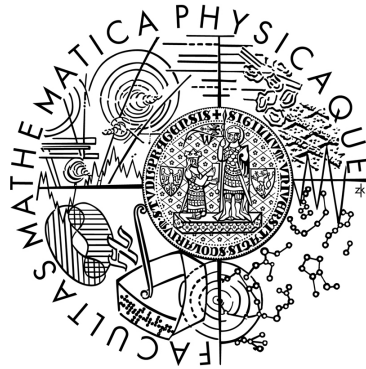


Univerzita Karlova v Praze
Matematicko-fyzikální fakulta

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



Peter Ondáč

Vybrané problémy termojaderné fúze v magnetických nádobách typu tokamak

Katedra fyziky povrchů a plazmatu (32-KFPP)

Vedoucí bakalářské práce: prof. RNDr. Milan Tichý DrSc.

Studijní program: Fyzika

Studijní obor: Obecná fyzika

Praha, 2011

Pod'akovanie:

Ďakujem môjmu vedúcemu bakalárskej práce prof. RNDr. Milanovi Tichému DrSc. za možnosť vlastného výberu témy mojej bakalárskej práce a za odborné vedenie pri písaní práce. Taktiež ďakujem svojmu konzultantovi RNDr. Janovi Stöckelovi CSc. za to, že si na mňa našiel čas popri svojej práci.

Najviac však ďakujem pozemskej Prírode. Ďakujem jej za svoj život a za to, že mi celý život len pomáhala. Bez nej by táto práca vôbec nevznikla.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů, literatury a dalších odborných zdrojů.

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona v platném znění, zejména skutečnost, že Univerzita Karlova v Praze má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona.

V Praze dne 22.5.2012

Název práce: Vybrané problémy termojaderné fúze v magnetických nádobách typu tokamak

Autor: Peter Ondáč

Katedra (Ústav): Katedra fyziky povrchů a plazmatu

Vedoucí bakalářské práce: prof. RNDr. Milan Tichý DrSc.

Abstrakt:

V tejto práci sú formou rešerše zhrnuté základné poznatky o problematike termojadrového výskumu. Slúži ako úvod do tejto oblasti fyziky pre úplných začiatočníkov, ale aj mierne pokročilých záujemcov. V prvých dvoch kapitolách sú uvedené základné pojmy a predstavy spojené s riadenou termonukleárnou reakciou. Bližšie je opísané magnetické udržanie plazmy v tokamakoch. Fyzikálne najdôležitejšia je tretia kapitola, ktorá obsahuje už aj pokročilejšej časti fyziky. Rozoberá hlavné zameranie tejto práce, teda niektoré z najdôležitejších problémov brzdiacich termojadrový výskum. Záverečná štvrtá kapitola je voľnejšia. Pojednáva o predstavách a víziách blízkej aj vzdialenejšej budúcnosti.

Klíčová slova: fúzia, tokamak, plazma, nestability, turbulencie

Title: Selected issues of thermonuclear fusion in tokamak-like magnetic containers

Author: Peter Ondáč

Department: Department of surface and plasma science

Supervisor: prof.RNDr. Milan Tichý DrSc. (32-KFPP)

Abstract:

In this thesis there are summarized in the form of basic knowledge the basic problems of fusion research. It serves as an introduction to this field of physics for beginners, but also intermediate candidates. The first two chapters set out the basic terms and ideas associated with controlled thermonuclear fusion. Further described is the magnetic confinement in tokamaks. Physically most important is the third chapter, which includes more advanced parts of physics. It discusses the main focus of this work, i.e. some of the major problems hindering fusion research. Final fourth chapter is relaxed. It discusses the ideas and visions for the near and distant future.

Keywords: fusion, tokamak, plasma, instabilities, turbulences

Obsah

Predslov	1
Úvod	2
1 Termojadrová fúzia všeobecne	4
1.1 Princíp a výhody riadenej termojadrovej fúzie	4
1.2 Lawsonovo kritérium, magnetické a inerciálne udržanie	8
2 Tokamaky	13
2.1 Tokamaky a stelarátory	13
2.2 Princíp a popis tokamaku	18
3 Vybrané problémy riadenia termojadrovej fúzie	21
3.1 Nasýtenie transformátorového jadra	21
3.2 Dopĺňovanie vodíkového paliva do komory tokamaku	22
3.3 Odvod nečistôt a splodín termojadrovej reakcie z tokamaku	23
3.4 Nestability a turbulencie v plazme tokamaku	28
3.4.1 Nestability v plazme	28
3.4.2 Turbulencie v plazme	34
3.4.3 Niektoré pojmy v teórii nestabilit a turbulencií	39
3.4.4 Experimenty	41
3.5 Interakcia plazmy s pevnými povrchmi	42
4 Vyhliadky do budúcnosti	45
4.1 Využitie riadenej termojadrovej fúzie v tokamakoch.....	45
4.2 Využitie riadenej termojadrovej fúzie všeobecne	49
Záver	52
Zoznam použitej literatúry	54
Zoznam použitých skratiek	56

Predslov

V tejto práci som sa kvôli obmedzenému rozsahu nezaoberal podrobným matematickým popisom. Mnoho použitých rovníc som preto neodvodil. Dôvod môjho zamerania v rámci fyziky termojadrovej reakcie práve na tokamaky, som popísal v podkapitolách 1.2 a 2.1.

V rámci vybraných problémov spojených s termojadrovým výskumom som podrobnejšie opísal predovšetkým turbulencie a nestability v plazme a s nimi spojenú interakciu plazmy s vnútornou stenou vákuovej komory tokamaku. Dôvod je ten, že tieto dva problémy v súčasnosti asi najviac spomaľujú termojadrový výskum a tiež to, že v plánovanej diplomovej práci sa plánujem venovať týmto problémom aj experimentálne (aj keď v českom tokamaku COMPASS kvôli nízkej teplote plazmy ($\approx 1\text{MK}$) termojadrová reakcia neprebíha). Budúce plánované zameranie na istú oblasť termojadrového výskumu je tiež dôvodom toho, že táto práca je rešerš. Slúži mne, a možno bude aj iným, na uvedenie do problematiky (preštudovanie problematiky) termojadrového výskumu. Lepší pohľad do tejto problematiky potom napomáha lepšiemu výberu konkrétnej oblasti na podrobnejší výskum/ štúdium. Nestretol som sa s inou, v slovenskom jazyku napísanou prácou, ktorá by uvádzala čitateľa do problematiky termojadrovej fúzie v takej miere ako táto práca. Dúfam teda, že poslúži hlavne mnohým Slovákom, zaujímajúcim sa o termojadrovú fúziu, ktorí ešte nečítajú cudzojazyčné texty (v posledných ročníkoch slovenských gymnázií). To bol jeden z hlavných dôvodov toho, prečo som túto prácu napísal v slovenskom jazyku.

Úvod

Veľký súčasný problém je zlé myslenie väčšiny ľudí na Zemi. Skutki majú totiž rad (dá sa povedať nekonečný rad) dôsledkov a väčšina ľudí akoby pozerala len na niekoľko prvých členov tohto radu, zatiaľ čo súčet ostatných členov (dôsledkov) môže mať často väčší vplyv na človeka ako súčet tých prvých. Tak je to, aj čo sa týka využívania energie. Ak by ľudia na Zemi žili povedzme budhistickým spôsobom života, na výrobu energie by im mohli stačiť obnoviteľné zdroje energie (vietor, voda, biomasa, slnečné žiarenie).

Ale súčasný spôsob života ľudstva ako celku, si vyžaduje výrobu oveľa väčšieho množstva energie, ako mu stačia tieto obnoviteľne zdroje poskytnúť. Majú totiž malú účinnosť a predpokladá sa [1] že pri súčasnom trende budú v budúcnosti schopné pokryť len asi 20% celkovej spotreby energie. Preto „musia“ ľudia „vyrábať“ energiu aj iným spôsobom. A v súčasnosti to robia najmä spaľovaním uhlia, ropy, plynu v tepelných elektrárňach a štiepnou jadrovou reakciou v jadrových elektrárňach. Lenže pri týchto prídavných spôsoboch „výroby“ energie, ktoré majú už dostatočnú účinnosť (zatiaľ), sa vynárajú hneď dva ďalšie veľké problémy. Prvý si všíma aj mnoho ľudí: zásoby uhlia podľa odhadov [1] vydržia ešte 200 až 250 rokov, ropy 40 až 45 rokov, zemného plynu 60 až 70 rokov. Svetové zásoby ekonomicky dostupných jadrových palív môžu pri dnešnom spôsobe recyklácie vydržať ešte 140 rokov.

Druhý problém je väčší, ale bohužiaľ menej nápadný. Ľudia týmito prídavnými (myslí sa vzhľadom k obnoviteľným zdrojom energie) spôsobmi „výroby“ energie vážne poškodzujú prírodu a tým samozrejme nepriamo (množstvo vzdialenejších členov v rade dôsledkov) aj svoje psychické a fyzické zdravie. Pri spaľovaní fosílnych palív do ovzdušia uniká do prostredia veľké množstvo oxidov síry, oxidov dusíka (spôsobujúce okrem iného kyslé dažde) a oxidov uhlíka (prispievajúcich veľkou mierou k skleníkovému efektu). Jadrové elektrárne sú šetrné k ovzdušiu, ale vyrábajú dlhodobý a vysoko rádioaktívny odpad, ktorý niet kam skladovať. Je tu teda veľký problém a je potrebné ho riešiť. Lenže ako?



Obrázok 0.0: Príroda [2].

Človek si už odjakživa (aj keď si to mnohí neuvedomujú) berie inšpiráciu a rady z prírody (ktorá mu pomáha, napriek tomu, že on ju ničí). Teda je dobré opäť sa pozrieť na prírodu. Potrebujeme veľmi výkonný spôsob „výroby“ energie, ktorý bude využívať vo veľkom množstve sa vyskytujúce palivo a navyše bude šetrný k prírode.

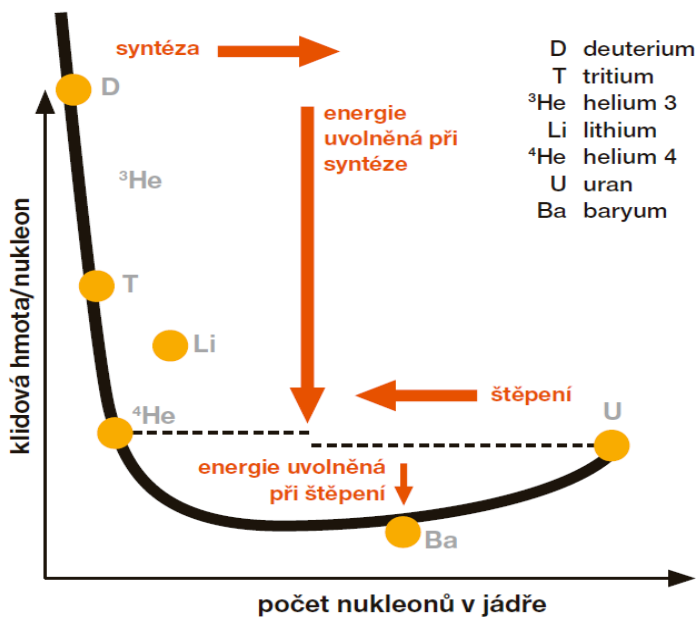
Už tesne po druhej svetovej vojne mnohí fyzici prišli na to, že riešením by mohla byť riadená termonukleárna reakcia uskutočňovaná priamo na Zemi. Príklad si zobrali pravdepodobne zo Slnka (teda výnimočne z kozmu a nie z pozemskej prírody), ktorý je najväčším pre nás viditeľným zdrojom energie a v ktorom prebieha termonukleárna reakcia. O sile tejto reakcie svedčia aj najsilnejšie dosiaľ vyrobené bomby - vodíkové bomby (najsilnejšie vodíkové bomby boli vyrobené v bývalom Sovietskom zväze – „Tsar bomba“). V nich však prebiehala neriadene (nekontrolovateľne).

Kapitola 1

Termojadrová fúzia všeobecne

1.1 Princíp a výhody riadenej termojadrovej fúzie

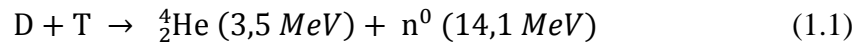
Termojadrová (termonukleárna) reakcia (syntéza) je zlučovanie jadier ľahkých prvkov do jadier ťažších prvkov. Výsledné ťažšie jadrá majú menšiu celkovú pokojovú hmotnosť ako súčet pokojových hmotností zlučovaných ľahších jadier. Rozdiel pokojových hmotností sa teda musí uvoľniť, či už vo forme kinetickej energie produktov reakcie alebo vo forme energie vzniknutého žiarenia. Pri jadrovom štiepení (v jadrových elektrárňach) je tiež uvoľňovaný rozdiel pokojovej hmotnosti produktov a reaktantov reakcie, ale tento rozdiel je tu podstatne menší (viď obr.1.1, „obr.“=Obrázok) ako v prípade syntézy ľahkých prvkov.



Obrázok 1.1: Závislosť priemernej pokojovej hmotnosti nukleónov v jadre na počte nukleónov v jadre [1].

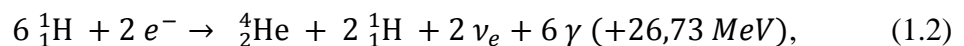
Jadrá ľahkých prvkov sú však kladne nabité a preto sa odpudzujú elektromagnetickou silou (v tomto prípade elektrickou silou). Je preto potrebné ich priblížiť na veľmi malú vzdialenosť (približne 10^{-14} m [1]), pri ktorej je už silná interakcia väčšia ako elektrická a pri prekonaní odpudivej elektrickej sily pritiahne obidve jadra k sebe, aby sa mohli zlúčiť. Preto je dobré, aby zlučovacie jadrá mali

malý elektrický náboj, čiže malé protónové číslo. Priblížiť jadrá ľahkých prvkov na tak malú vzdialenosť je možné napríklad pri ich vysokoenergetických zrážkach. Dostatočnú energiu na takéto zrážky im môžeme poskytnúť urýchlením v urýchľovači, alebo ich zahriatím na vysokú teplotu (milióny stupňov Kelvina). Pri prvom spôsobe je však vstupná energia väčšia ako výstupná. Väčšina energie zväzku sa totiž spotrebuje na zahriatie terčika, pretože elektromagnetické zrážky (spôsobujúce zahrievanie) sú podstatne pravdepodobnejšie ako jadrové zrážky (spôsobujúce syntézu). Takže ľahké prvky, ktoré sa majú zlučovať, musíme zohriať na vysokú teplotu. A je dobré, aby sa zlučovali len dva prvky/reaktanty, pretože pravdepodobnosť zrážky troch jadier je omnoho menšia ako pravdepodobnosť zrážky dvoch jadier (syntézu chceme čo najrýchlejšiu). Pri tepelnej izolácii sa so zvyšovaním teploty zvyšuje aj tlak hmoty tvorenej ľahkými prvkami. A to nás núti hľadať vhodnú syntézu prvkov, pri ktorej by sa uvoľňovala dostatočná energia (a teda aby bola exotermická - čo nás obmedzuje na syntézy najľahších prvkov s malým protónovým číslom), ale zároveň, aby na ňu nebola potrebná príliš veľká zápalná teplota (a teda ani vstupná energia). Naskytá sa tu možnosť syntézy (1.1) [1].



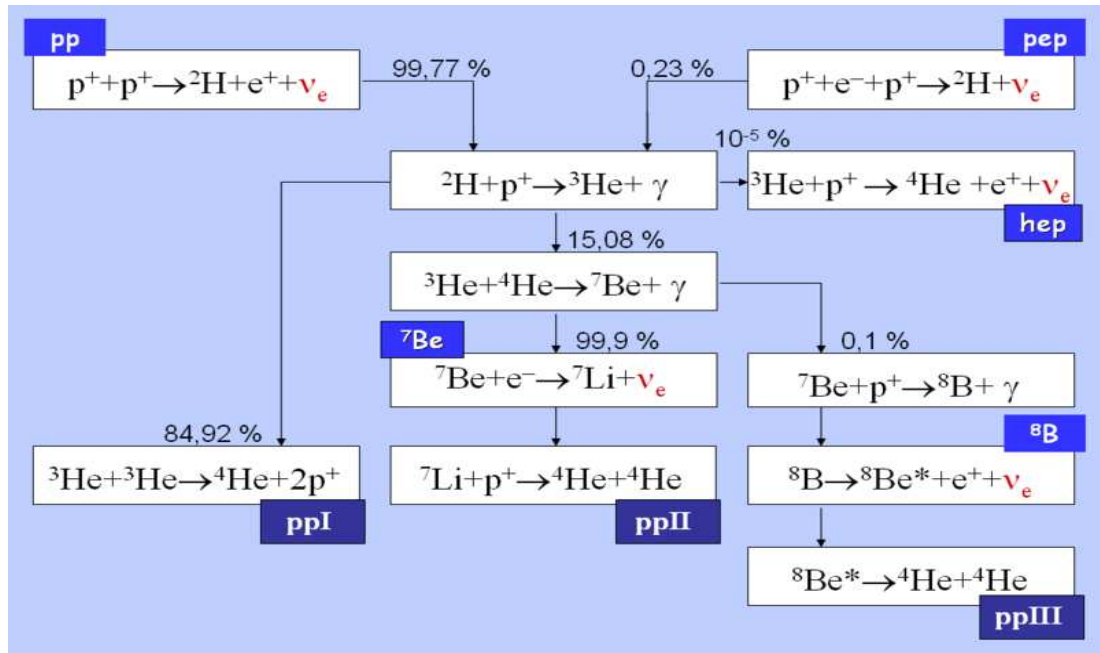
$D, T, {}^4_2\text{He}$ sú značky pre jadrá deutéria, trícia a hélia a n^0 je značka neutrónu, $D = {}^2_1\text{H}$, $T = {}^3_1\text{H}$.

Syntéza (1.1) má totiž zápalnú teplotu najnižšiu. Pri hľadaní vhodnej reakcie je dobré samozrejme pozrieť sa aj na reakciu prebiehajúcu v Slnku, pretože tá dala ľuďom inšpiráciu. V Slnku prebieha [3] reťazec reakcií znázornených, aj s pravdepodobnosťou uskutočnenia (v Slnku), v obrázku 1.2. (Teplota vnútri Slnka je okolo $15 \cdot 10^6$ Kelvinov.) Súhrnne sa dajú zapísať touto rovnicou:



${}^1_1\text{H}$ označuje protón, teda jadro atómu vodíka; ν_e je elektrónové neutríno; γ je fotón; e^- je elektrón.

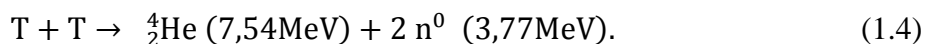
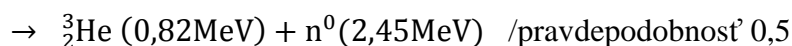
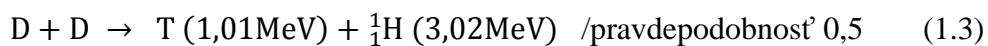
Prvá reakcia (dvoch protónov) reťazca v obrázku 1.2 je však veľmi málo pravdepodobná a v Slnku prebieha v rozumnej rýchlosti len vďaka obrovskému počtu protónov (vo veľkej hustote). Na Zemi nemôžeme prevádzať reakciu s porovnateľným množstvom protónov. A s menším množstvom protónov by bola rýchlosť uvoľňovania energie veľmi malá. Takže reakcie v Slnku musíme pri hľadaní vhodnej syntézy na Zemi vylúčiť.



