

Obecné připomínky:

- Pokuste se na závěr jednotlivých oddílů uvádět vždy téma následujícího oddílu.
- Udělejte si pro pořádek seznam použitých symbolů a uveďte ho na konci práce. Dávejte pozor, ať pro stejné veličiny nepoužíváte různé symboly ..
- Projedte si to spellcheckem
- Projděte si <http://golem.fjfi.cvut.cz/wiki/HowTo/bpdp>
- STRIKTNĚ uvádět zdroje (odkud to berete). Kritický nedostatek této práce v tomto stavu.
- Já myslím, že bude velmi bolestivé to psát všechno svými slovy a svou strategií - měl byste (striktně to doporučuji) si najít nějakou/nějaké vhodnou inspiraci a nechat se jí vést.

Obsah

Úvod	2
1 Princíp termonukleárnej fúzie	4
1.1 Fúzne reakcie vo hviezdach	5
1.2 Lawsonovo kritérium	5
2 Princíp tokamaku	8
2.1 Ionizácia a ohrev plazmy <i>#To je asi predionizace, ne?#</i>	8
2.2 Čerpanie energie <i>#Opravdu tady? Není to někam do úvodu? Musí to tu být (takže podrobně)?#</i>	9
2.3 Základné parametry plazmy <i>#plazmatu bych asi věnoval samostatnou kapitolu, kde budou zmíněné věci, které budete v dalším potřebovat pro vysvětlování vašich záležitostí: Debayova délka, možná pohyb častic v E a B poli#</i>	10
2.4 Energetická rovnováha plazmy - ohmický príkon P_{OH} , energia plazmy W_p a doba udržania τ_E <i>#Potřebujete to někde?#</i>	10
3 Sondové merania vo vysokoteplotnej plazme	12
3.1 Sondové merania	12
3.2 Plávajúci potenciál	12
3.3 Iónový nasýtený prúd	12
3.4 Langmuirova sonda <i>#Němělo by tohle být o dvě patra výše?#</i>	12
3.4.1 Langmuirova sonda na tokamaku Golem	13
4 Machova sonda a meranie toku plazmy	14

Úvod

Ľudstvo potrebuje nové zdroje energie. Dopyt po energii neustále stúpa. Zdroje energie využívané v dnešnej dobe majú rôzne nedostatky. Sú bud' vyčerpateľné, znečisťujúce životné prostredie, nebezpečné z hľadiska možnej havárie, alebo jednoducho neschopné získavania dostatočného množstva energie. Preto musíme nájsť nový zdroj energie. **#Možná bych zmínil i šetrení energií?#** Taký, ktorý by neškodil životnému prostrediu, nebol by nebezpečný, bol by prakticky nevyčerpateľný a hľavne, aby bol schopný ľudstvo zásobiť dostatkom energie v blízkej a vzdialenej budúcnosti. Jedna z ciest získavania energie, ktorá splňa tieto prepoklady je termojadrová fúzia. Proces, ktorým získavajú energiu všetky hviezdy vo vesmíre. Jadro hviezdy je pre ňho dokonalým prostredím vďaka extrémnym teplotám a tlaku spôsobenom gravitáciou. Napodobíť tieto podmienky na zemi je však zložitejšie. Prvý krát sa ľudstvu podarilo termojadrovú fúznu reakciu uskutočniť výbuchom vodíkovej bomby v 50. rokoch **#Jste si jist? Nikdo neudělal nějaký laboratorní experiment?#**. Avšak dosiahnuť stabilnú riadenú reakciu v reaktore je oveľa väčšia technologická výzva. Ponúkajú sa nám **+dva+** rôzne spôsoby dosiahnutia jadrovej fúznej reakcie na zemi. **Jedným/*První*** z nich je inerciálna fúzia spočívajúca v stlačení **+a zahŕatiť+** paliva laserovými lúčmi, ktoré ho zahrejú a vytvoria podmienky vhodné pre reakciu. **Iné spôsoby/*Druhý*** využívajú magnetické udržanie plazmy v stellerátoroch a tokamakoch. **Stellerátori využívajú pomerne komplikovanú geometriu pre udržanie plazmy. Tokamak je komora s toroidným tvarom.** Stal sa dominantom fúzneho výskumu, aj napriek tomu, že má oproti iným spôsobom svoje nedostatky. Hlavná výhoda tokamaku je potenciálne vysoká doba udržania, ktorá je pre kontinuálnu výrobu energie dôležitá. Od spustenia prvej komerčne využiteľnej fúznej jadrovej elektrárne nás nepochybne delí dlhá doba. V ceste stojí mnoho nevyriešených problémov. V najbližších rokoch je však dôležité ukázať, že sme schopní udržať ziskovú termojadrovú reakciu. To znamená, že energetický výkon musí prevyšiť dodaný príkon. Táto snaha viedla k stavbe najväčšieho termojadrového fúzneho reaktoru ITER, ktorý by mal byť dokončený v roku 2020. Podľa **predpokladov/*zámérů*** by mal byť výkon desaťnásobne vyšší, než príkon. Budú sa na ňom testovať rôzne pomocné systémy ako chladenie, materiály, diagnostika a podobne. Na základe výsledkov tohto projektu bude isto závisieť budúcnosť výzkumu termojadrovej fúzie.

