

Univerzita Karlova v Praze
Matematicko-fyzikální fakulta

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



Stanislav Valenta

Jaderná fúze a její využití v energetice

Ústav částicové a jaderné fyziky

Vedoucí bakalářské práce: Mgr. Milan Krtička, Ph.D.

Studijní program: Fyzika, Obecná fyzika

2008

Prohlašuji, že jsem svoji bakalářskou práci napsal samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů. Souhlasím se zapůjčováním práce a jejím zveřejňováním.

V Praze dne 7. srpna 2008

Stanislav Valenta

Obsah

1	Úvod	5
	1.1 Objev fúze	5
	1.2 Energetická situace	6
2	Jaderná fúze	8
	2.1 Fúze v přírodě a v technice	8
	2.2 Lawsonovo kritérium	10
3	Metody fúze	12
	3.1 Fúze pomocí inerciálního udržení	12
	3.2 Fúze pomocí magnetického udržení	14
	3.3 Jiné cesty fúze	15
4	Fúzní zařízení s magnetickým udržením plazmy	17
	4.1 Stellarátor	17
	4.2 Tokamak	18
	4.3 ITER	20
5	Závěr	23
	Literatura	24

Název práce: Jaderná fúze a její využití v energetice
Autor: Stanislav Valenta
Katedra (ústav): Ústav částicové a jaderné fyziky
Vedoucí bakalářské práce: Mgr. Milan Krτίčka, Ph.D.
E-mail vedoucího: milan.krticka@mff.cuni.cz

Abstrakt: Jaderná fúze je v principu jedním z nejslibnějších zdrojů energie pro budoucnost. Výzkum jaderné fúze probíhá v několika směrech, nejslibnějších výsledků dosáhnou systémy s magnetickým udržením plazmatu, konkrétně tokamaky. V současné době se začíná, jako projekt široké mezinárodní spolupráce, stavět tokamak ITER, který by měl být poprvé na Zemi schopen vyprodukovat více energie získané pomocí fúze, než do něj bylo vloženo, ověřit některé technologie potřebné pro případnou fúzní elektrárnu a prokázat tak vhodnost tohoto zdroje energie. Příložená práce popisuje současné metody dosahování jaderné fúze se zaměřením na tokamaky, konkrétně projekt ITER.

Klíčová slova: magnetické udržení plazmatu, tokamak, ITER

Title: Nuclear fusion and its utilization in energetics
Author: Stanislav Valenta
Department: Institute of Particle and Nuclear Physics
Supervisor: Mgr. Milan Krτίčka, Ph.D.
Supervisor's e-mail address: milan.krticka@mff.cuni.cz

Abstract: Nuclear fusion is one of the most promising sources of energy for future. Research of nuclear fusion contains several methods, the most promising results are given by systems with magnetic confinement of plasma, concretely tokamaks. Tokamak ITER, the wide international project, is now in early stages of construction. This facility should release more energy than absorb, verify some technologies needed for future fusion power plant and demonstrate usability of this power source. The present work describes current methods of reaching nuclear fusion with a view to tokamaks, concretely ITER.

Keywords: magnetic confinement of plasma, tokamak, ITER

Kapitola 1

Úvod

1.1 Objev fúze

V roce 1932 v Cavendishově laboratoři proběhlo několik zásadních objevů – uskutečnění štěpné reakce, identifikování neutronu a objev pozitronu. Na žádost Ernesta Rutherforda s ním spolupracoval v dalším výzkumu Mark Oliphant, tato spolupráce vedla k objevům těžších izotopů vodíku (deuterium a tritium) a izotopu helia ^3He . Jak později Sir Oliphant prohlásil^[1]:

„V ten samý čas jsme byli mimochodem schopni ukázat, že lze uskutečnit reakci dvou těžších jader vodíku za produkce spousty energie a jiných typů atomů. Přesně tato reakce, kterou jsme tehdy objevili, je základní reakcí v takzvané vodíkové bombě.“

Tyto reakce byly po jejich objevení v souvislosti s konflikty tehdejšího světa skutečně zkoumány a využity k vojenským účelům, k výrobě vodíkové bomby. Sir Mark Oliphant se k tomu v roce 1967 vyjádřil takto^[1]:

„... neměli jsme nejmenší tušení, že by to mohlo být jednou použito k výrobě vodíkových bomb. Naše zvědavost byla pouze zvědavostí o struktuře jádra atomu a objevení těchto reakcí bylo, jak by to podali Američané, čistě náhodné.“

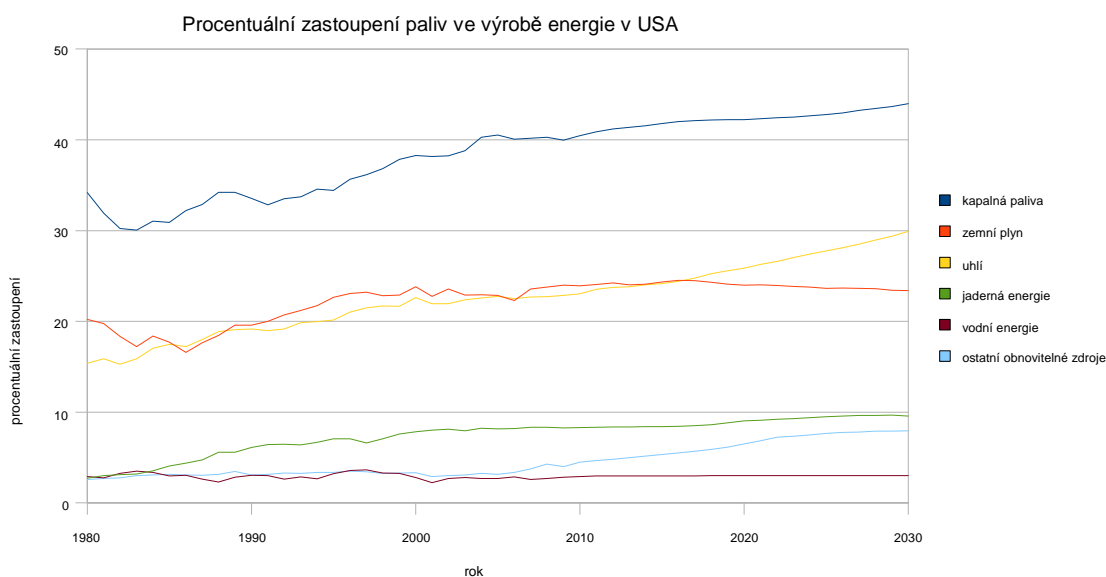


Obrázek 1.1: První výbuch vodíkové bomby na světě nedaleko atolu Enewetak v Pacifiku 1. listopadu 1952. Fotografie byla zveřejněna Národním úřadem pro jadernou bezpečnost USA

Od 50. let jsou ovšem, stejně jako tomu bylo u štěpných reakcí, zkoumány možnosti jejich mírového, civilního využití s budoucím cílem stavby fúzních elektráren.

