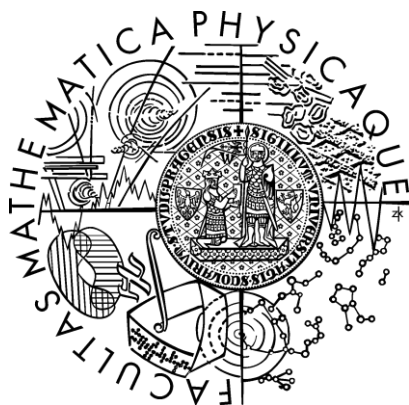


Univerzita Karlova v Praze

Matematicko-fyzikální fakulta

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



Česlav Řehák

Kapitoly z jaderné fúze pro střední školy

Katedra didaktiky fyziky

Vedoucí bakalářské práce: RNDr. Jan Mlynář, Ph.D.
Fakulta jaderné fyziky a inženýrství, ČVUT

Studijní program: Fyzika, Fyzika zaměřená na vzdělávání

Praha 2013

Na tomto místě bych rád poděkoval především vedoucímu své práce, RNDr. Janu Mlynářovi, za velkou ochotu a vysokou profesionalitu při konzultacích, za všechnu poskytnutou literaturu i za čas, který mojí práci věnoval. Také bych rád poděkoval všem, kteří mě v práci jakkoliv podpořili, zejména poskytnutím materiálů a cenných rad.

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 16. 7. 2013

Česlav Řehák

Název práce: Kapitoly z jaderné fúze pro střední školy

Autor: Česlav Řehák

Katedra / Ústav: Katedra didaktiky fyziky / Matematicko-fyzikální fakulta UK

Vedoucí bakalářské práce: RNDr. Jan Mlynář, Ph.D., Fakulta jaderné fyziky a inženýrství, ČVUT

Abstrakt: Text této práce je určen všem zájemcům o základy jaderné fúze v řadách veřejnosti, především je ale cílen pro potřeby výuky fyziky na střední škole. Práce shrnuje základní principy fúzních reakcí a osvětluje jejich význam pro život. Dále text poukazuje na problematiku světové energetiky a představuje řízenou termojadernou fúzi jako možné řešení problémů s dnešní energetikou spjatých. Přístupnou formou osvětluje výzkum v oblasti magnetického udržení řízené fúze v pozemských podmínkách a uvádí možné výhody i nevýhody tohoto možného energetického zdroje. Práce je doplněna o mnoho názorných obrázků.

Klíčová slova: Jaderná fúze, slučování, energetika, magnetické udržení, tokamak

Title: Chapters from nuclear fusion for high school education

Author: Česlav Řehák

Department: Didactics of physics

Supervisor: RNDr. Jan Mlynář, Ph.D., Faculty of nuclear physics and engineering, ČVUT

Abstract: Text of this thesis is intended for anyone interested in nuclear fusion, although it is especially aimed for education of physics in high schools. The thesis sums up the basic principles of fusion reactions in space and explains its importance for life on Earth. Additionally, it points out some of the most crucial problems of present world energetics and introduces controlled thermonuclear fusion as a possible solution. The thesis clarifies some of the most important aspects of controlled fusion research, especially the branch of magnetic confinement reactors, and provides the most significant advantages and disadvantages of this potential power source. It also offers variety of illustrative pictures.

Keywords: Nuclear fusion, energetics, magnetic confinement, tokamak

Obsah

Úvod	6
1) Připomenutí učiva atomové fyziky na SŠ	7
1.1) Mikrosvět a makrosvět	7
1.2) Atom	8
1.3) Jaderné reakce, radioaktivita	9
1.4) Obohacování	10
2) Fúze	12
2.1) Co je to jaderná fúze? Kde se s ní setkáme?	12
2.2) Vznik těžších prvků	14
3) Fúze a energetika	15
3.1) Energie	15
3.2) Energie a hmota	15
3.3) Energie na Zemi	17
4) Využití fúze na Zemi	21
4.1) Fúze pro lidstvo	21
4.2) Mytologie fúzních procesů	21
4.3) Inerciální udržení	22
4.4) Magnetické udržení	24
4.4.1) Stelarátory, pinče a tokamaky	26
4.4.2) Nestability	29
4.4.3) Diagnostika plazmatu	30
4.4.4) Nečistoty	32
4.4.5) Ohřev plazmatu	33
4.5) Tokamak jako elektrárna	34
5) Historie fúze a dosažené výsledky	37
Matematické okénko	39
Závěr	41
Obrazová příloha	42
Literatura	49

Úvod

Hlavním cílem této práce je přiblížit středoškolákovi, učiteli fyziky, ale také zvědavému laikovi principy jaderné syntézy (fúze) ve vesmíru, současně si však práce klade za cíl představit tento proces i jako možný zdroj energie pro lidskou společnost a uvést čtenáře do základní problematiky vývoje fúzních reaktorů.

Téma této práce jsem zvolil proto, že mě fyzika jaderného slučování fascinovala již na střední škole, kde jsem se však potýkal s nedostatkem literatury, která by mne mohla do této oblasti uvést na - pro středoškoláka - srozumitelné úrovni. Rozhodl jsem se proto vytvořit studijní text, který čtenáři nabídne náhled do fyziky jaderné syntézy, osvětlí některé důležité souvislosti s jinými fyzikálními principy a poskytne odpovědi na otázky fúzní energetiky na Zemi - to vše s minimálními nároky na znalosti matematiky i fyziky.

Středoškolské osnovy fyziky se jadernou fúzí zabývají zpravidla jen málo nebo vůbec, což pro jev tak nezbytný pro život považují za politováníhodné. Přesto jsem přesvědčen, že zvolené téma může při bližším seznámení nejen zaujmout, ale přímo fascinovat. Tato práce je projevem snahy zpřístupnit nukleární fúzi nejen pro středoškolskou výuku fyziky, ale také pro veřejnost, a snad i motivovat čtenáře k hlubšímu zájmu o zvolené téma.

Práce je rozdělena do pěti hlavních kapitol, ve kterých postupně připomíná základy atomové fyziky na středoškolské úrovni, zavádí pojem jaderné fúze a ukazuje její význam pro život na Zemi, zavádí pojem energie a vysvětluje myšlenku „přeměny“ hmoty na energii. V předposlední kapitole práce představuje problematiku fúzních reaktorů v zemských podmínkách, kde se speciálně zaměřuje na magnetické udržení, zejména tokamaky - zařízení, která se v současnosti nacházejí nejbližší podmínkám pro energetické využití fúze. Kapitola poslední pak ve stručnosti shrnuje historický vývoj směřující k fúznímu reaktoru a předkládá některé důležité dosažené výsledky.

Kapitola 1 - Připomenutí učiva atomové fyziky na SŠ

1.1) Mikrosvět a makrosvět

Než se začne hovořit o jaderné fúzi samotné, je rozumné si připomenout, co již víme o atomové fyzice, a oprášit své poznatky o světě částic – tzv. mikrosvětě.

Stěžejními pojmy, které je třeba uvést vždy, když se začíná mluvit o atomové fyzice, jsou mikrosvět a makrosvět. Na první pohled jsou to pojmy zcela jednoduché: makrosvět je svět objektů, které známe a vidáme všude kolem sebe. Jsou to věci, na které si můžeme sáhnout, které můžeme pozorovat ať už dalekohledem, mikroskopem nebo pouhým okem. Tyto věci dovedeme měřit pravítkem, pásmovým metrem, mikrometrem a podobně. Mikrosvět tedy naproti tomu bude určitě svět malých věcí, kterými jsou třeba částice: elektrony, protony, neutrony, z nich složené celé atomy a z atomů molekuly. Částicím světla se říká fotony, někteří také mohli zaslechnout například o neutrinech nebo kvarcích. Částic existuje mnoho typů a druhů, všechny ale mají něco společného: jsou malé. Tyto objekty mikrosvěta jsou dokonce tak malé, že je nemůžeme vidět (a to ani nejlepšími optickými mikroskopy!) a nemůžeme je měřit běžnými metodami (pravítky či metry), na které jsme zvyklí.

Je to opravdu takto jednoduché? Ne tak docela. Důležitým poznatkem pro rozlišení mikrosvěta a makrosvěta je skutečnost, že v obou těchto světech fungují trochu jiná pravidla. Všichni lidé žijí a vyrůstají v makrosvětě – poznávají jeho zákonitosti, získávají zkušenosti o jeho fyzikálních zákonech. Proces učení a poznávání makrosvěta začíná už v tom nejtěžším dětství, když se učíme chodit nebo si hrajeme. Každé dítě velmi brzy zjistí například, že všechny věci padají dolů k zemi, pokud je shodíme ze stolu, že pokud chceme projít dveřmi, musíme je nejprve otevřít, nebo že když rozkutálíme míč po podlaze, bude se pohybovat tak dlouho, dokud se nezastaví o překážku nebo nezpomalí z jiných důvodů (odpor vzduchu, valivý odpor – tyto důvody pochopitelně ještě malé dítě nezná, avšak pozoruje jejich následky, má i s nimi tedy určitou zkušenost).

Na druhé straně mikrosvět je oblast, o které člověk nemá žádné intuitivní povědomí. V podstatě se fyzik, který se chce něco dozvědět o světě částic, nachází v situaci malého dítěte, které vidí míč poprvé v životě. Zákonitosti, které byly objeveny pro mikroobjekty, se velmi často liší od těch, které známe už od malička, proto bývá zpočátku poměrně těžké si je představit. Tak například: zvyklí jsme si, že každý předmět má v každém okamžiku svou jednoznačnou polohu – tužka leží na stole nebo na podlaze, nebo se v daný okamžik může nacházet třeba ve vzduchu, pokud ji vyhodíme nad hlavu. O elektronu ovšem toto říct nemůžeme; nelze z principu prohlásit „elektron se nachází zde“. Ve skutečnosti existují oblasti, kde se elektrony vyskytují s určitou (někde vyšší a jinde nižší) pravděpodobností. Není to tím, že by měřicí přístroje byly nepřesné a neuměly polohu částice přesně určit. Poloha je totiž pojem, který byl vymyšlen a používán pouze pro objekty makrosvěta, v mikrosvětě se ukázalo, že nedává příliš smysl. Taková trochu jednodušší představa by byla, že se elektron vlastně nachází na všech místech současně, pokaždé ovšem s jinou pravděpodobností výskytu (obr. 1). Tato vlastnost platí i pro jiné částice než elektron. Ten má však i další zajímavé vlastnosti.

Tak například z přesného měření elektrického náboje lze zjistit, že elektron se nedá dělit (setkáváme se pouze s celočíselnými násobky náboje jednoho elektronu). Z toho lze usoudit, že elektron je nedělitelná částice. Na druhé straně, jiné experimenty ukázaly, že v některých případech elektrony prolétávající úzkou štěrbinou po dopadu na stínítko vytvářejí difrakční obrazce (připomeňme z optiky, že difrakce je jev, který nastává pro průletu světla úzkou štěrbinou, a je důsledkem skutečnosti, že světlo je tvořeno elektromagnetickými vlnami).

Difrakce je jev, který pozorujeme pouze u vln (v souvislosti s elektrony hovoříme o tzv. de Broglieově vlně). Vystává tedy otázka – je elektron částice nebo vlna? Odpověď se zprvu může zdát neuspokojivá: elektron je elektron - je to objekt, který se v některých případech chová jako částice, v jiných jako vlna. Celý háček je v tom, že se elektronu pokoušíme přiřadit nějakou představu, kterou máme z makrosvěta. Vlny například známe na zčeřené vodní hladině, částice zase bývají často vyobrazovány jako malé kuličky, které do sebe mohou pružně narážet. Je důležité si zkrátka uvědomit, že naše zkušenost s okolním světem v mikrosvětě selhává. To je nejdůležitější podstatou rozdílu mezi mikrosvětlem a makrosvětlem.

1.2) Atom

Dalším důležitým klíčovým slovem atomové fyziky je atom sám. Slovo atom pochází z řeckého *átomos* a znamená nedělitelný. Představa o existenci nedělitelných částic, ze kterých je poskládána veškerá hmota, vznikla už v 5. století před našim letopočtem (myšlenku vyslovil Démokritos) a držela se až do konce 19. století (na jehož začátku byla ještě vědecky přeformulována Daltonem) [28]. Myšlenka atomů jako nedělitelných částic je v jistém smyslu správná, ale pouze z hlediska chemických reakcí. Uvážíme-li, že ve zmiňovaném období nebyly k dispozici přístroje, které by mohly odhalit existenci jaderných reakcí či existenci částic, ze kterých je atom tvořen, je představa nedělitelnosti ta nejspávnější, jaké bylo možno dosáhnout. Teprve roku 1897 tuto teorii vyvrátil Thomson, který objevil elektron.

Atom je ve své podstatě nejmenší částicí chemického prvku, což jinými slovy znamená, že bude-li se atom dále dělit (jadernými reakcemi), ztratí tato částice veškeré vlastnosti chemického prvku, který tvořila.

Stavebními kameny atomu jsou protony, elektrony a neutrony. Elektrony se vyskytují v obalu atomu, zatímco protony a neutrony jsou souhrnně označovány jako nukleony, protože se vyskytují v jádře (latinsky a též anglicky nucleus). Podle jejich četnosti v atomu můžeme atom popsat několika parametry: Z je protonové číslo, udává počet protonů v jádře atomu. N se označuje jako neutronové číslo, udává počet neutronů v jádře atomu. A je číslem nukleonovým, tedy udává součet protonů a neutronů v jádře. Zřejmě $A = Z + N$. S dalším důležitým číslem se můžeme setkat v periodických tabulkách prvků; je jím relativní atomová hmotnost. Tato veličina udává hmotnost atomu jako násobek atomové hmotnostní konstanty ($1,661 \cdot 10^{-27}$ kg). Vzhledem k tomu, že hmotnost elektronu je ve srovnání s hmotností protonu nebo neutronu velmi malá (proton je asi 1836x těžší než elektron) a navíc proton i neutron jsou skoro stejně těžké (neutron je těžší asi jen o 1%), dá se relativní atomová hmotnost poměrně přesně chápat jako počet nukleonů v jádře.

Bude-li se lišit počet elektronů v obalu atomu od protonového čísla, hovoříme o tzv. iontu. Ionty se dělí na kationty, pokud bude celkový náboj atomu kladný (tzn. má méně elektronů než protonů), a na anionty, pokud je celkový náboj atomu záporný (zřejmě při přebytku elektronů). Ionizace (tedy změny počtu elektronů v obalu) lze dosáhnout mnoha způsoby, mezi které patří například silné elektrické pole, ozáření určitým typem záření (třeba ultrafialové nebo rentgenové), srážky s volnými elektrony či dokonce zahřátí na velmi vysoké teploty.

Pokud se u atomu změní počet neutronů v jádře, vznikne jiný izotop stejného prvku. Vlastnosti různých izotopů jednoho prvku se liší jen poměrně málo (například hmotností), avšak liší se i jejich výskyt v přírodě a liší se velmi často i jejich stabilita. Například je známá skutečnost, že atom vodíku se skládá z jednoho protonu v jádře a z jednoho elektronu v elektronovém obalu. To je ovšem pouze nejčastější izotop tohoto prvku. Existuje také izotop

vodíku, který má v jádře kromě protonu navíc ještě jeden neutron. Takový atom se označuje jako deuterium nebo také těžký vodík, a v přírodě je ho asi 6000x méně než běžného vodíku. Tento izotop je přibližně 2x těžší než běžný vodík, avšak stejně jako on není radioaktivní (nerozpadá se, je stabilní). Existuje dokonce izotop, který má v jádře spolu s protonem neutrony dva. Takový izotop vodíku je označován jako tritium (supertěžký vodík) a přirozeně se v přírodě nevyskytuje, avšak vzniká při některých jaderných reakcích [9][10].

Změnou počtu protonů v jádře pak pochopitelně vzniká úplně jiný prvek s úplně odlišnými chemickými vlastnostmi.

1.3) Jaderné reakce, radioaktivita

Jádra, která nejsou stabilní, se časem rozpadají. Výsledkem je jádro menší (lehčí), či dokonce jader více, pak uvolněná energie, a dále nějaké částice, které z jádra vylétají velkou rychlostí. Právě v jejich rychlosti je většinou ukryta zmíněná uvolněná energie - jde tedy o přeměnu energie jaderné na energii pohybovou (kinetickou).

Vylétávající částice se označují jako záření (radiace) a zpravidla je možno se setkat se čtyřmi typy:

a) Záření alfa jsou v podstatě rychle letící jádra helia - tedy dva protony a dva neutrony držící pohromadě. Toto záření bývá rizikové nejméně; dá se zastavit pouhým listem papíru, ve vzduchu má dosah jen několika centimetrů. Pokud by však přece jen došlo k ozáření organismu, například spolknutím alfa-zářiče, ukazuje se, že biologické následky jsou silnější (ve srovnání s jinými typy záření průměrných energií jsou účinky záření alfa až dvacetinásobné. Převzato z [3, str. 40].)

