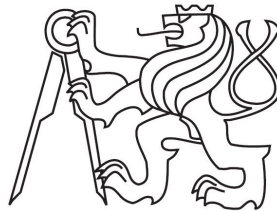


Česke vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická

Katedra elektroenergetiky  
Program: Elektrotechnika, energetika a management  
Obor: Aplikovaná elektrotechnika



# **Perspektivní využití termojaderné syntézy pro zásobování elektrickou energií**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Vypracoval: Roman Kopřiva  
Vedoucí práce: Stanislav Bouček  
Rok: 2014

- Zadání -

## **Anotace**

Cílem práce je zanalizovat možnosti fyzikálního a technologického využití termojaderné syntézy. Posouzení reálných a potenciálních možností fúze pro výrobu elektrické energie a její konkurenceschopnost na trhu s elektřinou. Součástí práce je pohled do historie vývoje a výzkumu fúze, teoretické předpoklady a výpočty fúzních reakcí, projekty fúzí se zabývající a srovnání výrobních zdrojů.

## **Abstract**

Main goal of this thesis is analyzing the technological possibilities and potential of thermonuclear fusion in power generation and supply. Investigation of fusion's place on the power market and its ability to withstand in a competitive environment. Thesis includes brief review of the history of the development of fusion energy, basic theory and calculations of the plasma particle behavior, important projects involving fusion and comparison with other methods of electric power generation.

### **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně za použití podkladů uvedených v příloženém seznamu literatury.

V Praze dne .....

.....

Roman Kopřiva

### **Poděkování**

Děkuji Ing. Stanislavu Boučkovi za odbornou pomoc, trpělivost a ochotu při tvorbě a konzultaci práce. Dále bych chtěl poděkovat rodičům za poskytnutí možnosti studia předcházejícího vypracování práce a také za finanční a emoční podporu v průběhu studia a tvorby závěrečné práce.

## Obsah

<b>1</b>	<b>Historie výzkumu v oblasti jaderné fúze</b>	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>Fyzikální principy a energetická využitelnost jaderných reakcí se zaměřením na fúzi</b>	<b>14</b>
	2.1 Chemické reakce	14
	2.2 Jaderné reakce	15
	2.3 Vazební energie	17
	2.4 Výtežnost jaderných reakcí	20
<b>3</b>	<b>Fyzikální a technologické podmínky pro dosažení energetického využití fúze.</b>	<b>22</b>
	3.1 Magnetická zrcadla a pasti	24
	3.2 Pinče	25
	3.3 Tokamak	26
	3.4 Stelarátory	28
	3.5 Inerciální udržení	29
	3.6 Neřízená fúze	31
<b>4</b>	<b>Popis současných projektů</b>	<b>33</b>
	4.1 JET	33
	4.2 Tore Supra	34
	4.3 JT-60	35
	4.4 W7-X	36
	4.5 NIF	37
<b>5</b>	<b>Porovnání fúzních reaktorů s ostatními typy energetických zdrojů.</b>	<b>39</b>
	5.1 Uhlí	40
	5.2 Zemní plyn	41
	5.3 Ropa	41
	5.4 Jaderné elektrárny	41
	5.5 Vodní elektrárny	42
	5.6 Větrné elektrárny	43
	5.7 Solární elektrárny	43
	<b>Použité konstanty a symboly</b>	<b>44</b>
	<b>Reference, seznam literatury</b>	<b>45</b>

## **Úvod:**

S rostoucí populací a rozvojem průmyslu ve světě roste a nadále poroste spotřeba elektrické energie. Z hlediska stále přísnějších ekologických norem a pomalu se snižujícím zásobám nerostných zdrojů je současná situace výroby elektrické energie do budoucna neudržitelná. V důsledku se zvyšuje poptávka po alternativních zdrojích elektrické energie a financování výzkumu hledání nových zdrojů. Ačkoli obnovitelné zdroje vypadají slibně, stále se s nimi pojí množství problémů a v současné podobě je lze s těžší pomocí jako páteř energetiky jak jednotlivých států, tak i celosvětově. Zastávají, až na výjimky, spíše roli vedlejší, doplňující. Nejnadějněji se jako hlavní zdroj výroby elektrické energie jeví energetika jaderná, a jak se pokusím v této práci argumentovat, pro blízkou budoucnost spíše než jádra štěpit, se vyplatí je slučovat. Na následujících stranách se budu věnovat jaderné syntéze, jejímu potenciálu, pro a proti coby nástupci fosilních paliv v elektrárnách.

# 1

## Historie výzkumu v oblasti jaderné fúze

---

Teoretické počátky výzkumu nukleární syntézy umožnil Albert Einstein v roce 1905 svou speciální teorií relativity. Konkrétně z jeho rovnice  $E=mc^2$  vyplývá možnost konverze látky a energie v poměru kvadrátu světelné rychlosti.

Roku 1920 F.W.Aston zkonstruoval hmotnostní spektrograf schopný prvních přesných měření hmotnosti atomů. Z opakovaných měření mimo jiné vyplynuly rozdíly v hmotnostech prvků, složených ze stejných elementárních částic. Mezi prvními případy, kde byl tento jev pozorován bylo např. porovnávání čtveřice atomů vodíku s jedním atomem hélia. Daný hmotnostní rozdíl byl vysvětlen pomocí Einsteinovy speciální teorie relativity, podle které byl číselně roven energii v poměru kvadrátu světelné rychlosti ( $E = mc^2$ ).

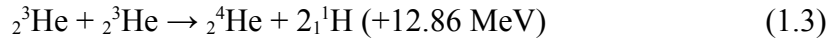
Arthur S. Eddington se zabýval astronomií a procesy probíhajícími uvnitř hvězd, zejména tehdy palčivou otázkou jak hvězdy odolávají vlastní gravitaci a proč se jejím důsledkem nezhroutí. Spekuloval o vnitřním tepelném tlaku a jeho zdroji v elektron-protonové anihilaci a cyklu proton-proton. V návaznosti na Astonova měření tentýž rok jako první vyřkl tezi o termojaderné fúzi, jakožto zdroji energie hvězd. Ačkoli nedokonale fyzikálně podložená zvýšila jeho teorie zájem a vedla k dalšímu výzkumu v této oblasti.

1939 Hans Bethe představil dva základní cykly jaderných reakcí ve Slunci. Dodal plné vysvětlení Eddingtonova proton-protonového cyklu a přidal CN cyklus (později doplněn o stabilní izotop kyslíku na současný CNO cyklus), dominantní ve velkých hvězdách. Vysvětlil tak dosud neobjasněné samovolné procesy uvnitř hvězd pomocí termojaderné fúze.



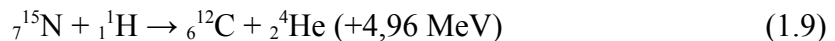
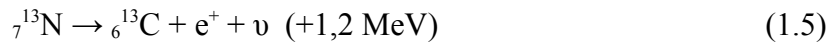
## Dva Behteho hvězdné cykly:

Proton-protonový cyklus, vznik Helia:



Srážkou dvou vodíkových jader vznikne Deuterium. Vzácny beta rozpad jednoho ze vstupních protonů (vodíkového jádra) na neutron za uvolnění pozitronu a neutrina (1.0) dovoluje následné pokračování cyklu. Následné setkání pozitronu s elektronem ústí v anihilaci v dva fotony gama záření (1.1). Vzniklé Deuterium srážkou absorbuje jádro vodíku  ${}_1^1\text{H}$  na Helium  ${}_2^3\text{H}$  opět za přítomnosti gama záření (1.2). Nejčastější následující reakcí (existují další tři možné reakce) je syntéza dvou lehkých izotopů helia na Helium  ${}_2^4\text{He}$  a dva protony (1.3). V závorkách jsou uvedeny hodnoty energie při reakcích uvolněné.

CN cyklus:



Původní Betheho návrh uzavřeného uhlík-dusíkového cyklu (CN): Uhlík  ${}_6^{12}\text{C}$  srážkou s vodíkovým jádrem vytvoří nestabilní izotop dusíku  ${}_7^{13}\text{N}$  (1.10). Ten se beta rozpadem (z protonu vyzářením neutrina a pozitronu vzniká neutron) mění na uhlík  ${}_6^{13}\text{C}$  (1.11). Vzniklý uhlík syntetizuje s jádrem vodíku na dusík  ${}_7^{14}\text{N}$  (1.12). Pohlcením dalšího vodíkového jádra vzniká nestabilní izotop kyslíku (1.13), který se následně beta rozpadem mění zpět na dusík (1.14). Cyklus se uzavře pohlcením vodíkového jádra dusíkem  ${}_7^{15}\text{N}$ , který se následně rozpadá na uhlík  ${}_6^{12}\text{C}$  a helium  ${}_2^4\text{He}$  (1.15) a proces se může opakovat. V cyklu vzniklé pozitrony při prvním setkání s elektronem anihilují. V závorkách je opět uvedena vyzářená energie.

Rok 1938 přinesl první praktické využití myšlenky magnetického oddělení plazmatu A. Kantrowitzem a E. Jacobsem v amatérsky sestavené nádobě omotané cívkou.

Za první umělou jadernou reakci se označuje Rutherfordova přeměna atomu dusíku na atom vodíku nastřelení alfa částice:  $^{14}\text{N} + \alpha \rightarrow ^{17}\text{O} + \text{p}$ . Ztímco první úspěšnou fúzní reakci v laboratorních podmínkách provedli M.L.E. Oliphant a P. Harteck a to na lineárním urychlovači částic roku 1934 vytvořením atomu helia srážkou dvou alfa částic [1]. Vstupní energetická náročnost fúzních reakcí v urychlovačích nenaznačovala možnost většího průmyslového využití těchto reakcí.

Po vypuknutí války byly myšlenky na jadernou fúzi potlačeny do pozadí a pozornost se přesunula na jaderné štěpení. To, oproti fúzi, mělo obrovský potenciál pro výrobu zbraní. Do výzkumu investovaly v té době nejvíce tři velmoci: USA, Sovětský svaz a Velká Británie. Rivalové SSSR a Spojené státy držely výzkum v přísném utajení. Když dosáhl výzkum ve Velké Británii slibných výsledků, utajila Anglie svůj program rovněž.

#### **USA:**

V průběhu Manhattan projektu zvažovali američtí vědci využití fúze a její řízené udržení za pomoci magnetického pole. Výpočty však nenaznačovali budoucnost takového návrhu kvůli přílišným ztrátám energie v průběhu procesu [2]. Laboratoř v Livermoru zapracovala na jedné možnosti magnetického udržení - tzv. magnetickém zrcadle. Zařízení sestávalo z tubusu uvnitř cívky tvořící magnetické pole s dvěma silnějšími magnetickými poli na obou koncích tubusu, které by zabraňovali úniku iontů plazmatu. Vědci v Livermoru nebyli nikdy schopni omezit magnetickými zrcadly ztráty dostatečně na to, aby vytvořili podmínky fúzi.

Lyman Spitzer, který se podílel na vývoji vodíkové bomby, také experimentoval s několika podobami magnetické nádoby. Nejslibnější konfigurací byl tzv. Stelarátor - zařízení s komorou ve tvaru čísla 8. Taková komora značně zredukovala únik částic v zaoblených trubiciích opačným směrem proudění při průchodu koncovými oblouky. Vývoj stelarátoru dostal zelenou roku 1951 v podobě projektu Matterhorn, později Sherwood, zahrnující několik amerických laboratoří (Los Alamos, Princeton Un.,

Californian Un., a.j.). Stellarátor byl velmi náročný na přesné provedení a provázeli jej mnohé technické problémy především s nestabilitami plasmatu. Ačkoli bylo navrženo několik prototypů stellarátorů, nikdy nebylo dosaženo stabilního plasmatu natož fúze. Projekt ztroskotal na nedostatečných znalostech fyziky plasmatu a byl odtajněn roku 1958.

