

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

**Termonukleární fúze – významný zdroj energie  
pro budoucnost**

Bakalářská práce

Vedoucí práce: prof. Ing. Martin Libra CSc.

Student: Jan Slavík, OPT

PRAHA 2012

# Obsah

ÚVOD .....	7
<b>I. FYZIKÁLNÍ PRINCIP FÚZE .....</b>	<b>8</b>
<b>II. ZPŮSOBY UDRŽENÍ .....</b>	<b>10</b>
1. INERCIÁLNÍ .....	10
2. MAGNETICKÉ .....	12
<b>III. TOKAMAK A STELERÁTOR .....</b>	<b>14</b>
1. STELERÁTOR .....	14
2. TOKAMAK .....	15
2.1 <i>Historie tokamaku</i> .....	16
2.2 <i>Konstrukce tokamaku</i> .....	18
2.3 <i>Princip fungování</i> .....	19
2.4 <i>Problémy tokamaku</i> .....	21
<b>IV. ITER .....</b>	<b>23</b>
1. SOUČÁSTI ITER .....	25
2.1 <i>Interní (tokamakové) součásti</i> .....	25
2.2 <i>Externí součásti</i> .....	28
2. DEMO .....	30
<b>V. HYBRIDNÍ REAKTOR .....</b>	<b>31</b>
<b>VI. BUDOUCNOST FÚZE .....</b>	<b>32</b>
1. VÝHODY .....	32
2. NEVÝHODY .....	34
<b>VII. ZÁVĚR .....</b>	<b>35</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....</b>	<b>36</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ .....</b>	<b>37</b>

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce si klade za úkol čtenáře seznámit s problematikou termojaderné syntézy a nastínit možná technická řešení. Práce postupuje metodicky od komplexních kapitol po jednotlivé technické řešení. Klíčový je pro tuto práci projekt ITER, financovaný mezinárodním sdružením. Závěr práce je věnován zhodnocení jednotlivých konceptů a jejich možné využití v budoucnosti.

**Klíčová slova:** Jaderná energie, termonukleární fúze, tokamak, ITER, plazma

## **Abstract**

This bachelor thesis sets task to introduce the issues of thermonuclear synthesis to its readers and to outline possible technical solutions. The thesis progresses methodically from complex chapters into individual technical solutions. Internationally financed project ITER is crucial for this thesis. The ending is aimed at evaluation of individual concepts and their possible utilization in the future.

**Key words:** Nuclear energy, thermonuclear fusion, tokamak, ITER, plasma

## **Předmluva**

Bakalářskou práci na téma *Termonukleární fúze – významný zdroj energie pro budoucnost* jsem si vybral hned z několika důvodů. Jednak mě vždy zajímala fyzika, jak věci fungují v mikro, makro i megasvětě a jednak proto, že se samotným tématem fúze jsem byl seznámen již v poměrně raném věku. A je to právě termojaderná reakce, která má své projevy v megasvětě (hvězdy), makrosvětě (tokamaky, vodíkové bomby) i v mikrosvětě (slučování jader atomů).

Chtěl bych tímto poděkovat mému vedoucímu práce profesoru Martinu Librovi za to, že toto téma vypsál a umožnil mi tak hlouběji se ponořit do světa fyziky plazmatu a také za konzultace vedoucí k napsání této práce.

Dále chci poděkovat Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT za exkurze prováděné na tokamaku GOLEM, jichž jsem se zúčastnil.

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci *Termonukleární fúze – významný zdroj energie pro budoucnost* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne:

Podpis:

## Úvod

Náš svět je místem, které hostí život po více než tři a půl miliardy let. Tento vytrvalý stav je možný pouze díky obřím a stálému zdroji energie, kterým je nejbližší hvězda, Slunce. Slunce vysílá do svého okolí záření, které ohřívá a osvětluje planety v jeho radiu. Kde bere Slunce energii?

Na tuto otázku se snažilo v průběhu tisíciletí odpovědět mnoho učenců i náboženských teoretiků. První vysvětlení bylo jednoduché: Boží dočinění. Až v průběhu 19. století se vynořili vědecké teorie o zdroji této energie. V roce 1853 vyslovil německý přírodovědec Hermann von Helmholtz teorii smršťujícího se Slunce, která počítala se zmenšujícím se objemem hvězdy, čímž by se zahřívalo jádro. Tato hypotéza dále tvrdila, že věk Slunce je asi 20 milionů let. To bylo brzy vyvráceno paleontologickými nálezy.

Až v roce 1905, když Albert Einstein umožnil svým objevem ekvivalence hmoty a energie otevřít cestu ke správnému porozumění. Ve dvacátých letech minulého století zformovali pánové R. Atkinson a F. G. Houtermans teorii o slučování nukleusů prvků v jádrech hvězd. Ve třicátých letech pak tyto teorie potvrdili první experimenty na urychlovačích. Slunce získává svou energii z termojaderné reakce, při které se slučují jádra vodíku na těžší helium za vzniku enormního množství energie. Tento jev byl nazván termonukleární fúzí. Nicméně v této době bylo průmyslové využití fúze nemyslitelné, protože energie vzniklá syntézou na urychlovači nikdy nemůže překročit vstupní energii. Ernest Rutherford dokonce řekl, že kdokoli se snaží uvolnit výkon přeměnou atomu, je nenapravitelný snílek.

Jako řešení se ukázala syntéza s magnetickým nebo inerciálním udržením. Oba způsoby jsou silně provázány s politickou a ekonomickou situací ve světě a oba byly zrozeny původně jako vojenský projekt. [1]

## I. Fyzikální princip fúze

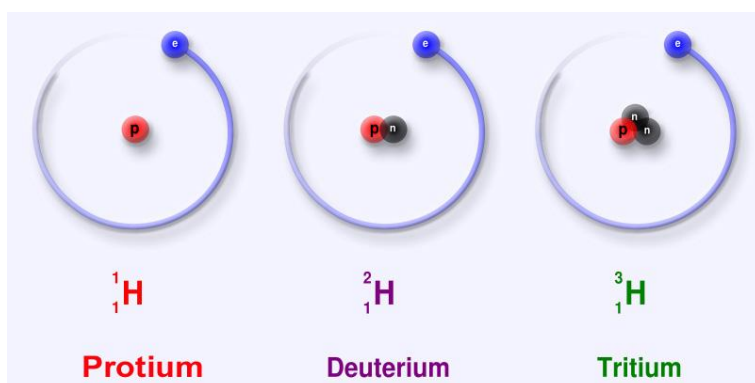
Jak již bylo řečeno, termojaderná fúze znamená slučování lehkých jader atomů za vzniku těžšího jádra. Podobných reakcí je celá řada, ale pro nás nejzajímavějším ta, s nejnižší zápalnou teplotou a tím případem je slučování deuteria **D** a tritia **T** (viz obr. 1.). Oba zmíněné prvky jsou izotopy vodíku, který se skládá z protonu a elektronu. Deuterium má navíc neutron, tritium má navíc dva neutrony. Schematický zápis reakce

vypadá takto:  ${}^2\text{H} + {}^3\text{H} = {}^4\text{He}(3,5\text{MeV}) + n(14,1\text{MeV})$

Horní *index prvků* vyjadřuje počet elementárních částic v jádru

Zkratka *MeV* je vyjádření vzniklé kinetické energie

Malé *n* značí vyzářený neutron

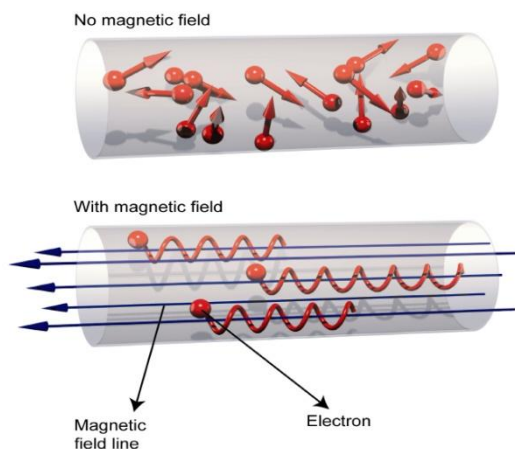


**Obr. 1. Izotopy vodíku [14]**

Aby mohla syntéza probíhat, musí přitažlivá síla jader překonat jejich vzájemný elektrostatický odpor (obě jádra jsou pozitivně nabitá), k čemuž je nutné přiblížení na vzdálenost  $10^{-14}$  m. Tohoto přiblížení můžeme dosáhnout dvěma způsoby: Prvním jsou srážky v urychlovači, na které je potřeba více energie na vstupu, než kolik se uvolní. Druhým je zahřátí na zápalnou teplotu, které je z průmyslového hlediska relevantní. V tomto stavu jsou všechny plyny plně ionizovány, tj. ve skupenství plazmatu. Plná ionizace znamená, že záporně nabitě elektrony i kladně nabitě ionty se pohybují na sobě nezávisle.

Fyzikové se při popisu chování plazmatu potýkají s potížemi zařadit plazma do zaběhnutých modelů pohybu částic. Pro účely této práce postačí několik zjednodušených zákonitostí popsanych dále.

Elektricky neutrální částice změni směr a velikost své rychlosti teprve při srážce s jinou částicí. Elektricky nabitá částice v elektrickém poli je urychlována ve směru nebo proti směru elektrických siločar. Kladný iont je urychlován od anody ke katodě a elektron od katody k anodě. V magnetickém poli bez působení vnějších sil se nabitá částice pohybuje podél magnetických siločar volně – magnetické pole „nevnímá“. Ve směru kolmém na směr magnetických siločar se pohybuje po kružnici, jejíž poloměr je nepřímo úměrný intenzitě magnetického pole. Elektrony se pohybují opačným směrem než kladně nabitě ionty a poloměr jejich kružnice je menší než u hmotnějších iontů. Kolmo k magnetickému poli se nabitá částice může pohybovat pouze díky srážce s jinou částicí, která střed kružnice jejího pohybu posune na jinou magnetickou siločáru. Tento pohyb napříč magnetickým polem se nazývá difúze. Za normálních okolností je



rychlost difúze nepřímo úměrná druhé mocnině intenzity magnetického pole. Zajímavé je, že při pohybu podél magnetického pole srážky pohyb brzdí a při pohybu napříč magnetickým polem jsou naopak jeho nezbytnou podmínkou.