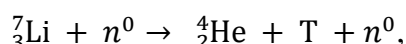
Obrázok 1.2: Reakcie v Slnku [3].

Rýchlosť jadrovej reakcie závisí na teplote T faktorom $e^{-E/kT}$ ($k \doteq 1,381 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ je Boltzmanova konštanta, E je energia zrážajúcich sa častíc), takže pre dostatočnú rýchlosť jadrovej syntézy v zemských podmienkach (menší počet a menšia hustota častíc) potrebujeme približne 10 až 100-krát väčšiu teplotu ako je vnútri Slnka. Ďalej je dobré, ak takáto syntéza má *veľký účinný prierez* (čo odpovedá väčšej pravdepodobnosti zrážok a teda aj väčšej rýchlosti uvoľňovania energie). Napríklad reakcia (1.1) má oproti iným fúznym reakciám veľký účinný prierez. Najväčší pri kinetickej energii iónov okolo 100keV [8].

Vhodné syntézy pre Zemské podmienky môžu byť okrem syntézy (1) ešte tieto dva [3]:



Trícium je rádioaktívny izotop vodíka, s polčasom rozpadu 12,3 roka. Aby sa mohol zúčastňovať riadenej syntézy ako reaktant, využívajú sa nasledujúce dve reakcie na jeho opätovné vytváranie [4]:



Ale aj pri najnižšej zápalnej teplote reakcie (1) sa jedná v pozemských podmienkach približne o teplotu $1 \cdot 10^8$ K a hmota pri tak veľkej teplote je v stave plazmy. Štúdium termojadrovej syntézy je teda spojené najmä so štúdiom plazmy. Na Zemi je plazma v prírode vzácna, ale tvorí asi 99% známej hmoty vesmíru [1]. Vodíková plazma je tvorená voľnými elektrónmi a voľnými jadrami. Preto pri jadrovej syntéze hovoríme o zlučovaní a zrážkach jadier atómov a nie celých atómov. Pri nižšej teplote sa v plazme môžu vyskytovať aj anióny a neutrálne atómy. Plazma – ionizovaný plyn, alebo štvrté skupenstvo hmoty, je ako celok kvazineutrálna (koncentrácia kladných a záporných častíc je takmer rovnaká, makroskopicky sa teda javí takmer ako neutrálna). Jej hlbším štúdiom sa budem zaoberať v podkapitole 1.2 a v kapitole 3.

Ak by sa podarilo termojadrovú fúziu riadene uskutočňovať (v minulosti sa to už podarilo zrealizovať, ale pri väčšej vstupnej energii ako výstupnej), jej účinnosť využitia paliva by bola asi 10 000 000-krát [1] väčšia ako pri chemických reakciách (a teda aj horení v tepelných elektrárňach). Na výkon 1GW by stačilo ročne pre termojadrovú elektrárňu len asi 100 kg deutéria (v každom 1 m^3 vody je asi 35 g deutéria) a 3 tony prírodného lítia. Za rok by tak vyrobila okolo 7 000 000 000 kWh elektriny (tepelná elektrárňa, ktorá výrazne ničí život na Zemi by na to potrebovala asi 1 500 000 ton uhlia).

Z rovníc (1.1), (1.3) a (1.4) vyplýva, že palivo pre prvé termojadrové elektrárne by malo byť deutérium a prípadne trícium. Trícium by sa vyrábalo priamo v elektrárni z lítia pomocou vzniknutých neutrónov (rovnice (1.5)). Deutérium tvorí

približne 1/6500 (0,015%) [5] všetkých vodíkových atómov bežnej vody. A z jedného litra vody by tak bolo možné vyprodukovať rovnakú energiu ako z 300 litrov benzínu [1]. Voda je na Zemi pre človeka palivo dostupné v najväčšom množstve a navyše dostatočne rovnomerne. Lítium je tiež hojne a rovnomerne sa vyskytujúci prvok. Takže palivo pre termojadrovú elektrárňu by mala každá krajina. Navyše lítium nie je rádioaktívny, preto by nebol potrebný transport rádioaktívneho materiálu do elektrárne alebo z elektrárne.

Výbuch termojadrového reaktoru v dôsledku vnútorných vplyvov je prakticky nemožný. V daný okamžik by totiž vo fúznom reaktore bolo prítomných len niekoľko gramov paliva (asi 1g zmesi D-T v objeme 1000 m³) a pri prípadnej poruche by sa toto palivo veľmi rýchle ochladilo natolko, že reakcia by prakticky okamžite skončila. Termojadrová elektrárňu by bola teda omnoho bezpečnejšia ako sú dnešné jadrové elektrárne. Konštrukčné materiály reaktorovej komory, pokiaľ sa nepríde na niečo lepšie, budú spočiatku zrejme rádioaktívne (najmä vplyvom dopadajúcich vysokoenergetických neutrónov a usadzovaného trícia) niekoľko desiatok rokov (horný odhad je do 100 rokov). Ale na to by stačili sekundárne, dočasné úložiská rádioaktívnych konštrukčných materiálov. Vyhoréte palivo štípných jadrových elektrární je naproti tomu nutné skladovať stovky tisícov rokov [1].

Produktom fúznej reakcie v termojadrovej elektrárni by bolo hélium. Hélium je však vzácny nerádioaktívny plyn, ktorý sa nepodieľa na skleníkovom efekte. Pre svoju nízku atómovú hmotnosť by bol unášaný do vyšších vrstiev atmosféry.

Čo sa týka peňazí, investičné náklady budú zrejme pre prvú termojadrovú elektrárňu veľké, ale tieto náklady sa veľmi rýchlo vrátia vďaka nízkej cene paliva a desiatky rokov dlhej životnosti elektrárne.

Takže výhody riadenej termojadrovej fúzie:

- a) bezpečnosť - V daný čas je v reaktorovej komore len niekoľko gramov paliva (asi 1g zmesi D-T v objeme 1000 m³). V prípade poruchy a malého ochladenia nastane rýchle zastavenie reakcie. Nie je tu riziko zneužitia nukleárneho materiálu pre vojenské účely.
- b) pomoc prírody – Nevypúšťajú sa pri nej nebezpečné plyny. Rádioaktivita je len krátkodobá (aj tá len v prípade, že sa nevymyslí lepší spôsob priebehu reakcie). Beta rozpad trícia je sprevádzaný uvoľňovaním elektrónov, ktoré vo

vzduchu doletia iba niekoľko milimetrov a nepreniknú ani listom papiera. Trícium je nebezpečné, len ak sa dostane do organizmu.

- c) nízka cena a veľká dostupnosť paliva - Deutérium sa dá získať elektrolýzou z vody. Lítium na tvorbu trícia je hojne sa vyskytujúci kov (dá sa extrahovať aj z morskej vody vo forme Li_2CO_3 [6]). Palivo je asi 10 000-krát lacnejšie ako v súčasnosti elektrická energia [6].

1.2 Lawsonovo kritérium, magnetické a inerciálne udržanie

[7] Plazma je súbor nabitých a neutrálnych častíc, ktorý je zvonku elektricky neutrálny a vyznačuje sa kolektívnym chovaním. Kolektívne chovanie znamená ovplyvňovanie lokálneho miesta plazmy ďalekodosahovými elektromagnetickými silami iných častí tej istej plazmy. Lokálne miesta plazmy totiž môžu byť nabité a pôsobiť elektromagnetickými silami na iné, hoci aj veľmi vzdialené časti (sila sa znižuje ako $1/r^2$, ale objem nabitej časti je úmerný r^3).

Matematický popis plazmy nie je jednoduchý. Na štúdium jednotlivých trajektórií je plazma príliš hustá a na model tekutiny je plazma príliš riedka [1]. Používa sa štatistický popis kinetickej teórie, magnetohydrónamický popis plazmy ako tekutiny, a tiež ich kombinácia.

Ako už bolo spomenuté vyššie, je dôležité, aby nám riadená termojadrová reakcia vyprodukovala viac využiteľnej energie, ako vynaloženej energie. Vynaložená energia sa týka vytvorenia plazmy, ohrievania plazmy, náhrady uniknutého žiarenia a častíc plazmy. Toto popisuje *Lawsonovo kritérium*, ktoré bolo odvodené pravdepodobne v roku 1955 za predpokladu, že vyprodukovaná energia a stratová energia žiarenia a unikajúcich častíc sú vrátené do tepelného cyklu s účinnosťou menšou ako 33%.

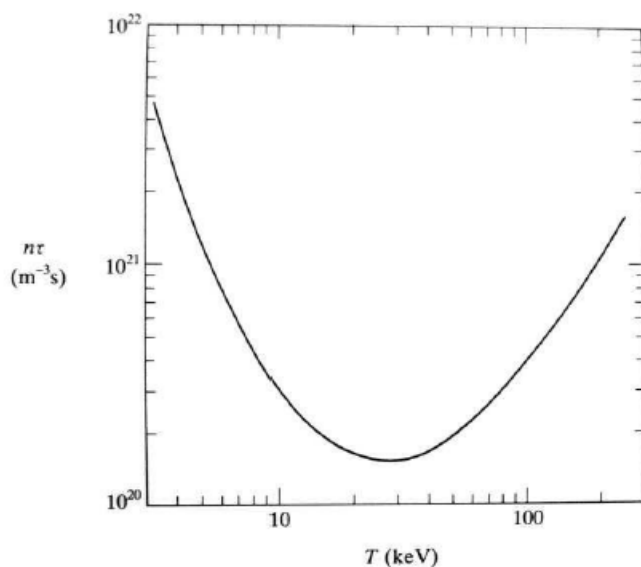
Pre syntézu deutéria s trícium, pri teplote iónov $T \approx 2 \cdot 10^8$ °C, toto kritérium tvrdí, že musí platiť [1]

$$n \cdot \tau \geq 0,5 \cdot 10^{20} \frac{\text{s}}{\text{m}^3}, \quad (1.6)$$

n je hustota plazmy a τ je čas udržania energie plazmy.

Zjednodušene povedané, τ je v tokamakoch (viď kapitola 2) čas, počas ktorého by mala plazma „horieť“, aby sme mali z toho „horenia“ kladný zisk energie. Presnejšie

(aj pre reaktory) sa τ definuje ako $E/(P-dE/dt)$, kde E je energia plazmy a P je výkon na kompenzovanie energetických strát (čiže aj stratový výkon). Horenie plazmy znamená zlučovanie jadier plazmy. Závislosť $n \cdot \tau$ na teplote T je znázornená na obr.1.3. Ďalej budem, tak ako je vo fyzike plazmy zvykom, miestami používať eV ako jednotku teploty. Používam pritom približný prevodný vzťah $1\text{eV} \approx 11\,600\text{K}$, ktorý vyplýva zo vzťahu $E=k \cdot T$.



Obrázok 1.3: Závislosť $n \cdot \tau$ na T [5].

Všeobecne, pre daný typ jadrovej fúzie musí byť fúzny súčin, teda súčin $n \cdot T \cdot \tau$ väčší ako nejaká konštanta. Pre reakciu (1.1) je to približne [8]

$$T \cdot n \cdot \tau \geq (3 - 5) \cdot 10^{21} \frac{\text{keV} \cdot \text{s}}{\text{m}^3}. \quad (1.7)$$

Doba udržania energie je úmerná druhej mocnine rozmeru magnetickej nádoby - tokamaku. Čím väčšia nádoba na reakciu, tým lepšie. Vo hviezdach je plazma udržiavaná dlhú dobu vďaka veľkej gravitačnej sile. Na Zemi tak veľkú gravitačnú silu nemôžeme vyvinúť, preto je potrebné použiť iné metódy udržania plazmy.

Z Lawsonovho kritéria vyplývajú hneď dva základné spôsoby uskutočnenia ziskovej termojadrovej reakcie. Môže byť uskutočnená pri veľkej hustote ($\approx 10^{31} \text{ m}^{-3}$) a len krátkej dobe udržania ($\approx 10^{-10} \text{ s}$), alebo pri menšej hustote ($\approx 10^{20} \text{ m}^{-3}$), ale dlhšej dobe udržania energie plazmy (\approx niekoľko sekúnd, minút), a energii iónov približne 10keV.

Takže si môžeme vybrať, buď sa budeme zameriavať na udržanie vysokej hustoty plazmy, alebo na dlhé udržanie jej energie. Jedno aj druhé je náročné, ale Lawsonovo kritérium žiada dosiahnuť aspoň jedno. Ľudia už vyskúšali obidve tieto dva základné spôsoby uskutočnenia riadenej syntézy.

Inerciálne udržanie je udržanie plazmy (ľahkých prvkov) v krátkom čase, ale pri veľkej hustote a magnetické udržanie je udržanie plazmy pri nižšej hustote, ale dlhšej potrebnej dobe udržania plazmy.

Pri magnetickom udržaní, dlhší čas udržania τ zaručuje, že najviac energetické častice plazmy, ktorých je tým menej čím majú väčšiu energiu („chvost Maxwellovho rozdelenia rýchlostí“), za daný čas stihnú vykonať dostatočný počet zlučovacích reakcií. Dostatočný počet, v zmysle vyprodukovať dostatočnú energiu v danom čase na pokrytie strát energie.

[1] Inerciálna fúzia sú vlastne výbuchy miniatúrnych vodíkových bômb. Aj vodíkové bomby fungovali na tomto princípe. Slovo inerciálna znamená, že plazma nie je udržiavaná žiadnym vonkajším silovým poľom. Podstata je v tom, že miniatúrne množstvo paliva je vložené do guľového terča (vyrobeného často z plastu) s priemerom niekoľko milimetrov. Na tento terč sa zo všetkých strán zasvieti silnými lasermi. Povrchová časť terča absorbuje veľké množstvo energie, preto sa odparí a expanduje do vákuu. Ale neodparená časť terča sa v dôsledku tlakovej vlny šíri obrovskou rýchlosťou (tisíce km/s) do stredu a tým stláča palivo v strede terča. To je tam vo forme plynu alebo pevného ľadu. Za predpokladu symetrickej kompresie sa takto (premena kinetickej energie na tepelnú) zvýši teplota stredu paliva v okamžiku dosiahnutia maximálnej hustoty až nad zápalnú teplotu paliva (často sa jedná o teplotu až $350 \cdot 10^6$ °C). Palivo začne v strede „horieť“ a vlna horenia - zlučovania sa šíri do zvyšku paliva.

Toto všetko sa vďaka zotrvačnosti hmoty uskutoční skôr ako sa palivo vplyvom vlastného tlaku rozletí do okolia. Samozrejme, toto by sa dialo v ideálnom prípade [1]. Problémy sú napríklad v nie úplne dokonalej symetrii a homogenite terča a v absorpcii energie na povrchu terča. Aj malá odchýlka od guľovej symetrie je totiž v priebehu stláčania/kompresie zosilňovaná. Tak napríklad v dôsledku turbulentného premiešania paliva je zvýšenie teploty v strede terča menšie ako očakávané.

[1] Lasery reprezentujú priamo poháňanú (direct drive) riadenú inerciálnu fúziu. Energia do terča je totiž dodávaná priamo z laseru. Preto je aj táto premena

energie lasera na kinetickú energiu terča účinnejšia ako v prípade nepriamo poháňanej inerciálnej fúzie. Pri nepriamo poháňanej (indirect drive) inerciálnej fúzii je táto energia zo zdroja do terča, dodávaná ešte cez röntgenové žiarenie. Röntgenové žiarenie vzniká absorpciou laserového žiarenia v obale terča (nazývaného hohlraum), ktorý je vyrobený z materiálu s vysokým protónovým číslom Z . Výhodou nepriamo poháňanej inerciálnej fúzie sú podstatne menšie požiadavky na homogenitu a symetriu vonkajšieho zdroja energie. Nepriamo poháňaná inerciálna fúzia bola uskutočnená už v roku 1985 [1].

Ako lasery sa spravidla používajú neodýmové lasery a ich impulzy (čas pri ktorom svietia na terč) sú nanosekundové. Namiesto lasera by sa mohli použiť aj urýchlené zväzky ťažkých iónov.

Obidve spôsoby udržania plazmy majú snubné vyhliadky do budúcnosti, ale v súčasnosti sa predpokladá, že práve magnetické udržanie povedie k prvému termojadrovému reaktoru a k prvej termojadrovej elektrárni. Aj preto sa ďalej budem zaoberať len magnetickým udržaním plazmy v nádobách nazývaných tokamaky. Ďalším dôvodom je to, že kvôli primeranému rozsahu tejto práce som bol prinútený vybrať si len jeden spôsob udržania plazmy a vybral som si ten aktuálnejší a s lepšími vyhliadkami do budúcnosti.

Kapitola 2

Tokamaky

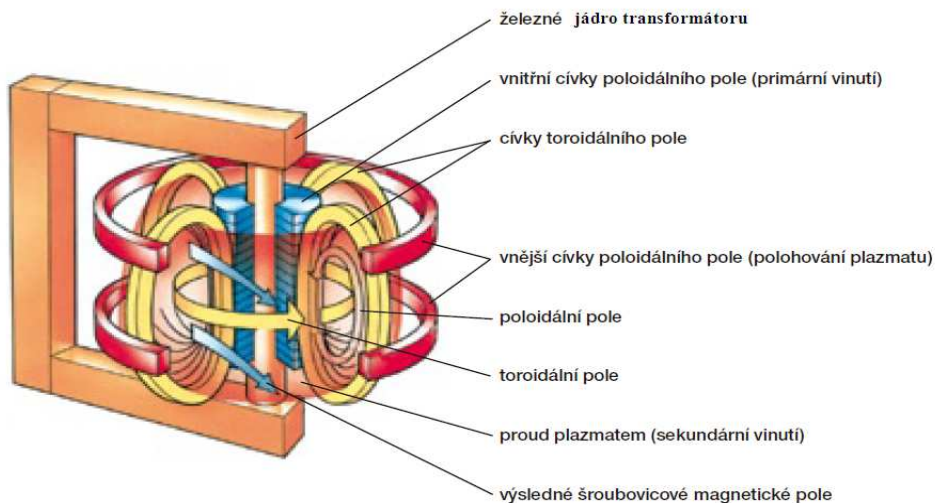
2.1 Tokamaky a stelarátory

Ako som už spomínal, ak chceme riadenú termojadrovú elektrárňu na „výrobu“ energie čo najskôr, je dobré zaoberať sa magnetickým udržaním plazmy. Už názov napovedá, že plazma je pri ňom udržiavaná vonkajším magnetickým poľom. Je známe, že elektricky nabitá častica (v plazme s teplotou niekoľko miliónov Kelvinov nie sú neutrálne atómy) sa pozdĺž magnetických indukčných čiar homogénneho magnetického poľa pohybuje voľne (po špirálovitých dráhach), ale v smere kolmom k magnetickým indukčným čiarom sa pohybuje len pomocou zrážok s inými nabitými časticami alebo v dôsledku driftov o ktorých bude reč neskôr. V nehomogénnom magnetickom poli sa nepohybuje voľne žiadnym smerom. Dá sa teda vytvoriť taká konfigurácia magnetického poľa, že každá unikajúca častica by musela prechádzať kolmo na magnetické indukčné čiary a teda by bola väznená v istej priestorovej oblasti.