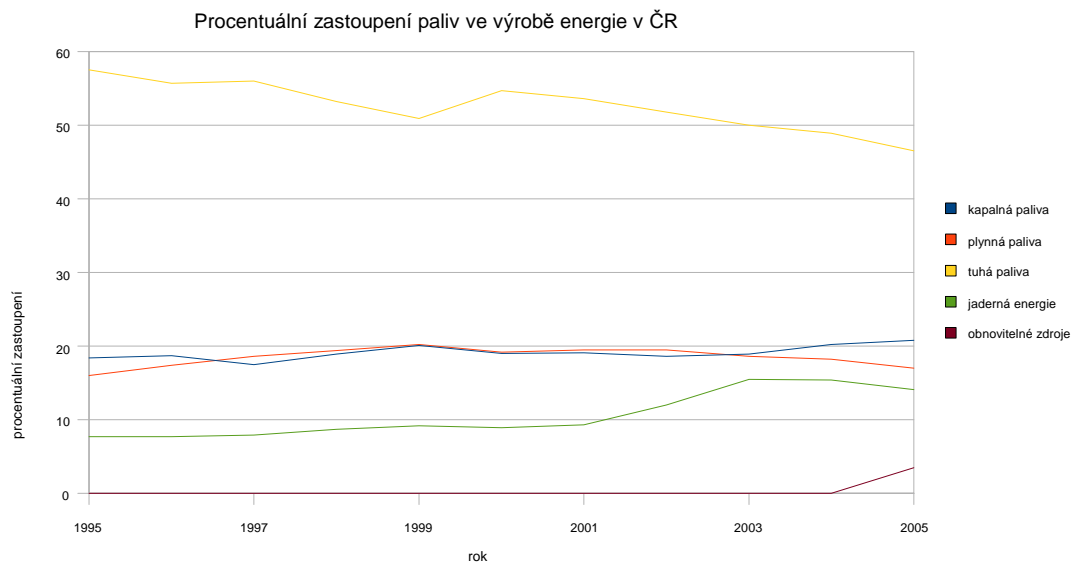
1.2 Energetická situace

Při pohledu na grafy procentuálního zastoupení paliv (uvádím ČR^[2], USA^[3] a Francii^[4]) a propočty Energy Information Administration (EIA), která uvádí, že dle těchto dat odhaduje zásoby fosilních paliv na desítky let, konkrétně 45 let pro ropu, 72 let pro zemní plyn a 252 let pro uhlí, je jasné, že lidstvo stojí před problémem nahrazení fosilních zdrojů energie.

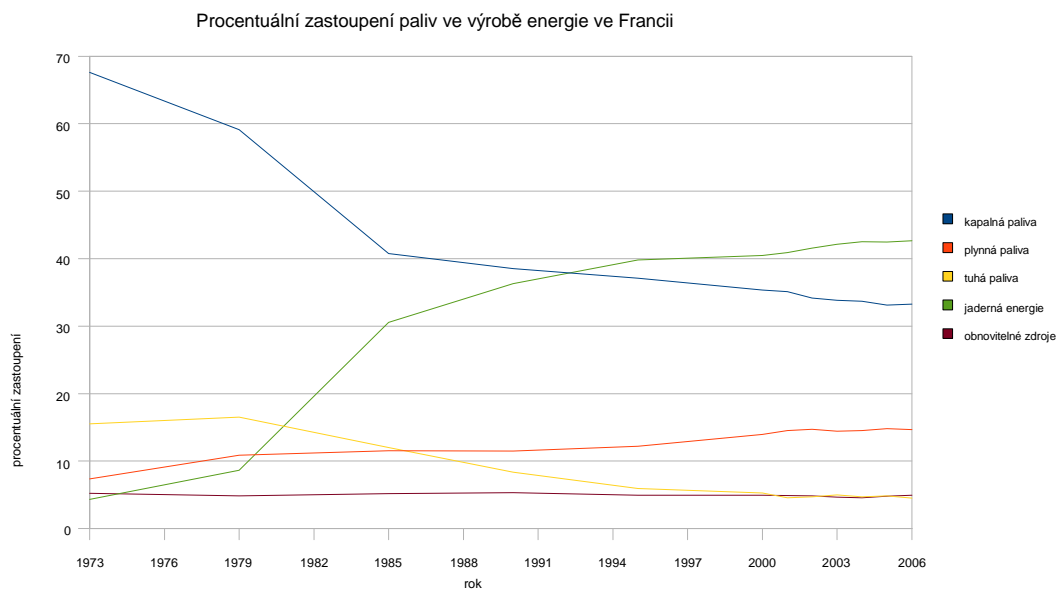


Obrázek 1.2: Graf procentuálního zastoupení paliv ve výrobě energie v USA. Tento graf zobrazuje historii od roku 1980 a předpokládaný vývoj do roku 2030. Suma v jednotlivých letech není 100%, ostatní roky jsou přepočítány dle celkové (předpokládané) spotřeby k roku 2005.

Fosilní paliva tvoří v USA v současné době konstantně 85% zdrojů energie, v ČR tento podíl od roku 1995 z přibližně 92% klesl na asi 83% v roce 2005. Ve Francii je závislost na fosilních palivech menší, v současné době je asi 52% energie vyráběno z fosilních paliv.



Obrázek 1.3: Graf procentuálního zastoupení paliv ve výrobě energie v ČR.



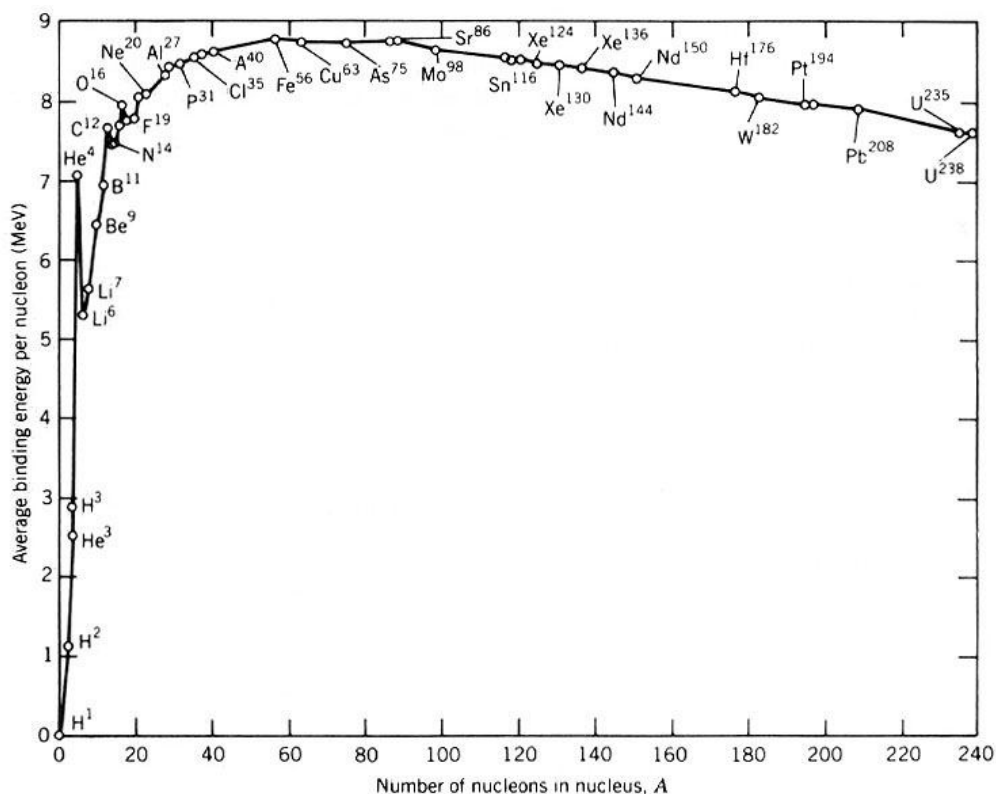
Obrázek 1.4: Graf procentuálního zastoupení paliv ve výrobě energie ve Francii. Zobrazena je historie od roku 1973 se zřetelným trendem přenesení velké části energetické závislosti na jadernou energii.