### **Anglie:**

Anglický výzkum zplodil zařízení typu pinč. Princip byl ve využití tzv. pinč efektu, kdy proudem protékané plasma vytváří magnetické pole, jež toto samotné plasma stlačuje a tím i zahřívá. Problém zde byl v nestabilním chování plasmatu a proudu jím procházejícím. Tento problém byl částečně vyřešen přidáním další vrstvy magnetického pole pomocí cívek. Výsledným návrhem byl toroidální pinč ZETA (Zero Energy Thermonuclear Assembly), dokončený 1957. ZETA dosáhlo proudu 200kA teplot  $5 \cdot 10^6$  K ( $\sim 300$ eV) [3] a byla na něm pozorována produkce značného množství volných neutronů. Ty byly považovány za produkty slučování dvou atomů deuteria:  ${}_2^1\text{H} + {}_2^1\text{H} \rightarrow {}_3^2\text{He} + {}_1^0\text{n}$  a tedy za důkaz úspěšné fúze. Jak se ale později ukázalo, volné neutrony vznikaly již při zahřívání plasmatu a nikoli až fúzními reakcemi.

### **SSSR:**

První zmínky ruského výzkumu uvádí dopisová korespondence z roku 1950 mezi O.A. Lavrent'evem a A.D. Sakhratovem o teoretické podobě zařízení k magnetickému udržení fúze.

Roku 1951 v reakci na Argentinské prohlášení vyhradil Stalin prostředky a oficiálně stanovil program výzkumu řízené fúze. První návrhy reaktorů byly toroidální podoby, bylo však třeba vyřešit problém s difúzí iontů v důsledku srážek v toroidálním směru. Problém s toroidální difúzí byl vyřešen přidáním poloidálního magnetického pole zprostředkovaného přidavnými cívkami a vedl k prvnímu návrhu komory s využitím dvojího jak poloidálního tak toroidálního magnetického pole - zrodil se princip zvaný tokamak v roce 1955. Velký problém prvních prototypů tokamaků byl jejich konstrukční materiál. Špatné vlastnosti keramických stěn způsobovaly velké ztráty UV zářením a navíc se jejich objem v důsledku malé tepelné vodivosti lokálně odpařoval a kontaminoval plasma, což mělo za důsledek nízké dosažené teploty v řádech  $10^5$  K (10-

30 eV) [4]. Prakticky nulový pokrok ve vývoji v následujících několika letech vedl k rozhodnutí o odtajnění výzkumu zbytku světa. Stalo se tak v dubnu 1956 v Harwell (Velká Británie), kam přijel Kurčatov se svým týmem prezentovat dosažené výsledky. Přednáška vedla k celosvětovému odtajnění výzkumných programů všech tří velmocí a položila základy následné mezinárodní spolupráci za společným cílem dosažení řízené fúze.

V roce 1955 stanovil ve své, o dva roky později publikované a odtajněné zprávě John D. Lawson dvě základní kritéria k dosažení fúze s kladnou energetickou bilancí - Lawsonovo kritérium minimální teploty a součinu hustoty a času výboje. Lawson stanovil energetický zisk a jako funkci teploty hustoty a času, z těchto hodnot sestavený diagram je užitečným ukazatelem dosaženého pokroku [5].

V září 1958 se odehrála druhá ženevská konference, kde velmoci porovnaly své návrhy. Bohmova difúze představovala kritický problém stelarátorů. Následujících několik let se vědci po celém světě marně snažili překonat teploty několika set tisíc stupňů. Největší překážkou se opět ukazuje neznalost dějů v plasmatu, jež vedla k rozvoji teoretické fyziky plasmatu a diagnostických systémů. Dalším limitujícím faktorem byly anomálie v tepelném transportu skrze plasma. Tyto anomálie se zdály řešitelné zvětšením průměru komory. S velikostí tokamaků úměrně rostla i dosažená teplota plasmatu.

V roce 1964 N.G.Bashov a O.N.Krokhin publikovali návrh zapálení fúzního paliva pomocí vysokoenergetického laserového impulsu [6] nedlouho poté přišli s podobnou myšlenkou i američtí vědci [7] čímž položili základy metody inerciálního udržení (viz kapitola 3).

Rok na to 1965 prohlásil Lev A. Arcimovič dosažení 10 milionů stupňů na tokamaku T-3A. Tento výsledek byl natolik pokrokový, že vzbuzoval značné pochybnosti. Byl však následně potvrzen při britské návštěvě 1968. T-3A navíc kromě vysokých teplot dosahoval výborné doby udržení, která zdaleka překonala doposud limitující Bohmovu hranici. Výborné výsledky T-3A inspirovaly svět a pobídly výzkum fúze k zaměření na tokamaky a jejich další zvětšování neslo ovoce. Teplotní hranice daná s teplotou se snižujícím elektrickým odporem horkého plasmatu byla překonána alternativními metodami dodatečného ohřevu. Jednou možností bylo nastřelování částic s vysokou energií do oblaku plasmatu, které svou energii předávaly částicím plasmatu

srážkami. Druhou možností byl ohřev radiovými vlnami, zde bylo vyvíjeno několik druhů o různých frekvencích. Nejlepších výsledků bylo dosaženo při kombinaci všech zmíněných metod. Sedmdesátá léta přinesla zdokonalení tvaru komory. Protáhlý tvar písmene D měl lepší stabilitu plazmatu a nahradil dosavadní kruhový průřez. Rozvíjet se pořádně začaly i diagnostické metody pro sledování výsledků a přesnější měření [8]. Následující léta patřila především z finančních důvodů hlavně dílčím úspěchům velkých projektů.

## 2

### Fyzikální principy a energetická využitelnost jaderných reakcí se zaměřením na fúzi

---

**2.1 Chemické reakce:** Proces jehož výsledkem je vzájemná přeměna chemických látek [9].

Při chemické reakci dochází k vzájemnému působení přítomných látek a ke změně jejich chemických vlastností. Tyto změny se týkají změn elektronů v elektronovém obalu, atomárních a meziatomárních elektronových vazeb. Nukleus, tedy atomové jádro zůstává v průběhu a po skončení chemické reakce nezměněn. Mění se počet a podoba molekul, počet atomů jednotlivých přítomných prvků zůstává stejný. Hlavní hnací silou a zdrojem energie při tomto typu reakce je elektromagnetická interakce.

Pro názornost uvádím číselné vyjádření elektromagnetické interakce na příkladu dvou odpuzujících se protonů ve vzdálenosti odpovídající pozicím umístění v deuteriovém jádře ( $\sim 10^{-15}$  m):

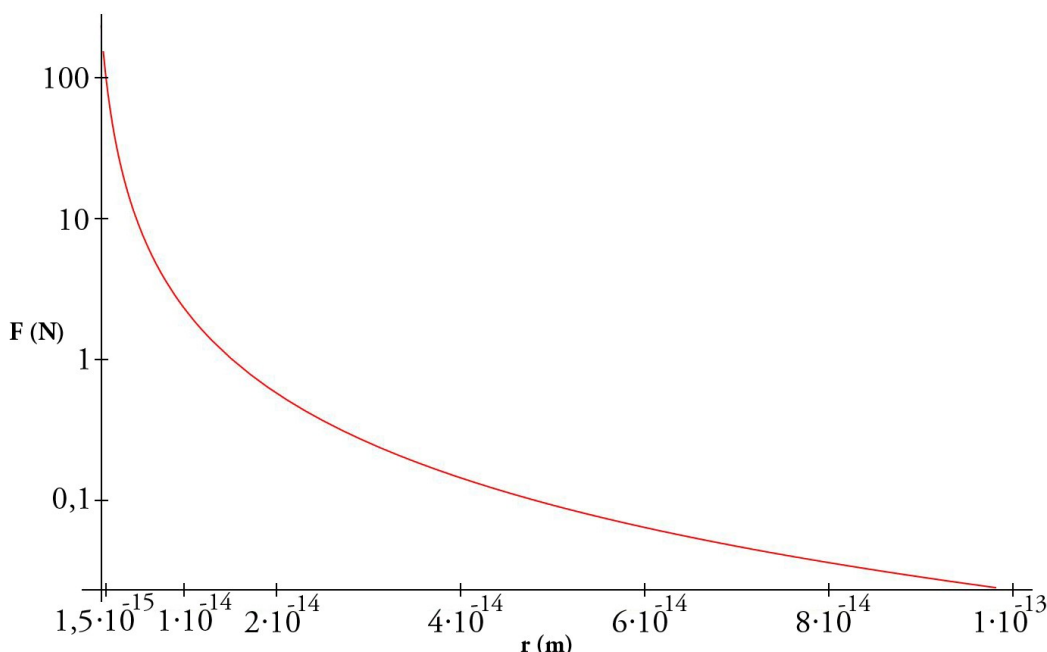
Dle Coulombova zákona je elektrostatická síla působící mezi dvěma nabitými částicemi rovna:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} = k \frac{q_1 q_2}{r^2}, \text{ kde:} \quad (2.1)$$

$k$  představuje konstantu zohledňující vliv prostředí,  $q_1$  a  $q_2$  jsou náboje zúčastněných částic, v tomto případě obě rovny elementárnímu náboji protonu a  $r$  je rovno vzdálenosti mezi částicemi. Protože konstanta prostředí  $k$  i oba náboje jsou neměnné, bude velikost síly záležet pouze na vzdálenosti. S klesající vzdáleností obou částic kvadraticky roste odpuzivá síla mezi nimi. Pro vzdálenost  $1,5 \cdot 10^{-15}$  m, tedy zhruba vzdálenosti nukleonů jádra deutéria, se budou odpuzovat silou:

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} = 9,98 \cdot 10^9 \frac{(1,602 \cdot 10^{-19})^2}{(1,5 \cdot 10^{-15})^2} = \frac{2,31 \cdot 10^{-28}}{r^2} = 102,65 \text{ N} \quad (2.2)$$

Přemístí-li se částice na 1 m od sebe, odpudivá síla již bude zanedbatelná:  $2,3 \cdot 10^{-28}$  N. Obrázek 2.1 zobrazuje rapidní pokles síly F s rostoucí vzdáleností.

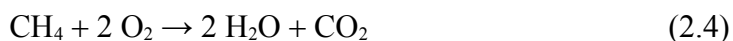


obr. 2.1: závislost odpudivé elektrostatické síly na vzdálenosti

Práce potřebná k přenesení obou protonů k sobě, tedy proti směru působení jejich elektrostatických polí, je rovna integrálu síly po uražené dráze (vzdálenost protonů) a je ekvivalentní potenciální energii částice - tzv. Coulombově bariéře. Pro případ dvou protonů bude tato práce:

$$U = \int_{-\infty}^{r_0} F dr = k \frac{q_1 q_2}{r} = 9 \cdot 10^9 \frac{(1,602 \cdot 10^{-19})^2}{(10^{-15})} = 2,3 \cdot 10^{-13} \text{ J} \sim 1,4 \text{ MeV} \quad (2.3)$$

Typickým příkladem chemické reakce je hoření, neboli oxidace probíhající v krátkém časovém intervalu. Hoření je exoenergetická/exotermická reakce, v jejím průběhu látka ztrácí část vnitřní energie (zde zastoupené elektronovými vazbami). Ztracená energie je transformována v záření, a kinetickou energii přítomných částic. Tepelná energie uvolněná hořením při spalování fosilních paliv se využívá k produkci elektřiny v elektrárnách. Typickým příkladem takového procesu je spalování metanu - hlavní složky zemního plynu:



Při tepelné zisku spalování 890 kJ/mol [10] odpovídá 1 kg metanu produkci tepla:

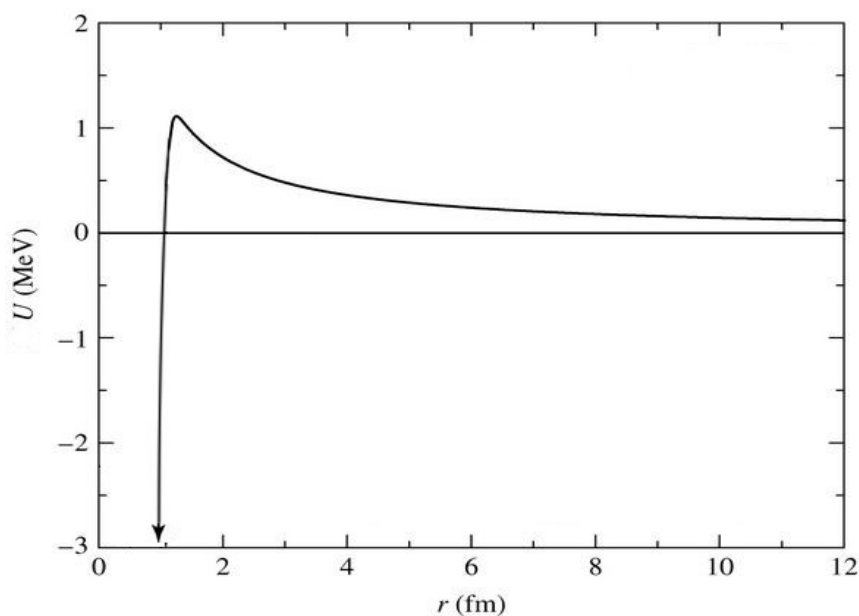
$$\frac{1}{0,016} \cdot 890 = 5,6 \cdot 10^7 \text{ MJ} \sim 3,46 \cdot 10^{26} \text{ eV.} \quad (2.5)$$

**2.2 Jaderné reakce:** Přeměna atomového jádra, která může probíhat samovolně nebo být vyvolaná působením jiného jádra nebo částice.

