typem ohřevu problém. Plazmatu s vyšší teplotou klesá odpor, takže čím větší teplotu plazma dosáhne, tím větší úsilí je třeba vynaložit na další ohřev. Maximální teploty dosažené tímto ohřevem jsou menší než 50 milionů stupňů, což je pro plazma potřebné v tokamacích málo. Další ohřevy nejsou z technických důvodů možné.

Potřebný prostor pro dodatečný ohřev vyplnily dvě metody, metoda ohřevu svazkem neutrálních částic a metodou ohřevu absorpcí rádiových vln v plazmatu.

Ohřev svazkem neutrálních částic využívá výkonné svazky velmi rychlých neutrálních atomů deuteria nebo jiných izotopů či prvků. Tato metoda se označuje NBI (*Neutral Beam*

⁹ MCCRACKEN, Garry M a Peter E STOTT. *Fúze: energie vesmíru*. Vyd. 1. Praha: Mladá fronta, 2006, s. 167. ISBN 80-204-1453-3.

Injection). Energie svazků musí být stanovena pro daný objem plazmatu a danou hustotu plazmatu. Typická energie svazků ohřívající dnešní velké tokamaky je asi 120 keV, v budoucích elektrárnách se ale počítá až s energií 1 MeV.

Druhá metoda ohřevu využívá absorpce rádiových vln v podobném stylu, jako si v mikrovlnné troubě ohříváme jídlo, částice pohltnou energii vysílanou zdrojem a tím se rozkmitají (zahřejí). Rozdíl oproti mikrovlnným troubám je hlavně ve výběru frekvence daných vln, protože plazma nejlépe absorbuje energii na jiné frekvenci, než se kterou pracuje mikrovlnná trouba. Výběr frekvence záleží na rezonanční frekvenci iontů a elektronů, na které nejlépe pohlcují záření, na které tedy jdou nejjednodušeji rozkmitat. Frekvence pro ohřev iontů se pohybuje okolo frekvencí používaných rádiem a televizemi (proto rádiové vlny), zatímco elektrony nejlépe absorbují delší frekvence, obvykle používané u radarových zařízení. Kombinací obou frekvencí lze dosáhnout velmi flexibilního systému ohřevu, který dokáže regulovat teplotu plazmatu.

7.1.4 L-mod a H-mod tokamaku

Využití kombinace divertoru a ohřevu neutrálními svazky se podařilo na konci 20. století dosáhnout zvláštního stavu v tokamaku ASDEX. Zjistilo se, že za určitých podmínek se vlastnosti plazmatu přeskupí a plazma se najednou začne chovat odlišně. Tento stav se začal objevovat i na dalších tokamacích s divertory, byl pozorován i na tokamacích s limity, ale daleko obtížněji. Nový stav byl pojmenován H-mod (od *High confinement*) za účelem odlišení od běžného uskupení plazmatu L-mod (od *Low confinement*). H-mod s sebou přináší zefektivnění udržení, obvykle dvojnásobné. Pro dosažení H-modu je nutné, aby výkon ohřívající plazma přesáhl danou minimální hranici. Tento mod není snadné udržet a pronásleduje ho nestabilita zvaná ELM, která opakovaně vede ke ztrátám plazmatu. ELM znamená v překladu mod omezený na okraj. Z názvu lze odvodit, že se jedná o nestabilitu projevující se na okraji plazmatu. Tato nestabilita vede opakovaně, byť nepravidelně, ke ztrátám plazmatu.

7.2 Inerciální udržení

Princip inerciálního udržení se podobá principu vodíkové bomby, zažehnout fúzi dřív než se stačí palivo rozlétnout. Palivo tedy drží setrvačnost, (inercie) proto inerciální udržení. Paliva je třeba mnohem menší množství než v případě vodíkové bomby z důvodu nežádoucí destrukce okolí a způsob stlačení a ohřevu se také musí lišit od principu vodíkové bomby, kde se fúze zapalovala štěpnou atomovou bombou.