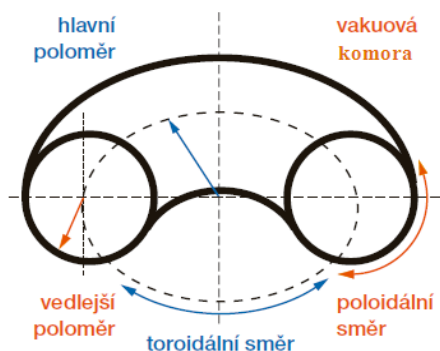
[1] Nádoba v ktorej sa takéto magnetické pole vytvára sa nazýva *tokamak*. Na utvorenie takéhoto magnetického poľa sa zásadne využíva elektrický prúd prechádzajúci pevným vodičom alebo plazmou. Tokamak (obrázok 2.1 a 2.2) je uzavretá magnetická nádoba a indukčné čiary neopúšťajú jej vákuovú komoru (vákuová komora má tvar torusu - trojrozmerného geometrického útvaru). V minulosti sa používali aj otvorené magnetické nádoby fungujúce na princípe magnetických zrkadiel - nabitá častica sa odráža od obidvoch koncov nádoby kvôli zhusteniu indukčných čiar v týchto miestach. Častice s veľkými energiami sa však od koncov nádoby neodrazia ani pri silnejších magnetických poliach a preto sa používajú uzavreté magnetické nádoby. Na Zemi je v súčasnosti okolo 35 tokamakov rozmiestnených v krajinách Európy, Ázie a Ameriky.

Ako som už spomínal v súvislosti s Lawsonovým kritériom, je potrebné plazmu udržať pokope čo najdlhšie, ale je tu problém. Nabité častice v uzavretej nádobe krúžia a odstredivá sila spolu s efektom nehomogenity poľa v priereze vákuovej komory tokamaku (vákuová komora má tvar podobný pneumatike) spôsobujú únik častíc v radiálnom smere (v smere hlavného polomeru) na steny

komory - takzvaný toroidálny drift nabitých častíc. Význam toroidálneho a poloidálneho smeru je znázornený na obr.2.2.



Obrázok 2.1: Schéma tokamaku [1].



Obrázok 2.2: Rez vákuovou komorou tokamaku [1].

Toroidálne magnetické pole, vytvárané poloidálnymi cievkami (obr.2.1), pozdĺž vákuovej komory tokamakov sa znižuje nepriamo úmerne s rastúcim hlavným polomerom R (obr. 2.2) podobne ako v toroide ($B = \text{konštanta} \cdot \frac{1}{R}$). Gradient ∇B smeruje proti tomuto klesaniu a tento gradient magnetického poľa spolu so zakrivením indukčných čiar vytvárajú unášavú rýchlosť (tzv. drift) nabitých častíc

$$\vec{v}_{\nabla B} + \vec{v}_R = \left(\frac{m \cdot (v_{\parallel}^2 + \frac{1}{2} v_{\perp}^2)}{q \cdot R^2 \cdot B^2} \right) \cdot \vec{R} \times \vec{B}. \quad (2.1)$$

Je to rovnica [2-30] v [7]. Takisto význam veličín a odvodenie je uvedené v [7]. Na tomto mieste je dôležitý len vektorový súčin polohového vektora \vec{R} (v smere ktorého sa určuje R) a magnetickej indukcie \vec{B} a náboj q unášanej častice, ktorý môže byť kladný alebo záporný. V dôsledku tohto driftu stúpajú kladné častice „hore“ a záporné častice (elektróny) klesajú „dole“. „Dole“ a „hore“ v zmysle v smere tiažovej sily a proti smeru tiažovej sily. Tým vzniká elektrické pole s indukciou \vec{E} smerujúce dole a to spolu s tiažovou silou vytvára výsledný drift - unášanie kladných aj záporných častíc v smere rastu R („von“ z komory), s rýchlosťou

$$\vec{v}_E + \vec{v}_g = \left(\frac{1}{B^2} \right) \cdot \vec{E} \times \vec{B} + \left(\frac{m}{B^2 \cdot q} \right) \cdot \vec{g} \times \vec{B}. \quad (2.2)$$

Toto je spojenie rovnice [2-18] a [2-15] v [7]. Na tomto mieste je podstatné len to, že $\vec{v}_E + \vec{v}_g$ smeruje v smere rastu hlavného polomeru R. Podstata príčiny vzniku týchto driftov je to, že polomer obiehanie častice okolo indukčnej čiary je iný na jednej strane kruhovej dráhy ako na druhej strane. Táto zmena polomeru obehu je zapríčinená buď zmenou magnetického poľa alebo príťažlivou elektrickou či gravitačnou silou. Preto majú častice sklon k unikaniu zo stredu komory k jej okraju. Existujú aj iné driftы. Napríklad pri vonkajšom elektrickom poli v tvare $\vec{E} = (E_0 \cdot \cos(k \cdot y)) \cdot \vec{x}$ a konštantnom \vec{B} vzniká drift

$$\vec{v}_{\vec{E}} = \left(\frac{1 - \frac{1}{4} k^2 r_L^2}{B^2} \right) \cdot \vec{E} \times \vec{B}. \quad (2.3)$$

Je to rovnica [2-58] v [7]. Tento drift je významný pri veľkých „k“ (vlnových vektoroch), teda pri malých rozmeroch nehomogenity elektrického poľa, pretože závisí na k^2 . Je závislý na druhu častíc (závislosť na r_L^2 , $r_L = m \cdot v_{\perp} / (|q| \cdot B)$). Na druhu častíc je závislý aj polarizačný drift spôsobený časovo premenným elektrickým poľom \vec{E} (v tomto prípade priestorovo homogénnym):

$$\vec{v}_p = \pm \left(\frac{1}{\omega_c \cdot B} \right) \cdot \frac{d\vec{E}}{dt}, \quad (2.4)$$

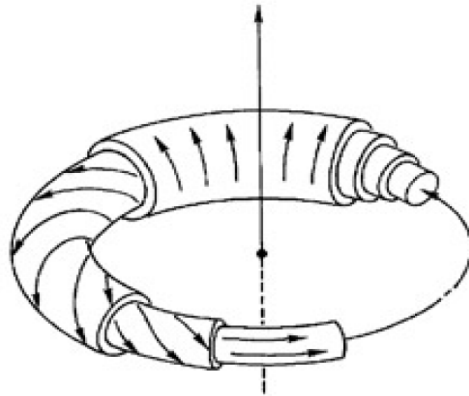
ω_c je vysvetlené v rovnici (2.6) nižšie, znamienko „+“ platí pre kladný náboj a znamienko „-“ pre záporný náboj častice. Tento drift je spôsobený zotrvačnosťou častice.

Nenulový gradient tlaku ∇p v plazme spôsobuje diamagnetický drift

$$\vec{v}_D = \left(\frac{-1}{q \cdot n \cdot B^2} \right) \cdot \nabla p \times \vec{B}, \quad (2.5)$$

je to rovnica [3-65] v [7]. Pri tomto drifte sa nepohybujú stredy orbitálnych dráh nabitých častíc. Ale v každom elemente plazmy sa šíri hore alebo dole viac kladných častíc ako záporných častíc.

[1] Problém driftov čiastočne rieši špirálovité magnetické pole. Jeho indukčné čiary majú tvar špirály s osou totožnou osou vákuovej nádoby, ktorej stúpanie sa znižuje so vzdáľovaním od tejto osi. Na osi sú teda indukčné čiary rovnobežné s osou a nebránia pohybu častíc pozdĺž osi. V istej vzdialenosti od osi je však stúpanie špirály nulové a indukčné čiary sú teda kolmé na osu a zabraňujú pohybu nabitých častíc v radiálnom smere, od osi k stenám. Schematicky je to zakreslené na obr.2.3.

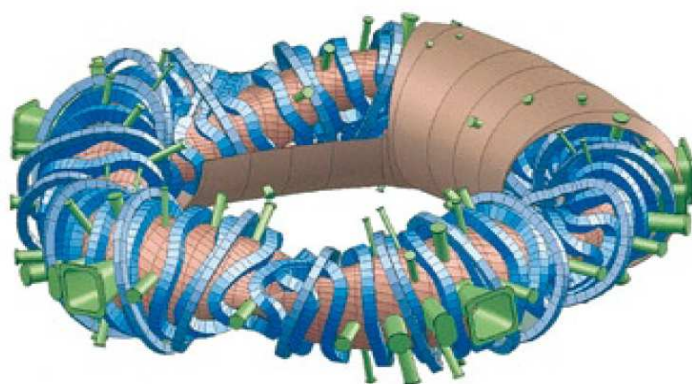


Obrázok 2.3: Špirálovité magnetické pole vo vákuovej komore (stelarátore) [1].

Toto pole vznikne napríklad zložením toroidálneho magnetického poľa vonkajších cievok a poloidálneho magnetického poľa elektrického prúdu v plazme, ktoré je asi 10 až 100-krát slabšie ako toroidálne pole (obrázok 2.1). V dôsledku malej veľkosti poloidálneho poľa je skrúcanie indukčných čiar malé. Počet toroidálnych otočení indukčnej čiary špirálovitého magnetického poľa pri jednom

poloidálnom otočení sa nazýva bezpečnostný faktor. Toto špirálovité pole odstraňuje hlavne účinky driftov v rovnici (2.1). V dôsledku vzájomných zrážok častíc a iných zložitejších javov (turbulencií) však môžu častice unikať na steny komory aj v špirálovitom magnetickom poli. To je problém, o ktorom diskutujem v kapitole 3.

Tak to je v tokamakoch. Ale takéto špirálovité pole je možné vytvoriť aj iba pomocou vonkajších cievok (bez pomoci elektrického prúdu v plazme). Potom sa takéto uzatvorená magnetická nádoba nenazýva tokamak, ale *stelarátor*. Kvôli tomu, že sa nevyužíva pole prúdu vnútri plazmy, musia mať komory a cievky stelarátorov často neobyčajný tvar (obr.2.4.)



Obrázok 2.4: Komora projektovaného stelarátoru – model [1].

[1] Stelarátor na rozdiel od bežného tokamaku pracuje stacionárne - so stacionárnym (časovo nemenným) magnetickým poľom. Tokamaky väčšinou využívajú elektromagnetickú indukciu. V stelarátoroch bol však dlho problém s difúziou nabitých častíc k stenám komory a tiež s počiatočným ohrievaním plazmy (nevyužíva totiž ohrievanie pomocou elektrického prúdu v plazme). Tokamaky tak vo vývoji získali pred stelarátormi náskok a aj preto tu budem písať radšej o tokamakoch ako o stelarátoroch. V kapitole 4 sa dozvieme, že aj plánovaný predchodca prvej termojadrovej elektrárne – medzinárodný experimentálny termojadrový reaktor sa stavia na princípe tokamaku. V budúcnosti sa však počíta aj so stelarátormi.

2.2 Princíp a popis tokamaku

[1] Myšlienka tokamaku sa oficiálne zrodila približne v rokoch 1950-1952 v bývalom Sovietskom zväze. Ako už bolo uvedené, tokamak má dutú vákuovú komoru v tvare nafúknutej pneumatiky (toroidu) obklopenú magnetickými cievkami a jadrom transformátora (obr. 2.1). Na obr. 2.2 je taktiež znázornený toroidálny a poloidálny smer a hlavný a vedľajší polomer tokamaku. Palivo v komore je udržiavané špirálovitým magnetickým poľom. Toroidálne magnetické pole (1T až 10 T) je vytvárané cievkami, poloidálne magnetické pole (0.01T až 0.1 T) je vytvárané hlavne elektrickým prúdom prechádzajúcim plazmou vnútri komory. Okrem cievok toroidálneho poľa sú v tokamaku (obr. 2.1) aj vonkajšie a vnútorné cievky poloidálneho poľa, ktoré udržiavajú a „kontrolujú“ polohu plazmy. V tradičných magnetických cievkach vznikajú obrovské tepelné straty, preto sa začínajú využívať supravodivé cievky. Sú drahšie, ale tepelné straty a spotreba elektrickej energie je pri nich zanedbateľná.

Tokamaky pracujú na princípe transformátora. Sekundárne vinutie je tvorené jedným závitom a to komorou s plazmou (výkon je vedený viac do plazmy ako do komory samotnej). Takže zmenou magnetického poľa sa v dôsledku elektromagnetickej indukcie v komore (v plazme) vybudí elektrický prúd I prechádzajúci plazmou. Dnešné tokamaky sú pripojené na zdroj jednosmerného prúdu. Teda zmena prúdu v cievkach primárneho obvodu je len tá, z nulovej hodnoty na konečnú hodnotu. Počas tejto zmeny vznikne elektrický prúd v plazme a hneď na to zanikne, čím sa rozpadne plazma. Elektrické výboje v tokamakoch sú väčšinou krátke – pomocou neinduktívnych metód (napríklad urýchlenie častíc plazmy elektromagnetickými vlnami) trvajú maximálne niekoľko minút, v stelarátoroch môžu výboje prebiehať oveľa dlhšiu dobu. Striedavé napätie sa v tokamakoch nepoužíva, lebo v súčasnosti sa nedá zmeniť smer primárneho prúdu v cievkach tak rýchlo, aby sa medzitým plazma nerozpadla (stabilizačné špirálovité pole sa tak rýchlo neprispôsobí). Elektrický odpor R v plazme je dostatočne veľký, preto sa plazma v dôsledku Joulovho tepla ($Q=R \cdot I \cdot t$) rýchlo ohrieva (t je čas) – induktívny ohrev plazmy. Rýchlo tu znamená, že v priebehu jednej milisekundy má plazma teplotu asi 10 keV. Najprv je v komore len slabo ionizovaný vodíkový plyn, ale pri takejto teplote sa z neho stane plne ionizovaná plazma (bez neutrálnych častíc atómov). Plazma v tokamaku je veľmi riedka, v celej komore je menej ako gram

paliva. So vzrastajúcou teplotou sa však odpor R plazmy (a tým aj Joulovo teplo) znižuje (ako $1/T^{3/2}$), preto sa používajú d'alšie metódy ohrievania plazmy.

a) Často sa používa ohrev plazmy pomocou absorpcie (zvonku prichádzajúceho) elektromagnetického žiarenia s vhodnou frekvenciou. Frekvencia sa volí tak, aby sa elektróny a ióny v plazme pohybovali v dôsledku dopadajúceho žiarenia s rezonančnými frekvenciami. Rezonančná uhlová frekvencia rotácie okolo magnetickej indukčnej čiary sa nazýva cyklotrónová rezonančná frekvencia [1] (niekedy nazývaná aj Larmorova frekvencia):

$$\omega_c = \frac{|q| \cdot B}{m}, \quad (2.6)$$

m je hmotnosť častice; q jej náboj a B veľkosť magnetickej indukcie.

Pre elektróny má hodnotu 70-200 GHz a pre ióny 20-120 MHz. Využíva sa aj ohrev plazmy na dolnej hybridnej (uhlovej) frekvencii 1-10GHz. Dolná hybridná frekvencia je pre bežné hustoty v tokamakoch definovaná ako [1]

$$\omega_d = \sqrt{\omega_{ce} \cdot \omega_{ci}}, \quad (2.7)$$

ω_{ce} resp. ω_{ci} je cyklotrónová rezonančná frekvencia elektrónov respektíve iónov.

b)[1] Ďalší spôsob dodatočného ohrevu plazmy pred samotným spustením termojadrovej reakcie (prípadne len elektrického výboja) v plazme je vstrek vysokoenergetických (s energiou $E \approx 100 \cdot k \cdot T$, k je Boltzmanova konštanta, T je teplota plazmy, E je energia neutrálnej nalietajúcej častice) neutrálnych častíc do plazmy, ktoré svoju energiu pri zrážkach odovzdávajú plazme. Zvyčajne majú tieto neutrálne častice energiu 20 – 100 keV.

Ak sa Joulovým ohrevom a dodatočnými ohrevmi dosiahne zápalná teplota termojadrovej reakcie, fúzia začne prebiehať a časť uvoľnenej energie sa môže použiť na udržiavanie tejto zápalnej teploty. Pre budúce elektrárne sa predpokladá pre vyššiu bezpečnosť použiť na udržiavanie zápalnej teploty menšiu časť energie reakcie a zvyšok dodať malým vonkajším ohrevom. Takže ak by nastala nejaká chyba, vonkajší ohrev zanikne, teplota ihneď klesne pod zápalnú teplotu a reakcia prestane. Lawsonovo kritérium „hovorí“ vlastne o tom, že uvoľnená energia z fúzie

musí pokryť samoohrev aj straty energie. Súčasný tokamak Lawsonovo kritérium ešte nespĺňa. Dodávaná energia je pri nich väčšia ako získaná. V súčasných tokamakoch (okrem jedného experimentu v roku 1997 v tokamaku JET v Anglicku, keď bolo prvýkrát do paliva pridané trícium) ešte termojadrová reakcia neprebieha. Uskutočňujú sa v nich len krátke (najviac niekoľko minút, v tokamaku TORE SUPRA bol dosiaľ rekord 4 minút 25 sekúnd) elektrické výboje. Na ich zapálenie sa používa predionizácia napríklad pomocou rozžeravej katódy. Elektróny z katódy v nich pri každom obehu získajú energiu asi 5 eV a po niekoľkých obehoch sú schopné ionizovať vodík.

Približne 80% energie uvoľnenej pri termojadrovej reakcii je prenášaná neutrónmi (ktoré prechádzajú magnetickým poľom voľne) na stenu komory. Tam sa premenia ich kinetická energia na tepelnú energiu a z tepelnej energie by sa dala klasickým spôsobom (ako napríklad v tepelných elektrárňach) vyrábať elektrická energia. (Pomocou tepla sa vyrobí para, ktorá poháňa turbíny a tie otáčajú magnetmi. Vďaka elektromagnetickej indukcii potom môže vznikáť indukovaný elektrický prúd.).

Kapitola 3

Vybrané problémy riadenia termojadrovej fúzie

Na to aby prvá elektrárň vznikla čo najskôr je potrebné čo najrýchlejšie vyriešiť problémy spojené s tokamakmi a so samotnou riadenou termonukleárnou reakciou. Tu uvádzam niektoré z nich (snažil som sa vybrať tie hlavné).

3.1 Nasýtenie transformátorového jadra

Tokamak pracuje na princípe transformátora. U veľkých tokamakoch dochádzalo za 10 až 20 s [1] pri veľkých hodnotách elektrického prúdu v plazme k nasýteniu transformátorového jadra. Nasýtenie jadra je saturácia jadra, čiže preorientovanie všetkých domén jadra do smeru vonkajšieho magnetického poľa. V takom prípade sa magnetický indukčný tok v jadre prestáva meniť, transformátor prestáva fungovať a prúd v plazme sa v dôsledku toho znižuje na nulu. Magnetické pole v plazme sa tak zmení a častice z plazmy unikajú aj so svojou energiou na steny komory. Tým sa samozrejme znižuje fúzny výkon reakcie. V budúcej elektrárni by však mal byť dodávaný výkon pokiaľ možno konštantný.

