

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
Fakulta elektrotechnická  
Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd



**Problémy řízené termonukleární fúze**  
**Problems of controlled thermonuclear fusion**

Bakalářská práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management  
Studijní obor: Elektrotechnika a management  
Vedoucí práce: prof. RNDr. Pavel Kubeš, CSc.

**Pavla Bednářová**

Praha, 2019



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Bednářová** Jméno: **Pavla** Osobní číslo: **465882**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávací katedra/ústav: **Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd**  
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**  
Studijní obor: **Elektrotechnika a management**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Problémy řízené termonukleární fúze**

Název bakalářské práce anglicky:

**Problems of controlled thermonuclear fusion**

Pokyny pro vypracování:

1. Student se seznámí s fyzikálními principy termonukleární fúze, tokamaků, Z-pinčů a laserových aparatur.
2. Rešerše historie i současného stavu výzkumu termonukleární fúze ve světě, v ČR a na katedře fyziky FEL ČVUT.
3. Popis současných problémů laserové, tokamakové a pinčové koncepce termonukleární fúze.
4. Ekonomické zhodnocení plánované fúzní elektrárny.

Seznam doporučené literatury:

MCCRACKEN, Garry M a Peter E STOTT. Fusion: the energy of the universe. Amsterdam: Elsevier Academic Press, c2005. Complementary science series. ISBN 0-12-481851-X.  
KIKUCHI, Mitsuru; LACKNER, Karl; TRAN, Minh Quang. Fusion physics. Vienna: IAEA, 2012. ISBN 978-92-0-130410-0

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**prof. RNDr. Pavel Kubeš, CSc., katedra fyziky FEL**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **11.02.2019** Termín odevzdání bakalářské práce: **24.05.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: **20.09.2020**

prof. RNDr. Pavel Kubeš, CSc.  
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Studentka bere na vědomí, že je povinna vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studentky





## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracovala samostatně a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne .....

.....  
Pavla Bednářová

## **Poděkování**

V první řadě bych chtěla poděkovat vedoucímu své bakalářské práce prof. RNDr. Pavlovi Kubešovi, CSc. za odborné vedení a cenné rady při zpracovávání této práce.

Dále bych chtěla poděkovat doc. Ing. Jiřímu Vašíčkovi, CSc. za vstřícné konzultace ohledně ekonomické části této bakalářské práce.

Mé poděkování patří také celé Skupině silnoproudých výbojů z Katedry fyziky FEL ČVUT za uvedení do problematiky fyziky plazmatu.

## Abstrakt

Tato práce se věnuje problematice řízené termonukleární fúze, která je velmi perspektivním zdrojem elektrické energie. V teoretické části jsou nejprve vyloženy základní fyzikální principy termonukleární fúze. Následně jsou vysvětleny 3 hlavní přístupy k řízené termojaderné fúzi, jmenovitě magnetické, inerciální a magneto-inerciální udržení plazmatu, a funkce zařízení pracujících na těchto principech. Dále tato práce podává rešerši historie a současného stavu fúzního výzkumu. Poté jsou identifikovány stěžejní problémy jednotlivých fúzních aparatur, které v současnosti brání využití fúze v energetice. V závěru teoretické části je naznačen vývoj fúzního výzkumu do budoucna včetně koncepcí fúzních elektráren. Praktická část této práce se zabývá ekonomickým zhodnocením plánované fúzní elektrárny. Pro analýzu byl zvolen referenční model demonstrační fúzní elektrárny DEMO2. V souladu se studií OECD jsou vypočítány průměrné výrobní náklady elektřiny, tzv. LCOE, tohoto modelu a je provedena jejich citlivostní analýza. Dále je fúzní elektrárna porovnána s jinými zdroji elektrické energie z hlediska velikosti LCOE a externích nákladů spojených s výrobou elektrické energie ve fúzní elektrárně. Na závěr je provedena diskuze konkurenceschopnosti fúzní elektrárny na trhu.

**Klíčová slova:** termonukleární fúze, magnetické udržení, inerciální fúze, magneto-inerciální fúze, tokamak, fúzní elektrárna, LCOE

## Abstract

This bachelor thesis deals with the topic of controlled thermonuclear fusion and examines its role as a future power source. The theoretical part of this thesis begins with the basics of fusion physics. Subsequently, 3 main fusion concepts are introduced, namely magnetic confinement fusion, inertial confinement fusion and magneto-inertial fusion. In addition, the working principles of fusion devices based on these concepts are explained. This thesis also provides an overview of the history of fusion research as well as its current state. Following this, the crucial problems of fusion devices, that prevent fusion from being applied in the power industry, are identified. Finishing the theoretical part, prospects of future fusion research are outlined, including a brief description of fusion power plants concepts. The practical part of this bachelor thesis aims to perform an economic analysis of a planned fusion power plant. The analysis was carried out using a demonstration power plant model DEMO2. In compliance with an OECD methodology, the levelized cost of electricity (LCOE) of this model are evaluated. In addition, the dependence of LCOE on various variables is analysed. Finally, the value of external costs and the evaluated levelized cost of electricity are used to compare the fusion power plant with other power plants and to discuss its viability.

**Key words:** thermonuclear fusion, magnetic confinement fusion, inertial fusion, magneto-inertial fusion, tokamak, fusion power plant, LCOE

# Obsah

Seznam tabulek	x
Seznam obrázků	xi
Úvod	1
<b>1 Fyzikální principy termonukleární fúze</b>	<b>5</b>
1.1 Energie z jádra	5
1.2 Fúze jader	5
1.2.1 Plazma	7
1.2.2 Fúzní reakce	7
1.3 Lawsonovo kritérium	10
<b>2 Fúzní zařízení</b>	<b>13</b>
2.1 Magnetické udržení	13
2.1.1 Lineární konfigurace	14
2.1.2 Toroidální konfigurace	16
2.2 Inerciální udržení	19
2.2.1 Přímé zapálení	21
2.2.2 Nepřímé zapálení	21
2.2.3 Rychlé zapálení	22
2.2.4 Alternativní mechanismy zapálení	22
2.3 Magneto-inerciální udržení	23
2.3.1 Lineární pinče	23
2.3.2 Toroidální pinče	24
<b>3 Historie výzkumu řízené termonukleární fúze</b>	<b>25</b>
3.1 Tokamaky, stelarátory a pinče	26
3.1.1 Spojené království	26
3.1.2 Sovětský svaz	26
3.1.3 Spojené státy americké	27
3.1.4 Mezinárodní spolupráce	27
3.2 Inerciální fúze	28
3.3 Historie v ČR	29
<b>4 Současný stav výzkumu</b>	<b>31</b>
4.1 JET	31
4.2 NIF	33
4.3 Z machine	34
4.4 Aktuální stav výzkumu v ČR	36
4.4.1 Výzkum na Katedře fyziky FEL ČVUT	38

<b>5</b>	<b>Problémy řízené termonukleární fúze</b>	<b>40</b>
5.1	Tokamaky . . . . .	40
5.2	Laserové fúzní aparatury . . . . .	41
5.3	Pinčové fúzní aparatury . . . . .	42
<b>6</b>	<b>Perspektivy do budoucna</b>	<b>43</b>
6.1	ITER . . . . .	44
6.1.1	Financování projektu ITER . . . . .	46
6.2	Koncepce fúzních elektráren . . . . .	47
6.2.1	Elektrárna na principu MCF . . . . .	48
6.2.2	Elektrárna na principu ICF . . . . .	49
6.2.3	Elektrárna na principu MIF . . . . .	51
<b>7</b>	<b>Ekonomické zhodnocení využití fúze v energetice</b>	<b>52</b>
7.1	Referenční model fúzní elektrárny . . . . .	53
7.1.1	Parametry . . . . .	53
7.1.2	Náklady . . . . .	54
7.2	LCOE . . . . .	56
7.2.1	Teoretický úvod . . . . .	56
7.2.2	Výsledky . . . . .	57
7.3	Externí náklady . . . . .	60
7.4	Konkurenceschopnost fúzní energie . . . . .	62
<b>8</b>	<b>Závěr</b>	<b>64</b>
	<b>Literatura</b>	<b>66</b>
	<b>Příloha A</b>	<b>71</b>
A.1	Výpočet LCOE . . . . .	71
A.2	Přepočty cenových hladin . . . . .	71
	<b>Příloha B</b>	<b>73</b>

# Seznam tabulek

4.1	Přestavba tokamaku COMPASS . . . . .	36
6.1	Základní parametry tokamaku JET a ITER . . . . .	45
6.2	Náklady projektu ITER . . . . .	46
7.1	Parametry referenčního modelu DEMO2 . . . . .	53
7.2	Parametry DEMO2 týkající se výroby elektrické energie . . . . .	53
7.3	Investiční náklady DEMO2 . . . . .	54
7.4	Životnost elektrárny a vyměnitelných komponent. . . . .	55
7.5	Roční provozní náklady a investice. . . . .	56
7.6	Průměrné výrobní náklady elektřiny modelové fúzní elektrárny pro různé diskonty. . . . .	58
7.7	Tabulka externích nákladů modelů fúzní elektrárny . . . . .	61
7.8	Vlastnosti modelů fúzních elektráren 1, 2 a 3 porovnávaných z hlediska externích nákladů. . . . .	62

# Seznam obrázků

1	Celosvětové primární zdroje energie . . . . .	2
1.1	Závislost vazebné energie připadající na jeden nukleon na hmotnostním čísle . . . . .	6
1.2	Závislost potenciální energie na vzdálenosti jader . . . . .	6
1.3	Proton-protonový cyklus . . . . .	7
1.4	Struktura jádra deuteria a tritia . . . . .	8
1.5	Závislost účinného průřezu na kinetické energii . . . . .	8
2.1	Ampérův zákon síly . . . . .	14
2.2	Magnetické zrcadlo . . . . .	15
2.3	Lineární konfigurace baseballová cívka . . . . .	15
2.4	Geometrie toroidální konfigurace . . . . .	16
2.5	Principální schéma tokamaku . . . . .	17
2.6	Příčný řez vakuovou nádobou tokamaku . . . . .	18
2.7	Stelarátory . . . . .	19
2.8	Inerciální fúze s přímým zapálením . . . . .	21
2.9	Inerciální fúze s nepřímým zapálením . . . . .	21
2.10	Rychlé zapálení . . . . .	22
2.11	Nepřímé zapálení pomocí Z-pinčového výboje . . . . .	23
2.12	Lineární pinče . . . . .	24
3.1	Porovnání tokamaků T-1 a JET . . . . .	28
3.2	Tokamak GOLEM . . . . .	29
3.3	Tokamak COMPASS . . . . .	30
4.1	Tokamak JET . . . . .	32
4.2	National Ignition Facility . . . . .	33
4.3	Schéma hohlraum a palivového terče používaného v NIF . . . . .	34
4.4	MagLIF . . . . .	35
4.5	Z machine . . . . .	35
4.6	Evropské tokamaky s průřezem podobným tokamaku ITER . . . . .	37
4.7	Laserový systém PALS . . . . .	37
6.1	Koncept vývoje fúzního programu . . . . .	43
6.2	Rozestavěný ITER . . . . .	45
6.3	Řez fúzní elektrárnou . . . . .	47
6.4	Schéma MCF elektrárny . . . . .	48
6.5	Schéma ICF elektrárny . . . . .	50
7.1	Složení přímých nákladů výstavby modelu DEMO2. . . . .	55
7.2	Graf závislosti $LCOE$ na výši diskontu. . . . .	58
7.3	Graf závislosti $LCOE$ na výši celkových investičních nákladů. . . . .	59
7.4	Graf závislosti $LCOE$ na výši ročních investic do vyměnitelných komponent. . . . .	59

7.5	Graf zobrazující externí náklady různých zdrojů energie . . . . .	61
7.6	<i>LCOE</i> slunečních a větrných elektráren . . . . .	63
7.7	<i>LCOE</i> zdrojů energie pracujících v základním zatížení . . . . .	63

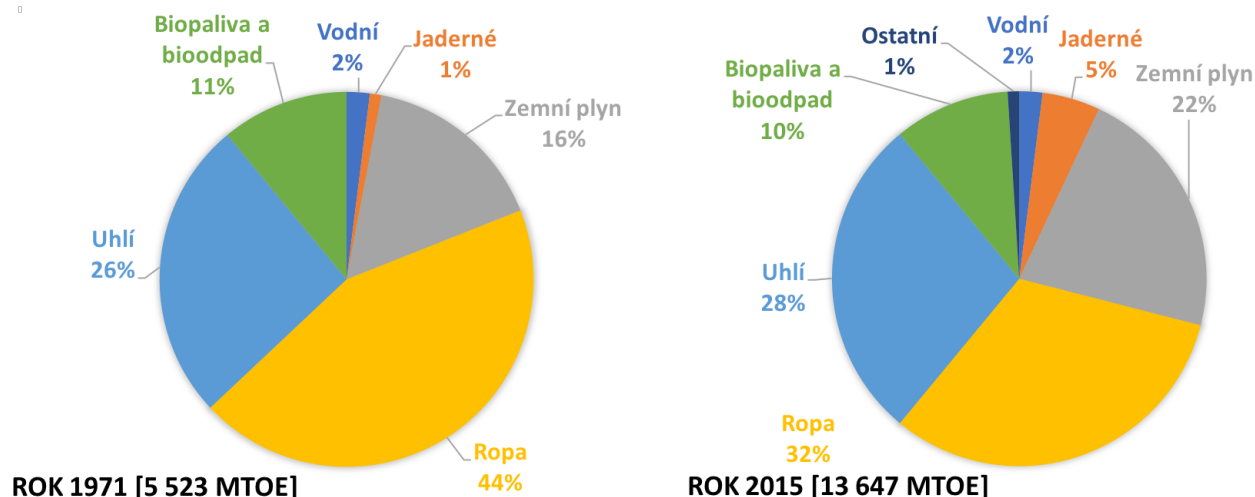


# Úvod

Celosvětová spotřeba energie se každým rokem zvyšuje a hledání vhodného zdroje energie tak nabývá na významu. Spotřeba energie na osobu je jedním z ukazatelů kvality života v různých částech světa [1]. S rostoucí populací a probíhající industrializací rozvojových zemí poroste poptávka po energii i nadále. Mezinárodní energetická agentura IEA (International Energy Agency) předpokládá nárůst spotřeby energie o 30 % oproti současnému stavu do roku 2040 [2].

Dominantní roli v získávání energie hrálo doposud spalování fosilních paliv, jako jsou uhlí, ropa a zemní plyn (viz obr. 1). Již nyní je ale zřejmé, že chceme-li v budoucnosti zajistit trvale udržitelný rozvoj lidské společnosti, budeme muset najít jiné zdroje energie. Jedním z důvodů jsou ztenčující se zásoby fosilních paliv. Statistiky z roku 2018 odhadují, že současné světové zásoby by byly schopny pokrýt celosvětovou produkci energie z roku 2017 na 134 let u uhlí, na 52 let u zemního plynu a na 50 let u ropy [3]. Rozložení zdrojů navíc není rovnoměrné a v případě energetické krize by tato skutečnost mohla vyústit ve válečné konflikty. Dalším, neméně důležitým, důvodem je ekologické riziko. Spalováním fosilních paliv se do atmosféry uvolňují skleníkové plyny (např. oxid uhličitý, metan a oxidy dusíku), které způsobují menší průhlednost atmosféry. Následkem toho je záření emitované zemským povrchem atmosférou absorbováno a částečně odraženo zpět, čímž se povrch Země více zahřívá. Tento jev označujeme jako skleníkový efekt [4]. Emise vzniklé spalováním fosilních paliv jsou také příčinou kyselých dešťů a (zejména  $\text{CO}_2$ ) přispívají ke globálnímu oteplování. Oteplování planety by v budoucnu mohlo vést například k častějším a prudším klimatickým změnám a zvýšení hladin světových oceánů [5]. To by mimo jiné znamenalo zatopení přímořských oblastí, které jsou dnes osídleny stovkami milionů lidí. Některé důsledky globálního oteplování jsou pozorovatelné již dnes [6]. Roky 2012 až 2017 byly prokazatelně nejteplejšími 5 lety z hlediska teploty oceánu, rok 2017 se stal nejteplejším doposud zaznamenaným rokem pro oceán vůbec [7]. Pozorovatelné je také ubývání ledovců. Za posledních 100 let roztála polovina alpských ledovců a průměrná tloušťka ledu v Arktidě se za posledních 32 let ztenčila ze 7 m na 3 m. Podle nynějších odhadů by se mohla průměrná teplota Země v průběhu příštích 50 let zvýšit až o 4 °C. Takový nárůst teploty by znamenal přírodní katastrofu v globálním měřítku [4].

Ekologicky výhodnější variantou z hlediska šetrnosti k ovzduší je energie jaderná, která přímo neprodukuje skleníkové plyny. Jaderná energie má potenciál vyrábět větší podíl světové energie, než činí dnes. Nicméně je brzděna nedostatkem důvěry veřejnosti v její bezpečnost. V historii



Obrázek 1: Grafy vyjadřují podíl jednotlivých primárních zdrojů energie na celosvětové produkci energie v roce 1976 a 2015. Čísla v hranatých závorkách udávají hodnotu celkové celosvětové vyrobené energie v daném roce v jednotkách Mtoe.<sup>1</sup> Grafy byly vytvořeny na základě dat uvedených v [8].

jaderné éry došlo k několika haváriím s únikem radioaktivních látek do okolí. Po posledních z nich, havárii jaderné elektrárny Fukushima v Japonsku způsobené zemětřesením a následnou vlnou tsunami, došlo k útlumu jaderné energetiky například v Německu [4]. Dalším problémem je uskladnění vyprodukovaného dlouhodobě radioaktivního odpadu [9]. Zásoby uranu  $^{235}\text{U}$  rovněž nejsou nevyčerpatelné. Bez recyklace paliva mohou světové zásoby vystačit na 90 let [5].

Dokonce ani obnovitelné zdroje energie nejsou ekologicky zcela šetrné. Výroba solárních panelů je energeticky vysoce náročná a zahrnuje použití těžce dosažitelných materiálů. Větrné elektrárny jsou hlučné a zasahují do rázu krajiny. Kvůli vodním elektrárnám se musí zaplavit obrovské plochy vodou. Dalšími problémy, kterým čelí alternativní zdroje energie (solární a větrné), jsou: závislost na počasí a tím způsobená obtížná regulace, nízká energetická hustota, nízká účinnost a vysoká cena vyrobené energie [1]. Vzhledem k těmto skutečnostem se neočekává, že by obnovitelné zdroje byly v budoucnosti schopny vyprodukovat více než 20 % celosvětové spotřeby energie [5]. Alternativní zdroje budou i nadále hrát pouze pomocnou roli, avšak jejich podíl se bude zvyšovat. Ani obnovitelné zdroje (vítr, voda, biomasa) tedy energetické potřeby lidstva nevyřeší.

Nejperspektivnějším zdrojem energie se jeví ten, jenž dodává energii hvězdám, tedy i Slunci. Slunce zahřívá Zemi po miliardy let a svou energii získává ze slučování jader vodíku a jeho izotopů na helium a těžší prvky. Tomuto procesu slučování lehčích atomových jader na jádra těžší říkáme termojaderné slučování neboli termonukleární fúze. Během této reakce zároveň dochází k uvolnění energie, která je několiknásobně větší než při jaderném štěpení a přibližně milionkrát větší než při spalování fosilních paliv [10]. Řízená termonukleární fúze, jakožto zdroj energie, ale poskytuje i mnoho dalších výhod.

<sup>1</sup>Megatuny ropného ekvivalentu (z anglického Mega tons of oil equivalent).

Jednou z nich jsou prakticky nevyčerpatelné zásoby paliva, které jsou navíc rovnoměrně rozloženy. Pro první generaci fúzních elektráren se počítá s využitím izotopů vodíku deuteria a tritia, druhá generace by měla pracovat již jen s deuteriem (viz podkapitola 1.2.2). Deuterium se nachází v libovolné sloučenině obsahující vodík, lze tedy získat i extrakcí z vody. Z jednoho litru vody lze vyprodukovat energii ekvivalentní 300 litrům benzínu [5]. Současné zásoby deuteria ve světových oceánech mohou pokrýt celosvětovou spotřebu energie na 8 miliard let [11].<sup>2</sup> Poslední odhady ukazují, že k vyhoření fúzního paliva na Slunci dojde za 5 miliard let, tj. zásoby fúzního paliva jsou reálně nevyčerpatelné. Naproti tomu tritium, radioaktivní prvek s poločasem rozpadu 12,3 let, se na Zemi prakticky nevyskytuje. Tritium je slabý beta zářič, jehož záření lze absorbovat tenkou vrstvou papíru [1]. Tritium bude vznikat přímo v reaktoru reakcí fúzních neutronů a lithia. Zásoby lithia by měly vystačit na pokrytí celosvětové spotřeby energie po dobu 2,2 milionů let [11].

Dalším faktorem, který přispěje zejména k získání důvěry veřejnosti ve fúzní energii, je vnitřní bezpečnost reaktoru. Termojaderná fúze probíhá pouze za velmi vysokých teplot plazmatu (viz podkapitola 1.2). Jakákoliv porucha povede k ochlazení paliva a ukončení slučování jader [11]. Na rozdíl od řetězové štěpné jaderné reakce se tedy u termojaderné fúze není nutné obávat případných problémů se zastavením chodu reaktoru. Fúzní neutrony budou sekundárně aktivovat konstrukci reaktoru, proto reaktor a primární okruh elektrárny budou umístěny v ochranném kontejnmentu. Stejně tak k výrobě a manipulaci s tritiem bude docházet v dalším ochranném kontejnmentu [11]. Tato bezpečnostní opatření zabrání úniku radioaktivních látek do životního prostředí.

Odpadem fúzní elektrárny bude inertní plyn helium, který lze dále využít. Fúzní elektrárna tedy neprodukuje žádné emise. Mezi další výhody můžeme řadit nezávislost na počasí (jasno, vítr, dostatek vody) [11].

Termojaderná fúze, jak bylo naznačeno, je velice perspektivní energetický zdroj, a to zejména z těchto důvodů: nulové emise, prakticky neomezené množství paliva, vysoká vnitřní bezpečnost reaktoru a produkce minimálního množství radioaktivního odpadu. I proto byla fúze předmětem intenzivního výzkumu v posledních 70 letech. Zvládnutí řízené termojaderné fúze by totiž znamenalo získání levného a čistého energetického zdroje na příští miliony let. Bohužel ovládnout řízenou termonukleární fúzi se dodnes zcela nepodařilo. Vědci čelí mnoha překážkám, které budou pravděpodobně stát v cestě komerčnímu využití energie z fúze po několik dalších desítek let (viz kapitola 5). Ačkoliv některá fúzní zařízení již byla schopna vyprodukovat energii [12], čímž demonstrovala možnost praktického využití, zapojení první fúzní elektrárny do elektrické rozvodné sítě se odhaduje až na rok 2050.

Podrobnější vysvětlení fyzikálních principů jaderné fúze nabízí první kapitola. Druhá kapitola se věnuje 3 hlavním přístupům k řízené termonukleární fúzi a principům funkce vybraných fúzních zařízení. Dále je popsána historie výzkumu jak ve světě, tak v České republice. Ve 4. kapitole

---

<sup>2</sup>Počítáno pro spotřebu energie z roku 2015 ve výši  $6 \cdot 10^{20}$  J/rok

je nastíněna současná situace výzkumu na poli řízené termonukleární fúze. Pátá kapitola nabízí přehled současných problémů tokamaků, laserových a pinčových fúzních aparatur. Následně jsou zmíněny perspektivy do budoucna včetně koncepcí fúzních elektráren. Poslední kapitola se zabývá ekonomickým zhodnocením využití fúze v energetice.

Cílem této bakalářské práce je seznámit čtenáře s fyzikálními principy termonukleární fúze, podat rešerši historie i současného stavu fúzního výzkumu a následně popsat problémy různých fúzních aparatur, které stojí v cestě komerčnímu využití energie z fúze. Cílem praktické části je provést ekonomické zhodnocení plánované fúzní elektrárny a její porovnání se současnými zdroji elektrické energie.

# Kapitola 1

## Fyzikální principy termonukleární fúze

### 1.1 Energie z jádra

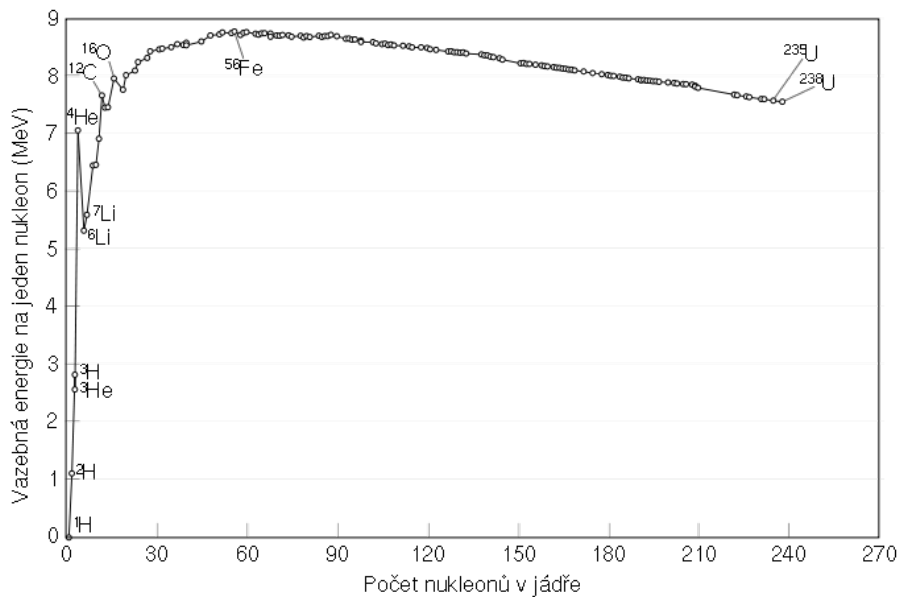
Protony a neutrony v jádře atomu jsou vzájemně vázány jadernou silou. Bylo zjištěno, že celková klidová hmotnost atomových jader je menší než prostý součet klidových hmotností protonů a neutronů, ze kterých se jádro skládá [12]. Tento rozdíl ve hmotnostech nazýváme hmotnostním úbytkem  $\Delta m$  a je úměrný vazebné energii. Vazebná energie je energie potřebná k rozdělení jádra na jednotlivé nukleony. Její velikost je dána Einsteinovým vztahem  $E = \Delta mc^2$ , kde  $c$  reprezentuje rychlost světla a  $\Delta m$  je výše zmíněný hmotnostní úbytek [1]. Právě vazebnou energii je možné při určitých jaderných reakcích změnit. Závislost vazebné energie připadající na jeden nukleon na hmotnostním čísle zobrazuje obrázek 1.1.<sup>1</sup> Z grafu lze vyčíst maximum vazebné energie připadající na jeden nukleon. Toto maximum odpovídá hmotnostnímu číslu 56, které náleží železu. Atomy s blízkým hmotnostním číslem jsou nejstabilnější. Pokud chceme jadernou energii uvolnit, máme dvě možnosti. První možností je slučování jader lehčích (s menším hmotnostním číslem) než železo. Výsledný prvek má nižší klidovou hmotnost než je součet klidových hmotností fúzujících prvků a dojde k uvolnění energie úměrné hmotnostnímu úbytku. Druhou možností je štěpení jader těžších (s vyšším hmotnostním číslem) než železo za vzniku prvků lehčích [12]. Z obrázku 1.1 je také patrné, že fúzi lze získat mnohem více energie než štěpením. Jadernými reakcemi obecně lze získat přibližně milionkrát více energie než spalováním fosilních paliv [10].

### 1.2 Fúze jader

Aby mohla proběhnout fúzní reakce, musí se atomová jádra přiblížit na velmi malé vzdálenosti. Jádro atomu se skládá z kladně nabitých protonů a neutrálních neutronů, má tedy kladný náboj.

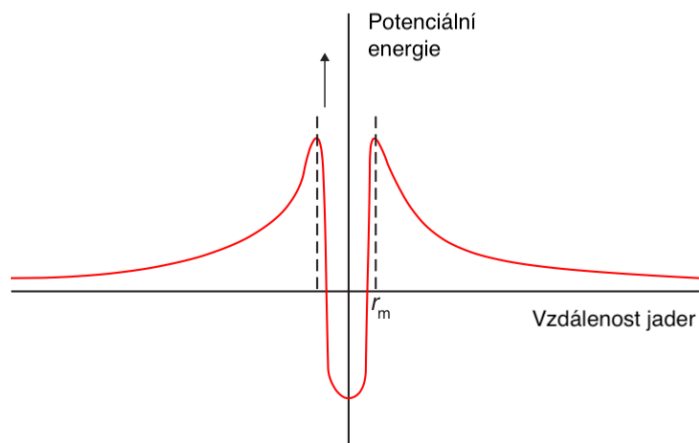
---

<sup>1</sup>Hmotnostní číslo udává celkový počet nukleonů v jádře.



Obrázek 1.1: Závislost vazebné energie připadající na jeden nukleon na hmotnostním čísle. Převzato z [13].

Přiblížení dvou shodně nabitých jader však brání Coulombovská elektrostatická odpudivá síla. Přiblíží-li se jádra na vzdálenost  $10^{-14}$  m [5], přitažlivá jaderná síla bude větší než elektrostatická odpudivá síla a může dojít ke sloučení jader. Tuto skutečnost zobrazuje obrázek 1.2. Pro



Obrázek 1.2: Závislost potenciální energie na vzdálenosti jader. Převzato z [12].