Kapitola 2

Jaderná fúze

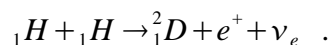
2.1 Fúze v přírodě a v technice

Jaderná fúze je obecně proces, při kterém se více lehčích atomových jader slučuje na těžší jádra. Největší vazebnou energii na jeden nukleon mají jádra prvků v okolí železa (^{56}Fe). Pokud se tedy slučují dvě lehčí jádra (ve smyslu lehčí než ^{56}Fe), lze předpokládat uvolnění energie. Toto tvrzení neplatí zcela obecně pro jakoukoliv reakci kvůli výskytu dobře vázaných systémů jako ^4He .

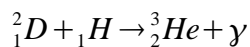


Obrázek 2.1: graf vazbové energie na nukleon v závislosti na nukleonovém čísle

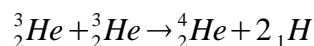
V přírodě se fúzní reakce realizují ve hvězdách, v Slunci a jemu podobných hvězdách převládá takzvaný proton-proton řetězec, který začíná sloučením 2 jader vodíků, tedy protonů, na deuterium



Řetězec dále pokračuje anihilací pozitronu, deuterium reaguje s protonem



za vzniku jádra izotopu helia ${}^3\text{He}$. Dvě tato jádra vytvářejí v nejběžnějším pokračování tohoto řetězce (ve Slunci asi 86%) jádro helia ${}^4\text{He}$.

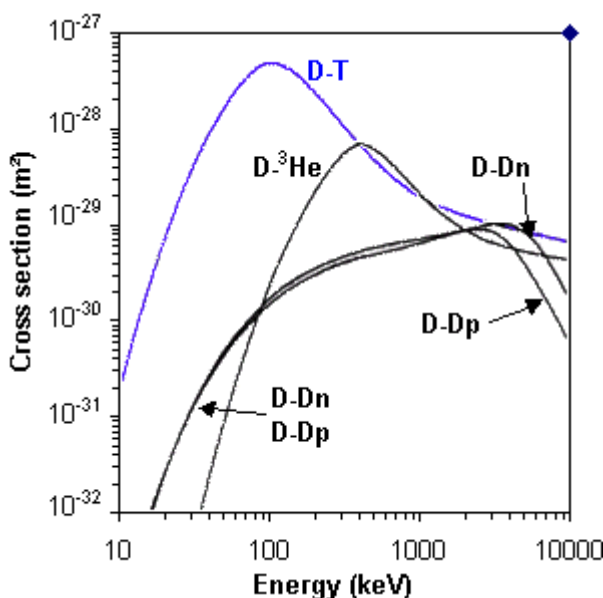


V dalších větvách tohoto řetězce poté vznikají těžší jádra lithia, berilia a bóru.

Pro použití ve fúzních reaktorech je ovšem předpokládáno použití reakcí těžších izotopů vodíku – deuteria a tritia – s izotopem helia ${}^3\text{He}$:



Poslední reakce má v širokém rozsahu energií největší účinný průřez, je uváděna jako reakce, která bude klíčová v prvních generacích fúzních reaktorů. Při této reakci si asi 20% energie odnáší jádro helia, zbylých 80% neutron.



Obrázek 2.2: graf závislosti účinného průřezu na typu reakce a energii

Fúzní reakce, konkrétněji sloučení dvou kladně nabitých jader (deuteria a tritia), samozřejmě neprobíhají s dostatečnou četností za normálních podmínek, jádra jsou udržována mimo dosah přitažlivých jaderných sil Coulombickou repulzí. Sloučení dvou jader, tedy překonání nebo dosažení dostatečné energie k protunelování potenciálové bariéry na dosah přitažlivých jaderných sil, je dosahováno různými metodami, například nastřelováním svazku urychlených částic na terčích v urychlovačích.

Pro využití fúze v energetice se jako vhodné jeví zahřátí paliva na teplotu řádu 10^8 K při udržení dostatečné hustoty. Hmota při této teplotě existuje ve formě plazmy, kdy jsou atomy hmoty rozděleny na elektrony a jádra, která

mají kinetickou energii umožňující fúzní reakci. Pokud tedy chceme energii vyrábět z takto zahřátého plazmatu, musí být zajištěn ohřev na tuto teplotu a její udržení – tedy co nejlepší izolace a případné přitápění. Plazma, v které probíhá fúzní reakce, může dosáhnout stavu, kdy jsou energetické ztráty plně kompenzovány energií dodanou produkty probíhající reakce. Takový stav se charakterizuje Lawsonovým kritériem.

Fúzní zařízení je charakterizováno hodnotou Q – poměrem výkonu uvolňovaného z reaktoru (tedy plazmy) k výkonu potřebnému k zahřívání a udržení plazmy. Podmínkou k energetické využitelnosti fúze je, že fúzní reaktor bude dodávat mnohem více energie, než kolik bude potřeba k jeho chodu, a že tato energie bude dostatečně efektivně transformována na elektrickou energii. Do hry vstupuje i ekonomický faktor konkurenceschopnosti fúzní elektrárny vzhledem k ostatním alternativám. Pro úspěšnou fúzní elektrárnu tedy nestačí faktor $Q > 1$, o výsledcích a cílech v projektech bude řečeno dále.

2.2 Lawsonovo kritérium

Lawsonovo kritérium definuje pomocí hustoty částic n a doby udržení τ_E stav, kdy energetické ztráty plazmy jsou plně kompenzovány ohřevem plazmy zajištěným produkty fúzní reakce.

Doba udržení se definuje jako podíl energie ke ztrátám (normováno na jednotku objemu):

$$\tau_E = \frac{W}{P_{ztr}} \quad (2.1).$$

Pro D-T reakci, za předpokladu, že obě složky paliva mají stejnou teplotu T , jsou zastoupeny v poměru 1:1 a směs neobsahuje žádné další ionty (náhodné příměsi ani helium), je iontová hustota n a elektronová hustota n_e stejná a hustota energie je:

$$W = 3n_e k_B T \quad (2.2),$$

kde k_B je Boltzmannova konstanta.

Počet reakcí na jednotku objemu a času f je dán:

$$f = n_D n_T \langle \sigma v \rangle = \frac{1}{4} n_e^2 \langle \sigma v \rangle \quad (2.3),$$

kde σ je účinný průřez fúzní reakce a v je vzájemná rychlost, závorky značí středování přes Maxwellovo rozdělení rychlostí. Ohřev plazmy je realizován nabitými produkty fúzní reakce, v konkrétním případě D-T reakce tedy ionty helia s energií $E = 3,5$ MeV. Lawsonovo kritérium je požadavek, že ohřev plazmy těmito ionty je větší než energetické ztráty (normováno na jednotku objemu):

$$f E \geq P_{ztr} \quad (2.4).$$

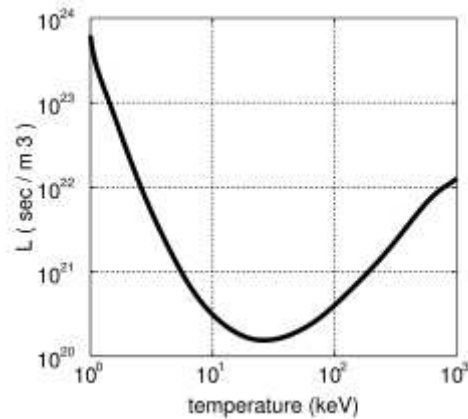
Dosazením ze vztahů (2.1), (2.2) a (2.3) lze podmínku upravit na:

$$\frac{1}{4} n_e^2 \langle \sigma v \rangle E \geq \frac{3 n_e k_B T}{\tau_E} \quad (2.5),$$

respektive na

$$n_e \tau_E \geq L = \frac{12 k_B T}{\langle \sigma v \rangle E} \quad (2.6),$$

kde zlomek na pravé straně definujeme jako L funkci. Tato funkce teploty má absolutní minimum, Lawsonovým kritériem je nazývána nerovnost (2.6) s hodnotou L funkce v tomto minimu.



