

# Přehled jaderné fyziky

Petr Muzikář

<[muzikar.petr@volny.cz](mailto:muzikar.petr@volny.cz)>

## 1 Úvod

Někteří z vas, milí čtenáři, se ještě s jadernou fyzikou ve škole nesetkali, protože bývá vykládána až někdy v posledních ročnících. Důvodem je, že se zavádí řada zcela nových pojmů (radioaktivita, štěpení, fúze, hmotnostní úbytek, vazebn energie, ...), které nemusí být snadné pochopit, když s nimi nemáte přímou zkušenost, a dají se jen těžko demonstrovat pokusy ve školních podmínkách<sup>1</sup>. Dalším důvodem je, že detailní matematický popis jaderné fyziky je dost obtížný, a tak se řada tvrzení ned jednoduše odvodit.

Tento text vám d základní informace o jaderné fyzice, abyste snadněji pochopili různé aplikace jaderné fyziky, např. princip jaderné elektrárny a tokamaku nebo třeba použití některých radioizotopů v lékařství. Nedělám si nároky na originalnost, spíše shromažďuji informace z různých zdrojů. Základní učebnicí, z níž čerpám, je Fyzika mikrosvětla [1]. Zmíním též atraktivní popularizační publikaci Jadro [2]. Další použitá literatura a odkazy jsou zařazeny na konci textu.

## 2 Základní pojmy

### 2.1 Rozměry a škály v mikrosvětě

Chceme-li porozumět jaderné fyzice, musíme se ponořit mikrosvěta, v němž „žijí“ různé mikročástice (protony, neutrony, elektrony, neutrina, ...), jejichž vzájemné působení a přeměny umožňují existenci všeho, co kolem sebe vidíme, včetně živých organismů.

Velikosti různých objektů mikrosvěta můžeme srovnat na Obr. 1 na následující straně. Optický mikroskop odhalil svět prvků a některých bakterií, viry zobrazil až elektronový mikroskop a jednotlivé atomy dokázal rozlišit rastrovací tunelový mikroskop (není uveden na obrázku). Atomová jádra a elementární částice neumíme přímo zobrazit, ale můžeme studovat jejich srážky a interakce pomocí moderních urychlovačů, např. v CERN ve Švýcarsku.

Velikosti atomů měříme v nanometrech ( $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ ) či ještě běžněji v angstromech ( $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$ ) – jsou mnohem menší než vlnová délka viditelného světla proto se nedají pozorovat optickými mikroskopy.

<sup>1</sup> Výjimku tvoří např. pokusy se školní soupravou Gamabeta



Obr. 1: Velikosti některých objektů mikrosvětla a přístroje, s jejichž pomocí je můžeme zkoumat. Převzato z [5].

Velikosti atomových jader měříme ve femtometrech (starší název byl fermi;  $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$ ).

Je užitečné si uvést jednotky energie používané v mikrosvětě. Zatímco v běžném životě jsme zvyklí na jouly nebo kalorie, v mikrosvětě se hodí menší jednotky. Jeden elektronvolt (eV) je energie, kterou získá elektron urychlením mezi deskami kondenzátoru o nabitěho na 1 volt. Platí

$$1 \text{ eV} \doteq 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J.} \quad (1)$$

Energetické hladiny v elektronovém obalu atomu mají energie řádově eV až desítky eV, např. energie základního stavu elektronu v atomu vodíku je  $-13,6 \text{ eV}$ . U jader a částic v urychlovačích se setkáváme s energiemi MeV ( $= 10^6 \text{ eV}$ ), GeV ( $= 10^9 \text{ eV}$ ) až TeV ( $= 10^{12} \text{ eV}$ ), např. klidová energie elektronu je  $0,5 \text{ MeV}$ , klidová energie neutronu či protonu je přibližně  $1 \text{ GeV}$  a energie protonů ve vstřícných svazcích urychlovače LHC budou kolem  $7 \text{ TeV}$ .