Dochází při ní jak ke změně struktury zúčastněných jader, tak ke změně jejich pohybového stavu. [11]

Oproti chemickým reakcím se v případě reakcí jaderných již změny týkají samotného atomového jádra. Výsledkem změny jádra je změna na jiný izotop téhož prvku, nebo úplná přeměna na jiný prvek. Atomové jádro drží pohromadě zbytková silná interakce. Ačkoli se jedná pouze o nepřímou (zbytkovou) složku silné interakce, přítomná síla působící na nukleony je mnohem vyšší, než působení elektromagnetické interakce na stejné vzdálenosti.

Účinky silné interakce jsou znatelné pouze na vzdálenost několika femtometrů a s rostoucí vzdáleností exponenciálně klesají, zatímco u elektromagnetické interakce je vztah vzdálenosti kvadratický. Obě charakteristiky se tedy protínají a od určité vzdálenosti je dominantní elektromagnetická interakce. Prolínání silových účinků obou interakcí znázorňuje obrázek 2.2. S klesající vzdáleností iontů roste potenciální energie až do bodu vyrovnaní silového působení interakcí, odkud se velikost potenciální energie snižuje. Směr výslednice působení síly odpovídá znaménku energie  $U$ .



obr. 2.2: Průběh potenciální energie [12]



Mezi jaderné reakce se řadí jaderná syntéza, stejně tak jako jaderné štěpení. Při syntéze dochází ke sloučení dvou jader s výsledným stvořením výsledného těžšího jádra. Opakem syntézy je štěpení, kdy je jádro, větinou vnějším vlivem, rozštěpeno na dvě, nebo více částí. Oba druhy jaderných reakcí mohou být jak exo, tak endoenergetickými ději, v závislosti na podobě vstupujících reaktantů.

Energie uvolněná při jaderných reakcích odpovídá rozdílu vazebné energie nukleonů prvků před a po skončení reakce. Změna vazebné energie nukleonů je doprovázena měřitelnou změnou hmotnosti jádra, i když je celkový počet elementárních částic v reakci zachován. Ve výsledku je tedy velikost energie reakci/í dodané/získané úměrný změně hmotností částic účastnících se reakce a to v poměru druhého kvadrátu světelné rychlosti, dle Einsteinovy rovnice  $E = mc^2$ .

### 2.3 Vazební energie

Z rozdílu hmotnosti jádra prvku a celkové hmotnosti všech jeho nukleonů lze určit tzv. vazební (disociační) energie.

Deuteron - jádro těžkého vodíku  $H_1^1$  je složeno z jednoho protonu a jednoho neutronu. Jeho hmotnost by tedy měla být rovna součtu hmotností obou částic:

$$m_{D1} = m_n + m_p = 3,347\,549\,128 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 2,015\,941\,383 \text{ u} \quad (2.6)$$

Zde se výpočty neshodují s praxí. Experimentálně ověřená hmotnost deuteriového jádra je:

$$m_{D2} = 3,343\,583\,480 \cdot 10^{-27} \text{ kg} [13] = 2,013\,553\,212 \text{ u}$$

Anomální rozdíl obou hmotností

$$m_{d(1)} - m_{d(2)} = 0,003\,965\,648 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 0,002\,388\,171 \text{ u} \quad (2.7)$$

představuje vazebnou energii jádra deuteria, o velikosti:

$$E_d = (m_{D1} - m_{D2}) \cdot c^2 = 3,568 \cdot 10^{-13} \text{ J} = 2,227 \text{ MeV} \quad (2.8)$$

Výsledkem je vyčíslení energie držící obě částice v jádře pohromadě. Pokud

bychom chtěli částice od sebe oddělit a jádro deutéria rozštěpit, bylo by k tomu zapotřebí právě toto množství energie (2.8).

Relativní vazebná energie je vztažena na jeden nukleon, v tomto případě je počet nukleonů 2, relativní vazebná energie deuteriového jádra je:

$$E = \frac{E_d}{A} = \frac{E_d}{2} = 1,1135 \text{ MeV} \quad (2.9)$$

Obdobně se určí vazebná energie všech prvků, uvedu ještě příklad určení vazební energie alpha částice:

Alfa částice  $He_2^2$  se skládá ze dvou protonů a dvou neutronů:

$$m_\alpha = 2m_p + 2m_n = 2 \cdot 1,674\,927\,351 \cdot 10^{-27} + 2 \cdot 1,672\,621\,777 \cdot 10^{-27} = 6,695\,098\,256 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \quad (2.10)$$

změřená, tabulková (klidová) hmotnost  $\alpha$  částice:

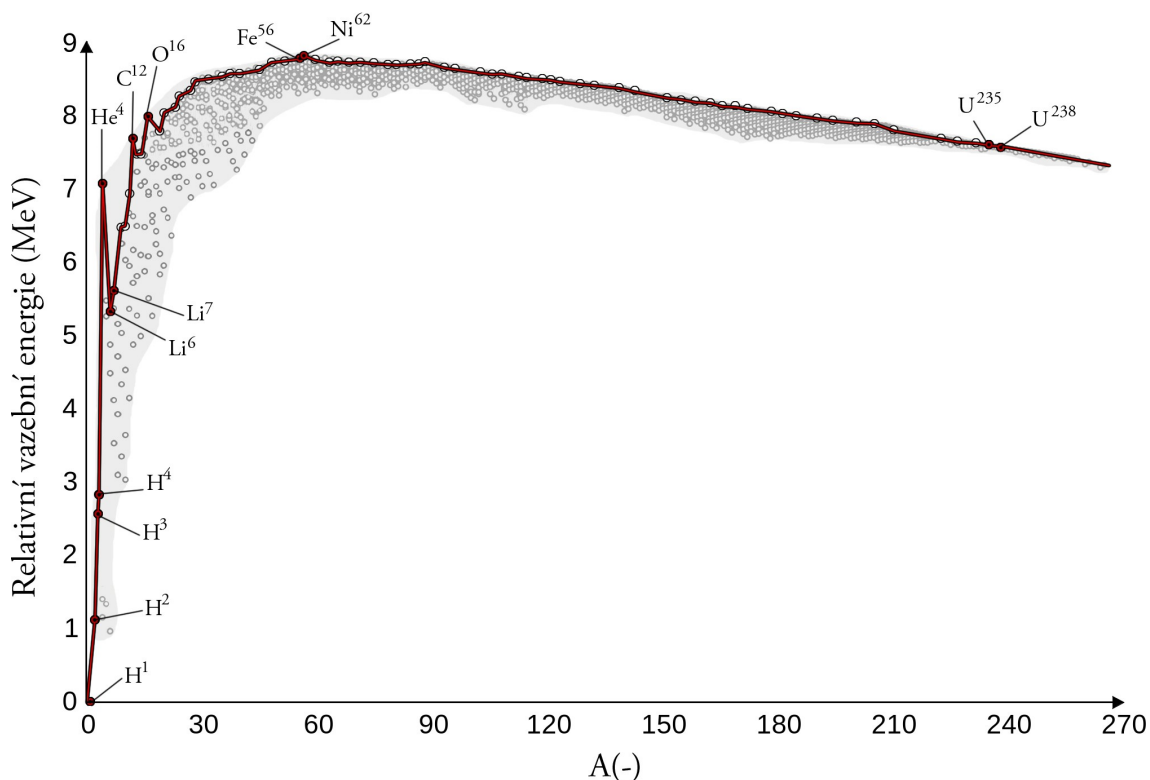
$$m_{\alpha(1)} = 6,644\,656\,753 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 4,001\,506\,179 \cdot 10^{-27} \text{ kg} [15]$$

$$m_{\alpha(2)} - m_{\alpha(1)} = 0,050\,441\,503 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \sim E_d = 28,33 \text{ MeV} \quad (2.11)$$

$$E = \frac{E_d}{4} = 7,0825 \text{ MeV} \quad (2.12)$$

Vazebná energie je v obou případech různá ( $2.9 \neq 2.12$ ). Každý izotop má vlastní úroveň vazebné energie, tu je možné považovat za ukazatel jeho stability. Obdobným způsobem jako v případech výpočtu vazebných energií  $\alpha$  částice a deuteronu (2.8, 2.11), lze určit vazebnou energii všech prvků. Vynesením těchto energií do grafu a následnou aproximací jejich hodnot vznikne charakteristická křivka závislosti relativní vazebné energie na hmotnostním čísle A, viz obr. 2.3.

Čím vyšší je vazebná energie vztažená k nukleonu, tím pevněji drží toto jádro pohromadě - tím je prvek stabilnější. Pro uskutečnění jaderné reakce je tedy nejjednodušší překonávat co nejmenší vazebnou energii.



obr. 2.3: Křivka vazební energie

Tvar křivky vazební energie vysvětlí opět společná existence silné a elektromagnetické interakce. Jak jsem již zmiňoval, uvnitř atomového jádra působí mimo gravitační tyto dvě síly s opačnými normálovými vektory. Ve vzdálenostech odpovídajícím velikostem nukleonů převládají účinky silné zbytkové interakce (viz obr. 2.2) a proto udrží jádro stabilně pohromadě. Jejím zdrojem jsou samotné nukleony. Nukleony zprostředkovávají silnou interakci vzájemným působením na sebe navzájem. Proto s jejich celkovým počtem v jádře roste i velikost vazební síly jádra, vyjádřitelná vazebnou energií. Lehké prvky se nacházejí spodní části grafu, protože mají malý počet nukleonů a jejich soudržné jaderné síly tudíž nejsou tak velké.

Také jsem uvedl, že účinky silné interakce prudce klesají s rostoucí vzdáleností (2.2). Jádra prvků s velkým počtem nukleonů (velkým  $A$ ) zaujímají velký objem, jejich nukleony jsou od sebe vzdáleny natolik, že jimi evokovaná zbytková interakce nepůsobí na každý jiný nukleon v jáře, pouze na ty ve svém nejbližším okolí. Zde se promítne Coulombova síla. Coulombova síla neklesá se vzdáleností tak radikálně jako silná interakce a stále působí na všechny přítomné nabitě nukleony a oslabuje soudržnost velkých jader těžkých prvků.

Budou-li spolu reagovat prvky tak, že výsledný produkt reakce bude mít vyšší relativní vazebnou energii, bude tato reakce exoenergetická. Nejvyšší relativní vazebnou energii má nejvýše znázorněný izotop niklu  $^{62}\text{Ni}$ . Reakce zvyšující relativní vazebnou energii svých produktů vydávají energii ven do systému, tohoto jevu však lze k zisku energie využívat pouze do momentu, kdy bude výsledným produktem právě zmíněný izotop Niklu.

Jak je z 2.2 vidět, relativní vazebná energie roste s hmotnostním číslem až na úroveň  $^{62}\text{Ni}$ , poté její velikost s rostoucím A klesá. Obecně lze říci, že v levo od  $^{62}\text{Ni}$  jsou exoenergetické reakce fúzní, zatímco v pravo od  $^{62}\text{Ni}$  je k energetickému zisku třeba jaderného štěpení. Syntézu těžších jader než  $^{62}\text{Ni}$  je potřeba energeticky dotovat a naopak pro štěpení.

Zároveň je na 2.2 k povšimnutí velký rozsah vazebných energií mezi lehkými izotopy oproti energetickému rozsahu jader těžkých izotopů v poměru zhruba jednoho desetinného řádu. Lze tedy předpokládat mnohem větší energetickou výtěžnost z reakcí mezi lehkými prvky, vůči reakcím prvků těžkých.

