

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Jaderná fúze – bezpečnost a environmentální dopad**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2012/2013

**ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Lukáš RICHTER**  
Osobní číslo: **E10B0555P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Technická ekologie**  
Název tématu: **Jaderná fúze - bezpečnost a enviromentální dopad**  
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Popište princip jaderné fúze.
2. Provedte studii bezpečnosti jaderné fúze a jejich projektů (ITER, Castor a dalších).
3. Zhodnoťte vývoj jaderné fúze jako zdroje energie budoucnosti.

Zadní strana zadání je uvedena v příloze na konci práce.

## Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na základní principy termojaderné fúze. Jaderná fúze je poměrně nový, ale zatím průmyslově nevyužívaný zdroj energie s velkým potenciálem. Předmětem této práce je také studie fúzních termojaderných zařízení využívající magnetické udržení plazmatu. Bakalářská práce pojednává o dvou projektech. První je celosvětově nejvýznamnější projekt ITER ve Francii a druhý projekt Compass v Praze, který je nejdůležitější pro Českou republiku. V rámci studie Compassu jsou také popsány některé prováděné diagnostiky s výzkumným zaměřením. Kromě technických principů se tato práce zabývá rovněž bezpečností těchto zařízení a jejich vlivem na životní prostředí. Na konci této práce je analyzován budoucí vývoj termojaderné fúze jako možný zdroj energie.

## Klíčová slova

Plazma, štěpení, fúze, izotopy, potenciální energie, kinetická energie, doba magnetického a inerciálního udržení, tokamak, stellarátor, radioaktivita, skleníkové plyny, ITER, divertor, Compass, H-mód, Thomsonův rozptyl, energetická chudoba, fosilní paliva, obnovitelná energie, DEMO, ...

## **Abstract**

This bachelor thesis presents the essential principles of thermonuclear fusion. Nuclear fusion is quite a new source of energy with huge potential, but there has not been any industrial application of this technology. The subject of this thesis is also to study thermonuclear fusion devices, which are use magnetic confinement of plasma. The bachelor's thesis deals with two projects. The first is the most significant project worldwide, i.e. ITER in France and the other one is Compass in Prague, which is the most important project of this kind in the Czech republic. In the study of Compass, the applied research diagnostics are described, too. In addition to the technical principles, this thesis deals with the safety of these devices and with their environmental impact. At the end of this work the development of fusion is analyzed, in terms of its future application as a possible energy source.

## **Key words**

Plasma, fission, fusion, isotopes, potential energy, kinetic energy, magnetic and inertial confinement time, tokamak, stellarators, radioactivity, greenhouse gases, ITER, divertor, Compass, H-mode, Thomson scattering, energy demand, fossil fuels, renewable energy, DEMO, ...

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....  
podpis

V Plzni dne 7.6.2013

Lukáš Richter

## Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucí bakalářské práce Ing. Janě Jiříčkové, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále bych velmi rád vyjádřil dík pánům Ing. Františku Žáčkovi, CSc.; Ing. Petru Böhmovi, Ph.D. a Mgr. Josefu Havlíčkovi (všichni ÚFP, AV) za poskytnutí odborných konzultací a za přístup k naměřeným datům tokamaku Compass.

# Obsah

<b>OBSAH .....</b>	<b>6</b>
<b>SEZNAM SPECIFICKÝCH SYMBOLŮ .....</b>	<b>7</b>
<b>ÚVOD.....</b>	<b>7</b>
<b>1 PRINCIP JADERNÉ FÚZE .....</b>	<b>8</b>
1.1 PLAZMA – VLASTNOSTI A ROZDĚLENÍ .....	8
1.2 ENERGIE HVĚZD – ZA VŠE MŮŽE VODÍK .....	11
1.3 JÁDRO – FÚZE / ŠTĚPENÍ .....	13
1.4 SPOJENÍ JADER .....	16
1.5 ZAPÁLENÍ FÚZE.....	17
1.6 MAGNETICKÉ UDRŽENÍ .....	18
1.7 INERCIÁLNÍ UDRŽENÍ .....	23
<b>2 STUDIE BEZPEČNOSTI A PROJEKTŮ ITER A COMPASS .....</b>	<b>24</b>
2.1 LÁTKY S FÚZÍ SPOJENÉ .....	24
2.2 Odstavení reaktoru.....	26
2.3 OHLEDUPLNÁ ENERGIE .....	26
2.4 PROJEKT ITER.....	26
2.5 PROJEKT COMPASS .....	32
<b>3 VÝVOJ JADERNÉ FÚZE JAKO ZDROJE ENERGIE BUDOUCNOSTI.....</b>	<b>38</b>
3.1 ENERGETICKÁ CHUDOBA .....	38
3.2 NAHRAZENÍ FOSILNÍCH PALIV .....	40
3.3 FÚZE V BUDOUCNU .....	41
<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>42</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A ZDROJŮ .....</b>	<b>43</b>
<b>PŘÍLOHA.....</b>	<b>46</b>

## Seznam specifických symbolů

Symbol	Název	Symbol	Název
$\varepsilon_F$	Fermiho energie elektronů	$\tau_E$	Doba udržení
$\lambda_D$	Debyeova vzdálenost	$n$	Hustota
$\sigma$	Účinný průřez	$D_{Tref\ max.}$	Max. přechodný teplotní rozdíl

## Úvod

V první kapitole mé práce bych rád nastínil základní teoretické principy termojaderné fúze. Čtenář by měl mít po přečtení základní přehled o tom, co to je termojaderná fúze a kde se vzala. První kapitola dále pojednává o způsobech, kterými se fúzní energie dá „udržet“. Ve druhé kapitole bych chtěl analyzovat dvě pro mě nejzajímavější fúzní zařízení a také jejich bezpečnost a environmentální dopad na životní prostředí. Ve třetí kapitole se kromě fúze v budoucnu zaměřím rovněž na globální energetické problémy současnosti a uvedu jejich možné způsoby řešení.

# **1. Princip jaderné fúze**

## **1.1 Plazma – vlastnosti a rozdělení**

Na Zemi jsme schopni pozorovat termojadernou syntézu zřídka kdy, především kvůli vysokým teplotám, které reakci doprovázejí. Všechna hmota za takto vysokých teplot vykazuje tzv. plazmatické chování. Podle makroskopického chování látek, které určuje interakce mezi různými částicemi (atomy, ionty, molekulami) spolu s tlakem a teplotou (ovlivňují jejich tepelný pohyb), je možné plazma zařadit mezi skupenské stavy látek. Plazma je většinou označováno jako 4. stupeň hmoty.

Je-li plyn neustále ohříván, způsobí se nejdříve jeho částečná a později úplná ionizace, čímž se elektrony zcela oddělí od atomových jader (iontů). Jinými slovy záporně nabitý elektron i kladně nabitý iont se pohybují nezávisle. Ionty zpravidla plní úlohu volných nosičů náboje. Ionizovaný plyn neboli plazma je jediný skupenský stav, který vždy vykazuje magnetické i elektrické účinky. [1]

Pojem plazma je znám od roku 1928. Poprvé ho použil Irwing Langmuir (1881 – 1957) a pro plazmu stanovil následující vlastnosti:

1. V plazmatu jsou přítomné volné nosiče náboje.
2. Plazma vykazuje kolektivní chování, tj. jako celek dokáže reagovat na elektrická a magnetická pole a také je vytváří.
3. Plazma je kvazineutrální, tj. v makroskopickém objemu je stejné množství kladných i záporných nábojů.

V momentě, kdy látka začne vykazovat plazmatické chování a je plně ionizována, se dá z fyzikálního hlediska považovat za elektrolyt, tedy elektrický vodič druhého řádu. Vodivost plazmatu je úměrná  $T_e^{3/2}$ . Na koncentraci plazmatu je vodivost závislá poměrně málo. Protéká-li plazmatem proud, vytvoří magnetické pole, které určuje chování nabitých částic uvnitř plazmatu. Magnetické pole nejen plazmatu, ale i vnějších zdrojů dovolí plazma do jisté míry „udržet“ a kontrolovat. Částice mohou rotovat kolem magnetických indukčních čar, nebo driftovat napříč magnetickému poli a z plazmatu unikát. To umožní zavedení dvou sledovaných teplot – podélnou a příčnou. Popsat

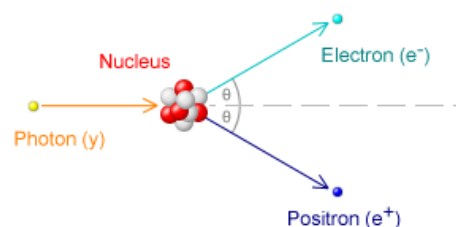


chování plazmatu je ohromně složité a vyžaduje použití mnoha matematických modelů. Většina z nich se snaží popsat neuvěřitelné množství nízkofrekvenčních i vysokofrekvenčních vln. [1]

Při práci s plazmatem je vhodné zavést následující veličiny charakterizující tepelnou energii:

- 1 eV (elektronvolt)  $\approx 1,6 \cdot 10^{-19} \text{J}$
- Teplota –  $E = k_B T$ ; 1 eV  $\approx 11\,600 \text{ K}$ , kde  $k_B$  je Boltzmannova konstanta, která vyjadřuje energii potřebnou k zahřátí jedné částice ideálního plynu o 1 K.
- Hmotnost částic –  $E = mc^2$  (Pro relativistické plazma platí:  $k_B T_e > m_e c^2$ )

Plazma se rozděluje z mnoha úhlu pohledu. Přehled typických druhů plazmatu je na obrázku 2. Dle obrázku plazma rozliším ve 4 oblastech. Při nižší teplotě je plazma pouze částečně ionizováno. Kolem teploty  $10^4 \text{ K}$  je ionizační energie  $W_i$  přibližně rovna energii  $k_B T$  a plazma je plně ionizováno. Zvýšení teploty na hodnotu  $10^8 \text{ K}$  způsobí samovolnou tvorbu elektron-pozitronových párů v plazmatu. Elektron-pozitronový pár vzniká při interakci vysokoenergetického  $\gamma$  záření (vlnová délka řádově  $10^{-11} \text{ m}$  a méně) s elektronovým obalem atomu. Na pozitron a elektron se fyzicky mění foton v blízkosti atomové jádra díky elektromagnetické interakci s elektrostatickým polem jádra (obr. 1). Při ještě vyšších teplotách, přibližně  $10^{10} \text{ K}$  je energie elektronů vyšší než jejich klidová hmotnost (Platí vztah  $k_B T_e > m_e c^2$ .) a plazma se dá považovat za relativistické. [1] [11]



Obr. 1 – Vznik elektron-pozitronového páru [11]

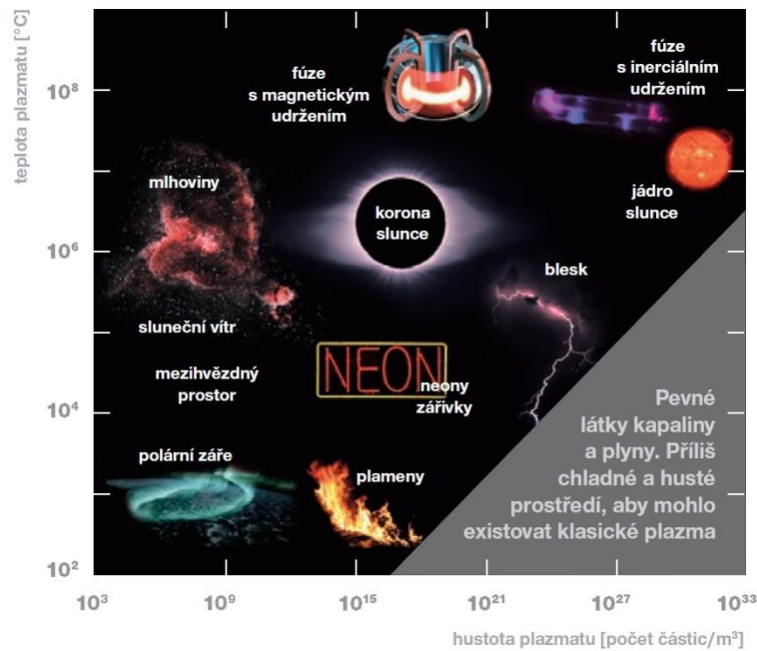
V pravém dolním rohu obrázku 2 je vyznačena oblast tzv. kvantového plazmatu. V tomto případě už není možné použít Boltzmanovo rozdělení pro klasický plyn, nýbrž plyn se zde chová kvantově a nutné je použít tzv. Fermiho-Diracovo rozdělení. Při použití tohoto rozdělení je systém složen z fermionů (elementární částice, která je základem pevné hmoty), které se vyznačují antisymetrickou vlnovou funkcí a poločíselným spinem. Takto tomu je v jádrech hvězd. Hranici této oblasti se popisuje pomocí Fermiho energie elektronů  $\epsilon_F$  jako  $k_B T_e \approx \epsilon_F$ .