Komentář: Na tomto miestě zmapujete svou práci. Něco jako *Nejdříve si řekneme ..., v další kapitole .. a nakonec*

Kapitola 1

Princíp termonukleárnej fúzie

Komentář: Mám problém se strukturou této kapitoly. Nebylo by možné se inspirovat u něčeho zavedeného? Např. Chena?

Komentář: Tady by měl být název kapitoly, ne?

Jadrová fúzia je opačný proces k štiepeniu atómov, ktoré sa využíva v reaktoroch dnešných jadrových elektrární. Z praktického hľadiska sa fúzna reakcia definuje ako: jadrová reakcia medzi ľahkými atómovými jadrami, pri ktorej sa uvoľňuje energia **#Odkud to pochází? Udejte referenci#.** **#Podľa tejto definície sa k reakciám jadrovej fúzie radia aj reakcie, pri ktorých atomové číslo nerastie.** Naopak, môže aj klesať. To nastane v prípade, keď sa uplnatný efekt uzavretia slupky a energia je uvoľnená, pretože reakcia vedie na tesnejšiu väzbu častíc atómového jadra. Proč to tu uvádite?**#** Štepením jadier ľažkých prvkov a zlučovaním jadier ľahkých prvkov je možné uvoľniť rozdiel väzbovej energie:

$$\Delta mc^2 = (Zm_p + (A - Z)m_n - m)c^2, \quad (1.1)$$

#Kde jste to vzal, není to divné?#

kde Z je protónové číslo, A je nukleónové číslo, m_p a m_n je hmotnosť protónu, resp. neutrónu v klúdovom stave, m je celková hmotnosť častíc po zlúčení **#Kde je štěpení?#** a Δm je tzv. hmotnostný schodok. Väzbová energia pripadajúca na jednotlivé prvky v závislosti na atómovej hmotnosti je vynesená v grafe. 1. Z grafu je vidieť, že minimálnu **#Neprotirečíte si s grafem??#** väzbovú energiu má železo, ktoré je najstabilnejším prvkom. Tento fakt je spôsobený tým, že nukleóny sú v železe viazané najstabilnejšie. Prvky s nižším protónovým číslom než železo, je výhodné zlučovať. Naopak prvky, ktoré majú vyššie protónové číslo, je energeticky výhodné štiepiť. U ľažkých jadier energia väzby na nukleón klesá kvôli zápornému príspevku d'alekodosahovej odpudivej elektrickej interakcie medzi protónmi. Odpudivá elektrická sila postupne prevládne aj nad o mnoho silnejšou, ale krátkodosahovou silnou interakciou medzi nukleónmy. Jadro s veľkým počtom protónov sú preto menej stabilné. Dôsledkom toho v ľažkých jadrach prevládajú neutróny. Maximálna možná uvoľnená energia pri fúznej reakcii je asi tri krát vyššia, ako energia uvoľnená pri štiepení ľažkých prvkov **#není to na nukleon??#**. Jedna zo základných reakcií je reakcia dvoch izotopov vodíku, deutéria a trícia. Uvoľnená energia z jednej reakcie je 17.59 MeV. Okrem pomerne veľkého energetického výťažku je reakcia deutéria a trícia v porovnaní s ostatnými reakciami vysoko pravdepodobná **#dospecifikovat#**. Vďaka týmto vlastnostiam sa s ňou počítava v projekte ITER a v budúcich **!fúznych!** reaktoroch v najbližších storočiach **#Není to příliš ovážný odhad?#.** **#je to PelMel, chtělo by to nějak uhladit, neskákat od jednoho k druhému, možná lépe strukturovat: jaderné reakce - termojaderné fúze - ..#**

$$D + T \longrightarrow 4He(3.5\text{MeV}) + n(14.1\text{MeV}) \quad (1.2)$$

#Takhle se chemické/jaderné reakce nesázejí, podívejte se do pravidel ...#

Deutérium je ľahko dostupný prvek, ktorý je možné vyrábať z vody. Tríčium je rádioaktívny prvek s malým/*krátkým?* polčasom rozpada, ktorý sa bežne v prírode vyskytuje len v malých množstvách **#kde??#**. Tento problém by sa dal vyriešiť výrobou priamo v reaktore z lítia štiepnou reakciou.

$$6Li + n \longrightarrow 4He + T \quad (1.3)$$



Lítium by bolo obsiahnuté v stenách $\#\#\#$ nádoby. Reakciu je tak $\#\#\#$ možné katalyzovať pomocou neutrónov, ktoré s dostatočne veľkou energiou dopadajú na stenu. Známe zdroje lítia by zabezpečili chod reaktorov na minimálne tisíc rokov.