Pro inerciální fúzi platí podobná kritéria jako pro fúzi magnetickou. Zatímco magneticky držená fúze spoléhá na dlouhé doby udržení při nižších teplotách a nižších tlacích, inerciální fúze je omezena velice krátkou dobou udržení (desítky miliardtin sekundy) a musí tento fakt vynahradit vyšší teplotou fúze i mnohem větší hustotou plazmatu.

Paliva se využívá pouze několik miligramů uzavřených v malém terčíku.

7.2.1 Ohřev a stlačení terčíku

Nejprve bylo udržení inercií pouze teorií, protože neexistoval způsob jak ohřát a stlačit terčík natolik rychle, aby stačila proběhnout fúze. Vše se změnilo s vynálezem laseru. Laser dokázal soustředit obrovskou energii do jednoho bodu. Laserové paprsky soustředěné do jednoho bodu, což je v našem případě peleta paliva, jsou schopné stlačit palivo až tisícinásobně oproti normálnímu stavu. Hustota terčíku v tuto chvíli přesahuje hustotu olova za normálních podmínek. Docílí toho odpařením svrchní vrstvy pelety, která díky zákonu zachování hybnosti začne tlačit na materiál uvnitř a tak ho stlačovat a zároveň ohřívat.

Problém je to, že pokud na terčík vypálíme laserovým paprskem pouze z jednoho bodu, terčík vystřelí ve směru opačném, protože se začne obal odpařovat pouze na jedné straně, což vyústí v odpálení terčíku směrem opačným, než ze kterého jsme vystřelili laserem.

Tento problém se řeší využitím většího množství laserů, které pálí na terčík z více stran tak, aby se terčík stlačoval rovnoměrně. Tento způsob zapálení klade také vysoké nároky na stejnorodost kapsle, protože sebemenší odchylka může vyústit ve větší nestabilitu, která by zamezila zapálení paliva.

Bod zapálení v kontextu inerciální fúze je chvíle, kdy terčík začne hořet fúzní reakcí od středu ven, na rozdíl od magnetického udržení, kdy tento bod značí chvíli, kdy fúzní reakce udržuje sama extrémní teplotu plazmatu.

Výkon prvních laserů byl nedostatečný, ale jejich vývoj šel a jde stále rychle kupředu a umožňuje konstrukci stále výkonnějších systémů. Dnešní odhady energie, kterou musí laser dodat, se pohybují v hodnotách, které přesahují jeden milion joulů. Pamatujme, že tuto energii musí dodat v extrémně krátkém pulsu. Takovýmito požadavkům odpovídají pouze dnešní nejvyspělejší lasery, které svým zázemím bez problému zaplní plochu o velikosti hangáru pro dopravní letadla. Taková zařízení se skládají z mnoha rovnoběžných svazků, které je třeba spustit v jeden okamžik a namířit tak, aby na terčík působili rovnoměrně.

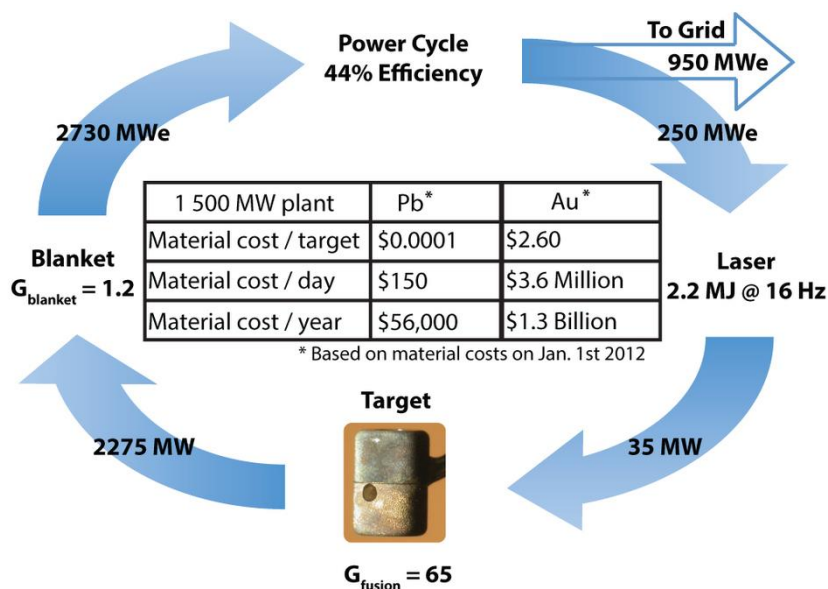
Laserů se používá mnoho typů a stále se vyvíjí, světlo některých je nutno modifikovat, aby dokázaly ohřát peletu uvnitř oblaku plazmatu, některé vlnové délky světla totiž plazma stíní a další zase procházejí skrz daleko lépe. Lasery produkují různé frekvence s ohledem na jejich konstrukci. Některé jsou často i vysoce neúčinné, u těchto laserů je účinnost okolo 1%.