Einsteinův vztah

$$E = mc^2 \quad (2)$$

umožňuje převádět celkovou energii částice na její celkovou hmotnost, např. proton ve zmíněném urychlovači má celkovou hmotnost  $7 \text{ TeV}/c^2$  a je díky svému rychlému pohybu více než 7000-krát těžší, než kdyby byl v klidu. Zapamatujme si, že  $\text{eV}/c^2$ ,  $\text{MeV}/c^2$ ,  $\text{GeV}/c^2$ ,  $\text{TeV}/c^2$  apod. jsou jednotky hmotnosti a za  $c$  se tam nedosazuje číselná hodnota.

Vhodnou jednotkou pro vyjadřování hmotností atomů a jejich jader je atomová hmotnostní jednotka. Je definována jako  $\frac{1}{12}$  hmotnosti atomu  $^{12}_6\text{C}$ , který má 6 protonů a 6 neutronů, celkem 12 nukleonů, a tedy jde o přibližnou<sup>3</sup> střední<sup>4</sup> klidovou hmotnost jednoho nukleonu. Číselnou velikost atomové hmotnostní jednotky v kilogramech můžeme vypočítat ze znalosti Avogadrovy konstanty  $N_A \doteq 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ , udávající počet atomů (či molekul nebo iontů) v jednom molu látky, a molární hmotnosti  $M_m(^{12}_6\text{C}) = 0,012 \text{ kg mol}^{-1}$ , vyjadřující hmotnost jednoho molu látky.

<sup>2</sup>Za  $c$  a za  $\text{eV}$  bychom museli dosadit číselné hodnoty v základních jednotkách, kdybychom potřebovali převést hmotnost částice na kilogramy.

<sup>3</sup>Nepočítáme-li hmotnost elektronů v obalu.

<sup>4</sup>Hmotnost neutronu je o něco větší než hmotnost protonu.

Počítejme

$$\begin{aligned}
 1 m_u &= \frac{1}{12} m \text{ } ^{12}_6\text{C} = \frac{1}{12} \frac{M_m(^{12}_6\text{C})}{N_A} \doteq \\
 &\doteq \frac{1}{12} \frac{0,012 \text{ kg mol}^{-1}}{6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}} \doteq \\
 &\doteq 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}.
 \end{aligned} \tag{3}$$

**Příklad 1**

Vyjadřete  $m_u$  v jednotkách  $\text{MeV}/c^2$ .

**Řešení př. 1**

Sledujme rovnici (4) níže. Rozšíříme  $m_u$  zlomkem  $\frac{c^2}{c^2}$  a v čitateli za  $c$  dosadíme (raději přesně podle Tab. 1). Ještě rozšíříme  $\frac{\text{MeV}}{\text{MeV}}$  a dosadíme do jmenovatele. Jednotky  $\text{kg m}^2 \text{ s}^{-2}$  v čitateli a  $\text{J} = \text{kg m}^2 \text{ s}^{-2}$  ve jmenovateli se zkrátí a zbude jednotka  $\text{MeV}/c^2$ .

$$\begin{aligned}
 1 m_u &\doteq 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \doteq \\
 &\doteq 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \cdot \frac{(299\,792\,458 \text{ m s}^{-1})^2}{c^2} \cdot \frac{\text{MeV}}{10^6 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}} \doteq \\
 &\doteq 931 \text{ MeV}/c^2.
 \end{aligned} \tag{4}$$

## 2.2 Atomová hypotéza

Richard Feynman píše ve svých přednáškách z fyziky [3] (volně cituji): „Kdyby měla zůstat budoucím generacím ze všech vědeckých poznatků jen jedin věta, která by obsahovala při nejmenším počtu slov nejbohatší informaci, jsem přesvědčen, že je to atomová hypotéza – že všechny věci se skládají z atomů, jež jsou v neustalém pohybu a vzájemně se přitahují, když jsou od sebe trochu vzdálené, ale odpuzují se, když jsou těsně u sebe.“ A já s ním souhlasím. Z atomů se skládají molekuly, které udávají vlastnosti chemických sloučenin. Chemické reakce jsou jednoduše řečeno jen výměny atomů mezi molekulami a vznikání nových molekul.