**Obr. 2. Pohyb elektronů: Nevázaný a v magnetickém poli [15]**

Aby dosáhla fúze energetické soběstačnosti, tj. dokázala kompenzovat vstupní energii a vyzářené ztráty, musí splnit určité požadavky na hustotu plazmatu  $n$ , teplotu plazmatu  $T$  a dobu udržení jeho energie  $\tau_E$ . V roce 1955 odvodil J. D. Lawson kritérium,

keré podle něj bylo nazváno Lawsonovo. To říká, že při 33 % účinnosti vracení tepla do reakce a zápalné teplotě D-T směsi  $T = 200 \text{ milionů } K$ , se součin hustoty plazmatu a doby udržení musí být větší nebo rovno  $0,5 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3} \cdot \text{s}$ . Matematické vyjádření  $n \cdot \tau_E = 0,5 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3} \cdot \text{s}$ . Hustota je uvedena v částicích na metr krychlový.

Z tohoto kritéria v podstatě vyplývají dvě metody dosažení ziskovosti fúze. Prvním je slučování za vysoké hustoty ( $10^{31} \text{ m}^{-3}$ ), ale krátké doby udržení ( $10^{-10} \text{ s}^{-3}$ ), druhým je nízká hustota ( $10^{20} \text{ m}^{-3}$ ) s relativně dlouhou dobou udržení (několik sekund). [1,3,4]

## II. Způsoby udržení

Z výše popsaných možností se vyvinuly dva způsoby udržení, inerciální a magnetické.

### 1. Inerciální

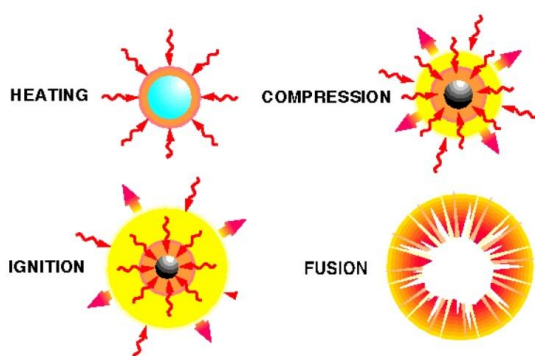
U inerciálního způsobu nedrží horké plazma žádné silové pole, tudíž se v podstatě jedná o výbuch principiálně srovnatelný s vodíkovou bombou, ale v mnohem menším měřítku. K ohřevu na slučovací teplotu kolem  $60 \text{ milionů } K$  musí tím pádem dojít rychleji než k expanzi paliva do prostoru. Z toho plyne, že energie uvolněná jedním zážehem nesmí být příliš velká, aby výbuch neohrozil bezpečnost. Za standardní uvolněnou energii se považuje 340 MJ, které se „ukrývají“ v  $1 \text{ mg}$  paliva. Poměr zesílení reakce vyjádřený jako:

$Q = \text{Fúzní výkon} / \text{Příkon do plazmatu}$  je v tomto případě  $Q = 540$ . K dosažení reakce za těchto podmínek musí být palivo stlačeno na  $200\,000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , což je tisíckrát více než jakou hustotu má zmražená směs D-T. (Pro představu prvkem s nevyšší hustotou, běžně se vyskytující je osmium  $22\,590 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ). Pro získání takto extrémních podmínek se používají slupkové kulové terče, na které se souběžně vyše proud částic, nejčastěji svazkem laserů. Energie se absorbuje na vnější straně slupky, zatímco vnitřní část způsobí implozi o rychlosti řádově až tisíce kilometrů za sekundu. Tato síla stlačí D-T palivo ve skupenství plynném či pevném. Toto extrémní stlačení středu má teoreticky vyvolat zahřátí nad zápalnou teplotu, které zažehne fúzi a ta se „rozšíří“ do zbytku paliva.



Nevýhodou inerciálního způsobu je extrémní požadavek na symetrii záření. V praxi se tak stává, že palivo je sice stlačeno na požadovanou hustotu, ale nedochází k rovnoměrnému stlačení, což vede k promíchání paliva a tím pádem ochlazení středu pod zápalnou teplotu.

Jak již bylo řečeno, k přenosu energie na slupku se využívá laserů, z nichž nejvýhodnějším pro tyto účely je Neodymový laser. Vynález femtosekundových laserů umožnil realizaci tzv. Fast Ignition. Při těchto experimentech se vědci pokouší o rychlé zapálení fúze, při podstatně nižších energiích laserů. U těchto pokusů hovoříme o **přímo hnané fúzi**, podtypu inerciálního způsobu.



**Obr. 3. Inerciální fúze: (zleva) zahřátí, stlačení, zážeh, fúze**

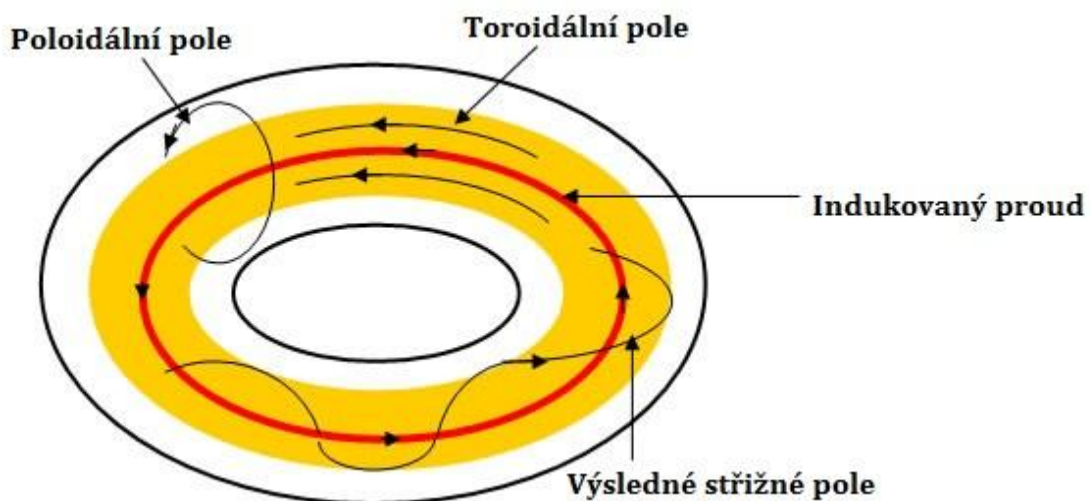
Existuje však i další soubor metod, označovaných jako **nepřímo hnaná fúze**. Jedním způsobem jak jí dosáhnout je ohřev paliva měkkým rentgenovým zářením.

Tím druhým je takzvaný pinč efekt. Základem tohoto jevu je proud procházející plazmatem, což vyvolá vznik azimutálního pole kolmého na směr proudu. Když proud prochází válcem, pak Lorenzova síla začne stlačovat plazma (proudový sloupec) směrem dovnitř k ose. Tím dochází k urychlení částic uvnitř proudového sloupce a následnému zvýšení teploty. Pokud by ohřívání stoupalo neomezeně se zvyšováním hodnoty proudu, potom bychom mohli při dostatečném proudu zapálit fúzi. Bohužel se zvyšujícími se hodnotami magnetického tlaku stoupá i tlak kinetický a v momentě

vyrovnání těchto dvou tlaků dojde k expanzi pinče. Z tohoto důvodu není pinč v současnosti perspektivním pro řízenou termojadernou fúzi. [1,3,4]

## 2. Magnetické

V současné době se jako nejpravděpodobnější způsob dosažení řízené termojaderné syntézy jeví magnetický způsob udržení. Na rozdíl od inerciálního udržení, pracuje s magnetickým polem, které udržuje částice plazmatu v uzavřeném prostoru. Jak již bylo řečeno, částice v magnetickém poli opisují kružnice okolo jeho siločar. Čím je pole silnější, tím menší je poloměr kružnice, což snižuje pravděpodobnost srážky s jinou částicí. Srážky představují jedinou možnost, jak se částice mohou pohybovat ve směru kolmém na magnetické siločáry a tudíž z toho plyne, že čím je pole silnější, tím lépe se udržuje stabilita drah částic a tím méně jich uniká z pole.



**Obr. 4. Magnetické pole**

Uzavřené prostory tedy netvoří pevný materiál, ale magnetické pole. Těmto útvarům se říká magnetické nádoby. Tvary těchto nádob jsou rozličné, ale dají se rozdělit na dva základní typy. Nádoby otevřené a nádoby uzavřené.

U těch otevřených se zabráňuje úniku částic zvýšením intenzity magnetického pole na koncích nádoby. Této technologii se říká magnetická zrcadla, či magnetické pasti. Ovšem vždy existují částice, které mají ten „správný směr“ a z pasti uniknou. I přes

intenzivní výzkum se tak otevřené nádoby neosvědčily. Nicméně bez pokusů s otevřenými nádobami by nedošlo k objevu, který pomohl eliminovat tzv. **Bohmovu difuzi**.