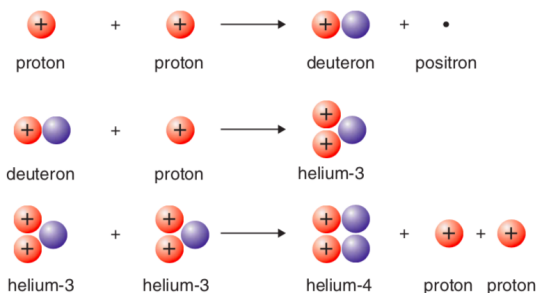
překonání odpudivé síly a přiblížení jader na vzdálenosti, kdy začne převládat přitažlivá jaderná síla, je potřebná energie. energii můžeme jádrům dodat dvěma způsoby. Prvním z nich je urychlení jader a následné ostřelování terče. Tímto procesem vyústí pouze velmi malá část srážek (1 ze 100 milionů) ve sloučení a většina energie spotřebovaná na urychlení jader je tak ztracena [12]. Urychlovat jádra pomocí urychlovače se tedy nevyplatí, protože výstupní energie nebude nikdy větší než vstupní [5]. Druhý způsob dodání energie je zahřátí fúzního paliva na teploty v řádech  $10^8$  stupňů Celsia. Právě kvůli vysoké teplotě označujeme fúzi, jíž jsme dosáhli tímto způsobem, jako termonukleární. Částice si v horkém plynu předávají energii srážkami, celková energie však zůstává zachována. Tyto srážky způsobí ionizaci plynu a takový stav hmoty nazýváme plazma.

### 1.2.1 Plazma

Plazma, neboli čtvrté skupenství hmoty, lze definovat jako kvazineutrální směs nabitých a neutrálních částic vykazující kolektivní chování [14, 15]. Tuto definici si nyní přiblížíme. Ionizaci plynu způsobíme vyražením elektronů z atomárních obalů. V plazmatu se tedy vyskytují volné nosiče náboje, které mohou vést elektrický proud. Elektrická vodivost vodíkového plazmatu při teplotách potřebných k dosažení fúze je zhruba 10krát větší než vodivost mědi za normálních teplot [12]. Při teplotách potřebných k dosažení fúze je plazma již plně ionizováno a skládá se ze směsi negativně nabitých elektronů a kladně nabitých jader. Z makroskopického pohledu je hustota kladných a záporných nábojů stejná, tudíž se plazma navenek jeví jako neutrální. Plazma, na rozdíl od plynu, reaguje na elektrická a magnetická pole a také je svými pohyby může tvořit. Proto lze hovořit o kolektivním chování plazmatu [14, 15]. Právě této skutečnosti je využíváno při tzv. magnetickém udržení plazmatu, na jehož principu fungují některá fúzní zařízení (viz podkapitola Magnetické udržení).

### 1.2.2 Fúzní reakce

Fúzních reakcí s kladným energetickým ziskem je mnoho, ne všechny však mohou reálně probíhat na Zemi. Za příklad si vezmeme proton-protonový cyklus odehrávající se na Slunci. Fúze dvou protonů, kterou tento cyklus začíná (viz obrázek 1.3), má příliš malý účinný průřez<sup>2</sup> na to, abychom ji mohli efektivně využít na Zemi jako zdroj energie [12]. Zaměřím se tedy speciálně



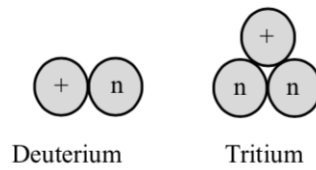
Obrázek 1.3: Proton-protonový cyklus probíhající na Slunci.<sup>3</sup>Převzato z [12].

na dvě reakce, s jejichž využitím se počítá v budoucích fúzních reaktorech. Jedná se o reakce izotopů vodíku deuteria, resp. tritia, které mají oproti atomu vodíku v jádře atomu kromě jednoho protonu navíc jeden, resp. dva, neutrony. Schematickou strukturu jádra znázorňuje obrázek 1.4.

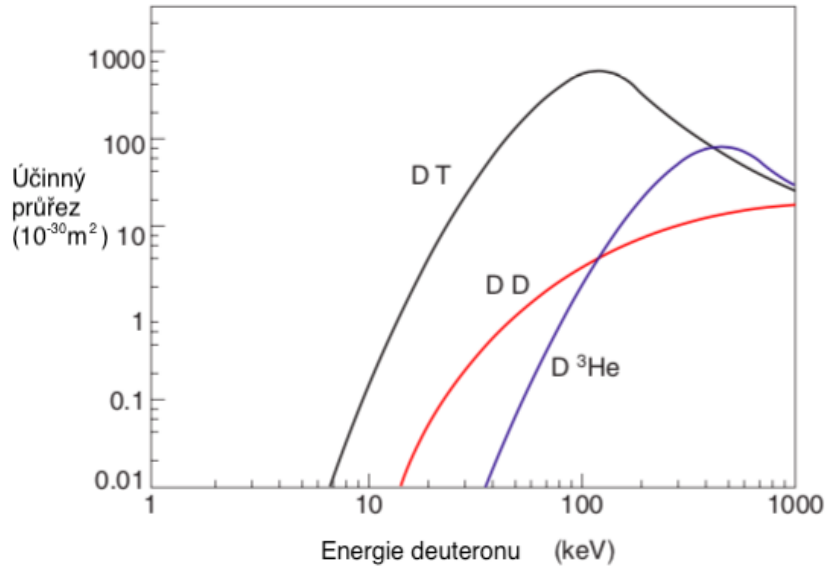
Pro první generaci fúzních reaktorů se počítá s využitím **D-T reakce**, tj. se slučováním jader deuteria a tritia. Hlavním důvodem je fakt, že této reakce lze nejnáze dosáhnout, protože má největší účinný průřez [1]. Účinný průřez je závislý na kinetické energii (viz obrázek 1.5).

<sup>2</sup>Účinný průřez reprezentuje pravděpodobnost srážky dvou jader vedoucí k fúzi [12].

<sup>3</sup>Deuteron označuje jádro deuteria.

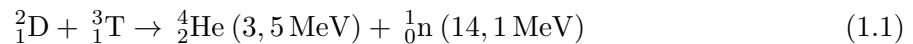


Obrázek 1.4: Struktura jádra deuteria a tritia. Převzato z [10].

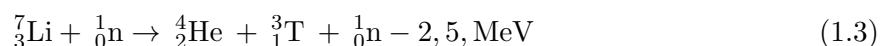


Obrázek 1.5: Závislost účinného průřezu na kinetické energii různých fúzních reakcí. Převzato z [12].

Reakce D-T má největší účinný průřez při energiích okolo 100 keV, zatímco maximum u ostatních reakcích nastává až při vyšších energiích [1]. Právě kvůli nejnižší zápalné teplotě je D-T reakce považována za nejvhodnější pro budoucí fúzní elektrárnu. Celková energie uvolněná při D-T reakci je 17,6 MeV, jak popisuje reakce (1.1) [1].



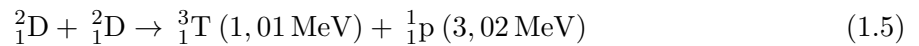
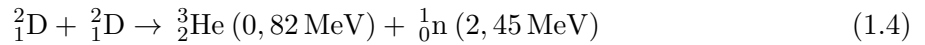
Zdrojem deuteria jsou světové oceány. Deuterium tvoří asi 1/6700 všech atomů vodíku a odhaduje se, že ve světových oceánech se ho nachází více než  $10^{15}$  tun. Takové množství může uspokojit energetické potřeby lidské civilizace [12]. Tritium se však v přírodě nevyskytuje a musí být získáváno z jiného zdroje. Toho lze dosáhnout reakcí neutronu, který je produktem D-T reakce, a lithia. Lithium existuje ve dvou formách:  ${}^6_3\text{Li}$  a  ${}^7_3\text{Li}$ . Do úvahu připadají dvě reakce, které jsou vyjádřeny reakcemi (1.2) a (1.3) [10].





Přírodní lithium obsahuje 7,4%  ${}^6_3\text{Li}$  a 92,6%  ${}^7_3\text{Li}$ . I přes větší podíl  ${}^7_3\text{Li}$ , jsou reakce neutronu a  ${}^6_3\text{Li}$  častější [10]. Protože z reakce (1.2) plyne, že se jedná o exotermickou reakci, získává se výrobou tritia další energie, a dochází tak k multiplikaci fúzního výkonu [11]. Znamé zásoby lithia mohou sloužit jako fúzní palivo po miliony let [11], avšak cílem do budoucna je využívat D-D fúzní reakci.

Ve druhé generaci fúzních reaktorů by měla již probíhat **D-D reakce** neboli slučování jader deuteria. Její hlavní výhodou je prakticky nevyčerpatelné, levné a lehce dostupné palivo. Iniciovat řízenou D-D reakci je ale oproti D-T nebo D- ${}^3\text{He}$  reakci obtížnější. K dosažení maximálního účinného průřezu je potřebná vyšší teplota, což klade větší nároky na komponenty reaktoru. Zároveň velikost maximálního účinného průřezu je 100krát menší než u D-T reakce (viz obrázek 1.5). To znamená, že fúze jader deuteria a tritia je pravděpodobnější než fúze dvou jader deuteria. D-D reakce má dvě větve, každá z nich probíhá s 50 % pravděpodobností [1].



Uvolněnou energii si odnáší produkty fúzních reakcí ve formě kinetické energie. Kupříkladu u D-T reakce si neutron odnáší přibližně 80 % energie a jádro helia zbylých 20 %. Jedná-li se o fúzi s magnetickým udržením (více v podkapitole 2.1), potom rychlý neutron není magnetickým polem zadržen a svou energii nepředává fúznímu plazmatu. Rychlé neutrony dopadají na stěny reaktoru a způsobují jeho poškození a aktivaci. Velký neutronový tok zároveň zvyšuje požadavky na kvalitu materiálu první stěny reaktoru<sup>4</sup> (více v kapitole 5).

Velmi lákavou možností, z hlediska využití v budoucím fúzním reaktoru, je tzv. bezneutronová fúze. Při reakci protonu a boru, popsané reakcí 1.6, nevznikají žádné neutrony. Kladně nabitá jádra helia, nesoucí veškerou energii z reakce, jsou zachycena magnetickým polem v plazmatu [1].



Bezneutronová fúze přináší možnost přeměnit až 80 % energie nabitých částic vzniklých fúzí přímo na elektrickou energii [1]. Nemuselo by tedy docházet k ohřevu vody a generaci páry, která následně pohání turbínu. Takový tepelný cyklus má totiž nízkou účinnost [14]. Podmínky pro dosažení bezneutronové fúze jsou však daleko přísnější než pro D-T či D-D reakci a hluboce překračují současné technické možnosti. O tomto konceptu se hovoří až v souvislosti se 3. generací fúzních reaktorů. V současné době se výzkum soustředí zejména na D-T reakci. Zvládnutí této reakce vytvoří základy náročnějším, ale z různých hledisek výhodnějším reakcím. Právě několikrát výše zmiňovaným náročným podmínkám, které jsou nutné k dosažení termoneukleární fúze, se věnuje následující podkapitola.

<sup>4</sup>První stěnou je označována vnitřní stěna reaktoru, která je v přímém kontaktu s plazmatem [12].

### 1.3 Lawsonovo kritérium

Pokud chceme termonukleární fúzi využít v energetice, musí být fúzní výkon větší než výkon dodaný. Dodaná energie se jednak spotřebuje na ohřev paliva na vysoké teploty, jednak musí kompenzovat ztráty energie plazmatu, zejména ztráty zářením. Podmínkami energetické rovnováhy fúzních reaktorů se zabýval John D. Lawson.<sup>5</sup> Lawson ukázal, že v užitečném fúzním reaktoru nestačí pouze zajistit dostatečně vysokou teplotu, ale reakce musí také probíhat dostatečně dlouhou dobu. Své výsledky publikoval v roce 1957 v článku *"Some criteria for a power producing thermonuclear reactor"* [16]. V tomto článku nejdříve stanovil kritické teploty pro D-T a D-D reakce a následně odvodil, dnes již známé, Lawsonovo kritérium.

Kritickou teplotou Lawson označil hypotetickou teplotu, při níž je uvolněná fúzní energie rovna ztrátám zářením. Ztráty kondukcí ve výpočtu zanedbal. Kritická teplota D-D reakce pak vychází okolo 150 milionů K, pro D-T reakci zhruba 30 milionů K [16].

Dále stanovil vztah mezi hustotou plazmatu  $n$ , teplotou plazmatu  $T$  a dobou udržení energie  $\tau_E$ , který označujeme jako Lawsonovo kritérium a zapisujeme jako:

$$n \tau_E \geq f(T). \quad (1.7)$$

Doba udržení energie charakterizuje míru, se kterou se ztrácí energie plazmatu. Je definována jako podíl celkové energie plazmatu  $W_p$  a ztrátového výkonu  $P_L$  [17].

$$\tau_E = \frac{W_p}{P_L} \quad (1.8)$$

Energetická bilance reaktoru může být také popsána pomocí faktoru zesílení  $Q$ , který udává poměr fúzního výkonu  $P_f$  ku vnějšímu výkonu  $P_H$ , který ohřívá plazma a udržuje reakci.

$$Q = \frac{P_f}{P_H}. \quad (1.9)$$

Podmínkou pro užitečný fúzní reaktor je  $Q > 1$ . Při stavu  $Q = 1$ , označovaném jako *breakeven*, dochází k rovnováze fúzního a vnějšího výkonu [1]. Ideální by byl stav, kdy fúzní reaktor potřebuje dodat energii pouze na začátku a nadále funguje soběstačně. I takový stav může v reaktoru teoreticky nastat. Při fúzní D-T reakci vznikají jádra helia a neutrony. Magnetické pole nemá na nenabitě částice vliv, a tak neutron, odnášející si 80 % energie z reakce, uniká z plazmatu a zpomaluje se nárazem do stěn reaktoru, kde jednak předává energii, jednak reaguje s lithiem za vzniku tritia. Kladně nabitě jádro helia<sup>6</sup> je zachyceno magnetickým polem v plazmatu, kde předává svou energii ostatním částicím a zahřívá tím plazma. Pokud alfa částice dodávají dostatečnou energii k udržení tepelné rovnováhy plazmatu, není potřeba vnějšího ohřevu. Potom  $P_H \rightarrow 0$  a  $Q \rightarrow \infty$ . Tento stav nazýváme zapálením, anglicky *ignition* [12].

<sup>5</sup>John D. Lawson (1923-2008) byl britský inženýr a fyzik.

<sup>6</sup>Jádro helia se často označuje jako alfa částice.

Nyní budou odvozeny podmínky pro zapálení fúzní D-T reakce [1, 12, 14, 17]. Požadavek je, aby výkon alfa částic  $P_\alpha$  byl větší nebo roven ztrátovému výkonu  $P_L$  při nulovém vnějším ohřevu, tj.  $P_H = 0$ . Výkon alfa částic je dán vzorcem [14]:

$$P_\alpha = n_D n_T \langle \sigma \nu \rangle E_\alpha V, \quad (1.10)$$

kde  $n_D$ , resp.  $n_T$  značí hustotu jader deuteria, resp. tritia.  $\langle \sigma \nu \rangle$  je fúzní reaktivita,  $E_\alpha$  je energie, kterou si alfa částice odnáší z jedné fúzní reakce a  $V$  symbolizuje objem plazmatu. Budeme-li uvažovat směs D-T skládající se z poloviny z deuteria a z druhé poloviny z tritia, potom  $n_D = n_T = \frac{n}{2}$  a výraz (1.10) nabude tvaru:

$$P_\alpha = \frac{n^2}{4} \langle \sigma \nu \rangle E_\alpha V. \quad (1.11)$$

Kinetická energie částice plazmatu připadající na jeden stupeň volnosti je  $\frac{1}{2} k T$ . Pro celkovou kinetickou energii můžeme psát:

$$E_k = \frac{3}{2} N k T, \quad (1.12)$$

kde  $k$  je Boltzmanova konstanta a  $T$  je teplota plazmatu. Celkový počet částic  $N$  je v našem případě tvořen atomovými jádry a elektrony v poměru 1:1. Potom  $N = 2nV$  a celkovou energii plazmatu popisuje vztah:

$$W_p = 3 n k T V. \quad (1.13)$$

Využitím rovnice (1.8) dostaneme vzorec pro výpočet ztrátového výkonu:

$$P_L = \frac{3 n k T V}{\tau_E}. \quad (1.14)$$

Jak již bylo řečeno, alfa částice si odnáší přibližně 20 % z celkového fúzního výkonu  $P_f$ , proto  $E_\alpha = 0,2 E_f$  a tedy i  $P_\alpha = 0,2 P_f$ . Kritérium pro zapálení D-T reakce matematicky vyjádříme s pomocí rovnic (1.11) a (1.14):

$$\begin{aligned} P_\alpha &\geq P_L \\ \frac{n^2 \langle \sigma \nu \rangle E_f V}{20} &\geq \frac{3 n k T V}{\tau_E} \\ n \tau_E &\geq \frac{60 k T}{\langle \sigma \nu \rangle E_f}. \end{aligned} \quad (1.15)$$

Optimální teplota<sup>7</sup> je  $T \approx 30$  keV a dosazením  $E_f = 17,6$  MeV (viz reakce (1.1)) a tabelovaných hodnot reaktivit  $\langle \sigma \nu \rangle$  dostáváme [12]:

$$n \tau_E \approx 1,7 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3} \text{ s}.$$

<sup>7</sup>Teplotu je možné uvádět i v elektronvoltech, platí  $1 \text{ eV} \approx 11600 \text{ K}$  [10].

Tento údaj se často udává pomocí tzv. trojného součinu hustoty, doby udržení a teploty. Trojný součin je platný pro rozsah teplot 10-20 keV. Po započtení profilu hustoty plazmatu, vlivu nečistot a dalších parametrů vychází trojný součin jako [12]:

$$n T \tau_E \approx 6 \cdot 10^{21} \text{ m}^{-3} \text{ keV s} .$$

Kritérium pro breakeven, tj.  $Q = 1$ , je mírnější. Z požadavku  $P_f = P_H$  plyne [1]:

$$n T \tau_E \approx 1,5 \cdot 10^{21} \text{ m}^{-3} \text{ keV s} .$$

Z Lawsonova kritéria (1.7) plynou dvě krajní možnosti jeho splnění. Buď udržovat relativně řídké plazma ( $n \approx 10^{20} \text{ m}^{-3}$ ) po delší dobu (řádově sekundy), nebo zajistit velmi husté plazma ( $n \approx 10^{31} \text{ m}^{-3}$ ) po krátkou dobu ( $\tau_E \approx 10^{-10} \text{ s}$ ). První koncept nazýváme magnetické udržení, druhý inerciální udržení [5, 11]. Dalším možným přístupem je magneto-inerciální udržení, při němž se hodnoty hustoty a doby udržení pohybují uprostřed výše zmíněných krajních parametrů. O těchto přístupech k termonukleární fúzi a fúzních zařízeních pracujících na jejich principech pojednává následující kapitola.

V historii se objevily i snahy "obejít" Lawsonovo kritérium – najít nějaký jiný způsob dosažení fúze, při kterém by nebylo nutné splnit náročné podmínky plynoucí z Lawsonova kritéria [4]. Mezi tyto směry se řadí mionová katalýza, tzv. studená fúze a bublinková fúze [12]. Na rozdíl od studené a bublinkové fúze, které se nepodařilo prokazatelně ověřit, pomocí mionové katalýzy skutečně fúze dosáhnout lze, pouze to není energeticky výhodné.

## Kapitola 2

# Fúzní zařízení

Koncepcí pro dosažení řízené termonukleární fúze je velké množství. Popsat všechna zařízení by bylo nad rámec této bakalářské práce. Proto budou vybráni jen nejdůležitější zástupci, a to jednak z hlediska historického, jednak kvůli jejich potenciálu pro výstavbu budoucí termojaderné elektrárny.

### 2.1 Magnetické udržení

Principem fúze s magnetickým udržení (Magnetic confinement fusion, MCF) je vytvoření takové konfigurace magnetického pole, že nabitě částice plazmatu budou tímto polem drženy a nebudou moci unikat. Cílem je tedy vytvořit tzv. magnetickou nádobu, která plazma "uzavře" [1]. Na částice pohybující se v magnetickém poli o magnetické indukci  $\mathbf{B}$  a v elektrickém poli o intenzitě  $\mathbf{E}$  působí Lorentzova síla

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}), \quad (2.1)$$

kde  $q$  je elektrický náboj částice a  $\mathbf{v}$  je její rychlost [4]. Částice pohybující se podél magnetických indukčních čar nejsou Lorentzovou silou ovlivňovány, pohybují se tudíž volně. Trajektorie pohybu částic, které se pohybují napříč magnetickým polem, je Lorentzovou silou zakřívována. Tyto částice obíhají okolo silokřivek kruhovým pohybem. Poloměr této trajektorie, tzv. Larmorův poloměr, je dán vztahem [4]:

$$r_L = \frac{m v_{\perp}}{q B}. \quad (2.2)$$

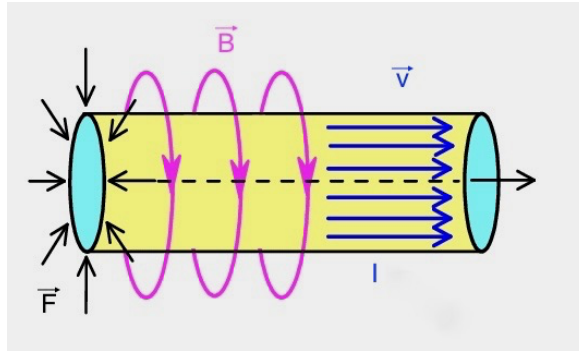
Zde  $v_{\perp}$  označuje složku vektoru rychlosti kolmo na magnetické pole a  $m$  je hmotnost částice. Skutečností, že se částice, které se pohybují napříč magnetickým polem, nemohou pohybovat volně, využívá magnetické udržení plazmatu. Ke ztrátám částic a energie však dochází srážkami procesem označovaným jako difúze. Srážka s jinou částicí způsobí změnu osy kruhového pohybu (částice pak obíhá okolo jiné silokřivky) a náhodný posun částice kolmo k poli. Difúze je zvyšována turbulencemi a nestabilitami v plazmatu. Tyto jevy jsou fyzikálně velice komplikované a dodnes se je ve fúzním plazmatu nepodařilo zcela odstranit, či využít ku prospěchu.

Energetické ztráty částic zkracují dobu udržení  $\tau_E$ , která je však klíčová pro splnění Lawsonova kritéria [4]. Při magnetickém udržení požadujeme  $\tau_E$  v řádech sekund. Dobu udržení lze zvýšit zlepšením konfigurace magnetického pole, nebo zvětšováním objemu plazmatu.

Požadované konfigurace magnetického pole lze dosáhnout buď uspořádáním vnějších cívek, proudem procházejícím plazmatem, či kombinací obou metod. Elektrický proud procházející vodičem (zde plazmatem) vytváří magnetické pole, jehož siločivky mají tvar uzavřených kružnic okolo vodiče. Na vodič potom působí síla, která směřuje k ose vodiče. Matematicky tento jev vyjadřuje Ampérův zákon síly (2.3), graficky obrázek 2.1.

$$d\mathbf{F} = I d\mathbf{l} \times \mathbf{B} \quad (2.3)$$

Síla  $d\mathbf{F}$  působí na element délky vodiče  $d\mathbf{l}$ , který je homogenně protékán proudem  $I$  v magnetickém poli o magnetické indukci  $\mathbf{B}$ .



Obrázek 2.1: Ampérův zákon síly. Převzato z [18].

Pokud je proud dostatečně velký, dochází ke stlačení proudového vlákna. Tento jev se také označuje jako *pinč efekt*, z anglického "pinch" neboli stisknout, sevít. Při termionukleární fúzi požadujeme stlačení vysokoteplotního plazmatu tak, aby se nedotýkalo okolních stěn, které by se v důsledku vysokých teplot tavily [12]. Významnou roli hraje pinč efekt u fúze s magneto-inerciálním udržením.

V následujícím textu budou zařízení, která fungují na principu magnetického udržení, rozdělena do skupin dle konfigurace magnetického pole, a sice na konfigurace lineární, s otevřeným magnetickým polem, a konfiguraci toroidální, s uzavřeným polem.

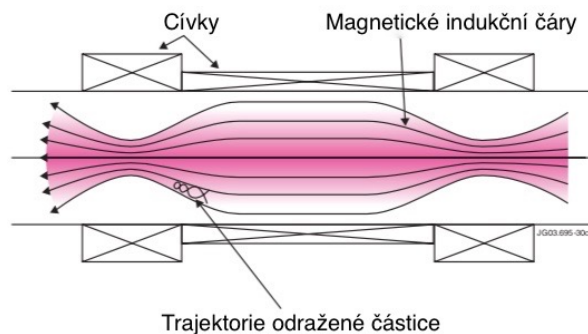
### 2.1.1 Lineární konfigurace

Jak název napovídá, při lineární konfiguraci je osou plazmatu přímka. Jedná se o uspořádání s otevřeným magnetickým polem.<sup>1</sup> Výhodou experimentálních fúzních zařízení s lineární konfigurací je jednodušší konstrukce oproti zařízením toroidálním. Otevřené konce však představují problém, jelikož zde dochází ke ztrátám částic a energie [4].

<sup>1</sup>Siločivky magnetického pole se v uspořádání s otevřeným magnetickým polem neuzavírají uvnitř plazmatu.

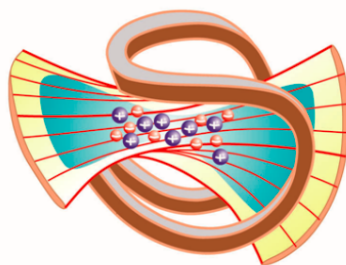
### Magnetická zrcadla

Schéma magnetického zrcadla je možné vidět na obrázku 2.2. Plazma je zde udržováno uvnitř solenoidu<sup>2</sup> protékaného proudem. Na koncích je magnetické pole zesíleno.<sup>3</sup> Nabitá částice se od



Obrázek 2.2: Magnetické zrcadlo. Převzato z [12].

silnějšího magnetického pole odráží, odtud název magnetické zrcadlo. Částice s velkou podélnou rychlostí však projdou i přes zesílené magnetické pole na koncích a dochází tak ke koncovým ztrátám. Další nevýhodou jsou nestability plazmatu vznikající v důsledku nerovnováhy tlaku plazmatu a magnetického pole. Ideální je, když v místě maximálního tlaku plazmatu nastává minimum magnetického pole. Takové rozložení magnetického pole lze dosáhnout pomocí tzv. vstřícných zrcadel, instalací dodatečných axiálních vodičů protékaných proudem (Ioffeho tyče) nebo pomocí cívky speciálního tvaru zobrazené na obrázku 2.3 [4]. Dosáhnout vyšších hustot



Obrázek 2.3: Konfigurace "baseballová cívka": cívka je tvarovaná jako šev baseballového míče. Převzato z [19].

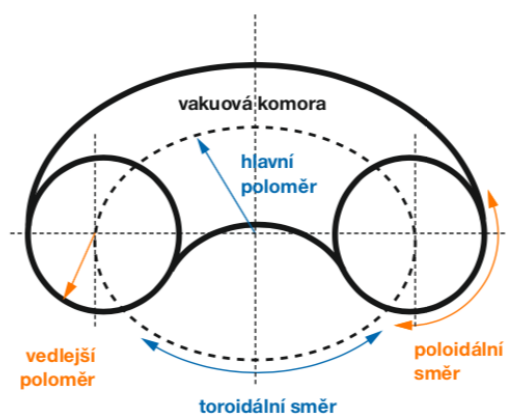
plazmatu je u magnetických zrcadel obtížné. Ani vylepšení konfigurace magnetického pole zcela neodstraní problém s koncovými ztrátami a nestabilitami plazmatu. Toroidální zařízení se v historii výzkumu začala jevit jako slibnější, proto došlo k útlumu vývoje magnetických zrcadel, a to i přes jejich nespornou výhodu – mohou pracovat v kontinuálním režimu [12].

<sup>2</sup>Solenoid je válcová cívka.

<sup>3</sup>Zhuštění magnetických indukčních čar je dobře viditelné na obrázku 2.2.

### 2.1.2 Toroidální konfigurace

Problémy s koncovými ztrátami lineárních konfigurací vedly k myšlence konce "spojit do jednoho", a vytvořit tak prstenec neboli toroid. Silokřivky magnetického pole se uzavírají uvnitř plazmatu, jedná se tedy o konfiguraci s uzavřeným magnetickým polem. Ani taková magnetická nádoba však nezachytí všechny nabitě částice. Vlivem difúze, turbulencí a nestabilit plazmatu mohou částice unikat z oblasti uzavřených silokřivek. Tyto částice pak dopadají na *první stěnu*<sup>4</sup>. Materiál první stěny musí být velmi odolný vůči teplu a radiaci a je předmětem intenzivního výzkumu [4, 11]. Geometrii toroidální konfigurace vysvětluje obrázek 2.4. Pro popis používáme dva význačné směry: toroidální a poloidální. Pohybujeme-li se po ose plazmatu, mluvíme o směru toroidálním. Směr kolmý na osu plazmatu je směr poloidální. Zároveň zavádíme dva poloměry: hlavní poloměr  $R$  a vedlejší poloměr  $a$ .



Obrázek 2.4: Geometrie toroidální konfigurace. Převzato z [5].