Jadrá jednotlivých elementov sa odpudzujú coulombovskou silou. Pre splnenie je ich nutné priblížiť na vzdialenosť, pod ktorou začne pôsobiť silná interakcia. Z pohľadu klasickej fyziky by k fíznej reakcii nikdy nemalo prísť, častice by sa mali od seba coulombovsky odrážať. Klúčovú úlohu hrá kvantové tunelovanie, jav popísaný pomocou kvantovej mechaniky. V kvantovej mechanike sú častice popísané pomocou vlnovej funkcie. Prechodom cez coulombovskú bariéru nedochádza k odrazu vlnovej funkcie, ale k jej exponenciálnemu útlmu za hranicou potenciálu. Existuje teda nenulová pravdepodobnosť, že častica bariéru prekoná, aj napriek tomu, že nemá dostatočne vysokú energiu na jej prekonanie. **#Tenhle odstavec patrí logicky asi jinde, ne?#**

1.1 Fúzne reakcie vo hviezdach

Komentář: Bude doplneno, že?

1.2 Lawsonovo kritérium

Základná požiadavka na reaktory budúcnosti je získanie väčšieho množstva energie, ako bolo použitej na ohriatie a udržanie plazmy. Pre dosiahnutie tohto stavu je nutné splniť Lawsonovo **!ktiérium!**:

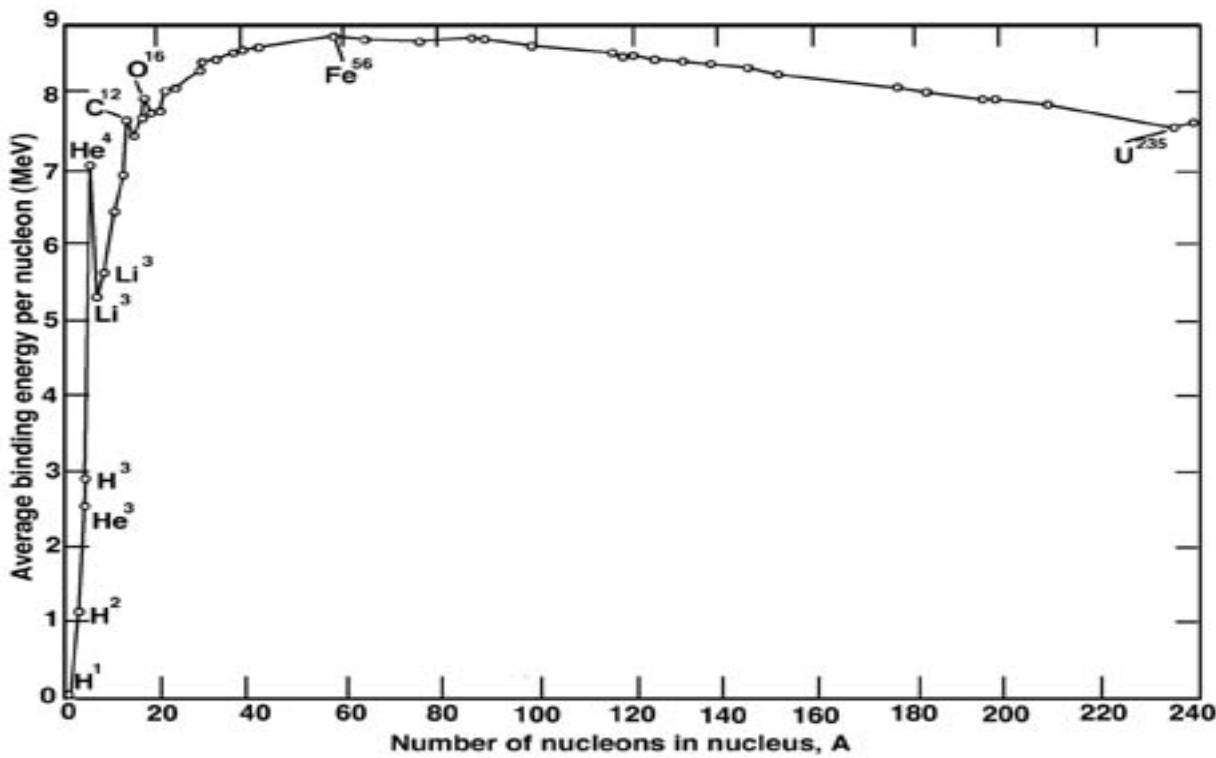
$$n\tau_E > f(T), \quad (1.5)$$

kde kde n je hustota látky/*plazmatu*, τ_E je doba udržania energie a $f(T)$ je nejaká funkcia teploty. Doba udržania je konštanta, ktorá je rovná času, za ktorý tepelná energia látky klesne na $1/e$ oproti pôvodnej hodnote. Pre reakciu D-T v rozmedzí teplôt približne od 10^8 K po 2.10^8 K je možné vzťah napísať ako:

$$nT\tau_E > c_k. \quad (1.6)$$

nT má až na konštantu rozmer tlaku. Zo vzťahu 1.6 teda plynie, že pre ziskovú reakciu je látku nutné udržať pri dostatočne veľkom tlaku nT po dobu τ_E **#Hodily by se nějaké konkrétní hodnoty - příklady#**.