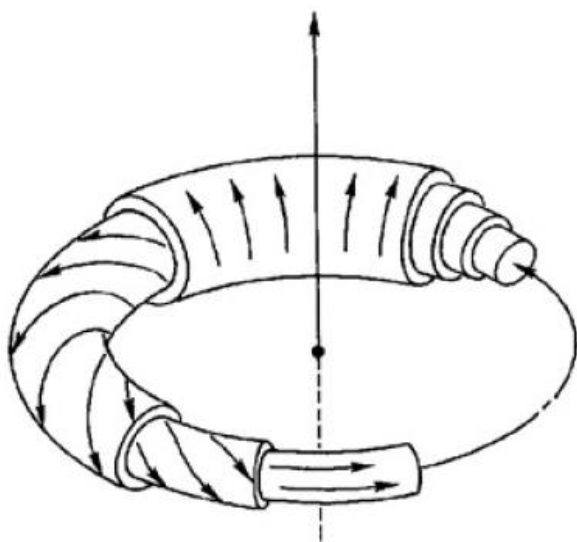
Klasická difuze v plazmatu je závislá na magnetickém poli s koeficientem  $B^{-2}$  tzn., Pokud se pole zesílí na dvojnásobek, difuze se zmenší čtyřnásobně. Zatímco Bohmova difuze má koeficient pouze  $B^{-1}$ , čímž se její eliminace stává obtížnou. Tento jev způsoboval takové ztráty, že v jednu dobu si fyzikové mysleli, že úplně zastaví vývoj magnetického udržení jako průmyslového zdroje energie.

Sovětský fyzik Abram Ioffe naštěstí při pokusech udržet částice v otevřených nádobách vybavil magnetické zrcadlo podélnými tyčemi, kterými protékal elektrický proud. To způsobilo tu správnou konfiguraci magnetické pole pro snížení vlivu Bohmovy difuze.

Uzavřené nádoby jsou dnes hlavními kandidáty na výrobu elektřiny za pomoci fúze. Z historického vývoje zrodily dva typy těchto nádob. Na západě stelerátor a na východě tokamak. Oba mají své výhody a nevýhody, ačkoli tokamaky získaly v posledních letech před stelerátory náskok. V následující kapitole si oba typy popíšeme. [1,2,3,4]

### III. Tokamak a stelerátor

Obě zařízení jsou si podobná jak konstrukčně, tak principiálně. Tokamak i stelerátor mají typický tvar toroidu, koblihy s dírou uprostřed a užívají magnetického udržení. Ke generaci magnetického pole oba využívají externí cívky. Cílem jejich provozu je kontinuální slučování jader D-T, na rozdíl od inerciálního udržení, kde se jedná spíše o cyklus, podobně jako ve spalovacích motorech. Vzhledem k tomu, že se jedná o uzavřené magnetické nádoby, částice by v ideálním případě vůbec neměly opouštět prostor vymezený magnetickým polem. V praxi k němu ale docházelo v důsledku toroidálního driftu, způsobeného nehomogenitou pole a odstředivou silou částic.



**Obr. 5. Šroubovicové pole [1]**

Důsledkem je odlétávání částic na stěnu komory reaktoru. Tento problém byl vyřešen aplikací tzv. šroubovicového (střižného) pole (viz obr. 5.), které je kombinací pole toroidálního a poloidálního. Toroidální pole má směr siločar opisující kružnici okolo hlavní osy reaktoru, zatímco siločáry pole poloidálního se „obotáčí“ kolem stěn toroidu jako drát kolem cívky. [1,2,4]

#### 1. Stelerátor

Hlavním rozdílem stelerátoru od tokamaku je, že plazmatem uvnitř neprotéká elektrický proud. To s sebou nese rozdílné požadavky na konstrukci, především k vytváření šroubovicového pole si musí stelerátor vystačit pouze s tvarováním vnějších cívek. To vede k neobvyklým tvarům, které vzdáleně připomínají matematický toroid.

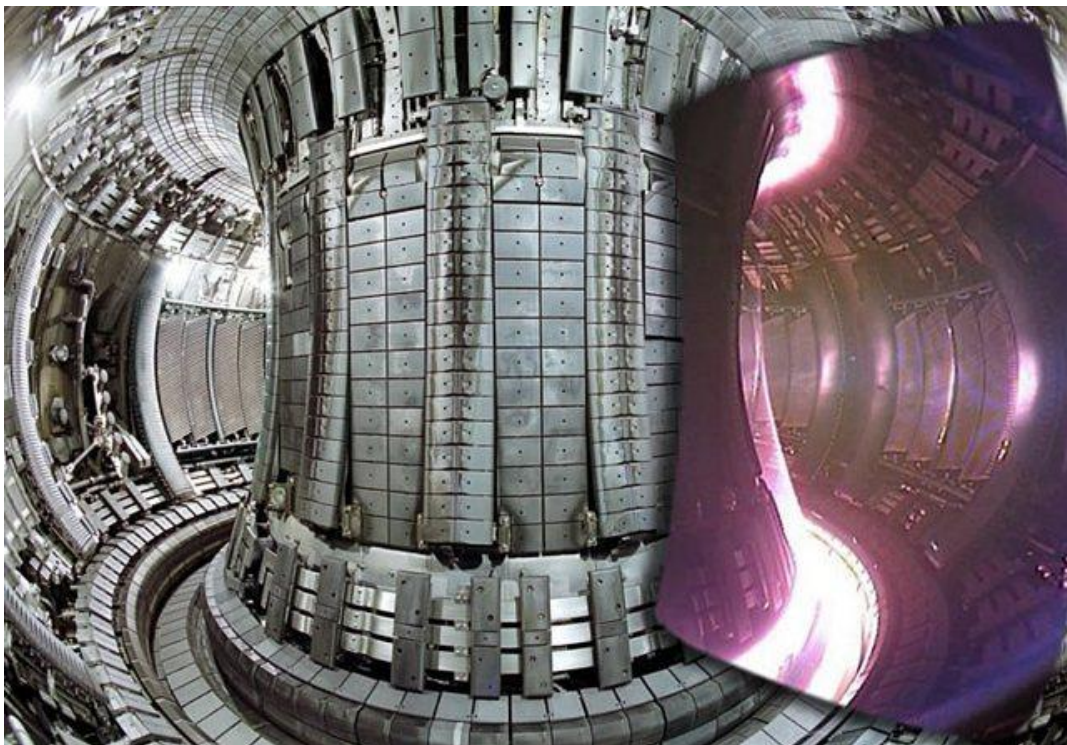
Stelerátory se potýkaly se značnými obtížemi, hlavně tzv. Bohmovou difúzí. Až s masivním vývojem výpočetní techniky bylo možné vypočítat a sestavit ideální tvary reaktorů, což umožňuje delší časy udržení. Navzdory současnému pokroku si tokamaky

drží nad stelerátory náskok. Nicméně i stelerátor má své výhody. Zatímco tokamak potřebuje obrovské množství elektřiny, aby mohl naindukovat proud plazmatem, stelerátor takovou zátěží netrpí. V budoucnu by mohlo jít o ekonomickou výhodu a má to i vliv na stabilitu.

Dosud největším stelerátorem světa je japonský Large Helical Device (LHD – neplést s Large Hadron Collider Device), který již dosáhl překvapivých výsledků. V Německu se pak staví ještě větší zařízení Wendelstein W7-X, jimiž se budu zabývat v dalších kapitolách. [1,4,7,12]

## 2. Tokamak

Jasnou jedničkou termojaderného výzkumu dneška je Tokamak. Samotný název pochází z ruského TOroidalnaja KAmera i MAgnitnyje Katuški, což znamená toroidální komora a magnetické cívky. [1]