## Tokamak

V současnosti jedním z nejslibnějších zařízení pro realizaci termonukleární fúze je tokamak. Klíčovou výhodou tokamaku je delší doba udržení plazmatu v řádech několika sekund. Tokamak je původně ruská myšlenka a jeho název je zkratkou ruských slov "Toroidální komora a magnetické cívky"<sup>5</sup> a napovídá základní podobu tohoto zařízení (obrázek 2.5). Prstencová komora je ovinutá cívkami, které vytvářejí toroidální magnetické pole. Samotné toroidální pole ale k udržení plazmatu nestačí. Velikost Larmorova poloměru se na vnitřní a vnější straně prstence liší, což způsobuje rozdělení náboje a následný drift částic od hlavní osy [14]. Proto je tokamak umístěn na transformátorovém jádře, které indukují proud v plazmatu. Indukovaný proud protékající v toroidálním směru vytváří poloidální pole, jehož velikost je přibližně 100krát menší než velikost pole toroidálního [5]. Sečtením těchto dvou polí vznikne pole helikální. Silokřivky výsledného pole mají tvar šroubovice. Pro stabilizaci plazmatu se ještě využívají vnější

<sup>4</sup>První stěnou je označována vnitřní stěna reaktoru, která je v přímém kontaktu s plazmatem [12].

<sup>5</sup>"TORoidalnaja KAMera i MAgnitnyje Katuški"

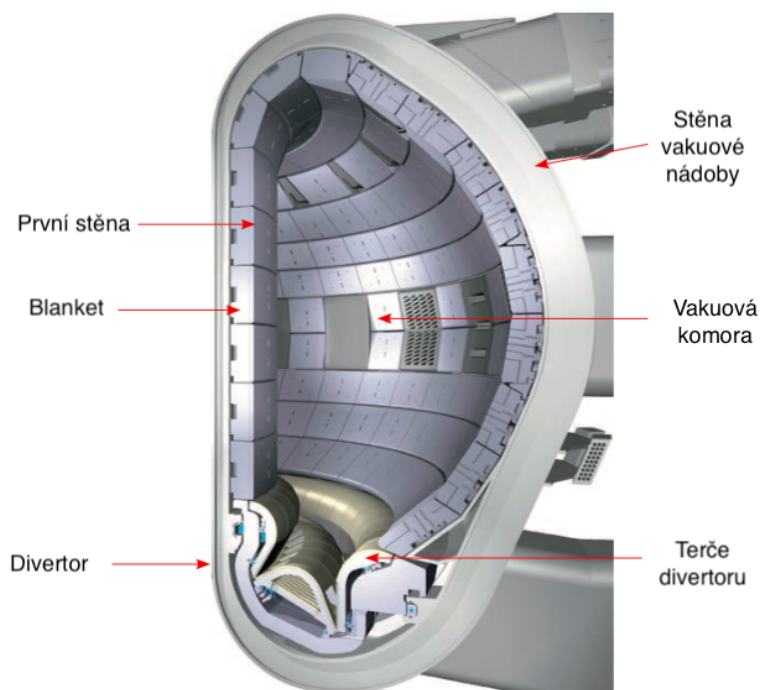




Parametr vyjadřující podíl hydrostatického tlaku plazmatu a tlaku magnetického pole se nazývá faktor  $\beta$  [12].

$$\beta = \frac{2\mu_0 p}{B^2} \quad (2.4)$$

$B$  je magnetická indukce,  $p$  je tlak plazmatu a  $\mu_0$  je permeabilita vakua. Ačkoliv byly snahy vytvořit zařízení s  $\beta \approx 1$ , tokamaky kvůli stabilitě pracují typicky s hodnotami pouze několika procent [12]. Bylo zjištěno, že z hlediska zvyšování faktoru  $\beta$  je výhodnější průřez komory ve tvaru písmene D. Také bylo zjištěno, že doba udržení závisí na okrajových podmínkách plazmatu. První generace tokamaků z tohoto důvodu používala clonu zvanou limiter, která vymezovala povrch plazmatu a byla v přímém kontaktu s ním. Tato varianta však nebyla ideální, jelikož erozí limiteru se do plazmatu uvolňovaly nečistoty. Proto bylo vytvořeno nové zařízení, nazývané divertor. Na divertorové terče jsou vhodnou konfigurací cívek odchylovány magnetické siločivky na okraji plazmatu. Divertor umožňuje odčerpávání jak nečistot ze stěn reaktoru, tak odpadních produktů fúzní reakce [12]. Tím se zlepšuje udržení energie. Nevýhodou divertoru je složitost jeho konstrukce a fakt, že zabírá místo v prstencové komoře.



Obrázek 2.6: Příčný řez vakuovou nádobou tokamaku. Jedná se o rozestavěný tokamak ITER. Převzato z [11].

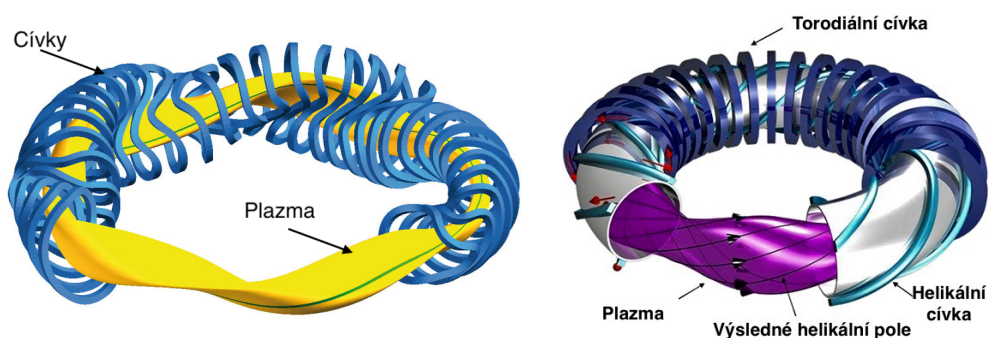
Palivo je do komory doplňováno ve formě zmrazených tabletek vodíku. Tyto tabletky musí být do plazmatu vstřelovány velkou rychlostí, aby se neodpařily na kraji plazmatu a dolétly až do nejteplejších oblastí [5].

Tokamaky dnes představují nejlépe probádanou cestu k realizaci termonukleární fúze. V současné době se dokončují práce na mezinárodním projektu ITER, budoucím největším fúzním zařízením na světě, které bude sloužit k experimentálnímu ověření současných technologií a jejich vy-

lepšování. Dále otestuje technologie, které by se v budoucnu mohly využít ve fúzní elektrárně [4]. Problémům, kterým stále tato fúzní zařízení čelí, se věnuje 5. kapitola. O perspektivách do budoucna, jako je výše zmíněný projekt ITER, pojednává kapitola číslo 6.

### Stelarátor

Na rozdíl od tokamaku, výsledné magnetické pole stelarátoru je plně dáno uspořádáním vnějších cívek. Toho lze docílit různými způsoby, některé z nich zobrazuje obrázek 2.7. Pro helikální tvar magnetického pole tudíž není nutné, aby plazmatem procházel proud. To znamená, že stelarátor může pracovat v kontinuálním režimu a nedochází k proudovým nestabilitám. I proto stále probíhá výzkum těchto zařízení a není vyloučeno, že se tato koncepce použije pro výstavbu termojaderné elektrárny [12]. Realizace stelarátoru je ale velmi náročná na výpočet průběhu magnetického pole a následné zhotovení cívek nepravidelných tvarů. Konstrukce stelarátoru je tedy oproti tokamaku, který je dokonale symetrický okolo hlavní osy, podstatně složitější [14]. Stelarátory pro svoji činnost potřebují velký (větší než tokamaky) vnější výkon na ohřev plazmatu. Doba udržení je nižší než u velkých tokamaků. Nejlepších výsledků v současné době dosahují supravodivé stelarátory, např. Wendelstein W7-X v Německu nebo LHD v Japonsku [4]. Obecně lze však tvrdit, že tokamaky mají nad stelarátory na cestě k řízené termojaderné fúzi vývojový náskok.



Obrázek 2.7: Vlevo: klasické rozložení stelarátoru, vpravo: modulární stelarátor. Převzato z [21].

## 2.2 Inerciální udržení

Inerciální udržení (Inertial confinement fusion, ICF) je naprosto odlišným přístupem k dosažení řízené termojaderné fúze. Tato koncepce nevyužívá žádných vnějších polí ke zvýšení doby udržení, ale pouze setrvačnosti (latinsky inercie) horkého paliva, odtud název inerciální udržení [1]. Cílem je palivo zahřát a stlačit na obrovské hustoty tak rychle, že dojde k zažehnutí fúzních reakcí ještě před tím, než se palivo začne rozpínat. Právě setrvačnost paliva se snaží této explozi zabránit. Množství paliva musí být přizpůsobené tomu, že exploze nesmí zničit okolní prostor,

aby k "mikroexplozím" mohlo docházet opakovaně [12]. Palivo, deuterium a tritium v pevné formě, je tvarováno do kuličky o poloměru několika milimetrů, označované jako pelet.

Lawsonovo kritérium (rovnice (1.7)) se pro fúzi s inerciálním udržením často udává v jiném tvaru. Lze zavést předpoklad, že k ukončení fúzních reakcí dojde, když se poloměr palivové kuličky rozpínáním zvětší o 25 % [12]. Potom pro dobu udržení energie platí [12]:

$$\tau_E = \frac{r}{4 v_T}. \quad (2.5)$$

Rozpínání paliva zde charakterizuje střední tepelná rychlost iontů po zapálení  $v_T$  a  $r$  je poloměr palivové kuličky před zapálením. Lawsonovo kritérium pro inerciální fúzi se uvádí v tomto tvaru:

$$\rho r \geq f'(T), \quad (2.6)$$

kde  $r$  je poloměr a  $\rho$  je hustota v  $\text{kg m}^{-3}$ . Na pravé straně nerovnosti se potom vyskytuje přepočítaná funkce teploty  $f'(T)$  pomocí převodních konstant. Užívaná terminologie oproti kontinuálnímu hoření reakce se zde také liší. Fúzní zisk  $Q$  je dán podílem celkové energie uvolněné při zapálení a energie dodané palivovému terčíku. Pro zapálení je v tomto případě důležitá hodnota  $Q = 1$  (v kontinuálním hoření okamžikem zapálení míníme  $Q \rightarrow \infty$ ). Aby reaktor vyrobil dostatek energie pro všechny systémy nutné k jeho chodu, je nutné dosáhnout přibližně  $Q \approx 100$ . Při takovém fúzním zisku je hodnota Lawsonova kritéria přibližně:

$$\rho r \geq 50 \text{ kg m}^{-2}. \quad (2.7)$$

Běžně udávaná hodnota hustoty zmrazené D-T směsi je  $\rho = 250 \text{ kg m}^{-3}$ . To by odpovídalo palivové kuličce o poloměru 0,25 m a celkové hmotnosti 13 kg. Takové množství by vedlo k uvolnění energie přibližně 800 000 tun ekvivalentu TNT [4]. Bezpečné množství paliva se pohybuje v jednotkách miligramů. Pro splnění podmínky 2.7 je tedy nutné mnohonásobně<sup>6</sup> zvýšit hustotu palivové směsi. Toho je dosaženo stlačováním.

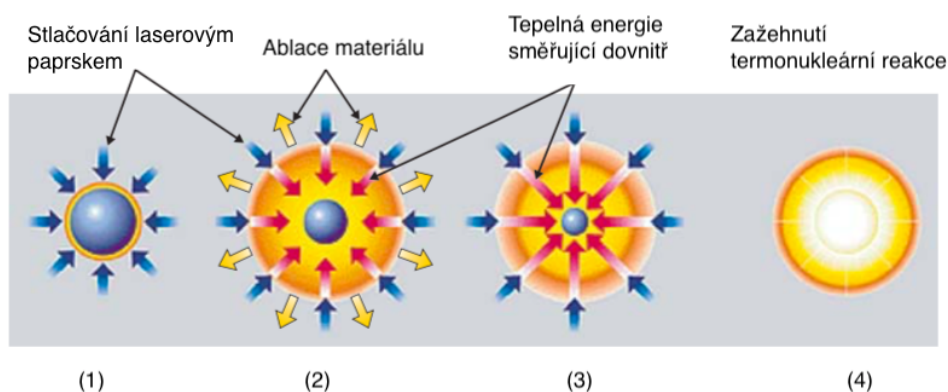
Zdrojem obrovského množství energie, které lze během velmi krátkého okamžiku fokusovat na malý terč, jsou v současné době zejména lasery. Laserový systém v NIF (National Ignition Facility, viz kapitola 4), používající 192 laserů, dodá terčíku až 1,8 MJ energie během několika nanosekund [12].

Průběh inerciální fúze lze popsat pomocí 4 základních kroků, schématicky zobrazených na obrázku 2.8.

1. Obrovský tok energie dopadá na vnější plášť palivového terče. Absorpcí energie se materiál na povrchu mění v plazma.
2. Vnější slupka se odpařuje, tento proces se nazývá ablace. Horké plazma expanduje směrem ven rychlostí v  $100\text{-}1000 \text{ km s}^{-1}$  [1].

---

<sup>6</sup>až 1000krát



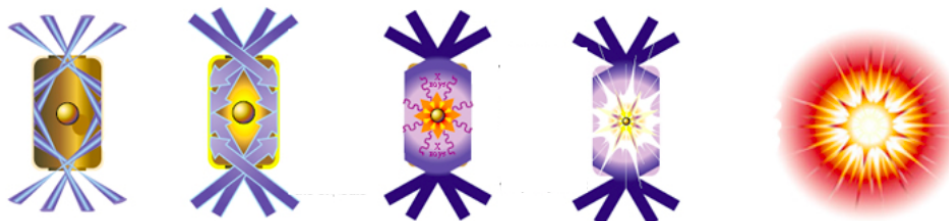
Obrázek 2.8: Inerciální fúze s přímým zapálením. Převzato z [12].

3. Předchozí akce způsobí reakci- vznikne tlaková vlna, která urychlí neodpařenou část kuličky směrem dovnitř. Dochází k implozi D-T směsi vedoucí také ke zvýšení teploty.
4. Je-li dosaženo dostatečné hustoty a teploty paliva, dojde k zapálení fúzních reakcí.

Přístupů k fúzi s inerciálním udržením je několik. Jedná se o přímé a nepřímé zapálení a tzv. rychlé zapálení.

### 2.2.1 Přímé zapálení

Průběh přímého zapálení je shodný s průběhem zobrazeným na obrázku 2.8. Tento způsob klade velké nároky na výrobu palivové kuličky a rovnoměrnost ozáření. Nehomogenní povrch či nerovnoměrné ozáření vede k nerovnoměrné ablací kuličky. Vlivem rozdílně velkých sil působících z různých směrů pak kulička vystřelí ze svého místa [4].



Obrázek 2.9: Průběh inerciální fúze s nepřímým zapálením. Převzato z [22].

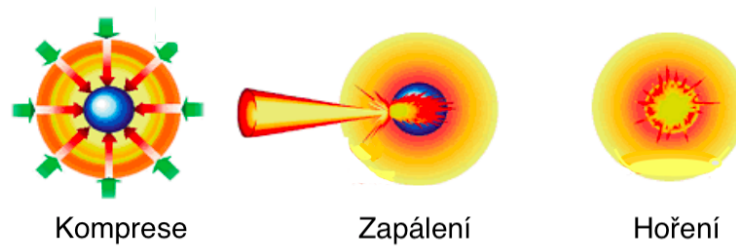
### 2.2.2 Nepřímé zapálení

Palivový terčík je vložen do válcové dutinky, označované jako *hohlraum*, která je vyrobena typicky ze zlata. Laserové svazky jsou fokusovány do dutinky (viz obrázek 2.9). Obrovská dopadající energie způsobí vypařování vnitřku dutinky, který se stává zdrojem rentgenového záření. Rentgenové záření se v dutince odráží a dopadá na palivovou kuličku rovnoměrně z různých

směrů [12]. Kratší vlnové délky rentgenového záření také způsobují lepší ablaci. Nepřímé zapálení je velice slibný směr dosažení fúze s inerciálním udržením. Perspektivní zařízení tohoto typu jsou NIF a Laser Mégajoule [4].

### 2.2.3 Rychlé zapálení

Jednou z hlavních nevýhod inerciální fúze je množství energie, které je nutné lasery terčičku dodat. Tato koncepce by mohla toto množství snížit. Ohřátí a stlačení se při rychlém zapálení dějí ve dvou krocích. Terčičk je nejdříve stlačen nanosekundovým laserovým systémem. V momentě, kdy materiál dosáhne maximální hustoty, druhý, femtosekundový, laserový systém vyšle puls, který má způsobit zapálení. Oproti zařízení NIF, které musí dodat terčičku až 1,8 MJ energie, zařízení HiPeR, využívající rychlé zapálení, potřebuje vygenerovat pouze 200 kJ v první a 70 kJ ve druhé fázi. Předpokládaný fúzní zisk je dokonce ještě větší než u NIF [1].



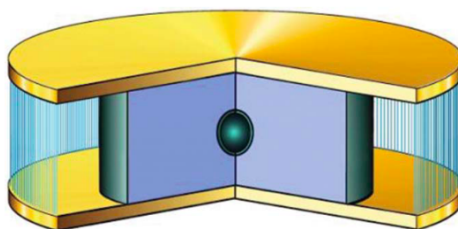
Obrázek 2.10: Průběh inerciální fúze s rychlým zapálením. Převzato z [23].

### 2.2.4 Alternativní mechanismy zapálení

Často používané velké neodymové lasery mají nízkou účinnost. Méně než 1 % elektrické energie je pomocí laseru přeměněno na ultrafialové záření, které je následně zaměřeno na terčičk [12]. Při nepřímém zapálení navíc dochází k dalším ztrátám energie v dutince. Od laserů také požadujeme vysokou opakovací frekvenci, abychom se co nejvíce přiblížili kontinuálnímu chodu. Místo laserů by se mohly používat svazky urychlených částic z urychlovačů, které jsou levnější, účinnější a jednodušší než lasery. Svazky částic je však obtížné zaměřit na malý terč [4].

Intenzivní rentgenové zařízení by také mohlo vznikat pomocí Z-pinčového výboje v tenkých wolframových drátcích (více o Z-pinči v příští podkapitole). Takový koncept je testovaný v Z machine a princip jeho funkce je následovný. Kondenzátory uchovávající obrovské množství elektrické energie se současně vybijí, tím vytvoří proudový impulz o velikosti až desítek MA. Tenké drátky se průchodem proudu vypaří a vytvoří plazma, které je urychlováno směrem k ose, kde se nachází palivová kulička. Na obrázku 2.11 je zobrazena koncepce tzv. dynamického režimu dutiny. Implodující wolframová vlákna (rozložená po povrchu pláště válce) vytvoří plazma, které je urychlováno do středu a vypařuje pěnu. Tím dojde k vytvoření dutinky analogické k dutince hohlraum, která odráží rentgenové záření [12].





Obrázek 2.11: Nepřímé zapálení pomocí Z-pinčového výboje, tzv. dynamický hohlraum. Převzato z [12].

## 2.3 Magneto-inerciální udržení

Magneto-inerciální udržení (Magneto-Inertial fusion, MIF) je kombinací výše zmíněných způsobů udržení. Tento koncept využívá, již vysvětleného, pinč efektu (obrázek 2.1). Je-li procházející proud dostatečně velký, jinými slovy, převažuje-li magnetický tlak nad tlakem kinetickým, dochází ke kompresi plazmatu a jeho ohřátí. Pinče jsou přírodě vlastní, na rozdíl od tokamaků a laserů. Lze je pozorovat např. při bleskovém výboji.

### 2.3.1 Lineární pinče

Výhodou lineárních pinčů je zejména jednoduchost jejich konstrukce. Kvůli potřebě obrovských proudů<sup>7</sup> však mohou pinče pracovat pouze v impulzním režimu [14], což je pro využití fúze v energetice nevýhodné. Existuje mnoho konfigurací pinčů, z nichž některé jsou například:

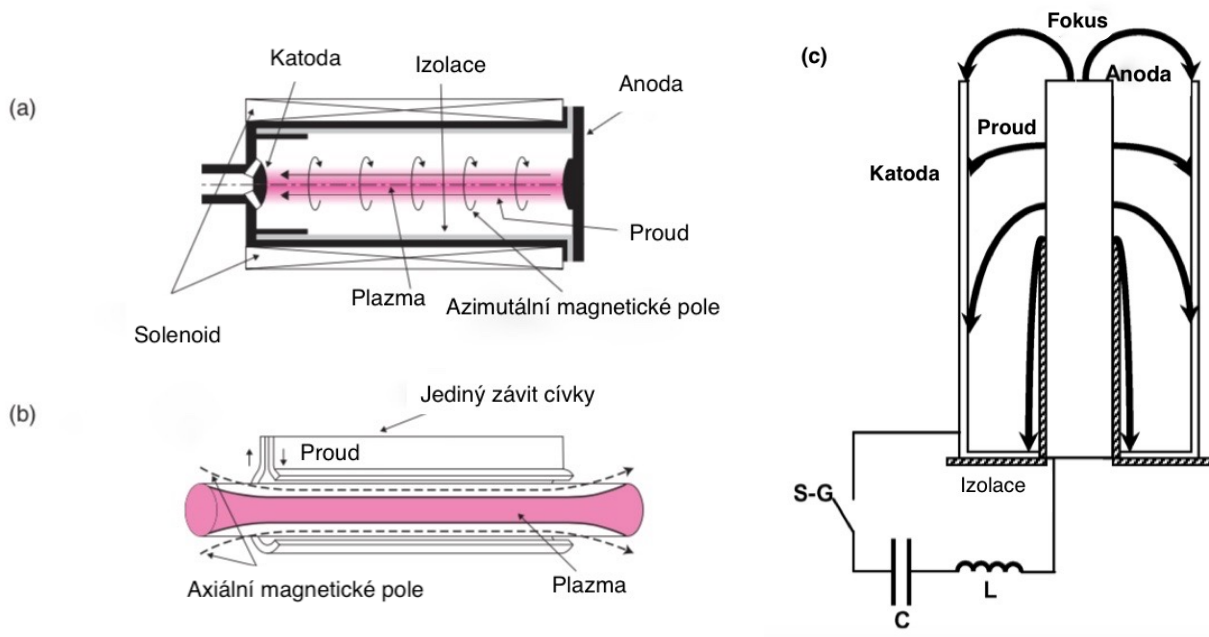
- **Z-pinč**

V této konfiguraci teče proud mezi anodou a katodou axiálně (ve směru osy  $z$ ) a vytváří kolem sebe azimutální magnetické pole. Uspořádání je patrné z obrázku 2.12. Záměrem je vytvořit co největší proud, který směr paliva ohřeje na vysoké teploty a zároveň stlačí na vyšší hustoty. Dosažení termionukleárních podmínek však brání nestability, které seškrtní a přetrhnou proudový sloupec ještě před tím, než teplota plazmatu stoupne na dostatečnou pro termionukleární fúzi. Nový impuls do výzkumu Z-pinčů nedávno přineslo zařízení Z Machine (více v 4. kapitole) [4]. Nyní jsou Z-pinče zkoumány zejména v souvislosti s produkcí neutronů a intenzivního rentgenového záření, které může zapálit inerciální fúzi [12].

- **Plazmatický fokus**

Plazmatický fokus, jehož uspořádání ukazuje obrázek 2.12, je variantou Z-pinče, která byla intenzivně studována v 60. letech minulého století. Dnes se plazmatické fokusy využívají zejména jako zdroj hustého plazmatu a neutronů, vhodný pro základní výzkum v oblasti fyziky plazmatu [12].

<sup>7</sup>až desítky MA



Obrázek 2.12: (a) Z-pinč, převzato z [12]. (b)  $\theta$ -pinč, převzato z [12]. (c) Plazmatický fokus, převzato z [24].

- $\theta$ -pinč

V tomto uspořádání teče elektrický proud v azimutálním směru, a vytváří tak axiální magnetické pole. Konfigurace theta-pinče je patrná z obrázku 2.12. Díky kratší proudové dráze dochází k proudovým nestabilitám v menším měřítku, což přispívá k celkovému vyššímu stupni stability systému [14]. Fúzní plazma navíc není znečišťováno erozí elektrod jako u Z-pinče.  $\theta$ -pinč SCYLLA v Los Alamos byl v roce 1958 prvním systémem pracujícím na principu magnetického udržení, který dosáhl velmi horkého fúzního plazmatu a termoneukleárních neutronů [4].

### 2.3.2 Toroidální pinče

Toroidální pinč je podobný tokamaku. Toroidální magnetické pole je však mnohem slabší a hlavní roli zde hraje poloidální pole vytvářené proudem tekoucím v toroidálním směru. Dosáhnout Lawsonova kritéria se tato konfigurace snaží pomocí vysokého elektrického proudu, který je, stejně jako u tokamaku, indukován v plazmatu. Elektrický proud způsobí pinč efekt. Ve stlačeném plazmatu se zvýší hustota i teplota. V současnosti nejvýznamnější zařízení tohoto druhu, toroidální pinč v italské Padově, udrží plazma až 0,4 sekundy. Zásadní výhodou toroidálních pinčů je vysoký faktor  $\beta$ . Reaktor pracující na tomto principu by mohl mít menší rozměry a nemusel by potřebovat dodatečný vnější ohřev. K ohřátí plazmatu by stačil ohmický ohřev indukovaným proudem. Tyto možnosti jsou ovšem pouhými spekulacemi. V současné době toroidální pinče silně zaostávají za stellarátory a tokamaky [4].



## Kapitola 3

# Historie výzkumu řízené termonukleární fúze

Slunce uvolňuje obrovské množství energie po miliardy let a ještě na začátku 20. století pro to neexistovalo přesvědčivé vysvětlení. Ke zformulování současné představy vedly zejména tyto 3 kroky. Prvním krokem byla známá Einsteinova dedukce z roku 1905 o ekvivalenci energie a hmoty. Druhým krokem, který přišel zhruba o 10 let později, bylo měření Francise Astona. Přesné měření atomových hmotností prvků ukázalo, že celková hmotnost atomu je nepatrně nižší než hmotnost jednotlivých částic, ze kterých se atom skládá. Tato 2 klíčová zjištění vedla Arthura Eddingtona a další vědce k myšlence, že hmota může být ve hvězdách přeměněna v energii, když se 4 atomy vodíku sloučí do jednoho atomu helia. Až kvantová mechanika však, koncem 20. let minulého století, umožnila kompletní porozumění fyziky jaderné fúze [12]. K přesnému poznání procesů, které Eddington postuloval, došlo až v roce 1939, když Hans Bethe popsal *proton-protonový cyklus* (viz obrázek 1.3) [25]. Po té bylo velmi přirozené klást si otázku, jestli je možné dosáhnout fúze v pozemských podmínkách, a pokud ano, zda-li budeme tuto energii schopni využít.

V roce 1934 došlo k první fúzní reakci v pozemské laboratoři. Byl to experiment E. Rutherforda, M. L. E. Oliphana a P. Hartecka na univerzitě v Cambridge, při němž došlo ke sloučení jader deuteria na urychlovači za vzniku helia a neutronů [5]. Kromě mírového výzkumu se začal vyvíjet také výzkum vojenský. V roce 1952 byla odpálením první vodíkové bomby opět demonstrována obrovská energie, kterou lze z jádra pomocí fúzních reakcí uvolnit [11].

Historie fúzního výzkumu je velice spletitá. Doposud vzniklo mnoho konceptů zařízení, které by mohly vést ke zvládnutí řízené termonukleární syntézy. V následujícím textu se zaměříme na vývoj nejdůležitějších z nich a bude zmíněna historie výzkumu ve světě i u nás. Informace pro tuto kapitolu byly čerpány z literatury [12, 26, 27, 28].

### 3.1 Tokamaky, stelarátory a pinče

Výzkum řízené termojaderné fúze po 2. světové válce probíhal utajovaně. Státy Německo, Japonsko a Francie, které válku prohrály, zůstaly pozadu. Vedoucími mocnostmi ve výzkumu se tak staly státy vítězné, a sice Spojené státy americké, Sovětský svaz a Spojené království. Nejprve se zaměříme na výzkum v právě zmíněných státech odděleně. Mezinárodní spolupráce byla totiž započata až v roce 1958 na 2. Mezinárodní konferenci o mírovém využití atomové energie v Ženevě, kdy došlo k odtajnění výzkumů.

#### 3.1.1 Spojené království

Spojené království jako první zahájilo systematický výzkum jaderné fúze. Velkou výhodou byla tradice prvotřídního výzkumu fyziky atomového jádra. Vždyť J. J. Thomson, objevitel elektronu, F. Aston, objevitel hmotnostního deficitu jádra, A. Eddington, autor hypotézy o slučovací reakci na Slunci, E. Rutherford, mimo jiné autor teorie struktury atomu, a mnoho dalších významných vědeckých kapacit té doby působilo ve Spojeném království. První hmatatelné výsledky přinesla dvojice G. Thomson a M. Blackman, když si v roce 1946 zaregistrovali patent na termojaderný reaktor. Dnes již víme, že tento prvotní koncept by nefungoval. Tato práce nicméně inspirovala další výzkum, a to zejména tzv. pinčů. Paralelně probíhala iniciativa i v jiných laboratořích, která vyústila v postavení malého Z-pinče v roce 1948 v Imperial College v Londýně. (Pinčefekt byl objeven v roce 1905 v Austrálii, kde se kovová trubka stlačila průchodem blesku.) Vedoucí osobností ve výzkumu pinčů byl Peter Thonemann, který na univerzitě v Oxfordu stavěl měděné uzavřené toroidální nádoby, ve kterých elektromagnetickou indukci budil proud způsobující pinčování. Tento koncept se nepodařilo utajit, a tak se v roce 1951 zkoumaly pinče již v nejméně 4 laboratořích: Imperial College v Londýně, Clarendon Laboratory v Oxfordu, Kurčatov v LIPAN a Tuck v Los Alamos National Laboratory. Úspěchy Thonemanna vedly ke stavbě největšího fúzního zařízení své doby, toroidálního pinče ZETA v Harwellu, který byl spuštěn v roce 1957. Již během prvních týdnů experimentů bylo dosaženo proudů v řádech stovek kA a velkého počtu neutronů. Veřejnou aférou se stalo prohlášení ředitele Harwellu v roce 1958 o tom, že neutrony získané na zařízení ZETA jsou na 90 % termojaderného původu. Netrvalo však dlouho a jeho tvrzení bylo vyvráceno.

