

# Řízená termojaderná syntéza – energie budoucnosti?

Jiří Orsava

---

Bakalářská práce  
2009



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav inženýrství ochrany živ. prostředí

akademický rok: 2008/2009

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Jiří ORSAVA

Studijní program: B 2808 Chemie a technologie materiálů

Studijní obor: Chemie a technologie materiálů

Téma práce: Řízená termojaderná syntéza – energie budoucnosti?

Zásady pro vypracování:

1. Vyhledejte vhodné literární zdroje týkající se popisu termojaderné syntézy a současného stavu poznatků v této oblasti.
2. Věnujte pozornost zejména technické využitelnosti termojaderné syntézy pro výrobu energie, současnému stavu vývoje potřebných technologií i perspektivám dalšího vývoje. Zaměřte se i na potenciální environmentální problémy technologické aplikace: jedná se o "čistý" zdroj, jaké vstupní suroviny, jaké dopady apod?
3. Zpracujte obvyklou formou v bakalářské práci ( viz instrukce UTB pro zpracování BP ).

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

**dle pokynů vedoucího bakalářské práce,  
stávající monografická a časopisecká literatura na ÚIOŽP, UK, UTB a jiných knihovnách  
elektronické informační zdroje ( www – stránky, databáze apod.)**

Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Markéta Julinová, Ph.D.**

Ústav inženýrství ochrany živ. prostředí

Datum zadání bakalářské práce:

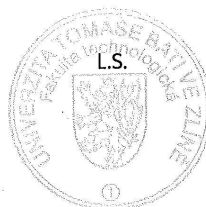
**9. února 2009**

Termín odevzdání bakalářské práce:

**27. května 2009**

Ve Zlíně dne 16. února 2009

  
doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.  
*děkan*



doc. RNDr. Jan Růžička, Ph.D.  
*ředitel ústavu*



## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce podává stručný popis problematiky jaderné syntézy. V první kapitole je nastíněna definice pojmu plazma. V další kapitole je krátké seznámení s jadernou syntézou a v jaké formě se s ní můžeme setkat. Ve čtvrté kapitole je popsán mezinárodní projekt ITER. V následující kapitole je uvedené palivo, které připadá v úvahu pro jadernou elektrárnu. A v závěru je diskuse mezi zastánci a odpůrci projektu ITER a dopady na životní prostředí.

Klíčová slova: plazma, Slunce, vodíková bomba, magnetické udržení, inerciální udržení, ITER, vodík, lithium, regolit

## **ABSTRACT**

This bachelor thesis gives a brief description of the issue of fusion. In the first chapter gives an overview of the definition of plasma. In the next chapter is a brief introduction to fusion and in what form it can be seen. In the fourth chapter describes the international ITER project. In the next chapter is referred to the fuel, which should be taken into account for the nuclear power plant. And at the end is the debate between proponents and opponents of the ITER project and the impacts on the environment.

Keywords: plasma, Sun, hydrogen bomb, magnetic confinement, inertial confinement, ITER, hydrogen, lithium, regolith

Děkuji vedoucímu mé bakalářské práce, p. **Ing. Markéta Julinová Ph.D.** za poskytnuté rady a četné konzultace, které mi velmi pomohly ve vypracování mé bakalářské práce.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků, je-li to uvedeno na základě licenční smlouvy, budu uveden jako spoluautor.

Ve Zlíně, 27.5.2009

.....

podpis

## OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>7</b>
<b>1 HISTORIE</b> .....	<b>8</b>
<b>2 PLAZMA</b> .....	<b>10</b>
2.1 DRUHY PLAZMATU .....	11
2.2 PROCESY V PLAZMATU .....	11
2.3 NĚKTERÉ TYPY PLAZMATU A JEJICH VYUŽITÍ .....	15
<b>3 JADERNÁ SYNTÉZA</b> .....	<b>18</b>
3.1 SLUNCE .....	18
3.2 VODÍKOVÁ BOMBA .....	20
3.3 ŘÍZENÁ JADERNÁ SYNTÉZA V POZEMNÍCH PODMÍNKÁCH.....	21
3.3.1 Magnetické udržení.....	21
3.3.2 Inerciální udržení .....	24
<b>4 ITER</b> .....	<b>25</b>
4.1 HISTORIE PROJEKTU ITER V DATECH [3, 4] .....	25
4.2 CÍLE ITERU .....	27
<b>5 PALIVO</b> .....	<b>29</b>
5.1 VODÍK .....	29
5.2 LITHIUM .....	31
5.3 REGOLIT.....	32
<b>6 VLIV FÚZNÍ ELEKTRÁRNY NA ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ</b> .....	<b>33</b>
<b>7 PRO A PROTI – NÁZORY VĚDECKÉ I LAICKÉ VEŘEJNOSTI</b> .....	<b>35</b>
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>38</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY</b> .....	<b>39</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>41</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	<b>44</b>
<b>SEZNAM TABULEK</b> .....	<b>45</b>

## ÚVOD

S rostoucím počtem obyvatel a rozvojem průmyslu se neustále zvyšuje energetická spotřeba lidstva, kterou není možno uspokojit jen využitím obnovitelných zdrojů energie. Ekologicky přijatelné řešení pro blízkou budoucnost se nazývá termojaderná fúze. Vědci, kteří se na řešení tohoto problému podílejí, jsou jednoznačně přesvědčeni, že termonukleární energie by měla být v budoucnosti definitivním energetickým zdrojem. Všechny ostatní zdroje včetně jaderné energetiky, založené na štěpení atomových jader těžkých prvků, jsou podle jejich mínění pouze dočasné. [1]

Zatímco dnes se vyrábí energie v jaderných elektrárnách štěpením atomových jader, fúze je proces opačný – jádra se slučují. Takový proces probíhá například na Slunci. Na Zemi vzniká nyní taková energie pouze v pokusných reaktorech.

„Strčit Slunce do krabičky je fajn nápad, ale nevíme, jak udělat tu krabičku.“

Jiří Cerman [2]

## 1 HISTORIE

Teoreticky lze považovat za začátek rok 1905, kdy Albert Einstein publikoval svoji teorie relativity (speciální) a asi nejznámější rovnici  $E = m \cdot c^2$ . O 15 let později v roce 1920 Sir Arthur Stanley Eddington jako první navrhl, že hvězdy berou svoji energii slučováním lehkých prvků. V téhle době, však stále ještě neexistoval pojem plazma. Tento termín byl použit až v roce 1928 Irvingem Langmuirem a „plazmatem“ nazval kladný sloupec výboje v plynu (analogie oscilací nábojového oblaku a krevní plazmy s gelovou konsistencí). O rok později (1929) Robert d'Escourt Atkinson a Friedrich Georg Houtermans vyslovili hypotézu o slučování jader vodíku za vzniku helia jako zdroje energie hvězd. První fúzní reakce řízená člověkem byla uskutečněna E. Rutherfordem a jeho týmem v roce 1934 v Anglii. Jednalo se o fúzi jader deuteria na urychlovači. Během pár následujících let se objevovali první výzkumy na provedení termojaderných reaktorů. Také začíná a končí druhá světová válka, při které byla vyrobena atomová bomba. Po skončení války dochází ke zbrojení a zdokonalování atomových bomb a také k vývoji vodíkové bomby. V roce 1951 prezident Argentiny Juan Perón oznamuje světu zvládnutí termojaderné reakce. Později bylo prokázáno že šlo o podvod. V tomto roce vznikl návrh tokamaku od A. D. Sacharova a I. E. Tammena v bývalé SSSR. A v USA vznikl návrh na stelaátor od L. Spitzera. Následujícím roce 1952 byla otestována první vodíková bomba Spojenými státy americkými a to 1. listopadu na Marshallových ostrovech. O rok později 12. srpna také otestovala SSSR svoji vodíkovou bombu v Semipalatinsku (Kazachstán). Roku 1955 bylo definováno “kritérium pro nulový zisk, tzv. breakeven, termojaderného reaktoru (výkon pro dosažení a udržení teploty plazmatu)“. Toto kritérium je známo jako Lawsonovo kritérium. V tomto roce se také koná 1<sup>st</sup> International Conference on Peaceful Uses of Atomic Energy jejímž závěrem je, že by jaderná fúze měla být zvládnuta během následujících 25 let. Do roku 1958 USA a SSSR pracují na úkolu zvládnutí jaderné fúze samostatně a pod přísným utajením. V tomhle roce se koná 2<sup>nd</sup> International Conference on Peaceful Uses of Atomic Energy, kde dochází k odtajnění výzkumu na obou stranách a následně ke vzájemné spolupráci. Česká republika (bývalá ČSSR) se také zapojuje do výzkumu plazmatu a to rokem 1959, kdy vzniká Ústav vakuové elektroniky Československé akademie věd (ÚVE ČSAV). Dnešní název je Ústav fyziky plazmatu Akademie věd České republiky (ÚFP AV ČR). Postupně během následujících let dochází k nových objevům v chování plazmatu a ke zdokonalování prvních prototypů na spuštění jaderné syntézy v laboratorních podmínkách. V roce 1961 G. J. Linhart – zavádí pojem



inerciální udržení (palivo je zahřáto tak rychle, že dosáhne podmínek k zapálení fúze a začne hořet předtím, než se rozletí a setrvačnost paliva zabraňuje jeho okamžitému úniku). O dva roky později v roce 1963 N. G. Basov a O. N. Krochin navrhli použití laseru k zapálení řízené termionukleární reakce. V Novosibirsku se podařilo v r. 1968 dosáhnout 10 000 000°C. Bylo to zařízení tokamak T-3. Tato teplota byla posléze potvrzena Britskými fyziky. Tenhle úspěch na tokamaku znamenal přestavbu stávajících zařízení na tokamaky a následný výzkum byl zaměřen tímhle směrem. V roce 1973 se R. M. Nixom s L. I. Brežněvem domluvili o posílení spolupráce mezi oběma státy. V tomhle roce také dochází k první naftové krizi na Středním východě, což mělo za následek zvýšení dotací na výzkum. Začínají se stavět větší a výkonnější zařízení. V roce 1978 se podařilo na tokamaku PLT (Princeton Large Torus) v USA dosáhnout teploty 60 000 000°C. Taktéž SSSR dosahuje úspěchu, když spustí první tokamak se supravodivými magnetickými cívkami na tokamaku T-7. Roku 1983 je zahájen provoz na největším tokamaku JET (Join European Torus) na světě. Na tomhle zařízení se podařilo překročit 1MA elektrického proudu plazmatem. V roce 1987 v Ženevě se představitelé EU, SSSR, Japonska a USA se dohodli na spolupráci při návrhu fúzního reaktoru ITER (původně zkratka, dnes je to označení z latiny – cesta). V následujících letech se k projektu ITER přidávají další a další státy. Mezi první co se přidávají je Kanada. Další jsou pak Česká republika prostřednictvím SSSR (1988), která je zapojena do projektu dodnes. USA se z projektu později odstoupila, aby se pak znovu k projektu vrátila. Mezitím probíhající výzkum zaznamenává čím dál lepší výsledky ve výkonu reaktorů. V roce 1998 staví Japonsko největší a supravodivý stelleátor na světě. V roce 2004 dne 28.června je rozhodnuto o místě výstavby ITERu - Cadarache (Francie). V dnešní době nadále probíhá výzkum a vývoj jaderné fúze i přes to, že projekt ITER má menší zpoždění oproti plánovanému harmonogramu. [3, 4]

## 2 PLAZMA

Aby mohla proběhnout jaderná syntéza, musí být hmota ve stavu plazmy. Bez porozumění této problematiky nebudeme schopni jaderné syntézy.