**Obr. 6. Vakuová komora vypnutého/zapnutého tokamaku [13]**

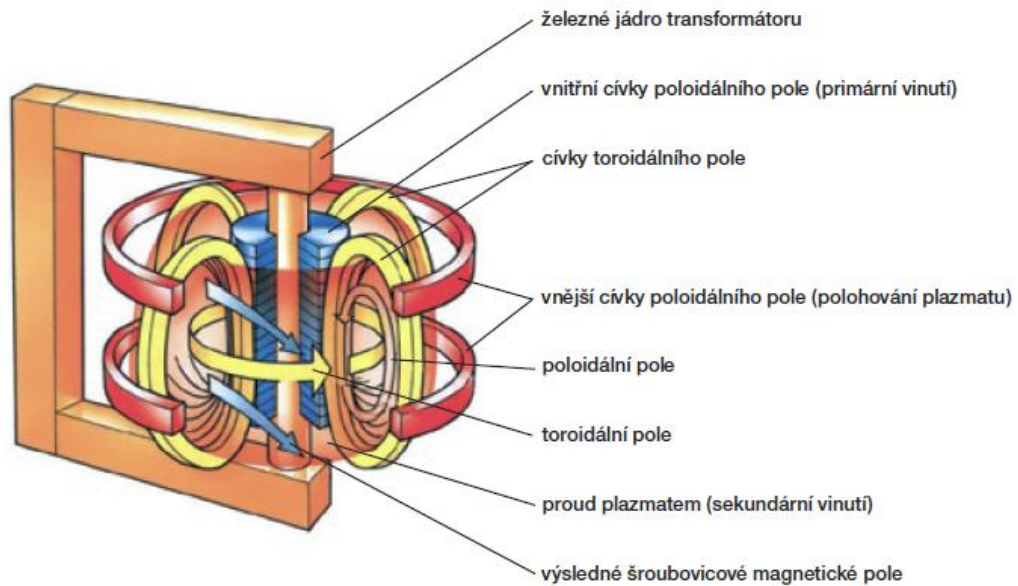
## 2.1 Historie tokamaku

- Tokamak se zrodil na počátku padesátých let dvacátého století v Sovětském svazu. Jako první roku 1949 navrhl v dopise Stalinovi seržant Oleg Alexandrovič Lavrentěv schéma s popisem termonukleárního reaktoru, v němž by bylo žhavé plazma udržováno elektrostatickým polem. Toto pole bylo nahrazeno magnetickým.
- V květnu 1951 vláda Sovětského svazu rozhodla o zahájení výzkumu magnetického termonukleárního reaktoru. V témže roce byl poprvé navržen Tokamak, z něhož vycházíme dodnes.
- K dalšímu významnému vědeckému poznatku došel John David Lawson roku 1955, kdy stanovil tzv. breakeven, kritérium pro nulový zisk energie z fúzní reakce. Dnes značíme breakeven jako  $Q=1$ , tj. kdy je poměr energie na vstupu a na výstupu v rovnováze.
- V roce 1956 zveřejňuje Lev Arcimovič Lawsonovo kritérium pro D-D reakci:  $n\tau_E = 10^{21} \text{m}^{-3} \text{s}$  při teplotě  $T = 10^8 \text{K}$ .
- Roku 1956 se po přednášce Igora Kurčatova v Anglii začala rozpadat informační zeď mezi východem a západem, což vyvrcholilo na druhé konferenci o Mírovém využití jaderné energie v Ženevě, konané v roce 1958. Mezitím začala fungovat ZETA, toroidální pinč sestavený v Anglii.
- Tzv. Ioffeho tyče a s nimi spojené odstranění nechvalně známé Bohmovy difuze, byly světu představeny roku 1961.
- Na třetí konferenci Fyziky plazmatu v roce 1968 zveřejnili sovětští vědci dosud nejvyšší dosaženou teplotu na tokamaku T-3, 10 milionů stupňů.
- V roce 1973 byly zahájeny práce na dodnes největším tokamaku světa, anglickém JET – Joint European Torus.
- Roku 1977 se zrodila myšlenka na INTOR, mezinárodní tokamak, jehož výstavba se nikdy neuskutečnila, ale vědci se díky němu se vědci naučili spolupracovat.
- O rok později se poprvé objevili supravodivé magnetické cívky na tokamaku T-7

- 1983 – dokončení a první provoz JET, na kterém spolupracuje 350 vědců a inženýrů z celého světa. JET posunuje nejvyšší hodnotu proudu protékajícího plazmatem na 1 MA.
- Roku 1987 se zástupci Evropské unie, Sovětského svazu, Japonska a USA zavázali ke spolupráci na společném projektu ITER, který se má stát jedním z posledních předstupňů fúzní elektrárny. V následujícím roce jsou zahájeny projektové práce.
- 1991 – První použití D-T (89 %D – 11 %T) směsi v tokamaku JET
- Roku 1998 se dostala v USA k moci republikánská strana, která zastavila financování magnetického udržení. Původní design ITERu obsahující 1500 MW fúzního výkonu,  $Q=\infty$ , v ceně 6 miliard USD byl ohrožen.
- V roce 2001 byl vypracován redukováný projekt ITER, cena byla snížena na 3 miliardy USD, fúzní výkon 500 až 700 MW a  $Q > 10$
- V roce 2003 se k ITERu připojila Korea, Čína a znovu se zapojují USA
- V roce 2005 byla konečně jako místo pro stavbu ITERu vybrána francouzská Cadarache
- Od roku 2005 do současnosti probíhá výstavba projektu ITER
- V současné době jsou, opomeneme-li infrastrukturu a podpůrné budovy, hotovy základy a seizmické bloky chránící budovu tokamaku před zemětřesením [1,5]

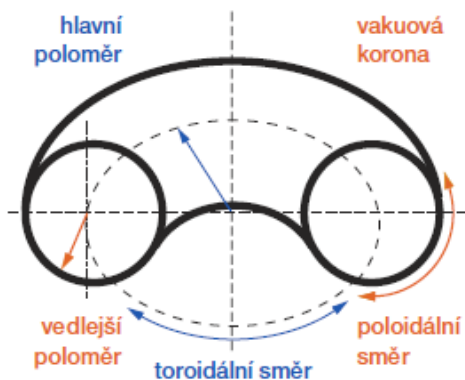
## 2.2 Konstrukce tokamaku

Tokamak je ve své podstatě obrovský transformátor s jedním závitem sekundárního vinutí. Reaktorová komora má tvar toroidu, či chcete-li nafouknuté duše od kola. Středem tokamaku vede transformátorové jádro. Komoru obklopují dokola cívky. Samotné plazma uvnitř komory potom tvoří ono sekundární vinutí.



**Obr. 7. Schéma tokamaku [1]**

Každý tokamak definují jeho základní rozměry a směry. Směry máme toroidální a poloidální. Jak už možná název napoví, korespondují tyto směry s magnetickými poli, které se zde vyskytují. Směr toroidální nalezneme podél kružnice opisující kolem



střední osy reaktoru (transformátorového jádra). Naproti tomu směr poloidální i jeho magnetické pole jsou v podstatě další kružnicí kroužící kolmo na toroidální směr. Definující rozměry tokamaku představují hlavní poloměr  $R$ , vedoucí od osy do středu komory. Vedlejší poloměr  $a$  je pak poloměrem samotné komory reaktoru. [1,2]

**Obr. 8. Rozměry a směry v tokamaku [1]**



## 2.3 Princip fungování

Aby vůbec došlo k termonukleární fúzi, musí se jádra atomů přiblížit na slučovací vzdálenost. Ta, jak již bylo řečeno, činí  $10^{-14}$  m. V takové blízkosti už překonává přitažlivá síla jader elektrostatický odpor. Tokamak k přiblížení na tuto vzdálenost využívá zahřátí na velmi vysoké teploty.

Žádný typ hoření nevyvolá teploty v řádech milionů stupňů, proto se plazma v tokamaku ohřívá Jouleovým teplem. Proud v plazmatu se naindukuje díky transformátorovému efektu a následně vlivem vysokého odporu vyvolá zahřívání.

$$P = R \cdot I^2$$

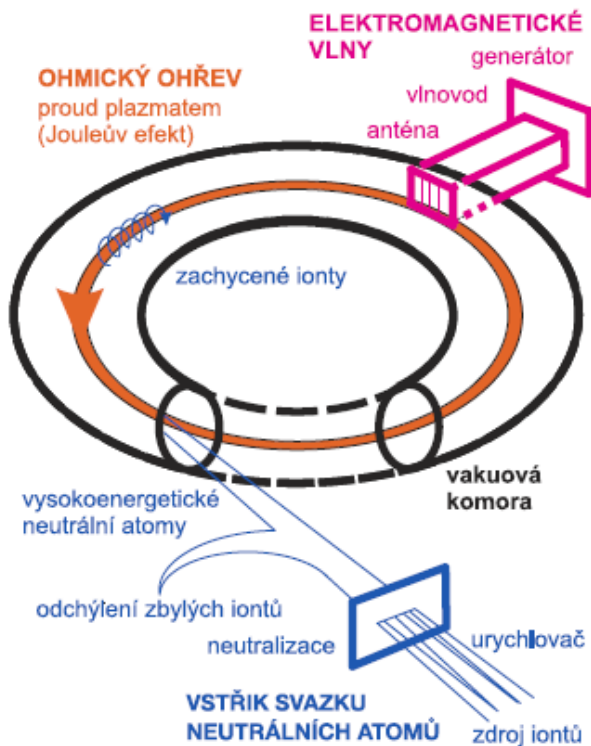
**P** – Uvolněný výkon, **R** – Odpor plazmatu, **I** – Protékající proud

Ohřev probíhá velmi rychle, teploty milionů stupňů dosáhne v řádech milisekund. Bohužel se vzrůstající teplotou plazmatu klesá i jeho odpor, což brzy způsobuje snižování efektivity ohřevu.

V této fázi nastupují přídatné systémy ohřevu. V praxi se používají dva typy.

Prvním je absorpce **elektromagnetických vln** v plazmatickém provazci. Můžeme použít několik různých frekvencí vlnění. Buď cyklotronní rezonanční frekvenci, shodnou s frekvencí rotace nabitých částic kolem magnetických siločar, 10 – 120 MHz u iontů a 70 – 200 GHz u elektronů. Nebo použití vln na dolní hybridní frekvenci. Na podobných principech ohřevu pracují i mikrovlny v domácích troubách. Energie vlnění se v obou případech uvolní rezonancí.

Druhým způsobem přídatného ohřevu je vstřik svazku neutrálních atomů přímo do plazmatu. Částice s energií až stonásobně vyšší než ty, které jsou přítomné, předají srážkami svou energii ohřivanému plazmatu.



**Obr. 9. Způsoby ohřevu plazmatu [1]**

Ve chvíli, kdy dosáhneme termojaderných slučovacíh teplot, dojde k reakci a energie uvolňovaná při fúzi vytváří tzv. samoohřev. Ten je klíčovým prvkem všech tokamaků, neboť z něj se vypočítává  $Q$  tj. termojaderný výkon. V budoucnu se počítá s tím, že samoohřev by vyjma zapálení reakce měl stačit pro udržování termojaderných podmínek uvnitř komory tj. dosáhnout  $Q > 1$ . Dosud bylo dosaženo pouze  $Q = 0,65$  na tokamaku JET. Až tokamak ITER by měl dosáhnout breakevenu ( $Q > 1$ ), konkrétně by zde měl být fúzní výkon vyšší než 10. [1,2]

## 2.4 Problémy tokamaku

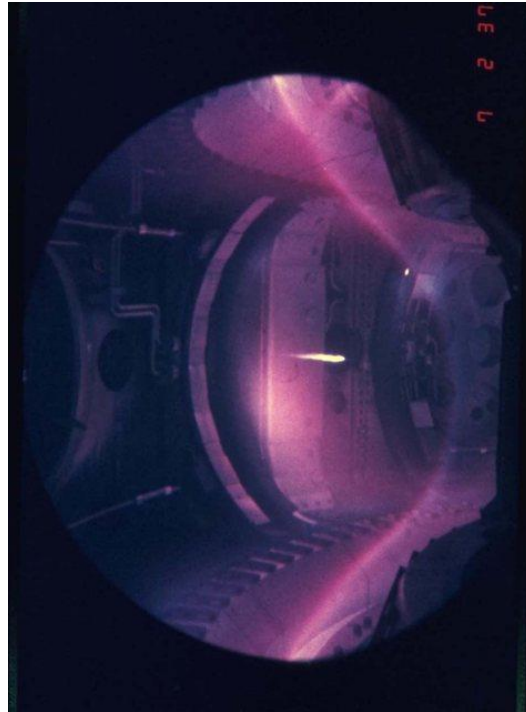
Ačkoli se zdá, že teoretické problémy termojaderné fúze již byly zjištěny a jejich řešení budou implementovány do příštího zařízení (ITER), má tokamak zásadní nedostatky.