#### 3.1.2 Sovětský svaz

Situace po 2. světové válce v Sovětském svazu nebyla pro vědecký výzkum ideální. Sovětský svaz se navíc stále snažil dohnat Spojené státy, které zatím jako jediné uměly vyrobit atomovou bombu. Velice nečekaně však v roce 1950 přichází dopis Olega Lavrentěva. Lavrentěv byl v té době seržant Rudé armády, který bez vysokoškolského vzdělání navrhl konstrukci vodíkové bomby a termonukleárního reaktoru pracujícího na principu elektrostatického udržení. Koncept termojaderné reakce ve zředěném plazmatu zaujal Sacharova, který dostal dopis k posouzení.

Společně s Tammem vypracovali návrh torodiálního Magnetického termojaderného reaktoru (MTR). Sacharov je autorem myšlenky stočit siločáry magnetického pole do tvaru šroubovice složením toroidálního a poloidálního pole, čímž se omezí toroidální drift částic plazmatu. Velký impulz do výzkumu, nejen v SSSR, přinesla zpráva z Argentiny. Rakouskému fyziku Ronaldu Richterovi se zde údajně podařilo uvolnit energii z jádra fúzí. Detaily nebyly nikdy zveřejněny a později bylo zjištěno, že tvrzení bylo nepravdivé. To v té době však v SSSR netušili a chtěli Argentině odpovědět. Proto byl zahájen projekt na výstavbu MTR, na němž se podíleli velké osobnosti tehdejšího výzkumu, jako Arcimovič, Kurčatov, Sacharov a Tamm. Pozornost byla věnována i pinčové koncepci. I v Sovětském Svazu zaznamenali na pinčích neutrony, ovšem stejně jako v UK, i zde se záhy zjistilo, že nešlo o neutrony termojaderné. Výzkum se tak opět vrátil ke koncepci MTR a v roce 1955 bylo postaveno první zařízení tokamakového typu s keramickou vakuovou nádobou, která se však ukázala jako nevhodná. V roce 1957 byl postaven tokamak T-1, jehož vakuová nádoba byla z nerezové oceli. Zpřístupnění informací o výzkumu USA a UK v roce 1958 pomohlo k dalšímu vylepšení. Tokamak T-2, po inspiraci americkým stelarátorem B-2, použil clonu zvanou limiter a ohřev stěn. V roce 1962 se podařilo udržet stabilní plazma po dobu 2 ms. Ještě stabilnější plazma a vyšší teploty přinesl tokamak T-3. Američané nemohli uvěřit, že T-3 dosahuje teplot až 8 milionů stupňů Celsia. Arcimovič tak pozval fyziky z Anglie, aby na T-3 provedli měření novou metodou Thompsonova rozptylu. Jejich výsledky ukázaly, že T-3 dosahuje ještě lepších parametrů, než se předpokládalo. Éra tokamaků byla tímto odstartována. Tokamak se tak stává vedoucím zařízením ve výzkumu řízené termonukleární fúze.

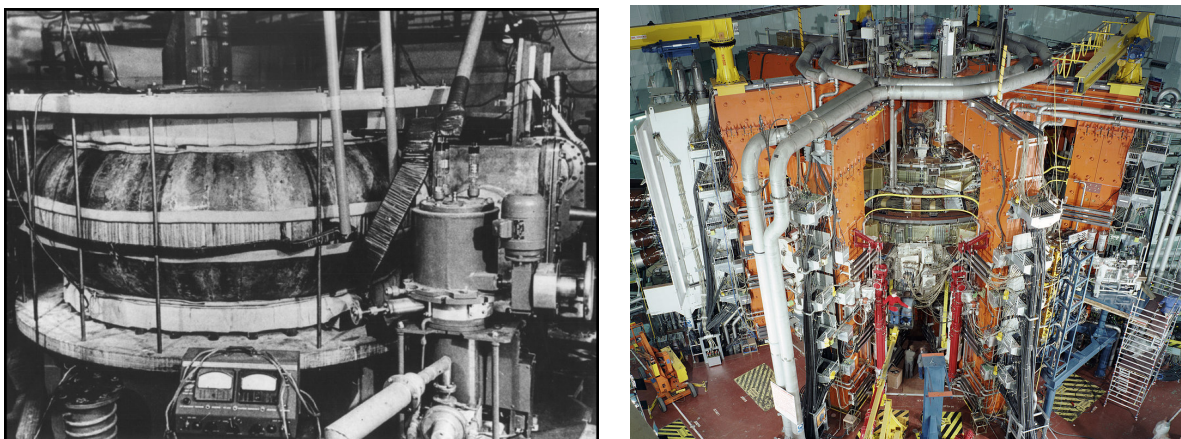
### 3.1.3 Spojené státy americké

Výzkum ve Spojených státech amerických byl nejprve směřován k neřízené fúzní reakci, tj. k vytvoření vodíkové bomby. Systematický výzkum řízené fúze byl, stejně jako v Rusku, iniciován informací o "úspěšném" výzkumu Ronalda Richtera v Argentině z roku 1951. Této zprávě však nevěřil americký astronom Lyman Spitzer, který zanedlouho přichází s originálním zařízením zvaným stelarátor. Konfigurace cívek, která má zajistit magnetické udržení plazmatu, je velmi složitá. První stelarátory měly například tvar osmičky. Fúzní výzkum v USA se věnoval i dalším zařízením. V Los Alamos National Laboratory se studovaly theta-pinče a v Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) magnetická zrcadla. Velkým milníkem byla detekce termojaderných neutronů v roce 1958 na lineárním theta-pinči v Los Alamos.

### 3.1.4 Mezinárodní spolupráce

Již v 50. letech minulého století bylo zřejmé, že postavení fúzního reaktoru bude daleko obtížnější než postavení reaktoru štěpného. Odtajnění výzkumu v roce 1958 napomohlo ke zrychlení pokroku. Od té doby došlo k mnoha vylepšením původních konceptů. Princeton Large Torus, na němž byly experimenty zahájeny v roce 1975, byl prvním tokamakem, ve kterém hodnota

proudu plazmatem přesáhla 1 MA. Díky dodatečnému ohřevu pomocí dvou energetických neutrálních svazků dosáhl teploty 85 milionů stupňů Celsia. V Sovětském svazu byly v tokamaku T-7 poprvé použity supravodivé cívky. V roce 1982 byl na německém tokamaku Asdex objeven H-mód neboli režim zvýšeného udržení energie. Sovětský tokamak T-8 byl prvním tokamak, který měl průřez vakuové komory ve tvaru D. Výsledky ze 70. let ukazovaly, že čím větší je objem plazmatu, tím vyšší je teplota a lepší udržení. To ale také znamená nákladnější zařízení, které samostatný stát může jen málokdy financovat. I proto mezinárodní spolupráce vyústila ve vybudování evropského tokamaku JET (Joint European Torus), dosud nejúspěšnějšího fúzního experimentálního zařízení. Projektové práce byly zahájeny v roce 1973 a o 10 let později začaly první experimenty. JET dosáhl v roce 1997 rekordního fúzního špičkového výkonu 16,1 MW a faktoru zesílení  $Q = 0,65$ . Dalším prvenstvím JET bylo vyzkoušení dodávky a zpracování tritia v uzavřeném okruhu. V roce 1982 byl v USA spuštěn velký tokamak TFTR, současník a soupeř JET. V roce 1994 se zde podařilo uvolnit 10 MW fúzního výkonu. Centrální teplota plazmatu dosahovala 510 milionů stupňů. Dalšími velkými tokamaky v 80. letech byly japonský tokamak JT-60, Tore Supra ve Francii a T 15 v Rusku. Vyvrcholením mezinárodní spolupráce a mnoha desetiletí výzkumu by měl být mezinárodní tokamak ITER. Více o perspektivách do budoucna bude zmíněno v 6. kapitole.



Obrázek 3.1: Vlevo: První tokamak- sovětský tokamak T-1, převzato z [25]. Vpravo: tokamak JET, převzato z [29].

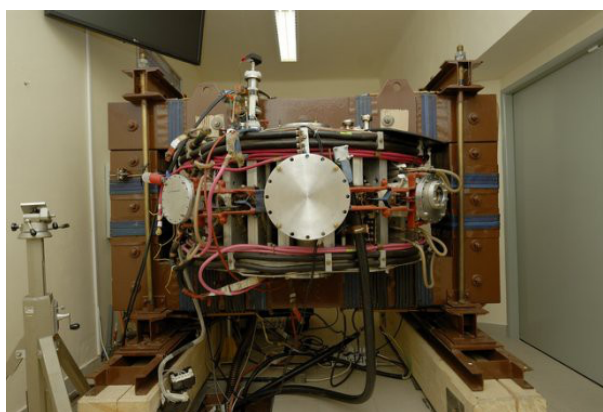
### 3.2 Inerciální fúze

Počátky výzkumu fúze s inerciálním udržením se datují do 60. let minulého století. V tomto období byl totiž vyvinut laser, zařízení, které je schopno dodat velké množství energie v krátkém čase. První funkční laser byl postaven v roce 1960 a již v roce 1963 N. Basov a A. Prokhorov z Lebeděvova institutu v Moskvě přichází s myšlenkou dosáhnout fúze pomocí ozařování malého terčíku laserem. Tento nápad vyvolal vlnu nadšení. Bylo však nutné, aby lasery měly větší výkon. Termonukleární neutrony se podařilo naměřit v roce 1968 v Moskvě a v roce 1970 ve Francii.

Protože modely pro výpočet komprese a zahřátí paliva jsou velmi podobné jako výpočty pro vodíkovou bombu, zůstal výzkum střeženým tajemstvím. V roce 1975 byl v Lawrence Livermore National Laboratory, předním výzkumném pracovišti i v současné době, navržen nový způsob fúze s inerciálním udržením, a sice nepřímé zapálení. Ve stejném zařízení byla později vyvinuta i další metoda, tzv. rychlé zapálení.

### 3.3 Historie v ČR

Několikrát výše zmiňovaná konference v Ženevě v roce 1958 byla klíčová i pro naši republiku. Možnost získání bezpečné a ekologické energie z prakticky nevyčerpatelného zdroje nadchla nejednoho zástupce československé delegace. Tři měsíce po konferenci byl v rámci Československé akademie věd založen Ústav vakuové elektroniky (po roce 1963 Ústav fyziky plazmatu ČSAV), jehož úkolem bylo koordinovat výzkum řízené termionukleární fúze. Zpočátku se prováděly experimenty zejména na kruhových urychlovačích elektronů, betatronech. Díky konferenci v Karlových Varech, kterou navštívil Arcimovič, významná osobnost fúzního výzkumu, byla v roce 1964 podepsána dohoda o spolupráci mezi Atomovou komisí ČSSR a Státním výborem pro atomovou energii SSSR. V září roku 1977 byl v Praze uveden do provozu tokamak TM-1 VČ, který byl zapůjčen Ústavem atomové energie I. V. Kurčatova v Moskvě. Jméno tokamaku se v častu měnilo, VČ naznačovalo ohřev částic vysokofrekvenčním polem. Po změně ohřevu na ohřev mikrovlnami byl tokamak přejmenován na TM-1-MH. V roce 1985 došlo k přestavbě a tokamak tentokrát získal jméno CASTOR. V současné době se 3. nejstarší tokamak nachází na půdě Fakulty jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT v Praze pod jménem GOLEM. Jeho unikátností je, že ho lze ovládat přes internet z celého světa. Stěžejním bodem výzkumu na tokamaku CASTOR

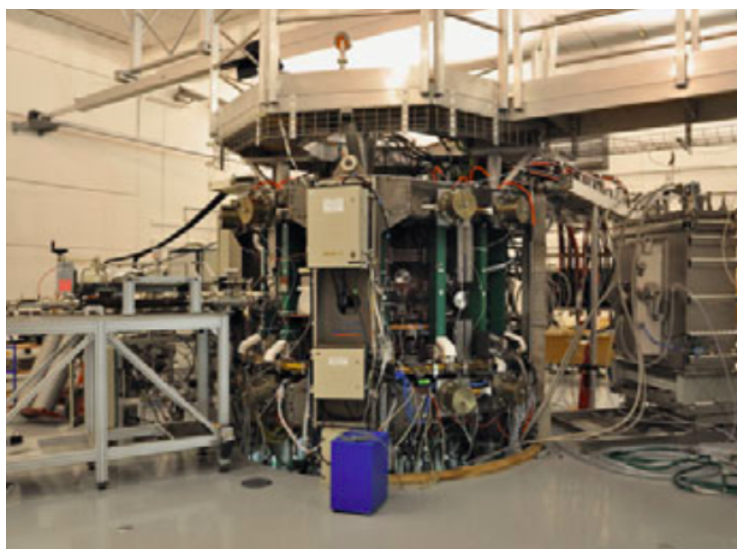


Obrázek 3.2: Tokamak GOLEM. Převzato z [30].

bylo studování neinduktivně buzeného elektrického proudu v plazmatu. Koncem 80. let se stal součástí mezinárodního konsorcia "Research Using Small Tokamaks". Ústav fyziky plazmatu se také zapojil do projektu velkého tokamaku T-15 v Rusku. Po roce 1989 se spolupráce se státy bývalého Světového svazu utlumovala a navázání kontaktu s předními evropskými laboratořemi trvalo téměř 10 let.

V roce 2000 dostala Česká republika možnost připojit se k evropskému programu EURATOM, který trval až do roku 2013. Po té evropské laboratoře založily konsorcium EUROfusion, v rámci něhož je koordinován a spolufinancován výzkum v členských zemích dodnes.

V roce 2007 byl do Prahy převezen tokamak COMPASS z Culham Science Centre v Anglii. Během 7 následujících let se tokamak zařadil do evropské špičky. V roce 2012 na něm bylo dosaženo H-módu. O 2 roky později byly na žádost ITER Organization provedeny experimenty, které pomohly vylepšit návrh první stěny reaktoru ITER. To byl velký úspěch skupiny pracující na COMPASS. Tokamak COMPASS má výhodu podobnosti s plánovaným tokamakem ITER.<sup>1</sup> Technologii řízené termionukleární fúze se začal od roku 1987 zabývat Ústav jaderného



Obrázek 3.3: Tokamak COMPASS. Převzato z [5].

výzkumu (ÚJV) Řež. V ústavu probíhaly například zkoušky tepelného namáhání a ozařování neutrony nebo testy první stěny tokamaku ITER. Fúzní výzkum se v roce 2002 soustředil do nově vzniklého Centra výzkumu Řež (CVŘ), ve kterém probíhá rozsáhlý projekt SUSEN. V rámci tohoto projektu se v Plzni vybudovalo zařízení HELCZA pro testování fúzních materiálů s vysokým tepelným tokem. Na tomto zařízení se budou testovat materiály pro tokamaky ITER a DEMO.<sup>2</sup>

V České republice máme zázemí i pro výzkum fúze jiné než s magnetickým udržením. Výzkum laserového plazmatu probíhá v ÚFP na Prague Asterix Laser System (PALS), jednom z největších laserů v Evropě. Na Fakultě elektrotechnické ČVUT probíhá výzkum Z-pinčů od roku 1964, kdy byl z rozhodnutí ředitele ÚFP dr. Seidela a vedoucího Katedry fyziky prof. Kracíka zahájen výzkum magnetických pinčů. Zde byl rovněž v roce 2000 zahájen výzkum fúzní D-D reakce. Tato experimentální zařízení slouží spíše k základnímu výzkumu v oblasti fyziky plazmatu. Větší pozornost současnému výzkumu v ČR bude věnována v podkapitole 4.4.

<sup>1</sup>Měřítko 1:10.

<sup>2</sup>Více o projektu ITER a DEMO ve 6. kapitole.

## Kapitola 4

# Současný stav výzkumu

Současnou výzvou fúzního výzkumu je dokázat, že řízená termonukleární fúze, jakožto zdroj energie, je technicky proveditelná. Pro experimenty, které se svými podmínkami přibližují budoucímu reaktoru, jsou potřebná velká, komplexní a drahá zařízení. Z tohoto důvodu je pro pokrok důležitá mezinárodní spolupráce. Na výzkumu řízené termonukleární fúze se v současné době podílí stovky světových laboratoří, jedná se o nejrozsáhlejší mezinárodní vědeckou spolupráci vůbec [31]. Jednou z významných organizací podporující fúzní výzkum je Mezinárodní agentura pro atomovou energii (IAEA) sdružující přes 50 členských států včetně České republiky. Aktivity IAEA na poli řízené termojaderné fúze jsou zaměřeny zejména na fyziku plazmatu, fúzní energii, technologie a materiály jak pro fúzi s magnetickým, tak s inerciálním udržením [32].

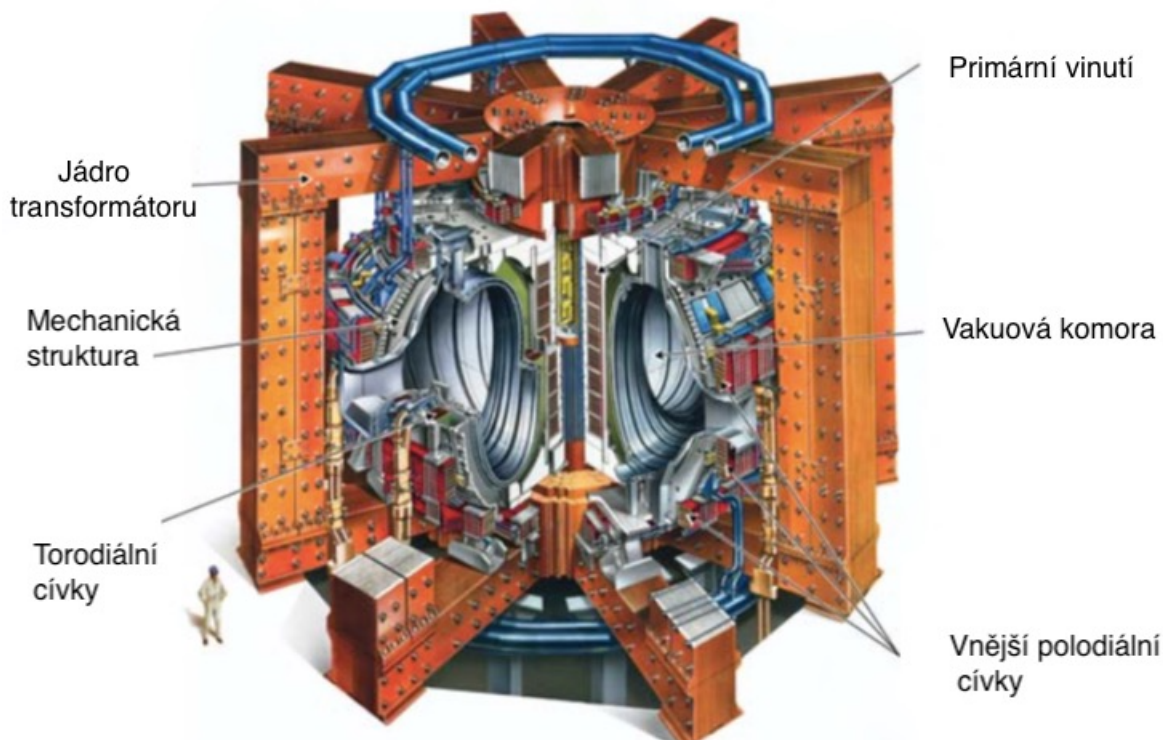
V této kapitole je zmíněn vždy jeden zástupce každého ze 3 přístupů k termojaderné fúzi, které byly vysvětleny ve 2. kapitole. Tedy zařízení pracující na principu fúze s magnetickým, inerciálním i magneto-inerciálním udržení plazmatu. Jedná se vždy o současné největší zařízení svého druhu. Poslední podkapitola je věnována soudobému stavu výzkumu řízené termonukleární fúze v České republice a speciálně na Katedře fyziky Fakulty elektrotechnické ČVUT.

### 4.1 JET

Současným největším tokamakem na světě je evropský JET (Joint European Torus), který stojí u vesnice Culham nedaleko Oxfordu ve Velké Británii. Rozhodnutí o postavení společného mezinárodního velkého tokamaku padlo v roce 1973. Cílem tohoto projektu bylo udržet a studovat plazma v podmínkách, které se přibližují podmínkám nutných pro termonukleární reaktor [33]. V roce 1979, kdy byl položen základní kámen, se projektu účastnilo 11 zemí: Belgie, Itálie, Lucembursko, Francie, Nizozemsko, Spolková republika Německo, Dánsko, Irsko, Švédsko, Švýcarsko a UK. O 4 roky později bylo v tokamaku vytvořeno první plazma [34]. Původním záměrem bylo postavit tokamak s proudem v plazmatu o velikosti 3 MA. JET během svého provozu dosáhl dokonce 7 MA [12]. V roce 1991 se JET stal prvním tokamakem, v němž byly prove-



deny pokusy se směsí deuteria a tritia. Při těchto experimentech byla zaznamenána produkce 1,7 MW energie [34]. Vakuová komora ve tvaru písmene D umožnila instalaci divertoru, který přispěl k dosažení ještě lepších výsledků. V roce 1997 při experimentech se směsí D-T se stal JET držitelem světového rekordu, když bylo v jednom výboji vyprodukováno 22 MJ fúzní energie a dosaženo 16,1 MW špičkového fúzního výkonu, a to po dobu několika sekund. Pro ohřev plazmatu bylo potřeba přibližně 25 MW. JET tak dosáhl rekordního faktoru zesílení  $Q = 0,65$ . Tyto experimenty navíc otestovaly zacházení s tritiem v uzavřeném cyklu a umožnily změřit ohřev alfa částicemi [12]. Další úspěšně otestovanou technologií, důležitou pro budoucí fúzní reaktor, se stala výměna divertoru ovládaná na dálku s použitím robotické paže. Díky podobnosti s plánovaným tokamakem ITER lze výsledky z JET extrapolovat a využít při jeho projektování. V tokamaku JET se kupříkladu testovaly materiály, které se plánují použít v tokamaku ITER, tj. první stěna z beryllia a divertor z wolframu [5]. Na roky 2019-2020 jsou naplánovány další experimenty se směsí D-T. Projekt JET se považuje za dosud nejúspěšnější fúzní experiment [34]. V současné době je JET využíván více než 40 evropskými laboratořemi, které spolupracují v rámci konsorcia EUROfusion<sup>1</sup>. K projektu přispívá přes 350 vědců a inženýrů z celé Evropy [34].



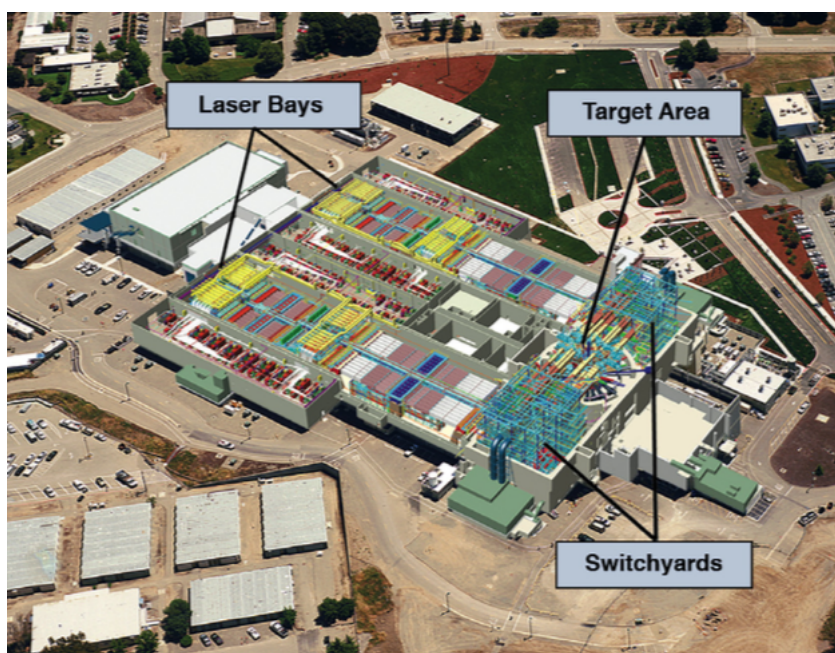
Obrázek 4.1: Tokamak JET. Převzato z [12].

<sup>1</sup>JET byl původně provozovaný EURATOM (Evropské společenství pro atomovou energii), později EFDA (Evropská dohoda o rozvoji fúze) [31]. Konsorcium EUROfusion (European Consortium for Development of Fusion Energy) vzniklo v roce 2014 jako následovník EFDA [5].



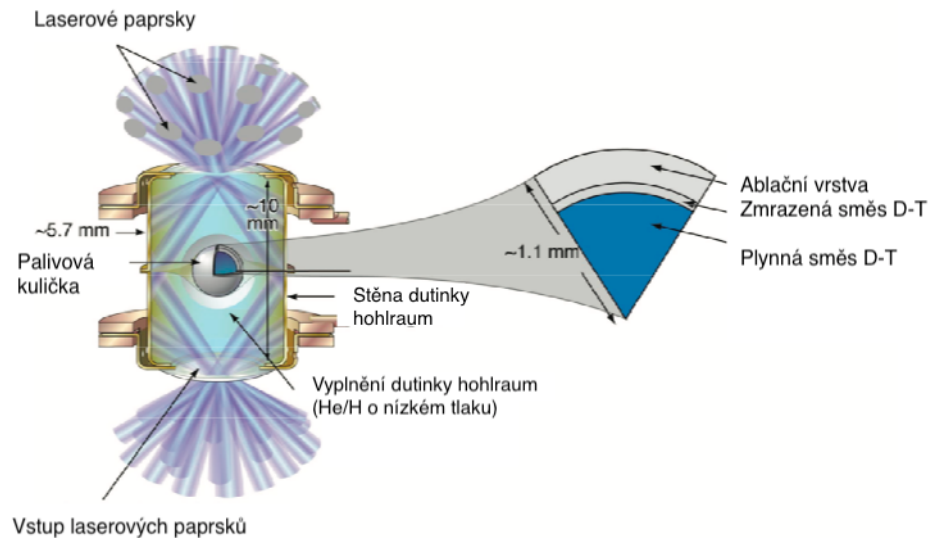
## 4.2 NIF

Zařízení NIF (National Ignition Facility) je největší a nejenergetičtější laserovou aparaturou na světě. Nachází se v Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) v Novém Mexiku v USA. Plány na výstavbu tohoto zařízení se datují do počátku 90. letech minulého století. Stavba byla zahájena v roce 1997 a o 12 let později bylo zařízení uvedeno do provozu. Celkové náklady zahrnující vývoj, investice i instalaci zařízení činily zhruba 3,5 miliard \$ [35]. Mezi jeho hlavní cíle patří studium fúze s inerciálním udržením, jakožto zdroje čisté a bezpečné energie. Jak název napovídá, záměrem National Ignition Facility je poprvé v laboratorních podmínkách dosáhnout zapálení (ignition), tedy stavu, kdy je při řízené fúzní reakci uvolněno více energie, než bylo dodáno pro ozáření terče. NIF také slouží jako výzkumné vojenské zařízení pro zajištění spolehlivosti jaderných zbraní bez nutnosti podzemního testování [35]. Schéma zařízení NIF je k vidění na obrázku 4.2. S rozlohou budov přibližně 70 000 m<sup>2</sup> se jedná o největší a nekomplexnější doposud postavený optický systém [36]. NIF využívá 192 svazků neodymového laseru, které při experimentech v roce 2012 do terčové komory dopravily 1,8 MJ ultrafialového záření o výkonu více než 500 TW [35]. Zapálení při tomto a ani žádném jiném pokusu dosaženo nebylo.



Obrázek 4.2: Pohled na National Ignition Facility. Převzato z [36].

Experimenty v NIF využívají konceptu nepřímého zapálení inerciální fúze [35]. Laserové svazky jsou nasměrovány do zlaté válcové dutinky zvané hohlraum o velikosti v řádech centimetrů, ve které se nachází terčik ze směsi deuteria a tritia o velikosti v řádech milimetrů (viz obr. 4.3). Záření laseru se dopadem na stěny dutinky hohlraum přemění na rentgenové záření, které způsobí implozi palivové kuličky rychlostí větší než 350 km · s<sup>-1</sup>. Vnitřek palivové kuličky pak dosahuje teplot až 40 milionů stupňů Celsia a hustot 50-100 g · cm<sup>-3</sup>. Současné experimenty se snaží ztrojnásobit tuto hustotu. V takových podmínkách by pak mohlo být dosaženo zapálení.



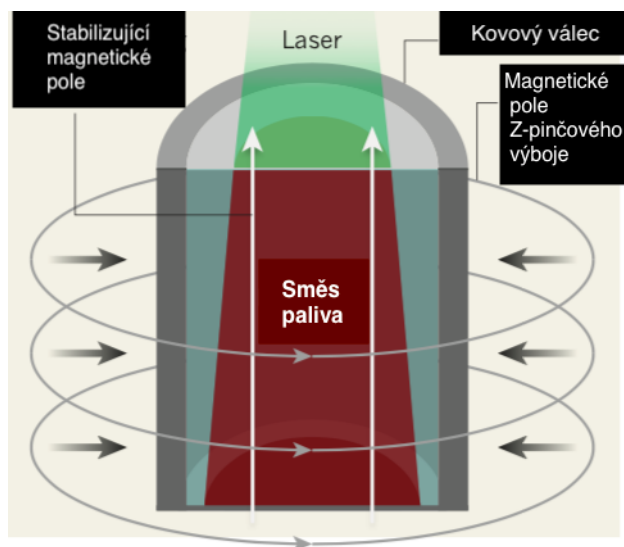
Obrázek 4.3: Schéma hohlaum a palivového terče používaného v NIF. Převzato z [37].