7.2.2 Přímé a nepřímé zapálení

Vzhledem k vysoké náročnosti na přesnost výroby terčíku, který se využívá při přímém zapálení, tj. přímém cílení svazků laserů na peletu paliva, byla vyvinuta i další metoda zapálení, takzvaná metoda nepřímého zapálení. Lasery při přímém zapálení musí dodávat energii rovnoměrně s odchylkou menší než 1%. Taková to přesnost je drahá a náročná.

¹⁰Pro účel zjednodušení rozptřeni výkonu laserů byla vyvinuta experimentální metoda tzv. nepřímého zapálení. V této metodě jsou svazky zaměřeny na stěnu experimentální dutinky zvané hohlraum, což je německý termín pro dutinu. Nejsou zaměřeny na samotný terčík, který je umístěn uvnitř této dutiny. Tím, že svazky dopadají na stěnu terčíku, jenž je vyroben z těžkého kovu (často zlato), povrch dutinky odpaří a vytvoří tak

Obrázek 7-4 Diagram materiálních nákladů provozu fúzní elektrárny za použití Au/Pb terčíků při frekvenci spalování 16Hz. (ceny z 1.1 2012)



¹⁰ Lead (Pb) Hohraum: Target for Inertial Fusion Energy. *Nature.com* [online]. 14 March 2013 [cit. 2014-12-10]. Dostupné z: <http://www.nature.com/srep/2013/130314/srep01453/full/srep01453.html>

husté plazma, které transformuje paprsek laseru na měkké rentgenové záření, které se odráží od stěn dutiny a tímto se rovnoměrně rozprostře po dutině a rovnoměrně tlačí na kapsli. Záření zasahuje terčik tak často a ze všech směrů, že se jakékoliv rozdíly způsobené původní konfigurací laserů mizí. Měkké rentgenové záření také lépe ohřívá terčik, neboť pronikají hlouběji do plazmatu okolo terčíku. Část energie se sice během přeměny laseru na měkké rentgenové záření ztrácí, ale tato ztráta je vynahrazena rovnoměrným ohřevem terčíku. Oba způsoby jsou stále předmětem výzkumu.

Materiál, ze kterého se hohlraum skládá, je také téma hodné zmínění. V experimentálních podmínkách se využívá zlato pro své materiálové vlastnosti a snadnou výrobu, manipulaci a vysokou účinnost v přeměně laserových svazků na měkké rentgenové záření. Ovšem v komerční elektrárně by bylo vysoce neekonomické využívat zlaté hohlrauby, proto se také experimentuje s využitím olova, byť to s sebou nese další problémy, které je nutné řešit.¹¹

7.2.3 Struktura terčíku

Další problematikou více než hodnou zmínění je struktura terčíku s palivem. Jako materiál terčíku slouží buď umělá hmota, nebo plast. Někdy se využívají i složitější mnohavrstvé terčíky, ve kterých se střídají vrstvy materiálu ve snaze zvýšit účinnost fúze. Uvnitř terčíku je umístěno malé množství deuterium tritiové směsi, která je poté při nastřelení lasery stlačena odpařující se svrchní vrstvou. Spotřeba terčíků bude v případě celé elektrárny obrovská, proto se jejich výrobní procesy drží na minimálních nákladech. Počítá se s frekvencí spalování několik kapslí za sekundu v případě fúzní elektrárny.