Komentář: Odkud jste to čerpal? Tady by bylo vhodné zmíniť prístupy - minimálne magnetické a setrvačné udržení



Obr. 1.1: Závislosť väzbovej energie [MeV] na nukleón na počte nukleónov v jadre [A] #ZDROJ!# Ten obrázek je tu len tak? Odkazujete sa na něj v textu? Je někde vysvetlen?

reakcia	+uvolněná+ energia [MeV]
základné fúzne reakcie	
$D + T \rightarrow \alpha + n$	17.59
$D + D \rightarrow T + p$	4.04
$D + D \rightarrow {}^3He + n$	3.27
$D + D \rightarrow \alpha + \gamma$	23.85
$T + T \rightarrow \alpha + 2n$	11.33
pokročilé fúzne reakcie	
$D + {}^3He \rightarrow \alpha + p$	18.35
$p + {}^6Li \rightarrow \alpha + {}^3He$	4.02
$p + {}^7Li \rightarrow 2\alpha$	17.35
$p + {}^{11}B \rightarrow 3\alpha$	8.68
p-p cyklus	
$p + p \rightarrow D + e^+ + \nu$	1.44
$D + p \rightarrow {}^3He + \gamma$	5.49
${}^3He + {}^3He \rightarrow \alpha + 2p$	12.86
CNO cyklus	
$p + {}^{12}C \rightarrow {}^{13}N + \gamma$	1.94
${}^{13}N \rightarrow {}^{13}C + e^+ + \nu + \gamma$	2.22
$p + {}^{13}C \rightarrow {}^{14}N + \gamma$	7.55
$p + {}^{14}C \rightarrow {}^{15}N + \gamma$	7.29
${}^{15}O \rightarrow {}^{15}N + e^+ + \nu + \gamma$	2.76
$p + {}^{15}N \rightarrow {}^{12}C + \alpha$	4.97
fúzia uhlíku	
${}^{12}C + {}^{12}C \rightarrow {}^{23}Na + p$	2.24
${}^{12}C + {}^{12}C \rightarrow {}^{20}Na + \alpha$	4.62
${}^{12}C + {}^{12}C \rightarrow {}^{24}Mg + \gamma$	13.93

#Tady by měla být identifikace tabulky a její popis (+ zdroj), nemělo by být vše oindexované, něco jako 2_1D ? Má to být vysázeno jako matematika? Ta tabulka je tu jen tak? Odkazujete se na ni v textu? Je někde vysvětlená?#

Komentář: To asi není ještě vše, ne? Inspirujte se u někoho zavedeného (Chen?). Je to celé nevyvážené, něco rozebíráte do neskutečných podrobností (tabulka) a něco úplně chybí (třeba energetická bilance, pojem zápalná teplota ..)

Kapitola 2

Princíp tokamaku

+Název podkapitoly?+

Tokamak je ruská skratka výrazu: toroidná komora $\psi^* s^*$ magnetických cievkach. #Co je hlavním úkolem? Odkažte se na obrázek, začnite komorou, zmiňte pracovní plyn#. Na udržanie plazmy využíva fakt, že nabité častice sa v magnetickom poli pohybujú po jeho siločiarach #to prece není pravda#. Magnetické pole v komore je výsledkom superpozície magnetického poľa v toroidálnom a poloidálnom smere. Cievky obklopujúce komoru vytvárajú toroidálne pole o sile rádovo jednotiek tesla. Toroidálne pole udržuje plazmu v požadovanej polohe #Není pravda - to jsou poloidální cívky!# a tým zamedzuje jej kontakt so stenou tokamaku. V strede toroidu #jakého toroidu? Ještě jste o komoře a její geometrii nemluvil# sa nachádza železné transformátorové jadro #Tohle platí pro GOLEM, ale ne obecně o tokamacích#, ktoré plní funkciu primárneho vynutia #opravdu tvrdé y?# transformátoru #transformátorové jádro neplní funkciu primárního vinutí!#. Plazma +a komora+ plní funkciu sekundárneho závitu. Tečením prúdu !primírny! vynutím sa v plazme indukuje elektrický prúd #ještě jsme ale neprorazili neutrální plyn#. Dôsledkom toho v plazme vzniká poloidálne #někde vysvětlete termín polidální a toroidální# magnetické pole. Výsledok pôsobenia poloidálneho poľa je sila, ktorá plazmu stlačuje #kde jste na to prišel?#. Reakcia na túto silu je vnútorný tlak v plazme #není to spíše opačné?#, ktorý zapríčinuje expanziu. V ideálnom stave sú tieto dve sily #spíš tlaky# v rovnováhe. Kombináciou toroidálneho a poloidálneho poľa vzniká šróbovité pole #PELMEL#. Z vonkajšej strany komory sa nachádzajú dve poloidálne cievky, ktoré podľa potreby dodatočne menia tvar magnetického poľa a polohu plazmy #to je hodně GOLEM like#.