Rekordním výstřelem se stal experiment v roce 2014, při kterém došlo k produkci  $9,6 \cdot 10^{15}$  neutronů a 27 kJ fúzní energie. Dalším konceptem testovaným v NIF je tzv. rychlé zapálení. Budoucí experimenty se zaměří na studium vyšších implozních rychlostí a zdokonalování laserů a optických komponentů. Budou se testovat ablační vrstvy z uhlíku (diamantu), beryllia a tenkých plastů [35].

### 4.3 Z machine

Z Pulsed Power Facility, zkráceně nazýváno jako Z machine, je v současnosti nejvýkonnější impulzní zařízení a zdroj rentgenového záření a světla. Nachází se v Sandia National Laboratories (SNL) v Albuquerque v Novém Mexiku v USA. Zařízení, ve kterém dojde k výstřelu průměrně 200krát za rok, dosahuje díky proudu přibližně 26 MA výkonu rentgenového záření až 350 TW a energie tohoto záření 2,7 MJ [38]. Pulzy jsou dlouhé 100 až 1000 ns.

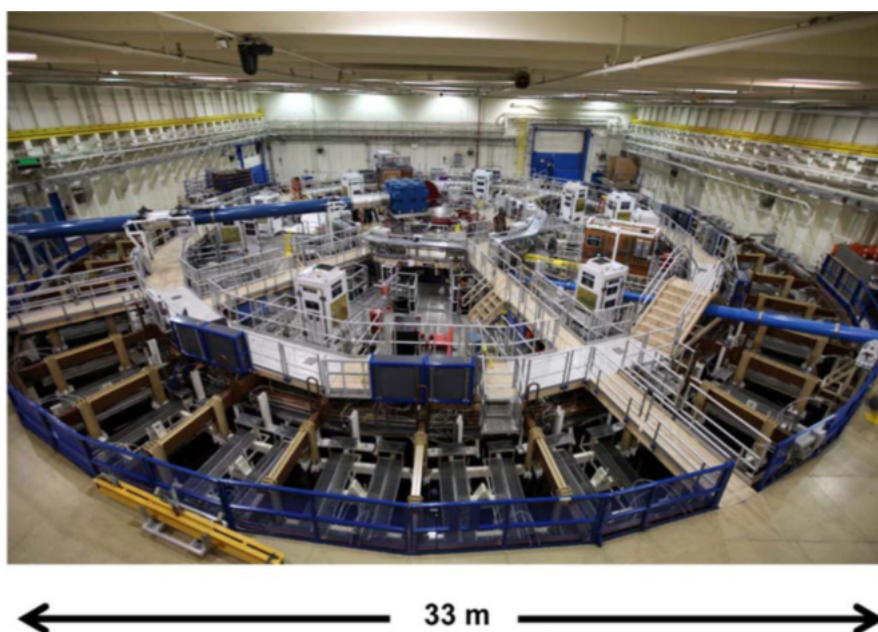
Aparatura Z machine je součástí programu SNL, který vznikl v 60. letech minulého století a soustředí se na impulzní výboje. Hlavním úkolem Z machine je studovat hmotu za extrémních podmínek, což přispívá k výzkumu fúze, fyziky plazmatu a k vojenskému výzkumu. Jedním z přístupů k fúzi testovaných v Z machine je inerciální fúze. Zdrojem energie potřebné pro stlačení palivové kuličky je v tomto případě Z-pinčový výboj v tenkých wolframových drátcích. Princip tohoto alternativního mechanismu zapálení fúze s inerciálním udržením byl vysvětlen v podkapitole 2.2.4. Dalším konceptem testovaným na Z machine je tzv. MagLIF (Magnetized Liner Inertial Fusion). Tento přístup využívá magnetické pole ke stlačení fúzního paliva a sloučení jader. Uspořádání je patrné z obrázku 4.4. Váleček z kovu, uvnitř něhož se nachází fúzní palivo, je průchodem proudu roztaven a stlačován pinč-efektem směrem dovnitř. Palivo je přehřáto



Obrázek 4.4: Schéma MagLIF experimentu na Z-machině. Převzato z [39].

laserovým zářením. Pro stabilizaci je důležité vnější magnetické pole, které působí v axiálním směru [39]. Koncept MagLIF tedy kombinuje magnetické i inerciální udržení.

Při experimentech se směsí D-D v roce 2014 bylo naměřeno řádově  $10^{12}$  fúzních neutronů. V roce 2016 proběhly na Z machine první experimenty se směsí D-T [38]. Stav zapálení zatím dosaženo nebylo. Výhodou Z machine jsou nižší náklady oproti zařízení NIF či rozestavěnému tokamaku ITER [39]. Renovace Z-machině stála 90,4 milionů \$ [40]. Vystřelit na této aparatuře lze v současnosti pouze jednou za den. Fúzní elektrárna by musela vystřelit přibližně šestkrát za minutu [38].



Obrázek 4.5: Z machine. Převzato z [41].

## 4.4 Aktuální stav výzkumu v ČR

Hlavní rámec současného výzkumu termonukleární fúze v České republice tvoří Asociace IPP.CR. IPP.CR je členem konsorcia EUROfusion, které sdružuje státy EU a Švýcarsko. Jeho úkolem je podporovat fúzní výzkum a poskytovat finanční prostředky. Výzkumná jednotka IPP.CR se skládá ze 4 pracovišť [42]:

- ÚFP: Ústav fyziky plazmatu Akademie věd ČR
- MFF UK: Matematicko fyzikální fakulta Univerzity Karlovy v Praze
- FJFI: Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT v Praze
- CVR: Centrum výzkumu Řež, s.r.o.

Hlavní centra výzkumu řízené termonukleární fúze a fúzních technologií jsou [42, 43, 44, 45]:

- **Tokamak COMPASS**

Britský úřad pro jadernou energii UKAEA a Evropská komise nabídly v roce 2004 České republice tokamak COMPASS. Tím se ČR zařadila mezi země s vyspělým výzkumem termonukleární fúze. COMPASS je v současnosti jedním ze 3 tokamaků, které jsou svou konfigurací a H-módem podobné rozestavěnému tokamaku ITER. Výsledky experimentů na tokamaku COMPASS tedy přispívají k projektování tohoto tokamaku. V posledních letech probíhala přípravná fáze přestavby tokamaku COMPASS na COMPASS-U.<sup>2</sup> Přestavba se uskutečňuje za účelem zvětšení rozměrů a zlepšení funkce zařízení. Tabulka 4.1 nabízí porovnání parametrů před a po přestavbě.

Parametr	COMPASS	COMPASS-U
Hlavní poloměr [m]	0,56	0,84
Vedlejší poloměr [m]	0,23	0,28
Magnetické pole [T]	0,9-2,1	5
Proud plazmatem [kA]	400	2000
Délka výboje [s]	1	1-5

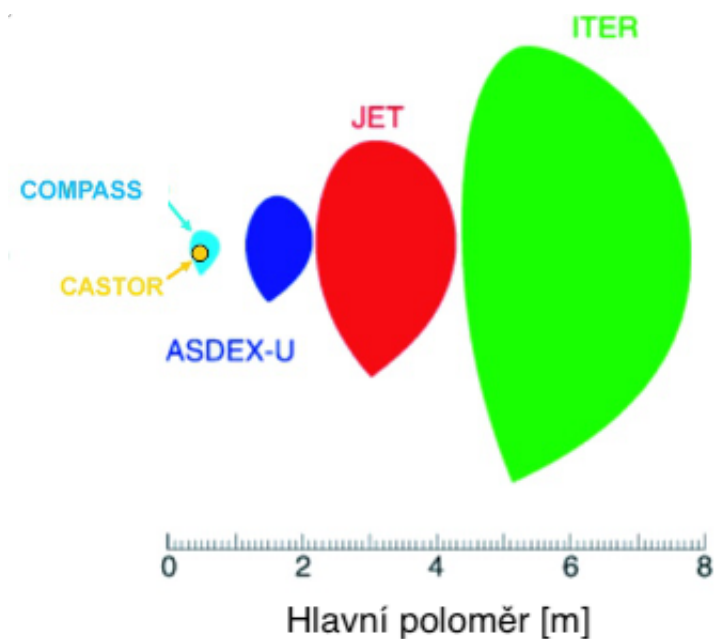
Tabulka 4.1: Tabulka porovnávající současné parametry tokamaku COMPASS s parametry po přestavbě. Informace převzaty z [42].

Přestavěný tokamak bude mít stále výhodné rozměry, tudíž výsledky bude opět možné extrapolovat a využít pro tokamaky ITER a DEMO. Na roky 2018-2021 je naplánovaná fáze výroby komponent. Během let 2020-2022 bude probíhat montáž zařízení. Lze očekávat, že zařízení bude uvedeno do provozu do roku 2022.

- **Centrum výzkumu Řež s.r.o**

Výzkumná organizace CVR se zabývá vývojem a inovacemi v oboru energetiky, především jaderné. V rámci výzkumu organizovaného EUROfusion se podílí na vývoji a testování materiálů pro komponenty vystavené plazmatu. V roce 2017 byla dokončena výstavba

<sup>2</sup>Celý název zní COMPASS Upgrade



Obrázek 4.6: Evropské tokamaky s průřezem podobným tokamaku ITER seřazené dle velikosti hlavního poloměru. Převzato z [42].

projektu Udržitelná energetika SUSEN (Sustainable Energy). Zařízení SUSEN se nacházejí v areálu v Řeži a v Plzni. Jedno z těchto zařízení, zařízení HELCZA (High Energy Load Czech Assembly), umožňuje zkoušky materiálů první stěny fúzního reaktoru a divertoru při tepelných tocích o velikosti až  $20 \text{ MW} \cdot \text{m}^{-2}$ . Díky projektu SUSEN byla mimo jiné rozšířena oblast možností účasti ČR na vývoji fúzních reaktorů.

- **Laserový systém PALS**

Hlavní částí centra PALS (Prague Asterix Laser System) je jódový laserový systém, který se řadí mezi 3 největší lasery v Evropě. Špičkový pulzní výkon laseru dosahuje až 3 TW. Experimenty týkající se fúze zahrnují studium inerciální fúze a bezneutronové fúze protonu s borem.



Obrázek 4.7: Laserový systém PALS. Převzato z [42].



- **Laserové centrum ELI Beamlines**

Laserové centrum v Dolních Břežanech bylo otevřeno na podzim roku 2015. Projekt ELI zahrnuje další dvě zařízení, a to v Maďarsku a Rumunsku. ELI Beamlines díky své laserové aparatuře umožňuje studovat fyziku plazmatu, dále také urychlování částic, vývoj nových laserových technologií a rentgenové zdroje.

- **Tokamak GOLEM**

Tokamak GOLEM, známý i pod předchozím jménem CASTOR, se nachází na Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT v Praze, kde slouží zejména ke vzdělávacím účelům [27].

#### 4.4.1 Výzkum na Katedře fyziky FEL ČVUT

Výzkum fyziky plazmatu má na Katedře fyziky FEL ČVUT dlouholetou tradici. První experimentální laboratoř silnoproudých výbojů byla vybudována v roce 1962 [46]. Výzkum se věnoval zejména studiu Z-pinčových výbojů. I v současné době se skupina Silnoproudých výbojů z Katedry fyziky FEL ČVUT zabývá základním výzkumem horkého a hustého plazmatu a specializuje se na silnoproudé výboje typu Z-pinč či plazmatického fokusu. Výzkum je orientován na výzkum řízené termonukleární fúze, především D-D fúzní reakce. V této souvislosti je zkoumána produkce fúzních neutronů a urychlení iontů v pinčovém plazmatu. Skupina navázala během let četné mezinárodní spolupráce (IHCE v Tomsku, IPPLM ve Varšavě, SNL v Albuquerque, NRL ve Washingtonu a další) [47].

Výzkum probíhá na několika pracovištích [46, 47]:

- **PFZ-200 na FEL ČVUT**

Aparatura PFZ-200 je malý plazmatický fokus, který se nachází přímo na Katedře fyziky FEL ČVUT. Plazmovým sloupcem při výboji protéká proud 200 až 250 kA. Zařízení slouží k testování diagnostiky, kterou skupina používá na větších zahraničních aparaturách. Dále také k výzkumu mechanismu urychlování iontů a produkci fúzních neutronů. V neposlední řadě je zařízení využíváno k výuce.

- **PF-1000 ve Varšavě**

Plazmatický fokus PF-1000 se nachází v Institute of Plasma Physics and Laser Microfusion (IPPLM) ve Varšavě. Skupina Silnoproudých výbojů se experimentů na tomto zařízení účastní v rámci programu International Center on Dense Magnetized Plasma (ICDMP), který koordinuje výzkum magnetických pinčů. PF-1000 je výkonný zdroj fúzních neutronů. Proud dosahuje velikosti až 2 MA. Aparatura je vybavena komplexní rentgenovou, neutronovou a interferometrickou diagnostikou plazmatu.

- **GIT-12 v Tomsku**

Terawattový generátor GIT-12 se nachází v Ústavu silnoproudé elektroniky (IHCE) v Tomsku. Skupina Silnoproudých výbojů spolupracuje s IHCE od roku 2011. Proudový impulz na této aparatuře dosahuje velikosti až 5 MA. V roce 2013 byl na tomto zařízení zaznamenán druhý největší fúzní zisk z D-D reakce na Z-pinčích.<sup>3</sup>

- **Generátor HAWK ve Washingtonu, D.C.**

Od roku 2017 se skupina Silnoproudých výbojů účastní experimentů na zařízení HAWK v US Naval Research Laboratory ve Washingtonu D.C. Jedná se o vysoko induktivní generátor, který vytváří proudový impulz o velikost 700 kA a délce trvání 1 ms.

Kromě výše zmíněné mezinárodní spolupráce, spolupracuje skupina Silnoproudých výbojů také s Ústavem fyziky plazmatu AV ČR, Fyzikálním ústavem AV ČR, Fakultou jadernou a fyzikálně inženýrskou ČVUT, Fakultou strojní ČVUT, Ústavem jaderné fyziky AV ČR a s dalšími institucemi [47].

---

<sup>3</sup> $4 \cdot 10^{12}$  neutronů v jednom výstřelu [47].

## Kapitola 5

# Problémy řízené termonukleární fúze

Tato kapitola se zabývá výčtem nejdůležitějších problémů, kterým čelí tokamaky, laserové a pinčové fúzní aparatury v cestě za zvládnutím řízené termonukleární fúze. Následující přehled byl vytvořen s použitím této literatury [4, 10, 11, 12, 48]. Kromě technologických, materiálových či konstrukčních výzev, které jsou zmíněny níže, lze jako společný problém fúzních aparatur uvést nestability plazmatu. Současné poznatky z fyziky plazmatu neumožňují spolehlivě popsat všechny složité děje odehrávající se v plazmatu.

### 5.1 Tokamaky

- **Materiály**

První stěna reaktoru a divertor čelí obrovským teplotám a vysokým neutronovým tokům.<sup>1</sup> Použité materiály musí nejen snášet tyto podmínky, ale také po reakci s neutrony nesmí vytvářet dlouhodobě radioaktivní izotopy. Aby k vyměňování aktivovaných částí docházelo pouze minimálně, klade se na materiály další požadavek, a sice dlouhá životnost. Při erozi vnitroreaktorových komponent je také důležité minimalizovat znečištění plazmatu, které může vést k nežádoucímu ochlazení.

- **Impulzní charakter**

Tokamak je z principu impulzní zařízení. Elektrárna však musí pracovat v kontinuálním režimu. Některé návrhy hovoří o práci v módu velmi dlouhých pulzů v řádech hodin, jiné o součinnosti více tokamaků v rámci jedné elektrárny. Další možností zajištění kontinuálního provozu jsou mechanismy neinduktivní generace proudu, které byly popsány v podkapitole 2.1.2.

- **Palivový cyklus**

Hospodaření s tritiem, které se bude v blanketu<sup>2</sup> reaktoru vytvářet reakcí lithia s neutrony, nebylo dosud řádně vyzkoušeno.

---

<sup>1</sup>Tepelný tok se pohybuje řádově v jednotkách  $\text{MW m}^{-2}$  a potřebná teplota pro fúzní reakci se pohybuje v řádech stovek milionů K [12].

<sup>2</sup>Blanketem označujeme vnitřní obložení vakuové komory mezi první stěnou a vakuovou nádobou.



- **Chlazení supravodičů**

Pro vytvoření silného magnetického pole musí cívkami procházet proud v řádech desítek kA. Takové hodnoty proudu běžné vodiče příliš zahřívají, a proto se používají supravodiče. Supravodiče jsou však velice nákladné, obtížné na výrobu a vyžadují neustálé udržování na teplotě blízké absolutní nule<sup>3</sup>. Zajištění kontinuálního chlazení je technologicky náročné. Supravodiče musí být také chráněny před neutronovým tokem.

- **Ohřev plazmatu**

Zahřátí plazmatu na teplotu minimálně 15 keV je nezbytné pro slučování jader. Možnosti ohřevu plazmatu byly popsány v podkapitole 2.1.2. Nejčastěji používaný dodatečný ohřev je ohřev svazkem neutrálních částic s vysokou kinetickou energií. Generování takového svazku je komplikované a v současnosti je stále předmětem výzkumu.

- **Ubíhající elektrony**

Některé elektrony se v plazmatu mohou urychlit na relativistické rychlosti vlivem elektrického pole. Pokud tyto elektrony opustí plazma v důsledku nestabilit, naráží na první stěnu a způsobují její poškození. Zároveň snižují účinnost ohmického ohřevu plazmatu, jelikož svou energii nepředávají ostatním částicím plazmatu.

- **Nákladnost**

Protože ztráty jsou úměrné poloměru plazmatu, ale fúzní výkon roste se třetí mocninou tohoto poloměru, je výhodné zvětšovat objem plazmatu. Velké tokamaky jsou nákladnější a náročnější na výstavbu.

## 5.2 Laserové fúzní aparatury

- **Účinnost a opakovatelnost laserů**

Účinnost současných laserů je menší než 1 % [12]. Nejčastěji používané neodymové lasery mohou být zažehnuty pouze několikrát za den. Důvodem je zejména nutnost vychladnutí optických zařízení laseru.

- **Výroba palivové kuličky**

Na palivový terčík jsou kladeny vysoké nároky z hlediska hladkosti a stejnorodosti.<sup>4</sup> I proto se palivové kuličky vyrábějí jednotlivě. Následkem toho mají vysokou cenu. Pro fúzní elektrárnu by byla nutná levná sériová výroba palivových kuliček.

- **Symetrie ozáření palivové kuličky**

Nestejněměrné ozáření palivové kuličky vede k nestabilitám v plazmatu. Symetričtějšího ozáření můžeme dosáhnout nepřímým zapálením, avšak přeměna laserového záření na rentgenové záření v dutince je doprovázena ztrátami energie.

---

<sup>3</sup>Absolutní nula je počátek stupnice termodynamické teploty, tj. jde o teplotu rovnou 0 K.

<sup>4</sup>Pro představu: typická drsnost povrchu musí být menší než 100 nm [12].

- **Impulzní charakter**

Impulzní charakter zvyšuje tepelné a mechanické namáhání materiálu vakuové komory. V současných experimentech dochází k výstřelům maximálně jednou za hodinu. Elektrárna pracující na principu inerciálního udržení by musela pracovat s 10 výstřely za sekundu [12].

- **Nákladnost**

Neodymový laser a přístroje potřebné k jeho funkci zabírají plochu o velikosti hangáru pro letadla. Fúzní experimentální zařízení NIF (National Ignition Facility) pracuje se 192 lasery [35], jejichž pořízení je nákladné.

### 5.3 Pinčové fúzní aparatury

- **Palivová kapsle**

Výroba palivové kapsle je ještě složitější než výroba palivové kuličky pro inerciální fúzi pomocí laserů. Velikost potřebné dutinky hohlraum je také větší. Tento problém se týká drátkových pinčů a dynamických hohlraumů.

- **Symetrie ozáření**

Stejně jako u laserových fúzních aparatur, i zde jsou kladeny vysoké nároky na symetrii ozáření palivové kapsle rentgenovými svazky. Tento problém se týká drátkových pinčů a dynamických hohlraumů.

- **Destrukce elektrodového systému**

Při každém výboji dojde k destrukci elektrodového systému tvořeného soustavou drátků ve tvaru povrchu válce. Drátky se průchodem proudu roztaví a vytvoří plazma, které generuje rentgenové záření.

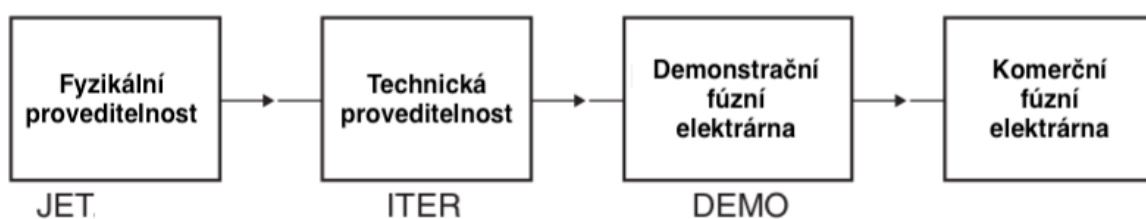
- **Opakovatelnost**

Právě kvůli zničení elektrodového systému po každém výboji pracuje pinčová fúzní aparatura v pulzním režimu. Dále je třeba nabít systémů potřebných pro elektrický výboj. Tento proces trvá např. u zařízení Z Machine 2 minuty [38].

## Kapitola 6

# Perspektivy do budoucna

Cesta k fúzní elektrárně, v tomto případě pracující na principu tokamaku, se skládá ze 3 hlavních kroků, jak je naznačeno v obrázku 6.1 [12]. Překážky na této cestě byly popsány v kapitole 5.1. První krok, čili ukázat, že fúze je realizovatelná z fyzikálního hlediska, byl dosažen na 3 velkých tokamacích: JET v UK, TFTR v USA a JT-60U v Japonsku. Další krok zahrnuje stavbu ještě většího experimentálního zařízení, tokamaku ITER<sup>1</sup>, který již bude testovat technické komponenty potřebné pro fúzní reaktor, jako např. tritiové hospodářství. Tento experiment má demonstrovat, že fúze je technicky proveditelná. Projekt ITER se v současné době staví ve Francii. Tokamaku ITER se věnuje první podkapitola. Třetím krokem je postavit prototyp fúzní elektrárny, která produkuje elektřinu kontinuálně a spolehlivě. Tato demonstrační fúzní elektrárna DEMO má ukázat, že fúzní elektrárna se vyplatí i z ekonomického hlediska. Podrobnější informace o plánovaném projektu DEMO obsahuje podkapitola 6.2.1.



Obrázek 6.1: Koncept vývoje fúzního programu. Převzato z [12].

Ačkoliv tokamaky v současné době představují nejvíce probádanou cestu k uskutečnění řízené termonukleární fúze a k následné stavbě elektrárny, není vyloučeno, že fúzní elektrárna bude postavena na principu fúze s inerciálním či magneto-inerciálním udržením. Takovým koncepcím se věnují podkapitoly 6.2.2 a 6.2.3.

<sup>1</sup>Latinsky znamená "iter" příznačně "cesta" [12].

## 6.1 ITER

ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), budoucí největší tokamak na světě, má za úkol demonstrovat proveditelnost řízené termonukleární fúze, jakožto zdroje čisté energie. Na tomto projektu se podílí Čína, Evropská unie<sup>2</sup>, Indie, Japonsko, Jižní Korea, Rusko a Spojené státy americké.<sup>3</sup> Dále probíhá spolupráce s Austrálií, Kazachstánem a přes 40 dalšími mezinárodními organizacemi, laboratořemi a jinými institucemi [25]. Jedná se o druhý největší vědecko-technický projekt v historii [31].<sup>4</sup> ITER má být první fúzní aparatura, ve které se uvolní více energie, než je dodáno na ohřev plazmatu. Jinými slovy, plánovaný faktor zesílení je  $Q \geq 10$ . Zároveň má být prvním zařízením, kde budou testovány materiály a technologie potřebné pro budoucí fúzní elektrárnu. Půjde mimo jiné o již zmiňovanou produkci tritia v rámci vakuové komory reaktoru nebo obrovské supravodivé cívky. Dalším úkolem projektu ITER je demonstrovat správnou funkci kontrolních systémů plazmatu a bezpečnost reaktoru a vyladit např. design divertoru [10, 25]. Stručná historie projektu a budoucí harmonogram jsou popsány níže [25].

- 1985: Myšlenka mezinárodní spolupráce na mírovém výzkumu řízené termonukleární fúze byla navržena Gorbačovem ze Sovětského svazu americkému prezidentovi Reaganovi.
- 1986: Dohoda o postavení mezinárodního tokamaku mezi EU, Japonskem, SSSR a USA.
- 1987: Začíná příprava projektu.
- 2001: Detailní inženýrský návrh projektu schválen členskými státy.
- 2003: K projektu ITER se přidává Čína a Jižní Korea.
- 2005: K projektu ITER se přidává Indie. Zvoleno umístění tokamaku, a sice ve francouzském výzkumném středisku Cadarache.
- 2006: Podepsání dohody o ITER ministry členských států.
- 2007: Zahájení stavby. Oficiální založení ITER Organization.
- 2012: ITER získává licenci pro jaderná zařízení.
- 2017: Dokončeno 50 % práce v cestě za prvním plazmatem.
- 2021: Do tohoto roku by měla být postavena budova pro tokamak i vedlejší budovy, vyrobeny komponenty pro přímý kontakt s plazmatem aj.
- 2020-2025: Hlavní montážní fáze
- 2025: První plazma
- 2035: Experimenty s deuteriem a tritiem

<sup>2</sup>Bude-li v této podkapitole zmíněna EU, je myšleno EU plus Švýcarsko.

<sup>3</sup>V těchto členských státech žije více než polovina obyvatel Země a podílí se zhruba 85 % na tvorbě celosvětového HDP [25].

<sup>4</sup>Prvenství náleží projektu Mezinárodní kosmické stanice ISS [31].

Původním záměrem bylo vytvořit první plazma v roce 2019 a započít experimenty se směsí D-T v roce 2026 [5]. Kvůli komplikované přípravě projektu došlo ke zpoždění stavby a navýšení předpokládané ceny zařízení [11]. Financování projektu ITER se věnuje podkapitola 6.1.1.



Obrázek 6.2: Foto rozestavěného projektu ITER z roku 2018. Převzato z [25].

Tabulka 6.1 nabízí porovnání současného největšího tokamaku JET s rozestavěným budoucím největším tokamakem ITER pomocí vybraných základních parametrů. ITER bude mít vakuovou komoru ve tvaru písmene D s divertorem. Pro určení materiálů první stěny byly prováděny experimenty mimo jiné na tokamaku JET. Nakonec bylo zvoleno beryllium a pro oblast divertoru wolfram [25]. Beryllium bylo zvoleno pro své dobré tepelné vlastnosti – může snášet tepelné toky o velikosti až  $5 \text{ MW m}^{-2}$ . Dále je výhodné nízké protonové číslo beryllia, které v případě kontaminace plazmatu berylliem minimalizuje ztráty tepla vedoucí k nežádanému ochlazení horkého fúzního plazmatu [25]. Navržené zařízení by mělo produkovat 500 MW fúzního výkonu. Vnější zdroje energie budou dodávat 50 MW výkonu, odtud  $Q = 10$ . Jedná se o dodatečný ohřev svazky neutrálních částic a dva zdroje vysokofrekvenčních elektromagnetických vln [25]. Proud plazmatem by měl dosáhnout 15 MA [10].<sup>5</sup>

Parametr	JET	ITER
Hlavní poloměr [m]	2,96	6,2
Vedlejší poloměr [m]	1,25	2
Magnetické pole [T]	3,45	5,3
Objem plazmatu [m <sup>3</sup> ]	100	840
Fúzní výkon [MW]	16	500
Typická délka experimentu [s]	20	600

Tabulka 6.1: Základní parametry tokamaku JET a ITER. Informace převzaty z [5, 12, 25, 34].

<sup>5</sup>V současné době se odhaduje, že pro dosažení stavu zapálení fúzní reakce (ignition) v režimu se zvýšeným udržením plazmatu (H-mód) by byl potřebný proud o velikosti přibližně 20 MA [10].

### 6.1.1 Financování projektu ITER

Během let 1992-8 byl vytvořen návrh tokamaku ITER s parametry: proud plazmatem 20 MA a hlavní poloměr 8,1 m. Odhadované náklady celého projektu, 9 miliard \$<sup>6</sup>, považovalo mnoho členských států za příliš vysoké. Také relativně levná cena energií v pozdních 90. letech nijak nepodněcovala intenzivní hledání nového zdroje energie. Proto byl vypracován návrh nový [10].

Na rozdíl od původní verze tokamaku, která měla dosáhnout stavu zapálení, tedy  $Q \rightarrow \infty$ , nový návrh počítá už jen s  $Q \geq 10$  [10]. Nová verze návrhu tokamaku z roku 2001, jehož parametry obsahuje tabulka 6.1, měla stát 5 G\$ [25]. Několik faktorů však vedlo k navýšení nákladů. Předběžný odhad ku příkladu nezahrnoval některé náklady na práci či vzrůst cenových hladin. Čas potřebný pro montáž a uvedení zařízení do provozu také nebyl řádně odhadnut. Detailní přezkoumání návrhu v roce 2008 vedlo k úpravám, které způsobily zvýšení nákladů. Zároveň došlo k podstatnému vzrůstu nákladů na stavbu budov. Například cena ocele se oproti roku 2001 zdvojnásobila a betonu ztrojnásobila [25]. V roce 2015 byla provedena nová analýza všech aspektů výroby a montáže komponentů systému ITER, která vedla k úpravě časového harmonogramu a celkového odhadu nákladů.