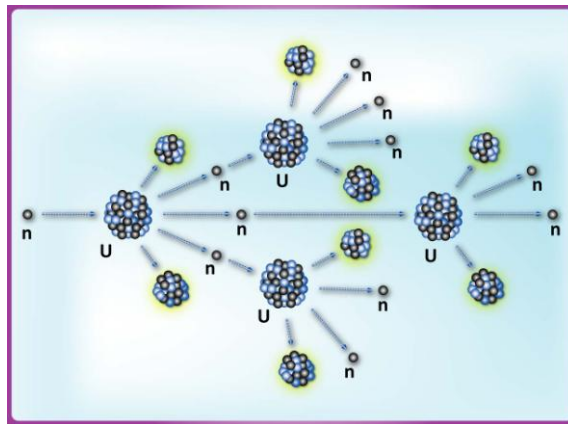
b) Záření beta jsou rychle letící elektrony (nebo pozitrony = antičástice elektronů). Elektrony se uvolňují při tzv. *beta rozpadu*, tedy rozpadu neutronu na proton a elektron, přičemž vznikají i neutrina (velmi špatně zachytitelné částice, jejichž existence byla předpovězena dlouho před jejich prvním pozorováním.) Záření beta lze odstínit například vrstvou hliníku.

c) Záření gama jsou vysokoenergetické fotony - jde tedy o elektromagnetické vlny s velmi vysokou frekvencí (krátkou vlnovou délkou). Záření gama patří k nejnebezpečnějším typům radiace, odstiňuje se silnou vrstvou olova (či jiného prvku s těžkými jádry) a může u člověka způsobit poškození genetické informace DNA, v důsledku čehož vzniká rakovina.

d) Neutronové záření je proud rychle letících neutronů. Jde také o velmi nebezpečný typ radiace, protože proniká do hloubky látky a pak pružnými srážkami zejména s protony (jádry vodíku) způsobuje mj. ionizaci vody či disociaci (rozklad) složitých uhlovodíků. Toto záření lze odstínit lehkými prvky, často se používá voda nebo beton. Neutronové záření jako jediné nevzniká samovolným rozpadem nestabilních částic (ať už přírodních či umělých), ale lze jej vytvořit při štěpných reakcích.

Rychlost rozpadu nestabilních prvků je charakterizována tzv. poločasem rozpadu. Jedná se o dobu, za jakou se přemění (rozpadne) právě jedna polovina libovolného počtu jader. U stabilních izotopů je jejich poločas rozpadu nekonečný, u nestabilních se můžeme setkat s poločasy v řádu od zlomků milisekund až po tisíce let. Například dříve zmíněný izotop vodíku tritium má poločas rozpadu přibližně 12,5 let. To znamená, že za 12,5 roku zůstane z původního množství polovina, za 25 let čtvrtina, za 37,5 let osmina atd.

Doposud jsme hovořili o samovolných rozpadech nestabilních jader. Od konce třicátých let dvacátého století však technika lidem umožňuje vyvolávat rozpady jader i uměle. Byly to právě atomy uranu, které se podařilo rozštěpit pomocí proudu pomalých neutronů do nich narážejících. Není náhodou, že jak pro objev, tak pro dnešní energetické využití řízených jaderných reakcí slouží právě jádra uranu. Izotop uranu U235 (v přírodě má poměrně malé zastoupení 0,72% a jeho podíl ve směsi ostatních izotopů uranu lze zvýšit tzv. obohacováním) se totiž po kolizi s pomalým (na jaderné poměry) neutronem stává izotopem U236, který se ve většině případů vzápětí rozpadá na dvě lehčí jádra – s největší pravděpodobností jádra barya a kryptonu. Dalšími produkty tohoto rozpadu jsou vylétávající neutrony, které tak mohou (při správné rychlosti) rozbít další a další jádra uranu [11]. Právě tento proces se označuje jako řetězová reakce (obr. 2).



Obr. 2. Řetězová štěpná reakce jader uranu U235. Převzato z [19].

1.4) Obohacování

Obohacování - jednoduše řečeno - je proces oddělování jednotlivých izotopů od sebe. Není to však tak jednoduché jako oddělování zrna od plev. Různé izotopy mezi sebou mají poměrně podobné vlastnosti, a bývá tedy nesnadné je odlišit. Výsledkem obohacovacího procesu tedy bývá pouze o několik procent zvýšená koncentrace daného izotopu ve směsi obohacené, a naopak koncentrace o něco nižší ve směsi ochuzené. Velká část obohacovacích metod se zakládá na skutečnosti, že rozdílné izotopy jednoho prvku mají jinou hmotnost. Je ale třeba si uvědomit, že například mezi izotopy U235 (který je potřeba pro jaderné využití) a U238 (jehož zastoupení v přírodě je více než 99% veškerého uranu) činí hmotnostní rozdíl pouhých 1,3%. A jak vlastně takové obohacování funguje?

V podstatě existují čtyři metody, kterými lze materiál obohacovat. Jsou jimi difuze, centrifugace, elektromagnetická separace a ionizace laserem.

A) Difuze využívá skutečnosti, že molekuly s lehčími izotopy se při stejné energii (teplotě) pohybují o něco rychleji než ty těžší. Pokud se tedy směs umístí do nádoby s pórovitou přepážkou, která ji bude oddělovat od prázdného prostoru, je logické, že se molekuly lehčích izotopů díky své vyšší pohyblivosti dostanou skrze přepážku dříve. Tato metoda ovšem není příliš účinná; musí se opakovat i více než 1000x pro získání požadovaných koncentrací. Další nevýhodou jsou obrovské energetické nároky na zahřívání směsi a její tlačení proti přepážkám, aby proces vůbec proběhl.

B) Centrifugace naproti tomu využívá odstředivé síly. Když se vysokou rychlostí roztočí směs lehčích a těžších molekul, těžší budou mít vždy tendenci putovat k okrajům nádoby, zatímco ty lehčí zůstanou uprostřed. Kvůli poměrně malému hmotnostnímu rozdílu izotopů uranu je nutné vyvíjet extrémní odstředivou sílu pomocí velmi rychlých otáček. V současné době se směs v odstředivkách dokáže pohybovat rychlostí až 600 m/s a vyvíjí se takové tlaky, že je pro konstrukci odstředivky potřeba speciálních materiálů (například kevlarových vláken), které jsou pevnější než ocel (obr. 3).

C) Elektromagnetická separace využívá skutečnosti, že při pohybu elektricky nabitě částice v magnetickém poli na tuto částici působí síla magnetická, jejíž velikost závisí pouze na velikosti elektrického náboje částice, intenzitě magnetického pole a rychlosti pohybu částice - síla nezávisí na hmotnosti částice. Navíc směr takovéto síly je vždy kolmý jak na směr pohybu, tak na směr magnetického pole. To v praxi znamená, že magnetická síla nemění rychlost částice, pouze ji vychyluje na stranu. Když pak na dvě různě těžká tělesa působí stejná (!) síla, je logické, že lehčí těleso se vychýlí více. V obohacovacích separátorech tedy stačí částice ionizovat (elektricky nabít) a poté je vystřelovat stejnou rychlostí do magnetického pole, za kterým se pak budou hromadit na několika různých místech do "skupinek" podle hmotnosti. Výhodou této metody je vysoká přesnost – je s její pomocí možno oddělit od sebe jednotlivé izotopy téměř úplně. Nevýhodou je velice malé množství částic, které lze takto oddělit, neboť není žádoucí, aby se částice v separátoru vzájemně ovlivňovaly.

D) Ionizace laserem využívá toho kvantového jevu, že elektromagnetická vlna o přesně dané frekvenci dokáže excitovat (vybudit) elektrony pouze u určitých zvolených izotopů. Takové excitované atomy je pak možno oddělit ze směsi třeba elektrickým polem nebo chemickými reakcemi. Problém je v nutnosti naladit frekvenci laserového světla velmi přesně - z tohoto důvodu se tato metoda využívá zatím pouze v laboratorních podmínkách.

Kapitola 2 - Fúze

2.1) Co je to jaderná fúze? Kde se s ní setkáme?

Doposud jsme popsali jaderné reakce, ať už samovolné nebo nuceně vyvolané, které vždy vedly k rozpadu jádra na jedno či více menších. Mohl by tento proces ale fungovat i obráceně? Odpověď zní ano, a takový děj se označuje jako fúze - je tedy opakem štěpení.

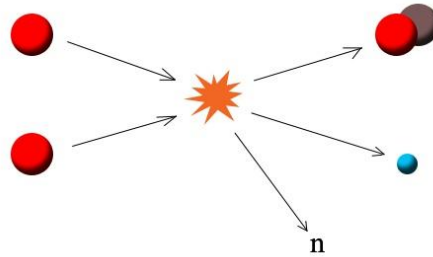
Samotný výraz fúze pochází z latinského fusio, jehož význam by se dal přeložit jako „vylévat“. Slovo bylo ve středověku přejato do angličtiny a poangličtěno na fusion, jeho význam se časem změnil na „slučovat“ [12]. Když pak byla na začátku dvacátého století připuštěna myšlenka, že by se mohla jádra atomů vzájemně slučovat, nebylo pro takový proces trefnějšího pojmenování než fusion (do češtiny později přejato jako fúze).

Když se začne mluvit o jaderných reakcích, jako první člověka pravděpodobně napadne štěpení jader (často uranu nebo plutonia), a nikoliv jejich slučování. Je to dáno tím, že současná jaderná energetika je založena výhradně na štěpení zmíněných prvků, a stejně je to i u často diskutovaných jaderných zbraní. S fúzí je to o něco obtížnější. Zatímco jádro uranu se většinou rozpadne prakticky samo, pokud do něj narazí neutron o určité (na jaderné poměry relativně nízké) energii, u fúze je potřeba dostat dvě jádra k sobě dostatečně blízko, aby se spojila v jádro jedno.

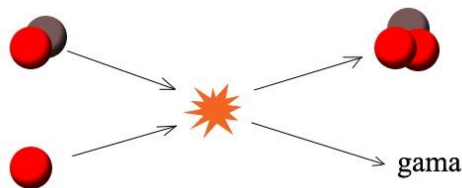
Jak jsme zmínili již v úvodu, jádra jsou tvořena protony a neutrony, z nichž protony mají kladný náboj. Zároveň je ale z elektrostatiky známé, že stejné náboje se vzájemně odpuzují. Velikost jejich odpudivé síly pak závisí nejen na velikosti obou nábojů, ale především na vzdálenosti mezi oběma náboji, a to dokonce s druhou mocninou. To v praxi znamená, že pokud se k sobě dva stejné náboje přiblíží 10x, jejich odpudivé síly vzrostou 100x. Když se pak vezme v potaz, že přitažlivá jaderná síla, která musí nad elektrickou odpudivou silou převážit, má dosah asi 10^{-15} m, není těžké si udělat obrázek o tom, jak obtížné je přiblížit k sobě jádra natolik, aby se sloučila.

Přes náročnou podmínky pro jadernou fúzi tato reakce probíhá samovolně v přírodě - ve hvězdách. Kdokoliv se kdy zamýšlel nad tím, odkud se bere sluneční energie, odpovědí pro něj je právě fúze. Slunce, stejně jako každá jiná hvězda, se na počátku své existence skládalo prakticky výhradně z vodíku. Vodík je nejjednodušší a nejlehčí možný prvek, který svým zastoupením ve vesmíru tvoří drtivou většinu. Gravitační síly umožňují postupné shlukování mračen vodíku, a když je jejich hustota a hmotnost dostatečně vysoká, aby nastaly podmínky popsané v předchozím odstavci, dojde v nitru hmoty k zážehu fúzní reakce.

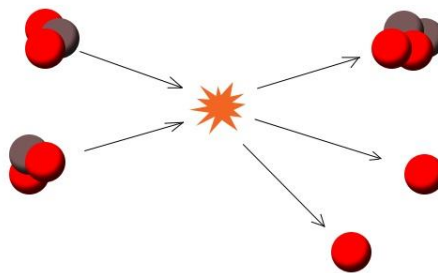
Fúzní reakce ve hvězdách mají mnoho fází. Ta počáteční je nejpomalejší (nejméně pravděpodobná), avšak nejdůležitější. Jde o sloučení dvou protonů za vzniku proton-neutronového jádra (deuteria) a jednoho pozitronu (antičástice elektronu). Jak vidno, při této reakci se jeden proton změnil na neutron, celkový náboj však musí zůstat zachován, proto je dalším produktem právě pozitron. Takto vzniklé jádro deuteria se ve druhé fázi slučuje s dalším protonem a vzniká izotop helia He3. Následující reakce spojuje dvě taková jádra He3 za vzniku jednoho jádra He4 a dvou volných protonů. Tímto způsobem se hmota hvězdy postupně přeměňuje z vodíku na helium [1, str. 48]. Tato posloupnost reakcí se nazývá proton-protonový cyklus a jde o nejpravděpodobnější sérii reakcí v jádrech hvězd, jejichž palivem je vodík. Cyklus je znázorněn na obrázcích 19, 20 a 21.



Obr. 19. Schéma první fáze proton-protonového cyklu. Dva protony reagují za vzniku jádra deuteria (proton + neutron), uvolní se také pozitron (modře) a neutrino (n).



Obr. 20. Druhá fáze proton-protonového cyklu. Proton se sloučí s jádrem deuteria za vzniku helia 3. To je po reakci excitováno a následnou deexcitací vyzáří foton gama.



Obr. 21. Třetí fáze proton-protonového cyklu. Dvě jádra helia 3 se sloučí v jádro helia 4, uvolní se dva volné protony.

V dostatečně starých hvězdách (jejichž jádro dosahuje teplot 100 milionů °C) pak dochází k tzv. 3-alfa reakcím, což je posloupnost procesů, do kterých vstupují tři jádra helia a na jejichž konci vzniká jádro uhlíku (převzato ze [13]). Když se takto vyčerpá heliové palivo u těžší hvězdy, dojde k jejímu stlačení, nárůstu teploty a začne se slučovat uhlík. Tímto postupem vznikají stále těžší prvky (zpravidla skoky neon - kyslík - křemík - železo) a proces končí u železa a niklu, které jsou velmi stabilní a dále se prakticky neslučují.

V tomto místě je dobré si uvědomit, jak mocným zdrojem energie Slunce je: na Zemi dopadá pouhá jedna dvoumiliardtina celkového slunečního výkonu, která však činí zhruba 180 000 TW (jeden tera watt je bilión wattů). To je pro představu asi 14 000 krát více, než v současné době spotřebovává celé lidstvo.

Jak se Slunci a ostatním hvězdám daří spustit a udržet fúzní reakce? Klíč leží v gravitaci. Slunce, které je přibližně 300 000 krát těžší než Země, je drženo pohromadě obrovskými gravitačními silami a v jeho nitru panují vysoké tlaky a teploty. Hovoří se asi o 15 milionech °C, tlak se odhaduje na $15 \cdot 10^{13}$ Pa. Mikroskopicky se tyto dvě veličiny projevují tak, že tlakem se atomy dostanou velice blízko k sobě, a teplota, která je projevem rychlosti částic, umožňuje jejich časté srážky.

2.2) Vznik těžších prvků

V tuto chvíli se nabízí otázka, jak je možné, že někdy se energie uvolňuje při štěpení jader, a jindy zase při jejich slučování. Je to skutečně dáno tím, jaká jádra do reakce vstupují, a jaká z ní vystupují. Vodík není jediný prvek, který lze slučovat, a uran není jediný, který lze štěpit. Teoreticky vzato lze slučovat či štěpit jádra kterýchkoliv prvků, rozdíl je jen v tom, za jakých podmínek k takové reakci dojde, a zda se při tom energie uvolní či spotřebuje. Výzkumy ukazují, že exotermní (uvolňující energii) slučování se týká jader těch prvků, které jsou lehčí než železo, naopak u jader prvků v periodické soustavě dále za železem se bude energie při slučování spotřebovávat (endotermní reakce). Štěpení je ve své podstatě opačný proces k fúzi, takže pro něj bude toto pravidlo platit obráceně.

Tato skutečnost také odpovídá na otázku, jak všechny známé prvky vůbec vznikly. Když budeme předpokládat, že v dřívější fázi existence vesmíru bylo k dispozici velké množství protonů a elektronů, které dohromady mohou tvořit atomy vodíku, není těžké si domyslet, že jejich slučováním v jádrech rodičích se hvězd mohly vznikat těžší prvky, a to až po železo, případně nikl. Jak potom ale vznikly prvky, které jsou ještě těžší než tyto dva?

Ve vesmíru se setkáme s celou řadou různých hvězd, které se liší především svou velikostí a teplotou. V podstatě platí pravidlo (u hvězd takzvané hlavní posloupnosti), že čím je hvězda hmotnější, tím má na svém povrchu i v jádře vyšší teplotu, současně má také ale kratší životnost, neboť rychleji spaluje fúzní palivo. Naše Slunce se v tomto žebříčku nachází někde mezi počátkem a středem obvyklých hmotností a teplot, patří tedy ke hvězdám menším. Existují ale i hvězdy, které mohou být až 70x hmotnější, než je naše Slunce (tzv. veleobří). Životní cyklus takových hvězd je velmi krátký (řádově desítky miliónů let) a vždy končí zhroucením hvězdy a následnou explozí, které známe jako supernovy. Takový výbuch zbylé jádro přemění na neutronovou hvězdu (pulsar) nebo na černou díru v případě těch úplně nejtěžších hvězd. Podstatné ovšem je, že exploze supernovy uvolní dostatečné množství energie na to, aby se sloučily i prvky těžké a stabilní, které by jinak do fúze nevstoupily. Takto v podstatě vznikají jádra těch prvků, které se v periodické soustavě nacházejí dále za železem, a explozí supernovy se rozmetají do vesmíru. Když tedy na Zemi lidé těží například zlato nebo uran, lze říci, že původ těchto prvků (ještě před vznikem Sluneční soustavy) se nachází právě v mohutných explozích supernov.