Odhaduje se, že asi 99 % hmoty ve vesmíru je ve stavu plazmy. Pouze 1 % zbývá na další tři skupenství. Na Zemi plazma není běžná a můžeme se s ní setkat třeba ve formě plamene, blesku, ionizovaného plynu v zářivkách nebo reklamních výbojkách či polární záře. Nebo když opouštíme Zemi setkáme se s ní v magnetosféře v okolí Země.

Plazma se od ostatních skupenství odlišuje. V závislosti na teplotě se látka vyskytuje ve stavu pevném. Po dodání energie přechází do stavu kapalného a dále do stavu plynného. Přechod do stavu plazmatického je pozvolný. Teprve asi při teplotách  $10^5$  K jsou srážky plazmatu tak prudké, že se neutrální atomy plně ionizují. Plazma je tedy směs elektricky nabitých a neutrálních částic, které na sebe navzájem působí. Na Obr.1. je uvedené srovnání charakteristických vlastností jednotlivých skupenství. [5, 6, 7]

Skupenství	pevné	kapalné	plynné	plazma
Složení z částic	molekuly ionty	molekuly kladné a záporné ionty u elektrolytů	neutrální částice – atomy, – molekuly	elektrony, ionty, protony, neutrální částice
Teplota	nízká, nad 0 K do bodu tání	vyšší, nad bodem tání	vysoká $\sim 10^2$ K	velmi vysoká $\sim 10^3$ K
Uspořádání	v pravidelné mřížce u krystalů nepravidelné u amorfních látek	téměř neuspořádané	chaotický pohyb	
Vzdálenost atomů (molekul)	malá $\sim 0,1$ nm (tj. $10^{-10}$ m)		velká $\sim 10$ nm (tj. $10^{-8}$ m)	
Vzájemné působení atomů	trvalé, silné, ale jen mezi sousedními atomy		jen po krátkou dobu srážky	trvalé, silné na velkou vzdálenost
Střední rychlost atomů	$\sim 10^2$ m.s $^{-1}$		$\sim 10^3$ m.s $^{-1}$	$\sim 10^4$ m.s $^{-1}$
Vyzařování	velmi nepatrné			intenzivní
Elektrická vodivost	různá	malá	téměř nulová	velká

Obr.1. Význačné vlastnosti jednotlivých skupenství hmoty [5]

## 2.1 Druhy plazmatu

Plazmu můžeme rozdělit [5, 6, 7]:

- běžné plazma

Elektronové obaly atomů jsou částečně poškozené (vysokou teplotou nebo tlakem). Volné elektrony jsou zodpovědné za plazmatické vlastnosti látky.

- termonukleární plazma

Atomární obaly neexistují, látka je směsicí holých jader a volných elektronů. V tomto stavu je plazma v jádrech hvězd, kde probíhá termojaderná syntéza.

- nukleonové plazma

Vysokou teplotou nebo tlakem jsou rozrušena sama jádra atomů. Látka je směsicí elektronů, protonů a neutronů.

- kvark-gluonová plazma

Při vysokých energiích jsou roztaveny samotné nukleony na své konstituenty – kvarky a gluony.

## 2.2 Procesy v plazmatu

V následujících bodech jsou stručně sumarizovány procesy probíhající v plazmatu a základní vlastnosti charakterizující plazma. [5, 6, 7]

### a) Srážky a jejich dělení [5, 6, 7]

- pružné

Při těchto srážkách zůstává zachována kinetická energie. Součet kinetických energií částic před srážkou a po srážce je stejný. Částice si zachovávají stejnou vnitřní strukturu. Mění se směr a velikosti rychlosti. Příkladem mohou být srážky nabitých a neutrálních částic při jejich tepelném pohybu v plynu.

- nepružné

Při těchto srážkách zůstává zachována celková energie, ne však kinetická. Podle způsobu přeměny energie při srážce dělíme dále tyto srážky takto

- nepružné srážky prvního druhu (Obr.2.)

Při těchto srážkách se mění část kinetické energie před srážkou ve vnitřní energii částic po srážce.

- nepružné srážky druhého druhu (Obr.3.)

Zde se mění část vnitřní energie před srážkou v kinetickou energii částic po srážce

Druh děje	před srážkou	po srážce
zvýšení kinetické energie obou atomů		
zvýšení kinetické energie elektronu		
nabuzení atomu B		
ionizace atomu B		
změna naboje		



atom



nabuzený atom

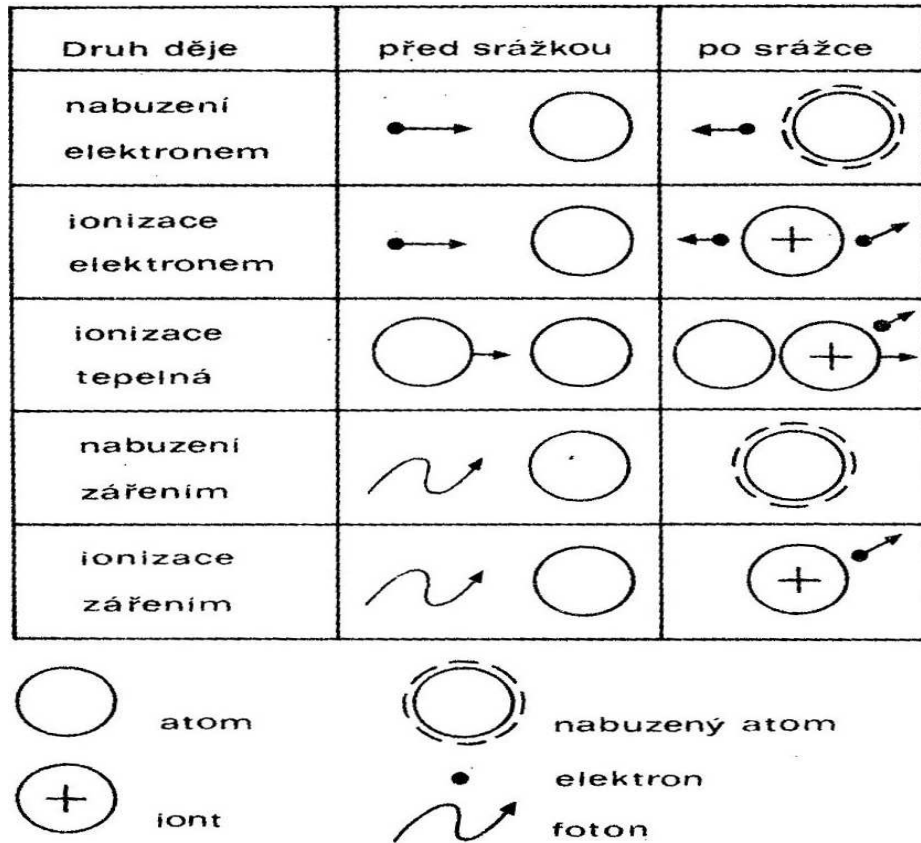


iont



elektron

Obr.2. Přehled nepružných srážek prvního druhu [5]



Obr.3. Přehled nepružných srážek druhého druhu [5]

**b) Ionizace [5, 6, 7]**

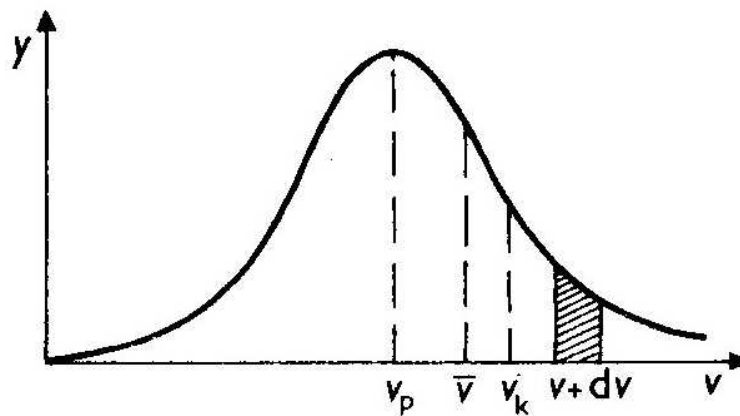
Pojmem ionizace označujeme děj, při kterém se vnějším zásahem odtrhne elektron z neutrálního atomu, nebo molekuly.