Před přepracováním rozpočtu z roku 2016 se odhadovaly náklady na výstavbu projektu ITER na 13 miliard EUR. Odhad byl proveden pro zjednodušený případ, ve kterém by veškerá výroba probíhala v Evropě [25]. Komponenty tokamaku ITER se však vyrábějí po celém světě a jejich doprava do Francie je spojena s dalšími náklady. Zmíněná aktualizace časového harmonogramu v roce 2016 znamenala i aktualizaci finančního plánu celého projektu. To vedlo k přidání dalších 4 miliard EUR k původnímu odhadu nákladů [25].

Dle dokumentu Evropské komise [49] z roku 2017 jsou odhadované náklady projektu přibližně 18 miliard EUR (viz tabulka 6.2). Tato suma se vztahuje na období 2007-2035, tj. od začátku stavby do prvních D-T experimentů. Experimenty na zařízení ITER by měly probíhat zhruba 20 let. Roční provozní náklady během experimentálního období jsou odhadovány na 318 milionů EUR [25].<sup>7</sup> Pro fázi deaktivace (2037-2042), resp. vyřazení z provozu, jsou předpokládáné náklady 281 milionů EUR, resp. 530 milionů EUR [25].<sup>8</sup>

Období	Náklady [miliony EUR]
2007-2013	3 556
2014-2020	4 127
2021-2025	5 469
2026-2027	1 802
2028-2035	3 032
<b>2007-2035</b>	<b>17 986</b>

Tabulka 6.2: Náklady projektu ITER v cenách roku 2017. V odhadech budoucích nákladů bylo počítáno s roční inflací 2 %. Informace převzaty z [49].

<sup>6</sup>V cenách roku 2005.

<sup>7</sup>V cenách roku 2016.

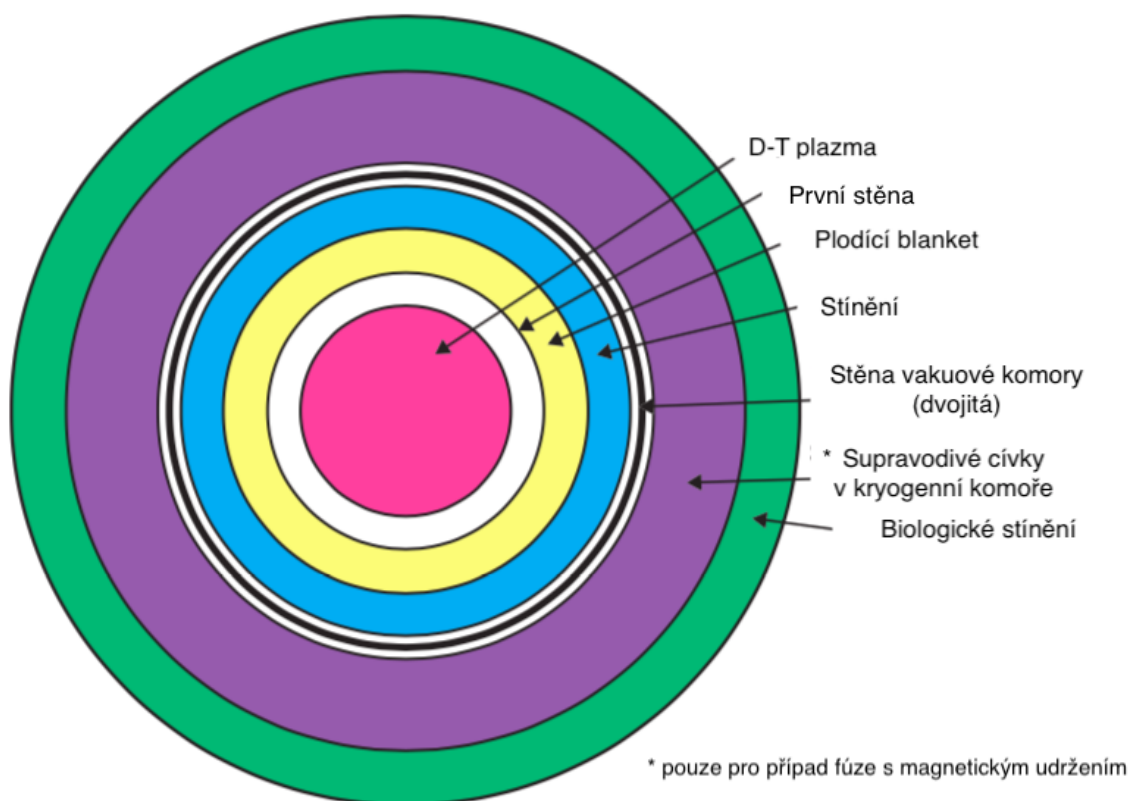
<sup>8</sup>V cenách roku 2001.

ITER je financován svými 7 členy. Během konstrukční fáze je Evropská unie zodpovědná za 45,5 % konstrukčních nákladů. Čína, Indie, Japonsko, Jižní Korea, Rusko a USA přispívají každý přibližně 9,1 %. Až 90 % příspěvků nebude dodáno ve formě peněz, ale jako komponenty či budovy. Aby věcné příspěvky od různých států s různými měnami a jinými náklady práce mohly být spravedlivě oceněny, byla zavedena jednotka IUA (ITER Units of Account). Pro období, kdy bude ITER v provozu, bude rozdělení nákladů mezi jednotlivé členy následovné: EU 34 %, Japonsko 13 %, USA 13 %, Čína 10 %, Indie 10 %, Jižní Korea 10 % a Rusko 10 % [25].

## 6.2 Koncepce fúzních elektráren

Motivací fúzního výzkumu již od svého počátku je využít fúzi jader pro výrobu čisté a levné energie [12]. Následující text obsahuje stručný popis koncepcí elektráren fungujících na principu fúze s magnetickým (MCF), inerciálním (ICF) a magneto-inerciálním (MIF) udržením. Jedná se pouze o rané návrhy, nikoliv detailní studie. Před postavením první fúzní elektrárny je nutné vyřešit ještě mnoho problémů (viz kapitola č. 5). Nejdetailnějším návrhem je v současné době DEMO, zařízení fungující na principu fúze s magnetickým udržením.

Schématický řez fúzní elektrárnou, který naznačuje hlavní části reaktoru, je na obrázku 6.3. Pro zjednodušení je průřez kruhový. To velmi dobře odpovídá případu elektrárny pracující na principu ICF. Pro tokamaky by byl průřez ve tvaru písmene D [12].

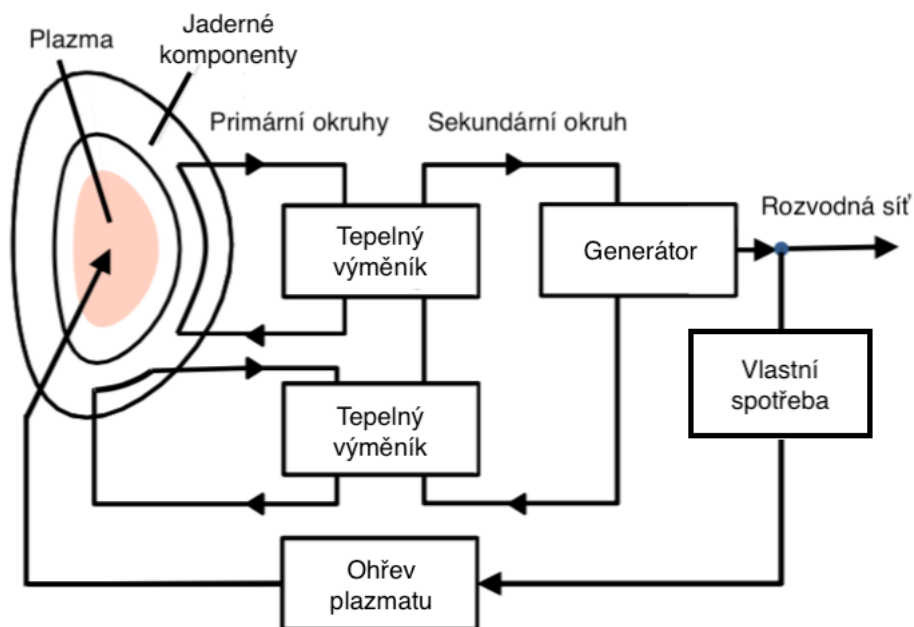


Obrázek 6.3: Řez fúzní elektrárnou. Převzato z [12].

Hořící plazma tvoří střed reaktoru, který obklopuje první stěna. Další vrstvy směrem od středu jsou: blanket, neutronové stínění, vakuová komora, magnetické cívky (pouze pro případ MCF) a druhé stínění snižující radiaci. 80 % energie z D-T reakce je odnášeno neutrony, které prolétnou skrz první stěnu a svou energii odevzdají až v oblasti blanketu. Zbýlých 20 % energie z fúzní reakce si odnáší alfa částice a předávají svou energii plazmatu. V případě ICF je energie plazmatu přenášena na první stěnu ve formě radiace a energetických částic. V případě MCF je energie z fúzní reakce přenášena nejenom na první stěnu, ale i na divertor. První stěna, blanket a divertor budou tedy muset být chlazeny. Chladicí látka, o které se uvažuje, je vysokotlaká voda nebo helium. Pára vzniklá ohříváním chladicího media sekundárního okruhu bude roztáčet turbínu generátoru elektrické energie stejně jako v konvenčních tepelných elektrárnách [12].

### 6.2.1 Elektrárna na principu MCF

Tokamaky mají nad stellarátory vývojový náskok, proto bude v následujícím textu uvažována elektrárna pracující na principu tokamaku. Minimální rozměry MCF elektrárny jsou nepatrně větší než rozměry tokamaku ITER (viz tabulka 6.1). Taková elektrárna by měla výkon zhruba 1 GW [12]. Princip funkce MCF elektrárny byl vysvětlen výše. Schéma fúzní elektrárny naznačující hlavní funkční bloky zobrazuje obrázek 6.4. Primárních okruhů, chladicích jaderné komponenty, bude více. Teplo odvedené z reaktoru je přes tepelné výměníky předáno chladicí látce sekundárního okruhu. Zde je toto teplo využito pro generaci elektrické energie [50].



Obrázek 6.4: Schéma fúzní elektrárny pracující na principu magnetického udržení. Převzato z [50].



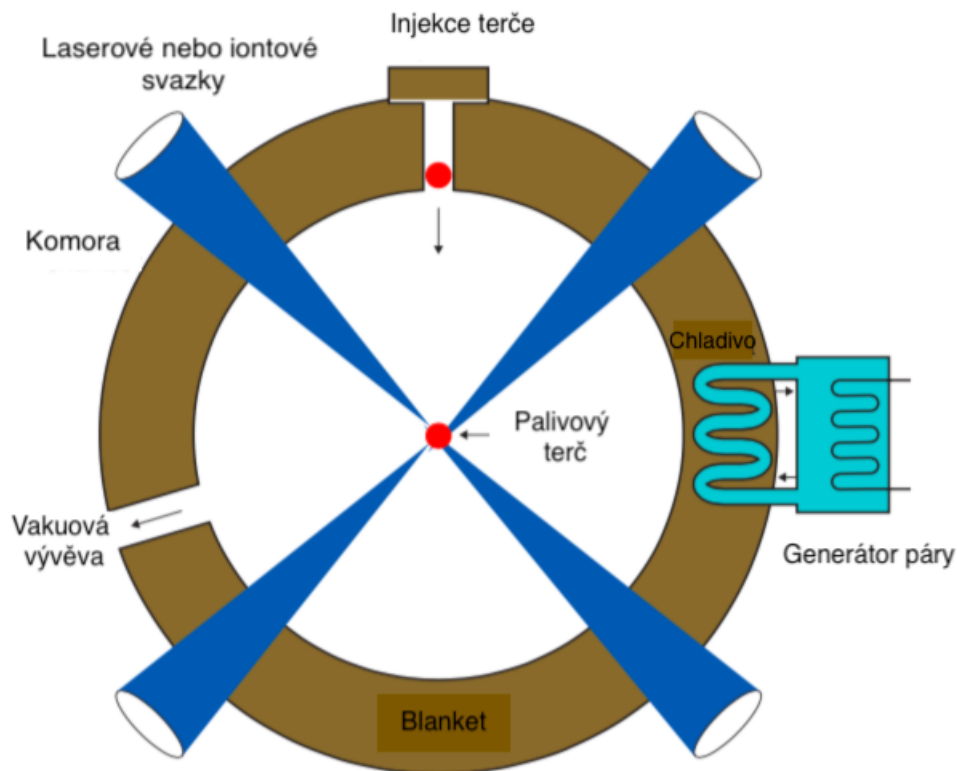
## DEMO

Mezikrokem mezi experimentální fúzní aparaturou a komerční fúzní elektrárnou, která již bude dodávat elektřinu do sítě, je plánovaný projekt demonstrační fúzní elektrárny DEMO (DEMO-nstration power plant) [34]. Zařízení DEMO by již mělo vyrábět elektřinu a pracovat s uzavřeným palivovým systémem [51]. Tento projekt by měl využít poznatky o fyzice plazmatu a fúzních technologiích získané z projektu ITER. Rozměry a parametry obou zařízení budou srovnatelné, tudíž bude možné výsledky z ITER extrapolovat. Klíčovým rozdílem mezi ITER a DEMO budou však technologie. Jedním z hlavních úkolů DEMO je otestovat technologie potřebné pro fúzní elektrárnu. Ku příkladu se jedná o produkci tritia v blanketu reaktoru z lithia. Cílem je vyprodukovat více tritia, než je spotřebováno. DEMO musí také demonstrovat schopnost kontinuálního, bezpečného, spolehlivého a udržitelného provozu. Tento projekt má taktéž ukázat, že fúzní elektrárna je šetrná k životnímu prostředí a produkuje pouze malé množství radioaktivního odpadu. K tomu bude důležitý mimo jiné materiálový výzkum [10]. Provoz DEMO by měl být zahájen ve 40. letech [25]. Nicméně kvůli nutnosti čekání na výsledky z tokamaku ITER lze očekávat, že projekt bude mít prodlení.

Přípravy tohoto projektu začaly již v roce 2014 [50]. Vzniklo několik koncepcí demonstrační fúzní elektrárny. Následující kapitola se bude zabývat ekonomickým zhodnocením evropského referenčního modelu s názvem DEMO2.

### 6.2.2 Elektrárna na principu ICF

Koncepce elektrárny pracující na principu fúze s inerciálním udržením má 3 hlavní části. Za prvé továrnu na palivové terče. Za druhé zdroj energie, který palivový terč stlačí a zahřeje, a za třetí fúzní komoru, ve které k tomu bude docházet. Další části jako blanket, systém přenosu tepla, stínění a princip generace elektrické energie jsou shodné s MCF elektrárnou. Za velkou výhodu inerciální fúze se považuje fakt, že většina složitých a nákladných zařízení se vyskytuje mimo fúzní komoru, což usnadňuje údržbu. Některé optické komponenty a systémy na manipulaci s palivovým terčem však do styku s radiací přijdou. Impulzní charakter ICF způsobuje velké tepelné a mechanické namáhání komory. Současné ICF aparatury provádějí výstřel méně než jednou za hodinu, v některých případech dokonce jen jednou za den. Fúzní elektrárna by musela provést okolo 10 výstřelů za sekundu. Palivové terčičky by musely být vstřelovány vysokou rychlostí do středu fúzní komory, opticky sledovány s vysokou přesností a zasaženy svazky záření [12]. Další problémy, které by se před postavením ICF elektrárny musely vyřešit byly diskutovány v kapitole 5. Na následující obrázku je k vidění zjednodušené schéma inerciální fúzní elektrárny. V tomto případě se jedná o přímé zapálení. Některé koncepce ICF elektrárny uvažují však i o nepřímě zapalované inerciální fúzi [52]. Schéma takové koncepce by pak obsahovalo navíc ještě dutinku hohlraum.



Obrázek 6.5: Schéma elektrárny pracující na principu inerciálního udržení. Převzato z [12].

### Hybridní reaktor [53]

Kromě koncepcí, v nichž by "samostatná" inerciální fúze generovala elektřinu, se uvažují i tzv. hybridní technologie spojující fúzi a štěpení. Tento koncept přináší možnost výroby udržitelné a čisté energie a zároveň možnost zlikvidovat až 99 % jaderného odpadu a jiných nebezpečných jaderných materiálů na celém světě. Hybridní reaktor se skládá ze zdroje neutronů, který je obklopen blanketem ze štěpného materiálů v podkritickém množství. Zdrojem neutronů by byla právě inerciální fúze. Neutrony generované ICF vyvolávají štěpné reakce v materiálu blanketu. Tím "vytěží" prakticky veškerou energii jaderného paliva a zůstává pouze malé množství dlouhodobě aktivního odpadu. Hybridní reaktory by tedy nejenom uzavřely jaderný cyklus, ale také generovaly elektrickou energii šetrnou k životnímu prostředí. Hybridní systém by vyžadoval pouze přibližně polovinu energie dodávané laserem při samostatné ICF. Docházelo by k produkci až 200krát většího množství energie než energie dodané. Tento koncept také nevyžaduje obohacování uranu a minimalizuje potřebu dlouhodobých úložišť jaderného odpadu. Výhodou je také možnost použití různých paliv: ochuzený, přírodní či vysoce obohacený uran, použité jaderné palivo či plutonium použité ve zbraních. Pro úspěšný vývoj hybridní technologie by však bylo třeba: dosáhnout stavu zapálení fúzní reakce, zajistit dostupnost levných laserových aparatur, produkovat fúzní terče levně v hromadné výrobě a vyrobit první stěnu reaktoru s dlouhou životností.

### 6.2.3 Elektrárna na principu MIF

Z-pinčové výboje představují alternativní mechanismus zapálení inerciální termojaderné fúze. Princip funkce Z-pinčové ICF elektrárny by byl podobný jako princip výše vysvětlené ICF elektrárny. V tomto případě však zdrojem intenzivního záření není laser, ale Z-pinčový výboj. Hlavní části koncepce takové elektrárny jsou: impulsní generátor, který je zdrojem Z-pinčového výboje, palivový terč a fúzní komora. Jednou z uvažovaných konfigurací je tzv. dynamický hohlraum, zobrazený na obrázku 2.11. Výhodou Z-pinčových výbojů oproti ostatním kandidátům na zapálení inerciální fúze je cena. Cena 1 J energie rentgenového záření vyprodukovaného Z-pinčovým výbojem je přibližně 30 \$, zatímco pro lasery nebo svazky těžkých iontů dosahuje cena 1 J až 1000 \$ [52]. Z-pinče také přeměňují energii pulzního generátoru na rentgenové záření s poměrně vysokou účinností.<sup>9</sup> Malá opakovatelnost je i v tomto případě jeden z problémů, který stojí v cestě využití výše popsané koncepce v energetice. Některé návrhy proto uvažují několik fúzních komor, v nichž by docházelo k výbojům postupně, ale jako celek by produkovaly energii kontinuálně [52].

---

<sup>9</sup>Na zařízení Z machine se dosahuje účinnosti 15 % [52].

## Kapitola 7

# Ekonomické zhodnocení využití fúze v energetice

Tato kapitola se věnuje ekonomickému zhodnocení plánované fúzní elektrárny pracující na principu tokamaku. Pro analýzu byl vybrán evropský referenční model demonstrační fúzní elektrárny DEMO2. Na základě odhadovaných nákladů budou stanoveny průměrné náklady elektrické energie (*LCOE*) vyrobené ve fúzní elektrárně. Následně bude přiblížena problematika externích nákladů výroby elektřiny z fúze a provedeno srovnání s jinými zdroji energie. V závěru bude diskutována konkurenceschopnost fúzní elektrárny na trhu.

V následujících bodech shrnu poznatky z předchozích kapitol a zmíním charakteristické rysy fúze, jakožto zdroje energie.

- Vnitřní bezpečnost reaktoru: Fúze jader probíhá pouze za teplot v řádech stovek milionů stupňů Celsia. Jakákoliv porucha by vedla k narušení udržení plazmatu a plazma by se dotykem se stěnami reaktoru ochladilo. Tím by došlo k přerušování fúzních reakcí. I při poruše chlazení teplota materiálů v reaktoru nestoupne nad bod tání [1]. Reaktor také obsahuje pouze malé množství paliva.
- Výroba elektrické energie pomocí fúze není spojena s emisí skleníkových plynů.
- Odpadem D-T fúzní reakce je pouze plyn helium.
- Nízká radioaktivita: Tritium je radioaktivní prvek s poločasem rozpadu 12,3 let. Ve fúzní elektrárně se bude vyrábět z lithia v blanketu reaktoru v uzavřeném cyklu. Tím odpadá nutnost manipulace s tritiem. Materiály aktivované vysokým neutronovým tokem budou uzavřeny v ochranném kontejnmentu.
- Fúzní palivo je prakticky nevyčerpatelné. Cena je nízká a lze ji očekávat stabilní.
- Fúzí se uvolňuje velké množství energie. Pro představu: 106 tun ropy vyprodukuje stejné množství energie jako 0,8 tun uranu a nebo 0,14 tun deuteria [1].

- Uvažovaná fúzní elektrárna by dodávala elektřinu do sítě kontinuálně.
- Kvůli vysokému tepelnému a neutronovému toku budou muset být komponenty v přímém kontaktu s plazmatem během provozu elektrárny několikrát vyměněny.

## 7.1 Referenční model fúzní elektrárny

### 7.1.1 Parametry

Příprava návrhu demonstrační fúzní elektrárny započala v roce 2014 [50]. Následující text se zabývá evropským referenčním modelem s názvem DEMO2. Koncept DEMO2 vychází z optimistických předpokladů, že na tokamaku ITER budou dosaženy nejlepší možné výsledky [51]. Vydalo ho konsorcium EUROfusion v roce 2015 [54]. Model byl vytvořen s použitím kódu PROCESS, který slouží k vyhodnocování technické a ekonomické proveditelnosti hypotetické fúzní elektrárny. Kód pracuje s jednoduchými modely všech částí elektrárny zahrnující jak fyzikální a technické parametry, tak náklady [55]. Vybrané parametry referenčního modelu DEMO2 obsahuje následující tabulka.

Parametr	DEMO2
Hlavní poloměr [m]	7,5
Vedlejší poloměr [m]	2,9
Magnetické pole [T]	5,7
Objem plazmatu [m <sup>3</sup> ]	2217
Proud plazmatem [MA]	21,6

Tabulka 7.1: Základní parametry referenčního modelu DEMO2. Informace převzaty z [54].

Fúzní elektrárna DEMO2 by měla mít výkon téměř 1 GW. Při ročním využití instalovaného výkonu ve výši 75 % (6570 hodin) dodá elektrárna do elektrické sítě za rok energii přibližně 6,3 TWh. Parametry týkající se výkonu obsahuje tabulka číslo 7.2. Účinnost elektrárny byla stanovena jako podíl čistého elektrického výkonu a fúzního výkonu. Tepelný výkon zahrnuje kromě fúzního výkonu ještě multiplikaci výkonu při výrobě tritia z lithia a recirkulaci výkonu ohřevu plazmatu [50].

Fúzní výkon [MW]	3255
Tepelný výkon [MW]	4149
Hrubý elektrický výkon [MW]	1660
Čistý elektrický výkon [MW]	953
Vlastní spotřeba elektrárny [MW]	707
Využití instalovaného výkonu [%]	75
Roční vyrobená elektrická energie [TWh]	6,26
Účinnost elektrárny [-]	0,29

Tabulka 7.2: Parametry DEMO2 týkající se výroby elektrické energie. Informace převzaty z [54].

### 7.1.2 Náklady

#### Investiční náklady

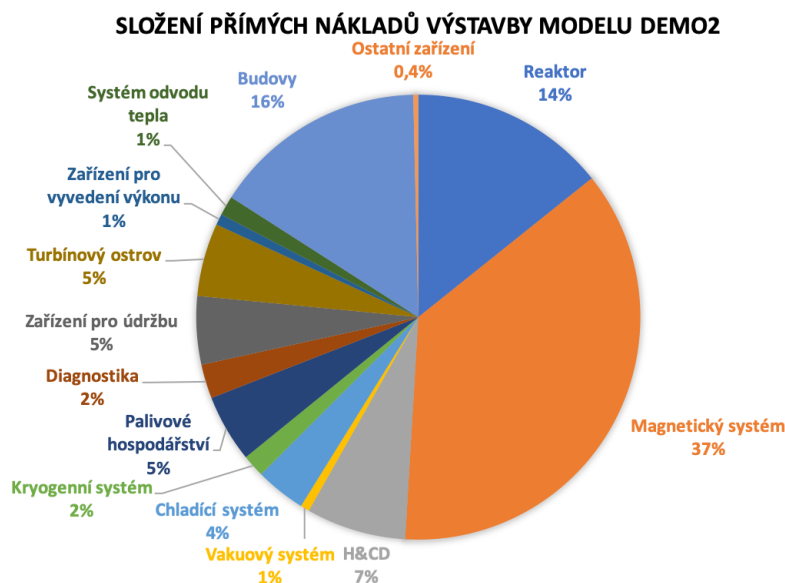
Investiční náklady modelu DEMO2 v amerických dolarech v cenách roku 2015 jsou shrnuty v následující tabulce. Jedná se o tzv. “overnight costs“, bezúročné, nediskontované celkové náklady, které vyjadřují cenu zařízení, kdyby bylo postaveno “přes noc“. Neuvažují tedy časovou cenu peněz. Do celkových investičních nákladů je započítána i rozpočtová rezerva ve výši 12 % z celkových investičních nákladů, která mimo jiné kompenzuje změny v overnight costs během výstavby. Největší podíl na přímých nákladech mají fúzní technologie (viz obr. 7.1). Lze očekávat, že se tyto náklady v budoucnu díky vývoji efektivnějších technologií sníží. Na druhou stranu, inflace investiční náklady na výstavbu zase navýší.

<b>Reaktor</b>		<b>862,5</b>	M\$
	*První stěna	160,0	M\$
	*Blanket	513,3	M\$
	*Divertor	75,4	M\$
	Stínění	80,0	M\$
	Podpurná konstrukce	33,8	M\$
<b>Magnetický systém</b>		<b>2216,3</b>	M\$
	Cívky	2040,9	M\$
	Příslušenství	175,4	M\$
<b>Systém ohřevu plazmatu a neinduktivní generace proudu</b>		<b>439,1</b>	M\$
	*H&CD <sup>1</sup> systém	43,9	M\$
	Systém injekce neutrálních částic	395,2	M\$
<b>Vakuový systém</b>		<b>39,3</b>	M\$
<b>Chladicí systém</b>		<b>221,3</b>	M\$
<b>Kryogenní systém</b>		<b>99,0</b>	M\$
<b>Palivové hospodářství</b>		<b>297,5</b>	M\$
<b>Diagnostika</b>		<b>150,0</b>	M\$
<b>Zařízení pro údržbu</b>		<b>300,0</b>	M\$
<b>Turbínový ostrov</b>		<b>320,7</b>	M\$
<b>Zařízení pro vyvedení výkonu</b>		<b>48,5</b>	M\$
<b>Systém odvodu tepla</b>		<b>85,6</b>	M\$
<b>Budovy</b>		<b>941,6</b>	M\$
<b>Ostatní zařízení</b>		<b>22,1</b>	M\$
<b>Přímé náklady</b>		<b>6043,4</b>	M\$
<b>Nepřímé náklady</b>		<b>1473,0</b>	M\$
<b>Rozpočtová rezerva</b>		<b>1008,6</b>	M\$
<b>Celkové investiční náklady</b>		<b>8525,0</b>	M\$

Tabulka 7.3: Investiční náklady modelu DEMO2 v cenách roku 2015. Informace převzaty z [54]. Symbolem \* jsou označeny vyměnitelné komponenty.

Nepřímé neboli režijní náklady jsou náklady, které nelze přiřadit k jednotlivé komponentě. Obsahují např. administrativu, mzdy vedoucích pracovníků, stavební dozor, energie a podobně.

<sup>1</sup>Jedná o část systému ohřevu plazmatu a neinduktivní generace elektrického proudu (Heating & current drive system), která bude muset být v průběhu životnosti elektrárny několikrát vyměněna.



Obrázek 7.1: Složení přímých nákladů výstavby modelu DEMO2. H&CD je zkratka pro systém ohřevu plazmatu a neinduktivní generace elektrického proudu. Graf byl vytvořen na základě dat z [54].

Specifikem fúzní energetiky je vysoký tepelný a neutronový tok, který zvyšuje nároky na odolnost komponent v přímém kontaktu s plazmatem. Tyto komponenty budou muset být v průběhu projektové životnosti elektrárny, která je pro model DEMO2 stanovena jako 40 let, několikrát vyměněny. Při výpočtech předpokládám, že cena vyměnitelných komponent je stále stejná.<sup>2</sup> Současný stav materiálového a technologického výzkumu neumožňuje vyrobit tyto komponenty s životností totožnou s životností elektrárny jako celku. Následující tabulka specifikuje životnost jednotlivých komponent.

Funkční celek	Životnost
Elektrárna	40 let
První stěna	10,5 let
Blanket	10,5 let
H&CD	10,5 let
Divertor	4,5 let

Tabulka 7.4: Životnost elektrárny a vyměnitelných komponent. Informace převzaty z [54].

Pro porovnání investičních nákladů: statistické údaje společností IEA a NEA<sup>3</sup> ukazují, že investiční náklady (vyjádřené v overnight costs v cenách roku 2013) jaderné elektrárny o průměrném výkonu 1434 MW jsou 4249 \$/kW [56]. V případě referenčního modelu DEMO2 dostáváme více než dvojnásobnou hodnotu, a sice 8945 \$/kW.

### Provozní náklady

Velkou výhodou energie z fúze jsou nízké palivové náklady. Referenční model DEMO2 počítá s využitím D-T fúzní reakce v poměru deuteria a tritia 50:50, přičemž tritium se bude získávat z

<sup>2</sup>Inflace bude kompenzována technologickým pokrokem. Tudíž zavádím předpoklad konstantní hodnoty.