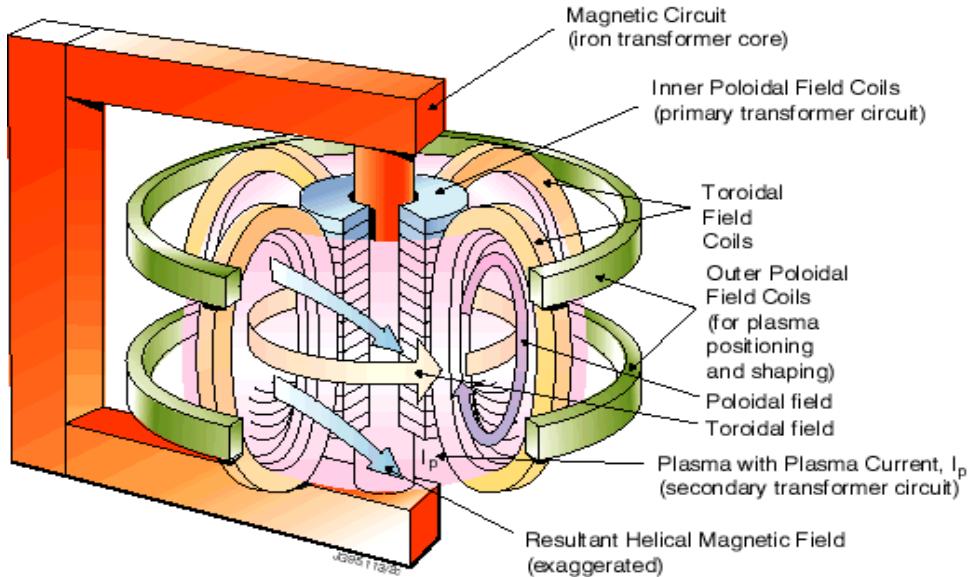
Komentář: PŘEDĚLAT podle nějakého slušného zdroje

Komentář: To bych zařadil do nějaké podkapitoly ”Scénář uskutečnění plazmatického vývoje .. (na tokamaku GOLEM?)“

2.1 Ionizácia a ohrev plazmy #To je asi predionizace, ne?#

Pred ionizáciou sa v komore tokamaku nachádza neutrálny plyn, v ktorom sú elektróny viazané na ióny #od-kud to čerpáte? Nebylo by vhodnejší vázané v atomu? Iont je prece něco bez elektronů ...#. Podmienka existencie/*prúruzu neutrálneho plynu do* plazmatického vývoja je dodať plynu dosť energie na to, aby elektróny prekonali príťažlivé sily iónov +uvolnily se+ a následne ionizovali ďalšie atómy plynu. Pre urýchlenie samotného vývoju je plyn vhodné/*nutné* predionizovať. To znamená, nejakým spôsobom mu dodať energiu ešte predtým, než sa začne transformovať elektrický prúd. Ionizácia je možná vo forme elektromagnetického žiarenia s rôznymi vlnovými dĺžkami #jen tak nějaké vlnové délky to být nemohou#, ktorého zdroj môže byť napr. UV lampa. Iné spôsoby využívajú prúd nabitéch častíc #zde to již ale není úplně presně o dodání energie, ale o vytvorení prostorového náboje#, napr. elektrónová tryska #vysvetlit#. Ionizáciu napomáha aj samotné kozmické žiarenie, ktoré je na povrchu zeme iba čiastocne odtienené atmosférou. Podmienky pre existenciu/*prúraz* plazmatického vývoja je možno dosiahnuť za splnenia dvoch kritérií #zmiňte Paschenovu křivku#:

- a) dostatočne intenzívne elektrické pole (hovoríme o kritickom prieraznom napäti),



Obr. 2.1: Schéma tokamaku. #zdroj!#

- b) dostatočnú strednú voľnú dráhu častic na ich urýchlenie, čo je veličina nepriamo úmerná tlaku pracovného plynu.