Kapitola 3 - Fúze a energetika

3.1) Energie

Energie je ve své podstatě fyzikální veličina, která vyjadřuje schopnost hmoty, tělesa nebo pole konat práci. Energie může nabývat mnoha forem a podob, pro příklad uvedme třeba energii pohybovou (kinetickou), polohovou (potenciální), chemickou, tepelnou, elektrickou a světelnou, existuje jich pochopitelně ale mnohem více. Energii v různých podobách nalezneme všude kolem nás a k životu ji nezbytně potřebujeme - ať už je řeč o energii v moderním pojetí slova, pod kterou si zpravidla lidé představují elektrinu nebo zemní plyn, či o energii lidského těla přijímanou z potravin, sluneční energii, která ohřívá Zemi na životu příznivé teploty – bez energie by žádný život existovat nemohl.

Energie souvisí s jedním z nejdůležitějších zákonů (a předpokladů) ve fyzice. Je jím zákon zachování energie. Tento postulát jednoduše řečeno praví, že při jakémkoliv uzavřeném procesu zůstává celková energie soustavy stejná. Jinými slovy, energie nemůže nikde mizet ani se tvořit „odnikud“. Pokud by tento zákon neplatil, v praxi by to například znamenalo, že by bylo možné zkonstruovat tzv. perpetuum mobile, tedy stroj, který pro svou práci čerpá energii „odnikud“. Ač by to nejspíše znamenalo revoluci v energetickém průmyslu, negativní následky by byly nedozírné.

Tento zákon je také klíčovým předpokladem pro budování většiny fyzikálních teorií. Uvažme následující situaci: fyzikové objeví děj, při kterém se zdánlivě energie ztrácí. Než aby ale uznali, že v tomto případě zákon zachování energie prostě neplatí, raději přepokládají, že ona „ztracená“ energie se mění do podoby částice, kterou pro její vlastnosti nedokážou přístroje detekovat (zachytit). Dobrým příkladem zmíněné situace je objev částice neutrina, kterou se podařilo zachytit a dokázat tak její existenci až po 25 letech od vyslovení předpokladu, že taková částice musí existovat (převzato z [14]).

3.2) Energie a hmota

Pojmem hmota se ve fyzice rozumí jakási substance, ze které jsou složeny všechny fyzikální objekty. Jednou ze základních vlastností hmoty je hmotnost, což je veličina projevující se dvěma způsoby: Jednak je to schopnost odolávat zrychlení, pokud na danou hmotu působí síla, zadruhé je hmotnost mírou projevu gravitačních sil.

Už od středověku se alchymisté snažili měnit hmotu tak, aby z materiálu hojného a dostupného (olovo, železo) vytvořili materiál drahý (zlato). Poháněni úspěchy s jinými „přeměnami“, které měly ovšem pouze chemický charakter, se tito lidé hnali za vidinou rychlého zbohatnutí. Co ovšem netušili, byla skutečnost, že zlato a železo jsou rozdílné prvky, a tedy neexistuje žádná chemická reakce, která by z jednoho udělala druhý. Teprve až na začátku 20. století bylo do celé záležitosti vneseno světlo. Tehdy se totiž ukázalo (a vedl k tomu především objev radioaktivity), že prvky mezi sebou ve skutečnosti lze měnit, ale jen prostřednictvím reakcí jaderných. A jakou úlohu v tom všem sehrála energie?

Vezměme si pro příklad řetězec prvních tří reakcí, které probíhají ve hvězdách (vizte předchozí kapitolu). Do této série vstupuje celkem 6 protonů, na jejím konci pak vystupuje jedno jádro He_4 , dva protony a dva pozitrony (hmotnost neutrin je zde zanedbatelná). Spočítejme celkovou hmotnost částic na vstupu a výstupu. Pro přehlednost budeme hmotnosti uvádět pomocí relativní atomové hmotnosti, tedy jako násobky $1,660\,539 \cdot 10^{-27}$ kg. Hodnoty budeme vyjadřovat na šest desetinných míst pro co nejvyšší přesnost:

Relativní atomová hmotnost protonu je 1,006 622, do reakcí vstupuje šestinásobek, tedy 6,039 732. Hmotnost pozitronu je stejná jako hmotnost elektronu, která činí 0,005 486. Relativní atomová hmotnost helia 4 je podle periodických tabulek 4,002 602. Když tedy sečteme hmotnosti výstupních částic, dostaneme sumu 6,026 817. Když tuto hodnotu srovnáme se vstupní hmotností 6,039 732, vidíme, že nastal úbytek hmotnosti (rozdíl činí 0,012 915). Kam se tato hmotnost poděla? A odkud se bere energie, která se při těchto reakcích uvolňuje?

Roku 1905 Albert Einstein (obr. 4) odhalil vztah mezi hmotou a energií. Tuto souvislost popisuje velice důležitý a dost možná populárně nejznámější fyzikální vztah: $E = mc^2$. E vyjadřuje energii, m hmotnost a c rychlost světla. Laicky řečeno to znamená, že jeden kilogram hmotnosti obsahuje klidovou energii o velikosti jedenkrát druhé mocniny rychlosti světla joulů. Rychlost světla má přitom hodnotu skoro 300 miliónů metrů za sekundu, z čehož je vidět, jak obrovské množství energie v sobě hmota ukrývá.

Jen čistě pro představu uvedme pár příkladů, v jakém měřítku by se tato energie mohla užít v praxi. Uvolněním klidové energie pouhého jednoho kilogramu hmoty (jakékoliv) by bylo možné získat dostatečné množství energie pro:

A) uvaření zhruba 250 miliónů tun vody (z původní pokojové teploty 20 °C). To je odhadem asi 400 000 plaveckých bazénů.

B) vyzvednutí více než osmi miliard tun váhy do výšky jednoho kilometru. To je přibližně 15 000 ropných tankerů.

C) nahrazení celkem 2,8 miliard litrů běžného benzínu. To je dostatek pro více než 800 000 okružních jízd kolem Země podél rovníku při spotřebě 8 litrů na 100 kilometrů.

D) pokrytí veškeré energetické spotřeby celého lidstva na asi 2,5 hodiny.

Čísla plynoucí z Einsteinova vzorce se zdají být sympatická, avšak háček je v tom, že přeměnit celou hmotu na energii umožňuje pouze reakce zvaná anihilace.

K anihilaci dochází při střetu hmoty s antihmotou, přičemž klidová energie obou složek („energie ukrytá v hmotnosti“) se mění energii jinou (záření gama). Při různých jaderných reakcích či v urychlovačích lze pozorovat antičástice, nejčastěji pozitrony (anti-elektrony), už od poloviny dvacátého století je však potvrzena i existence antiprotonů a objevují se stále další. S antihmotou se ovšem váže několik problémů: především se v přírodě volně nevyskytuje v potřebných množstvích (a pokud vyskytuje, pak je zcela mimo náš dosah) a její výroba stojí více energie, než by byl případný zisk. Druhý zádrhel spočívá v obtížnosti antihmotu udržet a skladovat. Jedinou současně známou metodou zabránění střetu antičástic s částicemi (a následné anihilaci) je využití magnetického pole, které lze ovšem použít pouze na antičástice s elektrickým nábojem.

Nyní zpět k fúzi. Při syntéze jader vodíku (nebo jiných lehkých prvků) dochází také k „přeměně“ hmoty na energii (stejně tak pochopitelně i při štěpení prvků těžkých), avšak na rozdíl od anihilace si zde většina hmoty svou klidovou energii zachovává a na energii jinou přemění pouze malou část. Jak bylo možno vidět na dříve uvedeném příkladu, u řetězce vodíkových reakcí se z celkového 6,039 732 násobku atomové hmotnostní konstanty na energii přeměnilo pouhých 0,012 915. To je asi 0,2%. I přes to, že mají přibližně 500x menší účinnost než anihilace, patří jaderné reakce stále k těm energeticky nejúčinnějším procesům ve vesmíru.

3.3) Energie na Zemi

Ukázali jsme, že jaderná fúze je velice efektivním zdrojem energie a výkonným pohonem hvězd. Je tedy zřejmé, že myšlenka ovládnutí tohoto procesu na Zemi již vyvstala na mysli nejednomu vědci. Aby bylo možné si lépe uvědomit výhody tohoto možného zdroje, je dobré podívat se postupně na jiné způsoby získávání energie, které se využívají v současné době:

A) Fosilní paliva - okruh materiálů, jejichž spálením se uvolňuje energie. Patří sem uhlí, ropa, zemní plyn. Stejným způsobem se dodnes využívá i dřevo, ač se nejedná o fosilní palivo. Výhřevnost těchto zdrojů se pohybuje okolo 15 MJ/kg pro dřevo, až 30 MJ/kg pro černé uhlí a koks a 45 MJ/kg pro benzín a naftu. Odhaduje se, že ropu lidstvo spotřebuje do 50 let, uhlí pak do 300 let. Je třeba brát podobné odhady s rezervou, jelikož mnoho nalezišť není v současné době ještě objeveno, přesto je zřejmé, že tyto zásoby nevydrží věčně a spotřeba energie lidstva stále dramaticky roste.

Fosilní paliva se navíc pro svou poměrně malou výhřevnost potýkají s drahou dopravou a skladováním (zvláště citelná je tato skutečnost u letadel, kde palivo tvoří značnou část hmotnosti stroje a tím dále zvyšuje jeho spotřebu).

Hlavním odpadním produktem spalování fosilních paliv je oxid uhličitý (CO_2). Ten vzniká navázáním dvou atomů kyslíku na jeden atom uhlíku v hmotnostním poměru 12 ku 16 · 2. To jinými slovy znamená, že úplným spálením 12 kg uhlíku vznikne 44 kg oxidu uhličitého. Jedna velká uhelná elektrárna (obr. 5) spotřebuje až 10 000 tun uhlí za den, což dává vzniknout skoro 30 000 tun CO_2 za den z jediné takové elektrárny. O možném následku zvaném „globální oteplování“ se ve světě stále diskutuje, faktem ale zůstává, že od dob před průmyslovou revolucí do dnešní doby vzrostlo zastoupení CO_2 v atmosféře o více než 15%.

Oxid uhličitý není jediný odpadní produkt spalování fosilních paliv. Mezi další látky uvolněné do ovzduší patří oxid siřičitý (SO_2), který dále reaguje s vodou a tvoří kyselinu sírovou, je zodpovědný za kyselé deště, oxidy dusíku a dokonce také stopová množství uranu a thoria (obojí radioaktivní). Uvádí se, že uhelná elektrárna o výkonu 1 GW za rok uvolní do atmosféry 5 tun uranu a 12 tun thoria. Pro srovnání – jaderná elektrárna o stejném výkonu za rok vyprodukuje 30 tun radioaktivního odpadu, který je však na rozdíl od předchozího bezpečně uskladněn. Uvedené hodnoty převzaty z [1].

B) Vodní elektrárny - využívají polohové energie vody. V některých hornatých zemích s velkými toky je „vodní energie“ schopna pokrýt až 100% spotřeby (Norsko), většina zemí však nemá dostatečné přírodní podmínky k tomu, aby mohla vodu využívat jako hlavní zdroj energie. V takovém případě by zvýšení použitelnosti vodních elektráren vyžadovalo budování obrovských přehrad, které však devastují krajinu (často právě tu zemědělsky nejvýnosnější, neboť nejúrodnější půda se nachází většinou v nížinách) a nutí tisíce obyvatel k vystěhování. Navíc při absenci veletoků mívají vodní elektrárny poměrně malý výkon (v České Republice pouze v řádech megawattů).

Je dobré si také uvědomit, že značná část vodních elektráren jsou elektrárny tzv. „přečerpávací“ (obr. 6). Tato zařízení fungují pouze jako zásobárny energie: ve špičce, kdy je cena elektřiny vyšší, pouštějí vodu z vyšší nádrže do nižší a elektřinu tak dodávají, v noci naopak, když je cena elektřiny nízká, vodu čerpají zpátky z nádrže nižší do vyšší, a energii při tom spotřebovávají. To znamená, že tyto elektrárny z dlouhodobého hlediska energii nevyrábějí (ve skutečnosti je tomu spíše naopak, neboť jejich účinnost se pohybuje mezi 30% až 50%, zbytek energie se při každém procesu přeměny na teplo třením).

C) Větrné elektrárny - využívají pohybové energie vzduchu k výrobě elektřiny. Jak je patrné už z názvu, tato zařízení potřebují ke své funkci vhodné geografické podmínky, tedy také je nelze provozovat kdekoliv. Stejně tak jsou větrné elektrárny (obr. 7) závislé na ročním období a počasí, tudíž nemohou fungovat nepřetržitě. Navíc se v posledních letech ukazuje, že tato zařízení vysušejí půdu, na které stojí, a produkují zejména nízkofrekvenční hluk, který má negativní dopady na zdraví blízko žijících obyvatel. Největší nevýhodou větrné energie však nadále zůstává velmi nízká výkonnost - jen k nahrazení Temelína by bylo třeba několik tisíc větrných elektráren.

D) Solární energie - převádění světelné energie ze Slunce na elektřinu je v současnosti ve zvýšené míře podporováno vládami formou finančních dotací, což je také důvod, proč se ve Střední Evropě rapidně zvýšil počet solárních zařízení, a proč došlo k hromadnému pokrývání i zemědělských ploch slunečními elektrárnami. Během slunečných letních dní dopadající hustota příkonu na povrchu Země činí až 1000 W/m^2 , nicméně moderní solární panely (obr. 8) dokáží z tohoto množství využít pouhých 17% (pro srovnání - rostliny, ať už zemědělsky užitečné či jiné, využívají fotosynteticky v některých spektrech až 30% této energie) [15][16]. V zimě klesá množství dopadající energie jen na cca 300 W/m^2 , a to když je slunečno. Naopak při nepříznivém počasí se hustota dopadající energie dále snižuje na 100 W/m^2 (léto) a v noci je pochopitelně nulová. Výkon solárních elektráren je tedy dost malý a stejně jako u těch větrných značně kolísavý. Jedinou výhodou se tak zdá ekologická nezávadnost a „zelenost“ solární energie. Je to ale opravdu tak?

Fotovoltaický článek je při své výrobě značně náročný na materiál a především také na energii. Zejména složitá úprava křemíku, který tvoří většinou část materiálu článku, si vyžádá velké energetické investice. Výzkumy ukazují, že energetická návratnost solárních panelů je zhruba 4 roky (jinými slovy článek za 4 roky vyrobí stejné množství energie, jako bylo spotřebováno k jeho výrobě). Do těchto úvah přitom nejsou započítány nároky na ekologickou likvidaci článku. Je tedy dost pravděpodobné, že u mnoha článků se spotřebuje více energie na jejich výrobu a likvidaci, než kolik tyto články vyrobí za celou dobu své životnosti [17].

E) Geotermální energie - využívá tepelné energie z nitra Země. Nejčastěji se zdroje geotermálního tepla uplatňují k vytápění domů, lze je použít i k výrobě elektrické energie pomocí horkých vodních par. Problém spočívá v ojedinělosti lokalit, kde se dá tato energie využít (zdroje jsou známy především na Islandu, USA a Filipínách). Hlavním nedostatkem tohoto zdroje je ovšem také malá výkonnost - k roku 2010 se uvádí celkový světový výkon okolo 10 MW.

F) Přílivová energie - dalším používaným zdrojem obnovitelné energie je pohybová energie vodní masy v mořích a oceánech, především tedy na jejich pobřežích. Pohyb vody, který je způsobený převážně slapovými jevy (gravitačním působením Měsíce), se převádí na elektřinu pomocí speciálních podmořských turbín.

Jedna z nejvýznamnějších přílivových elektráren se nachází se francouzské Bretani a má výkon až 240 MW. Potíž je ovšem v tom, že přílivové elektrárny mohou vyrábět energii asi 2500 hodin ročně (zhruba čtvrtina roku), přičemž se tyto časy neshodují s energetickými špičkami. Navíc se takováto zařízení nacházejí daleko od civilizace, což dále snižuje jejich využitelnost, nemluvě pak o vnitrozemních státech.

G) Jaderné elektrárny - využívají energii, která se uvolňuje při štěpení obohaceného uranu, tzn. uranu, jehož podíl izotopu U235 byl zvýšen na 2 až 5 %. Jde o zatím nejvýkonnější zdroj získávání energie, v současné době jaderné elektrárny (obr. 9) pokrývají asi 15 % světové spotřeby. Výstupní výkon jediné jaderné elektrárny se pohybuje v řádu tisíců MW (v závislosti na počtu reaktorů), Temelín například produkuje přes 2000 MW energie (dva reaktory). U Temelína ještě zůstaňme - tato elektrárna spotřebuje ročně kolem 40 tun paliva (používá se oxid uraničitý UO_2), což je množství hmoty, které by se vešlo do krychle o hraně 1,6 m.