<sup>3</sup>IEA: Mezinárodní energetická agentura, NEA: Agentura pro jadernou energii.

lithia v blanketu reaktoru. Palivové náklady činí pouze 2,7 M\$ ročně. Elektrárna o výkonu 1 GW spotřebuje ročně přibližně 110 kg deuteria a 380 kg lithia [57]. Ostatní provozní náklady jsou srovnatelné s provozními náklady jaderných elektráren [58]. Čím se ale fúzní elektrárna odlišuje, jsou vysoké roční náklady na výměnu komponent. Bez započítání ceny peněz činí průměrná roční investice do vyměnitelných komponent 85 M\$. Roční provozní náklady a investice jsou shrnuty v následující tabulce.

Roční náklady a investice	
Provoz a údržba	61,3 M\$/rok
Fond na likvidaci	4,9 M\$/rok
Palivové náklady	2,7 M\$/rok
Likvidace odpadu	3,5 M\$/rok
Investice do vyměnitelných komponent *	85,1 M\$/rok

Tabulka 7.5: Roční provozní náklady a investice vyjádřené v cenách roku 2015. Informace převzaty z [54].  
\*Průměrná roční částka bez započítání ceny peněz.

## 7.2 LCOE

Při analýze ekonomické efektivity modelu DEMO2 zavádím následující předpoklad: investici hodnotím z pohledu projektu, nikoliv z pohledu investora. Tudíž neuvažuji, jak by byl projekt financován (kolik by bylo vloženo vlastního kapitálu investora, kolik by činila půjčka atd.). Neuvažuji také daně z příjmů, neboť projekt může být realizován v různém daňovém prostředí. Analýza byla provedena v cenových hladinách roku 2015, v nichž jsou vyjádřeny údaje o referenčním modelu fúzní elektrárny DEMO2 uvedené v tabulkách 7.3 a 7.5.

### 7.2.1 Teoretický úvod

Průměrné výrobní náklady elektriny *LCOE* (Levelized Cost Of Electricity) jsou užitečným nástrojem pro porovnávání různých způsobů výroby elektrické energie. Tato metoda uvažuje obecné riziko investice do dané technologie, nikoliv specifické riziko investice do projektu na specifickém trhu. Pro své výpočty zavádím v souladu se studií OECD<sup>4</sup> [56] následující předpoklady:

- Diskont  $r$  je během životnosti projektu konstantní. Inflace není brána v úvahu.
- Množství roční vyrobené elektrické energie je během životnosti projektu konstantní.
- Náklady elektrárny nezahrnují náklady na systémové služby. *LCOE* jsou počítány na prahu výroby a vliv daného zdroje energie na elektrizační soustavu není uvažován.
- Výpočty jsou provedeny z hlediska projektu jako celku, tj. bez konkrétního financování, před zdaněním a za předpokladu nulových dotací (investičních i provozních).

<sup>4</sup>Organizace pro hospodářskou spolupráci a rozvoj



Výpočet *LCOE* dle studie OECD [56] s výše uvedenými předpoklady vychází z rovnosti současné hodnoty diskontovaných tržeb a současné hodnoty diskontovaných nákladů. Diskontování je provedeno k počátku prvního roku provozu. Tato rovnost je vyjádřena následující rovnicí [56].

$$\sum_{t=0}^{T_c} C \cdot W_t(1+r)^{-t} = \sum_{t=0}^{T_c} [(IN_t + O\&U_t + Npal_t + L\&O_t)(1+r)^{-t}] \quad (7.1)$$

Význam proměnných:

$C$	Cena 1 vyrobené MWh elektrické energie
$W_t$	Množství elektrické energie vyrobené v roce $t$
$r$	Diskont
$T_z$	Životnost projektu (doba provozu)
$T_c$	Celková doba zahrnující časový úsek od začátku výstavby projektu do ukončení provozu zařízení
$IN_t$	Investiční náklady v $t$ -tém roce (výstavby i provozu)
$O\&U_t$	Náklady na opravu a údržbu v roce $t$
$Npal_t$	Palivové náklady v roce $t$
$L\&O_t$	Náklady na likvidaci zařízení a zacházení s odpadem v roce $t$

Tržba  $C$  z jedné MWh vyrobené elektrické energie je předpokládána konstantní, přičemž tržby jsou spojeny pouze s obdobím provozu. Předchozí rovnici lze tudíž upravit na tvar:

$$LCOE = C = \frac{\sum_{t=0}^{T_c} [(IN_t + O\&U_t + Npal_t + L\&O_t)(1+r)^{-t}]}{\sum_{t=0}^{T_z} W_t(1+r)^{-t}} \quad (7.2)$$

Studie OECD [56] ve vzorci počítá ještě s cenou za uhlík. Tyto náklady (uhlíkové externality) jsou pro fúzní elektrárnu nulové. Tím je fúzní elektrárna při porovnávání různých zdrojů výroby elektřiny zvýhodněna. Jiné malé externality s tímto zdrojem energie však spojeny jsou. Blíže se jim věnuje podkapitola 7.3.

### 7.2.2 Výsledky

Při výpočtech pracuji s daty z tabulek 7.3, 7.4 a 7.5. Doba výstavby referenčního modelu DEMO2 byla zvolena jako 10 let.<sup>5</sup> Ve výpočtech předpokládám rovnoměrné rozložení celkových investičních nákladů do 10 let výstavby. Během doby provozu elektrárny jsou do investičních nákladů  $IN_t$  zahrnuty roční investice do vyměnitelných komponent. Pořizovací cenu vyměnitelných komponent předpokládám stále stejnou. Na základě životností a nákladů na jednotlivé vyměnitelné komponenty uvedených v tabulce 7.3 a 7.4 byla vypočítána průměrná roční částka investic do vyměnitelných komponent.

S použitím předchozích údajů, vzorců a předpokladů jsem stanovila průměrné náklady 1 MWh elektrické energie vyrobené ve fúzní elektrárně pro různé diskonty (viz tabulka 7.6). Detailní výpočet obsahuje příloha A.1.

<sup>5</sup>Doba výstavby jaderných štěpných elektráren je ve studii OECD [56] uvažována 7 let. Fúzní elektrárna obsahuje nové technologie, proto jsem zvolila delší dobu výstavby respektující nedostatečné know-how.

r	LCOE [\$/MWh]
0	59,2
0,03	92,7
0,05	125,0
0,07	166,3
0,1	247,1

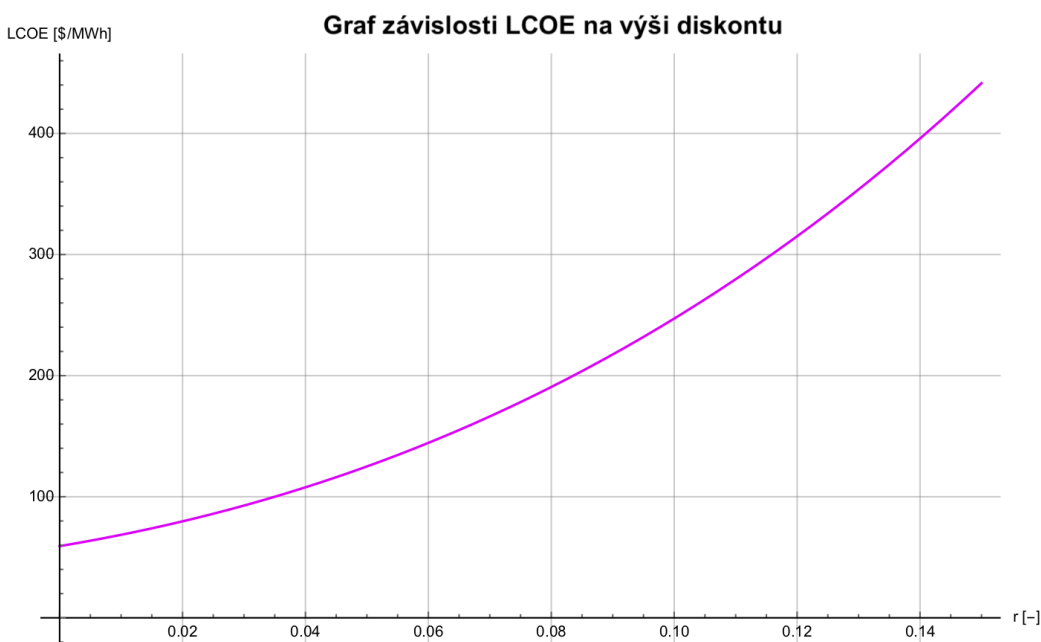
Tabulka 7.6: Průměrné výrobní náklady elektřiny modelové fúzní elektrárny DEMO2 pro různé diskonty.

### Volba diskontu

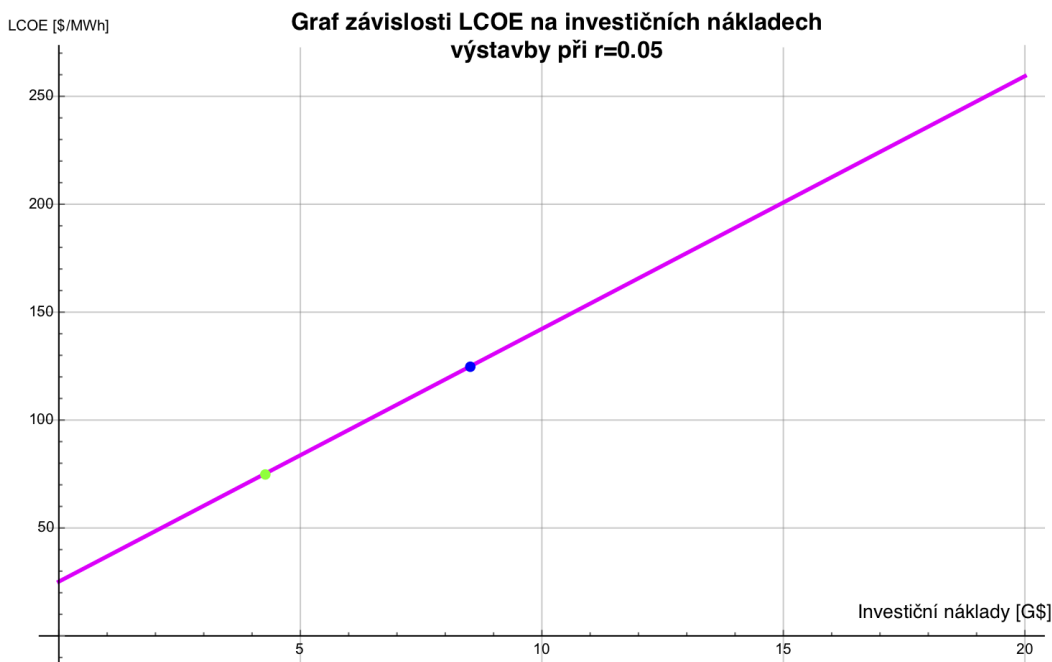
Diskont zohledňuje riziko projektu, někdy je také označován jako výnosová míra. Při výpočtu *LCOE* počítám s rozložením celkových investic na výstavbu elektrárny do 10 let výstavby. Investiční výdaje diskontované k roku zahájení provozu jsou znatelně vyšší než jejich prostý součet bez diskontování. Volba diskontu má vliv na výslednou hodnotu *LCOE*. Z tohoto důvodu jsem určila průměrné náklady na výrobu elektrické energie pro různé případy (viz tabulka 7.6) a závislost *LCOE* na diskontu vynesla do grafu (viz obrázek 7.2). V prvním případě jsem neuvvažovala časovou cenu peněz. 10% diskont odpovídá investici v rizikovém prostředí [56]. Lze očekávat, že fúzní energie bude stejně jako energie z obnovitelných zdrojů určitým způsobem podporována ze strany státu, a to např. převzetím legislativních rizik, dotacemi nebo garantovanou výkupní cenou. Na základě tohoto předpokladu považuji diskontní sazbu 5 % za vhodnou.

### Citlivostní analýza

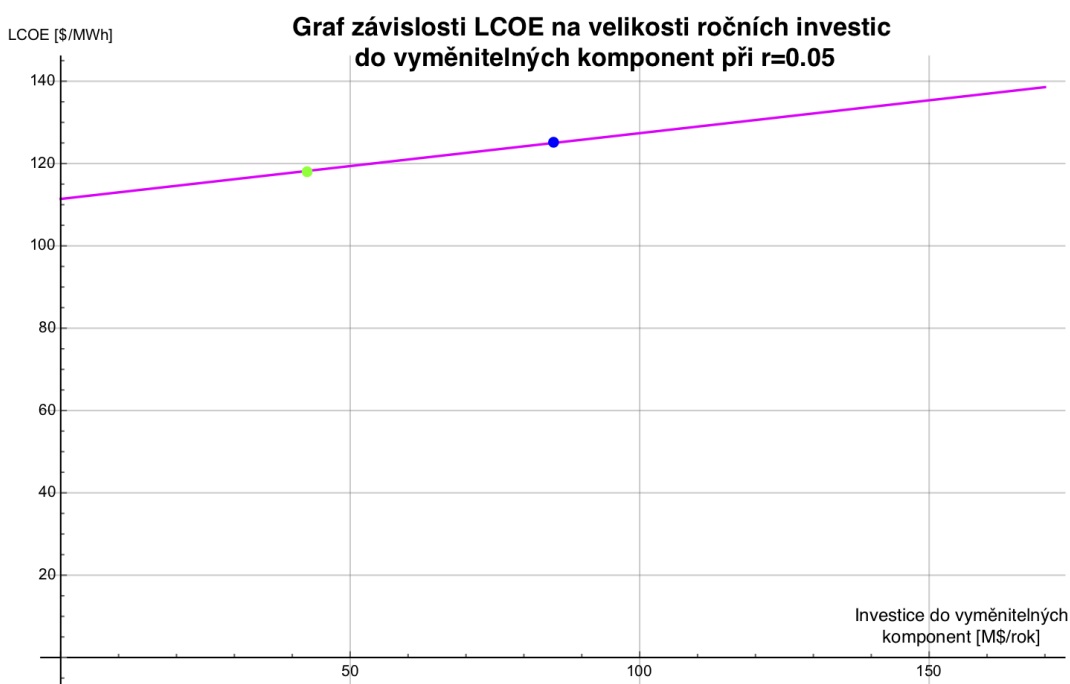
Vliv na průměrné výrobní náklady elektřiny má nejenom výše diskontu, ale i investiční náklady na výstavbu a následné náklady na výměnu komponent, které jsou v přímém kontaktu s plazmatem. Závislost *LCOE* na různých parametrech zobrazují grafy na obrázcích 7.2, 7.3 a 7.4 níže.



Obrázek 7.2: Graf zobrazující závislost *LCOE* na výši diskontu  $r$ .



Obrázek 7.3: Graf zobrazující závislost LCOE na výši celkových investičních nákladů. Zvýrazněný modrý bod na křivce odpovídá hodnotě LCOE při výše uvedených investičních nákladech 8252 M\$. Zelený bod na křivce ukazuje velikost LCOE pro případ, kdy by investiční náklady byly poloviční. LCOE by tedy klesly zhruba na polovinu.



Obrázek 7.4: Graf zobrazující závislost LCOE na výši ročních investic do vyměnitelných komponent. Zvýrazněný modrý bod na křivce odpovídá LCOE při ročních investicích do vyměnitelných komponent ve výši 85 M\$. Zelený bod na křivce ukazuje velikost LCOE pro případ, kdy by roční investiční náklady na vyměnitelné komponenty byly poloviční.

### Diskuze hodnoty LCOE

Pro následující porovnání jsou veškeré údaje přepočítány na cenové hladiny roku 2015.<sup>6</sup>

Studie z roku 2002 [61], která se zabývala interními náklady elektřiny z fúzní elektrárny, stanovila pásmo, ve kterém se bude výše nákladů 1 vyrobené MWh pohybovat, jako 102-190 \$/MWh. V tomto pásmu se pohybují mnou vypočítané *LCOE* pro rozmezí diskontu zhruba 4-8 % (viz obrázek 7.2).

Další studie [57] uvažující fúzní elektrárnu o výkonu 1 GW, životnosti 30 let s ročním využitím instalovaného výkonu 75 %, investičními náklady 17 308 \$/kW a diskontem  $r = 5\%$  dospěla k hodnotě *LCOE* = 286 \$/MWh. Z grafu závislosti *LCOE* na velikosti investičních nákladů je patrné, že pro investiční náklady 17,3 miliard \$ se svými výpočty blížím k podobné hodnotě *LCOE*.

V článku [58] byla provedena ekonomická analýza téhož modelu v cenách roku 2015. Tato studie uvažovala i konkrétní financování projektu a realizaci projektu v konkrétním daňovém prostředí. Pro diskont ve výši 7 % byla stanovena hodnota *LCOE* na 160,3 \$/MWh. Mnou vypočítaná hodnota *LCOE* z pohledu projektu při stejném diskontu je 166,3 \$/MWh.

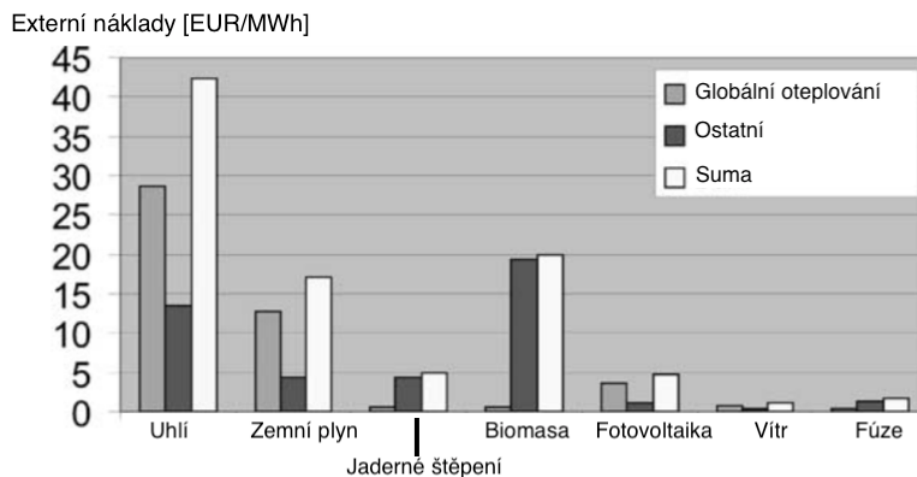
### 7.3 Externí náklady

Výše provedené výpočty nezahrnovaly náklady spojené s poškozováním životního prostředí či neblahé účinky daného zdroje energie na lidské zdraví, tzv. externality. Pro porovnávání různých zdrojů energie může být tato položka zásadní [1].

ExternE je metoda vytvořená pro standardizované stanovení externích nákladů. Zahrnuje celý životní a palivový cyklus, likvidaci odpadu (v tomto případě se jedná zejména o aktivované jaderné komponenty reaktoru) i vyřazení elektrárny z provozu a následnou revitalizaci místa, kde se nacházela. Dále jsou zahrnuty faktory jako: nebezpečné chemikálie, radioaktivní emise, profesní i dopravní nehody, havárie elektrárny, profesní ozáření, vlivy na zdraví osob (personálu i obyvatelstva), vlivy na krajinu, vlivy na degradaci např. stavebních materiálů a další [1]. Metoda ExternE bere v potaz i umístění [1]. Veškeré neblahé účinky jsou kvantifikovány pomocí peněz a jejich suma dává výsledné externí náklady. Zde naráží metodika ExternE na komplikace spojené ohodnocováním položek, které nejsou běžně vyjadřovány v penězích, jako např. ocenění lidského života či účinků na lidské zdraví [62]. Další nejistoty, které do procesu vstupují a jejichž vliv nelze jednoduše vyčíslit, jsou kupříkladu vlivy emisí na klima. Externí náklady různých zdrojů energie jsou k vidění na obrázku 7.5. Nutno podotknout, že výsledky jsou zatíženy velkou nejistotou [61].

Celkové externí náklady fúzní elektrárny lze ovlivnit např. volbou chladícího média. Z toho hlediska se lepší volbou, než je voda, jeví helium [63]. Při konstrukci elektrárny vstupují do

<sup>6</sup>Zdrojem přepočtu jsou údaje Českého statistického úřadu ČSÚ [59] a České národní banky [60]. Přepočty jsou obsaženy v příloze A.2.



Obrázek 7.5: Graf zobrazující externí náklady různých zdrojů energie. Převzato z [61].

výpočtu také externality plynoucí ze spotřeby elektrické energie během těžby, transportu a zpracování materiálů [62]. Studie [63], v níž byly vypočítány externí náklady 3 různých modelů fúzní elektrárny o výkonu 1 GW, stanovila externí náklady těchto modelů v řádu jednotek EUR/MWh. Podrobnější přehled jednotlivých položek, které byly při tomto výpočtu započítány, nabízí tabulka 7.7.

Stádia	Zátěž	1. Model	2. Model	3. Model
<b>Zpracování materiálů</b>		9,75E-02	9,75E-02	9,75E-02
<b>Konstrukce</b>	Emise způsobené dopravou	4,63E-03	4,81E-03	4,63E-03
	Dopravní nehody	4,48E-03	4,68E-03	4,48E-03
	Pracovní nehody	2,35E-01	2,35E-01	2,35E-01
<b>Provoz elektrárny</b>	Běžné uvolňování radioaktivních látek	Lokální vdechnutí do atmosféry 0,0000000854 1,02E-07 0	Globální 3,42E-05 7,51E-06 1,04E-04	8,54E-08 1,02E-07 0
	Profesní ozáření	9,65E-02	2,52	9,65E-02
	Jiné pracovní nehody	4,68E-03	2,60E-02	4,68E-03
		7,97E-02	7,97E-02	7,97E-02
<b>Likvidace elektrárny</b>	Emise způsobené dopravou	2,56E-03	5,02E-03	3,17E-03
	Dopravní nehody	4,84E-04	9,49E-04	6,01E-04
	Pracovní nehody	2,57E-01	2,57E-01	2,57E-01
<b>Recyklace</b>	Emise způsobené dopravou	2,22E-03	3,08E-03	2,22E-03
	Dopravní nehody	4,10E-04	5,84E-04	4,10E-04
	Emise neradioaktivníh prachu	1,70E-02	1,60E-02	1,70E-02
	Radioaktivní emise	4,65E-03	6,37E-03	4,65E-03
	Emise izotopu uhlíku C-14	3,14E-04	2,06E-04	2,90E-04
<b>Revitalizace pozemku</b>	Emise	3,79E-03	3,79E-03	3,79E-03
	Dopravní nehody	6,24E-04	6,24E-04	6,24E-04
<b>Likvidace odpadu</b>		0,8	0,5	0,7
<b>CELKEM</b>		1,61	3,76	1,51

Tabulka 7.7: Tabulka externích nákladů 3 modelů fúzní elektrárny vyjádřené v EUR/MWh. Informace převzaty z [63].

Porovnávané modely ze studie [63] se liší v použitých materiálech. Hlavní rozdíly mezi modely shrnuje tabulka 7.8. U modelů fúzní elektrárny 1 a 3 má dominantní vliv na externí náklady likvidace odpadu. U 2. modelu hraje hlavní roli uvolňování radioaktivních látek během provozu. Jedná se zejména o emise radiouhlíku C-14, které vstupují do globálního uhlíkového cyklu [63].

	1. Model	2. Model	3. Model
První stěna/blanket	Slitina vanadu	Martenzitická ocel*	Martenzitická ocel*
Výroba tritia	Keramický Li <sub>2</sub> O	Tekutý Li <sub>17</sub> Pb <sub>83</sub>	Keramický Li <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub>
Chlazení první stěny/blanketu	Helium	Voda	Helium

\* s nízkou aktivací

Tabulka 7.8: Vlastnosti modelů fúzních elektráren 1, 2 a 3 porovnávaných z hlediska externích nákladů. Informace převzaty z [63].

Z výše uvedeného je patrné, že externí náklady fúzní elektrárny jsou srovnatelné s externími náklady větrných a slunečních elektráren i štěpných jaderných elektráren [64]. Externí náklady výroby elektrické energie z uhlí jsou zhruba 20krát vyšší než u fúze [61]. Novější studie [65] uvádí, že externí náklady uhelné elektrárny se pohybují v rozmezí 70-130 EUR/MWh.<sup>7</sup>

## 7.4 Konkurenceschopnost fúzní energie

Studie OECD [56] s názvem *Projected Costs of Generating Electricity* analyzuje rozsáhlý soubor dat zemí OECD. Ve verzi z roku 2015 s fúzní elektrárnou nepočítá. Výsledky této studie jsou zobrazeny v obrázku 7.6 a 7.7. Na základě těchto výsledků a mnou vypočítané hodnoty *LCOE* lze říci, že elektřina z fúzní elektrárny je konkurenceschopná s typickými obnovitelnými zdroji, jako jsou sluneční a větrné elektrárny. Na rozdíl od těchto zdrojů bude fúzní elektrárna produkovat elektřinu kontinuálně. Bude ji tedy možné provozovat v základním pásmu denního diagramu zatížení [61]. Lze očekávat, že po připočtení nákladů na systémové služby pro intermitentní zdroje, by již obnovitelné zdroje (FVE<sup>8</sup>, větrné elektrárny) s fúzí konkurenceschopné nebyly [61].

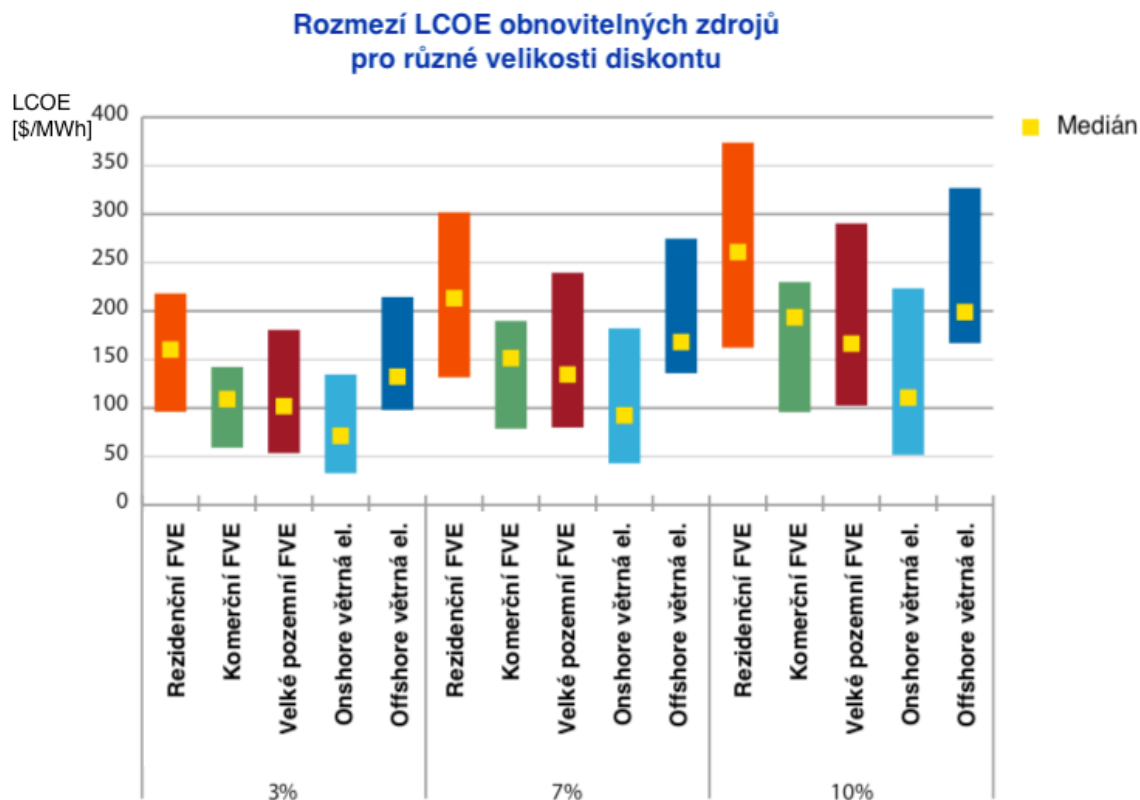
*LCOE* fúzní elektrárny jsou však vyšší než *LCOE* zdrojů energie pracujících v základním pásmu denního diagramu zatížení. Přesnější porovnání s výsledky z tabulky 7.6 nabízí graf na obrázku 7.7. Z grafu plyne, že *LCOE* paroplynové (CCGT)<sup>9</sup> či uhelné elektrárny se s diskontem mění pouze nepatrně. Naopak *LCOE* štěpné jaderné elektrárny s rostoucím diskontem rostou významně. Stejně tak je tomu i u fúzní elektrárny (viz obrázek 7.2). Pokud se tedy stát zaváže k převzetí části rizik, průměrné výrobní náklady elektřiny vyrobené ve fúzní elektrárně se podstatně sníží. Připočtení externích nákladů, které jsou pro výrobu elektrické energie z fúze nízké, vede ke zvýhodnění fúzní elektrárny při porovnání s ostatními zdroji energie.

Tržní cena elektrické energie na burze se v posledním roce pohybovala v rozmezí 28-55 EUR/MWh [66]. Hodnota *LCOE* nelze ztotožňovat s cenou, za kterou by se elektrická energie z fúzní elektrárny prodávala na trhu, a to kvůli zjednodušujícím předpokladům, které byly zavedeny. Nicméně je zřejmé, že bez určité formy podpory (dotace, garantovaná výkupní cena nebo převzetí některých rizik státem), by fúzní elektrárna nebyla zisková. Potřebné dotace jsou však srovnatelné s dotacemi pro obnovitelné zdroje energie [58].