Možné riešenia:

a) *Neinduktívna generácia (vlečenie) prúdu*. Zachováva smer prúdu v plazme. Do plazmy sa vpustí usmernené vysokofrekvenčné elektromagnetické vlnenie s frekvenciou blízkou dolnej hybridnej rezonančnej frekvencii, a to pred sebou „vlečie“ elektróny plazmy. Tok týchto elektrónov na čele takejto vlny tvorí potom elektrický prúd v plazme. Takýto vlečený prúd bol uskutočnený v tokamaku TORE SUPRA po dobu 6000 sekúnd [1].

b) *Automaticky generovaný prúd vznikajúci v toroidálnom smere kvôli nenulovému gradientu hustoty plazmy* [1]. Takto generovaný prúd sa v tokamakoch bežne pozoruje v režimoch s neinduktívnym vlečením prúdu. Jeho veľkosť je približne 10 až 20 % z celkového toroidálneho elektrického prúdu.

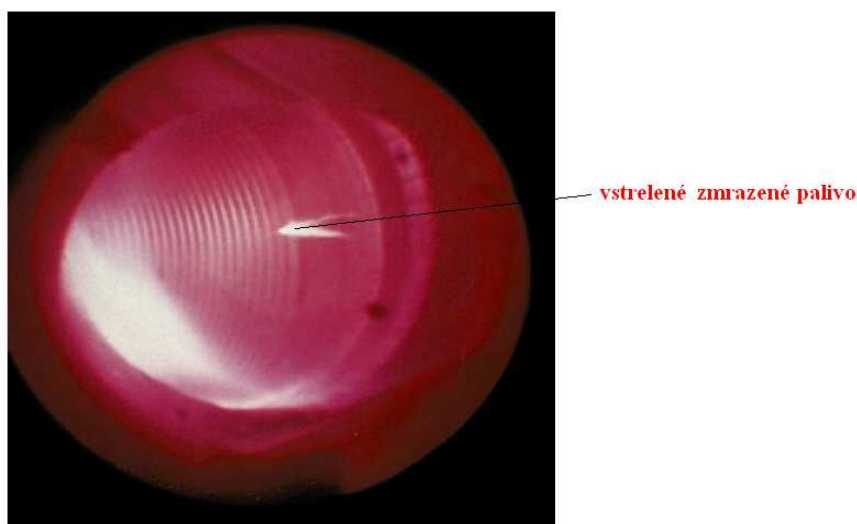
3.2 Doplnovanie vodíkového paliva do komory tokamaku

Ak by sme vodíkové palivo do komory vstrekovali v plynnom skupenstve s nie príliš vysokou rýchlosťou, tak by vplyvom silného magnetického poľa nedorazilo do oblasti osi komory, v ktorej má prebiehať termojadrová reakcia. V blízkosti stien vákuovej komory termojadrová reakcia prebiehať nemá - nie sú tam potrebné podmienky. Aj keby boli atómy tohto vodíkového plynu neutrálne, v dôsledku vysokých teplôt by sa ionizovali oveľa skôr, ako by dosiahli miesto reakcie. A nabité ich tam nepustí silné magnetické pole, pretože toto magnetické pole je konštruované na udržanie plazmy v blízkosti osy komory, a nie na prienik častíc zvonku.

Možné riešenia:

a) [1] Nadzvukové napúšťanie vodíkového plynu. V dôsledku veľmi vysokej rýchlosti stihne palivo dosiahnuť najteplejších oblastí plazmy predtým, ako mu v tom po ionizácii zabráni magnetické pole.

b) Vstreľovanie tabletiiek zmrazeného vodíka s veľmi vysokou rýchlosťou ($\approx 10\text{km/s}$ [1]) (obr. 3.1). Ionizácii v tomto prípade musí predchádzať ešte rozmrazenie a odparenie, takže palivo stihne dosiahnuť miesto reakcie.



Obrázok 3.1: Zmrazený vodík vstrelený do centra komory tokamaku [1].

3.3 Odvod nečistôt a splodín termojadrovej reakcie z tokamaku

Pri nepretržitom priebehu reakcie je nevyhnutné do tokamaku dodávať nové palivo. Preto je potrebné odvádzať nevyužitú zložku, ktoré by tam zavádzali. Nečistoty zo stien materiálov komory je potrebné odvádzať tiež. Nečistoty zvyšujú straty energie vyžarovaním brzdného žiarenia úmerného druhej mocnine ich protónového čísla Z (častica plazmy narazí do nečistoty, excituje ju a energia unikne vo forme fotónov). Tým sa plazma ochladzuje a zhoršujú sa podmienky na priebeh termojadrovej reakcie v blízkosti osi vákuovej komory. Kvôli vysokým teplotám a veľkému magnetickému poľu v komore je potrebné tieto splodiny odvádzať bezkontaktné – nezasahujúc nejakým materiálom do príliš horúcej časti plazmy. Takýto materiál by sa totiž vyparil.

Možné riešenia:

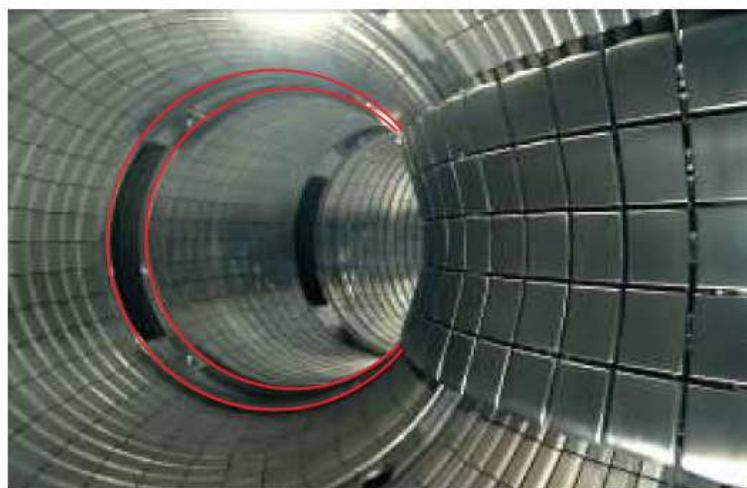
a) Použitie *limitera* (obr.3.2 a obr.3.3). Používa sa väčšinou pri okrúhlych poloidálnom priereze vákuovej komory. Vymedzuje hranice plazmy tak, aby jej okraj bol ďalej od stien komory tokamaku. Je však priamo v styku s „uväznenou“ / udržovanou časťou plazmy (tá časť, v ktorej sú uzavreté magnetické indukčné čiary) a preto nečistoty uvoľnené z jeho povrchu (vplyvom nárazov nabitých častíc plazmy) prechádzajú ľahko do jadra plazmy (plazmy v okolí osi komory) a tam zhoršujú podmienky termojadrovej reakcie. Neutrálne atómy a molekuly uvoľnené z jeho povrchu ionizujú. Plazma v jeho blízkosti je horúca a to ešte viac zvyšuje únik nečistôt z jeho povrchu do jadra plazmy.

Bol používaný aj na zníženie tepelného zaťaženia stien komory. Zachycuje nečistoty a splodiny reakcie. Musí byť vyrobený z tepelne vysoko odolného materiálu, napríklad molybdénu. Často sa používa prstencový limiter, ktorý obieha celé vnútro komory v toroidálnom smere a vymedzuje priemer udržovanej plazmy (obr.3.2). Okrajová plazma v jeho blízkosti má asi 10-krát menšiu teplotu ako približne 100 miliónov Kelvinov teplé jadro plazmy. Používajú sa aj limitere obiehajúce komoru v poloidálnom smere (obr.3.3). Častice v okrajovej časti plazmy (pri stenách komory), ktoré narážajú do poloidálneho limitera prejdú pred nárazom kratšiu dráhu ako v prípade toroidálneho limitera, pri ktorom najprv niekoľkokrát obehnú komoru a až potom narazia na jeho povrch. Nabitú časticu rôznych nečistôt

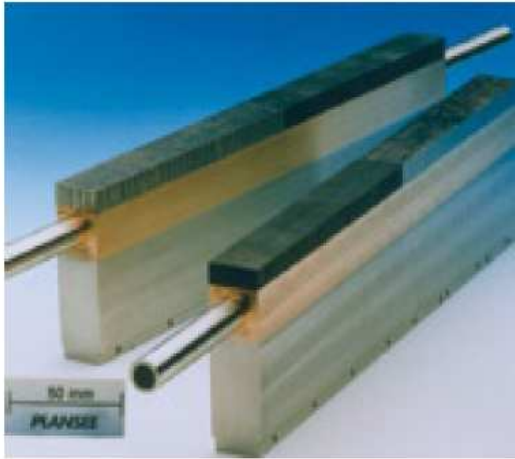
a splodín na limiteri rekombinujú a stávajú sa z nich neutrálne častice. Tie sa potom čerpajú. Toroidálny limiter je kovový prstenec umiestnený na jednom alebo viacerých miestach komory. Limiter je ešte viac tepelne namáhaný ako prvá stena vákuovej komory. V súčasnosti sú časti limiterov poskladané z vrstiev uhlíkových materiálov pripevnených (pomocou lasera a elektrónového zväzku) na bloky z medenej zliatiny (dobré tepelne vodivé) a chladených tlakovou vodou (obr. 3.4). Zvládnu aj tepelnú záťaž 10MW/m^2 [1].



Obrázok 3.2: Toroidálny limiter v nemeckom tokamaku TEXTOR [1].



Obrázok 3.3: Poloidálny limiter v tokamaku FTU – vyznačený červenou farbou [5].

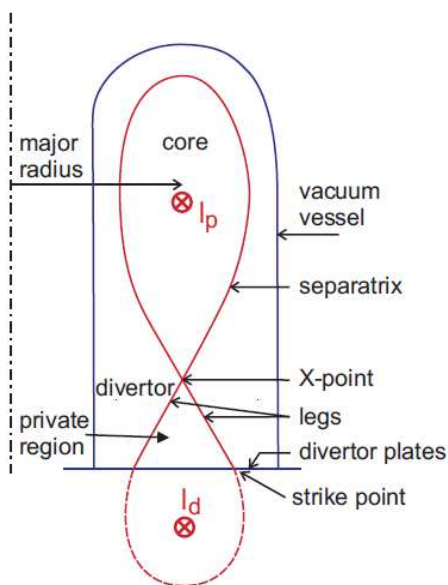


Obrázok 3.4: Časť toroidálneho limitera v tokamaku TORE SUPRA vo Francúzsku [1].

b) [5] Použitie *divertora*. Divertor sa používa v tokamakoch od polovice 70-tých rokov minulého storočia pri poloidálnom priereze vákuovej komory v tvare „D“. Tento tvar komory a príslušná konfigurácia magnetického poľa dovoľuje odkloniť okrajové otvorené magnetické indukčné čiary (v blízkosti stien komory) do priestoru divertora. Pri tejto konfigurácii vzniká takzvaný „X“ bod (obr. 3.5) a v ňom je slabé poloidálne magnetické pole (teoreticky nulové). Bod „X“ je dôsledkom osmičkového tvaru magnetického poľa vytvoreného toroidálnym plazmovým prúdom I_P a toroidálnym divertorovým prúdom I_D tečúcim toroidálnym vodičom prechádzajúcim divertorom. Toroidálny prúd I_D je vytváraný prídavnými poloidálnymi cievkami podobne ako prúd I_P v plazme (obr.3.5). V bode „X“ sa poloidálne magnetické polia prúdov I_P a I_D navzájom vrušia (teoreticky).

[5] Magnetické indukčné čiary vedúce k terčovým doskám (obr.3.5) v blízkosti X bodu sú dlhé a častice pohybujúce pozdĺž nich sa mnohokrát navzájom zrážajú. Tým sa vytvára veľký pokles teploty a v blízkosti terčových dosiek divertora je teplota menšia ako 5eV. Preto sa neutrálne častice uvoľnené z terčov divertora neionizujú v ich blízkosti. Prichádzajúci tok nabitých častíc sa zráža s týmto oblakom neutrálnych častíc a ich energia sa prenáša na neutrálne častice. Tie excitujú a vyžarovaním elektromagnetického žiarenia opäť deexcitujú. Tým sa ešte viac znižuje teplota okolo terčov divertora (menej ako 1eV) a nakoniec na nich môže tok prichádzajúcich nabitých častíc rekombinovať s elektrónmi a vytvárať tak neutrálnu vrstvu, ktorá sa dá odstrániť čerpaním napríklad kryopumpami/kryovývevami.

Súčasne je otvorených (vzhľadom k plazme) niekoľko púmp. Do danej pumpy sa podtlakom dostávajú zrekombinované neutrálne častice, ktoré sa napríklad „namrazia“ na chladné čerpace steny. Potom sa uzavrie ventil pumpy (ventily iných púmp v komore sú otvorené, takže čerpanie prebieha neustále počas reakcie/výboja), pod ním sa chladná čerpacia stena ohreje a častice sa uvoľnia a následne odčerpajú vývevou.



Obrázok 3.5: Nákres konfigurácie magnetického poľa za použitia divertora [5].

V prípade divertora je navyše udržiavaná plazma s uzavretými magnetickými indukčnými čiarami mimo pevných povrchov (pri limiteri sa jej hranica dotýka limitera) a preto je aj čistejšia – obsahuje menej nečistôt ako v prípade použitia limitera. Pri použití divertora sa dá oveľa ľahšie dosiahnuť H-mód (high confinement mode), teda režim s asi 2-krát lepším udržaním častíc a energie plazmy ako pri bežnom L-móde (low confinement mode). H-mód bol objavený v roku 1981 na tokamaku ASDEX.

Na divertorových zberných/terčových doskách (odolných voči vysokým teplotám) sa zachycujú nečistoty uvoľňované zo stien komory (uhlík, kyslík,...), nečistoty, ktoré prenikli do komory mikroškárkami a vznikajúce atómy He (koncentrácia He v komore musí byť menšia ako 5-10%, aby mohla prebiehať termojadrová reakcia). Zachycuje sa na nich aj vodíkové palivo, ktoré nestihlo do času zachytenia na divertore zhorieť, ale viac sa na divertore zachycujú ťažké

nečistoty ako ľahké palivo. V okrajovej plazme, z ktorej sa prevažne častice čerpajú, je viac nečistôt ako paliva, takže sa zbierajú prevažne nečistoty. Nazbierané nespálené palivo je možné znovu využiť - dopraviť do komory.

Divertor je možné vymieňať napríklad diaľkovo, pomocou robotickej paže. Je veľmi tepelne namáhaný. Na jeho výrobu sa používa najmä volfrám, v menšej miere aj zmesi uhlíkových vlákien, a pridávajú sa aj zlúčeniny titánu a molybdén.

[1] Výhody uhlíkových vlákien: dobrá tepelná odolnosť; dostatok skúseností v tokamakoch.

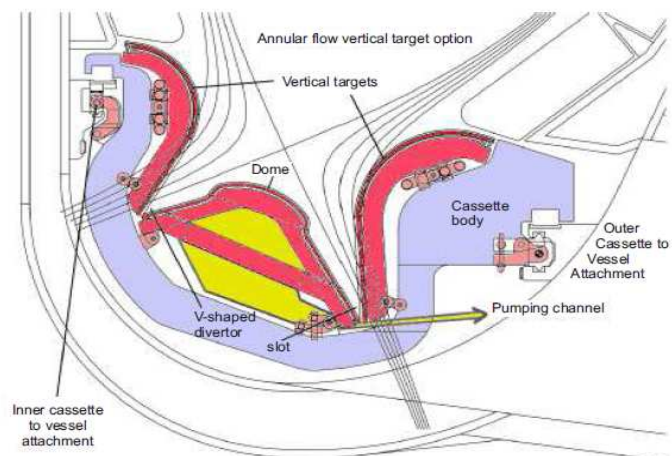
Nevýhody uhlíkových vlákien: uvoľňuje sa z nich množstvo uhlíkového prachu - rozprašovanie; usadzuje sa na nich veľa trícia (a trícium je rádioaktívne, preto sa tieto nánosy trícia musia pravidelne odstraňovať).

Výhody volfrámu: nízka rýchlosť rozprašovania; slabšie usadzovanie trícia.

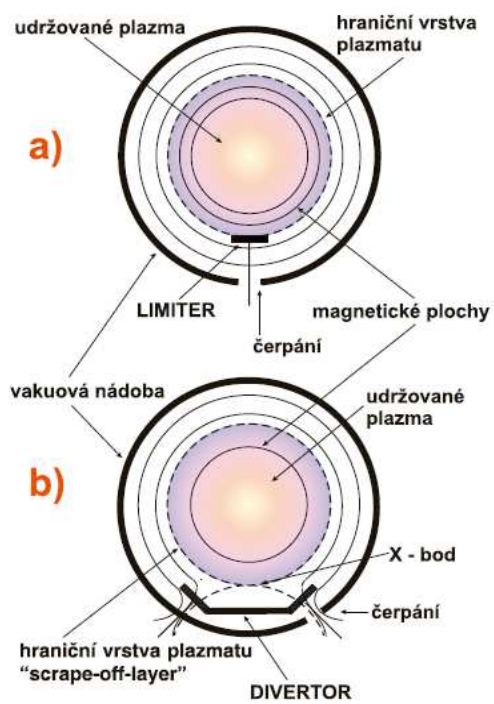
Nevýhody volfrámu: topenie; krehnutie po rekryštalizácii; veľké straty vyžarovaním elektromagnetického žiarenia úmerného druhej mocnине protónového čísla Z (veľké $Z=74$).



Obrázok 3.6: Model divertora [1].



Obrázok 3.7: Schéma divertora navrhovaného pre budúci ITER (viď kapitola 4) [5].



Obrázok 3.8: Limiter a divertor [1].

3.4 Nestability a turbulencie v plazme tokamaku

3.4.1 Nestability v plazme [7]

Nestability v plazme vedú k turbulencii plazmy a predstavujú veľmi podstatný problém, ktorý dosiaľ nie je vyriešený. Ako som už spomínal vyššie, špirálovité magnetické pole eliminuje (a v jednoduchom prípade ruší) drifty častíc, ale častice sa môžu pohybovať k stenám nádoby aj v špirálovitom magnetickom poli v dôsledku iných javov. Napríklad difúziou (vzájomnými zrážkami), turbulenciou alebo inými driftami, spôsobenými vzniknutými nestabilitami. To vytvára plazmu nestabilnú, rozpadá sa - uniká k stenám vákuovej komory. Väčšina (via ako 90%) plazmy uniká na steny komory tokamaku v dôsledku turbulencií. V dôsledku nestabilit v plazme je nestabilné aj udržiavacie špirálovité magnetické pole (špirálovité pole je výsledné magnetické pole a podieľa sa na ňom aj samotná plazma). Tieto javy mnohokrát až o niekoľko rádov zvyšujú únik častíc a tým aj energie na prvú vnútornú stenu vákuovej komory. Tým sa nielen tepelne zaťažuje a poškodzuje prvá stena vákuovej komory (výkonom 1 až 10 MW/m²), ale hlavne sa znemožňuje udržanie podmienok termojadrovej reakcie v blízkosti osi komory tokamaku. Pretože únikom častíc sa stráca palivo a ochladzuje okolie reakcie.