8 Problematika paliva

Pro potřeby fúze se jako palivo počítá pro samotnou fúzi s izotopy vodíku ${}^2_1\text{H}$ - deuterium a ${}^3_1\text{H}$ – tritium (někdy zvané tricium). Deuterium je na rozdíl od tritia stabilní a jeho výskyt je asi jedna částice deuteria na 7000 částic obyčejného vodíku, tedy 0.0156% všeho vodíku na

¹¹ Lead (Pb) Hohraum: Target for Inertial Fusion Energy. *Nature.com* [online]. 14 March 2013 [cit. 2014-12-10]. Dostupné z: <http://www.nature.com/srep/2013/130314/srep01453/full/srep01453.html>

Zemi.¹² Tritium je nestabilní a má poločas rozpadu 12.32 let.¹³ Rozpadá se na helium-3 beta rozpadem.

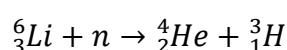
8.1 Deuterium

Deuterium se získává z vody elektrolýzou, kde se sbírá voda těžká (obsahující aspoň jeden atom deuteria v molekule vody). Cena deuteria by byla v porovnání s jinými náklady na fúzi zanedbatelná, jelikož je vcelku snadně dostupnou surovinou v porovnání s tritiem. Deuterium se totiž běžně v přírodě vyskytuje ve formě těžké vody. Všechna voda v oceánech může poskytnout až 10^{15} tun deuteria¹⁴, což je pro potřeby fúze více než dostačující.

8.2 Tritium

Tritium je, co se získávání týče, složitější. V přírodě se přirozeně nevyskytuje pro jeho poločas rozpadu 12 let a je jen několik způsobů jak tritium účinně vytvořit. První možnost je získávání tritia ze štěpných reaktorů. Štěpné reaktory totiž vyzářují neutrony, které se někdy s vodou, která se využívá jako moderátor a chladící kapalina, srazí a někdy, byť s malou pravděpodobností, spojí v izotop vodíku buď na deuterium, nebo tritium (záleží na typu používané vody). Některé reaktory využívající těžkou vodu jako moderátor mají takovou výtěžnost tritia daleko větší než lehkovodní reaktory. Velkým zdrojem tritia je například kanadský těžkovodní reaktor CANDU.¹⁵ Takovýto způsob získávání tritia však není do budoucna použitelný, neboť by to znamenalo přímou závislost fúzní elektrárny na štěpné a tím pádem i na jeho palivu (uran aj.).

Dalším způsobem získávání tritia je rozpadem lithia-6 srážkou s neutronem, tedy



¹² Deuterium. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-12-10]. Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/Deuterium#Production>

¹³ Tritium. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-12-10]. Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/Tritium>

¹⁴ MCCRACKEN, Garry M a Peter E STOTT. *Fúze: energie vesmíru*. Vyd. 1. Praha: Mladá fronta, 2006, s. 68. ISBN 80-204-1453-3.

¹⁵ CANDU reactor. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-12-10]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/CANDU_reactor

Samotný zdroj neutronů má být, krom počátku, reaktor sám, lithium-6 by mělo být v obalu, kde se bude měnit na tritium, které se bude jímat.

Zásoby lithia-6 jsou poměrně velké. Je to izotop stabilní. Nejběžnější izotop lithia je lithium-7, které tvoří 92,41 % pozemských zásob lithia. Lithium-6 tvoří pouze 7,59 % všech pozemských zásob.¹⁶ Celkové světové zásoby lithia činní 13 000 000 tun¹⁷, tedy $1,3 \times 10^{10} \text{ kg}$ z toho lze vyvodit, že celkové množství lithia-6 na zemi je $1,3 \times 10^{10} \cdot \frac{7,59}{100} \text{ kg}$, tedy 986 700 000 kg lithia-6, ze kterého je dále možné vyrábět tritium. Lze tedy vyvodit, že zásoby nejsou malé a při daleko větší účinnosti na kg hmoty, než má běžné palivo, by vydržely zásoby na mnohá tisíciletí.¹⁸

9 Současná aktivní zařízení a plánovaná zařízení

V současné době se experimentuje hlavně s inerciálním udržením a tokamakovým magnetickým udržením, Vznikají zařízení čistě experimentálního rázu a ještě se nepodařilo dosáhnout výsledků, které by byly uspokojivé pro fúzní elektrárnu.