Patří mezi ně tzv. **nasycení transformátorového jádra**. Podstatou tohoto jevu je, že při vysoké magnetické indukci (u tokamaků i desítky Tesla) ztrácí železné jádro svou permeabilitu až na úroveň vakua. Poté vymizí proud plazmatem a magnetické pole tak změní konfiguraci. Důsledkem je odlétávání plazmatu na stěnu komory a zhroucení reakce. Než k tomu dojde, uplyne sice asi *10 až 20 sekund*, nicméně budoucí elektrárna musí dodávat konstantní výkon po dlouhá časová období. Nejjednodušším řešením problému je zřejmě rychlé přepólování, způsobující změnu směru proudu v plazmatu.

Alternativní k přepólování je tzv. vlečení proudu. Jde o neinduktivní generaci proudu, při které se vpouští elektromagnetické vlnění na dolní hybridní frekvenci do plazmatu. Výsledné vlny potom nesou (vlečou) elektrony.

Dalším, i pro laika odvoditelným, problémem je: Co se stane s heliem, vzniklým reakcí **D** a **T**. Odpovědí je, že v komoře zůstává jako spaliny, odpad jaderné reakce. Problémem tedy je, jak ho odvést pryč. Faktem je, že při konstrukcích prvních tokamaků se odvodem helia konstruktéři příliš nezabývali, protože výboje byly příliš krátké na vznik značného množství odpadu. Proto se musel typický kruhový průřez komory, kde hranice plazmatu vymezoval tzv. **limiter** (pevný materiál, z vysoce tepelně odolného materiálu) změnit na tvar písmene D. Tak vznikl **divertor**, vnitřní součást reaktoru, která usměrňuje magnetické siločáry směrem dolů z toroidu do divertorové komory. Zde se na divertorových deskách zachycují atomy jak helia, tak ostatní nečistoty např. uhlík, kyslík. Ty nepochází z reakce, ale ze stěn, či do komory pronikají mikrometřskými.

Otázkou kterou je třeba vyřešit je doplňování fúzního paliva. Pokud má reaktor v čase dodávat stálý výkon, nelze ho vypnout, proto musí být **D-T** směs dodávána za chodu. Prosté napouštění plynných izotopů vodíku nepřipadá v úvahu. Vysoké teploty totiž způsobí ionizaci plynu a silné magnetické pole jej drží z dosahu středu komory, kde jsou termojaderné podmínky. Existují dva přístupy, jak tento problém vyřešit. Jedním je vstřelování hluboce zmražené směsi D-T v kapslích o objemu až  $100 \text{ mm}^3$  (viz obr. 9.). Rychlost vstřelování se pohybuje v řádech  $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$  (až  $10 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ ) a dochází k němu i 16krát za sekundu. Druhým způsobem doplňování je nadzvukové napouštění plynu tryskou s grafitovou hlavou, která vydrží tepelné zatížení.



**Obr. 10. Doplňování paliva vstřelováním [13]**

Posledním, ale zdaleka ne nejméně závažným problémem tokamaků jsou nestability. Existuje celá řada jevů, které bychom mohli do toho oboru počítat (Bohmova difuze, toroidální drift), a proto se zaměřím spíše na jejich řešení, než podstatu. Nestability vedou k turbulencím v plazmatu, což zvyšuje úniky částic na tzv. **první stěnu komory** (až  $20 \text{ MW}\cdot\text{m}^{-2}$ ). Cílem je proto vybrat ideální materiál, který vydrží extrémní zatížení po dlouhou dobu. Neméně důležité je zajistit dostatečný odvod tepla a předejít tak poškození součástí. Obojímu napomáhá správný výběr režimu výboje. V tokamacích vybavených divertorem funguje tzv. H-mod (High), režim výboje u kterého vzniká transportní bariéra zabraňující lépe únikům částic a tepla na stěnu komory. Výsledkem je delší doba udržení výboje. Oproti tomu klasický režim se nazývá L-mod (Low). [1]

#### IV. ITER

International Thermonuclear Experimental Reactor. Latinsky též CESTA. Je projekt největšího tokamaku, jaký byl zatím postaven. Jeho koncept vznikl v osmdesátých letech, kdy vedení tehdejšího Sovětského svazu iniciovalo rozhovory o mezinárodním termojaderném reaktoru. V roce 1987 byla zástupci USA, SSSR, EU a Japonska podepsána smlouva, na jejímž konci měl stát reaktor zhodnocující celkovou schopnost termonukleární fúze plnit funkci zdroje energie.

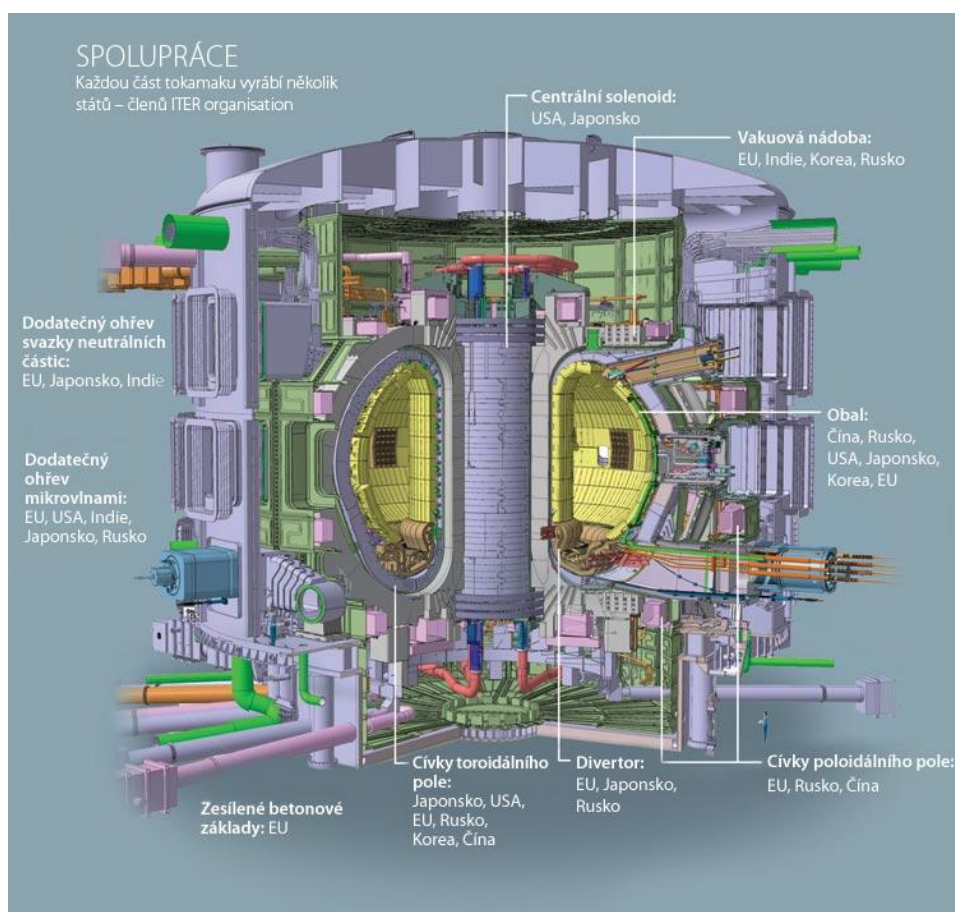
Původní parametry tokamaku z roku 1998 počítaly s objemem plazmatu  $2000\text{ m}^3$ , procházejícím proudem  $22\text{ MA}$ , fúzním výkonem  $1500\text{ MW}$  a hlavně  $Q=\infty$ , což by znamenalo nepřetržitý výboj. Projekt měl stát 6 miliard USD.

Bohužel politické vlivy takto velkému zařízení nepřály a po odstoupení USA od projektu v roce 1998 začal kolísat i zájem ostatních stran. Proto byl pro ITER vypracován nový, redukovaný projekt. Jeho parametry: Cena 3 miliardy USD. Objem plazmatu  $837\text{ m}^3$ , proud plazmatem  $15\text{ MA}$ . Fúzní výkon  $500\text{ MW}$ , při  $Q>10$ . Pokud je  $Q$  konečné číslo, znamená to, že i výboj není nekonečně dlouhý. U ITERu se počítá s délkou pulzu  $400\text{ sekund}$ .

Roku 2002 se však zájem o ITER znovu rozhořel a o hostitelství zařízení se přihlásilo hned několik zemí. Francie (Cadarache), Kanada (Clarington), Španělsko (Vandellós) a Japonsko (Rokkasho). S vědomím velkého potenciálu zadaných zakázek na komponenty zařízení se země pustily do boje o ITER. Ze čtyř kandidátů nakonec zbyli dva, Cadarache a Rokkasho, ale ačkoli se Japonci usilovně o projekt ucházeli, bylo vybráno francouzské Cadarache. Japonci však dostali „cenu útěchy“ ve formě více zaměstnanců v ITER, přednostní práva na některé zakázky a ředitelem společnosti ITER Organization bude Japonec. Od roku 2005 tak probíhají organizační a stavební práce ve Francii. Předpokládané dokončení projekt, často označované jako „první plazma“ je naplánováno na rok 2019. Pak začne první část experimentu, věnovaná především fyzikálním problémům a experimentům pouze s deuteriem k vyladění reaktoru. Tím by se měli vědci zabývat přibližně do roku 2026, kdy začne druhá fáze. Ta bude zahrnovat pokusy se směsí deuteria a tritia a tím otestuje inženýrské zpracování projektu.