Obrázek 2.3: graf L funkce pro reakci D-T

Pro D-T reakci nabývá L funkce minima při teplotě $T = 25$ keV, číselně se tedy Lawsonovo kritérium pro D-T reakci vyjadřuje:

$$n \tau_E \geq 10^{20} \text{ m}^{-3} \text{ s} \quad (2.7).$$

V přírodě se splnění Lawsonova kritéria a zažehnutí fúze realizuje ve hvězdách, jak bylo řečeno výše, kde je potřebná hustota částic dosažena gravitační silou. Tento způsob je na Zemi samozřejmě nerealizovatelný. Používá se metody magnetického udržení plazmatu, při kterém je Lawsonovo kritérium splněno při menší hustotě částic n ($\sim 10^{20} \text{ m}^{-3}$) a delší době udržení

τ_E (~ 1 s). Druhou metodou je inerciální udržení, při kterém je hustota částic větší ($\sim 10^{31} \text{ m}^{-3}$) a doba udržení menší ($\sim 10^{-11}$ s).

Kapitola 3

Metody fúze

3.1 Fúze pomocí inerciálního udržení

Fúze pomocí inerciálního udržení je v podstatě metoda předělání vodíkové bomby na využitelný, nedestruktivní zdroj energie. Ve vodíkové bombě je palivo pro fúzní reakci zahřáto spouští v podobě záření produkovaného štěpnou reakcí plutonia. Tento systém samozřejmě nelze využít pro získávání energie¹, proto je fúze pomocí inerciálního udržení nejčastěji realizována tak, že povrch paliva, kterého je samozřejmě daleko méně než v případě vodíkové bomby, je ohříván vysokoenergetickými paprsky – ionty, elektrony, ale vzhledem k výhodám je nejčastěji používán laser. Rozpínání vnější vrstvy paliva a rázové vlny způsobí kompresi vnitřní části paliva na objem a teplotu takovou, že může vzplanout fúzní reakce, která se může dále šířit ze středu. Tato metoda vyžaduje technickou preciznost v speciální přípravě paliva do tvarů velice dokonalých koulí a zdokonalení laserové zahřívání pro dosažení rovnoměrného ohřevu celého povrchu.

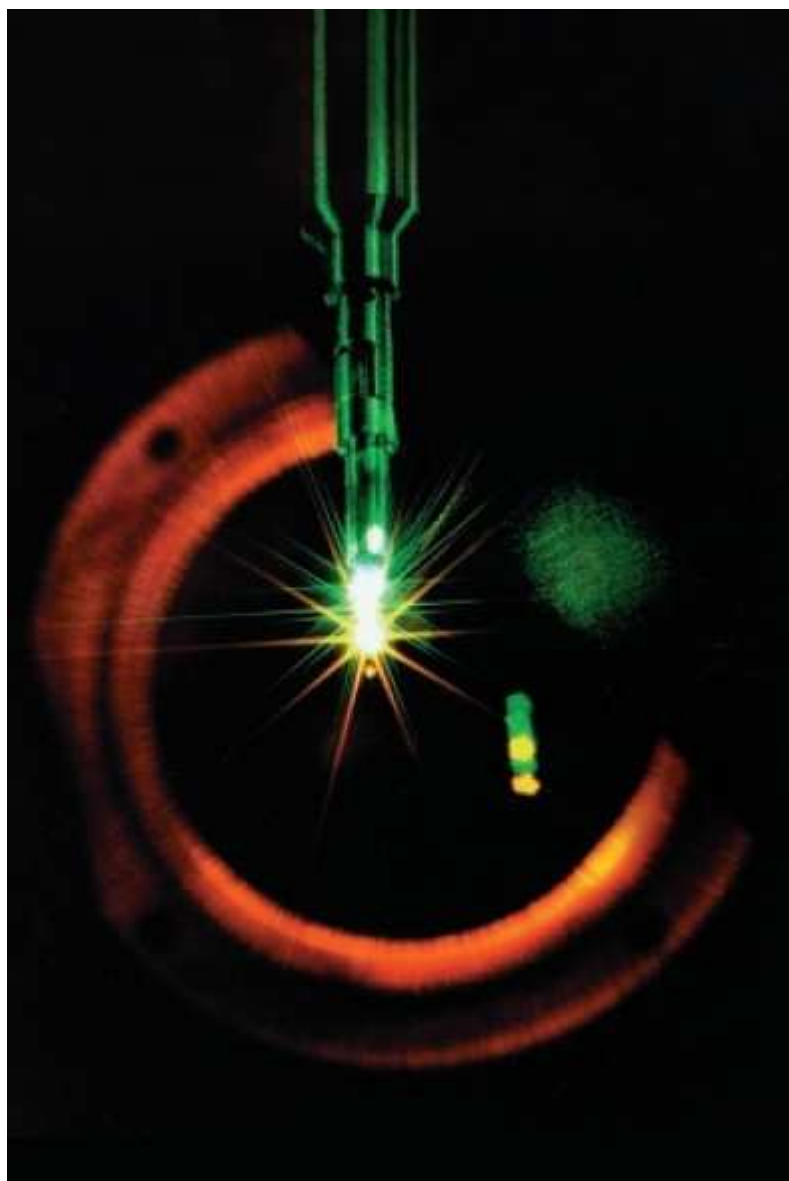
Rozvoj projektů byl spjat s vývojem laserů. První projekty začaly v 60. letech po zprovoznění rubínového laseru roku 1960, tehdejší lasery zdaleka nedosahovaly výkonu potřebného k dosažení fúze. Přes několik dalších projektů, které spíše pomáhaly rozvinout lasery, se vědci v Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) posunuli k laseru Shiva (1978), který uskutečnil kompresi kuliček vodíku na hustotu stokrát větší než je hustota kapalného vodíku. Laser NOVA v LLNL, který fungoval v letech 1984-1999, byl navrhnout k zapálení fúze, v tomto cíli selhal. Odhalil však příčinu hlavního problému – magnetohydrodynamickou nestabilitu v průběhu zahřívání terče⁵¹. Terč nebyl zahříván rovnoměrně, nedošlo tedy k požadované kompresi vnitřní části, ale k promíchání materiálu, což znemožnilo zapálení fúze. Přesto bylo dosaženo fúzního výtežku v řádu 10^{13} neutronů na jeden „zážeh“.