Lze vypočítat, že jeden kilogram jaderného paliva uvolní řádově 10^{12} jouleů energie (dostatek na vypaření 400 tun vody). Výhodou jaderné energetiky je tedy rozhodně vysoká výkonnost a nízká náročnost na množství paliva (cena paliva tvoří asi jen 15 % ceny elektřiny vyrobené v jaderné elektrárně). Mezi nevýhody patří velmi drahá a složitá konstrukce jaderných elektráren, riziko jaderných havárií (za kterými nemusí stát jen technické nedostatky či pochybení personálu, ale mohou být způsobeny například i vnějšími teroristickými útoky) a samozřejmě také vznik radioaktivního odpadu, který musí být bezpečně uskladněn na desítky let, než u něj míra radioaktivity poklesne na dostatečně nízkou úroveň. Údaje o současných zdrojích energie čerpány především z [1, str. 241].

Pro přehlednost uvedme ještě cenu energie vyrobené z různých zdrojů. Jedna kilowatthodina (kWh) energie vyrobené v uhlené elektrárně stojí 1,6 Kč, ve vodní elektrárně 5 Kč, ve větrné 7 Kč a v solární 8 Kč. Jaderná elektrárna přitom stejné množství energie vyrobí za 1 Kč. (Ceny převzaty z [3, str. 15].)

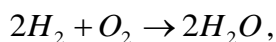
Naproti všem zmíněným energetickým zdrojům se zde nachází jadernou fúzi, jejíž technologie je zatím stále ve vývoji, avšak již nyní je zřejmá většina jejích výhod i nevýhod. Palivem takových elektráren by se stalo deuterium a tritium, jejichž reakce vyžaduje nejmírnější podmínky ze všech lehkých prvků. Deuterium se nachází běžně v přírodě v zastoupení jednoho z každých 6700 atomů vodíku. Vodík lze přitom získávat z běžné vody, která tvoří 71 % povrchu Země. Obohacovat vodík deuteriem je navíc mnohem snazší než obohacovat uran izotopem U235, neboť hmotností rozdíl U235 a U238 činí pouze 1,2%, zatímco u vodíku a deuteria je to okolo 100%. Tritium se v přírodě nenachází, protože je nestabilní, avšak je produktem reakce dvou deuteriových jader. Když se vezme v úvahu, že z jednoho kilogramu deuteria lze uvolnit 300 TJ, lze při četnosti tohoto izotopu ve vodě a množství vody na planetě vypočítat, že při současné spotřebě lidstva by tento zdroj energie vydržel 23 miliard let, což je asi 4x déle než je předpokládaná existence Země a Sluneční soustavy.

Odpadní látkou fúzního procesu bude především helium, které je bezpečné jak pro život, tak pro životní prostředí (běžně se prodává i dětem v pouťových baloncích). Helium totiž patří mezi inertní (netečné) plyny, což znamená, že nemá tendenci se vázat na jiné prvky a tvořit tak složitější sloučeniny. O žádném jaderném odpadu tedy v případě fúzních elektráren hovořit nelze.

Pro dosažení vhodných podmínek k fúzi je třeba do paliva neustále vkládat relativně velké množství energie, aby reakce mohla vůbec probíhat. To je podstatný rozdíl oproti štěpným uranovým reaktorům. V nich totiž proces štěpení probíhá tzv. „řetězově;“ to znamená, že při spuštění má reakce tendenci probíhat samovolně a je třeba ji naopak tlumit a udržovat pod kontrolou. Důsledkem této skutečnosti je, že u fúzních elektráren nehrozí žádné riziko exploze, jako se tomu stalo například v nechvalně proslulém Černobylu. V případě fúze v okamžiku, kdy do vodíkového paliva přestaneme přivádět energii, a tím palivo ohřívát, veškeré jaderné reakce ustanou.

Přes všechny zmíněné výhody fúzního reaktoru oproti štěpnému nelze říci, že bychom se přechodem od uranu k vodíku úplně zbavili rizika radioaktivity. V jedné z fází fúzního procesu vzniká tritium, které samo o sobě radioaktivní je. Tento izotop se pak dále přeměňuje na bezpečné stabilní helium 4, avšak v případě havárie (zastavení fúzního procesu) by se muselo počítat s výskytem radioaktivního tritia v palivové směsi. Navíc vnitřní stěny reaktoru budou dlouhodobě vystaveny ionizujícímu záření, které u nich vyvolá radioaktivitu, a při jejich pravidelých výměnách s nimi bude nutno zacházet jako s radioaktivním materiálem.

Pro doplnění výhod fúzní energetiky ještě uveďme tzv. *vodíkové hospodářství*. V současné době jsou fosilní paliva využívána nejen tepelnými elektrárnami, ale také domácnostmi a dopravními prostředky. Jak bylo ale uvedeno, tyto zdroje energie nejsou nevyčerpatelné, a navíc uvolňují do ovzduší oxid uhličitý a další skleníkové plyny. Alternativou ke spalování fosilních paliv by se však v budoucnu mohlo stát spalování vodíku. Ten hoří s kyslíkem podle chemické rovnice



odkud je vidět, že jedinou „zplodinou“ je voda (vodní pára). V přepočtu na hmotnost je dokonce výhřevnost vodíku více než 2x vyšší než u benzínu (až 120 MJ/kg pro vodík, benzín „pouhých“ 47 MJ/kg). Nevýhody vodíku jsou však především tyto dvě: vodík při stejné hmotnosti zaujímá mnohonásobně větší objem než benzín. Tento problém by ale bylo možné řešit vysokotlakými nádobami, které by vodík držely při vysoké hustotě. Druhou nevýhodou je samotné získávání vodíku. Takový proces je totiž velmi energeticky náročný (v závislosti na metodě si žádá mnoho elektrické či tepelné energie). To je patrně hlavní důvod, proč se vodík jako palivo automobilů a domácností nevyužívá už dnes. Tento problém by však mohly řešit právě fúzní reaktory. Při fúzi se uvolňuje velké množství tepla, z něhož na elektřinu bude možné přeměnit pouhou jednu třetinu (stejnou účinnost mají i současné štěpné reaktory, u moderních tepelných elektráren je to díky přímému cyklu ohřáté vody turbínami a vyšším teplotám mezi 40% až 50%). Zbylá, na elektřinu nepřeměněná energie se pak označuje jako „odpadní teplo“, a právě tato energie by se mohla využívat k oddělování vodíku a kyslíku z molekul vody. Rozšíření fúzních elektráren by tedy mohlo vést nejen k ekologičtější a výkonnější výrobě elektřiny, ale také by se tyto výhody mohly přenést na cestování a chod domácností.

O vodíkových člancích je možné se dozvědět více v [3].

Kapitola 4 - Využití fúze na Zemi

4.1) Fúze pro lidstvo

Na nesporné výhody možného vyrábění elektřiny pomocí slučování lehkých jader jsme již poukázali, jak ji tedy ale na naší planetě uskutečnit? Inspiraci vědci museli hledat tam, kde již fúze úspěšně probíhá: ve hvězdách. V jádrech hvězd teplota dosahuje řádově milionů stupňů a tlaky v pascálech mají čtrnáctimístné hodnoty. Speciálně pro deuterium-tritiový cyklus jsou naštěstí podmínky k zažehnutí nižší, i přesto je jejich dosažení cílem fyziků a vědců už po celá desetiletí. Obrovské tlaky palivové směsi na Zemi napodobit nelze (rozhodně ne dlouhodobě), proto je třeba obrátit pozornost ke zvyšování teploty. Čísla, o kterých je řeč, se tak pohybují v řádu několika stovek milionů kelvinů (nebo °C chcete-li, neboť při těchto hodnotách rozdíl 273,15 stupňů nehraje roli). Tento úkol však sebou nese dva velké problémy. Jak lze cokoli na Zemi ohřát na tak vysokou teplotu? A jak takto ohřátou směs udržet pohromadě? Oceli se vypařují už při teplotách kolem 3000 °C, a ani speciální teplu odolné materiály nevydrží více než několik tisíc stupňů. Vědci usilující o uskutečnění fúzních reakcí se rozdělili na několik táborů podle způsobu, jak žhavou palivovou směs udržet. Mezi dnes nejperspektivnější a nejúspěšnější metody patří udržení magnetické, nadějně mu však sekunduje udržení inerciální (setrvačné). Při snahách o ovládnutí možného nového zdroje energie se však také objevily mýty a slepé uličky (jako například „studená fúze“), které kolují mezi laickou veřejností i přesto, že z hlediska dnešní vědy nevede žádná cesta k jejich využití pro konstrukci reaktoru, či jen k jejich bližšímu zkoumání. Takové popisuje následující kapitola.

4.2) Mytologie fúzních procesů

Studená fúze - na konci osmdesátých let dva vědci oznámili, že se jim podařilo dosáhnout fúze deuteria za běžných pokojových teplot. Zájem o objev byl ve vědecké komunitě obrovský, avšak pánové Stanley Pons a Martin Fleischmann podrobnosti svého pokusu úzkostlivě tajili. Pokus, jak se později ukázalo, spočíval v elektrolýze těžké vody (D_2O - voda, kde místo vodíku zaujímá deuterium). Na elektrolytu z palladia se totiž uvolňovalo překvapivě velké množství energie, a oba vědci byli přesvědčeni, že tato energie má původ právě v jaderné fúzi.

Kovy jako palladium mají totiž schopnost absorbovat vodík (a tedy potažmo i jeho izotop deuterium) do své mřížky, kde může tento lehký prvek dosahovat značně vysoké koncentrace. Bylo tedy nasnadě myslet si, že izotopy deuteria jsou v palladiové mřížce umístěny tak blízko sebe, že mezi nimi může dojít ke sloučení jader.

Ve skutečnosti propočty ukazovaly, že vzdálenosti částic v mřížce jsou mnohonásobně větší, než by bylo potřeba pro jaderné spojení. Navíc při skutečné fúzi by se uvolňovalo neutronové záření, které by oba vědce během několika pokusů zabilo. Po mnoha dohadách a dalších pokusech, které s různými úspěchy a neúspěchy opakovaly jiné laboratoře, se ukázalo, že původ neočekávané energie je zřejmě pouze chemický, a „neočekávanou“ byl kvůli špatně (nepřesně) odhadnutým parametrům pokusu. Studená fúze je navzdory své popularitě mezi laickou veřejností pouhým vědeckým mýtem.

Sonoluminescence - fúze v bublince. V roce 2002 se skupina amerických vědců pokoušela ostřelovat kapalnou sloučeninu obsahující deuterium proudem neutronů. Jejich vlivem se v látce tvořily malé kapsle plynu - bublinky, které se působením zvukových vln prudce roztahovaly a následně hroutily. Při tomto procesu vědci pozorovali záblesky

rozzhaveného plynu v bublince, a domnívali se, že by v bublinkách za daných podmínek mohla probíhat fúze deuteria. Dokonce se podle nich při pokusu objevil i očekávaný proud neutronů a vznik tritia.

Když se ovšem jiní vědci nezávisle na sobě pokoušeli experiment zopakovat a potvrdit, žádné neutronové záření ani výskyt tritia nezaznamenali, a to i přesto, že měli k dispozici mnohem přesnější přístroje. Pozdější propočty ukázaly, že skutečná fúze by byla za daných okolností jen velice nepravděpodobná a v současné době je zřejmé, že je tato cesta jen dalším fúzním mýtem.

Podobných mýtů je mnohem více a stále se objevují další. Některé vznikají jako omyl při špatně či nepřesně provedených a zdokumentovaných experimentech, jiné slouží jako záminka pro získání pozornosti veřejnosti a čerpání financí z výzkumných grantů.

4.3) Inerciální udržení

Jelikož je žhavé palivo velmi obtížné udržet po delší čas (tím se myslí řádově sekundy), jednou z cest, jak se tomuto problému částečně vyhnout, je malá řízená exploze. Ta trvá méně než miliardtinu sekundy a nemá tedy takové nároky na stěny ani mechanismy aparatury, ve které fúze probíhá. S udržením hořícího paliva je ovšem spjat nejen čas, ale i jeho hustota, a to takovým způsobem, že čím je kratší potřebný čas, tím je vyšší nutná hustota k zapálení. Nevýhodou krátkých řízených explozí se tak stává nutnost vysoké hustoty zapalovaného deuteria, která musí překračovat hustotu olova.

Velice důležitým parametrem explozivní směsi je také její množství. Nemůže být moc malé, neboť by se snižovala pravděpodobnost zapálení (čím větší počet částic v palivu, tím větší je pravděpodobnost, že se budou srážet a slučovat). Navíc by mikroskopické kuličky deuteria byly velmi náročné na výrobu a jejich zaměření lasery by bylo obtížné. Na druhou stranu se ovšem stále jedná o jaderné reakce, tedy paliva při jedné explozi nesmí být příliš mnoho, aby nedošlo k poškození reaktorové komory. Výsledné pelety, jak jsou palivové kuličky nazvány, mají poloměr jen několik milimetrů a každá vydá energii ve stovkách miliónů jouleů.

Zapálení peletu musí proběhnout velmi rychle. K dodání velkého množství energie za krátký čas slouží složitý systém mnoha laserů, které obklopují pelet z mnoha stran a všechny do něj vystřelují vysokoenergetické pulzy současně. O zapálení v přesném slova smyslu se hovoří až tehdy, když dojde k „hoření“ (fúzním reakcím) peletu směrem z teplejšího jádra k jeho okrajům.

Používané lasery však nemají za úkol pouze palivo ohřát. Jak již bylo řečeno, k fúzní reakci je také zapotřebí vysoká hustota. Rovnoměrným a velmi prudkým zahřátím povrchu kuličky dochází odpařování jejího povrchu do okolí, přičemž vzniklé páry jsou vystřelovány ven do prostoru a jejich reaktivní síly tlačí naopak dovnitř kuličky. Tlaky vyvolané těmito silami převyšují tah tryskového motoru až stonásobně a dokáží stlačit vnitřní vrstvy peletu 1000x.

Problémem inerciálního udržení je enormní energie laserů, které jsou potřeba pro zapalování deuteria. V současnosti nejvýkonnějšími lasery jsou lasery neodymové, které však svými rozměry zabírají budovy o velikosti leteckých hangárů. Navíc je u těchto laserů problém s vlnovou délkou - ta je totiž příliš velká (nachází se za hranicí viditelného a infračerveného světla), což má ten důsledek, že páry odpařené při zahřátí peletu laserové světlo pohlcují. Problém by vyřešil laserový svazek s kratší vlnovou délkou (tj. vyšší frekvencí), který parami bez problému projde. K tomu by ale bylo potřeba vyvinout nový typ laseru, jehož přirozená vlnová délka splňuje tento požadavek. Dnes se používá svazek zatím z hlediska výkonu nejvhodnějších neodymových laserů, jejichž infračervené světlo se musí

upravit na potřebnou frekvenci pomocí speciálních nelineárních optických prvků. Ty jsou ovšem značně energeticky ztrátové.

Naopak výhodou inerciálního udržení je uspořádání jednotlivých částí zařízení – ty nejdražší (lasery) se totiž nacházejí poměrně daleko od reakční komory, a nebude proto nutné řešit jejich poškození radioaktivním zářením. Další výhodou je možnost zkoumání chování látek při extrémně vysokých teplotách a tlacích, protože laserové pulzní systémy nacházejí uplatnění i v oblasti astronomie [2].

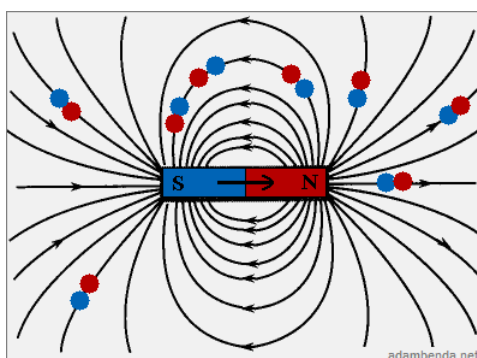
V současné době existuje po celém světě několik zařízení pro inerciální udržení, která mají ovšem pouze výzkumný charakter. Je to dáno především nedostačujícím výkonem laserů. Přesto již dva roky v USA existuje zařízení (označované jako NIF - obr. 10), jehož lasery měly mít podle předpokladů při konstrukci dostatečný výkon pro zapálení fúze. Bohužel se ukázalo, že rozptyl laserového svazku je příliš velký na to, aby k zapálení skutečně došlo. Kromě NIFu se ve fázi výstavby nachází další také zařízení ve Francii a plány na zahájení obdobného projektu oznámilo i Rusko. Všechna tři zařízení do budoucna slibují nemalý pokrok v dané oblasti výzkumu, a to nejen pro účely vědeckého a energetického charakteru, ale také pro vojenský sektor.

4.4) Magnetické udržení

Zařízení, která udržují žhavé plazma pomocí magnetických sil, jsou v současné době nejbližší podmínkám nutným ke spuštění a udržování fúzních reakcí, proto je na místě si je přiblížit podrobněji. Než se však začne hovořit o technických podrobnostech, je vhodné nejprve připomenout vliv magnetického pole na chování nabitých částic.

Klíčovým pojmem k ilustraci silového pole jsou siločivky - jde o orientované křivky, které znázorňujeme v okolí zdroje silového pole. Takové křivky popisují pohyb tzv. testovacího tělesa (či částice), které by se v onom poli nacházelo, a na které by působily síly daného pole. Když se tedy pro příklad uvede gravitační pole Země, budou všechny siločivky svislé a orientované dolů, nebo přesněji řečeno, budou mířit do středu Země.