#### 2.4 Výtěžnost jaderných reakcí:

Jaderné štěpení je hnací silou reaktorů jaderných elektráren. Jeden ze štěpných procesů, ke kterému v prostředí jaderného reaktoru dochází je štěpení uranu. Zde je energie z rozštěpení jednoho atomu  $\text{U}^{235}$  pomalým neutronem na Krypton Barium a tři neutrony:



$$\begin{aligned} m_n + m_{\text{U}} - (m_{\text{Kr}} + m_{\text{Ba}} + 3m_n) &= 1,67493 \cdot 10^{-27} + 3,903 \cdot 10^{-25} - \\ &- (3 \cdot 1,67493 \cdot 10^{-27} + 2,33994 \cdot 10^{-25} + 1,52647 \cdot 10^{-25}) \quad [0,2] = \\ &= 3,08915 \cdot 10^{-28} \text{ kg} \sim 173,31 \text{ MeV} \end{aligned} \quad (2.14)$$

1 kg uranu touto přeměnou uvolní:

$$6,0221 \cdot 10^{23} \cdot \frac{1}{0,235} \cdot 173,31 \cdot 10^6 = 4,44 \cdot 10^{32} \text{ eV} \sim 7,05 \cdot 10^{13} \text{ MJ} \quad (2.15)$$

Přímky spojující Uran  $U^{235}$  s Bariem a Kryptonem jsou hodně položené, odpovídá tomu poměrně malý rozdíl jejich relativní vazební energie. Oproti nim dosahují lehké prvky nacházející se na prudce stoupající křivce výrazně vyšší výtěžnost na nukleon. Rovnice (2.16 - 2.17) popisují syntézu Deuteria a Tritia v Helium. Tato reakce je velmi slibná pro zužitkování fúzní energie.



$$\begin{aligned} m_D + m_T - (m_\alpha + m_n) &= 3,343\,583\,48 \cdot 10^{-27} + 5,007\,356\,30 \cdot 10^{-27} - \\ &- (6,644\,656\,75 \cdot 10^{-27} + 1,674\,927\,35 \cdot 10^{-27}) = 0,031\,355\,68 \cdot 10^{-27} \text{kg} \\ &\sim 17,589 \text{ MeV} \end{aligned} \quad (2.17)$$

Porovnání výtěžnosti obou jaderných reakcí v poměru na počet nukleonů (2.18) ukazuje jasně ve prospěch fúzní reakce lehkých prvků.

$$\frac{173,3}{235} = 0,74 < \frac{17,6}{4} = 4,4 \quad (2.18)$$

1 kg DT paliva odpovídá:

$$\begin{aligned} 6,0221 \cdot 10^{23} \cdot \left( \frac{0,4}{0,002} + \frac{0,6}{0,003} \right) \cdot 17,589 &= \\ = 2,12 \cdot 10^{27} \text{ MeV} &\sim 3,4 \cdot 10^8 \text{ MJ} \end{aligned} \quad (2.19)$$

Druhá důležitá fúzní reakce je fúze dvou jader deutéria:



$$\begin{aligned} 2 \cdot m_D - (m_T + m_p) &= 6,6876696 \cdot 10^{-27} - \\ &- (5,007\,356\,30 \cdot 10^{-27} + 1,672\,621\,777 \cdot 10^{-27}) = 0,007\,691\,523 \cdot 10^{-27} \text{kg} \\ &\sim 4,315 \text{ MeV} \end{aligned} \quad (2.21)$$

pro 1 kg D paliva:

$$6,0221 \cdot 10^{23} \cdot 500 \cdot 4,315 = 1,23 \cdot 10^{27} \text{ MeV} \sim 2,08 \cdot 10^8 \text{ MJ} \quad (2.22)$$

### 3

## Fyzikální a technologické podmínky pro dosažení energetického využití fúze.

---

K úspěšnému využití jaderné fúze k produkci energie je zapotřebí zvládnutí mnoha technologických požadavků. Podmínky za kterých k fúzi vůbec může dojít jsou doslova extrémní a v dosud aplikovaných průmyslových procesech nevídané.

Pro energetické využití je zapotřebí, jak stanovil D. Lawson, aby při nastalé fúzi vzniklo více energie, než bylo potřeba pro nastolení podmínek k jejímu uskutečnění a jejich udržení. Potom můžeme hovořit o kladné energetické bilanci ( $Q > 1$ ). Poměr získané a dodané energie se značí  $Q$ :

$$Q = \frac{P_z}{P_d} \quad (3.2)$$

Pokud by energetická produkce měla mít nějakou šanci v reálném využití pro zásobování lidské populace elektrickou energií je navíc potřeba fúzní reakce uskutečnit v masové míře.

Indikaci užitečného fúzního reaktoru s kladným energetickým ziskem dává Lawsonův trojný součin,

$$n T \tau_E \quad (3.3)$$

kde  $n$  značí hustotu částic plasmatu (ekvivalent tlaku),  $T$  je teplota (K) a  $\tau_E$  čas udržení (s) - charakteristická doba poklesu energie plasmatu po odstavení zdroje energie. Užitečný reaktor, tedy takový, který bude schopný produkovat energii, lze dosáhnout kombinací těchto tří faktorů. Hodnota trojného součinu pro takový reaktor by měla být alespoň  $10^{20} \text{ keV m}^{-3} \text{ s}$  [16].

Aby bylo možné energii pomocí fúze získávat, jak je teoreticky popsáno v druhé kapitole, je třeba tyto fúzní reakce uskutečnit. Ke sloučení jader je zapotřebí překonat Coulombovu bariéru, tedy dostat částice na dostatečně vysokou energetickou hladinu aby překonaly odpudivou sílu elektromagnetické interakce - řádově jednotky MeV (viz. 2.3).

Při uvážení nízké hmotnosti lehkých prvků vhodných pro fúzi -  $10^{-27}$  kg (viz kapitola 2), je třeba vysoké hodnoty vnitřní energie dosáhnout rychlostí. Rychlost pro možnost srážky úspěšně ústící ve fúzi se tak pohybuje pohybuje řádově:

$$v = \sqrt{\left(\frac{2E_k}{m}\right)} \rightarrow \sqrt{\left(\frac{10^0 \text{ MeV}}{10^{-27} \text{ kg}}\right)} \sim 10^6 \text{ ms}^{-1} \quad (3.1)$$

Jednou možností dosažení takové rychlosti/energie je urychlení v urychlovači částic. Částice v urychlovačích dosahují běžně rychlostí  $2 \cdot 10^8$  m/s, tedy zlomku rychlosti světla. Při srážkách částic v urychlovačích byly fúzní reakce prokázány a jsou poměrně běžnou záležitostí. Problém ovšem je, že v poměru všech srážek tvoří ty ústící ve fúzi minimum. Další překážkou tohoto přístupu je vysoká energetická náročnost pro vytvoření magnetických urychlovacích polí. Vstupní energie k vytvoření pole je mnohonásobně vyšší než energie uvolněná při všech fúzních srážkách dohromady. Ačkoli je fúze v urychlovačích poměrně snadno dosažitelná, její energetické využití je nepravděpodobné. Jistou nadějí má urychlování proudu částic v kombinaci s inerciální udržení (více níže).

Jiný přístup zvýšení energie částice je její zahřátí. Hodnota střední kvadratické rychlosti  $10^6 \text{ ms}^{-1}$  odpovídá teplotě:

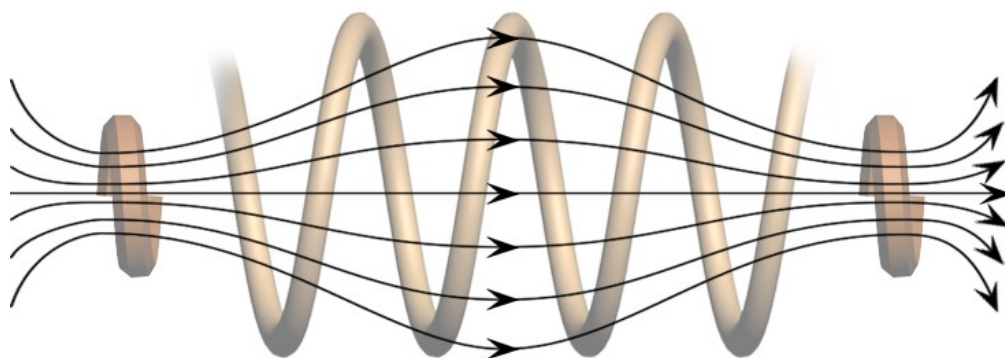
$$T = \frac{m v_k^2}{3k} \sim 10^7 \text{ K} \quad (3.4)$$

Dosažení teploty sedmi řádů K je technologicky značně náročné, vědci se o kontrolované dosažení a udržení takto horkého plasmatu snaží přes 60 let (viz kapitola 1). Vysoké teplotě plasmatu odpovídá značný tlak. Částice se vlivem elektromagnetické interakce odpuzují a snaží se rozletět od sebe navzájem. Aby mezi nimi mohlo dojít k jaderným reakcím je třeba je udržet pohromadě. Uzavření plasmatu do fyzické nádoby je přinejmenším nepraktické z důvodu odolnosti materiálu tepelnému namáhání plasmatem. Neexistuje materiál který by takovým teplotám při přímém kontaktu odolal. Prvek s s nejvyšším bodem varu Rhenium při 5869 K [17]. To není ani zdaleka dostatečné k odolání teplotě potřebné k fúzi lehkých prvků, která se pohybuje v hodnotách minimálně o čtyři řády vyšších. V případě aktivního vysoce účinného

chlazení aby materiál vydržel by bylo z plasmatu odebráno příliš mnoho energie na to, aby se samo udrželo, nemluvě o erozi částic materiálu stěn při přímém kontaktu, které by značně snížily kvalitu plasmatu a zhoršily podmínky fúze. Uzavření plasmatu přímým fyzickým kontaktem se stěnami nádoby tedy není slibná možnost, lze však využít jiného fyzikálního principu. Plasma je při takto vysokých teplotách plně ionizované a tudíž může být ovlivněno magnetickým polem. Při nastolení vhodného magnetického pole lze ovlivnit trajektorii částic aby se zamezilo jejich kontaktu se stěnami reaktoru. Tento princip se nazývá magnetické udržení a zahrnuje několik nadějných konfigurací magnetických polí polí.

### 3.1 Magnetická zrcadla a pasti

Konstrukčně jednoduchý princip - proudem protékaná dlouhá cívka - solenoid vytvoří homogenní válcové magnetické pole, dostatečné k usměrnění proudu nabitých částic do jedné osy pohybu. Zvýšením magnetické indukce na okrajích solenoidu se zamezí úniku částic konci cívky v podélné ose. Částice při přiletu do silnějšího pole na konci solenoidu ztrácí rychlost a odráží se zpět dovnitř magnetické nádoby. Má-li částice dostatečně velkou energii zesílené pole však nestačí k jejímu zadržení a z pasti unikne. Zesílením pole na koncích vzniká rychlostní gradient a pole přestává být homogenní. Nehomogenní pole je velmi často zdrojem nežádáných nestabilit v plasmatu ústících v další únik částic v podélném směru. Jak se experimentálně ukázalo, příliš mnoho částic z pastí uniká okraji s otevřenými siločárami a činí tak tento princip nedostatečný k dlouhodobému kvalitnímu udržení plasmatu.



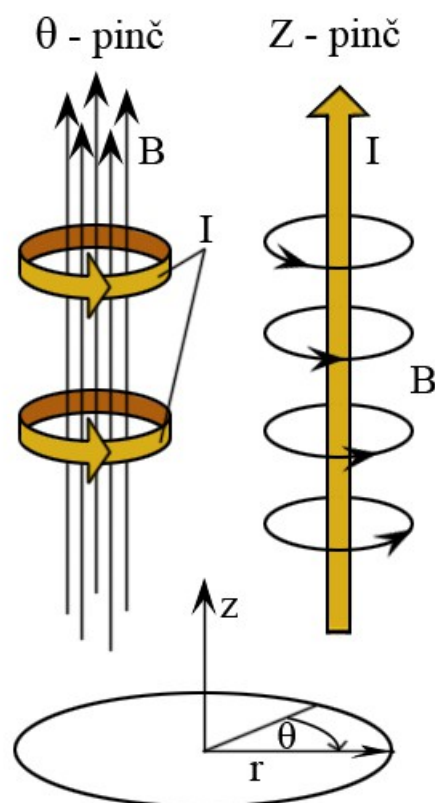
obr. 3.1: Průběh indukce pole  $B$  v řezu magnetickou pastí.