Pro lepší představu uvedu další rozdělení plazmatu:

- Plazma se zamrzlým mag. polem – s dif. polem; rozlišuje, zda v plazmatu částice difundují nebo dokonale sledují mag. pole s ohledem na vodivost.
- Plazma rovnovážné – plazma nerovnovážné; sleduje rozdíl teplot mezi elektrony a ionty.
- Plazma nízkoteplotní – plazma vysokoteplotní; dle dosažené teploty iontů se plazma rozděluje na vysokoteplotní (fúzní,  $T_i > 10^6$  K) a nízkoteplotní ( $T_i < 10^5$  K).
- Plazma bezsrážkové – plazma srážkové; udává, za jakých podmínek srážky v plazmatu probíhají. V plazmatu se uvažují Coulombovo srážky a srážky neutrálních částic. [1]

Důležitý parametr při posuzování vlastností plazmatu je tzv. Debyeova vzdálenost  $\lambda_D$ . Je-li vzdálenost částic větší než  $\lambda_D$  je potenciál částice „odstíněn“, vyruší se silové účinky a nedojde ke srážkám. Za předpokladu, že převládají kolektivní procesy nad srážkami, se chování plazmatu popisuje stavovou rovnicí ideálního plynu. [1]

Plazma tedy představuje v podstatě palivo pro termojadernou reakci. Jaderná fúze je na planetě Zemi spíše nevídaná. Na Zemi se nachází pouze nízkoteplotní plazma přítomné v plamenech, v neonech, či zářivkách anebo při polární záři (nízký tlak plazmatu) a bouřce v podobě blesků (vysoký tlak plazmatu). Zbylých 99% přirozeně se vyskytujícího plazmatu nacházíme za hranicemi naší atmosféry v hlubokém vesmíru. Plazma je obsaženo ve slunečním větru, v mlhovinách, v koróně slunce a především v jeho jádru.



Obr. 2 – Výskyt plazmatu [3]

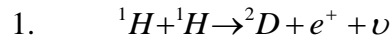
Právě termojaderná syntéza v jádru slunce, při níž se uvolňuje obrovské množství energie (mluvím o teplotě  $10^7$  °C a hustotě plazmatu  $10^{33}$  částic na metr krychlový), je nepostradatelná pro život na Zemi. Právě chování slunce pravděpodobně vedlo lidstvo za poznání termojaderné fúze.

## 1.2 Energie hvězd – za vše může vodík

Začátkem 20. století se pomalu začala formovat teorie poznání energie hvězd. Tvzení, že za zdánlivě nevyčerpatelnou energii je zodpovědný vodík, byla čím dál tím jasnější. Na planetě Země je vodík přítomen v atmosféře pouze minimálně. Vodík má schopnost vázat se s kyslíkem a tvoří další životně důležitou komoditu – vodu. Přirozeně se vyskytující vodík je na naší planetě obsažen především ve formě vody, nebo ve formě uhlovodíků. Z počátku se počítalo s tím, že slunce obsahuje pouze malé množství vodíku. Později se ukázalo za pomoci spektroskopických pozorování, že slunce je tvořeno vodíkem prakticky celé. Spektroskopické metody pozorování jsou založeny na pozorování vlnových délek světla, které každý atom vyzařuje. Schopnost slunce udržet vodík co nejvíce stlačený umožňuje jeho obrovská gravitace. Proti gravitační síle působí odstředivá síla plazmatu, ve kterém se všechny látky v jádru

slunce nacházejí (teplota – 14 miliónů stupňů a klesá s poloměrem). Ve všech slupkách se pak tyto dvě síly vyruší a způsobí hydrostatickou rovnováhu. [2]

Na slunci probíhají tři reakce přeměňující vodík na helium.



V reakci spolu reagují protony atomu vodíku a vytvoří těžší izotop vodíku – deuterium (D). Dále pozitron, který následně interaguje s elektronem. Vzhledem k tomu, že pozitron a elektron se vůči sobě chovají antičásticově, nastane jejich anihilace, během které tyto dvě částice zaniknou. Jejich klidová i kinetická energie se převede na svazek gama fotonů a je vyzářena do prostoru. Kromě toho při první reakci vznikají částice, tzv. neutrino, které se zpravidla neúčastní dalších jaderných reakcí a můžeme je detekovat i na Zemi.



V druhém kroku reagují jádra deuteria s protonem vodíku a vytvoří lehký izotop helia. Tzv. helium-3



Během posledního kroku jsou spojeny jádra helia-3 a vytvoří helium-4 za současného vzniku dvou protonů. Klidová hmotnost jádra helia je menší než součet klidových hmotností původních protonů, proto se uvolní energie. [10]

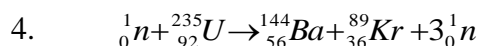
Během všech tří reakcí je uvolněna energie, jejíž hustota výkonu na zemském povrchu je asi  $1,4 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ . Transport energie z jádra slunce k jeho povrchu, posléze na planetu Zemi je poměrně zdoluhavý proces. První reakce, tedy reakce proton-proton neboli tzv. slabá interakce je velmi pomalý proces trvající stovky milionů let. Ve větších hvězdách, než je naše slunce, probíhá nejen reakce proton-proton, ale také reakce využívající jádra uhlíku. I tento reakční cyklus přeměňuje protony na helium. Podmínky, za kterých termojaderná syntéza na slunci probíhá, jsou naprosto nereálné na zemském povrchu. Hustota fúzního výkonu na slunci je totiž mnohonásobně menší, než který je potřeba pro komerční užití. [2]

### 1.3 Jádro – fúze/štěpení

Jaderná energie je bezesporu jeden z nejvíce průlomových objevů. Se svým obrovským potenciálem přináší jaderné reakce kladné i záporné důsledky. Radioaktivitu objevil v roce 1896 Henri Becquerel. 10 let po něm Albert Einstein obohatil svět vědy vzorcem  $E=mc^2$  a dokázal, že je možné přeměnit hmotu na energii. Pro jaderné reakce dále platí zákon zachování energie.

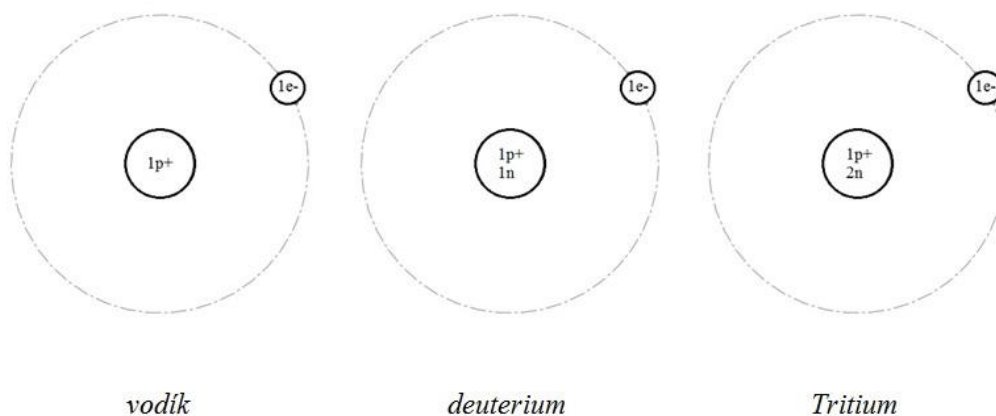
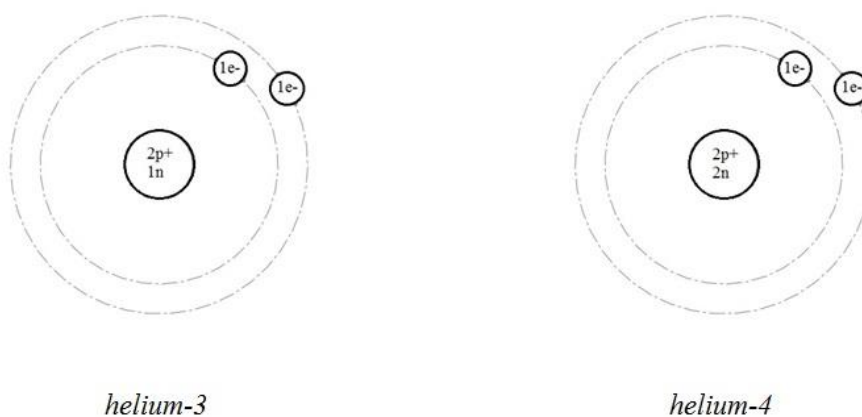
Jaderné štěpení i fúze vznikaly prakticky současně, ale už od počátku bylo zřejmé, že fúze je poněkud složitější proces než štěpení. Při štěpení je jádro atomu bombardováno neutrony, jejichž neutrální náboj jim umožní proniknout až do jádra atomu, které následně vyvedou ze stability, a jádro se rozpadne.

Mluvím-li o jaderném štěpení, mám na mysli přeměnu (transmutaci) těžších prvků na lehčí. Běžná štěpná reakce:



Při této reakci pronikne neutron do jádra uranu a způsobí vytvoření dvou lehčích prvků, tedy baria a kryptonu. Současně se také uvolní tři rychlé neutrony, které je potřeba zpomalit (moderovat), tím zvýšíme pravděpodobnost přeměny dalšího jádra. Krom toho je nutné ještě regulovat počet přebytečných neutronů, aby nedocházelo k samovolné neřízené reakci. [21]

Fúze je svým způsobem protiklad ke štěpení, čili přeměna lehkých jader na těžší. Fúzních reakcí existuje celá řada. Na Zemi se zdá být nejvýhodnější reakce dvou izotopů vodíku – deuteria a tritia (D-T). Izotopy jsou prvky, jejichž jádra jsou obohacena o jeden, či více neutronů oproti základnímu prvku. Produktem této reakce je helium-4. Další z možných reakcí připadá v úvahu reakce D + helium-3, kde je produktem rovněž helium-4. Hmotnostní rozdíl produktů oproti reaktantům je úměrný vyzářené energii během reakce. Pro lepší ukázkou uvádím jednoduchou ilustraci atomové struktury uvedených prvků:

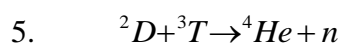
Izotopy vodíkuIzotopy helia

Obr. 3 – Atomová struktura důležitých prvků [2]

Reakce D-T pro svoji uskutečnitelnost vyžaduje poměrně nízkou zápalnou teplotu, proto se pro fúzi v zemských podmínkách jeví nejvýhodněji.

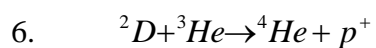
Znázornění fúzních reakcí realizovaných v zemských podmínkách:

Reakce deuterium-tritium:



Během D-T reakce reaguje 5 částic, z toho 2 protony a 3 neutrony.

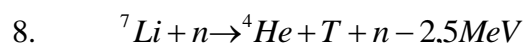
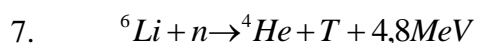
Reakce deuterium-helium-3:



Během této reakce reagují 3 protony a 2 neutrony. Vytvořeno je pak jádro s nukleony v poměru 2:2. Produkt této reakce, tedy helium-4, je inertní plyn a uplatnění najde např. jako náplň do balónů a vzducholodí. [2]

Jedno z paliv pro jadernou fúzi je tedy deuterium. Na Zemi je tento prvkem poměrně hojně zastoupen v podobě H<sub>2</sub>O. Ze statistik vyplývá, že přibližně 1 m<sup>3</sup> H<sub>2</sub>O obsahuje 35 g deuteria. Z vody ho snadno získáme elektrolýzou. Druhou částí skládačky je tritium, kde je situace poměrně složitější, ne však neřešitelná. Tritium se volně na Zemi vyskytuje pouze ve stopovém množství, navíc je radioaktivní s poločasem rozpadu 12,3 roku. Tritium však dokážeme vyrobit za pomoci lithia, kterého na Zemi najdeme dostatek. [6]

Lithium je alkalický kov s velmi nízkou hustotou. Je to tedy velmi měkký a lehký kov s dobrou tepelnou i elektrickou vodivostí. V přírodě se vykytuje ve dvou formách jako lithium-6 a lithium-7. Obě formy mají ve svém jádru stejný počet protonů – 3. Liší se pouze v počtu neutronů. Jádro lithia-6 obsahuje 3 neutrony a jádro lithia-7 ukrývá 4 neutrony. Obě formy lithia reagují s neutrony a vytvářejí helium-4 a tritium. Chemické reakce s lithiem vypadají následovně:



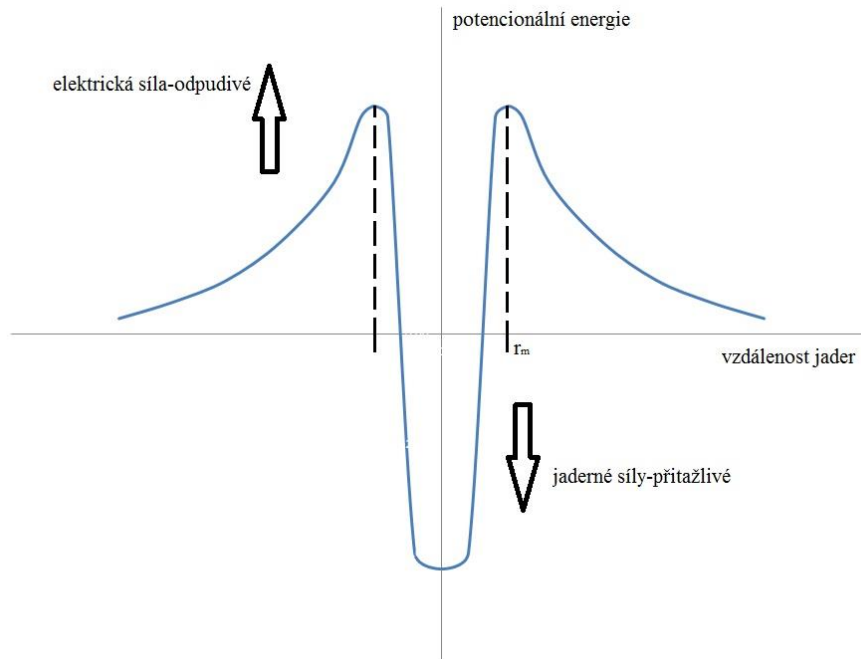
První reakce s lithiem-6 vyžaduje přítomnost pomalých neutronů a energii uvolňuje, čili je exotermická. Reakce s lithiem-7 je reakce endotermická, tj. energii musíme dodat a průběh této reakce je podmíněn rychlými neutrony. Přirozeně nás tedy bude zajímat první reakce s lithiem-6. V případě využití fúze jako zdroje energie se tritium bude vyrábět a také spotřebovávat za pochodu: během reakce, uvnitř zařízení. [2]

## 1.4 Spojení jader

V oblasti jaderné fúze musí být řešena důležitá problematika, konkrétně způsob spojení slučovaných jader. Spojují se jádra obsahující protony, proto mají stejný elektrický náboj. Mezi nimi působí velká elektrostatická síla, která jádra od sebe odpuzuje a snaží se vytvořit co největší vzdálenost mezi jádry.