Generovaný fúzní výkon a jeho odvod poskytne energetikům náhled do budoucí fúzní elektrárny. Po roce 2030 (udává se 2034) je naplánovaná demontáž tohoto výjimečného zařízení.

Projekt je unikátní hned v několika aspektech. Jednak jde o první skutečně mezinárodní tokamak (projekt INTOR se nedostal do fáze realizace), dále jako první dosáhne tzv. breakevenu a je největší (a také nejdražší). Zatímco menší tokamaky zkoumají dílčí vlastnosti fúze, ITER by je jako první měl zkombinovat a poskytnout tak celkový obraz jevů za přítomnosti ostatních. [1,13]



**Obr. 11. Řez tokamakem ITER + dodavatelé součástí [16]**

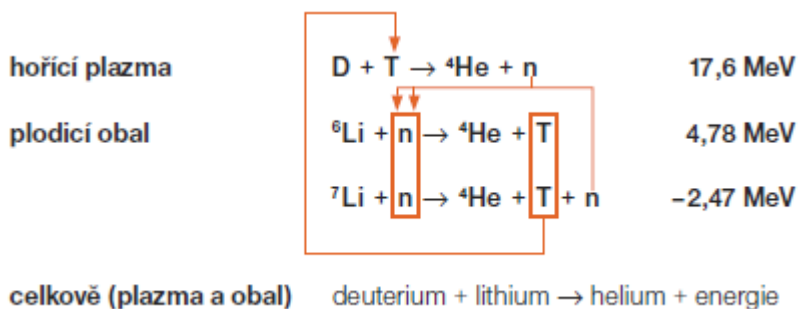
## 1. Součásti ITER

V této kapitole si popíšeme jednotlivé komponenty tokamaku ITER.

### 2.1 Interní (tokamakové) součásti

**Vakuová komora** – Ústřední součást tokamaku. Zde probíhá termojaderná fúze v  $837 \text{ m}^3$  plazmatu ohřivaném na 150 milionů °C. Průměr komory bude 19 m a výška 11 m. Celková váha dosáhne 5000 tun. Kolem komory povede v kanálcích chladící voda, odvádějící enormní teplo z reakce (v budoucí elektrárně se bude využívat na změnu vody v páru a výrobu elektřiny). První stěnu (nejblíže k plazmatu) bude pokrývat tzv. blanket, za stíněný dvojitou vrstvou oceli.

**Blanket** – Primární štít, zabraňující teplu a neutronům z fúzní reakce poškodit systémy tokamaku. Zde se kinetická energie neutronů změní v teplo, odváděné vodou. Pro lepší údržbu se blanket bude sestávat ze 440 segmentů (každý měří  $1,5 \times 1 \text{ m}$ ). Povrch blanketu pokryje beryllium, zbytek ocel a vysoce odolná měď. V pozdější fázi výzkumu se začne blanket využívat k produkci vlastního tritia pro jadernou fúzi. V současnosti jsou zásoby tritia omezené a jeho produkce je značně neekologická. Proto byl vymyšlen koncept tzv. plodícího blanketu, kde se lithium vlivem srážek s neutrony změní v tritium (viz obr. 12.).



**Obr. 12. Tvorba tritia v blanketu[1]**

**Magnety** – Další nezbytnou součástí tokamaku jsou jeho magnetické cívky. Bez nich by nebylo možné plyny zahřívát ani udržet plazma ve vymezených prostorách. V ITER se kvůli extrémně silnému magnetickému poli (asi 13 Tesla) musí využívat supravodivých materiálů. Klasické cívky by zabíraly příliš mnoho místa a hlavně proudy protékající vodičem by vyžadovaly dodatečná odvod tepla. Oproti tomu cívky supravodivé jsou konstantně chlazeny na  $-269\text{ °C}$  kapalným heliem, přičemž prakticky ztrácejí odpor a mohou jimi protékat velké proudy. Celý systém magnetů můžeme rozdělit na tři části, toroidální systém, poloidální systém a centrální solenoid.

Toroidální systém, cívky udržující plazma v mezích magnetického pole indukci 11,8 Tesla. Těchto 18 elektromagnetů, navinutých z celkem 80 000 km supravodivých kabelů, obklopuje komoru paradoxně v poloidálním směru.

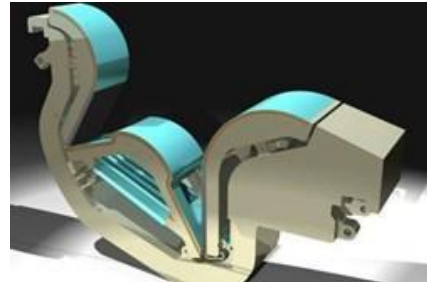
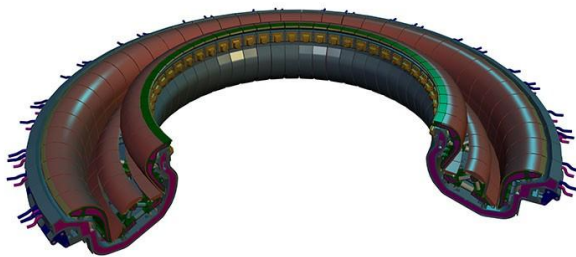
Poloidální systém je o mnoho slabší než toroidální a pomáhá stabilizovat plazma a oddalovat ho od stěn. Jeho pole je generováno jak magnety, tak samotným proudem protékajícím v plazmatu. Konstrukci tvoří šest horizontálních cívek obklopujících komoru v toroidálním směru. Tyto cívky jsou tak velké, že se musí navíjet přímo v areálu ITER.

Centrální solenoid je vlastně obrovský transformátor, zajišťující primární indukci napětí v plazmatu. Je tvořen šesti svazky supravodivých cívek procházejícími středem komory. Primárním vinutím (cívkami solenoidu) bude protékat 46 kA, což naindukuje na sekundárním vinutím proud (samotném plazmatu) proud až 17 MA. [8]

**Divertor** – Zařízení určené k zachytávání nečistot a heliových spalin z fúzní reakce. Nachází se na samém dně komory a je složen z 54 individuálních kazet. Magnetické siločáry jsou odkláněny (z anglického divert) na divertorové desky, zde dochází k nejintenzivnějšímu tepelnému zatížení materiálu. Na divertoru se nachází celkem tři takové plochy: Vnitřní vertikální terč, vnější vertikální terč a dóm. Materiál pro tyto styčné plochy s plazmatem musí vydržet plánovaný 20letý provoz. Volba materiálu je proto naprosto zásadní. Původně se počítalo s dvěma koncepty: Nejdříve se měl vyzkoušet divertor ze struktury uhlíkových vláken (výborně tepelně vodivý) a po něm



wolframový (nižší riziko eroze). Nicméně škrty v rozpočtu naznačují, že se použije pouze levnější wolframový typ.



**Obr. 13. Divertor v ITER [13]**

**Obr. 14. Segment divertoru [13]**

**Externí ohřev** – Jak již bylo řečeno, samotný proud v plazmatu nedokáže ohřát plazma na 150 milionů stupňů, potřebných pro zapálení fúze. Proto bude mít ITER hned tři systém externího ohřevu.

Prvním je vstřik neutrálních atomů deuteria. Princip fungování je poměrně jednoduchý, do plazmatu se vhání neutrální atomy (nabití ionty by se odrazily od magnetického pole) s kinetickou energií až 1MeV, které potom srážkou s plazmatem přemění svou energii na tepelnou. Pouze nabití ionty však mohou být urychleny v elektrickém poli, proto se nejdřív odebere deuteriu elektron a vznikne pozitivně nabitá částice. Po urychlení se částice (iont) dostane do komory s plynem, ve které doplní svůj chybějící elektron a pokračuje do plazmatu.

Druhý a třetí typ ohřevu se dají shrnout do jedné skupiny. Jde o ohřev elektromagnetickými vlnami o rezonančních frekvencích. V plazmatu jsou dva typy částic, které mohou být ohřívány rezonancí: Kladně nabitá jádra a elektrony. Jádra vyžadují frekvenci ohřevu 40 – 55 MHz, zatímco elektrony potřebují 170 MHz.

**Diagnostika** – Dosažené výsledky v tokamaku by nám nebyli k ničemu, pokud bychom je neuměli změřit. K tomu slouží rozsáhlý diagnostický systém, měřící teplotu plazmatu, hustotu, koncentraci nečistot a další parametry. Měřící systémy budou sestávat laserů, rentgenů, neutronových kamer atd.

**Kryostat** – Kopulovitý obal z nerezové oceli, poskytující systémům tokamaku tepelnou izolaci. V železné konstrukci je mnoho otvorů (vstupy diagnostiky, chlazení...), z nichž některé jsou až 4 metry široké. Tudy se provádí údržba blanketu, divertoru atd. Kryostat je 28 metrů široký a 29 metrů. [13]

## 2.2 Externí součásti

### Vakuový systém

Vytváření vakua uvnitř reaktorové komory patří k nejdůležitějším podpůrným systémům tokamaku. Za normálního tlaku by reakce neprobíhala vlivem znečištění. Pumpy v ITER vytváří tlak jedné miliontiny atmosférického tlaku tj. asi  $0,1 \text{ Pa}$ . Objem vakuové komory je celkem  $1400 \text{ m}^3$  (plazma zabírá asi 60 % tohoto prostoru). Odčerpání takto velký prostor trvá 1 až 2 dny.

### Kryogenika

Chladicí systémy mají v projektu ITER velmi široké využití. Navzdory vysokým teplotám uvnitř tokamaku musí být supravodivé magnety a další systémy chlazeny na velmi nízké teploty (až  $-269^\circ\text{C}$ ). Toho se dosáhne za pomoci rozvodů kapalného helia, jehož bude v zásobě  $25 \text{ tun}$ . Chlazení helia zprostředkují tři dusíkové výměníky tepla a  $3 \text{ km}$  kryopotrubí.