V současnosti jsou připravovány tři projekty, americký National Ignition Facility (NIF) v LLNL se v současné době blíží dokončení⁶¹, podobně francouzský Laser Mégajoule² (LMJ) a evropský (s účastí ČR) HiPER je ve

1 Projekt PACER, uskutečňovaný v 70. letech v Los Alamos, se o toto pokusil. Více informací lze najít v *Megawatts and Megatons: A Turning Point in the Nuclear Age?* od Garwina, Charpaka a Ahearneho nebo na <http://en.wikipedia.org/wiki/PACER>

2 Zajímavostí je, že tomuto francouzskému projektu byla zapůjčena komora z americké NOVY jako pomoc vývoji LMJ. Informoval o tom například Nature (<http://www.nature.com/nature/journal/v402/n6763/full/402709b0.html>)

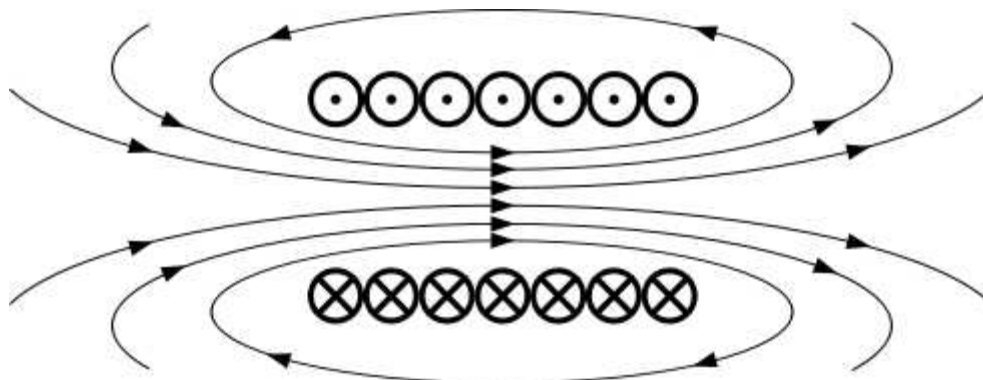
fázi příprav, jako rok zahájení konstrukční fáze je uváděn rok 2014^[7]. Zatímco NIF a LMJ, obrané projekty, nejsou plně zaměřen na prokázání energetické využitelnosti této metody fúze, HiPER slouží výhradně tomuto účelu.



Obrázek 3.1: Imploze vodíkového terče na laseru NOVA v LLNL. Fotografie pořízená ve viditelné části spektra zobrazuje i zeleně svítící držák terče, což je způsobeno zbytky světla z laseru.

3.2 Fúze pomocí magnetického udržení

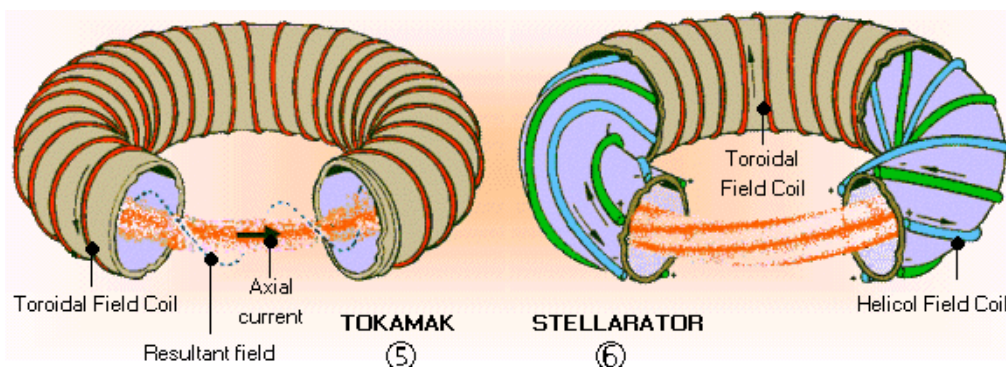
Teplota požadovaná k provedení fúze implikuje hmotu ve formě plazmatu, tedy elektricky nabitých částic, což umožňuje použití magnetického pole k ovlivnění jejich pohybu. Elektricky nabitá částice se v magnetickém poli pohybuje po šroubovici okolo siločáry tohoto pole. Jedním z nejjednodušších magnetických polí je pole solenoidu.



Obrázek 3.1: magnetické pole solenoidu

Pro využití k uskutečnění fúze je třeba takové pole uzavřít, částice v obyčejném poli solenoidu unikají na jeho koncích. Dva možné způsoby jsou buď uzavřít takové pole jakousi zátkou, magnetické pole různě tvarovanými cívkami upravit tak, aby na obou koncích docházelo k odrazu částic. Tak vznikají takzvané zrcadlové nádoby. Druhou cestou je konce spojit, pole uzavřít do sebe, vytvořit prstenec, částice se tedy budou pohybovat po kružnici.

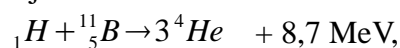
Taková toroidální geometrie, používaná tokamaky a stellarátory, přináší problém, gradient pole v radiálním směru způsobuje takzvaný toroidální drift, částice unikají od středu. Řešení tohoto problému je další komponenta magnetického pole v poloidálním směru, tokamak a stellarátor se navzájem odlišují právě řešením tohoto problému. Stellarátor jej řeší přidáním dalších cívek, celé magnetické pole je realizováno vnějšími cívkami, plazmatem teče pouze zanedbatelný proud. Tokamak řeší poloidální pole tak, že plazmatem teče proud, který indukuje toto pole. Tento proud je pak realizován stejně jako v transformátoru, sekundárním vinutím je v tomto uspořádání plazma.



Obrázek 3.2: tokamak a stellarátor, červeně jsou zobrazené cívky, které produkují toroidální pole, u stellarátoru (jedno z možných uspořádání) jsou modře a zeleně (odlišná barva je použita k naznačení opačného směru proudu) zobrazeny cívky produkující poloidální pole

3.3 Jiné cesty fúze

Bezneutronová fúze je taková fúzní reakce, při níž se jen malá část energie uvolňuje ve formě kinetické energie neutronů. Většina studovaných fúzních reakcí (D-T a D-D) uvolňuje až 80% energie v podobě energie neutronů, aneutronová fúze by tedy odstranila problémy spojené s neutronovou radiací, ionizačními poškozeními a neutronovou aktivací a tím zmenšila nároky na stínění reaktorů, dálkové ovládání a bezpečnost celkově. Podmínky pro uskutečnění bezneutronové fúze jsou mnohem extrémnější než podmínky pro deuterium-tritium palivový cyklus. Důvodem je, že vhodným kandidátem je reakce vodíkového jádra s jádrem bóru:



při které je působící Coulombická repulze pětkrát větší než v případě D-T nebo D-D reakcí. Pokud se ukáže udržitelná aneutronová fúze jako vědecky možná a realizovatelná, stále bude otázkou její ekonomičnost v porovnání s v současnosti intenzivně zkoumanou D-T případně D-D fúzí.

Studená fúze, nazývaná také low energy nuclear reactions (LENR) nebo condensed matter nuclear science, je soubor efektů pozorovaných v kontroverzních experimentech za běžných teplot a tlaků, které jsou podle některých vědců způsobeny jadernými reakcemi.

V roce 1989 oznámili Martin Fleischmann a Stanley Pons uskutečnění jaderné fúze v běžných laboratorních podmínkách na Univerzitě Utah. Na jejich tiskové konferenci a v článkách uvádějí, že pozorovali uvolňování neobvyklého množství tepla při elektrolýze těžké vody za použití paladiových elektrod. Nemajíce jiné vysvětlení pro zdroj takového tepla, předložili hypotézu, že teplo pochází z jaderné fúze jader deuteria. Tato zpráva samozřejmě zdvihla vlnu naděje, že byl objeven levný a vydatný zdroj energie.

Studená fúze nabyla pověsti patologické vědy poté, co žádní další vědci nebyli schopni zopakovat výsledky Fleischmanna a Ponse. Zpráva amerického úřadu pro energii (US Department of Energy) z roku 1989 shledala důkazy nepřesvědčivými. Další pozorování neobvyklého uvolnění tepla a produkce helia byly také uveřejněny v článcích a diskutovány na konferencích, většinou jsou ale přijmuty skepticky. V roce 2004 opět americký úřad pro energii nedoporučil soustředit vládní financování do programů pro výzkum nízkenergetických jaderných reakcí. Ve zprávě z tohoto roku také určil základní oblasti výzkumu, které by mohly vyřešit některé kontroverznosti tohoto problému.