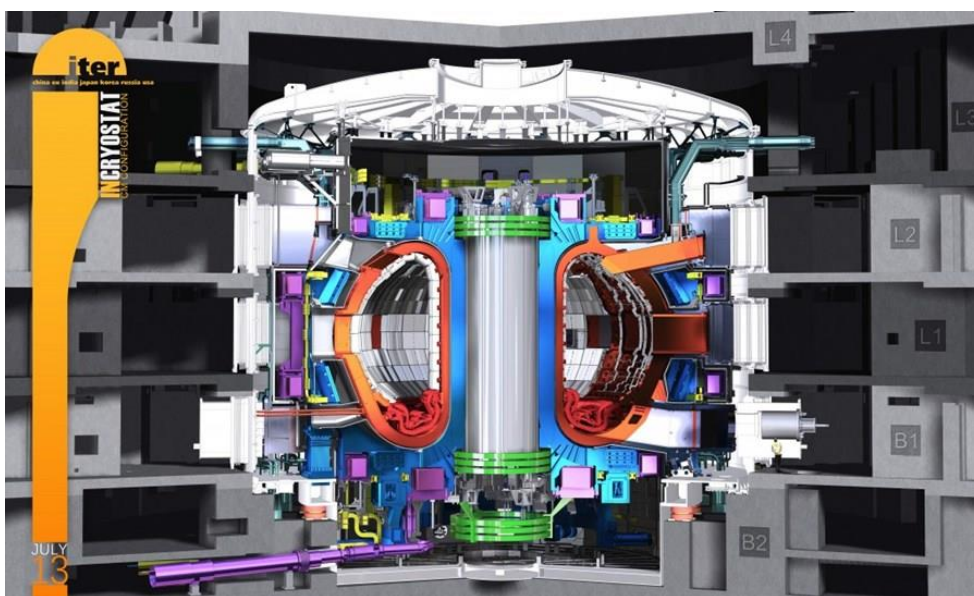
¹⁶ Isotopes of lithium. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-12-13]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Isotopes_of_lithium#Lithium-6

¹⁷ Lithium reserves. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2015-03-26]. Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/Lithium>

¹⁸ *Řízená termojaderná fúze pro každého - 4U*. 4., rozš. a čísl. vyd. Praha [i.e. Ostrava]: Vítkovice - výzkum a vývoj - technické aplikace, 2013, s. 24. Svět energie. ISBN 978-80-260-4785-8.

9.1 ITER

Jako důkaz konceptu má sloužit zařízení ITER, které se staví ve Francii. Toto zařízení mělo být původně větší, ale jeho velikost byla zmenšena z důvodu nedostatku financování. Spolupracuje na něm mnoho zemí nejen z Evropy. Má plánované $Q=10$ (poměr fúzního výkonu k výkonu ohřevu), což znamená, že návratnost energie použité na ohřev je desetinásobná.



Obrázek 9-1 Plán reaktoru ITER¹⁹

Avšak tento projekt trápí mnoho problémů spojených se spoluprací mnoha zemí a nedostatkem peněz. Tento projekt je momentálně ve výstavbě, a pokud se finální zařízení bude pohybovat v rozmezí plánovaných hodnot, pak dalším krokem bude první fúzní elektrárna (zvaná DEMO).

9.2 JET

Jedním z největších a nejvýznamnějších reaktorů na světě je JET (Joint European Torus). Toto zařízení je umístěno v anglickém Culhamu poblíž Oxfordu. Jako v jednom z mála zařízení se zde používala i DT směs jako palivo. JET