Ke sloučení je zapotřebí přiblížit jádra k sobě na takovou vzdálenost, že přestane působit síla elektrická a začne převládat síla jaderná. Taková vzdálenost dosahuje velmi malých rozměrů a v principu je srovnatelná se samotným rozměrem jádra ( $10^{-14}$  m). Aby se atomová jádra mohla dostatečně přiblížit čili překonat Coulombovo bariéru, je nutné dodat jádru poměrně velikou potencionální energii. Potencionální energie se běžně udává v jednotkách keV, které představují napětí, kterým je zapotřebí částici „urychlit“ k nabití oné energie. Pro fúzní reakci se počítá s urychlovacím napětím okolo 100 kV, kterého se dá v dnešních podmínkách poměrně snadno dosáhnout. Ne vždy se však podaří dosáhnout globálního maxima křivky (Obr. 4) vyjadřující potencionální energii v závislosti na vzdálenosti jader, v tom případě k fúzní reakci nedojde a energie vynaložená ke sloučení je ztracena. Toto kritérium se označuje jako tzv. účinný průřez. Účinný průřez v podstatě vyjadřuje pravděpodobnost uskutečnění fúzní reakce a každá fúzní reakce se vyznačuje odlišným účinným průřezem. Ze všech fúzních reakcí má DT reakce nejvyšší pravděpodobnost uskutečnění. Pro DT reakci s urychlovací energií přibližně 100 keV dosahuje účinný průřez největších hodnot ze všech fúzních reakcí. Plocha účinného průřezu za těchto podmínek u DT reakce odpovídá asi  $10^{-28}$  čtverečním metrům. [2]





Obr. 4 – Závislost potencionální energie na vzdálenosti jader [2]

Minimalizace vlivu účinného průřezu se provádí zahřáním deuteriové-tritiové směsi na fúzní teplotu. Dodáme energii, čímž částice zrychlíme. Dodanou energii v ideálním případě neztratíme, neboť si ji systém vyměňuje pouze uvnitř mezi částicemi. Až v tomto případě mluvíme o termojaderné fúzi, která představuje nejsnadnější cestu jak fúze dosáhnout.

## 1.5 Zapálení fúze

Produktem DT reakce jsou tzv. alfa částice (kladná jádra helia), které tvoří 20% uvolněné energie, a neutrony tvořící zbývajících 20% energie. Neutrony s neutrálním nábojem nejsou ovlivňovány magnetickým polem kolem plazmatu. Komora s hořícím plazmatem je obalena speciálním materiálem, ve kterém dochází k reakci neutronů z DT reakce s lithiem-6 za vzniku tritia. Teplo, které vzniká při této reakci, můžeme považovat za výstup budoucí fúzní elektrárny. Kladná jádra helia jsou zachycena magnetickým polem a představují energii, která je využita pro ohřev plazmatu. [2]

Termojaderná fúze je zajímavá především ve fázi, ve které dodává více energie než je potřeba pro její nastartování. To je okamžik, během kterého jádra helia dodávají

dostatečnou energii pro ohřev média, a známe ho jako moment zapálení fúze. Tedy doba, po kterou fúzní reakce probíhá samovolně. [2]

Podmínka pro zapálení je dána součinem hustoty plazmatu a doby udržení. Hustota vyjadřuje počet částic na krychlový metr a doba udržení  $\tau$  je definována jako poměr celkové energie plazmatu a rychlosti, kterou energie z plazmatu uniká. Celá podmínka vychází z rovnosti ohřevného výkonu a rychlosti ztrát energie z plazmatu a je pojmenovaná po svém objeviteli jako Lawsonovo kritérium. Podmínku jsme schopni zapsat následujícím způsobem:

$$9. \quad n \cdot \tau_E > 1,7 \cdot 10^{20} m^{-3} \cdot s$$

Doba udržení je mimo jiné závislá také na účinném průřezu, který se mění s teplotou. Pro každou fúzní reakci tedy zavádíme odlišné podmínky zapálení. S ohledem na všechny ovlivňující faktory můžeme zavést podmínku zapálení zohledňující teplotu pro DT reakci v rozmezí teplot 100 – 200 miliónů stupňů následovně:

$$10. \quad n \cdot T \cdot \tau_E > 3 \cdot 10^{21} m^{-3} \cdot keV \cdot s$$

Součin hustoty a teploty plazmatu se může přepsat na tlak plazmatu. Podmínka se pak tedy zapíše v jednotkách bar\*s. Je patrné, že způsoby udržení fúze se provádí za velmi rozdílného tlaku. Magnetické udržení se vyznačuje malou hustotou plazmatu, dobou udržení kolem 5 sekund a vyžaduje poměrně malý tlak srovnatelný s tlakem atmosférickým. Během inerciálního udržení je fúzní palivo stlačeno poměrně na vysokou hustotu, neboť se provádí za obrovského tlaku ( $10^{12}$  bar). Doba udržení inerciálního způsobu je o mnoho kratší v porovnání s magnetickým ( $10^{-9}$  s). [2]

## 1.6 Magnetické udržení

Jaderný výzkum byl ve své rané fázi ovlivněn především válečným stavem a dosti vyhrocenou situací ve světě. Na většinu experimentů byla uvalena poměrně značná

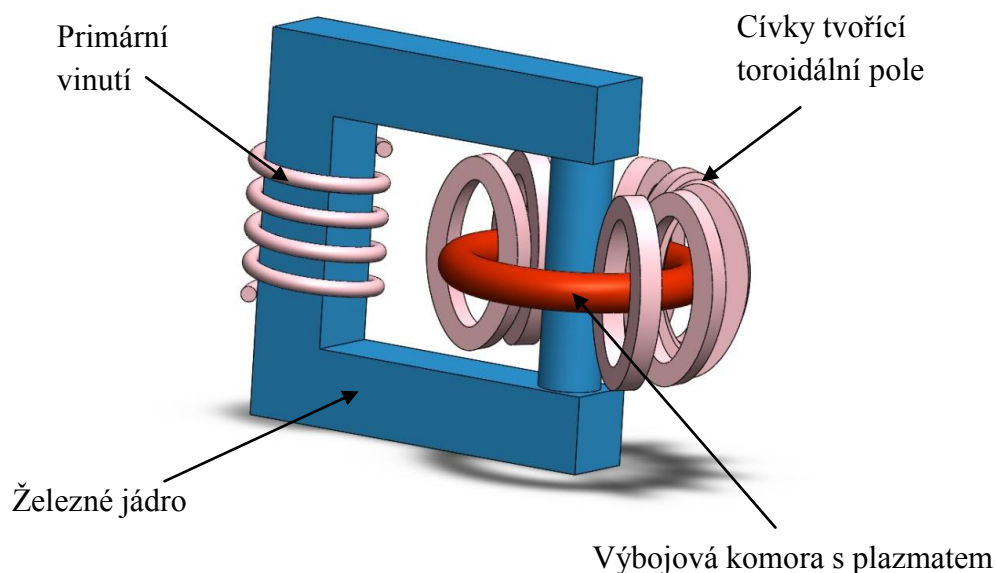
cenzura ze strany hlav států. Již na počátku výzkumu termojaderné fúze hrálo při experimentech velkou roli magnetické pole kolem plazmatu. [2]

Těsně po válce vzniká na Imperial College v Londýně patent popisující termojadernou elektrárnu. Patent George Thomsona a Mosese Blackmana vysvětluje způsob stlačení plazmatu magnetickým polem v nádobě toroidálního tvaru. Současně je na Oxfordské univerzitě objeven tzv. pinč-efekt, který stlačí plazma na potřebnou hustotu a teplotu a navíc dojde k odtrhnutí plazmatu od stěn výbojové komory. Postupně vznikají tzv. Z-pinč, který pracuje na principu tlakové rovnováhy mezi tlakem odstředivé síly plazmatu a tlakem, který vytváří magnetická síla. Vyznačoval se však velkou nestabilitou vlivem „zaškrvení“ plazmatu. Později problém s nestabilitou do jisté míry řeší tzv.  $\Theta$ -pinč. [22] [2]

Pohyb částic v plazmatu je urychlován a usměrňován magnetickým polem. Částice se v homogenním magnetickém poli pohybují podél siločáry. Rychlost částice lze rozdělit na dvě složky, tedy rychlost kolmou na siločáru a rychlost se siločárou rovnoběžnou. Díky rovnosti mezi Lorentzovou a odstředivou silou je výsledný pohyb částice kolem siločáry spirálovitého tvaru. Pro částice platí zákon zachování magnetického momentu, proto při změně intenzity mag. pole zvyšuje částice svoji kolmou rychlost a vzhledem k zákonu zachování energie svoji podélnou (rovnoběžnou) rychlost snižuje. Klesne-li podélná rychlost na nulu, dochází k odrazu částice, jež popisuje jev zvaný magnetické zrcadlo (Jedná se o místa s nejsilnější intenzitou mag. pole). Pakliže je podélná rychlost značně vyšší než kolmá, částice uniká ze systému, tudíž se nedá řídit lineárním zařízením. Problémem magnetického udržení je poměrně velký drift a také velké potenciálové rozdíly elektrického pole v plazmatu. Řešením je zařízení, které homogenizuje plazmu do pravidelného tvaru, který vyrovná potenciálové rozdíly čili tokamak. [15]

Plazma ve stabilizovaném stavu uvnitř komory lze udržet toroidálním a poloidálním magnetickým polem. Samotný toroidální proud plazmatu vytváří poloidální magnetické pole. Toroidální mag. pole je tvořeno vnějšími cívkami namotanými na výbojovou komoru. Výsledné magnetické pole, které je součtem těchto dvou, vytváří siločáry ve tvaru šroubovice uvnitř komory.

Tokamak je zkratka ruských slov, v českém překladu znamenajících – toroidální komora a magnetické cívký. Technicky představuje transformátor, jehož sekundární vinutí tvoří výbojová komora, resp. proud plazmatem (Obr. 5). [3]



Obr. 5 – Základní princip tokamaku. Nákres v SolidWorksu dle [2]

V sekundárním vinutí čili v plazmatu se indukuje proud vlivem proudu v primárním vinutí. Stabilizační cívký generující silné toroidální pole se snaží držet plazma ve stále kruhovém prstencovém stavu. Poloidální magnetické pole, které je tvořeno samotným plazmatem zamezí „rozprsknutí“ plazmatu do prostoru. V moderních projektech se taktěž objevují pomocné toroidální cívký vytvářející poloidální magnetické pole určené k zabránění styku stěny s plazmatem. Jde o udržení konstantního příčného průřezu plazmatu. Působením „tvarovacích“ cívek jsme schopni plazma stlačit do určitého tvaru zejména kvůli správnému odvodu spalin z komory (heliový „popel“, nespálený vodík, uhlík, kyslík atd.). Výhodná se zdá konfigurace do tvaru D, nicméně ještě lepší podmínky poskytuje stlačení do trojúhelníkového tvaru. [2]

Magnetické pole vytváří tlak daný vztahem:

$$11. \quad p = \frac{B^2}{2\mu_0}$$

V místě, kde je nižší intenzita magnetického pole, je nižší i jeho tlak. Částice vždy driftují do míst se slabším magnetickým polem. Je zapotřebí plazma udržet co nejvíce uprostřed výbojové komory. Začne-li částice v určitém místě unikat, stačí v daném místě zesílit magnetické pole a na opačné zeslabit. Většinou to je úkol poloidálních systémů a toroidálního pole. Magnetické pole v tokamaku není konstantní. Velikost indukce je nepřímo úměrná vzdálenosti od osy komory. Tato nepřímá úměra má za následek, že nejsilnější magnetické pole je uprostřed komory. V blízkosti osy komory se tedy částice mohou odrazit a způsobit nežádoucí efekt, tzv. banánovou trajektorii hrající důležitou roli v dodatečném ohřevu na tokamaku. Dalším zdrojem nestability je vysoká proudová hustota uprostřed komory, kde se nachází nejteplejší plazma. [15]

Využití interakce magnetických polí s plazmatem s sebou nese svá úskalí. V praxi je nutno provádět magnetickou diagnostiku na tokamaku, která zahrnuje měření proudu plazmatem, napětí na závit, energie obsažené v plazmatu, nebo ke kontrole pozice a tvaru plazmatu, atd.