Po prekonaní kritického prierazného napäťia sa neutrálny plyn behom veľmi krátkej doby lavínovým spôsobom ionizuje. V dôsledku toho sa za stálej prítomnosti elektrického poľa objaví a začne prudko rásť prúd plazmu I_p . Plazma sa prechodom prúdu začne ohrievať tepelnými stratami spôsobenými odporom. S narastajúcou teplotou odpor klesá a plazma sa stane dobre vodivým prostredím. Kvôli znižujúcemu sa odporu však súčasne klesá **+efektivita+** ohrev. Pre dosiahnutie požadovanej teploty, adekvátnej pre riadenú fúznu reakciu, je teda nutné použiť viacero typov ohrevu. Jedna z možností je dodávať energiu vo forme elektromagnetického žiarenia s vhodnou vlnovou dĺžkou, ktoré dopadá na plazmu z externého zdroja. Ďalšia možnosť je vstrekovať prúd vysoko energetických neutrálnych častic priamo do komory. Mimo tokamaku sa nabité deutérium urýchluje na požadovanú energiu. Urýchlené ióny prejdú neutralizátorom, ktorý ich zbaví náboja. Nakoniec sú vstreknuté priamo do plazmy, ktorej predajú svoju energiu nárazom. Je nutné použiť **+neutrálne+** časticie **bez náboja** kvôli prítomnosti magnetického poľa, ktoré by ich inak odklonilo **+a kvôli nežádoucímu nabíjení tokamaku+**.

Komentár: Je to nevyvážené: ohrev elma vlnou x proudem neutrálnych častic

Komentár: Nemela by býť adekvátně k této kapitole i podobná kapitola o magnetickém udržení plazmatu

2.2 Čerpanie energie #Opravdu tady? Není to někam do úvodu? Musí to tu být (takhle podrobně)?#

Tokamaky, ktoré máme dnes niesu zatiaľ schopné výroby energie. Jej odoberanie teda zatiaľ nieje nutné riešiť. V budúciach fúznych elektráňach bude však odber energie jedna z dôležitých aspektov. Elektrárne, ktoré ľudstvo využíva majú jednu spoločnú charakteristiku. Nezáleží, akým spôsobom sa energia získava, avšak jej konečný cieľ je roztočiť turbínu parným cyklom **#U termojaderné fúze máme ještě jiný horizont ..#**. Energia sa následne získava elektromagnetickou indukcíou. Nejakým spôsobom je teda nutné odčerpávať teplo z reaktoru a využiť osvedčený parný cyklus. Spôsob, ktorý sa nám ponúka spočíva vo fakte, že asi 4/5 z celkovej energie vygenerovanej v plazme uniká vo forme neutrónov. Preto, že neutróny nemajú náboj, sú samozrejme není zachytené magnetickým poľom a dopadajú na stenu nádoby. Vďaka tomuto je možné odčerpávať energiu z plazmy vo forme neutrónov, ktoré predávajú svoju kinetickú energiu stenám zrážkami. Teplo zo stien môže byť následne vedené preč a klasickým spôsobom využité na výrobu energie

Komentár: Energie primárne ze stien ?? Odkud to máte

2.3 Základné parametry plazmy #plazmatu bych asi věnoval samostatnou kapitolu, kde budou zmíněné věci, které budete v dalším potřebovat pro vysvětlování vašich záležitostí: Debayova délka, možná pohyb částic v E a B poli#

Plazma je kvázineutrálny ionizovaný plyn, ktorý vznikol disociáciou atómov neutrálneho plynu. Skladá sa z dvoch hlavných zložiek, **!elektrónov!** a iónov. Kvázineutralita znamená, že sa plazma ako celok chová elektricky neutrálne. Podmienka na kvázineutralitu sa dá vyjadriť vzťahom:

$$\sum Q_\alpha n_\alpha = 0, \quad (2.1)$$

kde Q_α je náboj častíc typu α a n_α je nábojová hustota častíc α . **#Doted' mluvíte o plazmatu obecně a od teď už o plazmatu tokamakovém ...#** Väčšina iónov pochádza z **!praovného!** plynu, napr. Vodíku. Vždy je prítomné tiež malé, ale nezanedbateľné množstvo nečistôt ako dusík, kyslík, alebo uhlík. Nečistoty v plazme vznikajú v dôsledku nedokonalého odčerpania obsahu nádoby **#tady jste už moc konkrétní ...#**. Vlastnosti plazmy sa v **!mnohch!** ohľadoch líšia od klasického plynu, obzvlášť kvôli rozdielnemu typu interakcií. V klasickom plyne medzi sebou časticie interagujú prakticky len na veľmi malé vzdialenosťi. Interakcia je dôsledok vzájomných zrážok. V plazme, okrem vzájomných zrážok, spolu časticie v tokamaku interagujú magnetickým a elektrickým poľom na vzdialenosťi rádovo v metroch. Tento spôsob interakcie sa nazýva kolektívne chovanie. Podmienka na kolektívne chovanie plazmy sa dá vyjadriť vzťahom:

$$\omega_p \gg f_p, \quad (2.2)$$

kde ω_p je plazmová frekvencia a f_p je frekvencia zrážok medzi jednotlivými časticami. Plazmová frekvencia je dôležitá charakteristika plazmy. Ióny sú približne **??? přibližně#** 1837 krát ľahšie než elektróny, preto po narušení vonkajšou silou sa rozkmitajú prakticky len elektróny. Plazmová frekvencia je frekvencia, ktorou kmitajú elektróny okolo iónov po vonkajšom zásahu. Závisí od koncentrácií elektrónov v plazme.