### 3.2 Pinče

Zařízení založené na tzv. pinč efektu: Jak známo elektrický proud indukuje ve svém okolí elektromagnetické pole. V případě pinče prochází proud přímo plasmatem. Proud při průchodu plasmatem generuje magnetické pole, které plasma stlačuje. Síla pole je přímo úměrná velikosti protékajícího proudu. Při vedení proudu hraje velkou roli značný elektrický odpor plasmatu, díky němuž je stlačované plasma zároveň ohříváno. Pro dosažení dostatečné teploty a síly magnetického pole se velikost indukovaného proudu musí pohybovat od  $10^5$  A výš.

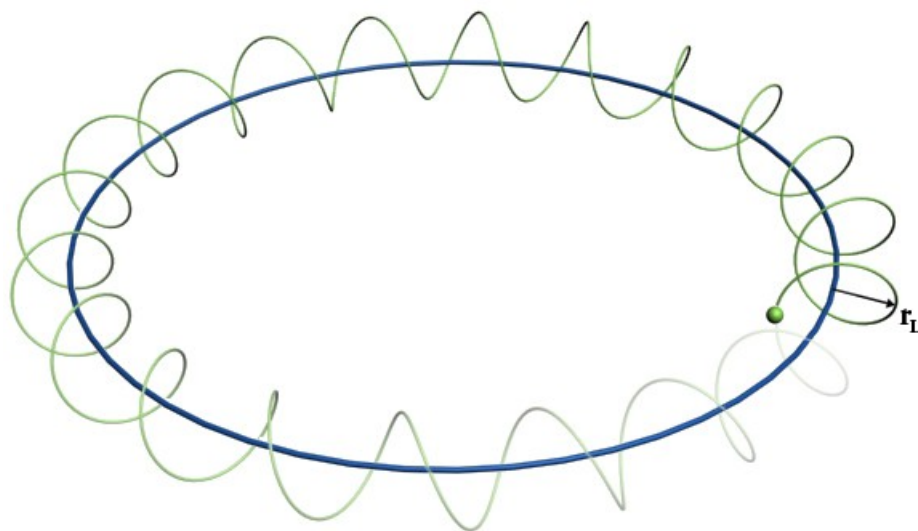
První pinče byly postavené na  $\theta$ -pinč principu. Název je odvozen od cylindrického systému souřadnic, kde souřadnice úhlu  $\theta$  značí směr tekoucího proudu. Podobně jako u magnetických zrcadel statické pole je vytvořeno vnějšími cívkami elektromagnetů. Proud v plasmatu představují nabitě částice rotující kolem indukčních čar pole vnějších cívek. Cyklotronní pohyb částic vytváří sekundární magnetické pole, jehož směr indukce je souběžný s osou z. Výsledné magnetické pole je kombinací obou zmíněných. Vytvořené magnetické pole je stabilní, samovolně se brání nestabilitám jako ohyb, stlačení či rozpínání návratem do původní stabilní podoby. Zároveň však vzdorováním ohybu zabraňuje uzavření indukčních čar.  $\theta$ -pinč je z principu otevřený systém a trpí tedy stejným problémem jako výše zmíněná magnetická zrcadla - vysokým únikem částic plasmatu otevřenými siločárami na koncích zařízení. Alternativou je z-pinč, kde proud teče souběžně s osou z a magnetická indukce naopak směřuje v radiálním směru po obvodu pomyslného válce cylindrické soustavy souřadnic. Tento systém je však mnohem více náchylný k nestabilitám. Zdokonalenou verzí z-pinčů jsou tokamaky.



obr. 3.2: Geometrie polí obou pinčů ( $\theta$  vlevo, Z vpravo) v cylindrické souřadnicové soustavě

### 3.3 Tokamak (Toroidálnaja kamera magnitnyje katuški)

Problematický únik částic skrze konce lineárních zařízení tokamak odstraňuje tím, že žádné otevřené konce nemá. Série cívek elektromagnetů rovnoměrně rozestavených do kruhu utvoří toroidální magnetické pole. Magnetické indukční čáry jsou uzavřené do kružnic, částice tak podél nich stáčí svou trajektorii a jsou uvězněné cyklickým pohybem uvnitř magnetické nádoby - toru.



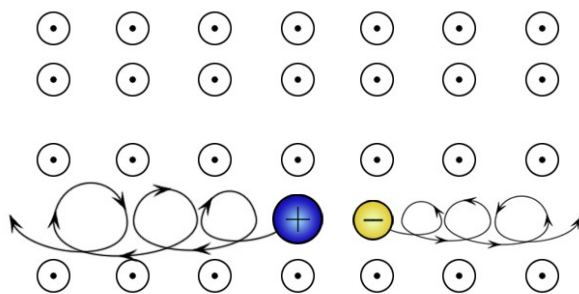
*obr. 3.3: Uzavření oběžové dráhy (zelená křivka) nabitě částice podél indukční čáry magnetického pole (modrá) uvnitř tokamaku. Poloměr rotace částice kolem magnetické siločáry  $r_L$  (Larmarův poloměr) závisí na velikosti magnetické indukce pole a energie částice, zatímco směr oběhu na polaritě náboje.*

Zaoblením pole do kruhu se projeví jeho nehomogenitou v radiálním směru. Na vnitřní straně toru jsou cívky blíže k sobě než na straně vnější, vznikne problematický gradient indukce, jemuž odpovídá různá hustota indukčních čar na vnitřním a vnějším poloměru.

Jedním následkem této nehomogenity v poli, je silnější tlak magnetického pole na plasma ze směru od vnitřního obvodu toru a slabší ze strany vnějšího. Plasma tak má tendenci se více rozpínat směrem od středu toru ven. Rozdílný magnetický tlak musí být vyrovnáván stabilizačními cívkami umístěnými po vnějším obvodu komory.

Druhým problematickým důsledkem zaoblení stacionárního magnetického pole je posun částic ve vertikálním směru. Při pohybu napříč magnetickým polem zakřivuje Lorenzova síla trajektorii nabitě částice - v případě homogenního pole bude Lorenzova síla konstantní a trajektorie částice bude mít podobu kružnice. Při pohybu v indukčním

gradientu je Lorenzova síla větší v oblasti vyšší indukce a menší v oblasti nižší, čímž se mění poloměr stáčení trajektorie částice a ta se v důsledku posouvá kolmo ke gradientu



indukce. Směr posunu je opačný pro opačné náboje, čímž vzniká také gradient elektrického náboje a napříč plasmatem se utvoří elektrické pole, které dále posiluje posun částic v horizontálním směru.

obr. 3.4: Vliv gradientu indukce na pohyb nabitých částic

Aby nedocházelo k úniku částic popsaným posunem mimo toroidální pole jsou

tokamaky vybaveny dalším magnetickým polem v poloidálním směru. Zakřivení tohoto sekundárního pole je navrženo tak, aby částice při oběhu po obvodu toru polovinu času směřovaly ven z druhou polovinu zpět dovnitř, čímž se celý posun eliminuje. Sekundární magnetické pole je v případě tokamaků tvořeno elektrickým proudem indukovaným přímo v plasmatu. Výhoda této metody je, podobně jako u pinčů, současné zahřívání plasmatu vlivem jeho odporu. Naopak velká nevýhoda je krátké trvání tohoto proudu. Proud v plasmatu se indukuje transformátorovým principem, kdy soustava cívek kolem toru tvoří primární vinutí transformátoru a samotné plasma vinutí sekundární. Nabíjením primárního vinutí se v plasmatu indukuje proud. Celý proces však končí nasycením obvodu, kdy proud plasmatem klesá k nule a následuje rozpuštění plasmatu výše popsaným jevem. K dalšímu výboji je třeba začít znovu a proces opakovat. Tokamak je tedy schopen pracovat pouze v pulsním režimu, což je asi největší překážka pro konstantní výrobu elektřiny. V současném výzkumu je věnována pozornost odstranění této nevýhody nahrazením způsobu indukce proudu v plasmatu. Jednou možností je přepólování transformátoru po nasycení jeho magnetického obvodu, nebo úplný odklon od transformátorového principu a generace proudu pomocí rádiových vln.

Energetická bilance tokamaku:  $E_\alpha + E_d = E_z$ :

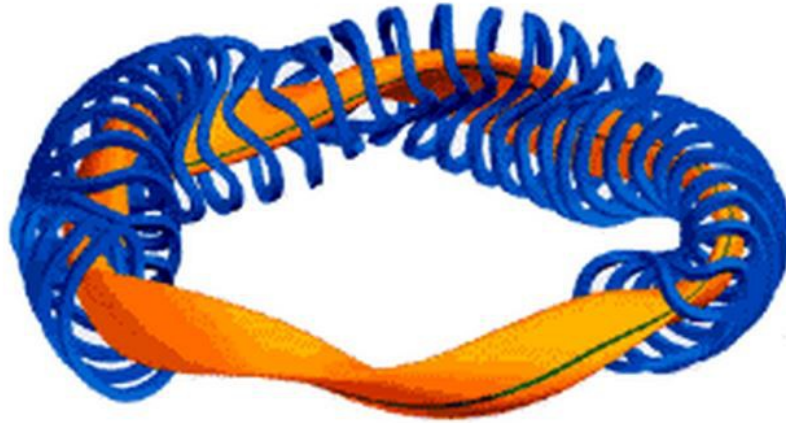
Fúzi vzniklá energie z procesu uniká v produktech reakce, kterými jsou v případě DT fúze (viz 2.16) alfa částice a neutron. Neutrony z reakce odnášejí větší podíl energie - 80%. Kvůli neutrálnímu náboji neutrony nejsou zachyceny magnetickým polem tokamaku, odnášejí tedy svou energii pryč z plasmatu a předávají ji kontaktem stěně komory, odkud je teplotnosným médiem odváděna na turbínu generátoru. To ovšem znamená, že tato energie není k dispozici pro ohřev plasmatu, o to se stará zbylých 20% -  $E_\alpha$  energie alfa částic.

Plasma ztrácí svou energii  $E_z$  mimo unikající neutrony dvěma hlavními způsoby: Nedokonalým magnetickým udržením - některé nabitě částice z plasmatu stejně unikají, a zářením. Ztrát záření je přítomno více: Bremsstrahlung záření spojené se změnou rychlosti elektronů při srážkách, synchrotronní záření v důsledku gyroskopického pohybu kolem magnetických siločar a záření v důsledku nečistot v plasmatu.

Energie získaná fúzí zatím není dostatečná k vyvážení ztrát. K udržení teploty plasmatu je tedy zapotřebí dodání energie z vnějšku -  $E_d$ .

### 3.4 Stelarátory

Stelarátory sdílí uzavřené magnetické pole tokamaků, v případě stelarátorů je však podoba vakuové komory a magnetického pole komplexnější. Na rozdíl od tokamaků neřeší stelarátory problém s horizontálním posunem částic proudem plasmatu, ale přímo geometrií komory a primárního pole, případně kombinací několika vnějších magnetických polí. Tímto také odpadá problém s pulsním režimem chodu. Problém stelarátoru je vysoká náročnost na přesný návrh a provedení. Jakékoli odchylky a nepřesnosti vždy vedly k nestabilitám v plasmatu a nemožnosti dosažení fúze. Vysoké technologické nároky na přesnost při konstrukci přispěly k zanechání vývoje této konfigurace. Obrození zažívají tato zařízení díky výkonným počítačům a softwaru, který je schopný složitých přesných výpočtů potřebných k jejich návrhu.



Obrázek 4<sup>[7]</sup>: Geometrie komory a stabilizačních cívek stellarátorů je značně složitá.