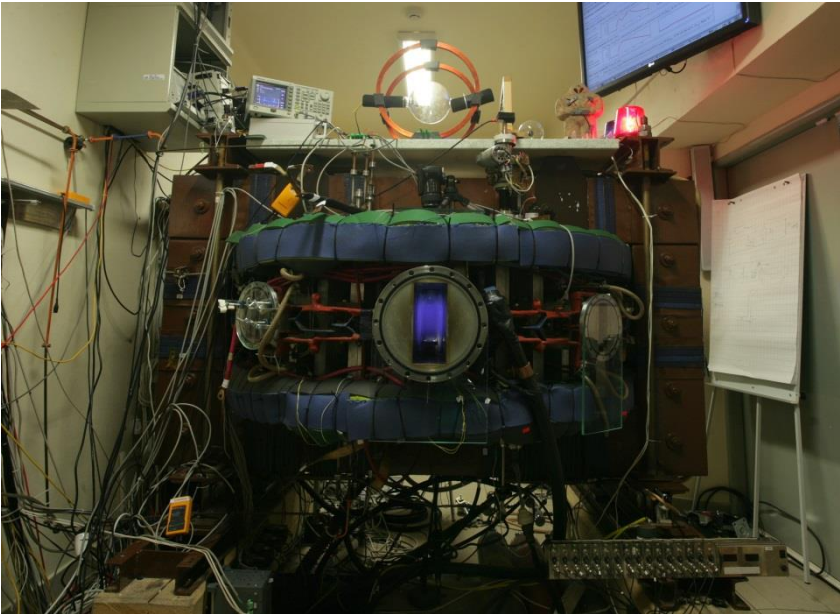


Obrázek 9-2 Joint European Torus

¹⁹ ITER. *ITER.org* [online]. 2014 [cit. 2014-12-14]. Dostupné z: <http://www.iter.org/construction/Assembly>

je totiž uzpůsoben pro robotickou údržbu, aby se lidé vyhli radiaci při údržbě.²⁰ Q u JETu dosáhlo rekordně až 0,65. Využívá komoru zploštělého toroidálního tvaru a divertorů.

9.3 CASTOR/GOLEM



Obrázek 9-3 Tokamak GOLEM

²¹Jedním ze dvou českých tokamaků je tokamak GOLEM. Je to výukový reaktor na půdě fakulty jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT v Praze. Jedná se o jeden z nejstarších tokamaků stále v provozu. Zařízení je původně zapůjčeno z moskevského ústavu fyziky.

9.4 NIF

²²NIF (National Ignition Facility) je zařízení se 192svazkovým neodýmovým laserem, využívající inerciální udržení, umístěné v USA. Je jedním z hlavních zástupců inerciálního udržení, které je dnes v provozu. Mimo jiné se také věnuje odlišným druhům experimentů, které slouží k hlubšímu porozumění vesmíru. Experiment si vedl dobře a dokonce se i blížil zapálení (tj. výstřel s kladným energetickým výtěžkem), ale další testy selhaly pro nesymetrickou kompresi terče. Nakonec americká vláda snížila financování projektu a převedla ho na mezinárodní rovinu.

²⁰ JET. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-12-14]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Joint_European_Torus#mediaviewer/File:JointEuropeanTorus_external.jpg

²¹ GOLEM. *Gym669ova.cz* [online]. 2014 [cit. 2014-12-14]. Dostupné z: http://gym669ova.cz/glossarium/wp-content/uploads/2012/06/detail_6.jpg

10 Závěr

Došel jsem k závěru, že tato technologie má rozhodně místo v naší budoucnosti, pokud se chceme odtrhnout od fosilních paliv a zajistit si produkci elektrické energie nezávislou na různých podmínkách, jako spád řek, síla větru a tak dál. Investice zemí do fúzní energie je téměř povinnost pro další existenci civilizace jak ji známe a její růst. Palivo pro fúzi je široce dostupné ve velkých množstvích a provoz fúzní elektrárny zatěžuje životní prostředí pouze minimálně oproti ostatním alternativám.

Termonukleární reaktory samotné jsou velice široké téma. Jejich možné využití v budoucnu ale dává dobrý důvod, proč takovéto téma znát a případně i ovládat, neboť poptávka po personálu obsluhující tyto zařízení bude veliká.

Tato ročníková práce splnila svůj cíl a rozšířila minimálně můj rozhled, co se týče termonukleárních reaktorů, ale také trochu prohloubila znalosti v oblastech částicové fyziky. Dle mého názoru tuto práci lze využít k předávání ucelené informace o termonukleárních reaktorech veřejnosti, která se o fyziku do určité úrovně zajímá a je možné jej dále upravovat pro cílené publikum, za účelem osvěty, kterou toto odvětví fyziky tak zoufale potřebuje.