$$\omega_p = \sqrt{\frac{n_e e^2}{m \epsilon_0}}, \quad (2.3)$$

kde n_e je hustota elektrónov, ϵ_0 je permitivita vákua a m je hmotnosť elektrónu. Jedna zo základných vlastností plazmy je elektrický odpor. Odpor čistej plno ionizovanej plazmy R_p závisí len na elektrónovej teplote T_e **#vysázet matematicky#** a nezávisí na hustote plazmy. Odpor plazmy R_p klesá s elektrónovou teplotou:

$$R_p \sim T_e^{-3/2}. \quad (2.4)$$

#Bacha na index!#

Preto nie je možno plazmu ohrievať ohmickým ohrevom neobmedzene, pri vysokých teplotách má totiž vysokú vodivosť a tepelné straty klesajú k nule **#To tedy není řečeno moc štastně#**. Stred plazmy má vyššiu teplotu a teda nižšiu rezistivitu s vyššou prúdovou hustotou než okrajová plazma. Merná celková rezistivita $R_p(t)$, ktorá je inverziou objemového integrálu vodivosti **#potreba asi rozvést, když už to tu uvádíte#,** stráca túto informáciu o rozdieloch teplôt **???#**.

2.4 Energetická rovnováha plazmy - ohmický príkon P_{OH} , energia plazmy W_p a doba udržania τ_E **#Potrebujete to někde?#**

Základný **#to asi není pravda#** spôsob ohrevu v tokamaku je ohmický ohrev vznikajúci priechodom prúdu plazmou s konečným odporom R_p . Časový vývoj ohmického príkonu P_{OH} je daný vzťahom

$$P_{OH}(t) = R_p(t) I_p^2(t) = U_l(t) I_p(t) - \frac{1}{2} \frac{d}{dt} L_p I_p^2, \quad (2.5)$$

kde L_p je indukčnosť plazmy a I_p je prúd tečúci **#tečúci??#** plazmou. **!Celkovúteplnú!** energiu plazmy $+W_{th}+$ dostaneme z ekvipartičného teóremu **#zdroj!#**:

$$W_{th}(t) = \frac{3}{2} k_B \int (n_i T_i + n_e T_e) dV \approx 3 k_B \int n_e T_e dV. \quad (2.6)$$

Pre dostatočne čistú vodíkovú plazmu a dostatočne vysokú hustotu môžme predpokladať rovnosť teploty elektrónov a iónov **#Jste si jist? Plazma může být několikateplotní#** a tiež rovnosť hustôt elektrónov a iónov. Ak uvažujeme parabolický priebeh elektrónovej teploty a konštantnú hustotu, dá sa celkovú energiu plazmy W_p **#index p?#** vypočítať zo vzorca

$$W_{th}(t) \approx \frac{1}{3} n k_B T_e(0, t) V, \quad (2.7)$$

kde V je objem plazmy, n **#nebo** n_e ??# je priemerná elektrónová hustota, k_B Boltzmanova konštanta a $T_e(0, t)$ centrálna elektrónová teplota. Tento vzťah dáva odhad energie len rádovo, kvôli hrubému odhadu hustoty. **!yNa!** základe znalosti energie plazmy W_{th} a ohmického príkonu P_{OH} sa dajú zo zákona zachovania energie vypočítať energetické straty plazmy $+P_{loss} +$

$$P_{loss}(t) = P_{OH}(t) - \frac{d}{dt} W_{th} \quad (2.8)$$

a následne aj dobu udržania energie definovanú ako

$$\tau_E(t) = \frac{W_{th}(t)}{P_{loss}(t)}. \quad (2.9)$$

Doba udržania plazmy je dôležitý parameter popisujúci globálnu energetickú rovnováhu plazmy a predstavuje charakteristickú dobu vychladnutia plazmy $P_{loss} = W_{th}/\tau_E$. Ak by $\tau_E(t)$ bolo konštantné, po vypnutí ohrevu by plazma chladla exponenciálne s touto časovou konštantou.