Další aplikaci najde magnetické udržení ve způsobu ohřevu plazmatu. Výbojová komora s plazmatem čili sekundární vinutí vykazuje určitý elektrický odpor. Při průchodu proudu jsou tudíž generovány Jouleovy ztráty ve formě tepla podle vztahu:

$$12. \quad P = R_{plazma} \cdot I_{plazma}^2$$

Ohmický ohřev (příkon) je dodáván proudem v primárním vinutí, který vybudí toroidální elektrické pole, jenž generuje proud plazmatem. Jelikož vodivost plazmatu je přímo úměrná teplotě, elektrický odpor bude klesat s teplotou, tudíž je ohmický ohřev možný pouze do určitých teplot. Při vyšších teplotách se stává neúčinným. Problém je, že ohmický ohřev vystačí na teploty okolo 20 milionů K, které pro provedení fúzní reakce nestačí. K provedení fúze je zapotřebí teplot 10x větších, proto je na tokamaku prováděn dodatečný ohřev za pomoci elektromagnetické vlny a pomocí vstřikování svazku neutrálních atomů deuteria a vodíku, či jiných izotopů.

Ohřev elektromagnetickou vlnou využívá schopnost plazmatu absorbovat elektromagnetické vlnění, potažmo jeho energii. Pro ohřev iontů jsou používány frekvence 20 – 120 MHz. Pro ohřev elektronů se pohybujeme ve frekvencích zhruba 70

– 200 GHz. V tomto frekvenčním pásmu hledáme tzv. cyklotronní rezonanční frekvenci, která odpovídá frekvenci rotace kladně nabitě částice kolem magnetické siločáry. Ohřev elektromagnetickou vlnou je také možný provádět ohřevem na tzv. dolní hybridní frekvenci, která je specifická dle hustoty plazmatu (1 – 10 GHz). [3]

Dodatečný ohřev pomocí vstřikování svazku atomů využívá elektrickou neutralitu vstřikovaných částic, která zajistí klidný průchod atomů skrz magnetické pole. V blízkosti komory tokamaku je umístěn zdroj atomů, které jsou vzápětí urychleny v urychlovači. Vysokoenergetické neutrální atomy se poté ionizují ve sloupci plazmatu. Vznikající ionty předávají energii samotnému plazmatu díky Coloumbovským srážkám s elektrony a ionty. Aby byl tento způsob ohřevu účinný, musí být výkon svazku podstatně větší než je ohmický příkon (řádově 3 – 4x). Velikost energie vstřikovaného svazku je třeba přesně určit, poněvadž optimální velikost energie způsobí ionizaci na správném místě, tedy uprostřed komory. Dodáváme-li příliš malou energii, atomy se ionizují na počátku své dráhy a způsobují nestabilitu plazmatu. V případě příliš velké energie se atomy nestačí ionizovat a proletí, aniž by systému předaly svoji energii. Jinými slovy velikost energie svazku je určena parametry a rozměry tokamaku. Vstřik svazku musí být řešen v místě, kde se neprojevuje již zmíněná banánová trajektorie. [9]

Pakliže je žádoucí, dosáhnout v tokamaku termojaderných teplot, je nutné před spuštěním plazmatického výboje z komory odčerpat vzduch a jiné nechtěné látky. Vytvoří se vakuový prostor, do něhož je postupně napouštěno nepatrné množství D-T paliva. Po zapálení fúze a úplné ionizaci plynu je doplňování paliva poněkud obtížnější, neboť se atomy deuteria a tritia díky vysoké teplotě ionizují téměř okamžitě po vstříknutí, aniž by dosáhly středu komory. Předčasná ionizace způsobuje řadu nestabilit. Směs vodíkového plynu se proto nejdříve zmrazí na velmi nízkou teplotu a následně velmi rychle vystřelí směrem k ose komory, čímž atomům dodáme dostatek času do středu komory doletět. [3]

Místo, kde dochází k nejintenzivnějšímu kontaktu mezi stěnou komory a plazmatem, se nazývá limiter. Primární úkol limiteru je vymezení poloidálního průměru plazmatu, rovnoměrné rozložení tepelného zatížení na stěny komory a konečně zvýšení doby výboje. Základní materiály pro konstrukci limiteru jsou vysokotavitelné kovy jako wolfram, molybden, či lehčí prvky jako uhlík a beryllium, ze kterých vzniká menší

množství nečistot (kap. 2.4). Odvod těchto nečistot řeší další typické zařízení pro tokamak tzv. divertor (kap. 2.4). [3]

Menší nevýhoda tokamaku pro budoucí výrobu energie je jeho pulsní funkce. Jelikož je transformátor připojen ke zdroji stejnosměrného napětí, dochází po určité době k přesycení transformátorového jádra (řádově sekundy). Přestává protékat proud plazmatem a zaniká magnetické pole držící plazma ve stabilním stavu. Tokamak však musí dodávat energii do sítě nepřetržitě. Nejjednodušším řešením je přepólování transformátoru a obrácení směru proudu plazmatem v momentě nasycení. Další možnost spočívá v tzv. neinduktivní generaci proudu, která zachovává směr proudu a využívá vysokofrekvenční elektromagnetické vlnění. Jedná se opět o vlnu s dolní hybridní frekvencí, která zachytí elektrony a tím vytváří proud. [3]

Magnetické udržení mimo jiné využívají zařízení zvané stelarátory, jež představují velkého konkurenta tokamaků. Stelarátory se vyznačují šroubovitými vnějšími vodiči kolem výbojové komory. Tvar komory je poněkud složitější a připomíná osmičku. Jejich výhodou je schopnost práce ve stacionárním režimu. Ovšem projevují se větší difúzí a problematictějším ohřevem, proto jsou současnou jedničkou tokamaky.

## 1.7 Inerciální udržení

I princip inerciální fúze je lidstvu znám poměrně dlouho, především od doby, kdy byla prezentována v podobě vodíkové bomby. Existují dva způsoby jak dosáhnout termojaderné fúze vyplývající z kapitoly 1.5. První z nich je za nízkého tlaku a po delší dobu udržení (magnetické udržení). Druhým způsobem je inerciální (setrvačné) udržení za vysokého tlaku a po velmi krátkou dobu udržení.

Pro spuštění inerciální fúze je třeba dodat velké množství energie během krátké doby. Zařízení, které splňuje takové podmínky, je laser. Jelikož inerciální udržení neposkytuje možnost, jakou by bylo možné plazma udržet, je nutné provést reakci co nejrychleji, ještě před tím než se plazma rozletí do prostoru. Doba mezi zapálením reakce a rozpadem je způsobena zákonem setrvačnosti a je to doba, během které jsme schopni odebrat více energie než dodáme laserovým paprskem. [2]

Terčik tvoří dutá kulička sférického tvaru naplněná plynnou směsí deuteria a tritia. Ohřev paliva se provádí neodýmovým laserem. Jelikož se plazma vůči infračervenému záření chová neprostupně, je nutné pomocí speciálních optických zařízení posunout vlnovou délku do ultrafialového spektra. Ohřev způsobí velmi rychlé odpařování povrchu terčiku. Díky obrovskému tlaku je možné horký plyn stlačit na požadovanou hustotu. Po dosažení správné hustoty a teploty dojde k zapálení fúze, kdy terčik hoří a expanduje do okolí rychlostí úměrnou rychlosti iontů plazmatu. Zvětší-li terčik svůj poloměr, na který je stlačen, o 25%, fúzní reakce zaniká a plazma vyhasne. [2]

Terčik je vlivem nestability způsobenou nerovnoměrným ohřevem náchylný k deformaci, která může vést k jeho rozpadu. Terčiky jsou proto umístěovány do speciálních dutinek tvořené těžkým kovem v plazmatickém stavu emitující rentgenové záření, které zajistí rovnoměrné rozložení energie. Inerciální udržení je rovněž pulsní zdroj energie. V budoucnu se proto počítá s využitím části energie z reakce pro ohřátí dalšího terčiku. [2]

## **2. Studie bezpečnosti a projektů ITER a COMPASS**

### **2.1 Látky s fúzí spojené**

Během jaderné fúze v zemských podmínkách přichází člověk do styku s prvky, které popisuje kapitola 1.3. S heliem není z hlediska bezpečnosti výrazný problém. Uchovávat by se mělo na dobře větraném místě a nemělo by se vdechovat. Při úniku ve větší koncentraci může způsobit udušení, pakliže se v atmosféře nenachází dostatečné množství kyslíku. Deuterium vyžaduje speciální zacházení zejména kvůli své extrémní hořlavosti. Při skladování by se mělo dbát i na možné výboje statické elektřiny. Lithium je žíravina, hrozí tedy poleptání. Je ovšem také vysoce reaktivní a při styku s vodou prudce reaguje za uvolňování extrémně hořlavých plynů. Proto je nutné s lithiem zacházet odpovídajícím způsobem. Do tzv. blanketu (obalu) komory se bude přidávat ve formě lithiové soli. [7]

Jediným radioaktivním prvkem v reakci je tritium. Tritium je slabý  $\beta$ -zářič s poločasem rozpadu na helium 12,3 roku. V přírodě se tritium tvoří ve formě plynu ve



svrchním obalu atmosféry při interakci kosmického záření s molekulami dusíku. Tritium má schopnost reagovat s molekulami vody. Nahrazuje přitom jeden atom vodíku a vzniká tzv. tritiová voda (HTO). Tritiová voda je rovněž bezbarvá a bez zápachu. Praktické užití má zejména ve zbrojním průmyslu, ale i v laboratořích při zkoumání vlivu nových potencionálních drog na lidský organismus. Tritium jako každý radionuklid způsobuje rakovinu, ale nepředstavuje takové riziko. Jeho záření je velmi slabé a nepronikne ani listem papíru. Problém nastává v momentě požití ve formě vody, nebo v případě inhalace a kožní absorpce ve větším množství. Jeho stopové množství je proto monitorováno v rozvodnách pitné vody, kam se dostává zejména z podzemních vod. Po vstupu do lidského těla se tritium poměrně rychle šíří a jako první napadá většinou orgány jako ledviny a játra. Převážné množství tritia je člověk schopen vyloučit přibližně jeden měsíc po požití. Tritium vázané s organickými sloučeninami člověk vylučuje o něco déle. [8]

Tritium není třeba dovážet až na dvě situace: v momentě uvedení do provozu a v okamžiku jeho ukončení. Samotného paliva je v komoře tokamaku během hoření velmi málo (1g D-T směsi na 1000 m<sup>3</sup>). Při jakékoli myslitelné nehodě by únik radioaktivního záření prakticky nevyžadoval evakuaci okolních usedlostí. Při odstávkách a montážních pracích je nutné v blízkosti zařízení, které jsou tritiu vystaveny dodržovat přísné bezpečnostní předpisy. Jedná se především o aktivované stěny komory tokamaku. Pro zvýšení bezpečnosti se pracuje na nízkoaktivovatelných konstrukčních materiálech pro oblast s vnitřními zařízeními. Mluvíme především o zvláštních typech ocelí, vanadiových a chromových slitinách nebo vláknových a keramických materiálech. Po skončení provozu tokamaku jako fúzního reaktoru v elektrárně bude reaktor na 100 let betonově zapečetěn, dokud se tritium nerozpadne. [4] [5]

Komora tokamaku je obložena berylliem. Jedná se o velmi toxickou látku (kov), tudíž je nutné s berylliem postupovat opatrně. Jeho předností a zároveň důvodem použití je vysoká doba tání. S berylliem přijdeme do styku nejčastěji ve formě toxických solí a karcinogenního aerosolu. Při delší expozici může vdechováním způsobit chronickou beryliózu plic. Největší nebezpečí představuje požití berylnatých mikročástiček spolu s potravou a tekutinami.

## 2.2 Odstavení reaktoru

Malé množství paliva umožní rychlé odstavení reaktoru. V případě poruchy se přívod D-T směsi přeruší, což způsobí poměrně rychlé zastavení fúze a vyhasnutí plazmatu. V takovém případě je nyní jediným zdrojem tepelného záření radioaktivní rozpad aktivovaných materiálů, který dosahuje minimálních hodnot. I přesto se počítá s aktivním chlazením pro jakékoli nestandardní podmínky. Možnost exploze, či tepelné destrukce z důvodu nestability reaktoru je prakticky vyloučená. [4]

## 2.3 Ohleduplná energie

Fúzní energie je mnohdy prezentována trošku utopisticky, neboť může poskytovat velmi šetrný způsob výroby energie vůči životnímu prostředí. Jaderná energie má nespornou výhodu v téměř nulové emisi skleníkových plynů, zejména CO<sub>2</sub>. Oxid uhličitý je jednou z příčin změny klimatických podmínek a globálního oteplování. Stále rostoucí teplota klimatu navíc přispívá k intenzivnějšímu odpařování dalšího skleníkového plynu, vodní páry. Již odsouhlasený trend Kjótským protokolem jasně směřuje ke krátkodobým i dlouhodobým opatřením, kterými se produkce CO<sub>2</sub> snižuje. To se jistě dotkne i energetických zařízení, především plynových kotlů. Nejen jaderná fúze, ale obecně jaderná energetika poskytuje vhodnou alternativu v dodání vysokého výkonu bez produkce oxidu uhličitého.