Kapitola 4

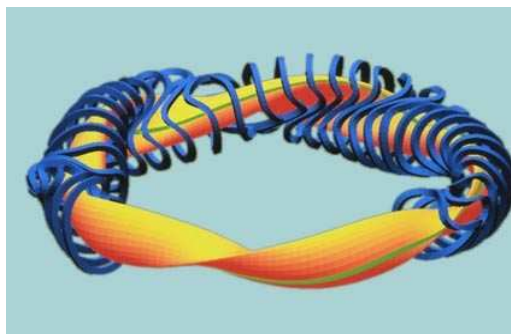
Fúzní zařízení s magnetickým udržením plazmy

4.1 Stellarátor

Jako vynálezce stellarátoru je uváděn Lyman Spitzer, první zařízení bylo postaveno v Princetonu v roce 1951. Geometrie používaná dnes byla vyvinuta přes počáteční používání tubusu ve tvaru osmičky. Jak bylo řečeno výše, stellarátor používá čistě vnějších cívek pro vytvoření magnetického pole nutného k udržení plazmy, v principu tedy nepotřebuje řídicí cívky, plazma je stabilní. Nepotřebuje také proud protékající plazmou, což je jeho hlavní výhodou v porovnání s tokamakem, protože nedochází k přetržení sloupce plazmatu, není také potřeba transformátor, který proud plazmatem generuje.

Dle uspořádání a tvaru cívek, které implikují různé tvary plazmatu, lze rozdělit stellarátory do tří skupin.

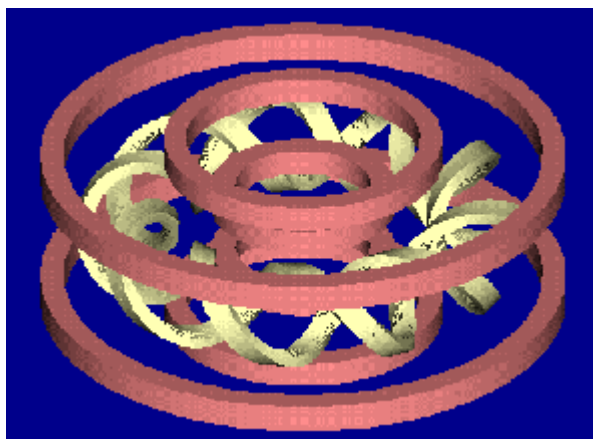
Nerovinné modulární cívky používá konfigurace *helias*, například německé projekty Wendelstein 7-X a 7-AS v Institutu Maxe Plancka pro plazmovou fyziku.



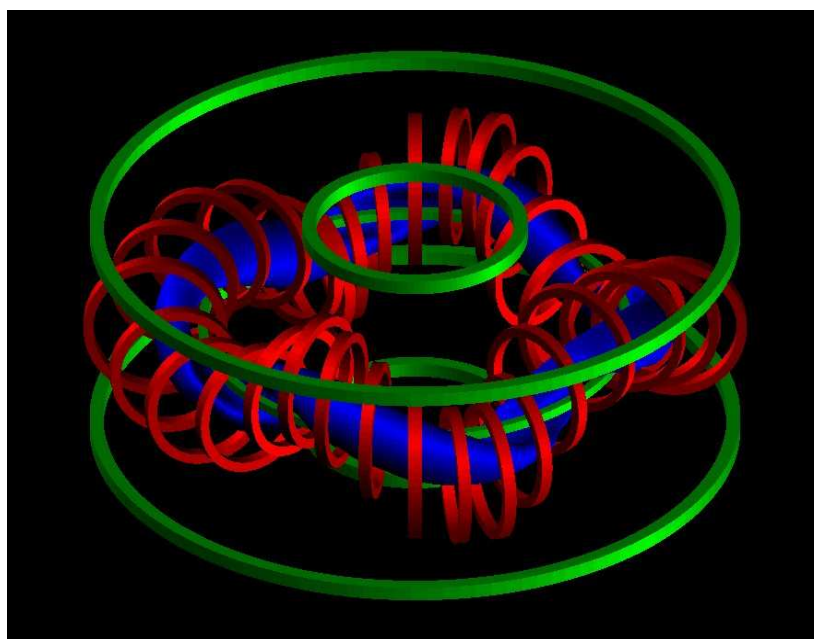
Obrázek 4.1: *Helias Wendelstein 7-X. Modře jsou znázorněny cívky, žlutě pak tvar plazmatu*

Na obrázku 3.2 vpravo je zobrazen *torsatron/heliotron*, který používá cívky šroubovicového tvaru navinutých po celém obvodu komory. Japonský Large Helical Device (LHD) používá poněkud odlišnou geometrii, dvě šroubovicové cívky jsou doplněny třemi páry polidálních cívek, jak znázorňuje obrázek 3.4.

Dalším druhem stellarátoru je heliac, který používá většinou rovinné cívky v komplikovanější geometrii pro dosažení požadovaného magnetického pole. Zástupcem toho druhu zařízení je australský H-1 a španělský JT-II, jehož tvar cívek a plazmatu ukazuje obrázek 3.5.



Obrázek 3.4: Cívky LHD – červeně poloidální, žlutě šroubovicové, komora je umístěna ve vnitřním prostoru těchto cívek, mezery jsou využity pro přístup ostatních částí zařízení do komory.



Obrázek 3.5: Cívky a plazma stellarátoru JT-II. Zelené poloidální cívky jsou analogické k červeným na obrázku 3.4, červené cívky vytvářejí pole podobné geometrie jako žluté cívky z obrázku 3.4, modře je zobrazen výsledný tvar plazmatu.

Všechna tato zařízení ale pracují s objemem plazmatu v řádu jednotek nebo desítek m^3 , tokamakové experimenty, jmenovitě JET, posunul tyto hodnoty k stovkám m^3 a ITER v tomto bude pokračovat.

3.4 Tokamak

Tokamak, zařízení produkující toroidální magnetické pole pro udržení plazmy, je nejvíce zkoumaný typ fúzního reaktoru s magnetickým udržením.

Termín Tokamak je překladem ruské zkratky Токамак znamenající toroidální komora s magnetickými cívkami. Byl vynalezen v 50. letech sovětskými fyziky Igorem Yevgenyevichem Tammem a Andrejem Sakharovem, kteří byli inspirováni nápadem Olega Lavrentyeva.

Jak bylo řečeno, výzkum jaderné fúze začal koncem druhé světové války jako tajné vojenské programy. V roce 1955 přišlo s Mezinárodní konferencí o mírovém užití jaderné energie určité uvolnění a odtajnění a tím i možnosti mezinárodní spolupráce. Experimentální zkoumání a vývoj tokamaků začal v roce 1956 v Moskvě v Kurchatovově institutu skupina sovětských vědců pod vedením Lva Artsimoviče. Tato skupina sestrojila a spustila první tokamaky, největším úspěchem byl typ T-3 a jeho větší verze s označením T-4, který při testu v Novosibirsku v roce 1968 poprvé dosáhla kvazistacionární termonukleární fúzní reakce.

Téhož roku na třetí IAEA Mezinárodní konferenci o plazmové fyzice a kontrolované nukleární fúzi v Novosibirsku oznámili sověští vědci, že v tokamaku dosáhli elektronové teploty asi 1keV. Ostatní vědci, především američtí a britští, zůstali podezřívaví k těmto prohlášením, neboť sami byli vzdáleni dosažení této laťky. Tyto hodnoty byly ovšem za pár let potvrzeny a jelikož žádný jiný směr výzkumu nedosahoval takových výsledků, většina výzkumných programů v oblasti fúze se přeorientovala na použití tokamaků, které do dnešních dnů zůstávají nejslibnějším zařízením k výrobě elektrické energie pro distribuční síť.