V případě gravitace je oním testovacím tělesem libovolné těleso s nenulovou hmotností, v případě polí elektrických jím bude částice s kladným nábojem a v případě polí magnetických jím je severní magnetický pól jiného magnetu. Při budování představy o působení magnetického pole se však setkáváme ještě s tou komplikací, že severní pól magnetu není možné oddělit od jižního (rozlomením magnetu na dva kusy vznikají dva nové magnety, každý s vlastním severním i jižním pólem). Jižní pól se v magnetickém poli pohybuje přesně obráceně než severní, a tedy jediným pozorovatelným důsledkem působení magnetických sil na magnet je jeho stočení kolem vlastní osy (princip kompasu - obr. 18). To je také důvod, proč se magnetické siločivky označují správněji jako magnetické indukční čáry.



Obr. 18. Princip kompasu. Hypotetické magnetické siločivky směřují ze severního pólu (N) magnetu k jeho pólu jižnímu (S). Malé magnety v poli toho velkého se stočí podél siločivky, na které leží. Převzato z [33].

Důležitější pro účely magnetického udržení bude působení magnetického pole na elektricky nabitou částici. Ke vzniku magnetických sil dochází pouze tehdy, když se nabitá částice vůči magnetickému poli (jeho zdroji) pohybuje. Zajímavé ovšem je, že takto vzniklá magnetická síla je vždy kolmá jak na směr pohybu částice, tak na směr magnetických siločivek. To v důsledku znamená, že magnetické pole nijak nezvyšuje rychlost ani energii letící částice, pouze její dráhu stáčí. Toto chování popisuje tzv. "Flemingovo pravidlo levé ruky".

Velikost stáčivé síly závisí nejen na intenzitě magnetického pole a velikosti prolétávajícího náboje, ale také na rychlosti jeho pohybu a na velikosti úhlu, který svírá

vektor pohybu částice se silokřivkou. Pro nulový úhel bude nulová i síla, poletí-li naopak částice kolmo k silokřivkám, bude stáčivá síla největší. Diskutovaná síla se nazývá Lorentzova (rovnice 2 v matematické příloze).

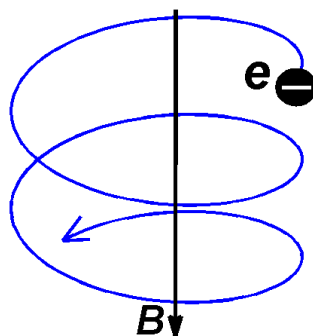
Je zřejmé, že pro dosažení žádaných fúzních reakcí je potřeba palivo, tedy izotopy vodíku, ohřát na teploty milionů stupňů Celsia. Při takových teplotách se elektrony odtrhávají z atomů a putují volně ve směsi. Vzniklá zionizovaná látka se nazývá plazma, přičemž se využívá jedna její důležitá vlastnost - její částice jsou elektricky nabitě.

Plazma samotné se označuje jako kvazineutrální, což znamená, že jako celek působí neutrálním nábojem. To je pochopitelné, protože celkový náboj kladných iontů odpovídá celkovému náboji elektronů z nich vytržených.

Pro zajímavost dodejme, že v českém jazyce se fyzikální plazma od krevní plazmy odlišuje rodem: plazma jako zionizovaný plyn je rodu středního, plazma coby složka krve je pak rodu ženského.

Čtivou formou se plazmatu blíže věnuje například kniha [7], odborněji pak [8].

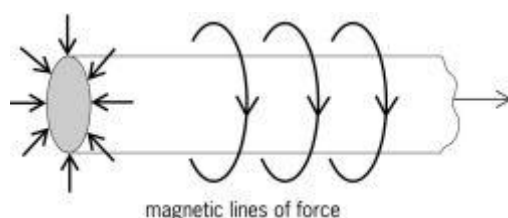
Díky působení magnetických sil na pohybující se nabitě částice budou tyto přesně opisovat magnetické silokřivky (přesněji řečeno kolem nich budou rotovat s tzv. Larmorovým poloměrem), vhodná volba tvaru magnetických silokřivek je proto naprosto zásadní (obr. 11). Hlavním způsobem, jak mohou částice „přeskakovat“ z jedné silokřivky na jinou, jsou jejich vzájemné srážky. Hovoříme o tzv. *difuzi*. [2, str. 24] [8, str. 81] (4)



Obr. 11. Znárodnění cyklotronové rotace (gyrace) nabitě částice kolem silokřivky magnetického pole. Vzdálenost částice od magnetické silokřivky se označuje jako Larmorův poloměr. Převezato z [29] s poděkováním Ústavu fyziky plazmatu.

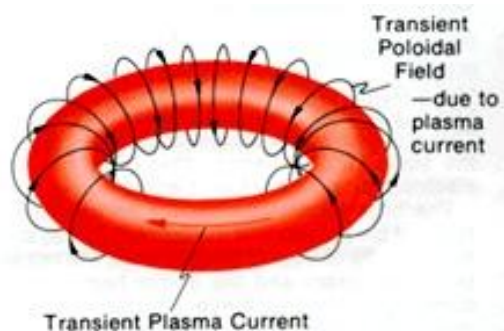
4.4.1) Stelarátory, pinče a tokamaky

Kolem každého vodiče, kterým protéká elektrický proud, vzniká magnetické pole tak, že jeho siločáry vodič obtáčí (pravidlo pravé ruky). Pokud konstrukce fúzního zařízení dokáže zařídit, aby vodíkovým plazmatem tekla silný elektrický proud, pak by tento proud mohl plazma nejen ohřívat, ale současně by vzniklé magnetické pole stlačovalo (anglicky „pinch“) proudící částice do středu směsi a tím by drželo plazma blízko osy komory. Tomuto jevu se říká pinč-efekt, a poprvé byl pozorován na smáčklé bleskosvodové trubici [7]. (obr. 12)



Obr. 12. Znárodnění pinč-efektu. Křivky obtáčející proudovou trubici znázorňují silokřivky magnetického pole, šipky směřující do středu trubice znázorňují silové působení na proud. Obrázek převzat z [30].

Kdyby se však plazma uspořádalo do rovné trubice a pustil by se jím elektrický proud, mělo by toto plazma tendenci unikat směrem k jejím koncům. Z toho důvodu se trubice stáčí do prstence a dává vzniknout útvaru známému též jako *torus* (připomíná americkou koblihu - obr. 13)



Obr. 13. Jednoduché vyobrazení toru. Šipky obtáčející trubici znázorňují silokřivky poloidálního magnetického pole. Převzato z [31].

Ke vzniku proudu plazmatem se využívá transformátorový efekt. Paralelně s torem plazmatu se navine cívka, která slouží jako primární vinutí, samotné plazma se pak projeví jako sekundární vinutí o jediném závitě nakrátko (do zkratu). Díky tomu je možné ve vodíkové směsi vybudit velmi vysoké elektrické proudy. Celé zařízení, které takto plazma ohřívá a udržuje, se nazývá *toroidální pinč*.

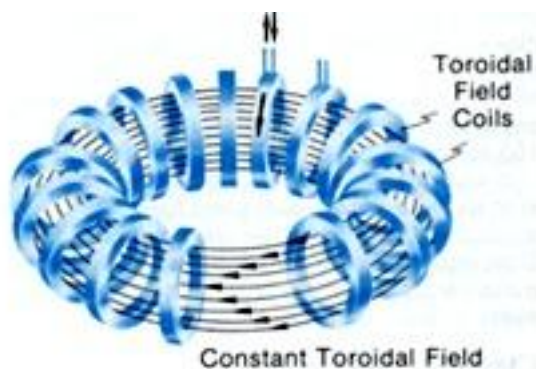
Při experimentech s pinčí se ukázalo, že plazma se při vysokých proudech a teplotách chová velmi nestabilně - nejen, že má tendenci se roztahovat a unikat ke stěnám toru, ale dokonce se kroutí (podobně jako žížala) a v některých místech se nahušťuje nebo ředí (tzv. párková nebo také korálová nestabilita, vzhledově připomíná buřtíky či korálky).

Alternativou k pinčům se později staly tzv. *stelarátory*. Šlo o zařízení tvarem velice připomínající pinčové tory, avšak na rozdíl od nich se neindukoval proud přímo v plazmatu, ale protékal vinutím vodičů, které obtáčely trubici toru, a vytvářel tak magnetické pole podél plazmatu. To udržovalo plazma o něco lépe, avšak tím, že plazmatem neprotékal proud, bylo potřeba mnohem komplikovanějších systémů cívek, které by pinč-efekt nahrazovaly. Současně bez elektrického proudu v plazmatu přišel stelarátor o významný zdroj zahřívání paliva. I přes tyto nevýhody však stále stelarátory mají dvě přednosti. Za prvé se jich vůbec netýkají proudové nestability (například smyčková nestabilita), a za druhé nepoužívají indukci proudu, která vzniká pouze při změně proudu v cívkách. Díky tomu může stelarátor pracovat kontinuálně. Jako příklad uveďme zařízení Wendelstein W7-X, které se staví v Německu a svou činnost by mělo zahájit roku 2014 (obr. 14).

Jako velmi schopnou konkurenci pro stelarátory a pinče se ukázal být *tokamak* - zařízení vyvíjené v tehdejším Sovětském svazu, které kombinovalo jak pinčový efekt, tak stelarátorovou stabilizaci. Název „tokamak“ je akronym ruského názvu pro toroidní komoru v magnetických cívkách, dobře tedy vystihuje konstrukci zařízení. Dosažené výsledky z experimentů v tokamacích byly přitom natolik dobré, že pinče a stelarátory brzy ustoupily do pozadí a fúzní fyzikové z celého světa zaměřili svou pozornost právě na tokamaky.

Jak již bylo zmíněno, tokamak kombinuje magnetická pole pinčů i stelarátorů současně. Pinč-efekt, který vzniká v důsledku elektrického proudu tekoucího plazmatem podél toru, vytváří magnetické pole, jehož silokřivky trubici toru obtáčejí. Takové pole se nazývá poloidální.

Naproti tomu proud, který teče cívkami obtáčejičými trubici toru, vytváří magnetické pole, které zase směřuje podél toru. Toto pole se nazývá toroidální (obr. 15).



Obr. 15. Šipky směřující podél trubice představují magnetické silokřivky toroidálního pole. Převzato z [31].

Když se zkombinují oba typy pole dohromady, vzniknou silokřivky ve tvaru spirály, která se obtáčí podél toru (strmost silokřivek se označuje také jako helicity). U tokamaků je zpravidla pole toroidální značně silnější než to poloidální, proto je tato spirála velmi strmá (má nízkou helicitu), podobně jako hodně natažená pružina.

Uveďme pro zajímavost, že helicity (strmost stáčení) není v celém průřezu toru stejná, ale pro co nejlepší vlastnosti magnetického pole a plazmatu helicity klesá od středu trubice směrem k okrajům. Hovoří se o tzv. *střížném poli*, jehož hlavním přínosem je především bránit šíření turbulencí ([2] – str. 31).

Jak již bylo zmíněno, proud plazmatem v tokamacích je indukován změnou magnetického pole toroidálních cívek. Změna ale nemůže probíhat neomezeně, protože by takový proud musel růst do nekonečna (či klaset z nekonečna). Současné testovací pulzy trvají až desítky sekund, a ačkoliv je možné je na budoucích zařízeních ještě více prodloužit, pro kontinuální provoz tokamaku jako reaktoru se tento princip nehodí.

Naštěstí byla v nedávné době objevena možnost tzv. *vlečení proudu*. Do toru se pomocí systému antén vyšle stojaté elektromagnetické vlnění, které část elektronů urychluje v požadovaném směru. Vzniká tak toroidální proud plazmatem.

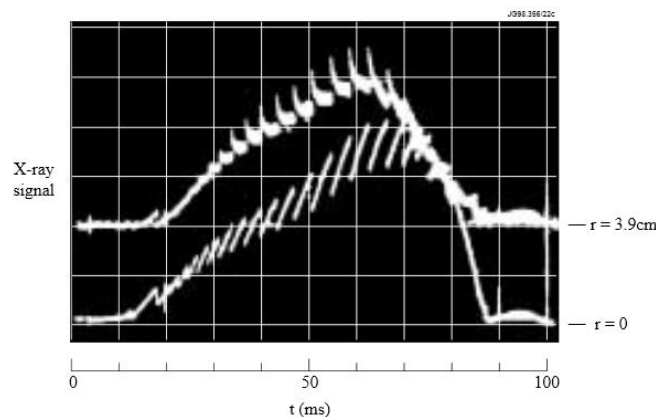
Navíc byl pozorován jev tzv. *samoindukovaného proudu* (v angličtině *bootstrap current*), který v plazmatu vzniká zcela samovolně v důsledku strmého spádu tlaku mezi nitrem a okrajem plazmatu.

4.4.2) Nestability

Tvar magnetických siločar je klíčový ve snaze zabránit střetu horkých částic plazmatu s vnitřními stěnami komory toru. Není se sice třeba bát, že by v takové situaci došlo k jakékoliv explozi či úniku záření, nicméně při styku plazmatu se stěnou dojde k jeho ochlazení a jeho celková energie tak klesá. Únik energie z plazmatu pak oddaluje podmínky potřebné k dosažení fúze.

Nabité částice mají tendenci z magnetického pole uniknout, jejich vlastnosti navíc způsobují celou řadu nestabilit. Snahu udržet plazma v požadovaném tvaru lze přirovnat ke snaze postavit tužku na její hrot. Teoreticky takto tužka stát může, avšak jakákoliv sebemenší výchylka povede k jejímu okamžitému pádu. Tato poloha je tedy pro tužku nestabilní (labilní) a jednoduše řečeno se jedná o tendenci tužky dostat se do stavu s nejnižší energií. To je také hlavní podstatou nestabilit.

Mezi nejznámější nestability patří například tzv. *pilová nestabilita*. Jde o relativně pozvolný růst teploty a hustoty elektronů v jádru plazmatu, který je náhle vystřídán pádem, a celý proces se opakuje znova. Na grafu časového vývoje těchto veličin připomíná křivka zuby pily, odkud je odvozen její název (obr. 16). Další významnou nestabilitou jsou takzvané *ELM nestability* (Edge Localised Mode, tedy u okraje lokalizovaný režim). K ELM dochází tehdy, je-li u okrajů plazmatu směrem k jeho středu příliš prudký nárůst teploty a hustoty. Projevy ELM jsou přitom velmi podobné těm pilovým: mají rovněž pilovitý průběh hustoty plazmatu v čase.



Obr. 16. Graf závislosti teploty na čase u pilové nestability, teplota je měřena rentgenovým zářením. Obě křivky značí měření ve dvou různých místech plazmatu (r představuje vzdálenost od osy komory). Převzato z [6].

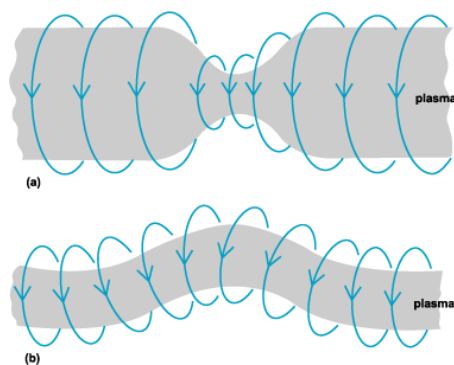
Tyto zmíněné nestability patří do skupiny nestabilit lineárních, což znamená, že k jejich vzniku stačí libovolně malá výchylka. Jinou skupinou jsou nestability nelineární, které vznikají až při překročení určité kritické meze veličiny, jejíž nárůst nestabilitu způsobuje. Uvedme opět několik příkladů.

Magnetické ostrovy vznikají přepojováním magnetických siločar a projevují se jako malé shluky, ve kterých částice krouží po malých, uzavřených drahách, čímž vyzařují více energie (elektricky nabitě částice vyzařují energii, pokud jsou předmětem zrychlení, včetně toho dostředivého), především jsou ale izolovány od okolního, teplejšího plazmatu. Oblast

chladne, zvyšuje se její elektrický odpor, čím se snižuje proud jí protékající. Stlačující pinč-efekt způsobený proudem tedy slábne a oblast se tak rozrůstá. Čím je přítom magnetický ostrov větší, tím větší má tendenci se dále rozrůstát.

Korálková nestabilita (v anglicky hovořících zemích též označovaná jako párková) vzniká lokálním zúžením profilu proudu. V místě takového zúžení je pak pochopitelně větší hustota elektrického proudu, čímž se posiluje pinč-efekt, který danou oblast zužuje ještě více.

Smyčková nestabilita se projevuje ohybem elektrického výboje, a je způsobena nerovnoměrností magnetického pole, které výboj stlačuje do jeho středu (opět pinč-efekt). Na vnější straně ohybu jsou silokřivky pole „řidší“, zatímco na vnitřní straně se více „nahustí“. To má za následek, že magnetické síly působící na proud ve směru ohybu jsou větší, než síly působící proti ohybu, ohyb tedy dále narůstá. To je jen několik příkladů pro představu, jak komplikované problémy je třeba na tokamacích řešit.



Obr. 24. Srovnání korálkové (nahore) a smyčkové (dole) nestability. U smyčkové nestability je dobře patrné zhuštění magnetických silokřivek na vnitřní straně ohybu a jejich zředění na straně protější. Převzato z [36].