**c) Maxwellova rozdělení [5, 6, 7]**

Pro popis plazmy je zapotřebí znát, jakým způsobem jsou rozděleny rychlosti částic (rovnice 1), které tvoří plazmu, a to jak co do směru, tak co do velikosti. (Obr.4.)

$$dn(v) = 4\pi n \left( \frac{m}{2\pi kT} \right)^{-\frac{3}{2}} v^2 \exp \left( -\frac{mv^2}{2kT} \right) dv \quad /1/$$

kde  $n$  – celkový počet částic;  $k$  - Boltzmanova konstanta ( $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{JK}^{-1}$ );  $1/2mv^2$  – kinetická energie částic s rychlostí  $v$ ;



Obr.4. Průběh Maxwellovy rozdělovací funkce pro jednu teplotu [5], kde  $v_p$  – nejpravděpodobnější rychlost;  $\bar{v}$  – střední rychlost;  $v_k$  – střední kvadratická rychlost;  $dv$  – velmi malý přírůstek rychlosti  $v$

#### d) Teplota [5, 6, 7]

Teplota je v těsném vztahu se střední kinetickou energií částic s Maxwellovým rozdělením a je dána rovnicí 2:

$$E_k = \frac{3}{2} \cdot kT \quad /2/$$

kde  $T$  - termodynamická teplota;  $E_k$  - střední kinetická energie;  $k$  - Boltzmanova konstanta

Jednotky můžeme vyjadřovat v  $kT$  pro energii, tzv. elektronvoltech ( $1\text{eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ ). Na základě domluvy pak uvádíme, že energie  $1\text{eV}$  odpovídá teplotě  $11\,600\text{K}$ .

Z pohledu teploty může být plazma

- neizotermická

Elektrony a ionty mají odlišné zastoupení s rozdílnými teplotami  $T_e$  (teplota elektronů) a  $T_i$  (teplota iontů).

- izotermická

Termodynamickou rovnováhu můžeme charakterizovat teplotou jednoho druhu částic.

**e) Kvazineutralita plazmatu [5, 6, 7]**

Plazma, kde v dostatečně velkém objemu nebo v dostatečně časovém intervalu je přibližně stejný počet kladně a záporně nabitých částic. Pak mohou být zavedeny pojmy popisující plazmu a její existenci:

- Debyeova stínící vzdálenost  $b$   
musí platit  $b < L$ ;  $L$  – rozměr systému (oblasti vyplněné plazmatem)
- počet částic v Debyeově sféře  $N_D$  kdy  $N_D \gg 1$
- plazmová frekvence  $\omega$  pro kterou platí  $\omega t > 1$

**f) Záření plazmatu [5, 6, 7]**

Úplně ionizované vodíkové plazma obsahuje jen protony a elektrony. Žádná z těchto částic nemá spektrální čáry jako atom. Elektrony a protony ve volně ionizovaném vodíkovém plazmatu vyzařují proto jen elektromagnetické vlny šumového charakteru, vyvolané tím, že při srážkách elektronu s elektronem nebo iontem dojde prudké změně směru jeho pohybu. Plazma tohoto typu vysílá záření v širokém oboru vlnových délek, které sahají až do ultrafialové a rentgenové oblasti, je-li teplota dostatečně vysoká.

Není-li plazma plně ionizovaná, vyzařuje i čárové spektrum. Každý atom i iont má své charakteristické spektrum, které má vždy spektrální čáry i ve viditelné oblasti. Podle charakteristických čar těchto spekter je možno určit atom nebo iont, který se v plazmatu vyskytuje, a srovnáním intenzity spektrálních čar lze určit i teplotu plazmatu.

Touto problematikou se zabývá optická emisní spektroskopie (OES), která se využívá ke zkoumání elementárních a chemických procesů v plazmatu.

**2.3 Některé typy plazmatu a jejich využití****Plazma elektrických výbojů [5, 6, 7]**

Vlastnosti elektrických výbojů určují různé parametry, které jsou na sobě vzájemně závislé. Změna jednoho ovlivňuje tak ostatní. Jsou to napětí na elektrodách, proud tekoucí výbojovou dráhou, chemické složení plazmatu, elementární procesy probíhající ve výbojové dráze, tvar a materiál elektrod.

Výboje tvoří nabitě částice, a tím elektrický proud, který je a nebo není vázán na vnější ionizační činidlo. Výboje pak můžeme dělit na nesamostatné (výboj přestane, když přerušíme působení ionizačního činidla; užití je v ionizačních komorách a počítačích částic) a samostatné (výboj může vzniknout a udržet se i v případě, kdy nepůsobí ionizační činidlo; výboje jsou temný výboj, koróna, doutnavý výboj, obloukový výboj, jiskrový výboj).

Přechod nesamostatného na samostatný výboj je možný. Přechod závisí na změně elektrického proudu výboje a napětí mezi elektrodami.

### **Plasmatický laser [5, 6, 7]**

Laser je optický generátor světla, v kterém vzniká novým způsobem světelné záření. Lasery můžeme rozdělit podle aktivního prostředí a to na plynové, v pevné fázi a polovodičové. Plynové pak dále můžeme rozdělit na atomární (př. He-Ne laser, jodový laser), iontové (př. argonový laser), a molekulové (př. vodíkový laser, CO<sub>2</sub> laser).

*Vlastnosti laseru:*

- monochromaticnost, frekvence vysílaného záření je velmi blízká jediné frekvenci
- koherence
- vysoká směrovost ( malá rozbíhavost ) paprsku
- vysoká intenzita záření
- polarizace, světlo je lineárně polarizované

Využití laseru je velmi široké, např. holografie, chirurgie, výpočetní technika, obrábění materiálů, spektroskopie, měření vzdáleností, aj. V jaderné syntéze je využíván k zapalování plazmatu; dřív se používal CO<sub>2</sub> laser s vlnovou délkou 10,6 μm, dnes se používá neodymový laser (pevná fáze) s vlnovou délkou 1,054 (blízké infračervené oblasti).



**Plazmochemie** [5, 6, 7]

Je to věda, která se zabývá chemickými látkovými přeměnami v plazmatu včetně reaktivních procesů na hraničních plochách s jinými materiály. Plazmochemii můžeme rozdělit na:

*- Izotermická plazmochemie*

Reakce probíhají v elektrickém oblouku nebo v plazmatronu (klasický nebo vysokofrekvenční). Teplota se pohybuje  $10^3$  až  $10^4\text{K}$ , entalpie  $10^6 \text{ J.kg}^{-1}$  až  $10^8 \text{ J.kg}^{-1}$  a okolo normálního tlaku ( $10^5 \text{ Pa}$ ). Tímto způsobem mohou vznikat produkty s novými vlastnostmi a velmi čisté sloučeniny.

*- Neizotermická plazmochemie*

Jde o reakce probíhající mimo termodynamickou rovnováhu. Plazma je málo ionizována. Má vysokou teplotu elektronů  $T_e \geq 10^4\text{K}$  a relativně nízkou teplotu neutrálního plynu  $10^3\text{K} \geq T_g$ . Pro neizotermické děje v molekulárních plynech je charakteristické:  $T_e \geq T_v \geq T_r \geq T_g$ , kde  $T_g$  – teplota neutrálního plynu;  $T_r$  – rotační teplota ( molekul );  $T_v$  – vibrační teplota ( molekul );  $T_e$  – teplota elektronů. Tlak je  $10^{-2}$  až  $10^3\text{Pa}$ . Používá se na změny povrchových vlastností přírodních i syntetických polymerních materiálů.

**Některé typy plazmatu vytvořené v laboratorních podmínkách** [5, 6, 7]:

- laserové plazma – doba života:  $10^{-12} \div 10^{-9} \text{ s}$
- pulsní plasma – doba života:  $10^{-9} \div 10^{-6} \text{ s}$
- tokamak – doba života: 1 s
- studené plazma – doba života: hodiny, dny, roky

### 3 JADERNÁ SYNTÉZA

Roku 1939 dokázal Hand Bethe (později odměněn cenou Alfréda Nobela), že hvězdy se během svého života „krmí“ energií, kterou získají syntézou malých vodíkových jader na jádra většího helia [2]. Slunce se tak stává nejen zdrojem světla, tepla, ale i taky zdrojem inspirace pro jadernou syntézu. To co samovolně probíhá na Slunci se člověk snaží napodobit v pozemských podmínkách.

#### 3.1 Slunce

Slunce – hvězda, která se zformovala asi před 4,6 miliardy let zároveň s naší sluneční soustavou. Slunce tvoří většinu (99 %) hmoty v naší soustavě. Poloha je v 1/3 průměru disku naší Galaxie cca. 30 000 světelných let od jejího středu. V tabulce I jsou uvedeny základní parametry Slunce. [8], [9]

Tab.I. Některé fyzikální vlastnosti Slunce [8]

Hmotnost	[kg]	$1,989 * 10^{30}$
Průměr	[km]	1 400 000
Teplota povrchu	[K]	5 770
Teplota jádra	[K]	15 600 000
Hustota povrchu	[kg/m <sup>3</sup> ]	$2,07 * 10^{-4}$
Hustota jádra	[kg/m <sup>3</sup> ]	150 000
Celková svítivost	[erg / s <sup>-1</sup> ]	$3,846 * 10^{33}$
Celkový výkon	[W]	$3,846 * 10^{26}$

Zdrojem energie Slunce je jaderná syntéza prvků ( vysoké teploty a tlaky ) za vzniku těžších prvků a uvolňování energie. Na Slunci mohou probíhat různé typy reakcí. Pro termojadernou fúzi realizovanou na zemi jsou nejdůležitější tyto reakce:

- 1) proton – protonový cyklus PP I
- 2) proton – protonový cyklus PP II

### PP – cyklus I

Probíhá při teplotách okolo  $10^7$  °K a hustotě  $100 \text{ g.cm}^{-3}$ .

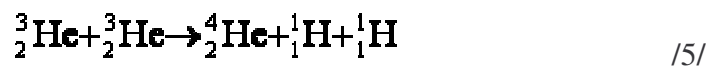
a) První reakcí proton – protonového cyklu je vznik deuteronu kombinací dvou protonů za emise pozitronu a neutrina ( rovnice 3 ).



b) Deuteron se spojí s protonem a vzniká jádro  ${}^3_2\text{He}$  a foton (gama záření) ( rovnice 4 ).



c) Posledním krokem je reakce dvou jader  ${}^3_2\text{He}$ , které vytvářejí  ${}^4_2\text{He}$  a dva protony ( rovnice 5 ).