Ak by sa jednalo len o magnetické udržanie jednotlivých častíc plazmy, ktoré sa nezrážajú a neovplyvňujú, bolo by to jednoduché. Stačilo by zvoliť také vonkajšie magnetické pole, ktorého siločiarly nepretínajú steny vákuovej komory a takú symetriu systému, pri ktorej by driftы častíc (rovnice (2.1), (2.2)) boli rovnobežné s vonkajšími stenami. Ale plazma je ako makroskopický celok udržateľná len veľmi ťažko. Jednotlivé jej časti (ktoré sa navyše chaoticky menia) môžu vytvárať vnútorné elektrické pole spôsobujúce nový $\vec{E} \times \vec{B}$ drift k stenám komory, alebo pohyb častíc v plazme môže vytvárať prúdy vytvárajúce $\nabla B \times \vec{B}$ drift k stenám komory. Napríklad driftы (2.1), (2.3), (2.4) oddeľujú elektróny a kationy, a tým vytvárajú nové vnútorné elektrické polia, ktoré zase zapríčiňujú ďalšie driftы. Ak by sme aj vonkajšie polia zložitými spôsobmi uspôsobili na udržanie plazmy, stále môžu vznikať, a vznikajú, vnútorné polia, ktoré neudržiajú plazmu. Takže rôzne driftы môžu vznikať v podstate na rôznych miestach plazmy v rôzny čas (chaoticky). A ak nevieme predpovedať chaotické správanie plazmy, tak ťažko zabránime jej rozpadu-úniku na steny komory. Preto sa aj v súčasnosti počíta skôr s obmedzením úniku

častíc (rozpadu plazmy v magnetických nádobách) ako s ich úplným udržaním. A ak sa to podarí obmedziť aspoň na únosnú mieru, tak by sa mohla využívať (čo sa týka základného problému nestability plazmy) termonukleárna reakcia na energetické účely.

Pod slovom *nestabilita* rozumieme zmenu (častokrát vlnu), ktorá znižuje voľnú energiu plazmy (premieňa ju napríklad na vlny) a privádza ju tak bližšie k termodynamickej rovnováhe (pri prechode do termodynamickej rovnováhy prechádza entropia systému do svojho maxima a termodynamické potenciály, ako napríklad aj voľná energia, prechádzajú do svojho minima). Nestability vznikajú v reálnej plazme, ktorá nie je v úplnej termodynamickej rovnováhe (častice nemajú presne Maxwellovo rýchlostné rozdelenie, hustota a magnetické pole nie sú úplne homogénne). Takáto plazma môže byť len v nestabilnej rovnováhe.

Najzákladnejšia nestabilita, ktorá iniciuje turbulencie vo väčších rozmeroch je *Rayleighová-Taylorová nestabilita*. V jej prípade existuje gradient hustoty, alebo je plazma ostro ohraničená (nie je homogénna) a okrem elektromagnetickej sily na plazmu pôsobí aj nejaká iná vonkajšia sila. Príklad je *gravitačná nestabilita*, pri ktorej je tá „iná“ vonkajšia sila väčšinou gravitačná sila. Známy príklad z hydrodynamiky na gravitačnú nestabilitu je rozhranie dvoch rôzne hustých tekutín v gravitačnom poli (obr.3.9). Hustejšia tekutina (napríklad voda) je nad redšou tekutinou (napríklad olej).



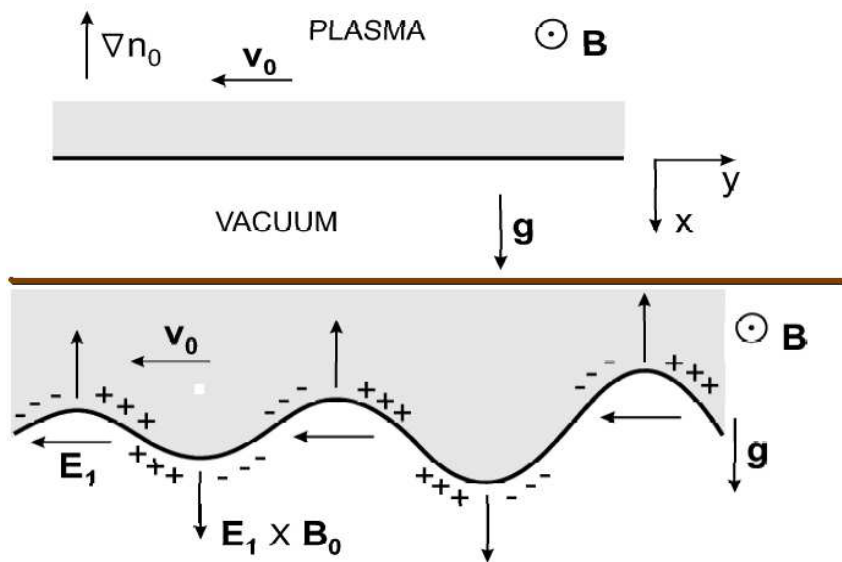
Obrázok 3.9: Rayleighová-Taylorová nestabilita vzniknutá na rozhraní hustejšej (hore) a redšej (dole) tekutiny v gravitačnom poli [8].

Samotný tlak pod redšou tekutinou by zabránil vytečeniu hustejšej tekutiny z nádoby na obr. 3.9. Ale táto rovnováha je nestabilná, stačí malá porucha (vlnka) na rovnom rozhraní, a táto porucha sa začne exponenciálne zväčšovať (vývoj gravitačnej

nestability). Zvlnenie potom rastie. Nestabilita čerpá energiu z gravitačnej potenciálnej energie hustejšej tekutiny. V plazme tokamakov vzniká rovnaká nestabilita, ale gravitačná sila je tam v porovnaní s elektromagnetickou silou zanedbateľná. Rolu gravitačnej sily tam hrá skôr odstredivá sila poloidálneho prúdenia alebo drifty vyjadrené rovnicou (2.1).

Úlohu redšej tekutiny môže mať aj magnetické pole vo vákuu, ktoré je pod plazmou (hustejšou tekutinou) - obr.3.10. V prípade vzniku malej vlnky na rozhraní (tepelné fluktuácie), gravitačný drift častíc (druhý člen rovnice (2.2)) spôsobí nahromaždenie kladných častíc na jednej strane vlnky a záporných častíc na druhej strane vlnky. Takto vznikne elektrické pole \vec{E}_1 kolmé na \vec{g} aj \vec{B} . Je opačne orientované na hrebeni vlny ako v jej údolí (viď obr. 3.10). Správne sfázovanie horného a dolného driftu $\vec{E}_1 \times \vec{B}$ (teda na jednom mieste pôsobí hore, vedľa dole, potom zase hore atď., „atď.“ = a tak ďalej) spôsobí rast zvlnenia.

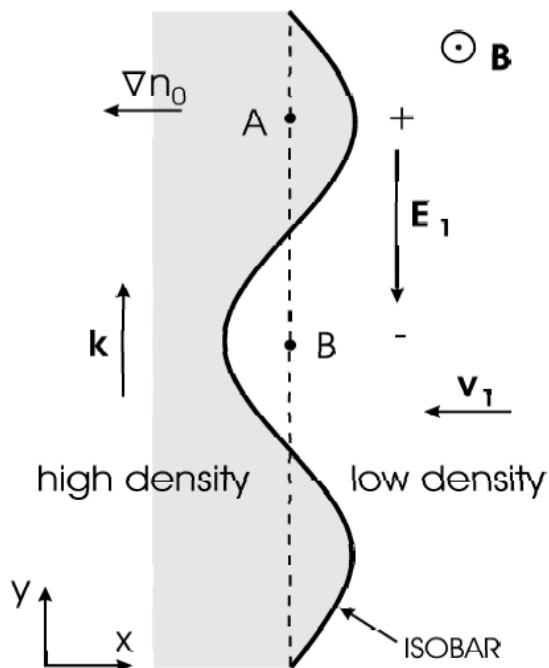
Gravitačná nestabilita zvyčajne vyvoláva v tokamakoch vlny kolmé na magnetické pole šíriace sa v poloidálnom smere.



Obrázok 3.10: Gravitačná nestabilita. Hore je stav pred vznikom nestability (rovnováha), dole je (oddelené hnedou čiarou) rozvíjajúca sa nestabilita - vznik vlnenia [8].

Ďalším typom nestabilít sú univerzálne nestability, vznikajúce v každej priestorovo obmedzenej plazme a to aj bez značných vonkajších síl. Univerzálna nestabilita je vyvolaná rozpínaním plazmy v dôsledku plazmatického tlaku. Príkladom tejto nestability sú driftové vlny. Ich vlnový vektor má na rozdiel od vln gravitačnej nestability okrem poloidálnej (všeobecne kolmej na ∇p aj \vec{B}) zložky aj zložku rovnobežnú s \vec{B} (\vec{B} pri nej musí byť prítomné). Plazmatický tlak je rušený magnetickým tlakom $B^2/(2\cdot\mu_0)$, kde μ_0 je permeabilita vákua. Princíp vzniku driftových vln je na obr. 3.11.

Hlavnú rolu pri driftových vlnách hrá diamagnetický drift (rovnica (2.5)). Ten zapríčiňuje pri malej poruche nahromadenie častíc kladného náboja na jedno miesto a záporného náboja na iné miesto a teda vznik elektrického poľa (označeného rovnako ako pri gravitačnej nestabilite) \vec{E}_1 . To vyvolá nový drift $\vec{E}_1 \times \vec{B}$, ktorý osciluje v čase a napomáha tak oscilácii hustoty nabitých častíc. Oscilácia driftu $\vec{E}_1 \times \vec{B}$ (alebo oscilácia \vec{E}_1) je oneskorená (fázovo posunutá) za osciláciou hustoty častíc, preto sú vzniknuté vlny nestabilné (porucha narastá). Driftové vlny sa môžu vytvoriť v akejkoľvek plazme s nenulovým gradientom hustoty, ale existujú spôsoby na úplné zastavenie rastu tejto nestability pomocou nehomogénneho magnetického poľa.

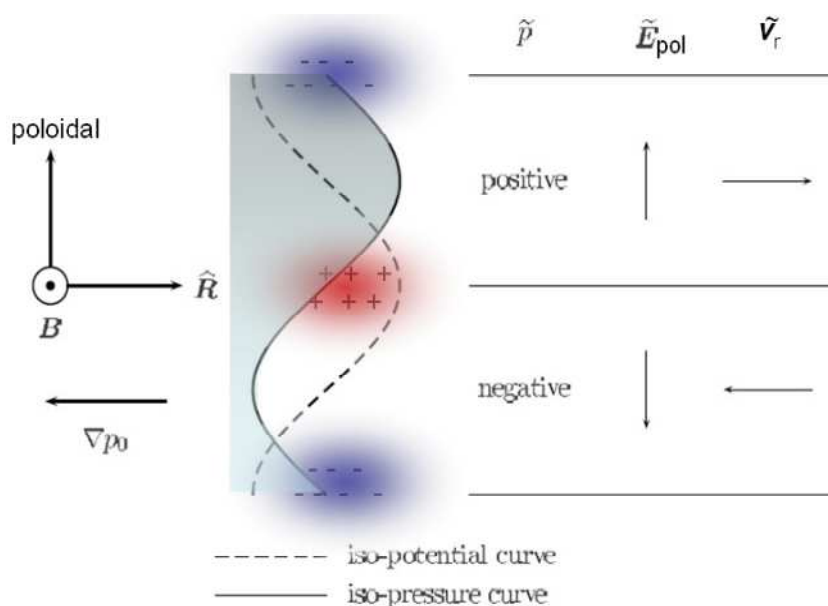


Obrázok 3.11: Fyzikálny mechanizmus driftovej vlny [8].

V tokamakoch vzniká vo výnimočných prípadoch aj zväzková nestabilita spôsobená elektrickým prúdom v plazme. Energia tohto elektrického prúdu excituje vlny. Oscilácie získavajú energiu z elektrického prúdu.

Proti gravitačnej a driftovej nestabilite je účinné špirálovité magnetické pole v tokamakoch. Na dynamickú stabilizáciu plazmy sa používajú aj oscilujúce elektrické a magnetické polia. Účinnou metódou je aj stabilizácia spätnou väzbou, pri ktorej na plazmu pôsobí sila (spôsobená napríklad vonkajšou cievkou) vo vhodnej fáze a tak potlačuje nestabilitu.

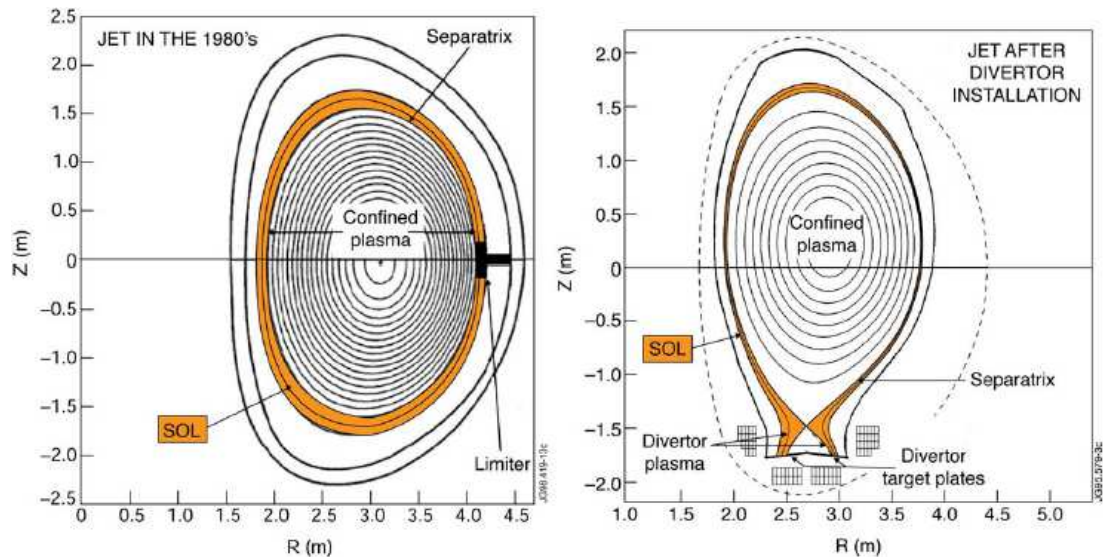
Podobnou nestabilitou ako je gravitačná a driftová nestabilita je výmenná nestabilita (interchange instability) znázornená na obr. 3.12. Ak vznikne malá napr. tepelná fluktuácia (vlnka), driftы (2.1) spôsobia presun náboja na okrajoch vlnky tak, ako je to znázornené na obr. 3.12. Periodický priebeh potenciálu je tak posunutý o fázu $\pi/2$ voči periodickému priebehu tlaku. Vzniknuté elektrické pole vytvorí drift vyjadrený prvým členom rovnice (2.2) a ten vytláča „vyduté“ miesta plazmy ďalej proti gradientu tlaku a „doliny“ zatláča viac v smere gradientu tlaku, takže zväčšuje pôvodnú výchylku/fluktuáciu. Toto sa deje v tokamakoch na strane menšieho magnetického poľa, teda na stene vákuovej komory ďalej od stredu torusu. Na vnútornej strane komory, bližšie k stredu torusu, je však na okraji plazmy gradient tlaku presne v opačnom smere. V týchto miestach preto táto nestabilita vlastne stabilizuje vzniknuté malé výchylky/vlnky/fluktuácie.



Obrázok 3.12: Fyzikálny mechanizmus výmennej nestability [6].

Pri nestabilitách plazmy je dobré zamerať sa na okrajovú plazmu, lebo práve tá je najviac nestabilná a uniká na steny vákuovej nádoby. Okraj plazmy je plazma v okolí tzv. magnetického separatrix. Slovo separatrix pochádza z angličtiny. Používa sa preň aj skratka LCFS (last closed flux surface). V smere od osi poloidálneho prierezu komory je to posledná plocha tvorená uzavretými magnetickými indukčnými čiarami. Za ňou bližšie k stenám komory sú indukčné čiary otvorené – končia na nejakom tuhom telese. Separatrix je znázornená na obr.3.13. Jednotlivé časti na tomto obrázku budú postupne zrejme z ďalšieho textu. Pri použití limitera v tokamaku je separatrix určená limiterom (jeho okrajom). Od separatrix smerom k osi vákuovej nádoby sa nachádza uväznená plazma s uzatvorenými magnetickými indukčnými čiarami a smerom k stenám nádoby od separatrix sa nachádza hraničná SOL vrstva plazmy. SOL je skratka z angličtiny (Scrape-Off Layer) a predstavuje plazmu s otvorenými indukčnými čiarami (končiacimi na limiteri, za predpokladu jeho použitia v tokamaku). SOL obsahuje nečistoty uvoľnené zo stien komory. V nej sú turbulencie (a nežiaduce prúdenia) väčšie ako kdekoľvek inde v plazme vnútri vákuovej komory. Ohraničuje ju LCFS a vnútorná stena komory. Jej šírka je zvyčajne 1cm-3cm. Plazma v SOL má v dnešných tokamakoch teplotu 1-100 eV, jednotlivé častice v nej zotrávajú 0,4 – 4 ms, kým narazia na tuhú stenu komory, divertora alebo limitera [5].

Pri H-móde spomínanom pri divertore (v podkapitole 3.3) sa v oblasti separatrix vytvára transportná bariéra. Mechanizmy jej vzniku však nie sú zatiaľ dobre známe. Všeobecne sa predpokladá, že pri vzniku tejto transportnej bariéry hrá dôležitú úlohu spontánne vznikajúce radiálne elektrické pole \vec{E}_r (v smere hlavného polomeru). Toto pole \vec{E}_r spolu s toroidálnym magnetickým poľom \vec{B} spôsobuje $\vec{E}_r \times \vec{B}$ drift a tým aj rotáciu plazmy v poloidálnom smere. Pritom sa potlačuje turbulencia okrajovej plazmy a vznikne bariéra pre prechod častíc a tepla od osi k stene komory.



Obrázok 3.13: Okraj plazmy [9].