Jak jsme uvedli, nestability se objevují především v okamžiku, kdy elektrický proud, tlak či hustota částic v plazmatu překročí určitou mez. V některých situacích způsobují jen nepatrný odvod energie z plazmatu, v jiných však mohou vést až k prudké ztrátě energie plazmatu nebo zhroucení celého proudového výboje. Těm druhým se říká *disrupce*.

Při disrupcích se zpravidla změní tvar celého plazmatického výboje, čímž dochází k jeho kolizi se stěnami toru, při jeho hroucení se navíc uvolňuje energie magnetického pole (poloidálního), a vznikají tak silové magnetické rázy na stěny toru v hodnotách až několika stovek tun. Disrupce tedy vedou k nadměrnému namáhání vnitřní části konstrukce tokamaku, a je proto velmi žádoucí se jim vyhnout.

Aby se tokamaky mohly disrupcím a podobným nestabilitám vyhnout, je nutné nestability zachytit už v jejich zárodku, a včas změnit parametry magnetického pole tak, aby k disrupci nedošlo. Hovoří se o řízení v reálném čase, nebo také o zpětnovazebném řízení. Aby však bylo možné na změny v plazmatu včas reagovat, je nutné neustále a podrobně sledovat jeho vlastnosti v celém jeho objemu. Tento proces se označuje jako diagnostika plazmatu.

4.4.3) Diagnostika plazmatu

Pro velmi vysoké teploty vodíkové směsi do ní není možné zasunout jakýkoliv měřicí přístroj, veškeré informace o ní se tedy musejí získávat na dálku. Nejjednodušší možností je sledovat záření, které vydává samotné horké plazma. To vyzařuje viditelné světlo, rentgenové záření, rádiové vlny, ale také neutrální částice. Informace získané takovým „pozorováním“

plazmatu však často nedostačují. Pokud mají být získána podrobnější data, je třeba do plazmatu vyslat svazek laserového světla, mikrovlnného záření či neutrálních částic (hovoří se o aktivních metodách). Pak se pozoruje, jak se tento svazek v palivu rozptýlí (nebo jaké záření vzniká při interakci svazku s plazmatem), a ze získaných dat lze vypočítat takové parametry, jako je hustota, teplota či doba udržení. Aktivní metody, ač náročnější konstrukčně, mají tu výhodu, že je pomocí nich možné určovat měřenou veličinu v přesně známém či určeném místě plazmatu (jednoduše v průsečíku vyslaného svazku a zorného pole měřicího přístroje). Plazma totiž není homogenní - jeho vlastnosti jsou v různých místech různé.

Například laserový svazek o přesně specifikované vlnové délce umožňuje měření teploty (rychlosti) elektronů pomocí Dopplerova jevu. Fotony rozptýlené od elektronů, které se pohybují ve směru pohybu fotonů, zaznamenají prodloužení či zkrácení vlnové délky, podle toho, zda se částice ke zdroji laserového svazku přibližují, nebo se od něj vzdalují. Počet částic v plazmatu je však i přes relativně nízkou hustotu velmi velký, a jelikož se částice pohybují dle Maxwellova rozdělení (všemi směry se stejnou pravděpodobností), není zachycené spektrum vlnových délek jednoduše posunuté, ale celkově roztažené. Podle tohoto roztažení se pak určuje teplota elektronů. Doplňme, že uvedený rozptyl se označuje jako Thomsonův.

K Thomsonovu rozptylu dochází při střetu nízkoenergetických fotonů s elektrony. Ionty se však tento jev netýká, a jelikož teplota iontů bývá větinou různá od teploty elektronů (rozdíl může být až několikanásobný), je nutné jejich teplotu měřit zvlášť. K tomu se zase nejvíce využívají spektrální čáry středně těžkých prvků. Tyto nejsou v plazmatu zionizovány úplně, a srážkami s rychlými částicemi emitují záření. To je ve velkém měřítku sice nežádoucí pro udržování teploty plazmatu, ale zase takové záření poskytuje významné informace o vlastnostech plazmatu. Spektrální čáry takových prvků jsou dobře známy, a lze proto snadno určit, o jaký prvek se jedná. Současně ale při teplotním pohybu „nečistoty“ plazmatem se vlnová délka vyzařovaných fotonů posouvá podle Dopplerova jevu, a ten je opět snadno měřitelný.

Velmi velký význam má měření profilu magnetického pole v toru, protože chování tohoto pole je úzce spjato s chováním plazmatu. To lze provádět opět vstřelováním svazku neutrálních částic, které se, jak již bylo řečeno, částečně zionizují a interakcí s plazmatem vydávají záření. Pokud k vyzáření ovšem dojde v elektrickém poli, spektrální čára se „rozštěpí“ na tři jiné (tzv. Starkův jev). Jelikož je magnetické pole rychle prolétavajícími ionty „vnímáno“ jako elektrické, lze podle rozštěpení spektrálních čar určit intenzitu (a směr) magnetického pole v každém místě, kterým částice prolétá.

Velmi přesných měřicích přístrojů si žádá metoda polarizační. Když totiž podél magnetické siločivky letí lineárně polarizovaná elektromagnetická vlna, rovina její polarizace se stočí (tzv. Faradayova rotace). Z úhlu stočení je pak opět možné dopočítat intenzitu magnetického pole.

Naproti tomu měření změn magnetického pole zle provést využitím malých detekčních cívek v blízkém okolí plazmatu. V nich se změnami magnetického toku indukuje napětí, které je velmi snadno měřitelné elektronikou.

Speciální oblast diagnostiky plazmatu se zaměřuje na pozorování a zkoumání nestabilit. Zjišťuje se především, za jakých okolností dochází ke vzniku kterého typu nestabilit, ale současně se měří i jejich vliv na chování plazmatu a energetické ztráty.

Podrobnější informace o diagnostice plazmatu může čtenář najít například v literatuře [4] a [6].

4.4.4) Nečistoty

Vnitřní stěny komory jsou vyrobeny z nerezové oceli. Před každým spuštěním experimentu je z komory odčerpán vzduch a do vzniklého vakua se napustí malé množství deuteria, které se ionizuje, aby vytvořilo plazma. Palivové plazma je velmi řídké, mnohonásobně řidší než vzduch. Přestože je na začátku palivo tvořeno čistým deuteriem, velmi rychle se znečistí různými příměsemi (ačkoliv jsou jejich koncentrace velmi malé, vliv příměsí na chování plazmatu je obrovský). Jde především o částice uhlíku a kyslíku, které se vždy nacházejí na povrchu kovu stěny komory. Čištěním stěn je prakticky nemožné se těchto prvků zbavit úplně, neboť jsou přítomné v atmosféře a mají vysokou tendenci povrch kovu pokrýt.

Když se plazma ohřeje na vysoké teploty, dochází mezi jeho částicemi a stěnami tokamaku ke srážkám, které mají často dost energie na to, aby ze stěny vyrazily i samotný atom kovu.

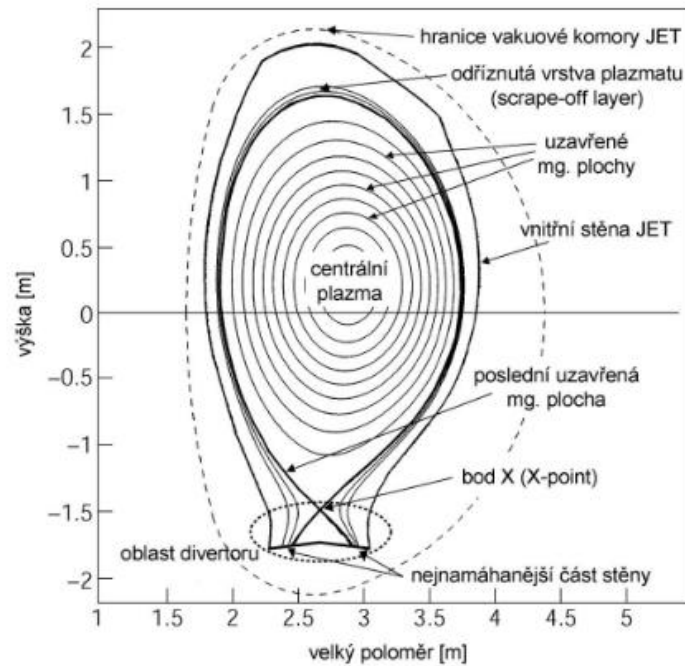
Objeví-li se v plazmatu nečistota (tedy částice nežádoucího prvku), narážejí do ní částice paliva, a tyto ji ionizují (jde o mechanismus lavinové ionizace). Zahřáté částice středně těžkých a těžších prvků však nejsou zionizovány úplně, tzn. část elektronů je jim ponechána. Tyto elektrony jsou dalšími srážkami pouze excitovány, a při následné deexcitaci vyzařují energii pryč z plazmatu, čímž ho ochlazují. Ochlazení paliva v oblastech u stěn pak může způsobovat disrupce, naopak dojde-li k ochlazení v centru plazmatu, snižuje se jeho vodivost a především se oddaluje dosažení termojaderných teplot.

Z těchto důvodů se stěny tokamaku pravidelně pročišťují působením vysokých teplot před zahájením každého testu. Především se ale hledají materiály, které by byly na jedné straně dostatečně teplotně odolné, avšak současně by měly co nejlehčí atomy, které v případě úniku do plazmatu způsobí co nejméně energetických ztrát.

Další problém, který současné experimenty sice příliš nepostihuje, ale je zřejmé, že v případě fungujících elektráren by se musel řešit, je helium. Helium vzniká jako produkt fúzní reakce, dá se tedy považovat za odpad či „popel“ fúzního hoření. Atomy helia jsou velmi lehké, proto jejich vyzařování působí menší ztráty než třeba uhlík a kyslík. Na stranu druhou se bude helium v tokamacích produkovat neustále a tím bude ředit směs deuteria a tritia. Aby byla fúzní elektrárna schopná fungovat dlouhodobě, je nutné vznikající helium průběžně odvádět pryč, a společně s ním je možné se zbavovat i ostatních, závažnějších nečistot. Za tímto účelem vznikl konstrukční prvek tokamaku zvaný *divertor* (obr. 17).

Divertor je v podstatě malou prostorovou oblastí ve spodní části tokamaku, která se táhne podél celého toru a od hlavní komory může být oddělena zúženým průchodem. Do objemu divertoru se postupně dostávají všechny částice, které prodifundují k okraji komory (do magnetického povrchu zvaného separatrix), a to vlivem magnetického pole podél stěn hlavní komory. Na každé magnetické silokřivce je vždy konstantní tlak, avšak ne vždy to platí i pro teplotu. Ta na silokřivkách v povrchu separatrix klesá směrem k divertoru. Tento jev je způsoben interakcí (srážkami) částic plazmatu s částicemi neutrálního plynu, který se v divertoru nachází. Některé částice jsou odraženy zpět do plazmatu a na své cestě s sebou strhávají část těch, které do divertoru právě míří, jiné se naopak srážkami s neutrálním plynem zpomalí a v divertoru se zachytí. Důsledkem je tedy vyšší koncentrace částic, které mají nižší energii oproti plazmatu v hlavní komoře, a jejich srážky se stěnami divertoru proto nezpůsobují takové namáhání materiálu stěn.

Nevýhodou divertoru je však skutečnost, že snižuje objem hlavní komory a tím i množství plazmatu, se kterým tokamak pracuje. Navíc divertor konstrukci zařízení komplikuje a zvyšuje tak náklady na výstavbu tokamaků.



Obr. 17. Průřez komorou tokamaku, v jejíž spodní části se nachází divertor. Poslední uzavřená magnetická plocha se označuje také jako separatrix. Obrázek převzat z [4] s poděkováním Ústavu fyziky plazmatu.

4.4.5) Ohřev plazmatu

Aby plazma dosáhlo teplot požadovaných k fúzi, je třeba ho ohřát. Jedním ze způsobů ohřevu paliva je samotný toroidální proud, který prochází podél plazmatu a vytváří poloidální magnetické pole. Když totiž proud prochází vodičem, zahřívá ho tím více, čím je větší jeho odpor. Tento efekt je znám jako Jouleovo teplo nebo ohmický ohřev, a setkat se s ním lze například u vlákna žárovky nebo topné spirály (1).

Jak bylo řečeno, ohřev proudem roste spolu s elektrickým odporem vodiče. Problém je, že s rostoucí teplotou plazmatu jeho odpor klesá, takže čím je plazma teplejší, tím je obtížnější jej nadále ohřívat. V současnosti je možné jen pomocí elektrického proudu dosáhnout teplot kolem 10 milionů stupňů Celsia, což je však pro potřeby fúze stále nedostačující. Bylo by sice teoreticky možné proud dále zvětšovat, tím by ale současně klesala rovnováha sil v plazmatu. Aby se palivo udrželo v rovnováze, bylo by nezbytné odpovídajícím způsobem posílit i toroidální pole, spolu se kterým ale rostou i magnetické síly na konstrukci reaktoru. Zde je tedy vývoj omezen materiály, ze kterých je tokamak zkonstruován.

Jelikož ohřev samotným proudem nestačí, je nutné použít alternativní způsoby ohřevu. Velmi častý je ohřev pomocí svazku neutrálních částic. Používají se nejčastěji atomy deuteria, které se ionizují, pak se magnetickým polem urychlí na velmi vysoké energie a vženu se do plazmatu tokamaku. Takto nabitě částice by však okamžitě zachytilo magnetické pole tokamaku, čímž by se zabránilo požadovaným srážkám s částicemi plazmatu. Před vpuštěním urychlených částic do paliva je tedy nezbytné je zpětně neutralizovat, což se provádí průletem komorou s deuteriovým plynem, ve které rychlé částice zachytí elektron a tak se neutralizují.

Protože se ukazuje, že s rostoucí rychlostí částice klesá efektivita neutralizace (stále méně z nich zachytí elektron), do budoucna se jeví jako výhodné používat tzv. *negativní ionty*, které se obtížněji vytváří, ale snadněji neutralizují.

Druhou variantou jak plazma dodatečně ohřát je využití rádiových vln. Každá částice má totiž tzv. cyklotronovou rezonanční frekvenci, tj. frekvenci, na které je nejsnadnější ji rozkmitat. Rozkmitání přitom lze vyvolat elektromagnetickou vlnou, a rychleji kmitající částice se projevují jako „teplejší“. Podobný princip se využívá například při ohřevu jídla v mikrovlnné troubě. Částice plazmatu v tokamaku mají však jiné cyklotronové rezonanční frekvence, než je vlastní rezonanční frekvence molekul vody v lidské stravě, je proto nutné zvolit vlny o jiných frekvencích. Rezonanční frekvenci jader deuteria odpovídají vlny, které jsou podobné vlnám běžně využívaným pro přenos televizních a rádiových signálů (odtud pojem rádiové vlny, řádově desítky MHz), frekvenci elektronů proti tomu přísluší vlny frekvence podstatně vyšší, podobné vlnám speciálních radarů (circa 100GHz). Technologie elektronového cyklotronového ohřevu se přesto vyvíjí prakticky výhradně pro potřeby tokamaků, neboť v jiných technologických oblastech nenachází příliš velké uplatnění.

Výhodou cyklotronového ohřevu je závislost rezonanční frekvence na intenzitě magnetického pole, kolem jehož silokřivek částice rotuje. Magnetické pole má v různých místech příčného řezu toru různou intenzitu, je proto možné vhodnou volbou cyklotronové frekvence ohřevu poměrně přesně nastavit oblast, ve které dojde k nejintenzivnější absorpci energie vln.

Dodejme ještě pro zajímavost, že při požadovaných teplotách stovek milionů stupňů Celsia se rychlost iontů (jader deuteria) pohybuje v tisících kilometrů za sekundu. Přitom se mají na svých „spirálovitých“ drahách udržet po dobu několika sekund. Za tu dobu tedy urazí vzdálenosti srovnatelné s obvodem Země. Je vidět, jak vysoké nároky musí magnetické pole splňovat, aby takto rychlé částice udrželo uvnitř komory o průměru několika metrů [6, str. 101].

4.5) Tokamak jako elektrárna

Při fúzi jader vodíku těžkého (deuteria) a supertěžkého (tritia) nevzniká žádný radioaktivní odpad, což je jedna z nesporných výhod slučovacích reakcí oproti těm štěpným. Stále nicméně platí, že při jaderné přeměně vodíku na helium se uvolňuje záření, které je pro živý organismus nebezpečné. Jedná se především o rychlé neutrony, které je nutné odstínit. Z tohoto důvodu musí být vnitřní stěna reaktoru až dva metry tlustá, a skládat se bude z několika vrstev. Ta nejvnitřnější se označuje jako *první stěna* a musí vydržet kromě vysokých teplot i záření gama a kolize s velmi rychlými částicemi. Druhá vrstva bude tzv. *plodící obal*. Do plodícího obalu se dostane většina rychlých neutronů, protože ty pro svůj neutrální náboj mají schopnost pronikat hluboko do materiálu. V této vrstvě se mnoho neutronů zastaví a svou energii předá materiálu vrstvy v podobě tepla.

Za vrstvou plodící se bude nacházet *vrstva stínění*. Ta má za úkol zachytit většinu neutronů, kterým se podařilo dostat skrz plodící obal. Dále za těmito vrstvami bude instalována dvojité vzduchotěsná *vrstva vakuová*, která zabraňuje proniknutí vzduchu dovnitř komory toru. Současně tato poslouží jako stěna nosná, jelikož bude podepírat celou konstrukci. Předposlední vrstvou budou magnetické cívky, za kterými už se bude nacházet pouze *vrstva biologického stínění*. Ta má za úkol zajistit naprostou bezpečnost personálu, který se v okolí tokamaku pohybuje.