Reakce může probíhat dál až po vznik beryllia a jeho rozpadu na dvě jádra helia. Tento cyklus je převažující reakcí na naší hvězdě.

### PP – cyklus II

Totožný s PP – cyklem I, rozdíl nastává až v posledním kroku, který se může lišit. Jde o produkt beryllia a jeho přeměnu na bor. Ten se zase zpátky přemění na beryllium a to se rozpadá na dvě jádra helia.

Na Slunci probíhá také ještě další typ jaderné syntézy. A to tzv. CNO – cyklus. Avšak snahou vědců celého světa a hlavním cílem projektu ITER je napodobit v pozemských podmínkách právě PP-cyklus. a je to také hlavním cílem projektu ITER.

V pozemských podmínkách nemůže samovolně proběhnout slučování jader. Jediný možný způsob je, že se na tom bude podílet člověk. Pokud se tak stane, půjde buď o řízenou reakci nebo neřízenou. Je smutnou skutečností, že první uskutečnění této reakce ( neřízené ) došlo pro vojenské účely. Toto byli první praktické pokusy a poznatky, které posloužili jako základ pro pokus o řízenou reakci slučování jader izotopu vodíku.

### **3.2 Vodíková bomba**

Vodíková bomba (VB) je silnější než atomová bomba (AB). Stejně jako je Oppenheimer považován za otce AB je za otce VB považován Edward Teller, který pracoval na projektu Mahattan. Již v té době prosazoval aby místo AB bylo úsilí věnováno VB. První VB je vyzkoušena na Marshallových ostrovech 1.listopadu 1952. SSSR vyzkouší svoji první VB 12. srpna 1953. Byly vyvinuty čtyři základní typy bomb. [10, 11]

#### **Vodíková bomba**

Je to atomová bomba, jejíž pouzdro tvoří těžké izotopy vodíku - deuterium a tritium. Atomový výbuch vytvoří počáteční teplotu několika milionů °C, která rozběhne jadernou fúzi.

#### **Kobaltová bomba**

Jedná se také o vodíkovou bomba, v jejímž obalu je nejen deuterium a tritium, ale i kobalt, který se působením neutronů změní na izotop s poločasem rozpadu 5,24 roku a dlouhodobě zamoří půdu.

### Neutronová bomba

Vodíková bomba, u které je však omezen její destruktivní účinek a naopak posíleno vyzařování různých druhů záření a zejména proudu neutronů (který poškodí obaly buněk, zasažená osoba bez možnosti léčení do dnů, týdnů, měsíců nebo i let umírá).

### Třístupňová bomba

Je to v podstatě vodíková puma, avšak se třetím stupněm, tvořeným pláštěm z  $^{238}\text{U}$ . Rychlé neutrony vzniklé z jaderné fúze štěpí  $^{238}\text{U}$  a tím je zvýšena účinnost.

## 3.3 Řízená jaderná syntéza v pozemních podmínkách

V pozemských podmínkách máme dva základní způsoby jak dosáhnout jaderné syntézy. První případ je magnetické udržení. To znamená, že pro fungování mu stačí nízké hustoty částic ( $n \sim 10^{20}\text{m}^{-3}$ ), ale velká doba udržení ( $t_E \sim 1\text{s}$ ). Mezi zástupce této koncepce patří tokamaky, stellarátory, theta a Z-pinče, kompresní linery, zrcadlové nádoby, torzatrony. Z toho tokamak a stellarátor patří mezi nejvýznamnější. Druhý způsob je inerciální udržení. To znamená, že pro fungování mu stačí nízká doba udržení ( $t_E \sim 10^{-11}\text{s}$ ), ale velká hustota částic ( $n \sim 10^{31}\text{m}^{-3}$ ). [14, 15]

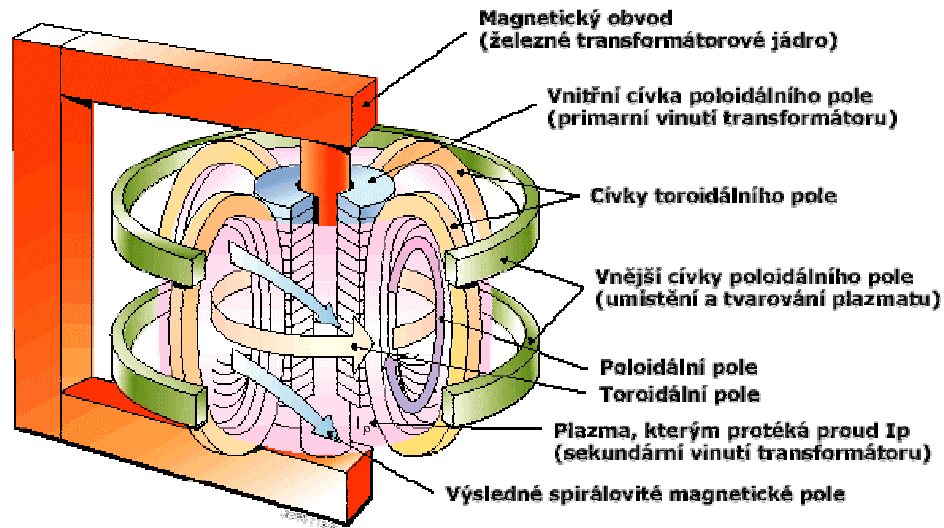
### 3.3.1 Magnetické udržení

Magnetické udržení spočívá v takové konfiguraci magnetického pole, aby většina nabitých částic sledovala vhodně zakřivené magnetické siločáry, a tak nepřicházela do styku se stěnami komory, v níž se plazma vytváří. [12]

#### Tokamak

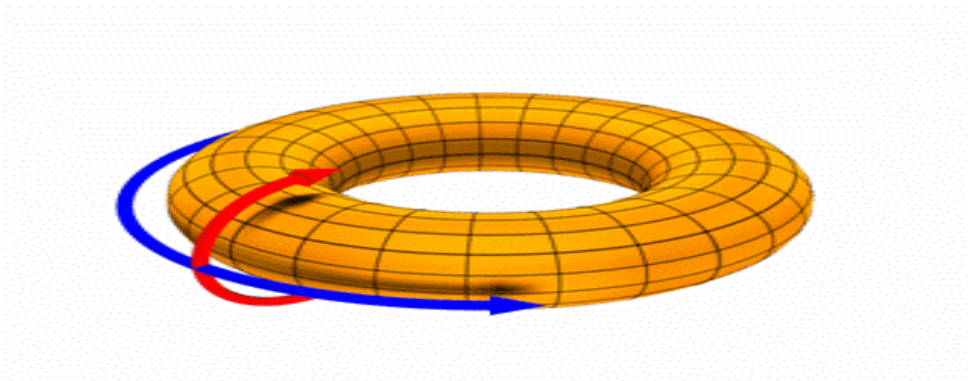
V roce 1951 v bývalém SSSR A. D. Sacharov a I. E. Tamm navrhli tokamak. Tokamak je zkratka v ruštině a znamená **TO**roidalnaja **KA**mera i **MA**gnitnyje **K**atuški – toroidální komora a magnetické cívky.

Tokamak si můžeme představit jako dutou prstencovou komoru (nafouknutou automobilovou pneumatiku) naplněnou horkým vodíkovým plynem, která je obklopena magnetickými cívkami a transformátorovým jádrem (viz. Obr.5.). [3]



Obr.5. Zjednodušené schéma tokamaku [12]

Jedná se v podstatě o obrovský transformátor, jehož sekundární cívka mající pouze jeden závit má tvar toroidní trubice. Toroid je charakterizován dvěma poloměry. První, kterému se říká hlavní, udává velikost kružnice vedoucí osou prstence a druhý, označovaný jako vedlejší, udává poloměr tohoto prstence (viz. Obr.6.).



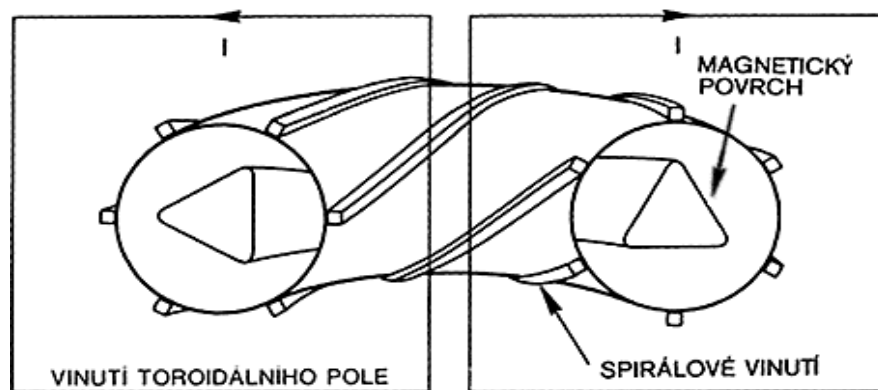
Obr.6. Vyznačení směrů běžně užívané v fyzice termojaderné fúze. Toroidní je vyznačen modrou šipkou a poloidní červenou [16]

Toroidní pole ( hlavní poloměr ) je primární proces, který udržuje nabitě částice uvnitř prstence. Poloidní pole ( vedlejší poloměr ) drží plazmu v dostatečné vzdálenosti od stěn, formuje jeho tvar a pomáhá udržet jeho stabilitu. Díky tomu, se sníží teplota působící na stěnu komory. Předpokládá se, že teplota stěn bude okolo 1000 až 1300°C. Tato teplota je již technologicky zvládnutelná. Uvnitř toroidální trubice je plazma a jinak vakuum. Plyn se ionizuje a indukovaný proud jej zahřívá na velmi vysokou teplotu ( přibližně na 100 milionů °C ). Magnetické pole drží plazmu uvnitř nádoby. Koncepce tokamaku se využívá u mezinárodního projektu ITER. [3, 12, 13, 14, 15, 16]

### Stelalátor

Je od svého vzniku konstrukční ideou vůči Tokamaku. Stelalátor byl navržen v roce 1951 L. Spitzerem ( Princeton University, Princeton, USA ).