### 3.5 Inerciální udržení

Jedná se o přístup, který k tvorbě a udržení plasmatu nevyužívá magnetické pole, ale setrvačnost hmoty. Princip spočívá v rychlém dodání velkého množství energie malému objemu fúzního paliva. Palivo je obrovským přítokem energie stlačováno a ohříváno až do splnění energetických podmínek pro překonání Coulombovy bariéry, kdy v palivu začne docházet k fúzi. Obrovské množství energie nutné k dodání palivu tímto způsobem nelze trvale generovat, ale je uvolněno krátkými intenzivními impulsy. Pro kladnou energetickou bilanci musí fúzí uvolněná energie předčít energii dodanou dříve, než plasma vlivem vnitřního tlaku expanduje a vychladne. Důležité tedy je, aby fúze v palivu probíhala rychle a co nejdéle, než podmínky pro fúzi přestanou platit. Jelikož jsou pulsy krátké ( $10^{-9}$  s [18]), doba udržení  $\tau_E$  (3.4) je skrze intenzitu impulsů kompenzována značnou hustotou. Na rozdíl od magnetického udržení, kde omezující faktor - síla elektromagnetů umožňuje udržet plasma s hustotou částic  $10^{21}$   $m^{-3}$ , je při inerciálním udržení palivo stlačeno na hustotu  $10^{32}$  částic na  $m^3$  [19]. Výkon je do paliva dopraven laserovými paprsky, nebo svazky elektronů, či iontů, popřípadě rentgenovým zářením při nepřímém způsobu ohřevu. Rozměry palivové pelety se odvíjí od velikosti na ni dopravitelného výkonu. V souladu se současnými technologickými možnostmi mají pelety velikost několika milimetrů. Z důvodu co nejsymetričtějšího rozložení ohřívacího výkonu je palivová peleta ohřívána několika desítkami až stovkami energetických paprsků rovnoměrně ze všech stran.

Pod vysokým energetickým náporem vnější vrstva pelety nejprve ionizuje a následně se zcela odpaří. Kromě ven směřujícího oblaku částic materiálu vyvolá rychlá ablace vnější vrstvy hlavně do centra se šířící silnou tlakovou vlnu. Tlaková vlna rezonuje s dalšími, po ní příchozími a společně stlačují palivo až dojde v jeho centru k zažehnutí fúze. Energie z probíhající fúze palivo dále zahřívá a množství syntetizujících částic rychle narůstá až do okamžiku explozivního rozpadu plasmatu. Klíčová je symetrie ohřevu, i malé odchylky způsobí nerovnoměrnou deformaci palivové pelety, která znemožní dosažení fúzní teploty.

Vhodnými kandidáty inerciálního udržení jsou intenzivní zdroje energie jako jsou lasery. U laserů záleží na frekvenci. Lasery nižších frekvencí produkují vysoce energetické elektrony v palivu, které palivo v centru ohřívají ještě než k němu dorazí tlaková vlna. Palivo se tím předčasně rozpíná, vzniká v něm tlak působící proti příchozí ablační tlakové vlně a nedojde k jeho efektivnímu stlačení. Z tohoto důvodu se hledají alternativy s vyšší frekvencí. Další možností je náhrada laserového paprsku svazkem iontů, které předávají elektronům paliva mnohem méně energie.

Problém technicky těžko realizovatelné symetrie dopadajících paprsků částečně řeší metoda nepřímého zapalování. Palivová peleta je umístěna do kontejneru z kovu s vysokým protonovým číslem s otvory pro příchozí paprsky. Vnější lasery namísto přímo do pelety paliva soustředí svůj výkon na tento kontejner kde se mění v rentgenové záření, které poté samo rovnoměrně peletu s palivem stlačuje.

### 3.6 Neřízená fúze

Není-li cílem produkce energie pro její zužitkování při výrobě elektřiny stačí přimět palivo k fúzi, přičemž následná fúzní reakce není nijak řízena a vyprodukovaná energie se neodvádí. Díky tomu, že se reakce nemusí řídit je dosažení fúze tímto způsobem relativně jednoduché, což bylo experimentálně dokázáno v raném stádiu fúzního výzkumu odpálením nálože Ivy Mike v listopadu 1952. Neřízená fúze má velké reálné využití ve zbrojním průmyslu v podobě termojaderných zbraní. Ke spuštění fúzní reakce je použito detonace jaderné nálože - termojaderná zbraně jsou principiálně více stupňové. Teller-Ulam je nejčastějším návrhem, sestává ze dvou (nebo více) náloží, jedné jaderné a zbytku fúzním. Nejprve je zažehnuta řetězová štěpná reakce. V rané fázi jaderného výbuchu je přes 80% energie v podobě měkkého rentgenového záření [20]. Rentgenové záření se šíří mnohem rychleji, než se štěpící se jaderné palivo rozpíná a jsou tak dosáhnou rentgenové paprsky fúzní nálože před vlnou rozpínající se prvotní jaderné nálože. Fúzní palivo má podobu dutého válce, nebo koule. Prostředek je vyplněn plutoniem a celý válec je obalený uranem. Zapalovací proces je podobný výše popsanému nepřímému zapálení. Vnější slupka uranu je rentgenovými paprsky rovnoměrně ohřáta a odpaří se. Rychlé odpaření uranu vytvoří obrovský tlak na vnitřní válec fúzního paliva, které se v důsledku začne smršťovat a zároveň stlačuje plutonium ve svém středu. Jakmile plutonium dosáhne kritického stavu rozběhne se v něm řetězová štěpná reakce a poskytne tak dodatečný tlak na válec fúzního paliva zevnitř. Kombinací vnitřního a vnějšího tlaku je fúzní palivo zahřáto dostatečně k zažehnutí fúze, kterou dále se zvyšující teplota urychluje až do vyhasnutí rychlou expanzí. Celý fúzní proces od zažehnutí po skončení trvá zhruba 30 ns při produkci 10-20 megatun [21] TNT  $\sim 2,5-5 \cdot 10^{35}$  eV. K dosažení silnější exploze se přidávají další stádia, kdy exploze sekundární (fúzní) nálože zažehne další terciární nálož. Nejsilnější otestovaná zbraň - Sovětská Tsar bomba měla tři stádia o celkové síle 50 megatun TNT.



Obr. 12: Řez termojadernou zbraní typu Teller-Ulam.[21]

# 4

## Popis současných projektů

### 4.1 JET: Joint European Torus

Od roku 1970 uvažovala Rada Evropské unie o větší investici do výstavby velkého zařízení a rozvoje výzkumu jaderné fúze. Výsledkem jednání bylo roku 1973 započítí návrhu největšího tokamaku na světě. Projekt navržený ke studiu plasmatu v podmínkách blízkých kladné produkci energie byl umístěn do vědeckého Centra pro Fúzní Energii v Culham ve Velké Británii. Do provozu byl uveden v roce 1983 a 25. června téhož roku v něm bylo dosaženo prvního plasmu.



obr. 4.1: Umístění JET



obr. 4.2: Časová osa JET [22]

Mezi největší úspěchy projektu JET patří rok 1991, kdy JET jako první vyprodukoval fúzní energii. Stalo se tak 9.11. Jako první také využil Deuterium-Tritiové reakce a v současné době je jediným funkčním zařízením schopným tyto reakce ve velké míře realizovat. V roce 1997 bylo z jednoho fúzního výboje vyprodukováno 22 MJ energie za špičkového výkonu 16 MW, čímž dosáhl energetického zisku  $Q = 0,65$ .



Technická specifikace [23]:

Rozměry komory:	2,96 m x 2,1 m x 1,25 m
Objem	200 m <sup>3</sup>
Proud v plasmatu	5-7 MA
Maximální délka impulsu	60 s
Síla magnetického pole	3,5 T
Maximální tlak plasmatu	2x10 <sup>-8</sup> Pa

Vnitřní stěny tokamaku namáhané plasmatem jsou z berylia. , vysoce tepelně namáhaný narážejícími ionty z nízkoenergetického okraje plasmatu je vystlán wolframovými pláty chlazenými vysokotlakou vodou.

V současné době se JET věnuje výzkumu pro budoucí provoz ITERu.

#### 4.2 Tore Supra

Největší francouzský tokamak s kruhovým průřezem komory se nachází ve výzkumném středisku Cadarache. V provozu je od roku 1988. Tore Supra využívá k indukci toroidálního magnetického pole supravodivé cívky, čímž dosahuje velmi silného a trvalého pole. Díky tomu je schopno udržet výboj v plasmatu dlouhou dobu. Hlavní limitující faktor na rozdíl od ostatních velkých tokamaků je pouze poloidální magnetické



obr. 4.3: Umístění Tore Supra

pole vyvolané elektrickým proudem v plasmatu. Díky supravodivým magnetům se délka výbojů pohybuje řádově v jednotkách minut s rekordem 6,5 minuty ze 4.12.2003. Zároveň za celou dobu tohoto experimentu bylo z plasmatu odebráno rekordní 1,1 GJ energie.

Pod vidinou prodloužení výbojů a ideálně jejich úplného odstranění a přechod do stálého chodu se kromě supravodivých magnetů Tore Supra specializovalo na studium ohřevu radiovými vlnami a odvod energie a částic z oblaku plasmatu.

Pomocí interakce radiových elektromagnetických vln s částicemi plazmatu lze vhodnou volbou frekvence generovat elektrický proud v plazmatu, čímž by odpadlo indukování poloidálního magnetického pole pomocí proudu z transformátorového efektu.

Podobně jako JET se Tore Supra v současné době věnuje výzkumu pro výstavbu ITERu. V roce 2013 byla pod programem WEST zahájena přestavba Tore Supra z původně limiterového tokamaku kruhového průřezu na D-průřez s wolframovým divertorem za účelem otestování této konfigurace pro ITER.



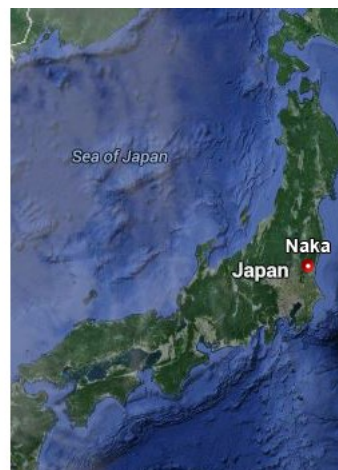
obr. 4.4: Časová osa Tore Supra [24]

Technická specifikace[25] :

Rozměry komory:	2,25 m x 0,7 m
Proud v plazmatu	1,7 MA
Maximální délka impulsu	390 s
Síla magnetického pole	4,5 T

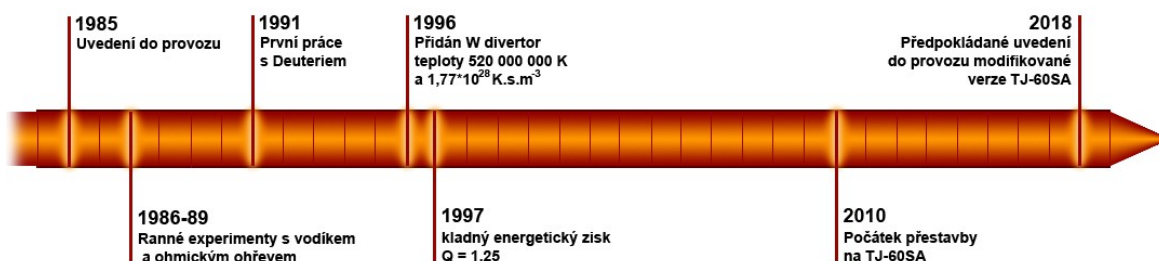
### 4.3 JT-60

Největší japonský tokamak se nachází ve městě Naka, v provozu je od roku 1988. V raných letech svého provozu na něm byly prováděny pouze experimenty s vodíkem. 1991 bylo zařízení uzpůsobeno práci s Deuteriem a v následných experimentech se roku 1996 podařilo dosáhnout teplot iontů Deuteria  $5,2 \cdot 10^8$  K s odpovídajícím (Lawsonovým) trojným součinem  $1,77 \cdot 10^{28}$  K·s·m<sup>3</sup>. O rok později dosáhli japonští vědci na tomto zařízení kladného energetického zisku s  $Q = 1,25$ .



obr 4.5: Umístění JT-60

Od devadesátých let se výzkum na JT-60 věnoval projektu ITER. Od roku 2010 je tokamak dočasně odstaven a přestavuje se na modernější výkonnější verzi JT-60SA (Super Advanced). Nový tokamak bude mít více než dvojnásobný objem, kompletně supravodivé cívky a pokročilý diagnostický systém a systém dodatečného ohřevu. Do provozu by měl být JT-60SA opět uveden po roce 2018. Bude se jednat o satelitní zařízení pro paralelní funkci a úzkou spolupráci s projektem ITER.



obr. 4.6: Časové osa JT-60 [26]

Technická specifikace:

Rozměry komory:	3,4 m x 1 m
Objem	90 m <sup>3</sup>
Proud v plasmatu	3 MA
Maximální délka impulsu	65 s
Síla magnetického pole	4 T

#### 4.4 W7-X

V německém Greifswaldu dokončují výstavbu supermoderního stelarátoru. Přestavba zastaralého stelarátoru 7-AS bude dokončena v příštím roce. W7-X bude vybaven supravodivým magnetickým vinutím celkově o 70 cívkách. Bude sloužit k zdokonalení stelarátorového typu reaktorů. Není na něm plánováno dosažení termojaderných reakcí, ale bude schopný udržet plasma po dobu 30 minut.