V roce 1976 navrhnutý a roku 1978 zahájený a 1983 spuštěný projekt JET (Joint European Torus) poblíž anglického Oxfordu dosáhl v roce 1997 prozatimního rekordu 16MW výkonu při $Q = 0,6$. Rekord v hodnotě zisku energie, ovšem za použití D-D paliva, drží japonský tokamak JT-60, který roku 1998 dosáhl hodnoty $Q = 1,25$. Dalším z tokamakových experimentů používajících D-D paliva je Tore Supra, který drží rekord v době trvání plazmy 6,5 minuty z roku 2003. Pokračováním ve výzkumu tokamaků je mezinárodní projekt ITER, podporovaný také současným korejským projektem KSTAR.

Parametr	tokamak		
	Tore Supra	JET	ITER
Hlavní poloměr plazmatu [m]	2.25	3	6.21
Objem plazmatu [m ³]	25	155	837
Proud plazmatem [MA]	1.7	5-7	15
Magnetické pole [T]	4.5	3.4	5.3
Délka pulzů [s]	minuty	10	> 300 s
Typ plazmatu	D-D	D-D / D-T	D-T
Q faktor	~ 0	~1	>10

Tabulka 3.1: Srovnání tří tokamakových experimentů

3.5 ITER

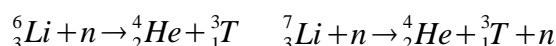
ITER je zkratkou pro International Thermonuclear Experimental Reactor, název má také symbolický význam, „iter“ znamená cesta, směr v latině. Jde o společný projekt Evropské unie, Indie, Japonska, Číny, Ruska, Jižní Koreje a USA. Několik lokací bylo nabídnuto pro výstavbu tohoto experimentálního zařízení, nakonec bylo 28.6.2005 v Moskvě rozhodnuto, že ITER bude postaven v Cadarache ve Francii.

Oficiálním cílem projektu ITER je „demonstrovat vědeckou a technickou vhodnost fúzní energie pro mírové účely“^[8]. Specifičtější cíle spojené s rozvojem fúzního reaktoru lze shrnout do tří kategorií.

Cíle spojené s energetickou bilancí jsou takové, že projekt ITER je plánován k dosažení okamžité hodnoty $Q = 10$. Pro ustálený stav (tedy dostatečně dlouhý pulz) je cílem překročení hodnoty $Q = 5$.

Technologické cíle jsou zřejmé – ověřit vhodnost používaných materiálů, ovládnutí a konstrukce pro využití v případných budoucích elektrárnách.

ITER má také otestovat a rozvíjet koncept výroby tritia použitím materiálů obsahujících lithium, které by byli vhodně umístěnou součástí těla reaktoru. Při fúzní reakci vznikají neutrony, ideou je jejich použití v reakcích s lithiem produkujících tritium:



Tritium je v přírodě nejméně zastoupeným izotopem vodíku. Jde totiž o beta zářič s poločasem rozpadu asi 12,3 roku, který přirozeně vzniká v atmosféře reakcí neutronů kosmického záření s dusíkem. Lithium je proti tomu dostatečně zastoupeným prvkem v zemské kůře.

Na obrázku 3.6 je znázorněn příčný řez tokamakem ITER s porovnáním jeho velikosti k dospělému člověku. ITER svým designem navazuje na úspěšný JET, který měl průřez komory také ve tvaru písmene D. Od JETu se samozřejmě odlišuje svojí velikostí, ale také použitím supravodivých cívek (cívky jsou na obrázku zobrazeny modře a šedě) jak tomu bylo při projektu Tore Supra a je v KSTARu.

Šedě je zobrazena jedna z osmnácti toroidálních cívek (TF), modře jsou zobrazeny centrální solenoid (CS), sestávající z šesti nezávisle napájených modulů, a 6 poloidálních cívek (PF). TF a CS jsou vyrobeny z Nb_3Sn , zatímco PF z Nb-Ti vodiče.

Vakuová nádoba (světle zelená) je konstruována z devíti toroidálních sektorů, materiálem je čistá ocel s vnitřními štíty a ferromagnetickými přísadkami. Komponentou, která přímo čelí plazmě, je berryliový štít připevněný na měděném podkladu, celé zavěšené na vodou chlazené ocelové konstrukci.

54 divertorů (znázorněny hnědou a světle zelenou) má uhlíkové terče a wolframové vysokoteplotní vodivé komponenty, upevněné jsou podobně jako berryliový štít. Terče jsou schopny po dobu dvaceti sekund dostávat teplotní dávku více jak 20 MWm^{-2} , předpokládaná maxima jsou v rozmezí $5\text{-}10 \text{ MWm}^{-2}$. Ty slouží k odvádění produktů fúzní reakce a případných dalších nežádoucích jader z komory.

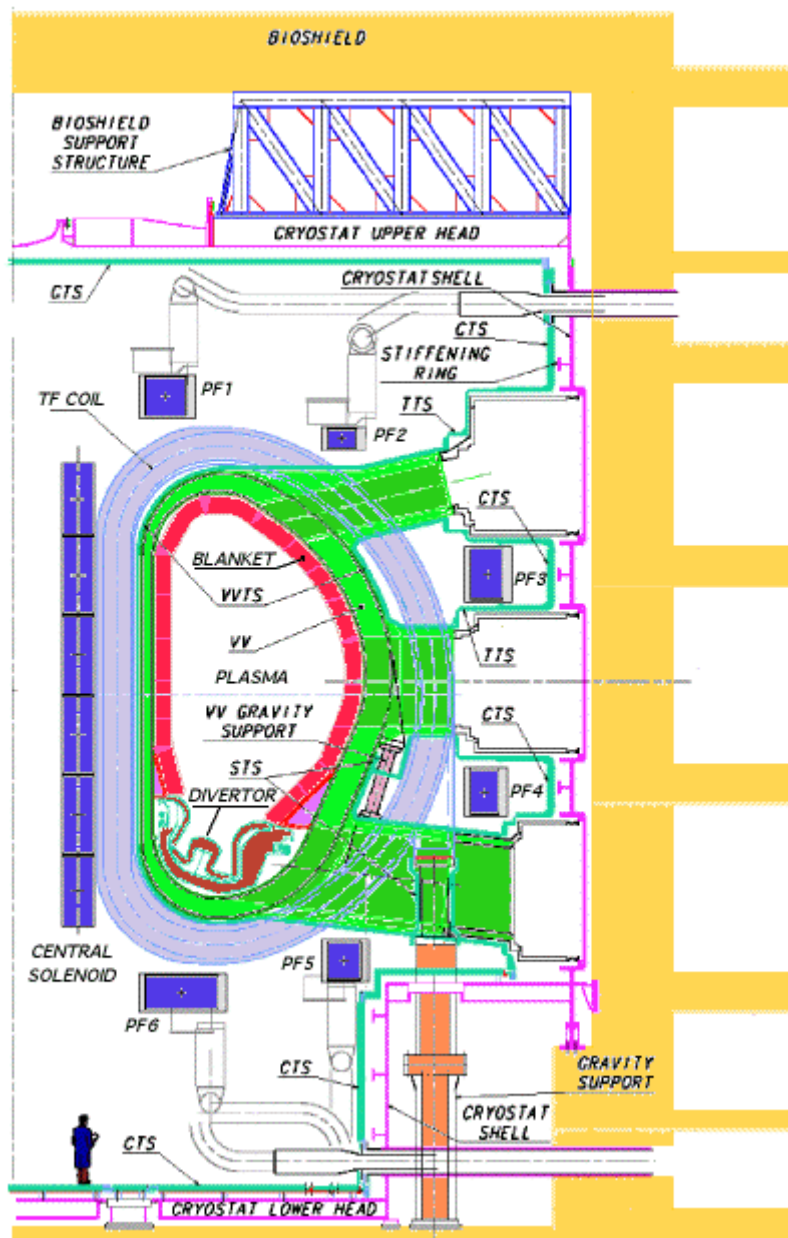
Po vnějším obvodu komory je „na rovníku“ umístěno 17 z vnější přístupných portů („zásuvek“, jsou zobrazeny tmavě zeleně) pro různá zařízení, konkrétněji 6 z nich bude využito pro ohřev plazmy, tedy antény a vstřikování neutrálních částic, 3 budou použity pro testy blanketu, zbývající pro diagnostiku a částečnou kontrolu plazmy. Skrze tyto „zásuvky“ bude také realizována výměna komponentů blanketu. 9 divertorových portů je využito k umístění vakuových pump (kryopumpy), diagnostických systémů, zařízení ke vstřikování plynného i pevného paliva a systému k pohledu do komory. 18 horních portů slouží převážně k diagnostice, částečně ke kontrole plazmatu.