Kapitola 3

Sondové merania vo vysokoteplotnej plazme

3.1 Sondové merania

Jedným z veľkých problémov riadenej termojadrovej fúzie je nedostatočná schopnosť diagnostiky plazmy, ktorá je nevyhnutná pre pochopenie procesov prebiehajúcich v plazme a pre udržanie stabilnej reakcie **#Sdelení této věty nerozumím#**. Vo vysokoteplotnej plazme dochádza k neustálim turbulenciám, ktoré sú pre kontinuálny chod nežiaduce. Tým pádom je nutné plazmu diagnostikovať v reálnom čase a meniť podmienky pre kompenzáciu odchyiek **#???#**. Meranie parametrov plazmy v tokamaku vyžaduje sondy **#jenom??#** schopné odolať vysokým teplotným gradientom, magnetickému poľu, žiareniu a toku neutrónov. Zároveň musia minimálne kontaminovať prostredie tokamaku. Tieto požiadavky veľmi obmedzujú schopnosť detailne analyzovať procesy, ktoré v plazme prebiehajú.

Komentár: To asi není vše pro podkapitolu "Sondová měření, ne?"

3.2 Plávajúci potenciál

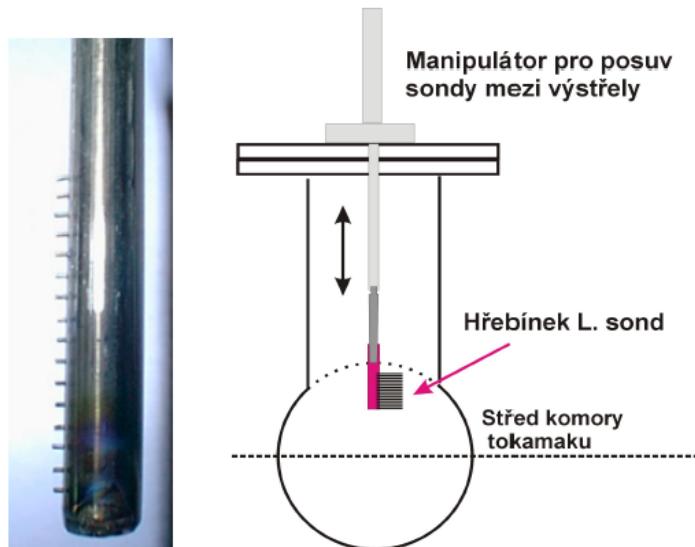
V stacionárnom režime je sonda izolovaná **#??#**. Je vodivá, preto po vsunutí do nádoby sa nabije na určitý **!potenci!**, ktorý nazývame plávajúcim potenciálom. Pri tomto spôsobe merania využíva sonda fakt, že elektróny majú oveľa vyššiu pohyblivosť ako ióny. Preto sa sonda a steny nádoby nabijú voči plazme záporne. Za predpokladu, že elektrónová teplota nefluktuuje, zmerané fluktuácie plávajúceho potenciálu približne reprezentujú skutočné fluktuácie potenciálu plazmy.

3.3 Iónový nasýtený prúd

Ak sondu v stacionárnom režime nabijeme na záporný potenciál, voči potenciálu plazmy, sonda bude obklopená úzkou **!stenou** vrstvou, na ktorej bude sústredený spás potenciálu. Záporné napätie je na sondu privedené z vonkajšieho zdroja. Ak je dosť veľké, aby odpudilo väčšinu elektrónov, prenáša sa potenciál sondy celou stenovou vrstvou a na sondu dopadajú všetky ionty, ktoré vstupujú na hranicu stenovej vrstvy s rýchlosťou väčšou než je iontozvuková rýchlosť. Tento tok ionov sa nazýva ionový nasýtený prúd.

3.4 Langmuirova sonda **#Němělo by tohle být o dvě patra výše?#**

Jednou **!zozákladných!** a bežne používaných diagnostických prostriedkov pre analýzu okrajovej plazmy je Langmuirova sonda. Jej konštrukcia je pomerne jednoduchá. Tvorí ju vodivý drôt, ktorý je umiestnený na izolovanej päte. Výhodou Langmuirových sond je ich jednoduchá konštrukcia, časové a priestorové rozlíšenie. Je možné použiť sondu s viacerími vzájomne izolovanými vodičmi **#možná dráty, když jste to tak už uvedl**



probe.png

Obr. 3.1: Langmuirové sondy na hlavici rake probe používané na meranie T_e na tokamaku GOLEM.

..#. Nevýhoda sondy je skutočnosť, že jej prítomnosť v komore narušuje plazmu. V stacionárnom režime môže sonda poskytovať informácie o plávajúcim potenciále, alebo o iontovom nasýtenom prúde.

3.4.1 Langmuirova sonda na tokamaku Golem

Langmuirove sondy na tokamaku Golem +(viz obr. 3.1)+ sú umiestnené na špeciálnej hlavici rake probe, zasunuté zospodu do komory tokamaku. Sond je celkom 16 a sú od seba radiálne vzdialené 2.5mm.

Kapitola 4

Machova sonda a meranie toku plazmy

Zoznam použitých zdrojov

1

2