Přibližně 80% veškeré energie, která se uvolní fúzními procesy, má formu pohybové energie unikajících neutronů. Zbylých 20% se uvolňuje v podobě pohybové energie částic alfa (jádra helia), které v plazmatu zůstávají a srážkami s částicemi plazmatu mu předávají svou energii. Poměr energií mezi neutrony a jádry helia je dán zákonem zachování hybnosti - ta musí být pro obě částice, které vylétávají z reakce opačnými směry, stejná. Částice alfa, která je přibližně čtyřikrát těžší než neutron, pak bude mít čtyřikrát nižší rychlost, a tedy i energii.

Jelikož většina vyrobené energie uniká jako rychle letící neutrony, které se zabrzdí uvnitř první až třetí vrstvy, dochází k silnému zahřívání materiálu těchto vrstev a je třeba je intenzivně chladit. Totéž platí o divertoru, do nějž se průběžně dostávají ty částice, které se pohybují k okraji plazmatu. K chlazení se využívá vysokotlaká voda (ta musí být deionizována, aby neodváděla elektrický proud) nebo plynné helium. Chladicí medium se tak v tokamaku ohřeje, vyvede se k tepelnému výměníku, kde předá energii vodě, a vytvoří se pára, která bude roztáčet turbíny napojené na generátor. Proces výroby elektřiny bude tedy stejný jako v současných tepelných či jaderných elektrárnách, a jeho účinnost se bude, stejně jako nyní, pohybovat kolem 33%.

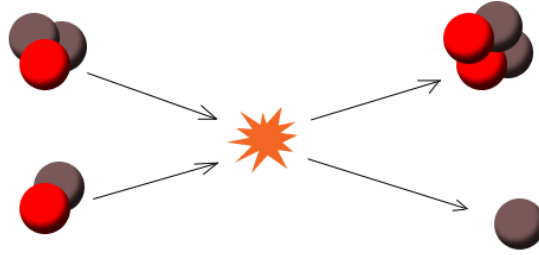
Tím, že vnitřní stěny tokamaku budou nepřetržitě vystaveny záření, stanou se samy radioaktivními, a bude s nimi třeba nakládat jako s radioaktivním odpadem. Provádění údržby tedy rozhodně nebudou moci vykonávat lidé. Za tím účelem se vyvíjí technologie, která umožní údržbu a výměnu materiálu stěn pomocí robotů. Současně jsou ve vývoji speciální, tzv. *nízkoaktivovatelné* materiály, které mají dobrou odolnost proti radioaktivnímu záření, a bude tedy možné je vyměňovat méně často. Tyto materiály navíc ztrácejí své radioaktivní vlastnosti za dobu pouhých několika desítek let, a umožňují tím svou snadnější recyklaci.

Aby bylo možné dobře předpovídat chování materiálů vystavených extrémně vysokým intenzitám neutronového záření, a díky tomu vyvíjet materiály nové, na toto záření odolnější, je nutné jejich chování pod vlivem takového záření dobře pochopit. K tomu se ovšem váže ten problém, že na Zemi s tak intenzivními proudy neutronů nemají fyzikové zkušenosti. Za tímto účelem se buduje zařízení IFMIF (v Japonsku), které se zaměřuje přímo na testování materiálů vystavených extrémně energetickým neutronům [4].

V dřívějších kapitolách jsme uvedli, že nejsnadněji dosažitelná fúzní reakce je reakce deuteria a tritia. Deuterium se nachází ve volné přírodě (ve vodě) a jeho získání je poměrně snadné. Jinak je tomu s tritiem, které je nestabilní, v přírodě se nenachází a je třeba ho vyrábět. Pro spuštění fúzní reakce je možné použít tritium ze štěpných jaderných reaktorů, kde vzniká jako vedlejší produkt vlivem záření na těžkou vodu (voda, ve které je vodík nahrazen deuteriem). Pro dlouhodobý provoz však bude nutné, aby si tritium fúzní elektrárna vyráběla sama.

Tritium vzniká například bombardováním atomů lithia rychlými neutrony. Stačí tedy do vnitřních vrstev tokamaku přidat příměsi lithiových sloučenin a neutronové záření způsobí „plození“ tohoto izotopu vodíku. Lithium by se mělo nacházet v blocích druhé vrstvy stěny tokamaku, odtud také plyne její název: *plodící vrstva*. Technologie plodících vrstev existuje zatím pouze v plánech, a poprvé by měla být testována až na tokamaku ITER formou malých výměnných plodících bloků.

Nevýhodou plodící vrstvy je skutečnost, že dále komplikuje konstrukci tokamaku a tím i náklady na jeho výstavbu. Teoreticky by bylo možné upustit od deuterium-tritiových reakcí a přejít k reakci například deuteria s heliem 3, čímž by se konstrukce současně zbavily potřeby stínění před rychlými neutrony (ty se při této reakci neuvolňují). Problémem je, že taková reakce by vyžadovala teploty asi sedmkrát vyšší, což v současné době sahá za hranice technologických možností.



Obr. 25. Schéma reakce deuteria s tritiem. Vzniklá jádra helia 4 jsou zachycena magnetickým polem a zůstávají v reaktoru, neutrony naopak bombardují stěny komory.

Dalším nepřehlédnutelným problémem při konstrukci kontinuálně fungujícího reaktoru jsou cívky toroidálního magnetického pole. Těmi musí protékat velmi vysoký proud, měděné cívky se proto zahřívají, a ani s velmi výkonným chlazením je není možné udržet dlouhodobě provozuschopné. Je proto nutné místo běžně používané mědi použít materiál, který bude supravodivý.

Supravodivost je jev, při kterém klesá odpor vodiče prakticky na nulu, nedochází proto k zahřívání vodiče vlivem proudu, stejně tak se mnohonásobně snižují energetické ztráty ve vodiči. Problém spočívá v tom, že současně známé supravodivé materiály dosahují těchto vlastností až při extrémně nízkých teplotách, tedy jen pár kelvinů nad absolutní nulou. To znamená další komplikaci při konstrukci fúzní elektrárny, neboť dostatečně výkonné chlazení by mělo vysokou energetickou spotřebu a současně by dále ztěžovalo a prodražovalo výstavbu zařízení. Naštěstí se zdá, že vývoj v oblasti supravodičů v budoucnu nabídne materiály, které svými supravodivými vlastnostmi budou nabývat za mnohem méně náročných podmínek (vyšších teplot).

Od zkonstruování fúzní elektrárny s magnetickým udržením v současné době vědce dělí nejen dokonalější pochopení chování plazmatu, ale stejně důležitou problematikou je i vývoj nových materiálů. Budoucnost fúzní energetiky tedy závisí nejen na laboratořích specializovaných na výzkum plazmatu a magnetického udržení, ale na podstatně širším okruhu vědních a výzkumných oborů, které se zabývají teplotě a radiaci odolnými materiály, supravodivostí, chladičnými systémy, a na mnoha dalších odvětvích.

Kapitola 5 - Historie fúze a dosažené výsledky

První vážné myšlenky magnetického udržení se objevily už v roce 1946 (registrace patentu George Thomsona). První tokamaky byly zkonstruovány začátkem 60. let v tehdejší Sovětském svazu (úplným prototypem bylo zařízení T-3), a ačkoliv v nich ještě nebylo zdaleka možné dosáhnout fúze, poskytla tato zařízení důležité základní poznatky o chování plazmatu a především ztrátách jeho energie. Zatímco elektrické proudy ve středně velkých tokamacích se pohybovaly od 400 000 A (francouzský TFR a ruský T-4) do 1 MA (pozdější americký PLT), pro dosažení stavu *vyrovnání*, tedy stavu, kdy dodávaná energie do tokamaku je stejná jako energie fúzí uvolňovaná, se předpokládal proud 3 MA. Stav *vyrovnání* má sice ještě poměrně daleko ke stavu *zapálení*, při kterém je energie uvolněná fúzí dostatečná k samostatnému ohřevu plazmatu, nicméně *vyrovnání* by znamenalo významný zlom ve fúzním výzkumu.

V roce 1973 se zahájily projektové práce na velkém tokamaku JET (Joint European Torus), který se dnes nachází v britském Culhamu. Konstrukční práce na tomto zařízení přitom započaly až v roce 1979, zahájení činnosti se pak tokamak dočkal roku 1983. JET byl příliš velkým projektem pro tým vědců z jednoho státu, vznikl proto jako spolupráce mnoha zemí Evropské unie, vše pod vedením francouzského fyzika Paula-Henriho Rebuta [6]. Počáteční plány předpokládaly proudy plazmatem 3 MA, ale konstrukce zařízení byla navržena tak dobře, že umožnila tuto hodnotu zvýšit až na 7 MA. Dalším významným rozdílem oproti předchozím tokamakům byl kromě mnohonásobných rozměrů i tvar palivové komory. Její průřez totiž nebyl kruhový, ale měl tvar písmene „D“ (obr. 17).

Jelikož energetická spotřeba JETu byla pro čerpání z elektrické sítě příliš velká, byly pro JET postaveny dva obří setrvačníky s hmotnostmi stovek tun, které se roztáčejí vždy v přestávkách mezi jednotlivými testovacími pulzy, a během pulzu pak předají část (přibližně třetinu) své pohybové energie tokamaku.

V těsném sledu za JETem vznikl nový velký tokamak i ve Spojených státech (TFTR – Tokamak Fusion Test Reactor) pro proud 2,5 MA a také v Japonsku (JT-60) s proudem 2,7 MA.

Pulzy v JET dosahovaly délky desítek sekund až jedné minuty a teplota plazmatu při nich sahala ke 200 milionům stupňů, v případě TFTR dokonce 400 milionům stupňů.

Až do roku 1991 se experimenty vyhýbaly užití tritia z důvodu druhotné radiace, kterou neutrony z tohoto izotopu vyvolávají ve stěnách toru. Tritium je současně izotopem, jehož užívání je přísně střeženo státními orgány, neboť by jeho únik do přírody způsobil nenávratnou kontaminaci vody. Když se však ve zmíněném roce v tokamaku JET tritium poprvé použilo, vzrostl výkon fúzní reakce přes jeden milion wattů, což byla povzbuzující demonstrace vysoké výkonnosti řízené fúzní reakce. Zatímco po těchto výsledcích tým tokamaku JET pozastavil experimenty kvůli instalaci nového divertoru, skupina kolem amerického TFTR dosáhla výkonu až 10 MW, a to díky optimální 50% koncentraci tritia v deuteriu. Této koncentrace nemohli vědci v JETu dosáhnout kvůli provizorní konstrukci divertoru, avšak po dokončení jeho rekonstrukce a opětovném uvedení tokamaku do provozu stoupl výkon řízené fúze až k 16 MW. Při porovnání s výkonem, který plazma spotřebuje, a který činí přibližně 25 MW, je vidět, že se výkon tokamaků rychle blíží hodnotám *vyrovnání*.

Na základě nových experimentů na zmíněných tokamacích vznikl odhad, že ke stavu *zapálení* (plazma se ohřívá samo vlastní reakcí) dojde při proudu 20 MA. S růstem proudu však rostou i požadavky na velikost zařízení. Z toho důvodu bylo nutné zkonstruovat nový tokamak, který bude svými rozměry a dalšími parametry ještě dále převyšovat JET a jeho současníky. Vznikl projekt ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor, nebo také z latinského „*iter*“ = cesta), na jehož konstrukčních plánech zahájili práci vědci z celého světa už v roce 1988. Když se ale v roce 1997 mělo započít s konstrukčními pracemi, mnoho zemí z finančních důvodů své dotace projektu ITER snížilo a některé dokonce úplně odstoupily. Jedinou možností týmu ITER tedy bylo přizpůsobit se nižšímu rozpočtu a zmenšit parametry fúzního projektu. Především se snížil plánovaný proud z 20 MA na 15 MA, což znamenalo, že tokamak nedosáhne stavu zapálení, ale pouze vyrovnání. 40 MW vnějšího výkonu poskytne fúzní výkon 400 MW, hovoří se tedy o vyrovnání s koeficientem 10. To by byla dostatečná ukázka fungování budoucí fúzní elektrárny a zároveň start pro intenzivní technologický výzkum.

V pozdějších letech se k podpoře projektu vrátily některé státy, jiné se připojily zcela nově. Jmenovitě se tedy na projektu začaly podílet USA, Kanada, Evropská unie, Japonsko, Rusko, Čína, Jižní Korea a další. V roce 2006 pak byla podepsána definitivní smlouva o výstavbě tokamaku ITER, jehož umístění bylo dohodnuto na jihofrancouzskou lokaci Cadarache (circa 60 km severně od Marseille) a výstavba začala o rok později. Dokončení projektu se odhaduje na rok 2020, první deuterio-tritiová reakce pak na rok 2027.

Pro zajímavost uvedme, že jde o druhou nejrozsáhlejší mezinárodní spolupráci na světě (tou první je Mezinárodní kosmická stanice ISS), přičemž termojaderný výzkum jako takový představuje počtem velmocí největší mezinárodní spolupráci vůbec.

Podrobné informace o historii vývoje na poli magnetického udržení může čtenář nalézt v [5].

ITER by podle všech předpokladů měl být posledním čistě experimentálním zařízením, po něm už bude následovat první demonstrační prototyp elektrárny (DEMO). Pokud všechny současné plány dojdou naplnění, bude lidstvo držet klíč k nové, ekologické, prakticky nevyčerpatelné a bezpečné energii.

Matematické okénko

Na závěr ještě doplníme fyzikální vztahy pro některé veličiny, které se vyskytly v průběhu textu.

A) Jouleovo teplo Q je energií, která se uvolňuje průchodem elektrického proudu vodičem s nenulovým odporem. Platí

$$Q = I^2 R t, \quad (1)$$

kde I je elektrický proud, R odpor vodiče a t čas, po který proud vodičem protéká.

B) Lorentzova síla je síla působící na elektrický náboj v elektrickém nebo pohybujícím se magnetickém poli. Její velikost závisí na velikosti daného náboje q , intenzitě elektrického pole E , na magnetické indukci B , a konečně na rychlosti v částice vůči magnetickému poli vztahem

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}). \quad (2)$$

Skutečnost, že působící síla je kolmá na pohyb částice i na siločivky magnetického pole, je zde vyjádřena pomocí vektorového součinu.

C) Budeme-li elektrickou intenzitu považovat za nulovou, můžeme vypočítat poloměr kružnice, po které se pohybuje náboj okolo magnetké siločivky - tzv. Larmorův poloměr. Pro jednoduchost budeme příslušné veličiny považovat za skaláry (pouze velikosti vektorů). Larmorův poloměr dostaneme porovnáním síly odstředivé se silou Lorentzovou:

$$\frac{v^2}{r} m = qvB. \quad (3)$$

Vyjádřením r získáme Larmorův poloměr

$$r = \frac{vm}{qB}, \quad (4)$$

kde m je hmotnost částice.

D) Souvislost mezi termodynamickou teplotou T a energií E soustavy částic o počtu N vyjadřuje tzv. ekvipartiční teorém

$$E = \frac{f}{2} NkT, \quad (5)$$

kde k je Boltzmannova konstanta ($k = (1,380\,6488 \pm 0,000\,0013) \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$) a f vyjadřuje počet stupňů volnosti částic. Pro plazma v tokamacích je $f = 3$, současně N zde označuje počet elektronů, a jelikož těch je ve vodíkovém plazmatu stejné množství jako iontů, bude celková energie dvojnásobná. Proto pro vodíkové (a také deuteriové či tritiové) plazma platí

$$E = 3NkT. \quad (6)$$

E) Důležitou veličinou pro popis schopnosti udržet energii v plazmatu je tzv. doba udržení τ_E :

$$\tau_E = \frac{W_C}{P_Z}. \quad (7)$$

Doba udržení je definovaná jako podíl celkové tepelné energie plazmatu k jeho ztrátovému výkonu. Rozměrově se opravdu jedná o čas, avšak s dobou držení termionukleárních teplot či délkou pulzu nemá tato veličina nic společného!

Doba udržení na současně největším tokamaku JET již překročila jednu sekundu, pro projekt ITER byla tato doba předpovězena extrapolací na 3,6 sekundy.

F) Lawsonovo kritérium je kritérium, které musí být splněno, pokud má dojít k zapálení fúzních reakcí, tzn. výkon uvolněný fúzními reakcemi vyrovná výkon energetických ztrát z plazmatu. Jde o podmínky pro teplotu T a součin hustoty částic n a doby udržení. Kritérium je různé pro různé reakce, přičemž nejnižší je pro reakci směsi deuteria a tritia v poměru 1:1. Pro takovou směs o teplotě $T \approx 2 \cdot 10^8 \text{ K}$ platí:

$$n\tau_E \geq 0,5 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3} \text{ s}. \quad (8)$$

Zde je vidět, že k dosažení účinné termojaderné syntézy je možné zvyšovat hustotu paliva při zachování nízké doby udržení (inerciální udržení), nebo naopak zvyšovat dobu udržení při zachování nízkých hustot (magnetické udržení).