## 2.3 Stavba atomu

Atomy se skládají z malinkého kladně nabitého jadra tvořeného kladně nabitými protony a neutrálními neutrony (dohromady se jim říká nukleony) a z obalu, v němž se pohybují záporně nabitě elektrony. Počet protonů v jádře je roven protonovému (atomovému) číslu, značíme ho  $Z$ ; stejný počet elektronů je v obalu. Dale zavádíme nukleonové (hmotnostní) číslo  $A$  udávající (po zaokrouhlení) průměrný počet nu-

fyzičtí lidé také přibližně stejnou hmotnost celého jadra. Neutronové číslo  $N$  a  $Z$  značí počet neutronů v jadře. Protonové a nukleonové číslo zapisujeme ke značce prvku takto:

### 3 ŘÍZENÁ TERMOJADERNÁ SYNTÉZA

Lidé zpotřebovávají každým dnem více a více energie. Energetických zdrojů však není dostatek a ke mnoha lidem se ani nedostane. 6. kongres Světové energetické rady WEC (World Energy Council) v Tokiu roku 1995 potvrdil, že spoléhání se jen na obnovitelné zdroje energie (vítr, voda, biomasa) je utopií a energetické problémy lidstva nevyráší. Energetický deficit by se tak mohl stát vážnou překážkou v trvale udržitelném rozvoji lidské společnosti. Válečné konflikty odjakživa vznikaly z nestejně rozložení zdrojů. V poslední době zejména zdrojů energie. Nerovnoměrnost spotřeby energie je přitom do očí bijící. Spotřebuje-li Evropa s 15 % všech obyvatel Země 30 % „světové energie“, pak stejné množství energie spotřebují Spojené státy s pouhými 5,5 % obyvatel Země. Na druhé straně Asie tvořící 60 % veškeré populace musí vystačit s 30 % celkové energie, což není nic proti Africe, kde je poměr 11 % : 3 %! Slunce však zahrívá Zemi po miliardy let od jejího vzniku až po současnost. Získává energii ze sloučení jader vodíku na helium a těžší prvky. Tento proces nazýváme termojaderná fúze. Využíváme pouze zanedbatelnou část energie ve formě elektromagnetického záření, které vnímáme zde na Zemi jako světlo a teplo. A tento zlomek je zdrojem energie nejen pro život na Zemi, ale například i pro veškerý koloběh vody.

#### 3.1 Současné zdroje energie

##### A) Fosilní paliva

Spalováním fosilních paliv jako je uhlí, ropa a zemní plyn se vyčerpávají zásoby (ropa na 45let, zemní plyn na 60 let a uhlí na 300 let), které příroda tvořila miliony let a zároveň se tím značně znečišťuje již tak dosti poškozené životní prostředí. Vznikají také některé z tzv. skleníkových plynů (např.  $\text{CO}_2$ ), které globálně oteplují zeměkouli. Tepelná elektrárna o výkonu 1 GW za rok spotřebuje 2,5 miliónu tun uhlí. Odpadními produkty jsou obrovská množství  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{CO}$  a popílků. Do elektrárny stejného výkonu, která jako palivo používá ropu, bude třeba dopravit přibližně 1 749 000 000 litrů ropy. Do ovzduší se dostane 10 950 000 t  $\text{CO}_2$ , 219 000 t  $\text{SO}_2$  a 29 000 t  $\text{NO}_2$ .

##### B) Ekologické zdroje energie

Obnovitelné zdroje jsou naproti tomu ekologicky čisté, ale mnohonásobně ekonomicky náročnější a navíc nejsou sami schopny pokrýt energetickou spotřebu lidstva.

###### 1. Voda

Pokusíme-li se naši tepelnou elektrárnu (o výkonu 1 GW) nahradit elektrárnou vodní, zjistíme, že pro její vysoké požadavky na spád a objem vodního toku by si ji mohla dovolit jen málokterá země.