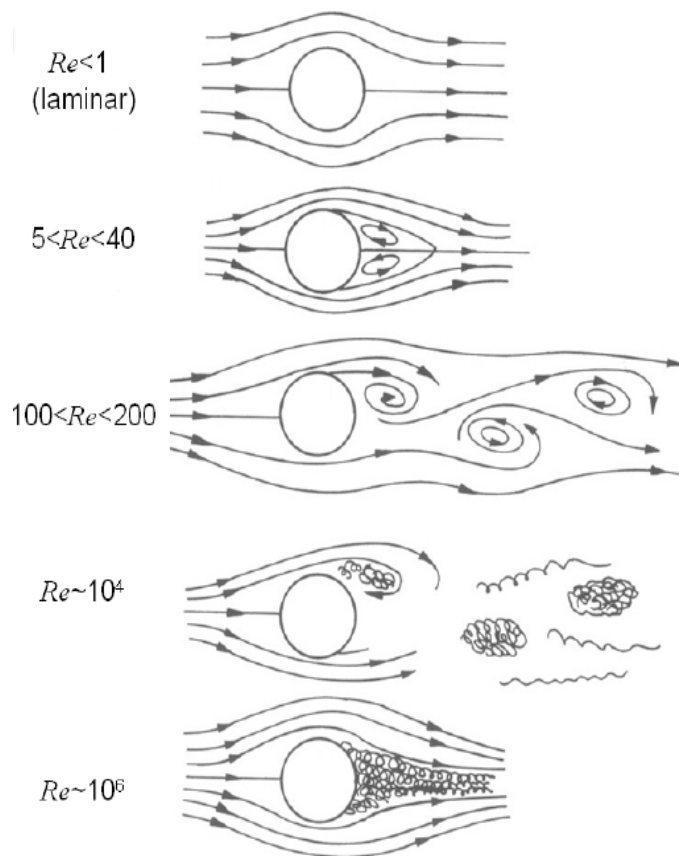
3.4.2 Turbulencie v plazme [6]

Turbulencie sú nerovnomerné v čase aj priestore. Vyjadrujú neporiadok, rozrušenie, nepravidelnosť. Vyskytujú sa bežne v tekutinách. Ich štúdium je potrebné pri prúdení vody (napr. morské prúdy), pri prúdení vzduchu (vzdušné prúdy, odpor vzduchu,...) alebo pri predpovedi počasia. Je to časť fyziky, ktorá zatiaľ nie je dobre preskúmaná. O turbulenciách sa hovorí ako o poslednom veľkom nevyriešenom probléme klasickej fyziky. Ak do miesta turbulencie neprúdi zvonku energia, vplyvom trenia zanikne. V plazme turbulencie charakterizujú nepravidelné stavy ďaleko od rovnováhy.

Turbulencie sa vyznačujú:

- 1) nepravidelnosťou alebo náhodnosťou: Preto na ich popis musíme používať štatistiku a teóriu pravdepodobnosti. Výsledky sú teda nepredvídateľné, dajú sa predpovedať len s istou, nie veľkou pravdepodobnosťou. Je potrebné počítať s viacerými alternatívami naraz.
- 2) fluktuáciami na malých aj veľkých rozmeroch
- 3) rýchlym premiešavaním hmoty silno ovplyvňujúcim transport častíc a energie
- 4) nelineárnymi interakciami

Popis turbulencie vyžaduje veľké množstvo obyčajných alebo parciálnych diferenciálnych rovníc. Naproti tomu na popis chaosu (napríklad pohyb dvojitého kyvadla) stačí malé množstvo obyčajných diferenciálnych rovníc.



Obrázok 3.14: Turbulencie pri prúdení tekutiny cez valcovú prekážku pre rôzne Reynoldsové čísla „ Re “ [6].

Napriek približne storočnému úsiliu neexistuje jednotná teória turbulencií, ktorá by ako v prípade kvantovej mechaniky alebo kinetickej teórie, dokázala spriemerovať náhodné hodnoty veličín pre jednotlivé častice a podať nenáhodný, makroskopicky predpovedateľný popis/model (dostatočne presné pravdepodobnosti). Vynašli sa len teórie pre konkrétne prípady, ale nie zjednocujúce teórie vysvetľujúce množstvo prípadov súčasne. Zatiaľ vedľa ľudí predpovedať napríklad len rýchlosť prenosu energie medzi turbulenciou a okolitým prúdom tekutiny, rozdelenie energie medzi rôzne veľkými vírmi, alebo dokázu v plazme spriemerovať rýchlosť prenosu nečistôt.

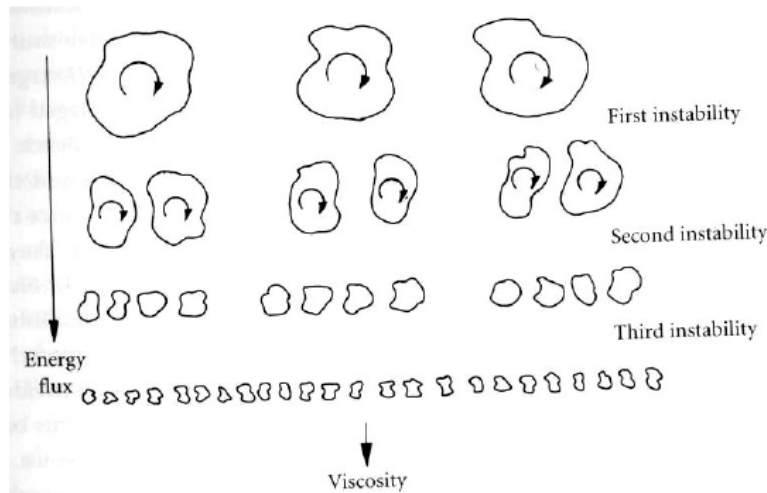
Prechod od lineárneho do turbulentného stavu sa dá popísať bezrozmerným Reynoldsovým číslom

$$Re = V \cdot d / \nu , \quad (3.1)$$

kde V je relatívna rýchlosť prekážky a tekutiny; d je rozmer (veľkosť) prierezu kolmého na smer prúdenia (pri kvapalinách tzv. hydraulický priemer) a ν je kinematická viskozita tekutiny.

Hydraulický priemer pre kvapalinu prúdiacu v celom objeme valca je $d =$ priemer valca. Pre kanály úplne zaplnené prúdiacou kvapalinou, ktoré majú prierez v tvare pravidelného monohouholníka je $d =$ priemer vpísanej kružnice, čiže napríklad pre prierez v tvare kocky so stranou L je $d = L$. Na obr.3.14 môžeme za „ d “ zvoliť priečny rozmer obtekajúceho telesa.

Ukazuje sa za vhodné popisovať turbulencie v tekutine (alebo plazme) ako superpozíciu rôzne veľkých vírov. Prenos energie medzi rôzne veľkými vírmi ich však neustále mení, preto je prúdenie náhodné. Podľa Kolmogorovej teórie, [6] je energia dodaná turbulentnému prostrediu obsiahnutá najprv vo veľkých rozmeroch (veľké víry), a potom sa postupne prenáša do stále menších rozmerov (malých vírov). Teda veľké víry sa rozpadávajú do malých vírov s tou istou rýchlosťou prúdenia. To nazývame aj disipácia energie. Malé víry sa ďalej zmenšujú (ich počet sa zväčšuje) a najmenšie „ d “ v rovnici (3.1), pri ktorom ešte víry existujú sa nazýva disipačná veľkosť. Určuje približne rozmer/veľkosť najmenších vírov (obr. 3.15). Pri menších „ d “ je už Re v rovnici (3.1) menšie ako 1, teda prúdenie už nie je vírivé, ale laminárne. Pri laminárnom prúdení totiž dominuje viskozita, ktorá pri ňom neumožňuje existenciu vírov. Pri ďalšom dodaní energie môžu v mieste, v ktorom zanikli predchádzajúce víry, vzniknúť nové víry.



Obrázok 3.15: Energia vložená do veľkých štruktúr „rozbíja“ tieto štruktúry do menších štruktúr (vírov), až nakoniec víry zaniknú disipáciou [8].

Kolmogorov postuloval závislosť

$$\epsilon \approx V^3/l, \quad (3.2)$$

kde ϵ je energia na jednotku hmotnosti a za jednotku času, vložená do turbulentného prostredia (obsiahnutá vo veľkých štruktúrach - víroch); V a l je podobne ako v (3.1) rýchlosť prúdenia hmoty vo víroch a veľkosť vírov.

Pre hmotnostnú hustotu E_k/m , kinetickej energie turbulentnej hmoty, potom platí

$$\frac{E_k}{m} \sim V^2 \sim \epsilon^{2/3} \cdot k^{-2/3} \sim f^{-2/3}, \quad (3.3)$$

kde $k \sim 1/l$ je veľkosť vlnového vektora vln v turbulentnom prostredí a $f=k \cdot V$ je frekvencia vln v turbulentnom prostredí, \sim tu znamená „úmerne/úmerný“.

Kvôli veľkým rýchlostiam častíc v toroidálnom smere (približne v smere magnetických indukčných čiar) sú v SOL víry v tomto smere výrazne pretiahnuté, a môžu sa presúvať aj v poloidálnom alebo radiálnom smere.

Plazmu môžeme v určitom priblížení považovať za tekutinu, dokonca za kontinuum a aplikovať na ňu Navierovu-Stokesovu rovnicu (pohybovú rovnicu – 1.Newtonov zákon) pre nestlačiteľnú viskóznou (s kinematickou viskozitou ν) tekutinu, a tiež rovnicu kontinuity. Tieto dve rovnice zapísané v zložkách majú tvar:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \quad (3.4)$$

$$n \cdot \left(u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_i}{\partial t} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \cdot \left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \right), \quad (3.5)$$

$i, j=1,2,3$; n je hustota plazmy; u_i sú zložky rýchlosti prúdenia plazmy; p je tlak v plazme; μ je dynamická viskozita plazmy.

Rovnica (3.5) vedie pre $Re = V \cdot d/\nu$ väčšie, ako istá kritická hodnota, k turbulentnému prúdeniu plazmy s chaotickým správaním. Keď chceme predpovedať nejaké správanie plazmy, ktorá sa chová chaoticky, nezostáva nám pravdepodobne nič iné ako spriemerovať veličiny a snažiť sa predpovedať/vypočítať vývoj aspoň priemerných hodnôt veličín. Preto do rovníc (3.4) a (3.5) dosadíme vyjadrenie veličín obsahujúce chaotické odchýlky \tilde{u}_i a \tilde{p} . Teda $u_i = \bar{u}_i + \tilde{u}_i$, $p = \bar{p} + \tilde{p}$. Pohybovú rovnicu (3.5) potom vhodne upravíme, obidve rovnice časovo spriemerujeme a zo spriemerovanej, upravenej pohybovej rovnice využitím spriemerovanej rovnice kontinuity, dostaneme túto rovnicu (celý postup je pekne rozpísaný v [10]):

$$n \cdot \left(\bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} \right) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \cdot \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - n \cdot \overline{\tilde{u}_i \cdot \tilde{u}_j} \right), \quad (3.6)$$

$\mu \cdot \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}$ je napätie v plazme spôsobené viskozitou plazmy a nový člen $n \cdot \overline{\tilde{u}_i \cdot \tilde{u}_j}$ je takzvané Reynoldsovo napätie. Je dôsledkom turbulentných fluktuácií plazmy (konkrétne fluktuácií jej rýchlosti prúdenia). Objavuje sa po spriemerovaní týchto fluktuácií. Na rozdiel od napätia spôsobeného viskozitou, ktoré premieňa kinetickú energiu prúdenia na teplo, Reynoldsovo napätie umožňuje prenos kinetickej energie prúdenia plazmy do turbulencií a prenos energie turbulencií do kinetickej energie prúdenia (zjednodušene povedané, radiálny transport plazmy spôsobený turbulenciami spôsobuje radiálny elektrický prúd \vec{j}_r a Lorentzova sila v smere $\vec{j}_r \times \vec{B}$ stáča plazmu nahor v poloidálnom smere).

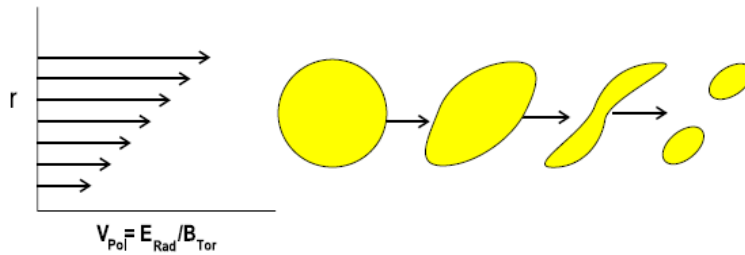
Na predpovedanie časového vývoja priemerov veličín potrebujeme dynamickú rovnicu pre $\overline{\tilde{u}_i \cdot \tilde{u}_j}$. Ak pre ňu použijeme Navierovu-Stokesovu rovnicu a spriemerujeme ju, objaví sa nám v nej trojitý člen $\overline{\tilde{u}_i \cdot \tilde{u}_j \cdot \tilde{u}_k}$. Pri jeho počítaní dostaneme rovnicu so štvoritým členom atď. Stále takto budeme mať o jednu neznámu viac, ako je rovníc. To je takzvaný uzatvorený problém turbulencie

(anglicky: closure problem of turbulence). To znamená, že iba pomocou pohybových rovníc nedostávame predpovedateľný štatistický model turbulencie (kvôli chaotickým odchýlkam veličín od stredných hodnôt). Aby sme dostali výsledok, musíme pri jednotlivých modeloch prijať nejaké predpoklady navyše.

Dôsledky Reynoldsovho napätia nie sú ešte dobre známe. Možno je spojený s generáciou prúdov. Alebo súvisí s priečnym turbulentným transportom plazmy v SOL do stabilných, pozdĺžnych (voči magnetickej indukcii) prúdov. Reynoldsovo napätie môže súvisieť aj s občasným generovaním stabilných zonálnych prúdov malými turbulentnými vírmi. Zonálne prúdy (anglicky: zonal flows) sú prúdy plazmy väčšinou v poloidálnom smere.

$\vec{E} \times \vec{B}$ drift vyjadrený rovnicou (2.2) (ale tentokrát je elektrické pole radiálne- môže byť napríklad externé) zapríčiňuje poloidálne prúdenie. V dôsledku gradientu radiálneho elektrického poľa (a šmykového trenia v plazme) sa však rôzne vrstvy plazmy pohybujú rôzne rýchlo. Čiže $\frac{dv_{pol}}{dr} \neq 0$, kde v_{pol} je poloidálna rýchlosť prúdenia závislá na radiálnej vzdialenosti „ r “. Schématicky je to zakreslené na obr.3.16. Tým sa koherentné (približne stredovo symetrické) štruktúry „trhajú“ v poloidálnom smere a vzniká akási bariéra pre radiálny transport častíc. To kvôli tomu, že plazmové štruktúry putujúce v radiálnom smere sú „trhané“ a ťahané v poloidálnom smere. Podobný efekt sa deje aj v toroidálnom smere (približne rovnobežnom s indukciou magnetickeho poľa), pretože $\frac{dv_{tor}}{dr} \neq 0$. Ale štruktúry plazmy sú v tomto smere asi 1000 krát dlhšie, zatiaľ čo v_{tor} len asi 10 krát väčšie, ako v poloidálnom smere. Teda efekt „trhania“ koherentných štruktúr je v toroidálnom smere menší ako v poloidálnom smere.

Príklad na bariéru v radiálnom transporte častíc, teda znižovanie rýchlosti častíc pohybujúcich sa v radiálnom smere (k okrajom komory tokamaku povedzme), je H-mód. Ako už bolo spomenuté vyššie, pri H-móde vzniká gradient tlaku (transportná bariéra) v okrajovej plazme, čo podstatne zlepšuje energetické a časticové udržiavanie plazmy. Proces znázornený na obr.3.16 zároveň potláča turbulencie (znižuje turbulentnú kinetickú energiu) v plazme.



Obrázok 3.16: Deštrukcia koherentných štruktúr plazmy radiálnou zmenou poloidálnej (alebo aj toroidálnej) rýchlosti prúdenia plazmy [8].

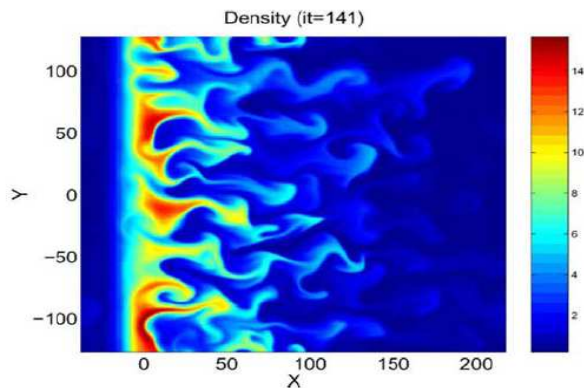
3.4.3 Niektoré pojmy v teórii nestabilití a turbulencií [8]

V súvislosti s nestabilnými systémami sa používa anglický pojem „*Self-organized criticality*“, ktorý budem ďalej označovať často používanou skratkou SOC. Voľný preklad by mohol byť „samo-organizovaná kritickosť“. SOC systémy sú systémy, ktoré sa stanú nestabilné po prekonaní nejakého kritického prahu. Ako príklad SOC systému použijem kopy piesku. Pri kope piesku je kritický prah kritický sklon kopy. Ten je udržiavaný rovnováhou tiažovej sily pôsobiacej na zrná piesku a statickej trecej sily medzi jednotlivými zrnami piesku. Pri zväčšovaní sklonu môžeme dosiahnuť kritický sklon - najväčší dovolený sklon. Okrem kritického prahu sú pri SOC systémoch dôležité ešte časové rozsahy. Jeden v súvislosti s pohonom systému (pridávanie/púšťanie zrn na nejaké miesto kopy piesku, napríklad na vrch) a druhý v súvislosti s nestabilnou relaxáciou systému (periódy lavín v kope piesku). Pri púšťaní zrn na vrch kopy piesku sa zväčšuje sklon kopy. Po prekročení kritického sklonu nastane posun väčšieho množstva zrn a sklon lokálne poklesne pod kritickú hodnotu. Tým sa však v blízkom okolí zväčší sklon nad kritickú hodnotu a opäť nastane posun väčšieho množstva zrn, tentokrát tých susedných. A proces sa ďalej opakuje. Odchýlky sa môžu takto šíriť po okolí ako lavína.

Analógiu s kopou piesku môžeme urobiť aj pri nestabilitách okrajovej plazmy v tokamaku:

- a) radiálny tlakový gradient v okrajovej plazme – sklon kopy piesku

- b) jednotlivé ióny plazmy pohybujúce sa po špirálovitých dráhach - jednotlivé zrná piesku
- c) zakrivenie magnetických indukčných čiar, rôzne driftы (rovnice (2.1), (2.2)) – tiažová sila
- d) prah vznikania nestabilít – statické trenie medzi zrnami piesku
- e) disipácia energie vírov (turbulencií) na malých rozmeroch a rýchlosť posuvu jednotlivých vrstiev plazmy - dynamické trenie medzi jednotlivými zrnami



Obrázok 3.17: Nestability v hustote, v okrajovej SOL plazme. X -ová os predstavuje radiálny smer (od stredu poloidálneho prierezu k vnútorným stenám komory tokamaku) a y -ová os predstavuje poloidálny smer – vytvorené pomocou 2D modelu fyzika Sarazina [6].

Ďalším pojmom v teóriách nestabilít a turbulencií je samo-podobnosť (anglicky: *self-similarity*). Objekt je samo-podobný vtedy, ak sa pri dívaní na jeho stále menšie detaily nemení jeho štruktúra a vzhľad (a teda ani jeho štatistické vlastnosti). Typickým príkladom sú fraktály. Pri ich optickom zväčšovaní je ich štruktúra stále rovnaká, ideálne pri ľubovoľnom optickom zväčšení. Niektoré objekty sú len štatisticky samo-podobné. Pri optickom približovaní/zväčšovaní ich obrazu sa nemenia pozorované štatistické vlastnosti (ale mení sa štruktúra). Napríklad, ak sa dívame na pobrežie (ktoré je čiastočne samo-podobné) s čoraz bližšej vzdialenosti, vidíme približne rovnaký počet výčnelkov a približne rovnaký celkový tvar, až kým sa nedívame povedzme na desať metrovú plochu (preto čiastočne samo-podobné).