Celé zařízení je za provozu samozřejmě řádně uzavřeno a stíněno (jedna z obálek je kryostat, znázorněna fialově, žlutě je zakreslen biologický štít), pro ochranu supravodivých cívek TF jsou přidány tepelné štíty. Celý tokamak je vodou chlazený, jak blanket, tak komora i divertor a vnitřní komponenty, chlazení je děleno na několik nezávislých obvodů. Přiváděná voda o teplotě 100°C a tlaku mezi $3\text{ - }4,2 \text{ MPa}$ se má z nejteplejších částí vracet na teplotě kolem 240°C .

Pro ohřev plazmy má být k dispozici jak elektronový tak iontový cyklotron, 1MeV -ový systém pro vstřik neutrálních částic a antény. Vše je navrženo tak, aby se mohly volit různé kombinace těchto prvků, dosažitelný ohřev má činit 110 MW .

ITER, stejně jako všechny do dnešní doby provedené experimenty, bude pracovat v půlním režimu. Celý pracovní cyklus začíná vyvakuováním komory a jejím následným naplněním pracovní směsí deuteria a tritia. Formování magnetického pole zahrnuje průraz plynu a vytvoření proudu v něm tekoucí. Tento proud plazma zahřívá (Jouleovo teplo), nestačí ovšem na dostatečný ohřev³, realizuje se proto ohřev vstřikem vysokoenergetických neutrálních částic a ohřev vysokofrekvenčními vlnami. Vstřik elektronů nebo iontů je také částí zahřívacího systému, ověření a zdokonalení tohoto systému (kladné ionty) proběhlo na JETu (výkon $20\text{-}30 \text{ MW}$).

3 Jsou testovány i konfigurace (ne ITERu), kde bude ohřev zabezpečen výhradně tímto způsobem a odpadne tak nutnost některých vnitřních komponent.



Obrázek 3.6: Příčný řez tokamakem ITER

Po vytvarování sloupce plazmatu se udržují kvazistacionární podmínky výboje (ohřev, řízení hustoty plazmatu). Konec pulzu nastává po vypnutí transformátoru, tedy zániku proudu plazmatem a samotného plazmatu, vše bylo zachyceno v Tore Supra (video o délce 2,2 min, viditelné spektrum, na <http://www-fusion-magnetique.cea.fr/cea/ts/films/ccd19622.mpg>).

Kapitola 5

Závěr

Zvětšování tokamaků je následkem toho, že energetické ztráty jsou úměrné povrchu, zatímco zisky jsou úměrné objemu. Nejen z tohoto pohledu je ITER zařízením další generace. Výsledky dosažené na ITERu budou s největší pravděpodobností klíčové pro další osud případných fúzních elektráren s magnetickým udržení plazmatu. Do současné doby bylo dosaženo, jak bylo uvedeno výše, několika slibných rekordů v oblasti výzkumu tokamaků, cílem ITERu je překonání téměř všech těchto rekordů. ITER nebude produkovat elektřinu, dle předpokladů by ITER byl „nulovou elektrárnou“, tedy i při instalaci sekundárního okruhu by do sítě nedodával žádnou elektřinu.

V oblasti případného energetického využití fúze s inerciálním udržení bude záležet na výsledcích projektu HiPER, nejde ovšem o zařízení, které má jako ITER prokázat budoucí konkurenceschopnost fúzního reaktoru.

Obě oblasti výzkumu jsou samozřejmě taky, nejen díky vysokým nákladům v řádech miliard eur, kritizovány. Poukazuje se na potenciálně lepší využití prostředků pro stavbu elektráren využívajících obnovitelné zdroje energie. Pravdou ovšem zůstává, že všechny realistické odhady a také závazky světových vlád (vyspělých zemí, zejména členů Evropské unie) sice hovoří o trendu posilování zastoupení obnovitelných zdrojů energie, nikdy se ale, až na extrémní případy malých zemí, nedá hovořit o desítkách procent. Často zastávaným názorem je, že v energetickém vývoji lidstva bude následovat po vzplývání fosilních paliv období závislosti na štěpné jaderné reakci. Na rozvoji fúze záleží, jak bude toto období dlouhé, případně nastane-li vůbec.

U všech dnešních a budoucích fúzních projektů je vždy zdůrazňována bezpečnost a šetrnost k životnímu prostředí, která je dána druhem a množstvím použitého paliva – izotopů vodíku, vznikem helia a pečlivým výběrem materiálů sloužících ke stavbě tak, aby nedocházelo k neutronové aktivaci zářičů s dlouhými poločasy rozpadu. Neutrony aktivované materiály představují radioaktivní zátěž po jejich vyjmutí z provozu na podstatně kratší dobu než odpad z štěpných reaktorů. Radioaktivita tritia také nepředstavuje problém, jde o slabý β -zářič. V dalším vývoji se navíc předpokládá čisté deuterium jako palivo, bez potřeby tritia a materiálů z lithia na jeho výrobu.

Literatura

<http://www.iter.org/>

<http://www-fusion-magnetique.cea.fr/gb/>

[1] Conversation with Sir Mark Oliphant, 24 July 1967, National Library Collection, Tape 276, p. 5 of 12 page transcript (Interviewed by Hazel de Berg).

[2] statistiky Ministerstva průmyslu a obchodu ČR
(<http://download.mpo.cz/get/29802/32430/345314/priloha001.pdf>)

[3] statistiky Energy Information Administration
(http://www.eia.doe.gov/oiaf/aeo/excel/figure3_data.xls)

[4] statistiky National Institute for Statistics and Economic studies
(<http://www.insee.fr/en/ffc/figure/NATTEF11305.xls>)

[5] Moody a kol., "Beam smoothing effects on stimulated Raman and Brillouin backscattering in laser-produced plasmas", *Journal of Fusion Energy*, Vol. 12, No. 3, září 1993, strany 323-330

[6] novinky z oficiálního webu LLNL
<https://publicaffairs.llnl.gov/news/sciencefeatures/2007/SF-07-01-02.html>

[7] sekce klíčových faktů o projektu HiPER na jeho webu
<http://www.hiperlaser.org/keyfacts/KeyFacts.asp>

[8] <http://www.iter.org/a/n1/objectives.htm>