###### .2. Vítr

Pro větrné elektrárny je potřeba zase poměrně velká plocha s často vanoucími větry. I to je velký problém. Ani takových míst není na světě tolik, aby vítr mohl nahradit jiné zdroje energie.

###### .3. Sluneční záření

Obrovské možnosti do budoucna skýtá solární energie. Ovšem dnes je výroba solárních kolektorů velmi náročná a drahá, nemluvě o tom, že pro nahrazení běžné elektrárny by byla potřeba článek o rozloze zhruba 20  $\text{km}^2$ . Navíc je nutné počítat s tím, že Slunce vlivem oblačnosti mění intenzitu svého záření a přes noc nesvítí vůbec (respektive svítí, ale neosvětluje tu část Země, kde je noc). A proto se musí tyto články doplnit o zásobníky energie.

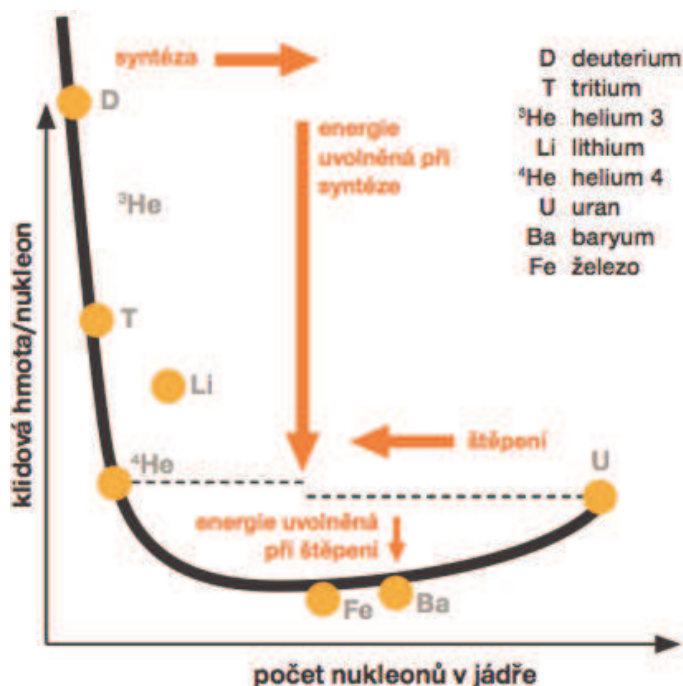
## C) Jaderná energie - fúze

## 1. Štěpné reakce

Jaderné elektrárně (pracující na principu štěpení jader) postačí za rok zásoba 28 t uranové rudy. Toto množství je oproti ostatním zdrojům minimální, ale i přes složitá ochranná opatření je zde stále malé riziko atomového výbuchu s nesmírnými následky pro život na této planetě. Obrovským problémem při provozu jaderné elektrárny je dlouhodobě vysoce radioaktivní vyhořelé palivo. Dnes je ho na světě již přes 200 000 t.

## .2. Termojaderná syntéza

Ve srovnání s ostatními zdroji energie by fúzní reaktor obstál na výbornou. Účinnost využití paliva při jaderné fúzi je  $10\,000\,000\times$  větší než u všech chemických reakcí včetně hoření. Palivem by za rok bylo pouze 180 kg deuteria a 270 kg tritia. Jako odpad vznikne 410 kg helia s možností jeho dalšího zpracování. Deuterium (tvorí přibližně 1/6000 všech vodíkových atomů) může z jednoho litru vody vyprodukovat energii ekvivalentní 300 litrům benzínu; energetickou potřebu České republiky by mohlo deuterium z Máchova jezera krýt po dobu zhruba 100 let.