Nakonec musím poděkovat Vojtěchu Delongovi, bez kterého by tato práce neexistovala v takovéto podobě, jakou má dnes. Poskytl mi neocenitelné rady, co se týče práce i dalšího studia a rozšířil mé poznání v této oblasti fyziky. Hlavně musím poděkovat ochotě PaedDr. Petra Dyršmída, který mi nabídl, že bude vedoucím práce. Bez jeho svolení by tato práce ani nevznikla, neb mi poskytl kontakt na odborného poradce Vojtěcha Delonga, poskytoval svoje rady i nápady, které práci také posunuly dál, ale hlavně si práci vzal pod svá křídla i přes to, že vypsána původně nebyla. Pomoci obou si velice cením.

11 Slovník pojmů

Deuterium- izotop vodíku s jedním protonem a jedním neutronem

disrupce- nestabilita plazmatu v tokamaku

divertor- místo v tokamaku do kterého vniká plazma a je odčerpáváno, plazma se z divertoru nevrací do komory tokamaku.

elektronvolt eV- jednotka práce a energie mimo soustavu SI.

hohlraum- cílová dutinka zhotovená z těžkého kovu (Au aj.) využívaná v inerciálním udržení na odraz a rozptyl laseru uvnitř dutinky a rovnoměrný ohřev terčíku.

Katalyzátor- reaktant umožňující/zrychlující reakci, který vychází z reakce nezměněn

Lawsново kritérium- Požadavek kladený na teplotu plazmatu, hustotu iontů v plazmatu a dobu udržení, který udává nutné parametry pro to, aby bylo v plazmatu tvořeno více energie, než se ztrácí, tím pádem je po splnění kritéria plazma tepelně samostatné

lehká voda- $\frac{1}{1}H_2O$ obyčejná voda

limiter- místo v tokamaku do kterého se vychylují siločáry tak, aby zde docházelo k částečnému kontaktu plazmatu se speciálním materiálem kvůli ochraně zbytku komory před poškozením plazmatem

Neutrino- elementární částice s téměř nulovou hmotou

plazma- ionizovaný plyn složený z iontů a elektronů vytvořený odtržením elektronového obalu

poloidální směr- směr kolmý na toroidální směr, tj. do středu toru

Poziton- antičástice elektronu

q parametr- parametr udávající strmost stáčení magnetických siločar.

stellarátor- zařízení udržující plazma za pomoci převážně toroidálního magnetického pole, využívá se také stabilizačních cívek

Supernova- výbuch masivní hvězdy

Termonukleární fúze- je proces, při kterém dochází ke sloučení atomových jader za pomoci vysoké teploty či tlaku.

těžká voda- molekula vody obsahující alespoň jeden atom deuteria 2_1H

toroid- těleso v prostoru získané rotací uzavřené rovinné křivky okolo osy ležící v rovině křivky a neprotínající křivku. V případě rotace kružnice se jedná o torus. *Tvar toroidu má například duše u kola*

toroidální směr- směr podél hlavní kružnice toroidu

toroidální pinč- zařízení udržující plazma za použití poloidálního pole, které je generováno elektrickým proudem v plazmatu, využívá se také stabilizačních cívek

Tritium- izotop vodíku s jedním protonem a dvěma neutrony

trojný alfa proces- proces, kterým se mění jádra helia na jádro uhlíku

udržení- v kontextu práce princip udržení plazmatu před kontaktem se hmotou a umožnění fúze

12 Seznam literatury

Milan Řípa a kol., *Řízená termojaderná fúze pro každého - 4U*. 4., rozš. a čísl. vyd. Praha [i.e. Ostrava]: Vítkovice - výzkum a vývoj - technické aplikace, 2013. ISBN 8020414533.

MCCRACKEN, Garry M a Peter E STOTT. *Fúze: energie vesmíru*. Vyd. 1. Praha: Mladá fronta, 2006, 324 s., [16] s. barev. obr. příl. ISBN 80-204-1453-3.