G) Bezpečnostní faktor q je převrácenou hodnotou helicity magnetického pole. Je to veličina, která udává počet toroidálních oběhů magnetické silokřivky na jeden oběh poloidální. Definována je vztahem

$$q = \frac{B_T}{B_P} \cdot \frac{r}{R} \quad (9)$$

pro magnetickou indukci ve směru toroidálním B_T , indukci ve směru poloidálním B_P , hlavní poloměr toru R a poloměr průřezu trubice toru r . Změna q podél malého průměru r způsobuje stříh pole. Zvláštní význam mají magnetické plochy s racionální hodnotou q , neboť to znamená, že se silokřivka po malém počtu oběhů toru napojuje „sama na sebe“. Důsledek racionálního q je proto například nízká tepelná kapacita plazmatu na dané magnetické silokřivce (silokřivka je kratší, pohybuje se po ní menší množství částic).

Závěr

V rámci své bakalářské práce jsem nastudoval literaturu více či méně odborně popisující jak jadernou fúzi v obecném pojetí, tak i zařízení a technologie užívané či vyvíjené pro účely vývoje fúzních reaktorů.

Shnul jsem základní pojmy a principy atomové fyziky a zavedl pojem nukleární fúze. Vysvětlil jsem význam jaderné syntézy, která probíhá ve vesmíru, a to jak z hlediska uvolňování energie, tak vzniku prvků těžších než vodík. Uvedl jsem přehled hlavních současných energetických zdrojů lidské společnosti spolu s jejich nejpodstatnějšími výhodami a nevýhodami. Vedle toho jsem uvedl i výhody a nevýhody možných fúzních reaktorů, abych tak odpověděl na otázku, proč má smysl se jejich vývojem zabývat.

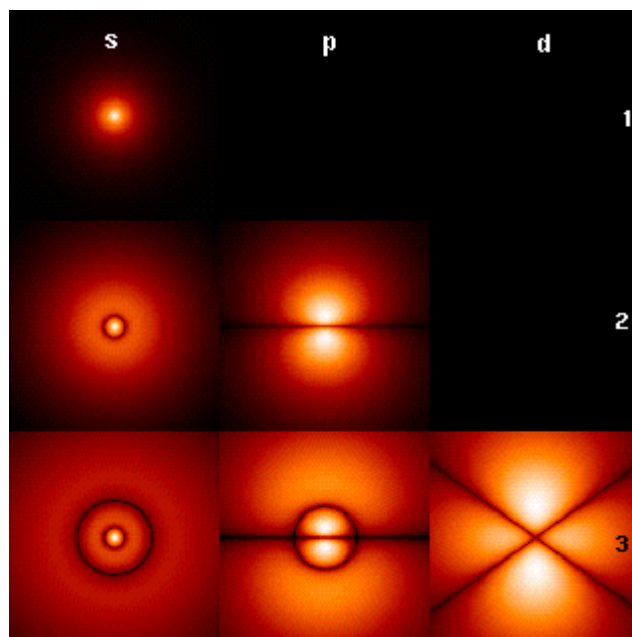
Na otázku, proč ještě fúzní energii neovládáme, pak práce odpovídá stručným popisem některých technologických obtíží, které musejí fúzní fyzikové a inženýři řešit. Závěrem jsem osvětlil stav fúzního výzkumu v dnešní době a uvedl vědecké odhady jeho budoucího vývoje.

Ve stručnosti je možné zdůraznit, že

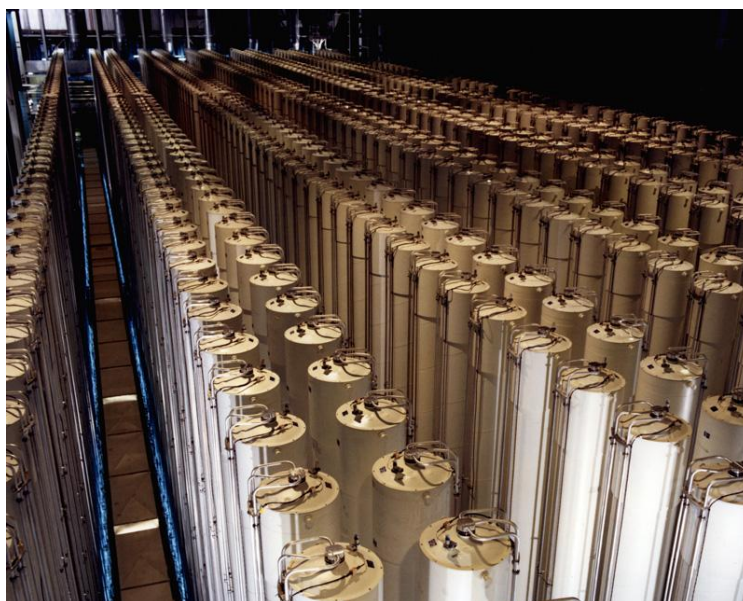
- jaderná fúze, nebo také syntéza či slučování, je opakem jaderného štěpení
- fúze je zdrojem energie většiny hvězd ve vesmíru, včetně našeho Slunce
- všechny prvky těžší než vodík vznikly ve hvězdách právě díky jaderné fúzi
- jádro s nejvyšší vazebnou energií patří atomu železa, štěpením prvků lehčích či slučováním těžších se bude energie „spotřebovávat“
- prvky těžší železa vznikly při explozích supernov
- voda na Zemi obsahuje dostatečné množství deuteria (těžkého vodíku) pro pokrytí současné spotřeby lidstva na několik miliard let
- produktem sloučení deuteria a tritia je neškodné helium 4
- nejbližší využití jaderné fúze pro energetiku na Zemi se nachází magnetické a inerciální udržení
- v reaktorech magnetického udržení (tokamacích) je dosahována teplota několika stovek milionů °C, plazma v nich bude udržováno supravodivými cívkami chlazenými naopak na teploty extrémně nízké
- projekt ITER bude prvním fúzním reaktorem, který vyrobí více energie, než kolik z plazmatu stihne unikat

Ve své práci jsem především shnul nejdůležitější a nejzajímavější informace z několika literárních zdrojů a formuloval je s velkým důrazem na srozumitelnost, současně jsem poskytl odkazy na tyto zdroje pro případ hlubšího zájmu. Věřím, že pro svou nenáročnost a snadnou dostupnost poskytne tato práce dobrý odrazový můstek pro hlubší zájem o zvolené téma v řadách nejen studentů, ale i laiků, a současně doufám, že bude práce dobrým zdrojem podnětů pro učitele při výuce astronomie, atomové fyziky, energetiky a jaderné fúze.

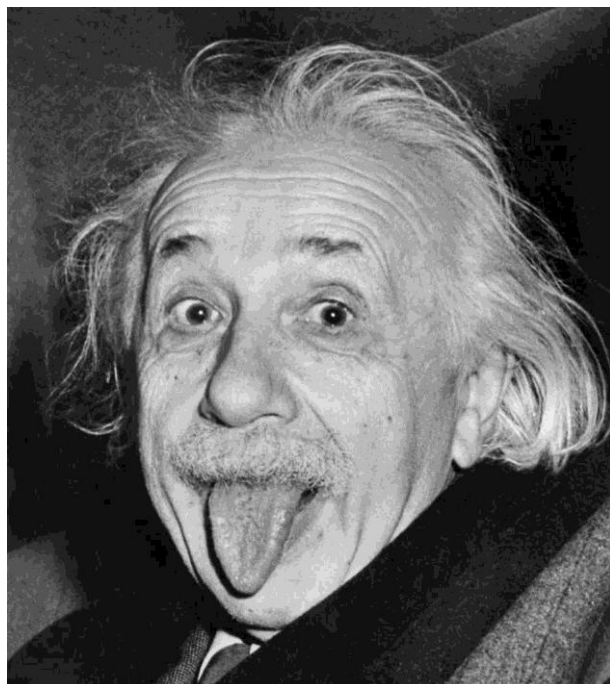
Obrazová příloha



Obr. 1. Vyobrazení amplitudy pravděpodobnosti výskytu elektronu v atomu vodíku. Na vertikální ose je znázorněno hlavní kvantové číslo n , na ose horizontální vedlejší kvantové číslo l . Obrázek převzat z [18].



Obr. 3. Kaskáda obohacovacích centrifug (odstředivek). Obrázek převzat z [20].



Obr. 4. Slavná fotografie Alberta Einsteina (1879 - 1955). Převzato z [21].



Obr. 5. Uhelná elektrárna Pruněřov II o výkonu 1,5 GW. Obrázek převzat z [22].



Obr. 6. Přečerpávací vodní elektrárna Dlouhé stráně. Převzato z [23].



Obr. 7. Systém větrných elektráren. Převzato z [24].



Obr. 8. Solární elektrárna v Hodonicích. Převzato z [25].



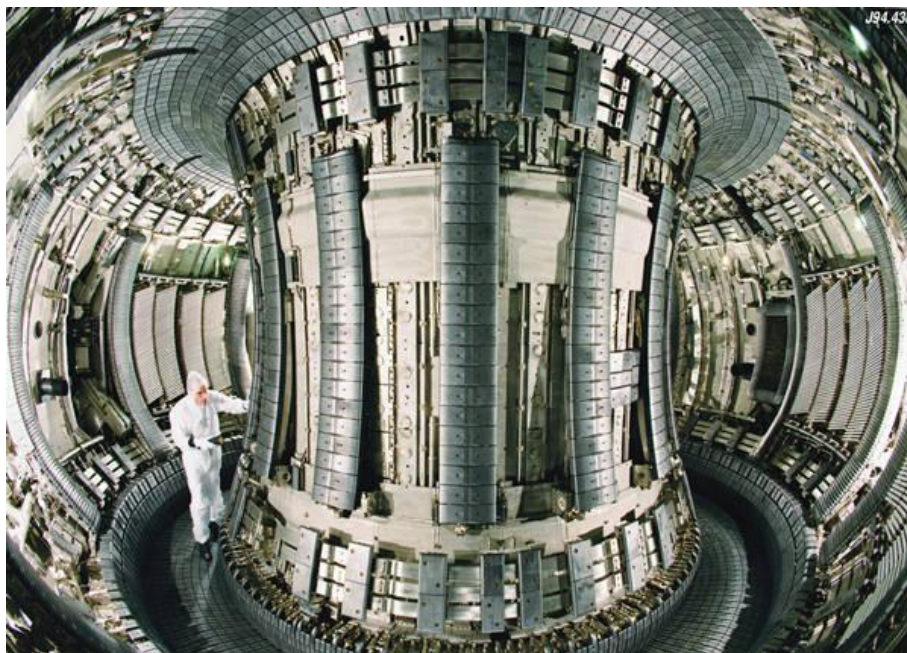
Obr. 9. Jaderná elektrárna Temelín. Z chladicích věží unikají oblaka zkondenzovaných vodních par. Převzato z [26].



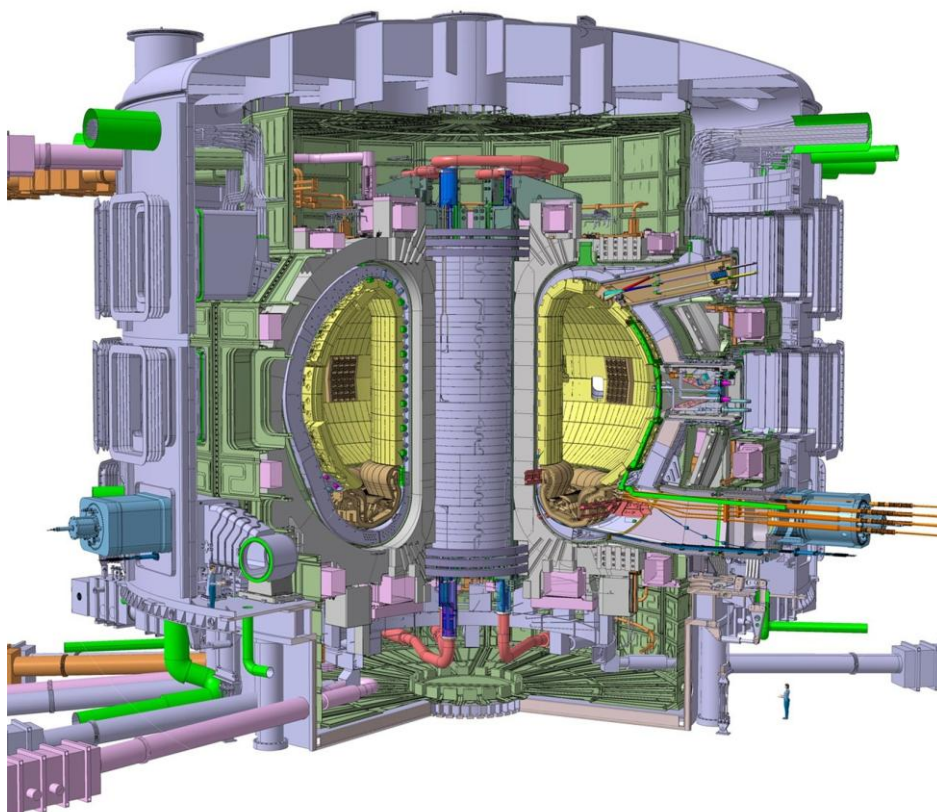
Obr. 10. Laserová komora zařízení NIF v Kalifornii. Převzato z [27].



Obr. 14. Schéma komory stelarátoru Wendelstein. Poloidální cívky mají pro požadovaný profil magnetického pole velmi komplikovaný tvar. Převzato z [32].



Obr. 22. Pohled dovnitř reaktorové komory tokamaku JET. Převzato z [34].



Obr. 23. Model tokamaku ITER. Pro velikostní srovnání je vpravo dole vyobrazena postava člověka. Převzato z [35].

Literatura

- [1] **McCracken, G. – Scott, P.:** *Fúze – Energie vesmíru*, Mladá fronta, Praha 2006, ISBN 80-204-1453-3
- [2] **Řípa, M. a kolektiv:** *Řízená termojaderná syntéza pro každého*, Praha 2005, ISBN 80-902724-7-9
- [3] **Libra, M. a kolektiv:** *Jaderná energie*, ILSA, Praha 2012, ISBN 978-80-904311-6-4
- [4] **Mlynář, J.:** *ITER: cesta ke zvládnutí řízené termonukleární fúze*, Pokroky matematiky, fyziky a astronomie 49 (2004), <http://dml.cz/dmlcz/141220>
- [5] **Braams, C. M. – Stott, P. E.:** *Half a Century of Magnetic Confinement Fusion Research*, IOP Publishing, Bristol 2002, ISBN 0 7503 0705 6
- [6] **Wesson, J.:** *The Science of JET*; <http://www.iop.org/Jet/fulltext/JETR99013.pdf>
- [7] **Kulhánek, P.:** *Blýskání, aneb třináctero vyprávění o plazmatu*, AGA, Praha 2011, ISBN 978-80-904582-3-9
- [8] **Kulhánek, P.:** *Úvod do teorie plazmatu*, AGA, Praha 2011, ISBN 978-80-904582-2-2
- [9] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Deuterium>
- [10] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Tritium>
- [11] http://cs.wikipedia.org/wiki/Jadern%C3%A1_reakce
- [12] <http://www.etymonline.com/index.php?term=fusion>
- [13] http://en.wikipedia.org/wiki/Star#Nuclear_fusion_reaction_pathways
- [14] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Neutrino#Historie>
- [15] <http://tech.ihned.cz/c1-38637190-slunecni-elektrarny-podle-zelenych-listu-rostlin>
- [16] http://www.vscht.cz/ktt/studium/predmety/AZE_I/3AZE_I_2012.pdf
- [17] <http://www.maxisun.cz/clanky/jaka-je-energeticka-navratnost-fotovoltaiky>
- [18] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektron>
- [19] http://artemis.osu.cz/mm fyz/jm/jm_2_3_3.htm
- [20] <http://3pol.cz/927-kdo-se-boji-obohacovani-uranu>
- [21] <http://www.npr.org/blogs/13.7/2011/09/28/140839445/is-einstein-wrong>

- [22] http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrárny_Prunéřov
- [23] <http://www.jeseniky.net/index.php?obl=2&kat=11&sluz=81&pol=1945&lang=nl>
- [24] <http://www.nazeleno.cz/energie/vetrna-energie/vetrne-elektrany-v-cr-zazivaji-boom-kolik-energie-vyrobi.aspx>
- [25] <http://www.nazeleno.cz/aktualne/tz-nova-fotovoltaicka-elektrarna-v-hodonicich.aspx>
- [26] <http://mojemesto.e15.cz/temelin-545155.html>
- [27] <http://www.guardian.co.uk/environment/gallery/2009/may/28/national-ignition-facility-fusion-energy>
- [28] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Atom>
- [29] <http://www.ipp.cas.cz/Tokamak/euratom/index.php/cs/compass-diagnostiky/mikrovlne/ece-ebw-radiometr>
- [30] <http://encyclopedia2.thefreedictionary.com/Pinch+Effect>
- [31] <http://www.inflow.cz/alternativni-energeticke-zdroje>
- [32] <https://www.efda.org/fusion/fusion-machine/types-of-fusion-machines/stellarators/>
- [33] <http://adambenda.net/index.php?id=10072>
- [34] <http://bacterio.uc3m.es/investigacion/fusion/english/intro/>
- [35] <http://www.fusion.kit.edu/english/85.php>
- [36] <http://www.answers.com/topic/pinch-effect-1>

Webové odkazy jsou platné ke dni 15. 7. 2013