## 3. Princip termojaderné syntézy

Jaderné reakce jsou jaderné přeměny, k nimž dochází při vzájemných interakcích jader s různými částicemi nebo jader navzájem. energii z atomových jader můžeme uvolnit pomocí jaderných reakcí dvěma různými způsoby: fúzí a štěpením. Při těchto jaderných reakcích dochází ke slučování, resp. dělení atomových jader. Jak při fúzní, tak při štěpné reakci nukleony (společný název pro proton a neutron) „padají“ z úbočí krivky vyjadřující závislost průměrné hmotnosti nukleonu na hmotovém čísle (to je na celkovém počtu nukleonů v

jádra, do míst s menší hustotou klidovou hmotností. Podle Einsteinova slavného vztahu  $E = \Delta m \times c^2$  je úbytek hmoty  $\Delta m$  ekvivalentní energii  $E$ , v tomto případě energii záření a pohybu produktu reakce. Z obrázku je zřejmé, že slučování lehkých jader je mnohem účinnější než štěpení jader těžších.

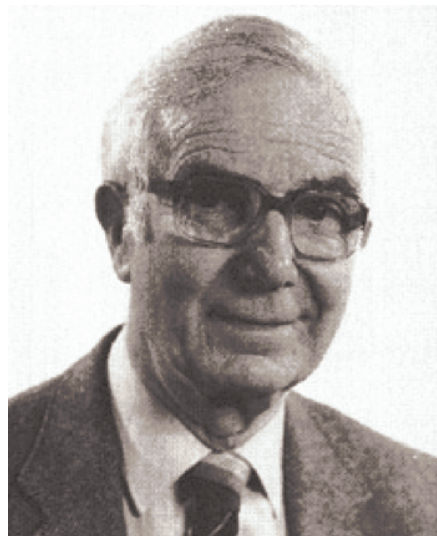
### 3.2 Termojaderná fúze

Při jaderné fúzi je třeba sloučit dvě jádra lehkého prvku, u fúzního reaktoru se používají těžké izotopy vodíku Deuterium a Tritium, aby vznikl prvek těžší, helium a uvolněná energie. Zkráceně se nazývá D-T reakce:



Tuto reakci na Zemi nenajdeme. Na Slunci ovšem probíhá jaderná syntéza již hezkou řádku let a věříme, že hned tak neprůestane.

Problém přitom je, že obě jádra mají stejný náboj a vzájemně se tedy odpuzují. Aby došlo k syntéze jader, je musíme je přiblížit na vzdálenost 10–14 m a před tím překonat elektrostatickou odpudivou sílu souhlasně nabitých jader. Aby to bylo možné je potřeba zvýšit teplotu na  $10^8^\circ\text{C}$ , kdy se molekuly rozpadají na atomy, které začnou velmi rychle kmitat a i přes odpor vyvolaný stejnými náboji, do sebe narážejí. Problémem je kde tento velmi horký plyn (plazma) uchovat. Za plazma se považuje ionizovaný plyn složený z iontů, elektronů (případně neutrálních atomů a molekul), který vzniká odtržením elektronů z elektronového obalu atomů plynu, či roztržením molekul (ionizací). Matematický popis plazmatu není jednoduchá záležitost. Na model používaný u urychlovačů, je příliš husté, a na model tekutiny je plazma v tomto případě příliš řídké. Plazma je vlastně čtvrté skupenství hmoty. Plazma je nejrozšířenější forma látky, tvoří až 99 %



pozorované hmoty vesmíru.

*J. D. Lawson*

### 3 Magnetické a inerciální udržení

K tomu aby termojaderná reakce vyprodukovala více energie, než je jí potřeba k vytvoření a ohřevu plazmatu, jsou určité požadavky hustotu a teplotu. Z předpokladu, že energetická ztráta ze záření, zdroje a z unikajících částic nebude převyšovat 33%, odvodil v roce 1955 J. D. Lawson kritérium, které se podle autora nazývá Lawsonovo. Pro syntézu deuteria s tritiem (D-T reakci) při teplotě iontů  $T_i \approx 2 \times 10^8^\circ\text{C}$  platí:  $n \tau E \geq 0,5 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}\text{s}$