## 2.4 Projekt ITER

ITER (latinsky „cesta“) je zkratka 4 anglických slov v českém překladu znamenajících mezinárodní termonukleární experimentální reaktor. Stavba tokamaku ITER započala v roce 2012 na jihu Francie. Jedná se dosud o největší zařízení tohoto typu. Za úkol má objasnit podmínky a požadavky pro stavbu budoucí fúzní elektrárny. Dokončení se datuje na rok 2022, po kterém je naplánováno 20 let provozu. Celkové investiční náklady na vybudování se původně odhadovaly na bezmála 5 miliard eur. ITER má jako první tokamak produkovat o mnoho více energie než je potřeba pro udržení provozu. Vyrábět by měl 500 MW, což odpovídá desetinásobku příkonu

potřebného pro ohřev plazmatu. Projekt ITER je výsledkem celosvětové spolupráce, na které se podílí EU, Čína, Japonsko, Indie, Rusko, Jižní Korea a USA. [4]

Tabulka 1 – Hlavní parametry tokamaku ITER [2] :

Hlavní poloměr (poloměr toru s plazmatem)	6.2 m
Vedlejší poloměr (poloměr komory)	2 m
Velikost toroidálního mag. pole	5.3 T
Poměr průměrného tlaku plazmatu a mag. tlaku	2.5 %
Proud plazmatem	15 MA
Poměr fúzního a dodávaného výkonu	10
Objem plazmatu	837 m <sup>3</sup>
Výkon	500 MW
Průměrná hustota elektronů	10 <sup>20</sup> m <sup>-3</sup>
Průměrná teplota iontů	8 keV
Doba udržení	3,7 s
Svislé protažení průměru komory	1,86 %
Ohřev alfa částicemi	82 MW
Výkon dodatečného ohřevu	40 MW

Tokamak ITER bude z hlediska funkce magnetických cívek zařazen do kategorie supravodivých tokamaků. Cívky jsou tvořeny supravodivými vlákny vyrobenými ze slitiny na bázi niobu, cínu a titanu, a navíc jsou uzavřené v konstrukci z nerezové oceli. Supravodivosti lze dosáhnout s pomocí zkapalněného helia, čímž zajistíme požadovanou kritickou teplotu (4 K). Na tokamak ITER se připravuje zatím největší kryogenní systém na světě s příkonem 65 kW. Systém zajišťuje nejen správnou funkci supravodivých magnetů, ale také speciálních kryogenních vývěv, díky nimž dosáhneme vakua ve výbojové komoře. [5] [12]

Magnetické pole kolem vakuové komory generuje složitý systém magnetických cívek. Primární obvod je tvořen centrálním solenoidem, který má využití jako startující člen, ale i při odvádění nečistot formováním magnetických siločar do oblasti divertoru (str. 22). Centrální solenoid je prvek určující proud plazmatem. Skládá se z 6 nezávislých cívek. Vinutí na bázi slitiny niobu a cínu je realizováno supravodivými vlákny, která jsou pokryta pryskyřicí impregnovanou sklo-polyamidovou izolací

testovanou až na 29 kV. Je třeba zajistit nízký vliv magnetického pole na vodiče. Pro centrální solenoid se předpokládá 910 metrů dlouhý vodič. [12]

Cívky tvořící toroidální magnetické pole je 18 a jsou zhotoveny ze stejných materiálů jako v případě centrálního solenoidu (niob a cín). Jsou schopny produkovat až 41 GJ a vytvářejí magnetické pole, jehož magnetická indukce odpovídá hodnotě 11,8 T. Pro všech 18 cívek, jež váží přes 6,5 tuny, se počítá s délkou vodičů dosahující 80 000 km. Použitím dalších 6 toroidálních cívek se vytvoří poloidální pole, které přispívá ke stabilitě plazmatu tím, že ho odtrhává od stěn. Poloidální pole je slabší než toroidální. Cívky poloidálního pole tvoří jiný materiál, konkrétně slitina niobu a titanu. Největší z toroidálních cívek s obvodem 257 metrů se vyrábí přímo v místě areálu tokamaku, menší se na místo dovezou. Projekt zahrnuje také použití korekčních cívek za účelem snížení vlivu ELMs, což si můžeme představit jako vysoce energetické výbuchy na okraji plazmatu, které způsobují nestabilitu (L/H – mod; kapitola 2.5). [12]

Konstrukční požadavky na komponenty tvořící stěny komory jsou obrovské z důvodu ohromného tepelného a mechanického zatížení, jež plazma vyvíjí. Konstrukce komory vyžaduje ohromnou přesnost a preciznost. Technologii pro svařování jednotlivých dílů zajišťuje finská technologická univerzita Lappeenranta, zaměřující se na robotiku a laserové svařování. Použitá svařovací robotika využívá princip hybridních pohonů, či hydrauliky vody a dokáže zajistit tolik potřebnou přesnost, vysokou tuhost a dynamickou stabilitu. Pro spojování a tvarování složitých struktur se v souvislosti s výrobou vakuové komory pracuje s metodou tváření kovů výbuchem, umožňující spojení poměrně velkých ploch rozdílných kovových materiálů. Metoda tváření kovu výbuchem je schopna zaručit vysokou jakost materiálu, jež je pro ITER vyžadována. [5]

Plášť komory zahrnuje tzv. stínící bloky, kde je přeměněna pohybová energie neutronů na tepelnou. Povrch vnitřního pláště pokrývá 440 speciálních panelů z nerezové oceli o rozměrech 1x1,5 metru, které mají za úkol eliminovat tepelné namáhání vlivem hoření plazmatu. Nejvyšší požadavky se kladou na šroub a matici, kterým je panel k bloku připevněn. Zkoušky těchto komponentů probíhaly v České republice pod záštitou ÚFP a FJFI ČVUT. Ocelové panely vážící 4,6 tun prošly nejdříve vítkovickými ocelárnami, později i plzeňskou Škodovkou, kde se díky tepelným

zkouškám podařilo vhodněji upravit stoupání závitu matice šroubu, což zajistí nízký pokles předpětí šroubu. [5] [12]

Pro lepší tepelný odvod do chladicího systému jsou panely pokryty berylliem. Beryliový povrch dokáže odolat tepelnému toku plazmatu, který dosahuje až  $500\,000\text{ W/m}^2$ . Výroba aktivního chlazení se skládá ze dvou částí a je zastřešena britskou strojírenskou společností AMEC. Základní deska chladiče je vyrobena ze speciální kompozitní nerezové oceli a slitiny mědi s využitím výrobní techniky izostatického lisování za tepla. Tepelné zatížení vakuové komory, divertoru, ale i systému dodatečného ohřevu vyžaduje aktivní chlazení komponentů alespoň na  $240^\circ\text{C}$ . Chlazení zajistí voda, která se následně odvede do chladicí věže. Chladič je válcového tvaru, je téměř 30 metrů vysoký a široký. [5] [12]

Během hoření plazmatu v komoře tokamaku vzniká helium, které ve větším množství snižuje fúzní výkon. Proto je nutné takovýto heliový „popel“ z komory odvádět. Spolu s heliem je nutné z komory odvádět řadu dalších nečistot vznikajících zejména vlivem obrovského tepelného záření, kterému jsou vystaveny vnitřní stěny. Vysoké tepelné záření způsobí uvolnění nežádoucích látek z povrchu stěn i přesto, že je pečlivě čištěn. Z povrchu materiálů jsou vlivem rozprašování neutrálními částicemi uvolňovány především atomy příslušného kovu, ale také atomy kyslíku a uhlíku, které se v materiálu zachytily už při jeho výrobě. Atomy uhlíku a kyslíku po své ionizaci způsobují ochlazování na krajích plazmatu, kdežto ionty kovů zvyšují energetické ztráty zářením uprostřed plazmatu. Pro správnou funkci tokamaku je nutné držet koncentraci nečistot pod hodnotou 1%. [2]

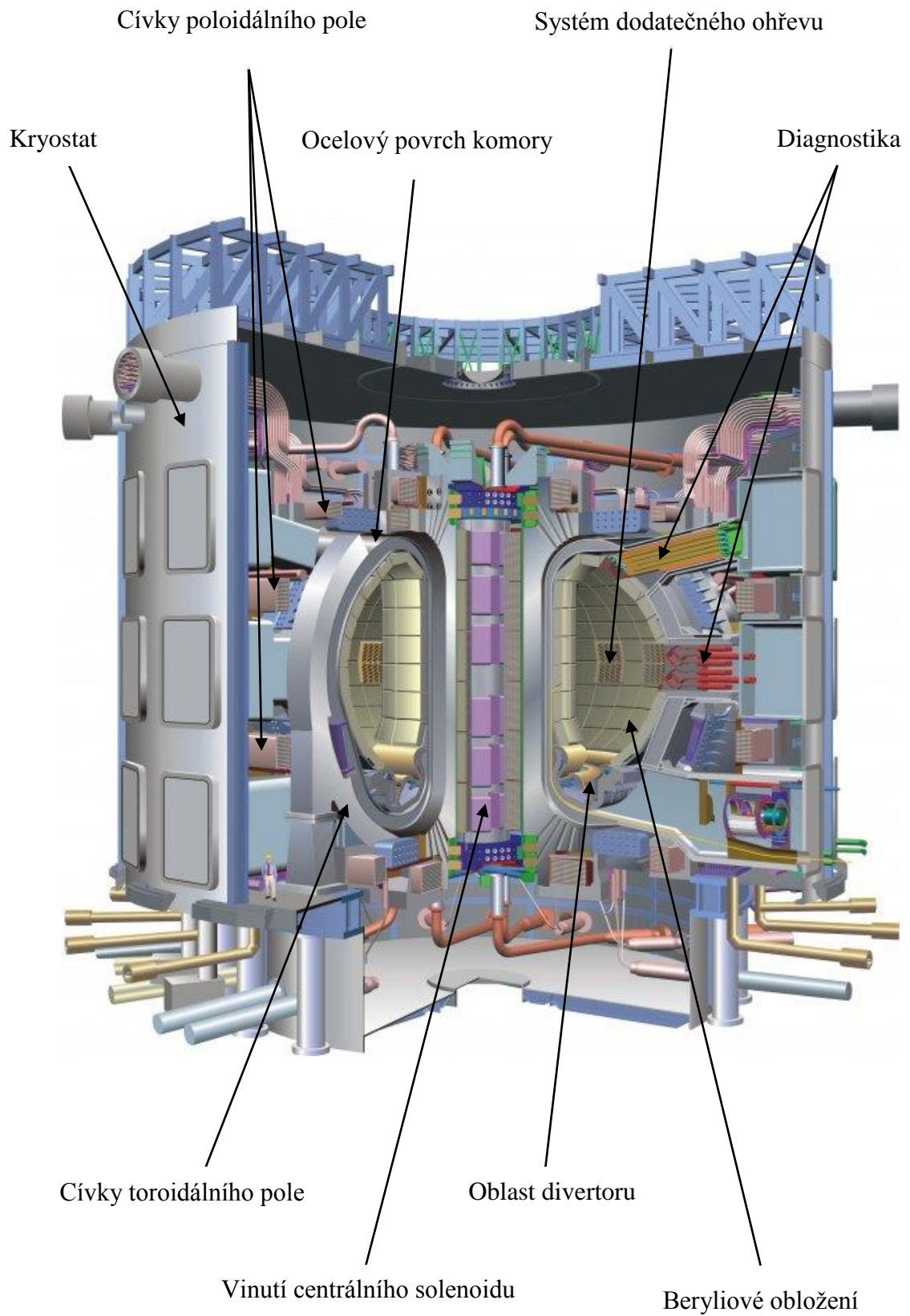
Vhodný odvod nečistot v tokamaku ITER zajišťuje divertor, jehož funkce je založena na speciální modifikaci silného toroidálního pole, které částice odvádí do zvláštní oblasti vakuové komory, kde interagují na sběrných deskách. Oblast divertoru se nachází na samém dně komory a je mírně zúžena. Divertor tvoří 54 dálkově vyměnitelných kazet, z nichž každá disponuje třemi terčíky pro zachycení nečistot. Jelikož se zde kinetická energie zachycených částic přeměňuje na teplo, je nutné oblast divertoru aktivně chladit vodou. Divertorové desky jsou prakticky nejzatíženější částí tokamaku. Požadavky na materiál, jenž má být použit k jejich zhotovení, jsou z hlediska tepelného namáhání nemalé. Italská asociace ENEA byla schopná navrhnout komponent

skládající se z uhlíkových vláken (CFC) a z wolframu. Deska je tvořena rovným dílem, který zpevňují karbonová vlákna a dílem zakřiveným, vyztuženým wolframem. Výrobu vhodného divertoru umožnila kombinace dvou výrobních postupů zahrnující natvrdo spájené vrstvy a radiální lisování za tepla. Jednotlivé kazety divertoru budou z důvodu tepelné degradace během provozu ITERu zhruba třikrát vyměněny. Výměna bude probíhat zcela automaticky s využitím dálkového ovládání a robotiky. Ve Finsku se díky spolupráci více technologických institutů podařilo sestavit odpovídající platformu pro divertor tokamaku ITER. S využitím virtuálního inženýrství a vysoce inteligentních manipulátorů je zde poměrně úspěšně prováděna simulace provozu a údržby divertoru.