V SOL plazme je frekvenčná závislosť (3.3) samo-podobná – zostáva v platnosti pri zväčšovaní a pozeraní sa na stále menší detail (menšiu časť plazmy). Aj časová závislosť môže byť samo-podobná. Závislosť $x(t)$ sa považuje za samo-

podobnú, ak existuje také číslo $0 < H < 1$ (Hurstov exponent), že pre všetky $k > 0$ platí

$$\langle x(t + \tau) - x(t) \rangle = k^{-H} \cdot \langle x(t + k \cdot \tau) - x(t) \rangle. \quad (3.7)$$

Turbulentné štruktúry (víry, zhustenia,...) sa v SOL plazme pohybujú prevažne v poloidálnom smere, a majú veľkosť porovnateľnú so šírkou SOL (1cm-3cm v tokamakoch). To môže znamenať, že turbulencie v SOL sú blízke okrajovej stabilite (anglicky „*marginal stability*“). Okrajovo stabilný systém je systém, ktorý po absorbovaní nejakého vstupného impulzu s konečnou veľkosťou „nevybuchne“ do nekontrolovaného koncového stavu. Avšak koncový stav (po získaní vonkajšieho impulzu) nie je stabilný, pretože v ňom s nejakými obmedzeniami pretrvávajú fluktuácie (ktoré ideálne nedisipujú). Takýto systém môže byť opísaný vyváženým rastom turbulencií a rozpadovými (rozpad turbulencií) rýchlosťami. Pojem okrajová stabilita je úzko spojený so SOC.

3.4.4 Experimenty [6]

Nestability a turbulencie v plazme sa vyšetrujú sondami. Užitočné merania sa však pomocou nich v tokamakoch uskutočňujú len v okrajovej plazme po oblasť separatrix. Pri ich použití v miestach bližšie k jadru plazmy dochádza často k poškodeniu sondy alebo značnému ovplyvneniu plazmy.

Na čo najväčšie zníženie turbulencie plazmy v komore tokamaku sa študujú možné režimy výboja termojadrovej reakcie, ktoré by turbulencie čo najviac potlačili. Výbojom sa myslí klasický výboj sprevádzaný ionizáciou a vedením elektrického prúdu v ionizovanom plyne/plazme, ale nie termojadrová reakcia. Termojadrová reakcia, ako som uviedol už v podkapitole 2.2, sa v súčasných tokamakoch ešte nespúšťa. Výnimkou bol napríklad pokus v tokamaku JET s použitým trícium, pri ktorom dosiahli fúzny výkon približne 17 MW po dobu približne jednej sekundy. Turbulentné procesy vedú k anomálnym stratám energie plazmy a zapríčiňujú hlavný dôvod toho, že termojadrový výskum je pomalý a finančne náročný.

V súčasnosti nájdeme tokamak zameraný na optimalizáciu (obmedzenie turbulencie a nestabilit plazmy) výbojových režimov a na interakciu plazmy so stenou komory napríklad v Nemecku (tokamak ASDEX Upgrade).

3.5 Interakcia plazmy s pevnými povrchmi

Interakcia plazmy s povrchom vnútornej steny komory alebo s povrchom divertora či limitera je dôležitý jav, pretože sa týka štyroch dôležitých procesov [5]:

- 1) recyklácia paliva (zbieranie a opätovné využitie niektorých častí paliva) v tokamaku
- 2) únik nečistôt (nežiaducich častíc) do plazmy, najmä do jadra plazmy, v ktorom prebieha termonukleárna reakcia
- 3) chladnutie plazmy, najmä jej okrajovej časti
- 4) erózia spomínaných pevných povrchov, a teda ich znehodnocovanie

V blízkosti pevných povrchov, ktoré sú v styku s plazmou sa vyskytuje pokles elektrického potenciálu, tlaku a teploty smerom k povrchu. Rýchlosť prúdenia plazmy však smerom k pevnému povrchu narastá.

Na skúmanie interakcie plazmy s pevnými povrchmi (prvou stenou, terčom divertora,...) potrebujeme rozumieť transportu častíc plazmy v blízkosti týchto povrchov. Do SOL tesne pri povrchu prichádzajú častice jednak z povrchov a jednak z udržiavanej plazmy cez separatrix naprieč indukčným čiarom v smere hlavného polomeru komory. Potom sa pohybujú buď ďalej naprieč indukčným čiarom alebo rovnobežne s nimi (v toroidálnom smere). Pohybujú sa prevažne v toroidálnom smere, lebo rýchlosť prúdenia v toroidálnom smere je podstatne väčšia ako v smere hlavného polomeru. Transport častíc naprieč magnetickým indukčným čiarom (skoro kolmo na ne) je opísaný rovnicou zahrňujúcou difúziu (1. sčítanec) aj prúdenie (2. sčítanec):

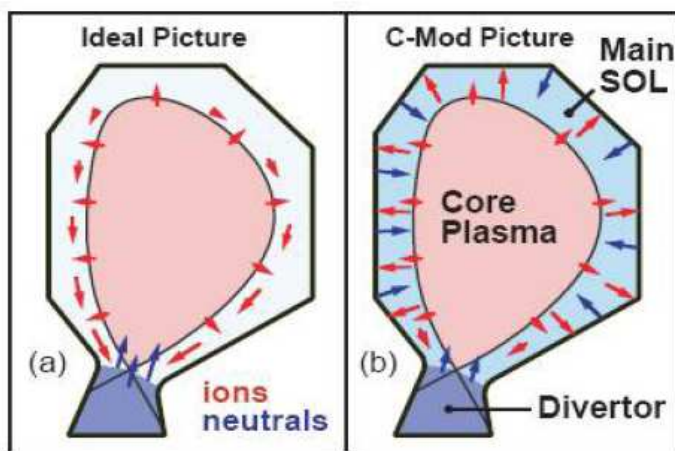
$$N_{\perp} = -(D_{\perp}) \cdot \left(\frac{\partial n}{\partial R}\right) + v \cdot n, \quad (3.8)$$

N_{\perp} tu označuje počet častíc, ktoré prejdú naprieč indukčným čiarám (v radiálnom smere) za jednotkový čas jednotkovou plochou; v je rýchlosť prúdenia plazmy kolmo na indukčné čiary; n je hustota častíc v danom mieste plazmy; D_{\perp} je difúzny

koeficient v kolmom smere (v smere hlavného polomeru tokamaku R), jeho zmena v smere R alebo v poloidálnom smere nie sú dobre známe.

Difúzny koeficient sa v SOL dá vyjadriť (aj keď len približne) teoreticky ľahšie ako v udržiavanej plazme, kde sa určuje zatiaľ len empiricky. Aj v SOL však difúzny koeficient závisí od turbulencií v udržiavanej plazme (ktoré spôsobujú rôzne prúdenia), preto sa v súčasnosti nedá presne vypočítať a v dôsledku toho to nie je lokálna veličina (závisí od parametrov udržiavanej plazmy vnútri LCFS).

Transport častíc v toroidálnom (rovnobežnom s magnetickou indukciou) smere so zanedbaním turbulencií sa dá napísať analogicky ako v radiálnom (kolmom) smere.



Obrázok 3.18: Transport častíc v tokamaku ALCATOR C-Mod [6].

Schéma transportu častíc v okrajových častiach plazmy je na obr.3.18. Najmä v menších tokamakoch sa žiaľ ukazuje, že radiálny (v smere hlavného polomeru) transport častíc zo SOL na stenu vákuovej komory je väčší ako sa predpokladalo. Preto je aj prvá stena komory namáhaná takmer ako divertor. K divertoru sa pohybuje menej častíc ako by bolo žiaduce, niektoré sa namiesto toho pohybujú k prvej stene komory.

Ak nezabráňime úniku častíc plazmy na prvú/vnútorú stenu vákuovej komory (a úplne zabrániť sa tomu asi ani nedá), tak je potrebné ju pokryť materiálom s dostatočnou odolnosťou voči vysokým teplotám a neutrónovému žiareniu (podobne pre iné povrchy v styku s plazmou). Je potrebné ju aj vhodne chladiť. Neutrónový tok dopadajúci na prvú stenu komory má v tomto prípade väčšiu intenzitu ako vo všetkých iných zariadeniach na Zemi. Ako vhodný materiál na jej zhotovenie sa zdá

byť volfrám, uhlík a berýlium. Prvá stena komory musí mať súčasne niekoľko vlastností: tepelná odolnosť, odolnosť voči erózii, dobrá tepelná vodivosť. Preto je potrebné aby pozostávala z viacerých materiálov usporiadaných vo vrstvách. V súčasnosti totiž nie je známy jeden materiál, ktorý by mal všetky potrebné vlastnosti vyžadované prvou stenou. Skoro všetky vnútorné časti vákuovej komory tokamakov sa v súčasnosti pokrývajú uhlíkom, väčšinou vo forme dlaždíc z grafitových materiálov. Pridáva sa aj berýlium [1].

Výhody uhlíka: nízke straty jeho vyžarovaním elektromagnetického žiarenia (malé $Z=6$)

Nevýhody uhlíka: veľké rozprašovanie (veľká erózia) do plazmy, tým väčšie, čím je plazma teplejšia

Výhody pridaného berýlia: zníženie usadzovania trícia; nízke straty z vyžarovania elektromagnetického žiarenia (malé protónové číslo $Z=4$).

Nevýhody pridaného berýlia: veľké rozprašovanie, ale menšie ako pri uhlíku; je toxické; krehne v dôsledku prúdu neutrónov; vlastnosti hrubej vrstvy BeO sú zatiaľ neznáme.

Prvé testy s berýliovou stenou by mali byť už tento rok na rekonštruovanom tokamaku JET v Anglicku. Výhody a nevýhody volfrámu sú uvedené pri divertore. Súčasný materiál nemá samostatne všetky potrebné vlastnosti, preto sa musia používať ich zmesi a musí sa počítať so stratami.

Kapitola 4

Vyhliadky do budúcnosti

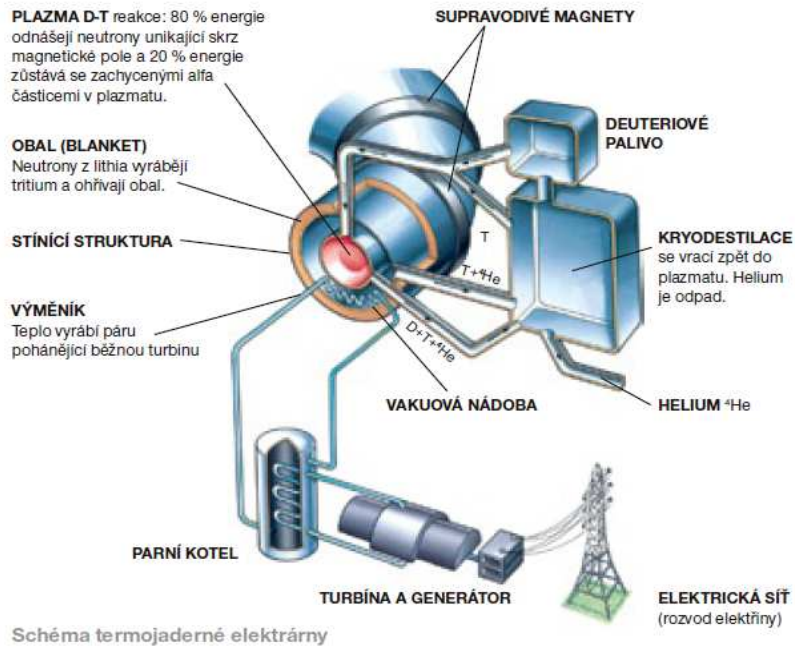
4.1 Využitie riadenej termojadrovej fúzie v tokamakoch

V roku 2009 sa začal stavať medzinárodný experimentálny reaktor ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor). V súčasnosti (v roku 2012) sa budujú základy budovy, v ktorej by mal byť reaktor. Celá výstavba by mala trvať zhruba 10 rokov. Výstavba je zatiaľ prevažne len na úrovni podpisovania zmlúv s výrobnými spoločnosťami a navrhovania dizajnu jednotlivých súčastí. Na spolupráci pri jeho návrhu sa dohodli predstavitelia Európskej Únie, SSSR, Japonska a USA už v roku 1987 [1]. Neskôr sa k projektu pripojila aj Čína, Južná Kórea a India. Pri jeho stavbe sa využíva databáza výsledkov z veľkých svetových tokamakov (JET v Anglicku, JT-60U v Japonsku, TFTR v USA).

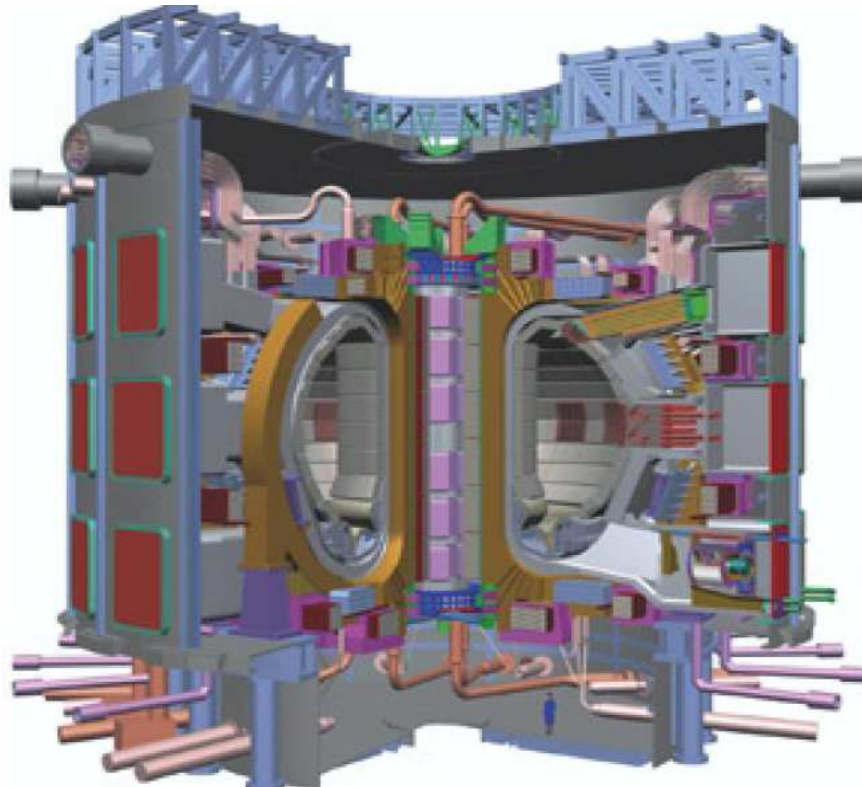
Prvé fyzikálne experimenty ako vyladenie reaktora, zapálenie reakcie, prechod do stacionárneho pochodu (asi hodinového), odskúšanie prvej steny komory a blanketu, by sa v ňom mali uskutočniť v roku 2019. Zapálenie termojadrovej reakcie so zmesou deutérium-trícium je v ITERi odhadované na rok 2027 [11]. Dovtedy sú na výskum riadenej termonukleárnej reakcie potrebné menšie, súčasné tokamaky v rôznych krajinách sveta (vrátane tokamaku COMPASS v Prahe). Výsledky v nich získané sa potom plánujú použiť pre ITER.

Prvé technologické experimenty ako testovanie materiálov a súčiastok, hlavne blanketu, by sa v ňom mohli uskutočniť v roku 2029. V roku 2029 (použitie časové rozmedzie 10 rokov z [1]) by sa mal začať stavať aj demonštračný reaktor DEMO produkujúci nepretržite elektrickú energiu (z tepelnej energie). Počíta sa aj s možnosťou, že pri priaznivých výsledkoch ITERu by sa DEMO ani nemusel stavať. Predpokladaná demontáž ITERu je v roku 2039 a konečne prvá termojadrová elektrárňa by mohla byť postavená okolo roku 2050 (ak bude ITER a DEMO úspešný) [1].

Medzinárodný tokamak ITER by mal byť prototyp reaktora pre termojadrovú elektrárňu. Mala by v ňom horieť zmes deutérium-trícium.



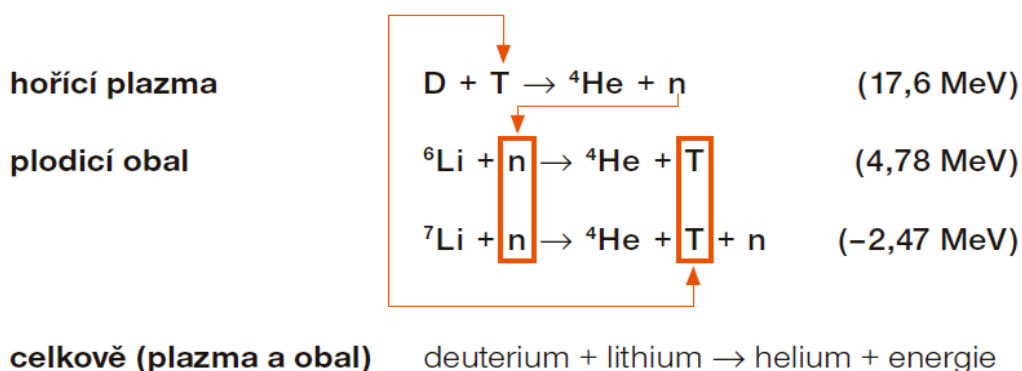
Obrázok 4.1: Schéma termojadrovej elektrárne [1].



Obrázok 4.2: Schéma ITERu [1].

Pre ITER sa predpokladá pomer Q uvoľňovaného termojadrového výkonu k príkonu ohrievajúceho plazmu na $Q=10$. Budúce fúzne reaktory by mali pracovať pri $Q=40$ až 50 . Ako už bolo uvedené pri Lawsonovom kritériu, ľahšie je dosiahnuť veľké Q pri väčšej komore tokamaku. Preto by mal byť ITER približne dvakrát väčší ako najväčší súčasný tokamak JET v Anglicku. ITER by mal mať tieto „parametre“ [11]: elektrický prúd v plazme okolo 16 MA, objem plazmy približne 840 m³, výstupný fúzny výkon približne 500 MW, vstupný príkon asi 50 MW, hmotnosť okolo $23\,000$ ton a teplota v jadre plazmy okolo 150 miliónov K. Náklady na jeho desaťročnú výstavbu sa v súčasnosti odhadujú na 13 miliárd Eur [11]. Neutrálne častice použité na dodatočný ohrev plazmy by v ňom mali mať energiu okolo 1 MeV.

Pre ITER je ešte potrebné navrhnuť vhodný obal obklopujúci plazmu, takzvaný *blanket*, ktorý bude premieňať pohybovú energiu vznikajúcich neutrónov na teplo a zároveň vyrábať trícium (T) z lítia (Li) (rovnice 1.5). Blanket, alebo prvá časť prvej steny komory (v smere od plazmy), by mal byť vyrobený prevažne z lítia. V ITERi by mali prebiehať reakcie znázornené na obr. 4.3.



Obrázok 4.3: Deutérium-lítiový cyklus v ITERi [1].