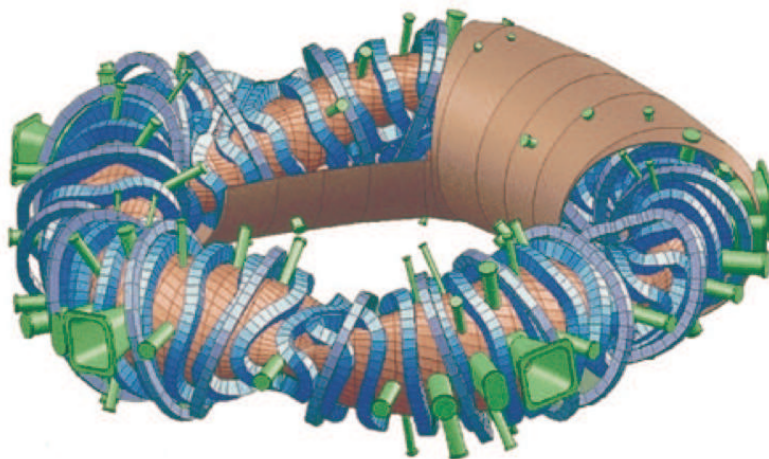
Z tohoto kritéria vyplývá, že pro energetický zisk je zapotřebí buď získat velkou ( $\approx 10^{31} \text{ m}^{-3}$ ) a krátkou dobou udržení ( $\approx 10^{-10} \text{ s}$ ), což se nazývá inerciální udržení, nebo malou hustotou ( $\approx 10^{20}$

### 3.1 Inerciální udržení

Inerciální fúze je vlastně miniaturní výbuch vodíkové bomby. Plazma zde není drženo žádným vnějším energetickým polem. Aby udržení fungovalo musí se dosáhnout extrémně rychlého ohřátí hmoty, kdy prudké zvýšení teploty zabrání vnějším vlivům v působení na reagující hmotu. K provedení takové operace je nutné vytvořit tabletu zmraženého vodíku o hustotě  $200 \text{ g cm}^{-3}$ , která se spustí do speciální komory. Zde ji zasáhne pulz energie laseru namířeného z několika směrů. Tímto rychlým zásahem nastanou v tabletě podmínky pro termojadernou fúzi. Během zlomku sekundy (řádově v nanosekundách) se vytvoří využitelná energie. To, že doba mezi ohřevem následovaným reakcí a rozpadem není nulová, je dáno obecnou vlastností hmoty – inercií či setrvačností.

### 3.2 Magnetické udržení

Tou druhou (a dnes mnohem reálnější) možností je udržení plazmatu pomocí vnějšího magnetického pole, kde většina nabitých částic sleduje vhodně zakřivené siločáry, a tak nepřichází do styku se stěnami komory, v níž se plazma vytváří. Toto pole je tvořeno množstvím zkroucených cívek. Ohřev dále trvá dokud tepelný pohyb částic nedosáhne rychlosti, ve které srážky vyvolají



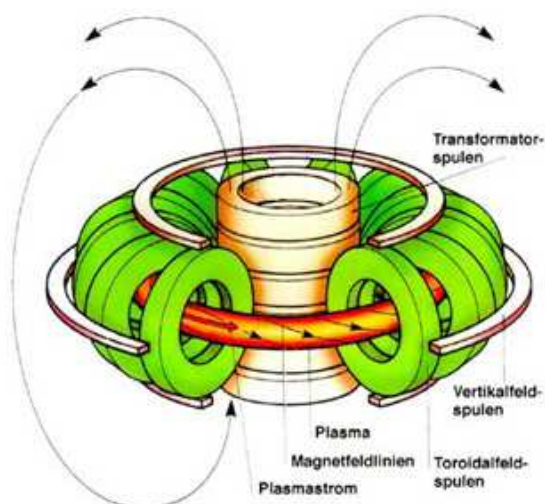
fúzi. Na tomto principu fungují stellarátory a tokamaky.