Pro tenkovrstvé nanášení wolframu na komponenty byla vybrána technologie magnetronového naprašování s implantací iontu (CMSII). Technika wolframového povlakování má být odzkoušena na britském tokamaku JET, pro který byla zvolena vrstva široká 10 $\mu$ m. Komponenty skládající se z CFC mají poměrně značný sklon k anizotropní tepelné roztažnosti, která může wolframovou vrstvu poškodit. Problém roztažnosti se podařilo minimalizovat nanesením mezilehlé molybdenové vrstvy (2 – 3 $\mu$ m), která dokáže tepelné roztažení komponentu vyrovnat. [5] [12] [3]

Zkoušky navrhnutých materiálů jsou prováděny pokrokovou nedestruktivní metodou označovanou jako systém aktivní infračervené termografie Satir. Zkušební metoda Satir je vhodná především pro komponenty s dobrým prostupem tepla. Princip je založen na měření doby změny povrchové teploty vůči rychlé změně teploty chladicího média, kde je určujícím parametrem tzv. maximální přechodný teplotní rozdíl  $DT_{ref\_max}$ . Zkušební metoda Satir a další měřicí především ultrazvukové metody posvětily výrobní technologii italské ENEA a ukázaly, že vyrobený materiál je schopný obstát v podmínkách odpovídajících ITERu. [5]

V plášti komory je přítomno lithium reagující s neutrony. ITER je prvním fúzním zařízením, kde je počítáno s výrobou tritia uvnitř pláště. Tritium je odváděno, smícháno s deuteriem a odvedeno zpátky do komory. Palivový cyklus řeší taktéž odvod heliového popelu. Celý areál tokamaku ITER zahrnuje 39 budov, včetně technologických míst zajišťujících bezproblémový provoz. Celý komplex bude pohánět měnič o výkonu od 110 MW do 620 MW v době maximální špičky. Téměř 80% tohoto výkonu pokryje kryogenní systém a aktivní chlazení. [12]



Obr. 6 – Vizualizace tokamaku ITER [14]

## 2.5 Projekt Compass

Tokamak Compass byl sestaven v 80. letech v britském výzkumném centru. Původně měl sloužit jako experimentální zařízení hlavně pro oblast výzkumu kruhového a D průřezu plazmatu. Již na počátku svého provozu byl Compass využíván při návrhu korekčních cívek pro tokamak ITER, později i při experimentech s neinduktivní generací (vlečení) proudu. Díky přítomnosti momentálně největšího tokamaku JET na britské půdě nebyl potenciál Compassu náležitě využíván. Evropská komise se na podzim roku 2004 rozhodla darovat tokamak Compass Ústavu fyziky plazmatu (ÚFP) Akademie věd ČR, kde dodnes slouží výzkumných účelům. [13]

Tabulka 2 – Hlavní parametry tokamaku Compass [13]:

Parametr	Aktuální hodnota	Maximální hodnota
Hlavní poloměr R	0.56 m	0.56 m
Malý poloměr a	0.18 m	0.23 m
Proud plazmatem $I_p$ (max)	200 kA	350 kA
Magnetické pole $B_T$ (max)	1.3 T	2.1 T
Vakuový tlak	$5 \times 10^{-8}$ Pa	$1 \times 10^{-8}$ Pa
Prodloužení	1.7	1.8
Tvar plazmatu	D, SND, eliptický, kruhový	D, SND, eliptický, kruhový
Délka výboje	~ 0.3 s	~ 1 s
Vlečení proudu $P_{LH}$ 1.3 GHz	0 MW	0.4 MW
Ohřev plazmatu $P_{NBI}$ 40 keV	1 x 0.3 MW	2 x 0.3 MW

Na začátku devadesátých let byl na Compassu odzkoušen tzv. H-mód, který bude stěžejní i pro tokamak ITER. H-mód je režim, během kterého dojde k přeskupení plazmatu. Prudké přeskupení má za následek strmý nárůst teploty (energie) a hustoty plazmatu. Pro přechod z L-módu (nízké udržení) na H-mód (vysoké udržení) je zapotřebí dodat ohřevem plazmatu určitý minimální výkon. Spuštění H-módu způsobí zvýšení doby udržení. Zhruba po 20 vteřinách se opakovaně objevují výbojové nestability v krajních místech plazmatu (ELMy, resp. ELMs), během kterých dochází k energetickým ztrátám na tokamaku. Rychlost energetických ztrát naneštěstí roste s příkonem ohřevu. Pro vykazání energetického zisku je H-mód nepostradatelným postupem. [2] [13]



Vakuová komora je svařena ze speciálního plechu nesoucí obchodní název Inconel 625. Plech obsahuje největší zastoupení niklu – 58%, až 23% chromu, dále o trochu méně železa a molybdenu, také nepatrné množství dalších prvků jako kobalt, mangan, měď, hliník, titan, ale i uhlík nebo fosfor, etc. Průřez komory odpovídá tvaru písmene D. Provádět diagnostiku či dodatečný ohřev je možné na 60 místech komory. Hlavní parametry komory nastiňuje tabulka 3. [13]

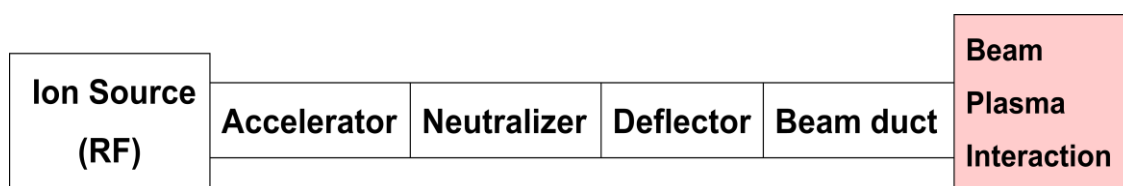
Tabulka 3 – Vybrané parametry komory tokamaku Compass [13]:

Materiál komory	Inconel 625
Tloušťka stěny	3 mm
Toroidální odpor	0.63 mΩ
Poloidální odpor	0.25 mΩ
Teplota vypékání	150 °C
Objem komory	1 m <sup>3</sup>
Povrch komory	8 m <sup>2</sup>
Základní vakuum	10 <sup>-6</sup> Pa
Materiál divertoru	grafit

Geometrické uspořádání magnetických cívek je shodné s tokamakem ITER s výjimkou faktu, že cívky toroidálního pole obklopují cívky poloidálního mag. pole. Cívky toroidálního pole pohání až 50% celkového příkonu. Velikost magnetické indukce toroid. pole se pohybuje v rozmezí 0.8 – 2.1 T v závislosti na proudu. Toroidální pole vytváří 16 rovnoměrně rozmístěných měděných vodou chlazených, cívek. Vinutí centrálního selenoidu vybudí maximální proud plazmatem o velikost 350 kA. Bez dodatečného ohřevu trvá průměrný plazmatický výboj v tokamaku Compass 100 – 400 ms. Doplníme-li systém vstřikování neutrálního svazku (NBI), přiblížíme dobu udržení k jedné sekundě. Cívky poloidálního pole tvoří hlavně zpětnovazební systém s reakční dobou 100 – 300 μs. Vinutí cívek poloidálního pole je záhodno rozdělit z hlediska funkce na magnetizační, rovnovážné, tvarovací a stabilizační. Díky sofistikovanému zpětnovazebnímu systému je možné poměrně přesně řídit a určovat proud plazmatem. [13]

Dodatečný ohřev plazmatu na tokamaku Compass řeší systém vstřikování svazku vysokoenergetických neutrálních atomů deuteria a vodíku (NBI). Jakmile ohmický ohřev přestane být účinný, nastupují 2 injektory s energií 2x40 keV. Atomy jsou

vzhledem k požadavkům na co nejdelší trajektorii letu v plazmatu vstřelovány do vakuové komory tangenciálně dvěma způsoby. Při prvním jsou oba svazky vstřikovány stejným portem v plášti komory. Ve druhém případě jsou využity dva porty, ovšem úhel, který mezi sebou injektory svírají, je vždy stejný –  $90^\circ$ . Velikost energie se měří kalorimetrem vložením do dráhy svazku. V něm umístěné měděné termočlánky snímají nárůst teploty. Některé části systému NBI jsou chlazeny tekutým dusíkem na teplotu blízkou 0 K. Celkový pulsně dodávaný (délka pulsu 300 ms) výkon do plazmatu o velikosti 600 kW vytváří 1,5 MW příkonu. [13]



Obr. 7 – Blokové schéma NBI (zdroj iontů, urychlení, neutralizace, odchýlení iontů, vlnovod, ionizace) [9]



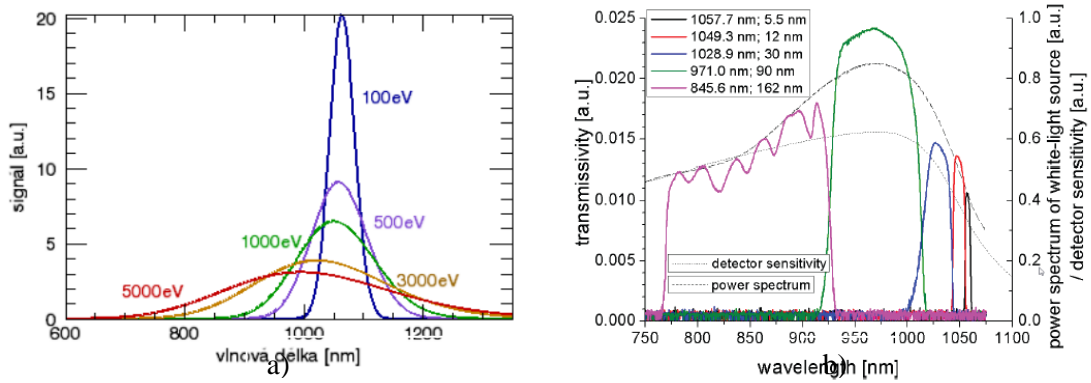
Obr. 8 – Vysokofrekvenční iontový zdroj (frek. – 4 MHz, max. VF výkon – 30kW, max. VF napětí na anténě – 8 kV) [9]

Odborníci z ÚFP provádí na Compassu řadu výzkumných programů, většinou zabývajících se L – H módy, nebo vlivem ELMs. Tokamak Compass byl postupem času optimalizován tak, aby na něm bylo možné provádět širokou škálu diagnostik. Ve svoji práci jsem se rozhodl podrobněji analyzovat diagnostiku magnetickou a spektroskopickou metodu založenou na Thomsonově rozptylu využívající Dopplerovské rozšíření rozptýleného spektra. Mimo to se na Compassu provádí další spektroskopické diagnostiky rentgenového a viditelného záření, měření rotace plazmatu nebo ztráty energie záření. Další měřicí metody spočívají v diagnostice částic a svazků, či v použití speciálních měřících sond.

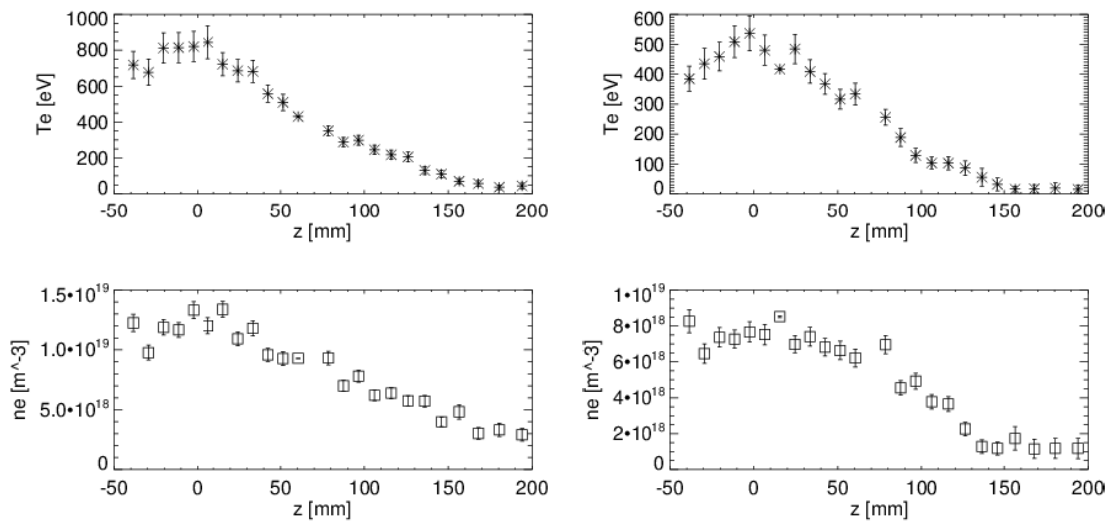
Diagnostika Thomsonova rozptylu (Thomson scattering, dále TS) patří mezi nejzákladnější diagnostiky, které jsou prováděny na většině fúzních zařízení. TS umožňuje sledovat elektronovou teplotu a hustotu ve středu i na okraji plazmatu, kde to je zvláště vyžadované z důvodu studie H-módu. Thomsonův rozptyl se dá pozorovat na volných nabitých částicích. Jedná se o pružný rozptyl světla, resp. elektromagnetického záření. Dopadající vlna způsobí rozkmitání částice, během kterého vyzáří záření, jehož spektrum je vlivem Dopplerova jevu rozšířeno. Změna spektrálního rozšíření oproti dopadajícím vlnám je stěžejní pro určení elektronové teploty, zatímco velikost intenzity rozptýleného záření určuje hustotu. [18]