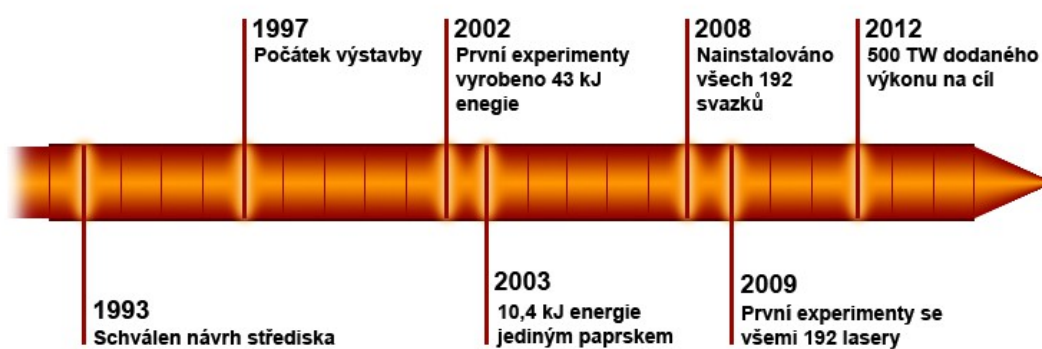
*obr. 4.7: Umístění W7-X*

## 4.5 NIF

National Ignition Facility je významným výzkumným střediskem v oblasti inerciálního udržení. Jedná se o největší středisko svého druhu a zároveň disponuje nejsilnějším a největším laserem na světě - tvoří jej 192 neodymových svazků. Účel střediska je dosažení fúze s vysokým energetickým ziskem pro vývoj jak fúze v plasmatu, tak i vojenských aplikací včetně termojaderných zbraní.



obr. 4.8: Umístění NIF



obr. 4.9: Časová osa NIF [28]

Technická specifikace[28]:

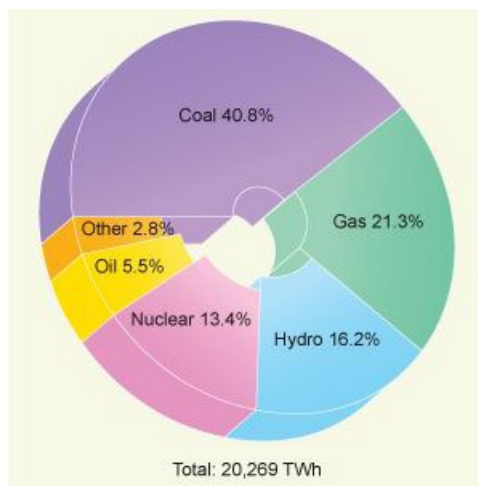
Celková energie laseru	4,2 MJ
Vrcholový výkon	$5 \cdot 10^{14}$ W
Průměr komory	10 m
Průměr kontejneru paliva	2 mm
Doba pulsů	20 ns



## 5

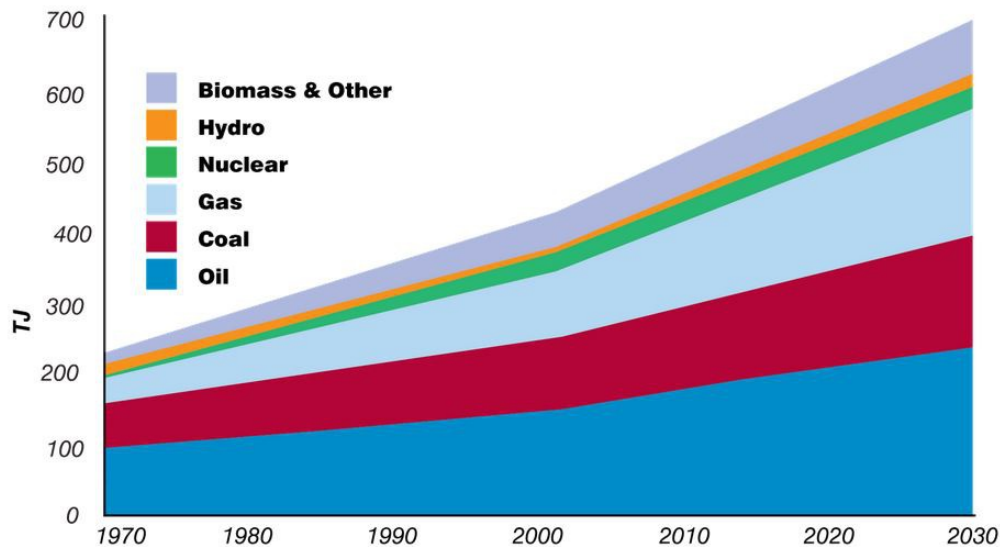
### Porovnání fúzních reaktorů s ostatními typy energetických zdrojů.

Světová produkce elektrické energie spadá do tří kategorií podle zdroje: fosilní, jaderné a sluneční záření. Jádro je jedním z mála zdrojů nevycházejících z energie slunce. Fosilní paliva představují organicky nahromaděnou sluneční energii v průběhu milionů let existence Země, zatímco přímé využití slunečního záření využívá většina obnovitelných metod. Fosilní paliva jsou dobře dostupná a jednoduše zpracovatelná, díky tomu tvoří páteř jak světové, tak české výroby elektřiny. Nesou sebou mnohé nevýhody, především negativní vliv na životní prostředí.



Světová poptávka po elektrické energii od dob jejího objevení neustále roste v souvislosti s rostoucí populací a zvyšující se životní úrovní a nepředpokládá se v blízké době obrat tohoto trendu. Problémy fosilních paliv již nelze ignorovat a tak je kladen důraz na alternativní způsoby výroby elektřiny, které by pokryly aslespoň zvyšující se poptávku. Dále je výrobní park založený na zpracování fosilních paliv v mnoha zemích již značně zastaralý a vzhledem k emisním regulacím a snižujícím se zásobám je otázka do jaké míry investovat do jeho obnovy a jak moc se snažit o náhradu alternativními zdroji. Termojaderná fúze ještě není na dostatečné úrovni k produkci elektřiny, natož pak konkurence schopného využití. Do budoucna má však slibné vyhlídky. Další možností náhrady fosilních paliv je využití jaderného štěpení, nebo v současné době propagované hlavně v evropské unii využití obnovitelných zdrojů. Všechny přístupy mají svá úskalí.

Obr.5.1[29]:Podíl jednotlivých zdrojů na světové výrobě elektřiny v roce 2008



obr. 5.2 [29]: Fosilní paliva jsou základem rapidně rostoucí produkce elektrické energie ve světě.

## 5.1 Uhlí

Největší podíl na výrobě elektřiny má uhlí, jak v oblasti fosilního paliva tak i celkově. Velká výhoda uhlí je jeho dostupnost a množství. Doposud bylo prokazatelně objeveno, 860 miliard tun nevytěženého uhlí [30]. Uhlí se nachází prakticky po celém světě, jeho dostupnost není omezena geopolitickými vztahy. Při současné míře těžby, která činí 6200 milionů tun černého a 1050 milionů tun hnědého uhlí [30] vystačí tyto zásoby zhruba na 110 let. Stálá dostupnost uhlí umožňuje nepřetržitý provoz elektráren a pokrytí základního zatížení. Technologie spalování uhlí je dlouho známa a za dobu své existence byla dobře vyřešena a rozvinuta, což z ní dělá technologii velmi levnou na výrobu a provoz. Maximální celková účinnost přeměny tepelné energie na elektrickou při spalování uhlí je 35-40% [31]. Největším negativem uhelného paliva je ekologie a dopad na životní prostředí. Výsledkem spalování uhlí je kromě uvolněné energie oxid uhličitý  $\text{CO}_2$ , který hraje velkou roli jako skleníkový plyn v globálním oteplování. V závislosti na kvalitě uhlí se při spalování často uvolňují i jiné zdraví škodlivé látky jako oxidy síry dusíku nebo rtuť. I když mohou být nečistoty v uhlí jen stopové, při obrovském množství jeho spalování se v ovzduší prokazatelně projeví.



## 5.2 Zemní plyn

Druhý největší podíl fosilních paliv má zemní plyn. Hlavní složkou zemního plynu je metan  $\text{CH}_4$ , zastávající podle čistoty 70-90% objemu. Zbytek tvoří ethan, propan, butan ~ 8-20%, oxid uhličitý cca 1% a ostatní stopové prvky. V České republice nemá výroba elektřiny spalováním zemního plynu velký podíl, něco přes 6% (2012) [17]. V Evropské unii a zbytku světa se na výrobě podílí zhruba 20%. Zemního plynu je ve světě prokazatelně k dispozici 187 bilionů  $\text{m}^3$  [32]. Spotřeba plynu rapidně stoupá a objevené zásoby podle odhadů vydrží zhruba 50 let [33]. Strategicky není zemní plyn tak dostupný jako uhlí. Dvě pětiny zemního plynu se nachází na blízkém východě a jednu čtvrtinu světových zásob kontroluje Rusko. Pominu-li politický vliv je lokalizace zásob problematická ještě z přepravních důvodů, kdy je třeba budovat potrubní plynovod, případně přepravovat v nádobách pod vysokým tlakem. Oproti uhlí je spalování metanu mnohem čistší s menším, ačkoli stále vysokým množstvím vypuštěných emisí  $\text{CO}_2$ . Další výhodou oproti uhlí je účinnost spalování plynu, která při kombinaci cyklů opětovného ohřívání páry může dosáhnout 50-60% [34]. Významnou komoditou je břidlicový plyn, jehož spotřeba se v poslední době zvyšuje.

## 5.3 Ropa

Poslední velkou složkou fosilních paliv je ropa. Ropa slouží jako výborný zdroj energie, k výrobě elektřiny se jí však použije minimum - celosvětový průměr 5% zvedají arabské státy, kde má přímé spalování ropy na výrobě elektřiny značný podíl. U nás se ropa k výrobě elektřiny téměř nepoužívá. Pouze jako záložní zdroj elektrické energie pro případ odstavení stabilní elektrárny.

## 5.4 Jádro

Elektrická energie získaná jaderným štěpením zastává 13% světové produkce. Jaderná elektrárna je technologicky složitá a drahá záležitost, v provozu je jich něco přes 400 v 32 zemích světa [35]. Jaderné elektrárny se zpravidla kvůli své ceně a době výstavby budují pro velké výkony a nepřetržitý provoz. Podobně jako uhelné elektrárny slouží k pokrytí základního zatížení, především proto, že odstavení jaderného a

opětovné spuštění reaktoru je ztrátové a je záležitostí několika jednotek až desítek hodin. Největší výhody jaderného štěpení je energetická využitelnost paliva, která milionkrát předčí fosilní paliva (viz druhá kapitola) a dále jeho minimální dopad na životní prostředí. Jaderné štěpení neprodukuje žádné emise CO<sub>2</sub> ani jiné skleníkové plyny. Problém je s vyhořelým palivem, které v nejhorších případech zůstává radioaktivní tisíce let a je třeba jej permanentně uskladnit. Vzhledem k vysokému poměru získané energie na objem paliva však jaderného odpadu nevzniká velké množství (oproti emisnímu odpadu fosilních paliv). Největším problémem jaderných elektráren je jejich špatný obraz v povědomí veřejnosti. Na negativním veřejném mínění se podílí několik faktorů, především několi havárií jaderných reaktorů v minulosti, které ovšem vedly k obrovskému zdokonalení bezpečnosti těchto zařízení. Další kontroverze vyvolávajícím faktorem je zmíněný jaderný odpad a spojitost s jadernými zbraněmi. Znamé zásoby uranu vystačí na několik set let. Současný výzkum se zabývá "breeder" technologií, která by teoreticky prodloužila zásoby paliva na tisíce let.