Výhodou stellarátorů je možnost odděleného vyšetřování stability magnetického pole a ohřevu plazmy. Nevýhodou zůstává značná složitost konstrukce a nesymetričnost vůči hlavní ose, čímž vznikají nadbytečné elektrické pole způsobující další nestability. Stelalátor představuje uzavřenou magnetickou konfiguraci. [3]



Obr.7. Schéma stellarátoru [17]

V dnešní době je největší stelalátor v Japonsku. Je to LHD ( Large Helical Device ) v Tokiu. Dnes se staví ještě větší v Německu a to Stelalátor Wendelstein W7-X ( Ústav fyziky plazmatu Maxe Plancka, Greifswald ). [14, 15, 16, 17]

### 3.3.2 Inerciální udržení

Inerciální udržení je proces, kdy horké plazma, není drženo žádným vnějším silovým polem a reakce musí proběhnout včetně ohřevu dříve, než se objem plazmatu vlastním tlakem rozletí do prostoru. Jedná se vlastně o malý výbuch vodíkové bomby. Používá se drobná tableta zmraženého vodíku, která je spuštěna do komory, kde se zahřeje. Z Lawsonova kritéria plyne, že musíme plazmu stlačit na hustotu  $200 \text{ g.cm}^{-3}$ . Toho se docílí pomocí laseru. Energie může být dodána do terče buď přímo z vnějšího impulsního zdroje energie (přímo hnaná fúze), nebo jako energie měkkého rentgenového záření, na kterou je energie vnějšího zdroje přeměněna v materiálu o vysokém atomovém čísle (nepřímo hnaná fúze). Jak přímo hnaná, tak i nepřímo hnaná fúze má své výhody a nevýhody. Nepřímo hnaná fúze má svoje uplatnění i pro vojenské účely. [3, 15, 16]



## 4 ITER

Je to mezinárodní projekt, který začal vznikat ještě za studené války na podnět M. Gorbačova. Byla to reakce na druhou ropnou krizi, která vznikla v roce 1980 jako následek revoluce v Iránu. ITER byla původně zkratka pro International Thermonuclear Experimental Reactor (Mezinárodní termonukleární experimentální reaktor). ITER je taky slovo v latině a znamená cesta. [3, 4]

### 4.1 Historie projektu ITER v datech [3, 4]

- 1985 - Ženeva - SSSR a USA společně rozhodli prověřit fúzní energii
- 1987 - v Ženevě se představitelé EU, SSSR, Japonska, USA dohodli na spolupráci při návrhu fúzního reaktoru
- 1988 - Kanada se připojila k projektu jako člen „evropského týmu“
- 1988 - Mezinárodní agentura pro atomovou energii ( IAEA ) ve Vídni přebírá patronát nad spoluprací SSSR, Japonska, USA a Evropské unie ( Kanady )
- 1988 - Conceptual Design Activities ( CDA ) – zahájení projekčních prací
- 1988 - Ústav fyziky plazmatu AV ČR se zapojuje do projektu prostřednictvím SSSR
- 1990 - Ústav fyziky plazmatu AV ČR se zapojuje do projektu v rámci EURATOM
- 1992 - Engineering Design Activities ( EDA ) – podepsaná čtyřstranná dohoda o vypracování projektu ( Rusko, USA, EU, Japonsko ) s cílem prokázat fyzikální a technickou dostupnost průmyslového termojaderného reaktoru
- 1998 - Final Design Report – závěrečná zpráva: 6mld. US \$, 1500MW fúzního výkonu,  $Q = \infty$ . USA odstupují od účasti na projektu ITER
- 1999 - Kanada – první zájemce o místo pro stavbu
- 2001 - Final Design Report No 2: redukovaný projekt ITER s polovičními náklady ( mld. US dolarů, 500 až 700 MW fúzního výkonu,  $Q > 10$  )
- 2002 - Cadarache ( Francie ), Vandellós ( Španělsko ), Clarington ( Kanada ), Rokkasho ( Japonsko ) – vybrány čtyři místa pro stavbu reaktoru

- Rokkasho-mura ( Japonsko ) – místa, která splnila technické zadání pro stavbu ITER
- 2002 - vývoj speciální Halovy sondy v Ústavu fyziky plazmatu AV ČR
- 2002 - studie materiálu první stěny v ÚFP AV ČR, ÚJF AV ČR a v ÚJV Řež, a.s.
- 2003 - Čína a USA ( únor ) – připojení k projektu
- 2003 - Korea ( červen ) – připojení k projektu
- 2003 - Evropa ( 26.listopad ) – ze dvou evropských kandidátů na místo pro ITER byla vybrána francouzská Cadarache
- 2004 - rozhodnuto dne 28.června o místě výstavby - Cadarache ( Francie )
- 2005 - 6. prosince – Indie se připojila k projektu
- 2006 - 21. listopadu – vznik mezinárodní organizace pro realizaci projektu
- 2007 - 24. října – založena organizace ITER
- 2008 - 16. ledna – podepsána dohoda o partnerství s Monackým knížectvím
- 2008 - 12. března – podepsána dohoda o spolupráci s organizací CERN
- 2014 - ITER – předpokládané první fyzikální experimenty
- 2014 - DEMO ( demonstrační reaktor ) – předpokládané zahájení práce na projektu
- 2024 - ITER - předpokládané zahájení technologických experimentů
- 2024 - DEMO - předpokládané zahájení výstavby
- 2034 - ITER - předpokládaná demontáž
- 2046 - DEMO - předpokládaná demontáž



Obr.8. Umístění ITERu ve Francii [4]

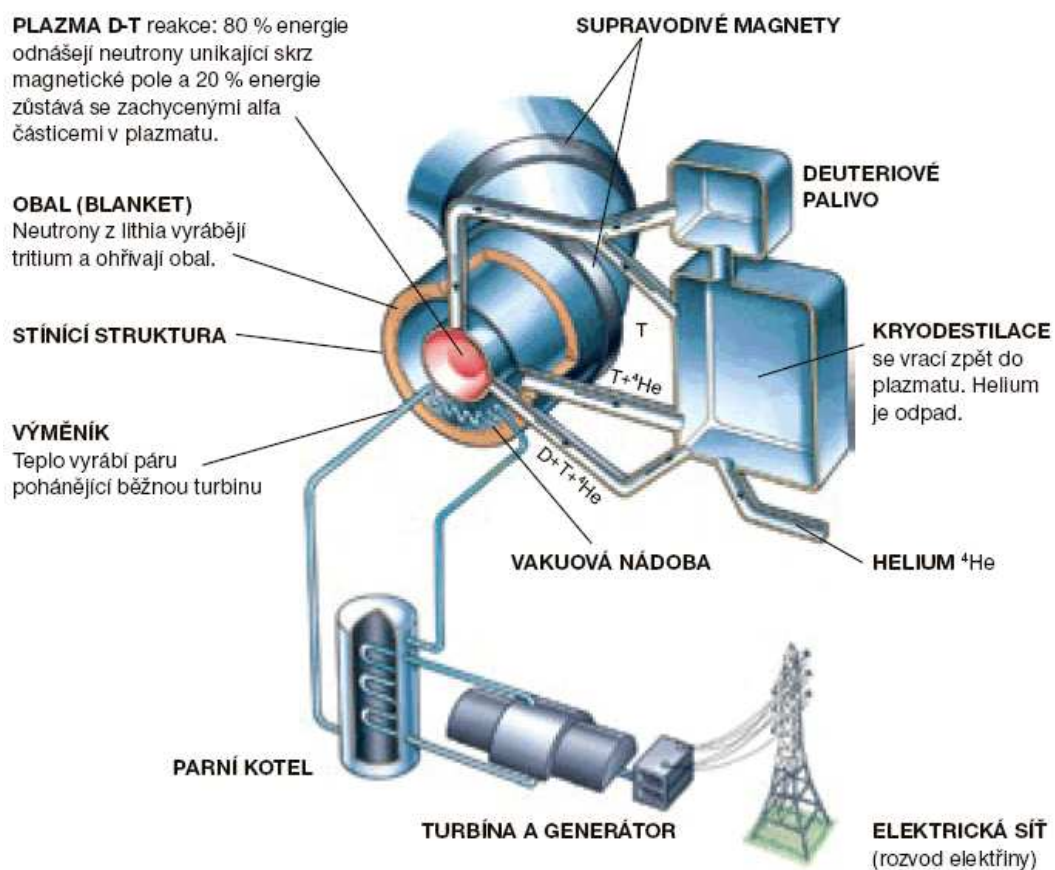
## 4.2 Cíle ITERu

Původní projekt počítal s tím, že by svými rozměry už kopíroval skutečnou elektrárnu. Poté co odstoupilo USA, vznikl nový návrh s menším rozpočtem. To vedlo ke zmenšení ITERu. Rozměry oproti JET ( Joint European Torus – společný evropský torus ) jsou jenom 2x větší. Původně měli být 3x větší. Poté co se USA vrátilo a přidali se další státy se rozpočet opět zvýšil. Ale i přesto zůstalo u druhého návrhu. Namísto toho budou podporovány doprovodné programy.

### Projekt má tři hlavní cíle:

- 1) produkovat více energie než se spotřebuje
- 2) zavést a vyzkoušet klíčové technologie potřebné pro budoucí elektrárny
- 3) získávání tritia z lithia, které bude v plášti ( tzv. blanketu ) reagovat s neutrony

Během projektu bude ještě spuštěn projekt DEMO. A to bude poslední stupeň před skutečnou termonukleární elektrárnou. DEMO by mělo vyrábět už elektrickou energii. Návrh termonukleární elektrárny je zobrazen na Obr.9. [3, 4]



Obr.9. Termonukleární elektrárna [14]

## 5 PALIVO

Hlavním zdrojem paliva pro projekt ITER a následně fúzních elektráren bude vodík a jeho izotopy. Dalším důležitým materiálem bude lithium. Lithium bude sloužit jako obal, který bude zadržovat neutrony. Srážka neutronů s lithiem pak bude generovat tritium, které se bude vracet zpátky jako palivo pro jadernou syntézu.

Dalším významným zdrojem materiálu bude regolit. Ale je to otázka vzdálené budoucnosti. Protože na využití tohoto materiálu budeme muset dokázat mnohem víc zvýšit teplotu a tlak než při reakci vodíku s vodíkem.