TS diagnostika vyžaduje poměrně precizní a nákladné vybavení. Zahrnuje použití dvou Nd: YAG laserů s vlnovou délkou 1064 nm, energií 1,5 J, frekvencí 30 Hz a s délkou pulsu 7 ns. Výhodou oproti použití rubínového laseru je dobré prostorové rozlišení a schopnost měřit v krátkých časových intervalech. Sběrnou optiku zajišťují dva objektivy nasměrované s ohledem na polarizaci záření ve směru kmitání částice. Signál je přenášen 12 svazky optických vláken pro středovou oblast a 16 svazky optických vláken pro okrajovou oblast. Jeden speciální svazek je určený pro seřízení polohy systému. Spektrální analýza se provádí s pomocí 28 polychromátorů, které jsou schopny analyzovat celkem 56 prostorových bodů. Součástí polychromátorů je 5 speciálních filtrů s teplotním rozsahem 10 eV – 5 keV. Dále zde jsou detekující lavinové fotodiody s lepší citlivostí v IR oblasti. Každý filtr propouští odlišnou vlnovou délku. Analogový signál je digitalizován rychlými (8 bit rozlišení, rychlost 1 GSsample/s) a pomalými (16 bit, 500 kSample/s) A/D převodníky firmy National

Instrument. Cílem TS diagnostiky je získání profilu s údaji o hustotě a teplotě elektronů, která je zhruba třikrát větší než teplota iontů. [13]



Obr. 9 – a) Průběh signálu v závislosti na vlnové délce. Při vyšších teplotách se zvyšuje šířka Gaussovy křivky, tedy frekvenční spektrum, a klesá monochromaticnost. Extrém se posouvá ke kratším vlnovým délkám. Při teplotách nad 5000 eV je nutné zohledňovat relativistický jev. [18] b) Frekvenční spektra filtrů, pomocí kterých se snažíme signál zrekonstruovat. [17]

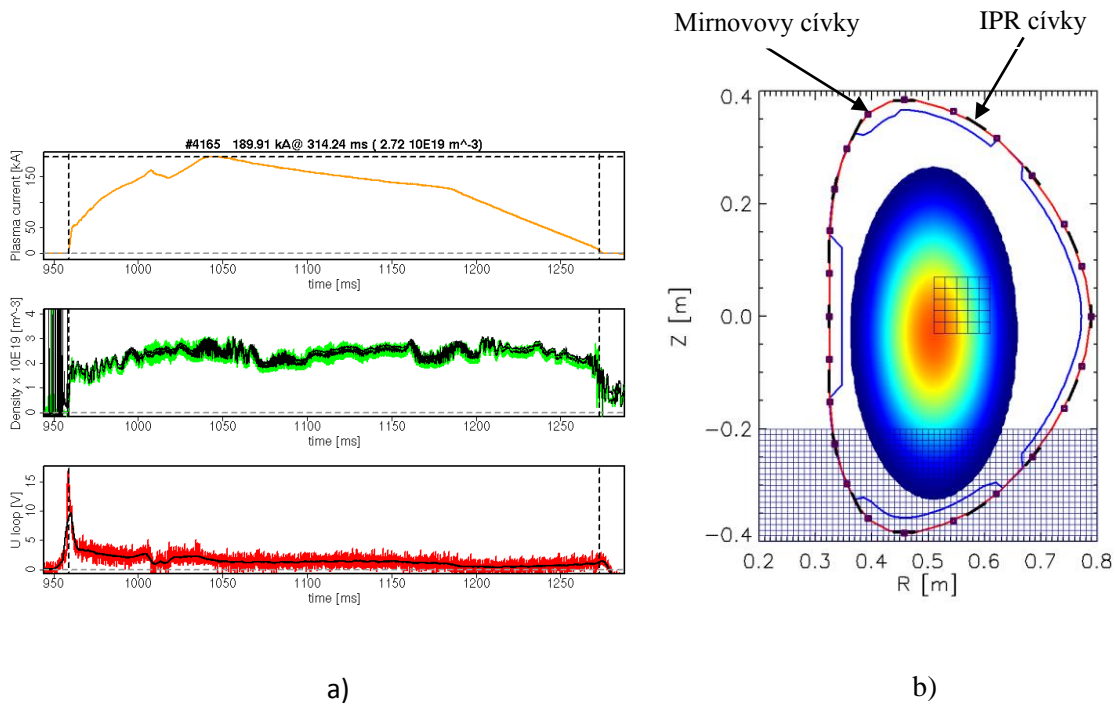


Obr. 10 – Výsledné naměřené profily teploty a hustoty z obou objektivů. Levá část obrázku je měřena v čase 982.52 ms. Pravá část je pořízená v čase 1015.85 ms. Časová prodleva je zapříčiněna nesterjnou délkou optických vláken. Teplota a hustota elektronů jsou základní veličiny pro určení výsledné energie. [17]

Magnetická diagnostika je rovněž nepostradatelná činnost při provozu tokamaku. Magnetické pole je určující pro zpětnovazebné řízení polohy plazmatu v komoře. Měřicí prvek představuje cívku, na které se indukuje napětí úměrné magnetickému toku cívkou. V měřicím obvodu je dále nutné počítat s určitým odporem sondy a s parazitní kapacitou sondy. Při změně magnetického toku se cívka chová jako zdroj napětí. Detekované napětí je zpožděno za napětím na cívce o časovou konstantu obvodu  $\tau$  ( $L/R$ ). Časovou konstantu je možné ovlivnit změnou vlastní indukčnosti cívky, resp. změnou počtu závitů a průměru závitů (pozn.:  $R$  je celkový odpor, tj. obvykle vstupní odpor měřicího přístroje – buď analogového integrátoru nebo A/D převodníku). Mezi požadavky na měřicí cívku patří také její citlivost. Snížením průměru cívky při zachování počtu závitů se citlivost v  $T/V$  sníží. Pro vysokou přesnost měření je potřeba cívku přesně orientovat, aby cívka měřící poloidální pole neměřila toroidální; je potřeba přesně znát její polohu z důvodu vhodného odečtení vakuových polí od silových cívek kolem tokamaku. [19]

Na tokamaku Compass je instalováno 440 měřicích cívek. Systém zahrnuje využití několika cívek speciálního typu. První z nich je tzv. Rogowského cívka, která je určena pro měření elektrických proudů plazmatem, komorou nebo silových cívek. Dalším typem je tzv. Mirnovova cívka, která měří lokální poloidální magnetické pole. Jde o cívku malých rozměrů (1 cm průměr). Pro určení polohy plazmatu jsou používány tzv. IPR (Internal Partial Rogowski) cívky, které jsou 4 cm dlouhé, čímž získávají vyšší citlivost a lepší odstup signál/šum. [19]

Další důležitou sledovanou veličinou je napětí na závit. Je snímáno 8 speciálními toroidálními cívkami (tzv. flux loops – FL). Výhodou FL je dobré časové rozlišení, dostatečně silný získávaný signál a možnost rekonstrukce magnetických povrchů. Analýza dat zahrnuje spektrální Fourierovu transformaci. Mezi měřené veličiny při magnetické diagnostice dále patří proudová hustota, vodivost plazmatu, celková energie plazmatu nebo tzv. MHD nestability. [19]



Obr. 11 – a) Časový průběh sledovaných veličin (proud plazmatem, hustota, napětí na závit) b) Rozmístění měřících cívek kolem vakuové komory [20]

### **3. Vývoj jaderné fúze jako zdroje energie budoucnosti**

#### **3.1 Energetická chudoba**

Při pohledu na Mazlovu pyramidu potřeb zjistíme, že teplo a elektrina, obecně energie, zajišťují ty nezákladnější fyziologické potřeby. Civilizovaná společnost by si těžko dokázala představit život bez světla, bez tepla nebo bez pohonných hmot. Můžeme konstatovat, že naše společnost je zcela jistě velmi závislá na energii. V moderně urbanizovaných částech světa žije více jak polovina populace ve městech, kde buď to průměrná hustota spotřeby energie stagnuje, nebo mírně roste vlivem přistěhovalců, neboť jsme schopni evidovat stále rostoucí maxima spotřeby energie. Z důvodu omezeného množství zásob je v energetice stále více prosazován přechod od fosilních paliv.

Situace je poněkud znepokojivější v zemích s výrazným růstem populace. Jedná se především o oblast jihovýchodní Asie, Afriky a latinské Ameriky. V roce 2011 žilo na Zemi přibližně 7 miliard lidí. Každoročně se lidská populace rozroste o cca 80

miliónů jedinců. Průměrná spotřeba energie na hlavu v těchto zemích prudce stoupá. V současné době je kolem 1,5 miliardy lidí bez přístupu k elektřině. Téměř veškerá energie se v rozvojových zemích vyrábí spalováním fosilních paliv a biomasy. Uvádí se, že přibližně 2,5 miliardy lidí vaří a topí nekvalitním spalováním biomasy, což má za následek řadu chorob a nemocí. O přechodu od fosilního paliva se dá tedy pouze spekulovat. Poslední období nasvědčuje, že situaci začali řešit v Číně a Indii, kde se zřejmě rozhodli určovat budoucnost energetiky. Pokud nedojde k zásadnímu zlomu, bude v příštích letech situace ještě kritičtější. V roce 2030 má být na světě zaokrouhleně 8 miliard lidí. Aby bylo možné pokrýt spotřebu populačního přírůstku, je nutné nainstalování asi 6ti - násobku současného instalovaného výkonu v Evropě. [16]

Pro uspokojení lidských potřeb je třeba výrazně posílit energetickou síť odpovídajícím způsobem. Jedním takovým způsobem jsou obnovitelné zdroje, které ovšem poskytují nízkou hustotu průměrného plošného výkonu a malé využití instalované kapacity s ohledem na geografické podmínky. Obnovitelné zdroje jsou velmi ohleduplné k životnímu prostředí, proto jsou značně politicky podporovány. Odváděný výkon z elektráren využívající přírodní zdroje je závislý na momentální klimatické situaci. Za určitých podmínek obnovitelné zdroje vyrábí přebytek energie. Vyřešit problém energetické chudoby by do jisté míry dokázal dosud neznámý způsob „uskladnění“ energie. Jinými slovy odebrat přebytečné špičky výroby a použít je v období s nízkou produkcí energie. Nicméně energetická politika některých států je řekněme zmatená. Německo oproti roku 2000 výrazně změnilo svůj energetický koncept. Uzavírá své jaderné bloky a sází na energii větru a slunce i přesto že, pro fotovoltaiku nemá vhodné podmínky. Jižněji položené země jako Španělsko, Itálie, Řecko nebo Turecko sice podmínky pro FV panely mají, ale nainstalovat nový výkon jim nedovolí tamější zoufalá ekonomická situace. [16]

Jako mnohem snadnější cesta se momentálně jeví sázka na jadernou energii. Její výhoda je vysoká stabilita dodávaného výkonu, nízké náklady provozu a nulová emise CO<sub>2</sub>. Mezi nevýhody můžeme zařadit vysoký počáteční kapitál, dlouhou dobu výstavby a problém bezpečnosti, který tvoří velmi citlivé politické téma. Jaderné bloky umožňují dodávat takřka nepřetržitě velmi vysoký výkon. Optimistický postoj k jaderné energii zaujaly především země, kde je energetická chudoba nejvýraznější, tedy Čína a Indie. Dále Rusko, Polsko, Francie i Česká republika.

V současnosti je po celém světě v provozu 437 jaderných bloků. Většinou jde o bloky dosluhující III. generace. Ve výstavbě se nachází 68 bloků, převážně v jihovýchodní Asii, kde se jedná o reaktory nastupující generace III+. Spolu s jadernou energií je spojeno několik ovlivňujících faktorů. Stěžejní je a vždy bude úroveň bezpečnosti, se kterou je úzce svázáno veřejné mínění, přístup politiků a mnoho legislativních požadavků. Neméně důležité je nakládání s radioaktivním materiálem, ekonomické parametry a v případě nejhoršího scénáře i vojenské zneužití. [16]

### 3.2 Nahrazení fosilních paliv

Termojaderné zařízení pro produkci energie patří do IV. generace v energetice. Celosvětový problém zmíněn v kapitole 3.1 by byl s uvedením fúzních reaktorů do provozu vyřešen. Fúze má zaručit bezpečný, trvale udržitelný zdroj s minimem odpadu. Teoretický potenciál jaderné fúze je ohromný. Otázkou je, jak velký je potenciál využitelný. Odpověď je potřeba hledat volbou vhodné technologie, vývojem inovačních materiálů a ploch. Nezbytnost pro co největší využitelný potenciál je cenová konkurenceschopnost, ekologické hledisko a akceptovatelnost.