## **5.5 Vodní elektrárny**

Výroba elektřiny pomocí energie vody je velmi závislá na geografických podmínkách. Obecně jednoznačně převažují výhody a tak jsou-li vhodné podmínky využívá se vodní energie co nejvíce. Příkladem budiž Norsko, kde v roce 2012 činila výroba elektřiny z vodních elektráren 96,7% [36]. V české republice jsou již možnosti využití hlavních vodních toků téměř vyčerpány. Vodní elektrárny se u nás podílí na výrobě elektřiny zhruba 11% [37]. Velké průtočné elektrárny pokrývají základní zatížení, menší a přečerpávací se díky prakticky okamžitému rozběhu uvádějí do provozu k vyrovnání špičkového zatížení. Atraktivní na vodní energii jsou nízké náklady: jednorázová investice na vybudování a téměř nulová náklady na provoz. Palivo je v případě stálých klimatických podmínek nevyčerpatelné a zdarma. Elektrárna neprodukuje žádné emise a operuje s vysokou účinností. Hlavní nevýhodou hydroelektrické energie je limitace na vodními toky, lze ji tedy získávat jen v určité maximální míře. Vodní elektrárna nemá vliv na životní prostředí vylučováním emisí, ale v případě kombinace s přehradou může výrazně zasáhnout do přirozeného prostředí zaplavením velké jinak využitelné půdní plochy.

## 5.6 Větrné elektrárny

Podobně jako voda je vítr čistým obnovitelným zdrojem energie. Využití větrné energie není nikterak masivní a pohybuje se řádově v jednotkách procent. Větrná energie je bezemisní, nevyčerpatelná metoda, není využívána ve velké míře především kvůli nepravidelnému, těžce předvídatelnému a nárazovému přísunu energie. Energie z větrných elektráren se ve velké míře špatně přizpůsobuje diagramu zatížení sítě. Další nevýhodou této metody, je relativně nízká intenzita energie ukrytá v pohybu molekul vzduchu. K produkci většího množství elektřiny je zapotřebí velká půdní plocha. K produkci 2 GW energie by bylo zapotřebí zhruba 1000 větrných turbín, což odpovídá záběru 1000 km<sup>2</sup> půdy. Při výrobě elektřiny produkují turbíny značný hluk a kvůli svým rozměrům (většinou negativně) esteticky ovlivňují krajinu.

## 5.7 Solární elektrárny

Fotovoltaika se v posledních letech v české republice, ale i v celé evropské unii těší obrovskému vzestupu. Za posledních 12 let u nás vzrostl poměr využití sluneční energi prakticky z nuly na 12% [38]. Solární energie sdílí podobné vlastnosti s větrnou: Je to čistá bezemisní produkce elektřiny, ovšem s nárazovým dodávaným výkonem. Fotovoltaické panely jsou značně cenově i technologicky náročné na výrobu. I když jejich vývoj udělal značné pokroky v posledních letech, stále nedosahují vysoké účinnosti ani životnosti.

## 5.8 Fúzní energie

Fúze má nepřehládnutelné výhody, kvůli který se do jejího vývoje investoval nespočet finančních prostředků a času. Vývoje ještě není zdaleka u konce, neexistuje ještě ani prototyp funkční fúzní elektrárny, avšak s projektem ITER na cestě je otázka zhruba 20-30 let, než bude funkční prototyp navržen. Vývoj fúze ještě spotřebuje značné množství prostředků, než budeme moci pocítit výhody fúzní energie. Její výhody jsou ale natolik lákavé, že se dle mého názoru do fúzní nergie investovat stále vyplatí. Možná že teď, když už je vysněná fúze téměř na dosah, vyplatí se vyhradit prostředky na dokončení tohoto posledního kroku více než kdy předtím.

## Některé použité symboly:

c	rychlost světla ve vakuu, $c = 299\,792\,458\text{ ms}^{-1}$ [39]
e	elementární náboj, $e = 1,602\,176\,565 \cdot 10^{-19}\text{ C}$ [40]
$\epsilon_0$	permittivita vakua, $\epsilon_0 = (4\pi \cdot 10^{-7}\text{ c}^2)^{-1} = 8,854 \cdot 10^{-12}\text{ F/m}$ [41]
k	Coulombova konstanta, $k = (4\pi\epsilon_0)^{-1} = 8,988 \cdot 10^9\text{ m/F}$ [42]
eV	elektronvolt, jednotka energie $1\text{ eV} = 1,602\,176\,565 \cdot 10^{-19}\text{ J}$
u	(unifikovaná) atomová hmotnostní jednotka, je definována jako dvanáctina klidové hmotnosti nevázaného atomu uhlíku $C_{12}^6$ $1\text{ u} = 1,660\,538\,921 \cdot 10^{-27}\text{ kg}$ [43]
$e, e^-$	elektron - elementární částice se záporným elementárním nábojem
$e^+$	pozitron - elementární částice s kladným elementárním nábojem
$p, p^+$	proton/vodíkové jádro
n	neutron
$\alpha$	alfa částice sestávající ze dvou protonů a dvou neutronů bez elektronového obalu
D	deuteron - jádro těžkého vodíku, deuterium bez elektronového obalu, sestávající z jednoho protonu a jednoho neutronu
T	triton - tritium bez elektronového obalu, sestávající z jednoho protonu a dvou neutronů
d	deuterium - stabilní izotop vodíku $H^2$ (= těžký vodík)
t	tritium - nestabilní izotop vodíku
$m_n$	klidová hmotnost neutronu, $m_n = 1,674\,927\,351 \cdot 10^{-27}\text{ kg}$ [4.2] = 1,008 664 916 u
$m_p$	klidová hmotnost protonu, $m_p = 1,672\,621\,777 \cdot 10^{-27}\text{ kg}$ [4.3] = 1,007 276 467 u
$m_D$	hmotnost deuteronu, $m_D = 3,343\,583\,48 \cdot 10^{-27}\text{ kg}$ [4.4]
$m_T$	hmotnost tritonu, $m_T = 5,007\,356\,30 \cdot 10^{-27}\text{ kg}$ [4.4]
$m_\alpha$	hmotnost alfa částice, $m_\alpha = 6,644\,656\,75 \cdot 10^{-27}\text{ kg}$ [4.4]
$m_U$	hmotnost atomu Uranu izotopu $U^{235}$
$m_{Kr}$	hmotnost atomu Kryptonuranu izotopu $Kr^{92}$
$m_{Ba}$	hmotnost atomu Baria izotopu $Ba^{141}$
A	hmotnostní/nukleonové číslo
Z	protonové číslo

Q energetický zisk/poměr dodané vyprodukované energie

### Seznam použité literatury:

- [1] M.L.E. Oliphant, P. Harteck and Lord Rutherford - Transmutation effects Observed with Heavy Hydrogen, vol. 144 (1934), strana. 692
- [2] <http://etherwave.wordpress.com/2009/05/28/hump-day-history-project-matterhorn-and-early-fusion-research/>
- [3] Charles Seife: Sun in a Bottle: The Strange History of Fusion and the Science of Wishful thinking
- [4] [http://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?jrnlid=ufn&wshow=contents&option\\_lang=eng&viewarchiveID=8&vl=173](http://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?jrnlid=ufn&wshow=contents&option_lang=eng&viewarchiveID=8&vl=173)
- [5] J.D. Lawson - Some Criteria for a Useful Thermonuclear Reactor, A.E.R.E. report GP/R 1807
- [6] N. G. Basov, O. N. Krokhin, - Conditions of Plasma Heating by Optical Generator Radiation
- [7] J. Nuckols, L. Wood, A. Thiessen, - Laser Compression of Matter to Super High Densities: Thermo nuclear Applications
- [8] Řípa, Mlynář, Weinzettl, Žáček - Řízená termojaderná fúze pro každého Giora Shaviv  
Giora Shaviv - The Synthesis of the Elements: The Astrophysical Quest for Nucleosynthesis and What It Can Tell Us About the Universe  
50 years of fusion research, Dale Meade Fusion Innovation Research and Energy, Princeton University, USA
- [9] IUPAC, Compendium of Chemical Terminology, 2nd ed. (the "Gold Book")
- [10] <http://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C74828&Units=SI&Mask=1#Thermo-Gas>
- [11]. wikipedia: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Jadern%C3%A1\\_reakce](http://cs.wikipedia.org/wiki/Jadern%C3%A1_reakce)
- [12] <http://burro.astr.cwru.edu/Academics/Astr221/StarPhys/coulomb.html>
- [13] NIST, Fundamental Physical Constants: [http://physics.nist.gov/cuu/Value?mn\\_search\\_for=deuteron+mass](http://physics.nist.gov/cuu/Value?mn_search_for=deuteron+mass)
- [14]: [http://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?tukg|search\\_for=unifiedsearch\\_for](http://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?tukg|search_for=unifiedsearch_for)
- [15]: [http://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?mal|search\\_for=alpha](http://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?mal|search_for=alpha)  
5. M. P. Fewell, American Journal of Physics, Volume 63, Issue 7, pp. 653-658 (1995).  
<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/814-jaderna-fuze>  
<http://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika3.htm>  
Plasma Physics and Fusion Energy - Jeffrey Freidberg  
Principles of Fusion Energy - Harms, Schoepf, Meley, Kingdon  
[http://physics.nist.gov/cgi-bin/Compositions/stand\\_alone.pl](http://physics.nist.gov/cgi-bin/Compositions/stand_alone.pl)  
<http://physics.nist.gov/PhysRefData/Elements/index.html>
- [16] Principles of Fusion Energy - Harms, Schoepf, Miley, Kingdon: Lawson Criterion - strana 132
- [17] <http://www.wolframalpha.com/input/?i=rhenium+boiling+point>

- [18], [19] Harms, Schoepf, Miley, Kingdon - Principles of Fusion Energy
- [20] <http://nuclearweaponarchive.org/Library/Teller.html>
- [21] <http://nuclearweaponarchive.org/Usa/Tests/Ivy.html>
- [22] <http://www.efda.org/jet/history-anniversaries/>
- [23] <http://www.efda.org/jet/jet%E2%80%99s-main-features/jets-specifications/>
- [24] <http://www-fusion-magnetique.cea.fr/gb/>
- [25] [http://www-fusion-magnetique.cea.fr/gb/cea/ts/description/ts\\_description02.htm](http://www-fusion-magnetique.cea.fr/gb/cea/ts/description/ts_description02.htm)
- [26] <http://www-jt60.naka.jaea.go.jp/english/jt60/project/html/history.html>
- [27] <http://www-jt60.naka.jaea.go.jp/english/jt60/mecha/html/mecha11.html>
- [28] [https://lasers.llnl.gov/content/assets/docs/news//pk\\_nif\\_at\\_a\\_glance.pdf](https://lasers.llnl.gov/content/assets/docs/news//pk_nif_at_a_glance.pdf)
- [29] <http://www.world-nuclear.org/info/Energy-and-Environment/Uranium,-Electricity-and-Climate-Change/>
- [30] <http://www.worldcoal.org/coal/coal-mining/>
- [31] Freidberg - Plasma Physics and Fusion energy, strana 7
- [32] <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/rankorder/2253rank.html>
- [33] <http://www.bp.com/en/global/corporate/about-bp/energy-economics/statistical-review-of-world-energy-2013/review-by-energy-type/natural-gas/natural-gas-reserves.html>
- [34] Plasma Physics and Fusion energy - Freidberg, strana 8
- [35] <http://www.cez.cz/edee/content/file/pro-media-2013/12-prosinec/energy-outlook-2013.pdf>
- [36] <http://www.nve.no/Global/Energi/Analyser/Energi%20i%20Norge>
- [37] <http://www.cez.cz/edee/content/file/pro-media-2013/12-prosinec/energy-outlook-2013.pdf>
- [38] <http://www.cez.cz/edee/content/file/pro-media-2013/12-prosinec/energy-outlook-2013.pdf>
- [39] [http://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?c|search\\_for=light+speed](http://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?c|search_for=light+speed)
- [40] [http://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?e|search\\_for=elementary+charge](http://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?e|search_for=elementary+charge)
- [41] Teorie elektromagnetického pole I - Doc. Ing. Karel Novotný CSc.
- [42] <http://www.wolframalpha.com/input/?i=coulomb+constant>
- [43] NIST - [http://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?c|search\\_for=c](http://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?c|search_for=c)