### 5.1 Vodík

Je to nejrozšířenější prvek ve vesmíru. Na Zemi je to třetí nejrozšířenější prvek a je součástí nejvíce sloučenin. Jeho chemie pokrývá prakticky celou periodickou tabulku prvků. Může tvořit víc jak 40 různých forem. Má dva izotopy. V přírodě se vyskytuje jako  $^1\text{H}$ . Jako  $^2\text{H}$  (deuterium) se vyskytuje jen 0,0156 %. Jako  $^3\text{H}$  (tritium) se prakticky nevyskytuje. A to z toho důvodu že  $^3\text{H}$  je radioaktivní s relativně krátkou dobou rozpadu. (Tab.II)

Tab.II. Atomové a fyzikální vlastnosti vodíku, deuteria a tritia [18]

Vlastnosti	vodík	deuterium	tritium
Relativní atomová hmotnost*	1,007825	2,014102	3,016049
Radioaktivní stabilita*	stabilní	stabilní	$\beta^-$ $\tau_{1/2} = 12,35$ let
Teplota tání [ K ]	13,957	18,73	20,62
Teplota varu [ K ]	20,39	23,67	25,04
Teplota tání [ kJ.mol <sup>-1</sup> ]	0,117	0,197	0,250
Výparné teplo [kJ.mol <sup>-1</sup> ]	0,904	1,226	1,393
Kritická teplota [ K ]	33,19	38,35	40,6 ( vypočteno )
Kritický tlak [ MPa ]	1,315	1,665	1,834 ( vypočteno )
Mezijaderná vzdálenost [ pm ]	74,14	74,14	( 74,14 )

Pozn. \* - atomé vlastnosti

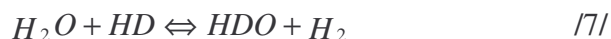
### Výroba deuteria

Získává se z těžké vody D<sub>2</sub>O elektrolytickým obohacováním normální vody. Obohacování se vyjadřuje separačním faktorem mezi plynnou a kapalnou fází

( rovnice 6 ):

$$s = \left( \frac{H}{D} \right)_g \div \left( \frac{H}{D} \right)_l \quad /6/$$

Rovnovážná konstanta výměnné reakce ( rovnice 7 ):

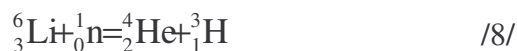


Hodnota *s* má za normální teploty hodnotu 3. Hodnota *s* se dá upravit vhodnou volbou elektrod. Nejúčinnější je zlatá. Nebo velký počet cel v kaskádě, spalováním vyvinuté směsi H<sub>2</sub>/D<sub>2</sub> a doplňováním elektrolytu v prvních celách kaskády. Takto lze získat až 99 % deuterium.

Obsah D<sub>2</sub> v plynném vodíku lze zjistit hmotnostní spektrometrií, nebo pomocí tepelné vodivosti s plynovou chromatografií. V kapalném stavu se může použít měření hustoty, změnou indexu lomu nebo infračervenou spektroskopií.

## Výroba tritia

Tritium získáme pomocí obohaceného  ${}^6\text{Li}$  neutrony v jaderném reaktoru ( rovnice 8 ):



Li vstupuje do této reakce ve formě slitiny s hořčíkem nebo hliníkem, která v sobě zadrží značná množství tritia, které se z této slitiny uvolňuje působením kyseliny. Tritium lze vyrobit bombardováním LiF neutrony při 450°C ve vakuu. Ze vzniklých plynných produktů se získá difúzí palladiovou přepážkou. [18] Tritium lze skladovat ve formě  $\text{UT}_3$  (reakce tritia s práškovým uranem). Tritium pak z této sloučeniny získáme zahřátím nad 400°C.

Výroba tritia se bude provádět přímo v komplexu fúzní elektrárny.

## 5.2 Lithium

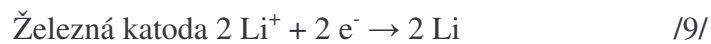
Název pochází z řeckého slova litos = kámen. Byl objeven v roce 1817 J.A Arfvedsonem. Nejdůležitější minerál lithia je spodumen  $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$  . (Tab.III.)

Tab.III. Atomové a fyzikální vlastnosti lithia [18]

Vlastnost	Li
Atomové číslo	3
Počet přírodních izotopů	2
Atomová hmotnost	6,941 (± 3 )
Poloměr kovu [ pm ]	152
Teplota tání [ °C ]	180,5
Teplota varu [ °C ]	1347
Hustota ( 20°C ) [ g.cm <sup>-3</sup> ]	0,534

## Výroba

Pro výrobu se používá spodument. K čištění spodumentu se používá flotace. Vyčištěný spodument se zahřívá na teplotu 1 100°C, čímž docílíme změny modifikace  $\alpha$  na  $\beta$  (méně hustotou a drolivější). Promyjeme kyselinou (  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ) při teplotě 250°C. Výluh (  $\text{Li}_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  ) pak reaguje s  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  a  $\text{HCl}$  . Vzniká  $\text{LiCl}$  a  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ .  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  se převede na  $\text{LiCl}$ .  $\text{LiCl}$  převedeme do taveniny ( 55%  $\text{LiCl}$  a 45%  $\text{KCl}$  ) a při teplotě 450°C se provádí elektrolýza (rovnice 9,10 ). A tím získáme kovové lithium.



## 5.3 Regolit

Vrstva (prachu, úlomků hornin, meteoritů a meteoritického prachu) pokrývající celý povrch Měsíce, měsíců jiných planet a planetek. Regolit mohl vzniknout jen na tělesech bez ochranné atmosféry. Na vytváření vrstvy regolitu se zúčastňují dopadající meteoridy různé velikosti, které vrstvu převracejí a promíchávají s materiálem vyvrženým z impaktních kráterů. [19]

Složení regolitu závisí na místě, v závislosti na horninách, z nichž byl impaktem vytvořen. Lehké prvky (vodík, helium, uhlík a dusík) pocházejí především ze slunečního větru. Jejich množství v regollitu na určitém místě je tím větší, čím déle byl vystaven slunečnímu větru. Regolit na světlých oblastech (pevninách) je bohatý na vápník a hliník. V tmavých mořích (mare) je více titanu, železa a hořčíku. Na mladších mořích je vrstva regolitu kolem 2 m, zatímco staré světlé vysočiny mohou být pokryty vrstvou až 20 m. [19]

Proč regolit? Regolit obsahuje  $^3\text{He}$ , který může sloužit jako palivo pro jadernou syntézu. Jeho reakce s deuterium nám dá víc energie, než reakce deuteria s tritiem (rovnice 11).



Získávání regolitu je však prozatím ve stádiu výzkumu.



## 6 VLIV FÚZNÍ ELEKTRÁRNY NA ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ

Každá velká či malá stavba má vliv na své okolí. V případě úspěchu projektu ITER a v případě jejich uskutečnění lze očekávat následující dopady na životní prostředí:

### Ovzduší

Jediným produktem je helium, což znamená, že při fúzní reakci nevznikají žádné sloučeniny síry, dusíku, uhlíku, halogenů a jejich sloučenin. Radioaktivní látky, těžké kovy, prachy a aerosoly se mohou dostávat do ovzduší při těžbě, ale ne při samotné reakci v reaktoru.

### Voda

Nejsou očekávány negativní vlivy na vodu. Elektrárna nepracuje a ani nevytváří produkty, které by mohly kontaminovat vodní zdroje.

### Půda

Ke znehodnocení půdy může dojít pouze ve dvou případech. První je samostatná zástavba fúzní elektrárny a přilehlých zařízení pro její provoz. K druhému znehodnocení půdy nedochází přímo v areálu či přilehlých místech. Jedná se o těžbu spodumentu (a také dalších materiálů potřebných pro stavbu a provoz), který je základní složkou při získávání lithia (lithium je součástí pláště, který reaguje s neutrony za vzniku tritia. Tritium je jedna ze složek paliva pro jadernou fúzi).

### Radioaktivita

Při pochodu v reaktoru jako konečný produkt vzniká helium. Helium je inertní neradioaktivní plyn. I přesto, vzniká materiál, který bude vykazovat radioaktivitu. Jedná se o zařízení elektrárny. Takto ozářené konstrukční materiály by se uskladňovali pouze na několik desítek let (oproti vyhořelému palivu jaderných elektráren, které se musí uskladnit až na několik tisíc let).

### Havárie

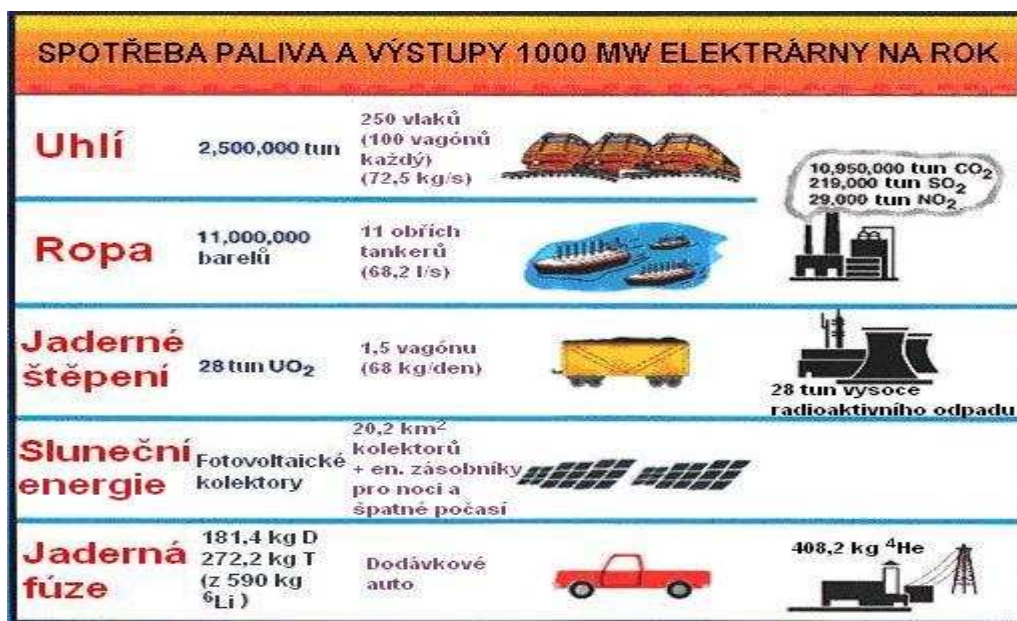
V případě fúzního reaktoru nic takového nehrozí. Je to dáno hlavně tím, že jak v případě tokamaků i jiného typu magnetického udržování termojaderné reakce tak i v případě inerciálního udržení je v reaktoru vždy jen velmi malé množství paliva. Každá

porucha navíc vede ke ztrátě schopnosti uskutečňovat fúzní reakce. Jediný problém, který vznikne při havárii je, že nedojde k výrobě elektrické energie.