#### 3.2.1 Stellarátor

Stellarátor představuje uzavřenou magnetickou konfiguraci, která na rozdíl od tokamaku může pracovat v kontinuálním režimu. V minulosti tokamaky byly zkoumány pouze v Sovětském svazu, stellarátory se zabývali v západních zemích. Všechny pokusy vyrobit a udržet ve stellarátorech horké plazma však zůstaly až do konce šedesátých let bez většího úspěchu. Když pak ruští vědci v roce 1969 podali zprávu o teplotách plazmatu až 10 milionů °C v tokamaku T3 v moskevském Kurčatovově ústavu, změnilo se světové smýšlení rychle ve prospěch tokamaků. Od té doby má většina fúzních experimentů tuto konfiguraci.

##### 3.2.1.1 Wendelstein 7-X

Je zkušební stellarátor postavený v Greifswald Branch of IPP. Zvládá udržet plazma o teplotě 100 milionů stupňů. Udržuje plazma v „kruhu“ o poloměru 5,5m.



### 3.2.2 Tokamak

Název Tokamak pochází ze zkratky ruských slov TOroidalnaja KAmera i MAgnitnyje Katuški = toroidální komora a magnetické cívky.

Je jedním z nejslibnějších typů zařízení pro uskutečnění řízené termojaderné fúze, v budoucnu i stavby fúzní elektrárny. Jeho koncepce se zrodila v letech 1950–2 v bývalém Sovětském svazu díky týmu slavného ruského fyzika Andreje Sacharova. Tokamak si můžeme představit jako dutou prstencovou komoru (nafouknutou automobilovou pneumatiku) naplněnou horkým vodíkovým plynem, která je obklopena magnetickými cívkami a transformátorovým jádrem.

V tokamaku rozlišujeme dva významné směry – toroidální a poloidální, a dva významné poloměry – hlavní a vedlejší. Toroidální směr můžeme sledovat, vydáme-li se podél prstence, zatímco v poloidálním směru bychom kroužili kolem komory v rovině kolmé na toroidální směr. Hlavní poloměr  $R$  je poloměrem prstence, tj. vzdálenost rotační osy celého prstence od osy komory. Vedlejší poloměr  $a$  je poloměrem samotné komory.

#### 3.2.2.1 JET

Joint European Torus je v současnosti největším tokamakem na světě s poloměrem prstence 3 m a komorou 1,25\*2,1 m. Je postaven v anglickém Culhamu. V roce 1997 produkoval termojadernou energii špičkově o výkonu 16,1 MW po dobu 5 s více jak 5 MW.

#### 3.2.2.2 ITER

Původně anglicky International Thermonuclear Experimental Reactor (Mezinárodní termonukleární experimentální reaktor) dnes latinsky Iter = cesta. Je to druhý nejdražší mezinárodní vědecký projekt a očekává se, že bude předstupněm ke komerčnímu využití termonukleární syntézy v energetice. Stavba ITERu začala roku 2010 ve Cadarache ve Francii. První zkoušky jsou plánovány na rok 2019. Objem reaktoru bude asi 840 m<sup>3</sup>. Plánovaný výkon by měl být 500 MW během zážehů pulsů plazmatu trvajících přinejmenším 500 s. Teplota plazmatu by měla být 150 milionů °C.

#### 3.2.2.3 DEMO

Tak zvaná Demonstrační elektrárna by se měla dostavět za 30-35 let. Vše záleží na úspěšnosti experimentů v ITERu. DEMO má být průkopník v získávání čisté energie.

### 3.2.2.4 PROTO

První komerční elektrárna využívající termonukleární syntézy. Plánované dostavení za 50 let.

## 4 Závěr

Termojaderná syntéza a její využití v energetice nabízí neomezené možnosti. Zdroj energie, který v sobě skrývá tato technologie je neskutečný. Někdy skoro pochybuji, zda by se tento vynález měl používat, protože s takovým zdrojem nám bude planeta Země malá. Fúzi však velice podporuji a myslím si, že to je technologie blízké budoucnosti, které se nad dožiji.

## 5 Reference

<http://www.iter.org>

<http://www.jet.efda.org>

<http://www.ipp.mpg.de>

<http://www.euronuclear.org>

Řízená termojaderná syntéza pro každého;

Milan Růžička, Vladimír Weinzettl, Jan Mlynář, František Žáček