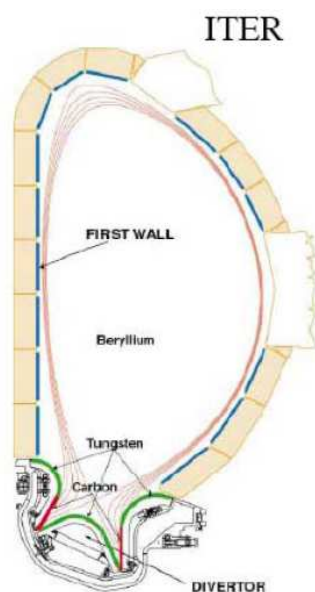
[1] Na reakcie teda stačí do ITERu dodávať deutérium a lítium, trícium by sa mohlo vyrábať priamo v blankete z lítia. Aj keď dnes sa ešte stále uvažuje nad tým, že v ITERi sa v prvých rokoch bude trícium do komory dovážať. Deutérium je možné ľahko získať extrakciou z vody. Pre blanket sa uvažujú rôzne materiály: oxidy lítia s berýliom, tekutá zliatina olova s lítiom v oceľovej štruktúre, lítium v štruktúre z vanádu alebo lítium v štruktúre nejakého karbidu kremíka. Berýlium sa pridáva kvôli tomu, že reakciou berýlia s primárnymi neutrónmi vznikajú ďalšie/sekundárne

neutróny a tým sa zvyšuje rýchlosť výroby trícia.

Všetky magnetické cievky v ITERi majú byť supravodivé. Vyrobené budú zrejme zo zliatin na báze nióbu a uzavreté v konštrukcii z nerezovej oceli. Budú to asi najväčšie dosiaľ vyrobené supravodivé cievky na Zemi. Aby boli supravodivé, musia mať teplotu okolo 4,5 K (ochladia sa pomocou kryostatu). Ale o jeden až dva metre ďalej musí mať plazma okolo 150 miliónov K.

Ako som už uviedol, prvá stena komory ITERu musí znášať obrovskú intenzitu toku neutrónov - podstatne väčšiu ako v prípade jadrových reaktorov. S tak intenzívnym prúdom neutrónov ľudia ešte nemajú skúsenosti, preto sa pripravujú osobitné zariadenia na testovanie materiálov pod takýmto prúdom neutrónov. Skôr ako ich použijú do ITERu je potrebné ich vyskúšať.

[1] ITER by mal používať, tak ako súčasný tokamak JET v Anglicku, diaľkovo ovládanú robotickú pažu na prácu vo vákuovej komore pod vplyvom sekundárnej rádioaktivity (z vnútorných stien komory). Vnútorne časti komory ITERu majú byť pokryté volfrámom, uhlíkovými zmesami aj berýliom. Divertor v ITERi má byť z volfrámu a uhlíkových vlákien.



Obrázok 4.4: Schéma prierezu vákuovej komory v ITERi [9].

Vákuová nádoba ITERu a neskôr aj reaktora musí zaistiť dostatočne vysoké vákuum. Pri zváraní veľkej konštrukcie by nemala vzniknúť veľká deformácia. Konštrukcia ITERu má byť z nemagnetickej a nízkoaktivovateľnej nerezovej oceli s dvojistou stenou vystuženou rebrami, na ktoré budú pripevnené vnútorné súčasti.

Vákuová nádoba musí obsahovať aj okna na dodávanie a ohrievanie paliva, výmenu vnútorných súčastí a inštaláciu diagnostických zariadení.

Termojadrová elektrárňa by ideálne mohla mať $Q = \infty$, ak by nebolo potrebné dodávať zvonku energiu na ohrev (okrem paliva) a vonkajší príkon na ohrev plazmy by bol teda nulový [1]. Energia unikajúca z plazmy (na steny komory) by teda bola nahradzovaná časťou energie z horenia plazmy. Na udržanie teploty plazmy by teda stačilo len dodávať palivo. Pri prvých termojadrových reaktoroch sa však počíta len s $Q=40$ až 50 . Dôležité je tiež zosúladiť prácu teoretických fyzikov, experimentálnych fyzikov a inžinierov. Pre ITER sa nepredpokladá samovoľné horenie plazmy, podstatné je to, že na rozdiel od súčasných tokamakov by v ňom mala byť uvoľnená energia väčšia ako spotrebovaná energia (na zapálenie a udržovanie reakcie), teda $Q > 1$. Predpokladá sa $Q = 10$. Tým by sa v ňom vlastne už dali študovať procesy, ktoré by mali prebiehať v skutočnom termojadrovom reaktore. Budúci skutočný termojadrový reaktor bude musieť odvádzať veľmi vysoký plošný tepelný výkon (oveľa väčší ako pri jadrových elektrárnach). Chladiace médium bude môcť byť v kontakte len so stenou reaktora, nie s vnútrom reaktora.

4.2. Využitie riadenej termojadrovej fúzie všeobecne

Výskum ohľadom ITERu a prvej termojadrovej elektrárne sa môže využiť aj v iných odvetviach fyziky. Napríklad tepelne namáhané materiály sa využívajú v kozmickom priemysle. Taktiež štúdium nestabilití a turbulencií sa využíva v hydrodynamike alebo meteorológii.

Už teraz sa uvažuje s vodíkom, ako palivom pre lietadlá a automobily, aj keď nie v súvislosti s termojadrovou reakciou. Pri klasickom spaľovaní vodíka vyrábaného z vody, vzniká opäť voda (vodná para). Výroba vodíka z vody je však dnes náročná, pretože sa na to nepoužívajú veľké niekoľko tisícové teploty, pri ktorých sa voda priamo disociuje ($2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2$). V tokamakoch je však teplota ešte oveľa väčšia, takže tam by s takouto disociáciou vody nebol problém (napríklad niekde pri vákuovej komore). Dnes sa väčšinou vodík z vody získava elektrolýzou. A elektrolýza je energeticky nevýhodná.

Termojadrová fúzia sa podľa predpokladov v budúcnosti bude podieľať najmä na „výrobe“ energie vo veľkých mestách a priemyselných centrách [1]. Pre

menšie oblasti a zariadenia (kde stačí menší výkon) by sa spočiatku mohli používať obnoviteľné zdroje energie ako slnečné žiarenie, veterná energia, geotermálna energia, vodná energia atď., ktoré sú k prírode šetrné tiež.

V ďalekej budúcnosti budú možno existovať aj malé termojadrové zariadenia využiteľné hoci aj v obytných domoch a možno že aj v dopravných prostriedkoch. Najmä úvahy *o studenej fúzii* - fúzii za studena, zahŕňajú malé a jednoduché fúzne reaktory s nízkymi teplotami. Studená fúzia by mohla predstavovať zlučovanie mezoatómov, čiže napríklad vodíkových atómov, ktoré majú namiesto elektrónov mezóny μ . Tieto mezóny sú oveľa ťažšie ako elektróny, preto by taký atóm bol menší, jadrá týchto atómov by boli bližšie pri sebe a oveľa častejšie by sa zrážali. Aj pri pokojovej teplote by bola pravdepodobnosť ich zrážok dostatočne veľká. Problém je vo veľmi krátkej dobe ich života (mikrosekundy). Istý čas sa hovorilo aj o studenej fúzii v kryštalickej mriežke paládiových elektród [1].

Ak by sa termojadrová fúzia začala používať na „výrobu“ energie ešte pred vyčerpaním dostupných zásob ropy na Zemi, zvyšná časť ropy by sa mohla využiť na výrobu látok ako plasty, oleje atď.

Riadená termojadrová reakcia by sa mohla využívať aj v kombinácii so štiepnou jadrovou reakciou. Tok neutrónov produkovaných pri fúzii by mohol uľahčiť proces štiepenia jadier v štiepnom reaktore [7].

Termojadrový pohon bude možno dôležitý aj pre ďaleké kozmické lety. Bežné palivo je totiž príliš objemné, na cesty na iné planéty by vyžadovalo veľmi veľké zásoby.

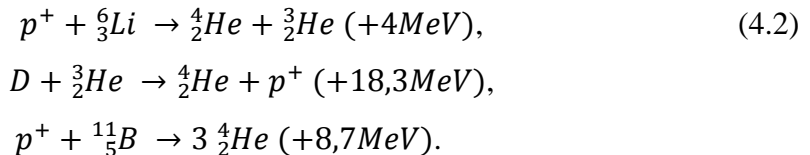
Je tu jedna dôležitá výzva do budúcnosti. Pre prvé termojadrové elektrárne sa počíta s reakciou (1.1), teda s rádioaktívnym tríciumom. Výbuch termojadrovej elektrárne v dôsledku vnútorných vplyvov je v podstate vylúčený ako bolo diskutované v podkapitole 1.1. Zostáva už len problém rádioaktivity trícia a rádioaktivity konštrukčných materiálov v dôsledku dopadu neutrónov. Trícium sa rozpadá beta rozpadom [12]



Elektróny majú však pri tomto rozpade veľmi malú energiu – vo vzduchu doletia len niekoľko milimetrov. Problém s rádioaktivitou by bol takmer vyriešený, ak by sa

použila v termojadrovom reaktore reakcia $D + D$ (1.3). Takto by sa nemuselo zložito vyrábať trícium a nebolo by potrebné ani lítium (ktoré je predsa len menej sa vyskytujúca látka na Zemi ako deutérium).

Zaujímavé sú aj reakcie ako [1]:



Pri týchto termojadrových reakciách, ktoré by tiež mohli prebiehať v budúcich termonukleárnych reaktoroch nevznikajú vôbec neutróny, takže konštrukčné materiály reaktora (spolu so stenami vákuovej komory) by nepodliehali vysokoenergetickému neutrónovému toku. Tým by sa neničili a nestávali sa rádioaktívnymi. Problém je pri týchto reakciách s veľmi vysokou zápalnou teplotou.

Pomocou nich by sa navyše už mohla vyrábať elektrická energia priamo z plazmy (pomocou vznikajúcich protónov, napríklad s využitím Hallovhovho javu v MHD generátoroch) a nie cez parnú turbínu. Tým by sa účinnosť výroby elektrickej energie ešte viac zvýšila. Dostupné technológie však takúto priamu výrobu elektrickej energie ešte neumožňujú prakticky uskutočniť.

Ohľadom fúzie sa môžu objaviť aj úplne nové myšlienky. Napríklad istý čas sa hovorilo o jadrovej fúzii vo zvukových rázových vlnách.

Na záver som si dovoľil citovať (po preklade) L. A. Arcimoviča (oficiálne najlepšieho odborníka v termojadrovom výskume v sedemdesiatych rokoch minulého storočia): „Fúzia tu bude, pokiaľ ju bude chcieť spoločnosť.“ [1]. Ja by som to zmenil na výrok: „Fúzia tu bude dostatočne skoro, pokiaľ ju bude chcieť spoločnosť.“ Pretože tak či tak sú ľudia „nútení“ ju začať využívať (napríklad z dôvodov uvedených v úvode práce), ak sa nečakane v najbližších rokoch nepríde s niečím lepším. Energia s fúzie je teda podľa mňa právom nazývaná energia budúcnosti.

Záver

Nadšenie fyzikom uľahčuje a urýchľuje prácu, ale myslím, že nie je dobré v sebe živiť veľmi nepravdepodobné nádeje. Pretože ak veríme niečomu veľmi málo pravdepodobnému, tak existuje veľká pravdepodobnosť, že budeme sklamaní. A to sklamanie je tým väčšie, čím väčšie boli naše nádeje. Veľké sklamanie môže navyše posunúť človeka tak veľmi „dozadu“, že aj bez predchádzajúceho dlhotrvajúceho nadšenia by bol v daný čas „ďalej“. Teda viera v dobré veci človeka „posúva“ dopredu, ale následné sklamanie (z tých istých vecí, ktorým veril a o ktorých zistil že sú inak, ako si myslel) ho „posúvajú“ ešte viac dozadu.

Preto aj v súvislosti s výskumom termojadrovej fúzie chcem dať nadšeniu plynúcemu z textu tejto práce nejaké hranice. Termojadrová fúzia je s princípu veľmi nádejná. Už len preto, že vidíme ako prebieha vo hviezdach (aj keď trochu inak). Ale je potrebné si uvedomiť, že termojadrový výskum vedúci k prvej termojadrovej elektrárni má toho ešte veľa pred sebou. Existuje množstvo technických problémov, ktoré sa budú môcť ešte len začať riešiť až potom, ako sa zvládne udržanie plazmy. A ani udržanie plazmy ešte nie je vyriešené. Dá sa očakávať, že roky spomínané v 4. kapitole tejto práce sa budú meniť (na väčšie čísla) tak, ako sa to udialo vo výskume termojadrovej fúzie už mnohokrát v minulosti.

Fyzici častokrát podľa mňa šíria o termojadrovom výskume trochu väčšie nadšenie ako by odpovedalo skutočnosti. Ale ak ide len o trochu prehnané šírenie nádejí, tak im to nevyčítam. Pretože dnešná spoločnosť (jej väčšia časť) si vo veľkej miere namýšľa, a žije častokrát v nepravdivých a skreslených predstavách (šírených médiami). A ak im niekto povie niečo presne (alebo skoro presne) tak, ako to je, tak sa im to zdá slabé v porovnaní s ich vlastnými vymyslenými predstavami. A nepodporujú to, lebo ich to nadchýna menej ako niečo iné, skreslené. Napriek tomu, výskum termojadrovej fúzie potrebuje pomoc tejto väčšiny (najmä formou financovania), a tak sú fyzici pre dobrú vec, trochu „nútení“ celú vec „prikrášliť“. Je potrebné si aspoň pre seba uvedomiť, aká je skutočná situácia.

Pred prvou termojadrovou elektrárnou je ešte dlhá cesta, ale na tejto ceste (k prvej termojadrovej elektrárni) sa podľa mňa oplatí zotrvať, lebo aj bez najmenšieho „prikrášľovania“ je úspech riadenej termojadrovej reakcie skoro zaručený. Už s princípu tejto reakcie podľa mňa (a mnohých iných) vyplýva, že sa to nejako dá urobiť (s kladným ziskom energie). Aj keď nie hneď, ale dá. Ved' napokon správne

cesty (po ktorých sa oplatí ísť) sú takmer vždy ťažšie (viac „trniste“), ako tie menej správne cesty.

Na tejto ceste odporúčam zotrvať aj kvôli tomu, že človek, ktorý sa po nej vyberie a zotráva na nej, pracuje pre niečo veľmi významné, pre niečo „veľké“. Jedná sa tu aj o pomoc Prírode a o predĺženie jej existencie. A čo viac dôležitejšie a významnejšie by človek mohol v živote urobiť, ako snažiť sa o predĺženie existencie Prírody? Akú lepšiu náplň života by človek mohol mať, ako snažiť sa o predĺženie existencie niečoho tak krásneho a výnimočného (minimálne v ľudstvom preskúmanej časti vesmíru) ako je Príroda? Akým lepším spôsobom by mohol jeden človek v svojom, z vesmírneho pohľadu skoro bezvýznamnom, živote urobiť niečo významné a užitočné (aj z vesmírneho/ vonkajšieho pohľadu/ nadhľadu), ako snahou o dlhšie pretrvanie Prírody na Zemi? Veď je jedno, že to je namáhavé, ťažké a zdĺhavé! Už len podieľanie sa na tom je podľa mňa veľmi významné, zmysluplné a úctyhodné.



Obrázok Z.1: Príroda [13].

Zoznam použitej literatúry

- [1] ŘÍPA, M. - WEINZETTL, V. – MLYNÁŘ, J. – ŽÁČEK, F.: Řízená termojaderná fúze pro každého. 2. vyd. Praha: Ústav fyziky plazmatu AV ČR, 2005. 100 s. ISBN 80-902724-7-9. Dostupné z WWW:
<http://www.nri.cz/c/document_library/get_file?uuid=a91dcf8f-8793-4f82-b302-e6a372f736eb&groupId=10504>
- [2] *Rexwallpapers.com* [online]. c2009 [cit. 2011-07-29]. Wallpaper/Wolf-1. Dostupné z WWW: <<http://www.rexwallpapers.com/wallpaper/Wolf-1/>>
- [3] Proton%E2%80%93proton chain reaction. In *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida): Wikipedia Foundation, 23:51, 2 January 2002, last modified on 18:36, 28 July 2011 [cit. 2011-07-29]. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Proton%E2%80%93proton_chain_reaction>.
- [4] Fusion reaction. In *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida): Wikipedia Foundation, 22:31, 17 January 2007, last modified on 22:31, 17 January 2007 [cit. 2011-07-29]. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Fusion_reaction>.
- [5] BROTÁNKOVÁ, Jana. *Studium horkého plazmatu v experimentálních zařízeních typu Tokamak* [online]. [s.l.], 2009. 175 s. Dizertační práce. Univerzita Karlova v Praze, Matematicko-fyzikální fakulta. Dostupné z WWW: <<http://jana.bharatanatyam.cz/ostatni/knihy/disertace/disertace.pdf>>.
- [6] HORACEK, Jan. *Measurement of edge electrostatic turbulence in the TCV tokamak plasma boundary* [online]. Lausanne: École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2006. 171 s. Disertační práce. École Polytechnique Fédérale de Lausanne, á la faculté sciences de base. Dostupné z WWW: <<http://library.epfl.ch/theses/?au=J.Horacek&ti=&sc=&yr=&nr=&adv=&access=&send.x=0&send.y=0>>.
- [7] CHEN, Francis F. *Úvod do fyziky plazmatu*. Vydání 1. ČSAV v Praze: Academia, 1984. 332 s.
- [8] BILYK, Olena. *Sondová diagnostika nízkoteplotního plazmatu*. [s.l.], 2005. 135 s. Disertační práce. Univerzita Karlova v Praze, Matematicko-fyzikální fakulta.
- [9] BEAN, Malcolm; SIMSON, Jacob. *Web.mit.edu* [online]. 22-May-2008 10:25 [cit. 2011-07-30]. [Www/presentations/Divertor Presentation.pdf](http://www/presentations/Divertor%20Presentation.pdf). Dostupné z WWW: <<http://web.mit.edu/22.012/www/presentations/Divertor%20Presentation.pdf>>.
- [10] Reynolds stress. In *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida): Wikipedia Foundation, 05:42, 7 May 2005, last modified on 21:39, 25 January 2011 [cit. 2011-07-30]. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Reynolds_stress>.

- [11] *Iter.org* [online]. 2007, 2012 [cit. 2012-05-23]. Iter.org. Dostupné z WWW: <<http://www.iter.org/>>.
- [12] Tritium. In *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida): Wikipedia Foundation, 19:48, 13 December 2001, last modified on 14:28, 13 July 2011 [cit. 2011-07-31]. Dostupné z WWW: <<http://en.wikipedia.org/wiki/Tritium>>.
- [13] *Rexwallpapers.com* [online]. c2009 [cit. 2011-07-29]. Wallpaper/Wolf-1. Dostupné z WWW: <<http://www.rexwallpapers.com/wallpaper/Wolf-5/>>

Zoznam použitých skratiek

- 1) „LCFS“ last closed flux surface
- 2) „SOL“ Scrape-Off Layer
- 3) „SOC“ Self-organized criticality
- 4) „ITER“ International Thermonuclear Experimental Reactor
- 5) „atď.“ a tak ďalej
- 6) „napr.“ napríklad
- 7) „obr.“ Obrázok