Většina válečných konfliktů byla v minulosti vedena z důvodu nerovnoměrného rozložení zdrojů. Tento fakt v kombinaci s lidskou hamižností vztyčuje velký vykřičník pro lidské pokolení. O vojenské intervenci na Blízkém východě se dá pouze polemizovat (velká naleziště ropy, zemního plynu a lithia). Energetické situaci příliš nepřidává nerovnoměrná spotřeba energie. Evropa, kde žije 15% světové populace, spotřebuje 30% světové energie. Rovněž 30% energie spotřebuje USA pouze s 5,5% obyvatel planety. Asie, která tvoří 60% veškeré světové populace, odebírá taktéž 30% energie. Na Afriku populačně srovnatelnou s Evropou zbývá pouhých 3% světové energie! [3]

Aby se v budoucnu zamezilo vyhroceným situacím, je třeba začít intenzivně hledat nové alternativní zdroje. Již několik let se vytěží více ropy, než je možné v nových nalezištích objevit. Světové zásoby ropy se odhadují na 40 – 45 let. Zásoby uhlí vydrží při současné spotřebě až 250 let a 70 let v případě zemního plynu. Situaci může do jisté míry zmírnit spalování břidlicového plynu, ovšem určitě ne vyřešit. S termojadernou fúzí by byl problém rozložení a spotřeby zdrojů vyřešen. Palivo pro



termojadernou fúzi se získává z vody, která pokrývá necelých 71% povrchu planety. Vodu můžeme prakticky považovat za obnovitelný zdroj. K vyrobení 1 GW výkonu je zapotřebí spálit přibližně 2,7 miliónu tun uhlí, které by bylo možné nahradit 100 kg deuteria a zhruba 150 kg tritia. Například objem vody z Velkého Boleveckého rybníku by zajistilo téměř 41 tun deuteria. Velké zásoby vody by civilizaci umožnily vyrábět energii několik tisíc let. Rovnoměrné rozložení vodních ploch a především snadná výroba deuteria by držela cenu fúzní energie velmi nízko. Náročná a složitá konstrukce fúzních reaktorů by naopak cenu kompenzovala, ale přesto by měla být konkurenceschopná a hlavně stabilní. 150 kg tritia odpovídá zhruba 10 tunám lithiové rudy. [3] [4]

### 3.3 Fúze v budoucnu

V posledních letech se vývoj fúze posunul kupředu. Velký úspěch zaznamenal zatím největší tokamak JET, když vyprodukoval výkon zhruba stejně velký jako je potřeba dodat. Výzkum termojaderné fúze již odkryl řadu průmyslově použitelných technologií i pro jiná odvětví. V budoucnu se bude vše odvíjet od úspěchu, či neúspěchu tokamaku ITER. ITER bude vyžadovat zřejmě ještě více investičních nákladů, než na které byl dimenzován, očekávám protáhnutí doby stavby, hlavně z důvodu současné ekonomické krize. Původně vyčíslené náklady (5 miliard eur) vypadají poměrně směšně s aktuální částkou dosahující závratných 16 miliard eur. Dohady spojené s financováním projektu ITER vlečou prakticky od okamžiku jeho zahájení. Kromě financování je vyžadována kvalitní koordinace výzkumných center a mnoha odborníků z celého světa.

Od okamžiku zahájení stavby ITERu jsem v oblasti fúzní energie zaregistroval nepatrný „boom“. Na pracovištích významných fúzních reaktorů (německý ASDEX-U, britský JET i náš Compass,...) probíhá řada aktivit svým výzkumem zaměřených na ITER. Pražský tokamak Compass se v rámci EFDA (dohoda zastřešující celoevropský fúzní výzkum) těší velké oblibě, neboť dokáže pracovat velmi flexibilně. Na mohutném JETu jsou výzkumné programy realizovány velmi těžkopádně. Instalace potřebných diagnostických systémů probíhá často i několik měsíců. Na tokamaku Compass je možné provádět rozdílné diagnostiky z týdne na týden, má-li k tomu ÚFP odpovídající prostředky.

Dobu, kdy fúzní energie rozsvítí první žárovku, si nikdo netroufne odhadnout. Výzkum termojaderné fúze sice pokročil, ale stále nenabízí vše potřebné k přesnějšímu určení této doby. Proto se již v předstihu pracuje na prototypu fúzní elektrárny (projekt DEMO), který bude schopen vyrábět elektřinu. Tepelný výměník pro páru pohánějící turbínu bude zaveden do oblasti divertoru. Osobně považuji za pravděpodobné nasazení prvních fúzních elektráren v oblastech s velkou hustotou obyvatel přibližně rok 2050 v případě, že projekty ITER a DEMO budou úspěšné. Jaderná fúze je stále velmi neprobádaná oblast. Zprávou o provedení jaderné fúze za pokojové teploty žil v minulosti celý svět, ovšem nadšení bylo předčasné. Později se ukázala teoretická možnost spojení jader za pokojové teploty s využitím těžších částic – tzv. mezonů  $\mu$ . V současných experimentálních podmínkách je fúze za studena zatím neproveditelná, neboť se mezon  $\mu$  extrémně rychle rozpadá. Již v současnosti je pod záštitou NASA zkoumán termojaderný pohon pro vesmírná plavidla. V příštích desetiletích předpokládám kromě zintenzivnění výzkumu jaderné fúze také větší politickou podporu a možný přísun peněz ze stran zainteresovaných soukromých subjektů. Člověku zůstává stále zakryt potenciál vodíkového hospodářství, které by jednou mohlo nahradit současné pohonné hmoty. S vývojem technologie bude možné přejít k zajímavějším fúzním reakcím bez radioaktivního materiálu, s minimálním počtem neutronů, s vyšší zápalnou teplotou a s větší uvolněnou energií. [3]

## Závěr

Cílem práce bylo komplexně rozebrat a zhodnotit důležitá fakta v oblasti jaderné fúze. První kapitola má za úkol čtenáře seznámit se základními principy s důrazem na magnetické udržení. Ve druhé kapitole jsem se kromě bezpečnosti zaměřil na inovační technologie pro stavbu ITERu. V rámci studie projektu Compass jsem se s pomocí ÚFP rozhodl do své práce zahrnout také malou praktickou ukázkou ve formě spektroskopické a magnetické diagnostiky. Třetí kapitola pojednává o stále rostoucí energetické chudobě a o nadměrném těžení fosilních paliv, což jsou problémy, které by měly být díky fúzi v budoucnu vyřešeny. V poslední části práce jsem analyzoval vývoj fúze jako zdroj energie budoucnosti.

## Použitá literatura a zdroje

- [1] Petr Kulhánek. *Úvod do teorie plazmatu*. Praha: AGA, 2011. s. 9-15. ISBN 978-80-904582-2-2 (váz.).
- [2] Garry McCracken. *Fúze: Energie vesmíru*. Peter Stott. Praha: Mladá fronta, 2006. Kolumbus, 183. ISBN 80-204-1453-3.
- [3] Milan Řípa. *Řízená Termojaderná syntéza pro každého*. 2. Vladimír Weinzettl. Jan Mlynář. František Žáček. Praha: Ústav fyziky plazmatu AV ČR, ČTK, 2005. ISBN 80-902724-7-9.
- [4] J. Pamela. *Čistá energie pro budoucnost: Vývoj fúzní energie*. Mnichov: EFDA, 2006. Informační brožura.
- [5] Evropská komise. Ředitelství Euratom. *Jaderná fúze a průmysl společně pro budoucnost*. Lucemburk: Úřad pro úřední tisky Evropských společenství, 2009. ISBN 978-92-79-11706-0.
- [6] Evropská komise. Ředitelství Euratom. *Výzkum fúze: volba energie pro budoucnost Evropy*. Lucemburk: Úřad pro úřední tisky Evropských společenství, 2006.
- [7] Air Products and Chemicals, Inc. *Bezpečnostní list*. [online]. Děčín: 8. 3. 2009, 1.2 [7. 5. 2013, 17:41]. Dostupné z: <http://www.plynarna-pb.cz/bezp/helium.pdf>
- [8] Vláda USA. *United States Environmental Protection Agency*. Tritium [online]. Washington: 24. 4. 2012, [7. 5. 2013 17:58]. Dostupné z: <http://www.epa.gov/radiation/radionuclides/tritium.html#healtheffects>
- [9] Jan Stöckel. *Dodatečný ohřev plazmatu v tokamacích energetickým svazkem atomů: NBI heating*. [online] Praha: Ústav fyziky plazmatu AV ČR, 2011 [2. 5. 2013 22:13]. Prezentace ke stažení na: <http://ftf.fjfi.cvut.cz/evergreen/ZimniSkolaFP/11Marianska/>

- [10] R.Daneel. Proton-protonový cyklus. *Wikipedie* [online]. 1. 5. 2010, edit 13. 5. 2013 [12. 4. 2013 14:12]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Proton-protonov%C3%BD\\_cyklus](http://cs.wikipedia.org/wiki/Proton-protonov%C3%BD_cyklus)
- [11] Efektivní přenos poznatků v rámci energetického sektoru. Elektron-pozitronový pár. *Enpedie*. [online]. 5. 11. 2012, edit 11. 12. 2012 [7. 4. 2013 0:37]. Dostupné z: [http://enpedie.cz/wiki/Elektron-pozitronov%C3%BD\\_p%C3%A1r](http://enpedie.cz/wiki/Elektron-pozitronov%C3%BD_p%C3%A1r)
- [12] ITER Organization. *Iter: the way to new energy* [online] 2013 [17. 4. 2013 17:12]. Dostupné z: <http://www.iter.org/>
- [13] Euratom-IPP.CR. *Tokamak COMPASS* [online] [24. 5. 2013 18:45]. Dostupné z: <http://www.ipp.cas.cz/Tokamak/euratom/index.php/cs>
- [14] ITER Organization. ITER. *Facebook* [online]. 21. 11. 2006 [19. 4. 2013 23:02]. Dostupné z: <https://www.facebook.com/media/set/?set=a.432842269706.230276.23363014706&type=3>
- [15] Ondřej Kudláček. *Magnetická pole tokamaku*. [online] Praha: FJFI ČVUT, 2009 [10. 5. 2013 11:31]. Prezentace ke stažení na: <http://ftf.fjfi.cvut.cz/evergreen/ZimniSkolaFP/09Marianska/www/index.html>
- [16] Dana Drábová. *Energie pro budoucnost*. Plzeň: Státní úřad pro jadernou bezpečnost, 2013. [CD] [26. 5. 2013 16:05]
- [17] M. Aftanas, P. Böhm, R. Scannell, M. Tripsky, V. Weinzettl, M. Hron, R. Panek, J. Stöckel, M. Walsh, P. Bilkova. Thomson scattering on COMPASS: commissioning and first data. *IOPscience*. [online] United Kingdom: 19. 1. 2012. Page 4. [30. 5. 2013 19:41]. doi:10.1088/1748-0221/7/01/C01074. Dostupné z: [http://iopscience.iop.org/1748-0221/7/01/C01074/pdf/1748-0221\\_7\\_01\\_C01074.pdf](http://iopscience.iop.org/1748-0221/7/01/C01074/pdf/1748-0221_7_01_C01074.pdf)

- [18] Lenka Kocmanová. *Thomsonův rozptyl na tokamaku COMPASS*. [online]. Praha, 2009 [30. 5. 2013 19:30]. Bakalářská práce. ČVUT Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská. Dostupné z:  
<http://fttf.fjfi.cvut.cz/StPrace/Bakalarky/2010/KocmanovaLenka.pdf>
- [19] Ondřej Kudláček. *Řízení polohy plazmatu v tokamaku COMPASS s přihlédnutím k tlumicímu efektu vodivé komory zařízení*. [online]. Praha, 2011 [31. 5. 2013 21:28]. Diplomová práce. ČVUT Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská. Dostupné z: <http://fttf.fjfi.cvut.cz/StPrace/Diplomky/2011/KudlacekOndrej.pdf>
- [20] F. Janky, J. Havlicek, D. Valcárcel, M. Hron, J. Horacek, O. Kudlacek, R. Panek, B.B.Carvalho. Determination of the plasma position for its real-time control in the COMPASS tokamak. *Elsevier*. 2011, page 2 [31. 5. 2013 21:58]. doi:10.1016/j.fusengdes.2011.01.143
- [21] Hoody.hoody. Štěpná jaderná reakce. *Wikipedie* [online]. 16. 11. 2006, edit 10. 12. 2012 [2. 5. 2013 10:14] Dostupné z:  
[http://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%A0%C4%9Bpn%C3%A1\\_jadern%C3%A1\\_reakce](http://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%A0%C4%9Bpn%C3%A1_jadern%C3%A1_reakce)
- [22] Jiří Limpouch. *Jaderná fúze*. [Online] Praha: FJFI ČVUT, 23. 5. 2013 [10. 5. 2013 16:12] Dostupné z:  
[http://kfe.fjfi.cvut.cz/~limpouch/plazma/13\\_JaderFuze.pdf](http://kfe.fjfi.cvut.cz/~limpouch/plazma/13_JaderFuze.pdf)


## Příloha

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího  
Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran  
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická  
Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jana Jiříčková, Ph.D.**  
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2012**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **7. června 2013**

  
Doc. Ing. Jiří Hapertbauer, Ph.D.

děkan



  
Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.

vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012