Fúzní elektrárna má oproti ostatním zdrojům jednu velkou výhodu. Pokud srovnáme výkonnostně stejné elektrárny, tak zjistíme, že potřebují mnohem méně paliva a taky mnohem méně produkuje odpadu viz. Obr.10.

S ohledem na extrémní teploty v reaktoru mohou mít fúzní elektrárny také velký vliv na rozvoj vodíkového hospodářství. Při vysokých teplotách se voda bude štěpit na vodík a kyslík. Stejně tak se dá vysoká teplota využít (pokud se bude elektrárna nacházet v blízkosti měst) k ohřátí vody až na páru a parovody pak ohřívat domácnosti.

Účinnost využití paliva při jaderné fúzi je 10 000 000× větší než u všech chemických reakcí včetně hoření. Porovnáním vychází, že při elektrickém výkonu 1 GW by bylo zapotřebí ročně spálit 2,5 miliónu tun uhlí, nebo použít plochu 20 km<sup>2</sup> solárních panelů či 2000 stometrových sloupů větrných elektráren a nebo... pouze 500 kg vodíku pro fúzní elektrárnu. [3]



Obr.10. Spotřeba paliva a výstupy 1000MW elektrárny na rok [15]

## 7 PRO A PROTI – NÁZORY VĚDECKÉ I LAICKÉ VEŘEJNOSTI

V článku Lesk a bída termojaderné fúze se snaží dr. Jan Mlynář<sup>1</sup> zodpovědět otázku perspektivisty termojaderné fúze [20]: Potřebujeme termojaderný reaktor již teď?

Bezpochyby ano, alespoň podle názoru těch, kteří se jaderné syntéze nejvíce věnují. Nejčastější argument pro stavbu reaktoru zní zhruba takto: Zásoby fosilních paliv se nakonec vyčerpají. Ještě podstatně dříve se může stát, že se nade vši pochybnost prokáže neúnosný vliv exhalací na globální klima. Dříve nebo později budeme tedy nový energetický zdroj potřebovat. Pokud nedojde k zásadní, kvalitativní změně v našich schopnostech získávání a uchovávání energie z obnovitelných zdrojů, zůstává jediným dlouhodobě zajistitelným zdrojem dostatečného množství energie právě energie jaderná. Jaderná syntéza přitom má oproti jadernému štěpení řadu principiálních výhod. Musíme ji proto zvládnout co nejdříve.[20]

Tento argument bohužel ztrácí hodně na své síle úměrně tomu, jak dlouho je opakován. Odpověď těch, kteří rozhodují o rozdělení rozpočtových prostředků, proto zní: stačí, když se znalosti o jaderné syntéze uchovají pro případ energetické krize, soustředit se dnes musíme na naléhavější problémy. Nemá smysl stavět prototyp reaktoru, který si energetické společnosti stejně objednávat nebudou [20].

Je s podivem, jak často se v těchto diskusích ztrácí naprosto zásadní argument pro co nejrychlejší výstavbu ITER: první reaktor, který ovládne jadernou syntézu, bude obrovským zdrojem poznání. Díky extrémním podmínkám v energeticky soběstačném plazmatu získáme nejen hluboké znalosti o chování hmoty při velmi vysokých teplotách, ale také řadu nových, jinak nedosažitelných prostředků pro základní i aplikovaný výzkum. ITER by umožnil mimo jiné měření účinných průřezů (tj. pravděpodobností chemických a jaderných reakcí), testování nových měřicích metod a řadu materiálových zkoušek. Bylo by též možné prověřit, do jaké míry se budou termojaderné reaktory hodit k transmutaci radioaktivních odpadů z reaktorů štěpných či k likvidaci vysoce toxických odpadů. Proto by i jediný termojaderný reaktor znamenal neocenitelný přínos pro fyziku a techniku již dnes.[20]

---

<sup>1</sup> dr. Jan Mlynář v současné době pracuje na společném evropském tokamaku JET v anglickém Culhamu, kam ho vyslal Ústav fyziky plazmatu AV ČR v rámci své asociační smlouvy s EURATOM.

Zatím jsme jen neméně zábavnými následníky těch, kteří filozofovali o perspektivách a stinných stránkách letectví, aniž se pokusili postavit jediné letadlo. V dnešních menších experimentech se snažíme vytvářet příslušné extrémní podmínky tak, že energii do plazmatu složitě (a ne vždy úspěšně) dodáváme zvenku. Modely extrapolující dnešní experimentální data na parametry reaktoru ovšem nemohou poskytnout dokonalou představu o chování reaktoru, protože tyto modely řídí nelineární rovnice. Při provozu prvního termojaderného reaktoru se proto budou nejspíš střídat okamžiky zklamání s chvílemi nečekaných nadějí. Není vyloučeno, že bude objevena cesta pro stavbu menších reaktorů.[20]

Naproti výše uvedené citaci z článku [20] můžeme nalézt i názory zcela opačného charakteru. Např. v článku Co nebylo řečeno o termojaderné fúzi Michala Rumana je konstatováno následující [21]:

„Termojaderná fúze je extrémním vyústěním současného fosilně-atomárního energetického systému. Její zastánci vidí jediný problém naší civilizace ve výrobě energie. Mávajíc pozlátkem pseudoekologického řešení se sobecky chtějí stát, alespoň na pár sekund, Bohem, který dal vzniknout Slunci. Odmítají vidět rizika, která takové hrátky s ohněm přináší, zvláště v čase extrémních klimatických jevů. Odmítají fakt, že nejlevnějším, nejbezpečnějším, nejstabilnějším a nejprínosnějším zdrojem energie je zdroj místní, zajišťující lidem soběstačnost. Nechápu, že pro zachování lidské kultury na planetě Zemi je třeba udělat mnohem víc než zažehnout tisíce malých sluncí. Je třeba se naučit dělit – o zdroje, o prostor, o svobodu, o nabyté znalosti a dovednosti. Toto dělení nemusí být bolestné, může být radostné. Záleží jen na nás, jak se s těmito kvalitami naučíme hospodařit. Nekompromisní podpora výzkumu, vývoje a široké aplikace obnovitelných zdrojů by nám v tom měla pomoci. Naší prioritou č. 1 musí být kvalita života“.[21]

Z výše uvedených prací tak vyplývá, že termojaderná fúze má jako každý velký projekt své zastánce, ale taky své odpůrce. Níže jsou uvedeny nejčastější argumenty jednotlivých skupin. [3, 22, 23]

## **Odpůrci**

- reaktor nedodá žádnou energii
- rozpočet je odhadován na 10 miliard Euro
- představuje obrovské technické problémy
- vznik velmi intenzivní neutronové záření, které může být zneužito pro vedlejší výrobu štěpných materiálů na jaderné zbraně
- reakce bude produkovat velká množství radioaktivního izotopu vodíku – tritia
- 50 až 100 tisíc tun radioaktivního odpadu
- nepomůže se vypořádat s klimatickými změnami, protože by byla k dispozici příliš pozdě
- Greenpeace upozorňuje, že za deset miliard Euro by bylo možné postavit například 10 000 MW větrných elektráren umístěných na moři (ročně vyrobí 35 TWh elektřiny - spotřebu pro osm milionů evropských domácností)

## **Zastánci**

- žádné plynné znečištění
- nevzniká radioaktivní odpad
- malé množství paliva a velké množství energie
- studium a vývoj projektu ITER přinese sebou nové objevy
- vodíkové hospodářství
- omezení závislost na dodávkách ropy a plynu

Závěr krátké diskuse asi nejlépe vystihuje citát Dr. Jérôme Paméla, EFDA Leader „Nebudu předstírat, že by fúze mohla pomoci teď. V nejlepším případě to bude v druhé polovině tohoto století. Ale nemůžeme si dovolit na tom nepracovat.“

## ZÁVĚR

S rostoucím počtem lidí na Zemi roste i poptávka po základních potřebách pro život. Stejně jako voda a jídlo, je nezbytnou součástí lidského moderního života v současnosti také elektrická energie.

Současné zdroje elektrické energie nemusí pokrýt v budoucnu potřebu lidské společnosti. Velká část zdrojů je neobnovitelná ( ropa, uhlí a zemní plyn ). Zbývající zdroje s velkou pravděpodobností nebudou schopny nadále pokrýt poptávku. Jaderná elektrárna má nevýhodu v produkci radioaktivního odpadu, který vzniká při štěpení uranu.

Alternativní zdroje energie ( větrné, vodní, sluneční, geotermální, biomasa, nebereme v potaz jaderné elektrárny ) jsou zdrojem energie pro lokální oblasti. Nelze je uplatnit pro libovolné oblasti obydlené lidmi. Musíme je upravit pro konkrétní místo, nebo je nemůžeme použít vůbec

( např. v oblasti pouště neuplatníme vodní elektrárnu ). Nevýhodou alternativních zdrojů je také malá účinnost v získání energie a velká plocha zástavby. Což je problém v hustě obydlených oblastech.

Jaderná syntéza je možnou odpovědí na nedostatky současných elektráren. A to jak ve smyslu “nevyčerpatelnosti zdrojů“, v univerzálnosti použití kdekoliv na světě, schopnosti zásobovat elektrickou energií hustě obydlené oblasti, tak i v neprodukcí nebezpečných odpadů. Na druhou stranu by bylo příliš naivní se domnívat, že výstavbou těchto elektráren zmizí naše problémy jako “máchnutí kouzelnou hůlkou“.