### Dálková obsluha

Obslužné rameno umístěné uvnitř komory zastane údržbové práce. Díly blanketu a divertoru vázací až  $50 \text{ tun}$  rameno vymontuje a skrze tzv. port vloží do transportního soudku.

### Energetické zásobování

Požadavky ITER na příkon elektrické energie budou kolísat od  $110 \text{ MW}$  do  $620 \text{ MW}$  (během kulminace procesů v tokamaku). Přívod elektřiny zajistí nedaleké  $400 \text{ kV}$  vedení, které se ve třech krocích transformuje na  $69 \text{ kV}$  a dále na běžné napětí. 80 % veškeré energie si vyžádá chladicí voda a kryogenický systém. Záložní zdroj pro ITER obstarají 2 dieselové generátory.

## **Palivový cyklus**

Jak již bylo zmíněno, z reakce se musí odčerpávat vzniklé helium a další nečistoty. Bohužel s tím je spojeno i nechtěné odstranění nespáleného paliva D-T. Proto se vedle přísunu nového paliva objeví další prvek zařízení, znovuzískávání. Spaliny reakce projdou kryodestilací, z níž se jedním vývodem odčerpá helium do zásob a druhým nespálená D-T směs. Ta se následně spojí s tritiem z blanketu a zásobním deuteriem a spolu poputují zpět do komory.

## **Hot Cell**

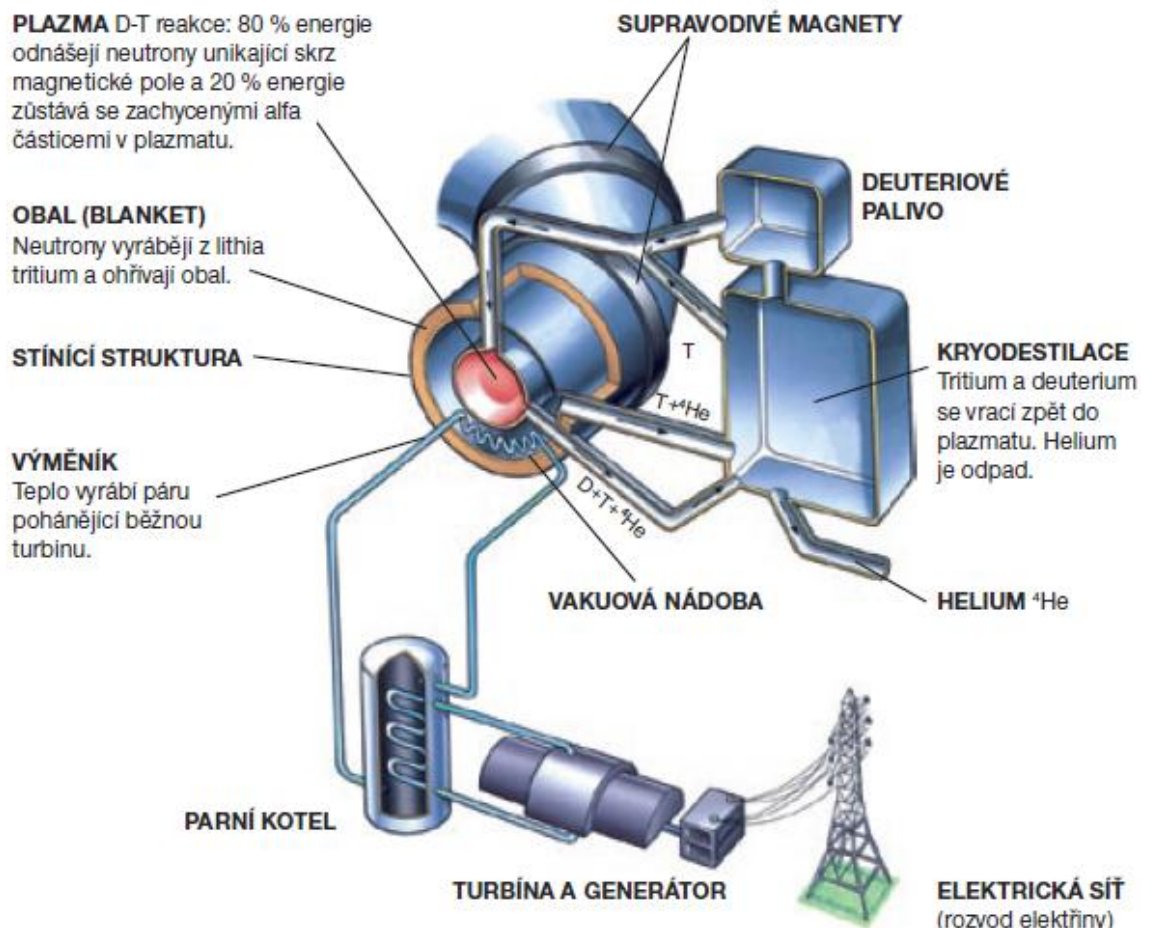
Plným názvem Hot Cell Facility, bud samostatná budova, určená pro skladování a dekontaminaci sekundárně radioaktivních komponentů a materiálů. Přestože fúzní reakce nemá žádné přímo radioaktivní odpady, její neutronové záření vytváří z regulérních prvků radioaktivní izotopy. Nejsou sice tak nebezpečné jako odpady štěpné reakce, ale přesto musí být po určitou dobu umístěny ve stíněné kontejnmentové komoře. Hot Cell bude dále čistit komponenty zanesené tritiem (produkty jeho rozpadu jsou radioaktivní). Samotná budova bude 4 patra vysoká, s objemem 130 000 m<sup>3</sup>.

## **Chladící voda**

Systém odvádění tepla z tokamaku (neplést s kryogenikou, ta chladí pouze supravodivé části). Hlavní chladicí proces zastane voda na divertoru a blanketu komory, kde bude udržovat teplotu cca. 240 °C. Dále poputuje voda k systémům sekundárního ohřevu a elektrického zásobení. Průtok systémem se odhaduje na 33m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>. [13]

## 2. DEMO

DEMO je projekt reálné elektrárny navazující na poznatky z ITERu. Termín jeho stavby, parametry a cena budou záležet na úspěších či neúspěších projektu ITER. Pokud však půjde vše podle plánu, měla by se demonstrační elektrárna na fúzní pohon (DEMO) začít projektovat okolo roku 2014. Zahájení staveb by tak vyšlo na rok 2032 a uvedení do provozu o dva roky později. Pro demo zatím existuje pouze hrubý odhad parametrů, který udává objem plazmatu  $1000 - 3500 \text{ m}^3$ , fúzní výkon  $2000 - 4000 \text{ MW}$  a  $Q = \infty$ . Po experimentu DEMO už (snad) budou následovat jen skutečné fúzní elektrárny. [1]



**Obr. 15. Funkční schéma budoucí fúzní elektrárny [1]**

## V. Hybridní reaktor

Hybridní typ reaktoru jsem zařadil do této samostatné kapitoly, protože nezapadá do již zmíněných oblastí. V principu jde o tokamak, který ale není primárně využíván jako zdroj energie z fúze, nýbrž jako zdroj neutronů. Nazývá se hybridním proto, že v jeho blanketu (viz výše) probíhá štěpná reakce. V tokamaku jako takovém probíhá fúzní reakce, která je skvělým zdrojem rychlých neutronů, potřebných pro jaderné štěpení. Na otázku, proč potřebujeme hybridní reaktor, když štěpné elektrárny už desítky let fungují je jasná odpověď. V klasické jaderné elektrárně štěpíme Uran ( $^{235}\text{U}$ ), vznikají nebezpečné, silně radioaktivní odpady, jak popisuje následující rovnice:



Oproti tomu v hybridním reaktoru budeme moci energeticky využít právě tyto nebezpečné odpady. To by přineslo hned několik výhod.

Za prvé bychom se zbavili tolik společensky neoblíbených jaderných odpadů. Některé prognózy tvrdí, že zhruba sedm až jedenáct takovýchto reaktorů by zlikvidovalo veškerý odpad z jaderných elektráren v USA a stovka hybridů by spolykala všechny jaderné odpady světa.

Za druhé jde o vydatný zdroj energie, ve své podstatě výkonnější než samotný tokamak. Hybrid o průměru 6m by dosáhl výkonu 100MW, zatímco např. ITER musí mít pro výkon 500MW průměr 30m.

A konečně za třetí tyto výhody představují perspektivu pro provozovatele jaderných elektráren, kteří by v hybridech mohli vidět způsob zbavení se odpadů, což by mohlo přilákat tolik potřebný soukromý kapitál. [1]

## VI. Budoucnost fúze

### 1. Výhody

Výhody energetického využití jsou zřejmě a nepopiratelné, jako zdroj je totiž fúze dosud nejúčinnější ze všech. V následující tabulce se pokusím nastínit výhodnost oproti jiným palivům.

#### Porovnání zdrojů pro výrobu 1GW elektrické energie

Zdroj	Spotřeba	Zásoby	Ekologie
Uhelná elektrárna	2,5 mil tun ročně	Asi 200 – 250 let	Vznik spalin, skleníkových plynů
Solární elektrárna	20 km <sup>2</sup> panelů	Neomezené	Zátěž vzniká při výrobě panelů
Štěpná elektrárna	28 tun UO <sub>2</sub> *	Asi 150 let	Štěpné odpady zatíží prostředí na tisíce let
Fúzní elektrárna	500 kg D-T směsi	Neomezené**	Téměř nulové, pouze vznikají sekundárně radioaktivní odpady

Ad \* - UO<sub>2</sub> je výchozím zdrojem pro výrobu Uranu 235

Ad \*\* - v budoucnu se plánuje využití trvalejších zdrojů než D-T

Kromě energetické výhody fúze se nabízí další a tou je strategická výhoda. Jde o to, že současné rozložení mocenských sil ve světě je ve značné míře vázáno na přírodní zdroje, jimiž jsou hlavně ropa, uhlí atd. Masové využití fúze by mohlo toto mocenské uspořádání roztříštit, protože zdroje fúze jsou dostupné všem. Jsou jimi voda (deuterium) a tritium si vyrobí rektor sám. V dalších fázích vývoje fúze by mohlo dojít ke spalování přímo deuteria (D-D), či dokonce ještě exotičtějších směsí jako D-He a další.