Samotná technologie jaderné syntézy není doposud zcela zvládnutá. S výstavbou se počítá v druhé polovině tohoto století. Někteří odborníci v této oblasti to dokonce odhadují až na příští století. Také se spoléhat jenom na jeden zdroj energii není rozumné. Především je zapotřebí kombinovat zdroje pro lepší efektivitu. Ale ani samotné zvyšování produkce elektrické energie není samo o sobě řešením. Je zapotřebí se také naučit šetřit.

Jaderná syntéza není všelék a ani řešení pro dnešek. Ale nemůžeme ignorovat budoucnost jenom proto, že ještě nenastala.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Vladimír Weinzettl: Čistá energie tokamaků, Vesmír 77, 207, 1998/4: [online] [cit. 2009-11-05]. Dostupné z www: < <http://www.vesmir.cz/clanek/cista-energie-tokamaku>>
- [2] Jiří Cerman: Termojaderná fúze – energetická spása, nebo armageddon? [online] [cit. 2009-11-05]. Dostupné z www: <[http://www.nazeleno.cz/chap\\_85/lang\\_1/termojaderna-fuze-energeticka-spasa-nebo-armageddon.aspx](http://www.nazeleno.cz/chap_85/lang_1/termojaderna-fuze-energeticka-spasa-nebo-armageddon.aspx)>
- [3] Milan Řípa, Vladimír Weinzettl, Jan Mlynář, František Žáček : Řízená termojaderná syntéza, Praha 2005, ISBN 80-902724-7-9 [online] [cit. 2009-03-05]. Dostupné z www: <<http://www.cez.cz/cs/vzdelavani/pro-profesionaly/odborne-publikace/7.html>>
- [4] ITER: Úvodní stránka [online] [cit. 2009-11-05]. Dostupné z www: < <http://www.iter.org/default.aspx> >
- [5] Stach, V.: Plazma – čtvrté skupenství hmoty. Praha, Státní pedagogické nakladatelství 1989
- [6] Krejčí. V.: Plazma, čtvrté skupenství hmoty. Praha, Orbis 1974
- [7] Aldebaran: Plazmový vesmír [online] [cit. 2009-03-05]. Dostupné z www: <<http://aldebaran.cz/astrofyzika/plazma/basics.html>>
- [8] Aldebaran: Slunce [online] [cit. 2009-03-05]. Dostupné z www: <<http://aldebaran.cz/astrofyzika/sunsystem/slunce.html>>
- [9] Astronomia: Astronomický server fakulty pedagogické ZČU v Plzni: Slunce [online][cit. 2009-03-05]. Dostupné z www: <<http://hvezdy.astro.cz/slunce/>>
- [10] Wikipedia – Otevřená encyklopedie: Jaderná zbraň [online] [cit. 2009-03-05]. Dostupné z www: <[http://cs.wikipedia.org/wiki/Jadern%C3%A1\\_zbra%C5%88](http://cs.wikipedia.org/wiki/Jadern%C3%A1_zbra%C5%88)>
- [11] PHP Web: Výroba atomové bomby [online] [cit. 2009-03-05]. Dostupné z www: <<http://phpweb.unas.cz/download/zaj/atom.php>>
- [12] Aldebaran: ITER – TOKAMAK nové generace[online] [cit. 2009-17-05].



- Dostupné z www: <[http://www.aldebaran.cz/bulletin/2003\\_39\\_itr.html](http://www.aldebaran.cz/bulletin/2003_39_itr.html)>
- [13] IPP: Oddělení tokamaku [online] [cit. 2009-17-05]. Dostupné z www: <<http://www.ipp.cas.cz/Tokamak/cz>>
- [14] Jiří Polanský: ENDO-Energie pro 21. století [online] [cit. 2009-11-05]. Dostupné z www: <<http://home.zcu.cz/~polansky/prednaska.pdf>>
- [15] Vladimír Weinzettl: Termonukleární fúze v tokamacích [online] [cit. 2009-11-05]. Dostupné z www: <<http://vega.fjfi.cvut.cz/docs/sfbe/tokamak/index.html>>
- [16] Vladimír Wagner: Kdy se bude jaderná fúze využívat pro výrobu energie? [online] [cit. 2009-11-05]. Dostupné z www: <<http://hp.ujf.cas.cz/~wagner/popclan/transmutace/fuze.htm>>
- [17] UK.MFF: Plazma [online] [cit. 2009-11-05]. Dostupné z www: <<http://atrey.karlin.mff.cuni.cz/~marble/d/?p=7>>
- [18] Greenwood N. N., Earnshaw A. : Chemie prvků. 1. díl. Informatorium, Praha 1993, ISBN 80-85427-38-9
- [19] Klezcek, J.: Velká encyklopedie vesmíru. 1.vydání.Academia, Praha 2002. str. 412, ISBN 80-200-0906-X
- [20] Jan Mlynář: Lesk a bída termojaderné fúze, 77, 212, 1998/4 [online] [cit. 2009-11-05]. Dostupné z www: <<http://www.vesmir.cz/clanek/lesk-a-bida-termojaderne-syntezy>>
- [21] Michal Ruman: Co nebylo řečeno o termojaderné fúzi Britské listy 2005, ISSN 1213-1792 [online] [cit. 2009-11-05]. Dostupné z www: <<http://www.blisty.cz/art/25083.html>>
- [22] WISE: Jaderná fúze nám nepomůže [online] [cit. 2009-11-05]. Dostupné z www: <<http://www.e-infoservis.cz/index.php?p=clanek&id=192>>
- [23] WISE: Růžové brýle versus realita [online] [cit. 2009-11-05]. Dostupné z www: <<http://www.wisebrno.cz/index.php?p=clanek&id=75>>



**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

E	Energie
m	Relativistická hmotnost tělesa
$c^2$	Rychlost světla ve vakuu
tokamak	Toroidní komora v magnetických cívkách
PLT	Princeton Large Torus
JET	Join European Torus
ITER	Název mezinárodního projektu; z latiny – cesta
n	Celkový počet částic
k	Boltzmanova konstanta
$1/2mv^2$	Kinetická energie částic s rychlostí v
$v_p$	Nejpravděpodobnější rychlost
$\bar{v}$	Střední rychlost
$v_k$	Střední kvadratická rychlost
dv	Velmi malý přírůstek rychlosti
T	Termodynamická teplota
$E_k$	Střední kinetická energie
b	Debyeova stínící vzdálenost
L	Rozměr systému ( oblasti vyplněné plazmatem )
$N_D$	Počet částic v Debyeově sféře
$\omega$	Plazmová frekvence
OES	Optická emisní spektroskopie
$T_g$	Teplota neutrálního plynu
$T_r$	Rotační teplota ( molekul )
$T_v$	Vibrační teplota ( molekul )

---

$T_e$	Teplota elektronů
$T_i$	Teplota iontů
PP-cyklus	Proton protonový cyklus
CNO-cyklus	Uhlík-dusík-kyslík cyklus
$e^+$	Pozitron
$\nu$	Neutrino
$\gamma$	Gama záření
VB	Vodíková bomba
AB	Atomová bomba
$n$	hustota částic
$t_E$	doba v excitovaném stavu
LHD	Large Helical Device
IAEA	Mezinárodní agentura pro atomovou energii
CDA	Conceptual Design Activities
AV ČR	Akademie věd České republiky
EURATOM	Evropské společenství pro atomovou energii
EDA	Engineering Design Activities
ÚFP AV ČR	Ústav fyziky plazmatu Akademie věd České republiky
ÚJF AV ČR	Ústav jaderné fyziky Akademie věd České republiky
ÚJV	Ústav jaderného výzkumu
CERN	Evropská organizace pro jaderný výzkum
DEMO	Demonstrační reaktor
$s$	Separční faktor
H	Vodík
D	Deuterium

T Tritium

p proton

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obr.1.	Význačné vlastnosti jednotlivých skupenství hmoty [5] .....	10
Obr.2.	Přehled nepružných srážek prvního druhu [5] .....	12
Obr.3.	Přehled nepružných srážek druhého druhu [5] .....	13
Obr.4.	Průběh Maxwellovy rozdělovací funkce pro jednu teplotu [5] .....	14
Obr.5.	Zjednodušené schéma tokamaku [12] .....	22
Obr.6.	Vyznačení směrů běžně užívané v fyzice termojaderné fúze. Toroidní je vyznačen modrou šipkou a poloidní červenou [16] .....	22
Obr.7.	Schéma stellarátoru [17] .....	23
Obr.8.	Umístění ITERu ve Francii [4] .....	27
Obr.9.	Termonukleární elektrárna [14] .....	28
Obr.10.	Spotřeba paliva a výstupy 1000MW elektrárny na rok [15] .....	34

**SEZNAM TABULEK**

Tab.I.	Některé fyzikální vlastnosti Slunce [8] .....	18
Tab.II.	Atomové a fyzikální vlastnosti vodíku, deuteria a tritia [18] .....	29
Tab.III.	Atomové a fyzikální vlastnosti lithia [18] .....	31

## EVIDENČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>Sigla</b> (místo uložení bakalářské práce)	Ústřední knihovna UTB
<b>Název bakalářské práce</b>	Řízená termojaderná syntéza – energie budoucnosti?
<b>Autor bakalářské práce</b>	Jiří Orsava
<b>Vedoucí bakalářské práce</b>	Ing. Markéta Julinová, Ph.D.
<b>Vysoká škola</b>	Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
<b>Adresa vysoké školy</b>	nám. T. G. Masaryka 275
<b>Fakulta</b> (adresa, pokud je jiná než adresa VŠ)	Fakulta technologická
<b>Katedra</b> (adresa, pokud je jiná než adresa VŠ)	Ústav inženýrství ochrany životního prostředí
<b>Rok obhájení DP</b>	2009
<b>Počet stran</b>	46
<b>Počet svazků</b>	1
<b>Vybavení (obrázky, tabulky...)</b>	Obrázky 10, tabulky 3
<b>Klíčová slova</b>	plazma, Slunce, vodíková bomba, magnetické udržení, inerciální udržení, ITER, vodík, lithium, regolit