Termojaderná syntéza však může mít i jiné využití, například jako spalovna odpadů ze štěpných reaktorů (viz hybrid), nebo jako palivo do kosmických lodí. Otázka využití fúze v kosmu je velmi zajímavá. Současná paliva totiž nedovolují dosáhnout velkého tahu a lodím tak trvá let i k planetám blízko Země celé roky. Toto by fúzní pohon vyřešil a zároveň by odpověděl na otázku skladování paliv v kosmických lodích. Klasická paliva totiž zabírají mnoho místa, zatímco palivo fúzní je velmi kompaktní.

Fúzní reaktory by mohly přinést i řešení problému se spalováním paliv v automobilech. V současnosti se jako perspektivní jeví použití vodíku. Nicméně jeho nevýhodou je nákladnost jeho výroby ve velkém měřítku, dnes se za tímto účelem používá elektrolýza. Ta je však velmi energeticky náročná. Řešením je termické štěpení vody při tokamacích, ke kterému dochází za vysokých teplot (2500 -3000°C).

Z politicko-ekonomického hlediska je fúze záležitostí zajímavou. Dost možná by právě dostupnost fúze mohla uklidnit současný neutěšený stav ve světě, závislém na fosilních palivech. Těch neustále ubývá a otázka jejich nahrazení není zdaleka zodpovězená. Jako odpověď na tento problém se svého času jevily štěpné elektrárny. Nicméně čas ukázal, že navzdory bezpečnostním opatřením se občas přihodí katastrofa, která tento typ energie v očích veřejnosti nezvratně poškodí. [6,9,10,11]

## 2. Nevýhody

Přes všechny své zřejmé pozitiva, není termojaderná fúze úplně dokonalým zdrojem. V této krátké podkapitole se pokusím vysvětlit proč tomu tak je a udat příklady.

Za zcela nejpodstatnější nevýhodu je považována časová náročnost fúzních operací. Výzkumy využití této metody získávání energie začaly na počátku minulého století a dodnes nemá fúze blízko k dosažení průmyslové výroby elektřiny. V roce 1955 se prognózy zvládnutí termojaderné syntézy pohybovaly do 25 let, v osmdesátých letech vědci věřili, že fúzi zvládnou do třiceti let, zatímco dnes se počítá nejdříve s rokem 2050, tj. asi 40 let. Z tohoto trendu lze vyčíst, jak nevyzpytatelné jsou problémy spojené s fúzí.

Další nevýhodou je obrovská kapitálová náročnost projektů. ITER i po redukcí bude stát (podle projektu) 3 miliardy dolarů. Investice do nejistých projekt, jakým fúze bezesporu je, nejsou v dobách ekonomické či dluhové krize populární. Právě provázanost výzkumu fúze s politickou a ekonomickou situací osobně považuji za jeho největší neštěstí.

Jako technickou nevýhodu fúze bych rád uvedl její stálost. Pokud jde o magnetické udržení, energetický output musí být stálý, bez výkyvů. Bohužel současnou energetiku trápí nejen hlad po elektřině, ale i výkyvy spotřeby, závislé na ročním období, teplotách, či střídání dne a noci. Fúzní reaktory na bázi tokamaku nejsou schopny rychle se adaptovat. Řešení by byla inerciální fúze či pinče, jejich zvládnutí je ale v nedohlednu.

Zdánlivě neškodnou, avšak v dopadu možná nejhorší nevýhodou je samotné pojmenování termojaderná fúze. Dnešní nechuť lidí k jaderným technologiím často vede k předsudkům a to i v případě, že fúze nemá se štěpením nic společného. V očích veřejnosti se tak termojaderná fúze jeví jako něco špatného, k prostředí a lidem nepřátelského. [9,10]



## VII. Závěr

I přes všechny komplikace spojené s vývojem termojaderné fúze si osobně myslím, že z dlouhodobého hlediska, je tento způsob získávání energie jedinou schůdnou cestou, jak utišit energetický hlad lidstva. Tím nechci naznačit, že jiné zdroje jsou špatné, například obnovitelné zdroje mají a jistě budou mít své využití. Dle mého názoru by se však takovéto alternativy dali uplatnit spíše v malém měřítku (domácnosti, chaty). Zatímco spotřebu průmyslu, dopravy a dalších velkých odběratelů elektřiny by měli zajistit zdroje především jaderného charakteru, tj. v současnosti štěpné elektrárny, které by průběžně přešly na fúzní, popř. hybridní.

Psaní této práce pro mě bylo velmi přínosné, jednak po stránce vědomostní a jednak i osobní. Vědomostní, protože díky studiu literatury ke zpracování práce, jsem se dozvěděl informace, ke kterým bych si zřejmě jinak cestu nenašel. A osobní, protože v mém případě totiž nešlo jen o povinnost, ale o hlubší poznání tématu, které mě vždy zajímalo a pokud to bude v mých silách, budu se snažit přiblížit ho veřejnosti a zabránit tak případným předsudkům.

## Seznam použitých zdrojů

- [1] ŘÍPA, Milan. *Řízená termojaderná syntéza pro každého*. 3. vyd. Praha: Ústav fyziky plazmatu AV ČR, 2011. ISBN 80-902-7247-9.
- [2] Theory of tokamak transport : new aspects for nuclear fusion reactor design / Leslie C. Woods. -- Weinheim : Wiley-VCH, c2006. -- xvi, 224 s. : il.
- [3] Principles of fusion energy : an introduction to fusion energy for students of science and engineering / A. A. Harms ... [et al.]. -- Singapore : World Scientific, 2000. -- xi, 295 s.: il.
- [4] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. 1. české vyd., 2. dotisk. Překlad Jan Obdržálek, Bohumila Lencová, Petr Dub. V Brně: Prometheus, 2006. ISBN 80-214-1868-0.
- [5] 50 let tokamaku. *3pól* [online]. 9. 1. 2009 [cit. 2012-03-30]. Dostupné z: <http://3pol.cz/744-50-let-tokamaku>
- [6] Termojaderná fúze jako podnikatelský záměr. *3pól* [online]. 12. 7. 2011 [cit. 2012-03-30]. Dostupné z: <http://3pol.cz/1091-termojaderna-fuze-jako-podnikatelsky-zamer>
- [7] World's Largest Fusion Experiment Of The Stellarator Type -- Wendelstein 7-X -- Taking Shape. *Science Daily* [online]. 13. 3. 2008 [cit. 2012-03-30]. Dostupné z: <http://www.sciencedaily.com/releases/2008/03/080313124448.htm>
- [8] Centrální solenoid v tokamaku iter. *Technický týdeník* [online]. Datum vydání neznámé [cit. 2012-03-30]. Dostupné z: <http://www.techtydenik.cz/detail.php?action=show&id=6413&mark=>
- [9] WEINZETTL, Vladimír Weinzettl. Termonukleární fúze v tokamacích. ČVUT. *Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská* [online]. 16. 2. 1998 [cit. 2012-03-30]. Dostupné z: <http://vega.fjfi.cvut.cz/docs/sfbe/tokamak/index.html>
- [10] Lesk a bída termojaderné syntézy. *Vesmír* [online]. Duben 1998 [cit. 2012-03-30]. Dostupné z: <http://www.vesmir.cz/clanek/lesk-a-bida-termojaderne-syntezy>
- [11] Výroba vodíku. *Pro řidiče* [online]. 2005 [cit. 2012-03-30]. Dostupné z: [http://www.proridice.atlasweb.cz/Vodik/Vodik\\_vyroba.html](http://www.proridice.atlasweb.cz/Vodik/Vodik_vyroba.html)
- [12] New Energy and Fuel. *What is a stellarator?* [online]. 2005 [cit. 2012-03-30]. Dostupné z: <http://newenergyandfuel.com/http://newenergyandfuel.com/2008/03/18/what-is-a-stellarator/>
- [13] ITER ORGANIZATION. *ITER: The way to new energy* [online]. 17. 3. 2009, 30. 3. 2012 [cit. 2012-03-30]. Dostupné z: <http://www.iter.org/>
- [14] Human resonance. *Standing Waves Depicted on Stone Levitation Basins at Knowth* [online]. 27.8 2011 [cit. 2012-03-31]. Dostupné z: <http://www.humanresonance.org/knowth.html>
- [15] ITER jako živý. *3pól* [online]. 24. 3. 2010 [cit. 2012-04-03]. Dostupné z: <http://3pol.cz/900-iter-jako-zivy>

## Seznam použitých obrázků

Obr. 1. Izotopy vodíku [14].....	8
Obr. 2. Pohyb elektronů: Nevázaný a v magnetickém poli [15] .....	9
Obr. 3. Inerciální fúze: (zleva) zahřátí, stlačení, zážeh, fúze .....	11
Obr. 4. Magnetické pole.....	12
Obr. 5. Šroubovicové pole [1] .....	14
Obr. 6. Vakuová komora vypnutého/zapnutého tokamaku [13].....	15
Obr. 7. Schéma tokamaku [1].....	18
Obr. 8. Rozměry a směry v tokamaku [1].....	18
Obr. 9. Způsoby ohřevu plazmatu [1] .....	20
Obr. 10. Doplnění paliva vstřelováním [13] .....	22
Obr. 11. Řez tokamakem ITER + dodavatelé součástí [16] .....	24
Obr. 12. Tvorba tritia v blanketu[1] .....	25
Obr. 13. Divertor v ITER [13] .....	27
Obr. 14. Segment divertoru [13] .....	27
Obr. 15. Funkční schéma budoucí fúzní elektrárny [1] .....	30