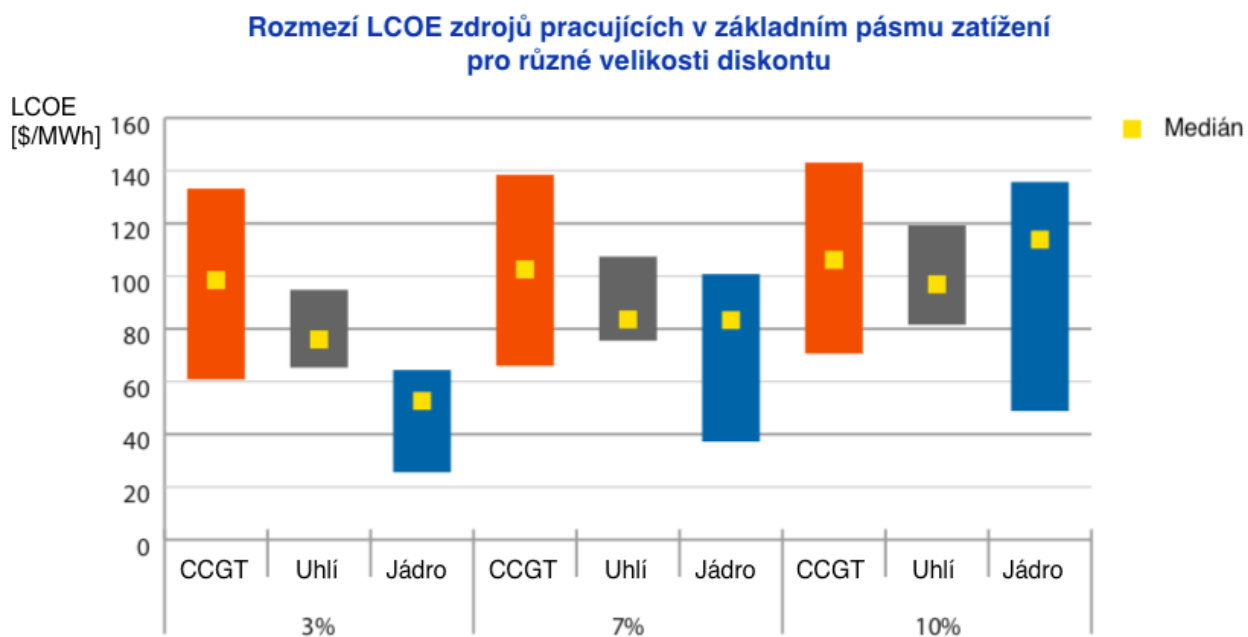
<sup>7</sup>V cenách roku 2012.

<sup>8</sup>FVE je zkratka pro fotovoltaickou elektrárnu.

<sup>9</sup>CCGT je zkratka anglických slov Combined Cycle Gas Turbine (Paroplynová turbína s kombinovaným cyklem.)



Obrázek 7.6: LCOE slunečních a větrných elektráren dle analýzy OECD pro výši diskontu 3 %, 7% a 10 %. V cenách roku 2013. Převzato z [56].



Obrázek 7.7: LCOE zdrojů energie pracujících v základním zatížení dle analýzy OECD pro výši diskontu 3 %, 7% a 10 %. V cenách roku 2013. Převzato z [56].

# Kapitola 8

## Závěr

Motivace pro vypracování této práce byla rozebrána v úvodní kapitole. Současná energetická situace je dlouhodobě neudržitelná, a proto je nutné hledat nové zdroje energie. Velice perspektivním zdrojem energie je právě fúze, která by umožnila vyrábět elektrickou energii šetrnou k životnímu prostředí z prakticky nevyčerpatelných zásob paliva, a navíc bezpečně.

První kapitola představuje teoretický úvod do problematiky. Byly v ní vysvětleny základní fyzikální principy termonukleární fúze, které jsou klíčové pro následující kapitoly. Na těchto základech staví druhá kapitola, která se zabývá třemi hlavními přístupy k řízení termonukleární fúzi, a sice magnetickým, inerciálním a magneto-inerciálním udržením plazmatu. V rámci této kapitoly byla také vysvětlena funkce vybraných fúzních zařízení.

Využití fúze, jakožto zdroje energie, je motivací vědců již více než 60 let. Spletitou historii fúzního výzkumu jak ve světě, tak v České republice, popisuje 3. kapitola. Ve 4. kapitole jsem se věnovala současnému stavu výzkumu řízení termonukleární fúze. Pro vytvoření přehledu byli vybráni zástupci jednotlivých přístupů k fúzi, kteří představují nejpokročilejší a největší zařízení svého druhu na světě. V této části byla také zmíněna hlavní výzkumná centra v České republice a byl popsán aktuální stav výzkumu fúze na Katedře fyziky FEL ČVUT.

I přes desítky let výzkumu a značný vědecký pokrok v této oblasti dosud fúzní elektrárna nestojí. Přehled stěžejních problémů různých přístupů k fúzi, které v současnosti znemožňují využití fúze v energetice, obsahuje 5. kapitola. Šestá kapitola nastiňuje vývoj výzkumu řízení termonukleární fúze do budoucna. Tato sekce se kromě rozestavenému tokamaku ITER věnuje i koncepcím fúzních elektráren.

V praktické části této bakalářské práce jsem se zabývala ekonomickým zhodnocením referenčního modelu fúzní elektrárny DEMO2, která pracuje na principu tokamaku. Vypočítala jsem průměrné výrobní náklady elektrické energie vyrobené v této modelové elektrárně, tzv. *LCOE*, a provedla jejich citlivostní analýzu. Dále jsem porovnávala externí náklady spojené s výrobou elektrické energie ve fúzní elektrárně s jinými zdroji.



Výsledky ekonomické analýzy referenčního modelu fúzní elektrárny DEMO2 ukazují, že fúzní elektrárna je konkurenceschopná s obnovitelnými zdroji energie, jako jsou sluneční a větrné elektrárny. Bez určitých forem podpory by však modelová fúzní elektrárna byla na trhu nerentabilní. Citlivostí analýza hodnoty *LCOE* na velikosti diskontu ukázala, že pokud na sebe stát převezme část rizik, průměrné náklady 1 vyrobené MWh se podstatně sníží. O tom, že fúze má velice malý negativní vliv na životní prostředí, se lze přesvědčit z nízké hodnoty externích nákladů, které jsou srovnatelné s externími náklady slunečních, větrných a štěpných jaderných elektráren. Nízké externality zvýhodňují fúzi při porovnávání různých zdrojů energie.

Z analýzy referenčního modelu fúzní elektrárny DEMO2 vyplývá, že se jedná o čistý zdroj energie s nízkými palivovými náklady, ale s vysokými investičními náklady. Vysoké investiční náklady jsou způsobené složitými technologiemi (magnetický systém), nedostatečným know-how a vysokými nároky na materiály komponent v přímém kontaktu s plazmatem. Je to právě materiálový výzkum, který bude na cestě k fúzní elektrárně stěžejní.

V krátkodobém měřítku budou klíčové výsledky z tokamaku ITER, který by měl být uveden do provozu v roce 2025. Měl by zde být dosažen důležitý milník, a sice vyprodukování více energie, než bylo spotřebováno. Pokud se vyplní tyto optimistické vyhlídky, bude dalším krokem k fúzní elektrárně demonstrační elektrárna DEMO. Ta však nebude spuštěna dříve, než ve 40. letech. O komerční fúzní elektrárně, která by dodávala elektřinu do sítě, se tudíž hovoří až v souvislosti s druhou polovinou 21. století.

V současnosti však stále není zcela jisté, na jakém principu bude fúzní elektrárna fungovat. Není tedy vyloučeno, že další typy fúze, případě jejich kombinace, realizaci tohoto snu umožní. K jeho uskutečnění bych ráda přispěla dalším výzkumem.

# Literatura

- [1] KIKUCHI, Mitsuru; LACKNER, Karl; TRAN, Minh Quang. *Fusion physics*. Vienna: IAEA, 2012. ISBN 978-92-0-130410-0.
- [2] IEA, International Energy Agency. *World Energy Outlook 2017* [online]. Paris: OECD Publishing, 2017. [cit. 10. 10. 2018]. ISBN 9789264282308. Dostupné také z: <https://www.oecd-ilibrary.org/content/publication/weo-2017-en>.
- [3] BP, Global British Petroleum. *BP statistical review of world energy June 2018* [online]. London, June 2018. [cit. 10. 10. 2018]. Dostupné také z: <https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2018-full-report.pdf>.
- [4] LIBRA, Martin; MLYNÁŘ, Jan; POULEK, Vladislav. *Jaderná energie*. Praha: ILSA, 2012. ISBN 978-80-904311-6-4.
- [5] ŘÍPA, Milan; MLYNÁŘ, J; WEINZETTL, Vladimír; ŽÁČEK, František. *Řízená termo-jaderná fúze pro každého*. Prague: ÚFP AV ČR, 2011. ISBN 80-902724-7-9.
- [6] SMITH, Chris Llewellyn. The need for fusion. *Fusion engineering and design*. 2005, roč. 74, č. 1-4, s. 3-8. ISSN 0920-3796.
- [7] CHENG, Lijing; ZHU, Jiang. 2017 was the warmest year on record for the global ocean. In: *Advances in Atmospheric Sciences* [online]. 2018, roč. 35, č. 3, s. 261-263. ISSN 1861-9533. Dostupné z DOI: [10.1007/s00376-018-8011-z](https://doi.org/10.1007/s00376-018-8011-z).
- [8] IEA, International Energy Agency. *World Energy Balances 2017* [online]. Paris: OECD Publishing, 2017. [cit. 08. 10. 2018]. Dostupné z DOI: [https://doi.org/10.1787/world\\_energy\\_bal-2017-en](https://doi.org/10.1787/world_energy_bal-2017-en).
- [9] FELLS, Ian. The need for energy. *Europhysics news*. 1998, roč. 29, č. 6, s. 193-195.
- [10] FREIDBERG, Jeffrey P. *Plasma physics and fusion energy* [online]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. [cit. 14. 10. 2018]. ISBN 978-0-511-27375-9. Dostupné také z: <http://www.gammaexplorer.com/wp-content/uploads/2014/03/Plasma-Physics-and-Fusion-Energy-Jeffrey-Friedberg-Cambridge-University-Press.pdf>.
- [11] ENTLER, Slavomír; MLYNÁŘ, Jan. *Spoutání slunce*. Praha: Středisko společných činností AV ČR, 2016. Věda kolem nás. ISBN 978-80-270-0252-8.

- [12] MCCRACKEN, Garry M; MCCRACKEN, Garry; STOTT, Peter. *Fusion: the energy of the universe* [online]. Amsterdam: Elsevier Academic Press, 2005. [cit. 12. 10. 2018]. ISBN 0-12-481851-X. Dostupné také z: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/cvut/detail.action?docID=294604>.
- [13] Atomové jádro. In: *Wikipedia* [online]. Wikipedia, 2009. [cit. 26.10.2018]. Dostupné také z: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Binding\\_energy\\_curve\\_-\\_common\\_isotopes-CZ.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Binding_energy_curve_-_common_isotopes-CZ.svg).
- [14] CHAN, Francis F. *Úvod do fyziky plazmatu*. 3. vyd. Praha: Academia, 1984.
- [15] KULHÁNEK, Petr; ROZEHNAL, Jakub. *Hvězdy, planety, magnety*. Kolumbus. Praha: Mladá fronta, 2007. ISBN 978-80-204-1693-3.
- [16] LAWSON, J D. Some Criteria for a Power Producing Thermonuclear Reactor. *London: Proceedings of the Physical Society. Section B*. 1957, roč. 70, č. 1, s. 6. Dostupné také z: <http://stacks.iop.org/0370-1301/70/i=1/a=303>.
- [17] ENTLER, Slavomír. Lawsonovo kritérium- kritérium fúzní energetiky. *Československý časopis pro fyziku*. 2015, roč. 64, č. 3, s. 161–167. ISSN 0322-7766.
- [18] The schematics of the  $\theta$ -pinch (the upper panel) and the z-pinch (the lower panel). The curves in blue (magenta) refer to the current (magnetic field). In: *ResearchGate* [online]. ResearchGate, © 2018. [cit. 03.11.2018]. Dostupné také z: [https://www.researchgate.net/figure/Color-online-The-schematics-of-the-th-pinch-the-upper-panel-and-the-z-pinch-the-lower\\_fig1\\_238950094](https://www.researchgate.net/figure/Color-online-The-schematics-of-the-th-pinch-the-upper-panel-and-the-z-pinch-the-lower_fig1_238950094).
- [19] Plasma confinement by magnetic mirror configuration and improvement of the confinement with the tandem mirror configuration. In: *Plasma Research Center* [online]. Plasma Research Center, © 2018. [cit. 02.11.2018]. Dostupné také z: [https://www.prc.tsukuba.ac.jp/en/?page\\_id=806](https://www.prc.tsukuba.ac.jp/en/?page_id=806).
- [20] Diagram illustrating the tokamak principle: arrangement of magnetic field coils and the resulting magnetic field that confines the plasma (2005). In: *EUROfusion*. [online]. EUROfusion CONSORTIUM RESEARCH INSTITUTIONS, © 2014-2018. [cit. 03.11.2018]. Dostupné také z: <https://www.euro-fusion.org/news/detail/tokamak-principle/>.
- [21] WAGNER, F. Fusion energy. *MRS Energy and Sustainability* [online]. June 2018, roč. 5, č. 5, s. E8. [cit. 06.11.2018]. ISSN 2329-2237. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1557/mre.2018.8>.
- [22] Indirect drive. In: *Lawrence Livermore National Laboratory*. [online]. LLNL, © 2018. [cit. 09.11.2018]. Dostupné také z: <https://lasers.llnl.gov/science/icf/how-icf-works>.
- [23] Fast ignition concept using an ultra-intence laser. In: *OSAKA UNIVERSITY* [online]. OSAKA UNIVERSITY, © 2009. [cit. 07.12.2018]. Dostupné také z: <http://www.osaka-u.ac.jp/en/research/annual-report/volume-3/selection/02a.html>.

- [24] LEOPOLDO, Soto et al. Demonstration of neutron production in a table-top pinch plasma focus device operating at only tens of joules. *Journal of Physics D: Applied Physics* [online]. 2008, roč. 41, č. 20, s. 205215. Dostupné také z: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0022-3727/41/20/205215/meta>.
- [25] *ITER - the way to new energy* [online]. ITER organization, 2019. [cit. 07.2.2018]. Dostupné také z: <https://www.iter.org>.
- [26] ŘÍPA, Milan. *Historie výzkumu řízené termojaderné fúze*. Věda kolem nás. Praha: Středisko společných činností AV ČR, v.v.i., 2014.
- [27] ŘÍPA, Milan. *Historie výzkumu řízené termojaderné fúze v ČR*. Věda kolem nás. Praha: Středisko společných činností AV ČR, v.v.i., 2016. ISSN 2464-6245.
- [28] KUBEŠ, Pavel. Novinky v řízené termonukleární fúzi. *Československý časopis pro fyziku*. 2001, roč. 51, č. 4, s. 252–255. ISSN 0009-0700.
- [29] The JET magnetic fusion experiment in 1991. In: *Wikipedia*. [online]. Wikipedia, 2013. [cit. 08.12.2018]. Dostupné také z: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:The\\_JET\\_magnetic\\_fusion\\_experiment\\_in\\_1991.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:The_JET_magnetic_fusion_experiment_in_1991.jpg).
- [30] Tokamak Golem. In: *Jaderka*. [online]. Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT, © 2018. [cit. 08.12.2018]. Dostupné také z: <https://jaderka.fjfi.cvut.cz/blog/tokamak-golem-se-vydava-do-sveta>.
- [31] ŘÍPA, Milan. Historie tokamaku ve světě a u nás. *Československý časopis pro fyziku*. 2008, roč. 58, s. 208–211.
- [32] *International Atomic Energy Agency* [online]. © 1998–2019 IAEA. [cit. 12.2.2019]. Dostupné také z: <https://www.iaea.org/topics/fusion>.
- [33] JET TEAM et al. Fusion energy production from a deuterium-tritium plasma in the JET tokamak. *Nuclear Fusion*. 1992, roč. 32, č. 2, s. 187.
- [34] *EUROfusion* [online]. EUROfusion CONSORTIUM RESEARCH INSTITUTIONS, 2014–2019. [cit. 2.2.2019]. Dostupné také z: <https://www.euro-fusion.org/devices/jet>.
- [35] *National Ignition Facility and Photon Science* [online]. Lawrence Livermore National Laboratory. [cit. 17.12.2018]. Dostupné také z: <https://lasers.llnl.gov>.
- [36] MOSES, Edward I. The National Ignition Facility (NIF): a path to fusion energy. *Energy Conversion and Management*. 2008, roč. 49, č. 7, s. 1795–1802.
- [37] MOSES, Edward I. Ignition and inertial confinement fusion at the National Ignition Facility. In: *Journal of Physics: Conference Series*. 2010, sv. 244, s. 012006. Č. 1.
- [38] *Sandia National Laboratories* [online]. National Technology and Engineering Solutions of Sandia, LLC, 2018. [cit. 20.12.2018]. Dostupné také z: <http://www.sandia.gov/z-machine/>.

- [39] GIBBS, W Wayt. Triple-threat method sparks hope for fusion. *Nature News*. 2014, roč. 505, č. 7481, s. 9. Dostupné také z: [https://www.nature.com/polopoly\\_fs/1.14445!/menu/main/topColumns/topLeftColumn/pdf/505009a.pdf](https://www.nature.com/polopoly_fs/1.14445!/menu/main/topColumns/topLeftColumn/pdf/505009a.pdf).
- [40] OLSON, Craig L et al. Z-pinch inertial fusion energy. *Landholt-Boernstein Handbook on Energy Technologies*. 2004, roč. 8, s. 3.
- [41] CUNEO, ME et al. Magnetically driven implosions for inertial confinement fusion at Sandia National Laboratories. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2012, roč. 40, č. 12, s. 3222–3245. Dostupné také z: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6353648>.
- [42] Ústav fyziky plazmatu AV ČR, v. v. i. [online]. © Ústav fyziky plazmatu AV ČR, v. v. i. [cit. 25.2.2019]. Dostupné také z: <http://www.ipp.cas.cz>.
- [43] Centrum výzkumu Řež s.r.o. [online]. © 2019, Centrum výzkumu Řež s.r.o.. [cit. 25.2.2019]. Dostupné také z: <http://cvrez.cz>.
- [44] PALS, Prague Asterix Laser System [online]. © PALS RC 2010. [cit. 25.2.2019]. Dostupné také z: <http://www.pals.cas.cz/cz/>.
- [45] ELI Beamlines [online]. © ELI Beamlines 2019. [cit. 8.3.2019]. Dostupné také z: <https://www.eli-beams.eu>.
- [46] KUBEŠ, Pavel; KRAVÁRIK, Jozef. Silnoproudé výboje na Katedře fyziky FEL ČVUT. *Československý časopis pro fyziku*. 2007, roč. 57, č. 3, s. 152–157. ISSN 0009-0700.
- [47] *Silnoproudé výboje*. FEL ČVUT. [cit. 8.3.2019]. Dostupné také z: <https://www.fel.cvut.cz/cz/vv/tymy/vyboje.html>.
- [48] W. J., NUTTALL. *Fusion as an energy source: Challenges and Opportunities* [online]. IOP Report, 2008. [cit. 15.12.2018]. Dostupné také z: [https://www.iop.org/publications/iop/2008/file\\_38224.pdf](https://www.iop.org/publications/iop/2008/file_38224.pdf).
- [49] EUROPEAN COMMISSION, Directorate-General for Energy. *Commission staff working document: The ITER Project Status* [online]. Brussels: European Commission, 2017. [cit. 18. 2. 2019]. Dostupné také z: <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/86ff07ac-50e6-11e7-a5ca-01aa75ed71a1/language-en>.
- [50] ENTLER, Slavomír; DLOUHÝ, Tomáš; DOSTÁL, Václav; HORÁČEK, Jan. Ekonomika fúzní energetiky. *Energetika*. 2017, roč. 67, č. 5, s. 318–323. Dostupné také z: <http://www.ipp.cas.cz/miranda2/export/sitesavcr/ufp/ufp-v-mediich/Publications/Ekonomika-fuzni-energetiky.pdf>.
- [51] FEDERICI, G et al. Overview of EU DEMO design and R&D activities. *Fusion Engineering and Design*. 2014, roč. 89, č. 7-8, s. 882–889.
- [52] OLSON, CL. 9 Inertial confinement fusion: z-pinch. In: *Nuclear Energy*. Springer, 2005, s. 495–528.
- [53] MOSES, Edward I. Ignition on the National Ignition Facility: a path towards inertial fusion energy. *Nuclear Fusion*. 2009, roč. 49, č. 10, s. 104022.

- [54] KEMP, R. DEMO2 reference design may 2015. *EUROfusion internal document IDM EU\_D\_2LCBVU, EUROfusion*. 2015.
- [55] KOVARI, M; FOX, F; HARRINGTON, C; KEMBLETON, R; KNIGHT, P; LUX, H; MORRIS, J. “PROCESS”: A systems code for fusion power plants–Part 2: Engineering. *Fusion Engineering and Design*. 2016, roč. 104, s. 9–20.
- [56] NEA; IEA; OECD. *Projected Costs of Generating Electricity 2015*. 2015. Dostupné z DOI: [https://doi.org/https://doi.org/10.1787/cost\\_electricity-2015-en](https://doi.org/https://doi.org/10.1787/cost_electricity-2015-en).
- [57] HAMACHER, T; BRADSHAW, AM. Fusion as a future power source: recent achievements and prospects. In: *18th world energy congress*. 2001. Dostupné také z: [https://pure.mpg.de/rest/items/item\\_2138773/component/file\\_2138772/content](https://pure.mpg.de/rest/items/item_2138773/component/file_2138772/content).
- [58] ENTLER, Slavomir; HORACEK, Jan; DLOUHY, Tomas; DOSTAL, Vaclav. Approximation of the economy of fusion energy. *Energy*. 2018, roč. 152, s. 489–497.
- [59] *Český statistický úřad* [online]. Český statistický úřad. [cit. 22.3.2019]. Dostupné také z: <https://www.czso.cz>.
- [60] *Česká národní banka* [online]. © Česká národní banka, 2003-2019. [cit. 22.3.2019]. Dostupné také z: <http://www.cnb.cz/cs/index.html>.
- [61] COOK, I; MILLER, RL; WARD, DJ. Prospects for economic fusion electricity. *Fusion Engineering and Design*. 2002, roč. 63, s. 25–33.
- [62] HAMACHER, T et al. A comprehensive evaluation of the environmental external costs of a fusion power plant. *Fusion Engineering and Design*. 2001, roč. 56, s. 95–103.
- [63] LECHÓN, Y et al. Exploitation and improvement of the external costs assessment of fusion power. *Fusion engineering and design*. 2001, roč. 58, s. 1027–1032.
- [64] SCHLEISNER, Lotte; KORHONEN, Riitta. *Socio-economic research on fusion. SERF 1997-98. Macro Task E2: External costs and benefits. Task 2: Comparison of external costs*. 1998. Technická zpráva. Risoe National Lab.
- [65] ALBERICI, Sacha et al. Subsidies and costs of EU energy. *Project number: DESNL14583*. 2014.
- [66] *pxe* [online]. Power Exchange Central Europe, a. s., 2007 - 2019 [cit. 22.3.2019]. Dostupné také z: <https://www.pxe.cz>.

# Příloha A

## A.1 Výpočet LCOE

Tabulky na následující straně se týkají výpočtu průměrných výrobních nákladů elektřiny *LCOE* ve fúzní elektrárně s použitím vzorce (7.2).

## A.2 Přepočty cenových hladin

Jedná se o přepočet hodnot *LCOE*, popř. výše nákladů na 1 kW, vypočítaných v různých studiích na cenové hladiny roku 2015 v amerických dolarech (\$). Tyto přepočty byly použity při diskuzi mnou vypočítané hodnoty *LCOE* a jejím porovnání s výsledky z jiných studií.

Data ČSÚ o inflaci (bazický rok 2015) Index cen průmyslových výrobců			
1995	1996	2015	2018
65,3	68,5	100,0	100,5

zdroj: [https://www.czso.cz/csu/czso/ipc\\_cr](https://www.czso.cz/csu/czso/ipc_cr)

Informace o kurzech ČNB ke 22.03.2019	
EUR	USD
25,725	22,761

zdroj: [https://www.cnb.cz/cs/financni\\_trhy/devizovy\\_trh/kurzy\\_devizoveho\\_trhu/denni\\_kurz.jsp](https://www.cnb.cz/cs/financni_trhy/devizovy_trh/kurzy_devizoveho_trhu/denni_kurz.jsp)

STUDIE [61]	cenové hladiny roku		jednotka
	1996	2015	
údaj	70	102	\$/MWh
údaj	130	190	\$/MWh

STUDIE [57]	cenové hladiny roku		jednotka	po přepočtu měny	jednotka
	1995	2015		ceny r. 2015	
údaj	10000	15314	EUR/kW	17308	\$/kW
údaj	165	253	EUR/MWh	286	\$/MWh

PROMĚNNÉ ZKRATKA

Rok	t	-9	...
Investiční náklady [M\$/rok]	<i>IN</i>	852,50	
Oprava, údržba [M\$/rok]	<i>O&amp;U</i>	-	
Palivové náklady [M\$/rok]	<i>Npal</i>	-	
Likvidace a odpad [M\$/rok]	<i>L&amp;O</i>	-	
$(1+r)^{-t}$		1,55	
Diskontované roční náklady [M\$/rok]		1322,51	
Vyrobena energie [TWh/rok]	<i>W</i>	-	

0	1	2	...
852,50	85,07	85,07	
-	61,32	61,32	
-	2,74	2,74	
-	8,40	8,40	
1,00	0,95	0,91	
852,50	150,03	142,88	
-	6,26	6,26	

39	40
85,07	85,07
61,32	61,32
2,74	2,74
8,40	8,40
0,15	0,14
23,50	22,38
6,26	6,26

DALŠÍ ÚDAJE

Diskont, $r$ [-]	0,05
Celkové investiční náklady na výstavbu [M\$]	8525

\* pro  $t > 0$  jsou do investičních nákladů započítávány investice do vyměnitelných komponent

Vyměnitelná komponenta	Cena [M\$]	Životnost [roky]	Průměrná roční částka [M\$/rok]
Divertor	75,44	4,5	16,76
HCD systém	43,92	10,5	4,18
První stěna	160,00	10,5	15,24
Blanket	513,30	10,5	48,89
<b>Celkem</b>			<b>85,07</b>

VÝSLEDKY **	
$r$	LCOE [\$/MWh]
0	59,2
0,03	92,7
0,05	125,0
0,07	166,3
0,1	247,1

\*\* Výpočet hodnoty LCOE byl proveden s použitím vzorce (7.2), hodnot a předpokladů uvedených v 7. kapitole této bakalářské práce



# Příloha B

## Citlivostní analýza LCOE

Výpis z programu Wolfram Mathematica, v němž byla prováděna citlivostní analýza *LCOE*.

```
In[158]:= (*ceny vyměnitelných komponent*)
d = 75.44; (*divertor*)
h = 43.915;
(*část systému ohřevu plazmatu a neinduktivní
generace elektrického proudu (H&CD systém)*)
ps = 160; (*první stěna*)
b = 513.3; (*blanket*)

(*průměrná roční částka investic do obnovitelných komponent*)
INvym = (ps + b + h) / 10.5 + d / 4.5;

(*DEFINICE DALŠICH PROMENNYCH*)
r = 0.05; (*diskont*)
W = 6.26; (*el. energie za jeden rok, TWh*)
INc = 8525; (*celkové investiční náklady na výstavbu, M$*)
IN = INc / 10;
(*rovnoměrné rozdělení investičních nákladů do 10 let výstavby, M$ *)

(*roční náklady*)
OU = 61.32; (*oprava a údržba, M$*)
Npal = 2.74; (*palivové náklady, M$*)
LO = (4.9 + 3.5); (*likvidace a zacházení s odpadem, M$*)

LCOE = 
$$\frac{\sum_{t=1}^{40} (OU + Npal + LO + INvym) * (1 + r)^{-t}}{\sum_{t=1}^{40} W * (1 + r)^{-t}} + \frac{\sum_{t=-9}^0 IN * (1 + r)^{-t}}{\sum_{t=1}^{40} W * (1 + r)^{-t}}$$

```

(\*CITLIVOSTNÍ ANALÝZA\*)

(\*závislost LCOE na diskontu\*)

```
Plot[{\frac{\sum_{t=1}^{40} (OU + Npal + LO + INvym) * (1 + r)^{-t}}{\sum_{t=1}^{40} W * (1 + r)^{-t}} + \frac{\sum_{t=-9}^0 IN * (1 + r)^{-t}}{\sum_{t=1}^{40} W * (1 + r)^{-t}}},
{r, 0, 0.15}, AxesOrigin -> {0, 0}, Filling -> None,
PlotStyle -> {Magenta}, AxesLabel -> {"r [-]", "LCOE [$/MWh]"},
PlotLabel -> "Graf závislosti LCOE na volbě diskontu r",
GridLines -> Automatic, AxesStyle -> Black, LabelStyle -> {GrayLevel[0]}}
```

(\*závislost LCOE na investičních nákladech výstavby \*)

```
g1 = Plot[{\frac{\sum_{t=1}^{40} (OU + Npal + LO + INvym) * (1 + r)^{-t}}{\sum_{t=1}^{40} W * (1 + r)^{-t}} + \frac{\sum_{t=-9}^0 Nezn * 0.1 * 1000 * (1 + r)^{-t}}{\sum_{t=1}^{40} W * (1 + r)^{-t}}},
{Nezn, 0, 20}, AxesOrigin -> {0, 0}, Filling -> None,
PlotStyle -> {Magenta, Thickness[0.004]},
AxesLabel -> {"Investiční náklady [G$]", "LCOE [$/MWh]"}, PlotLabel ->
"Graf závislosti LCOE na investičních nákladech výstavby pro r=0.05",
GridLines -> Automatic, AxesStyle -> Black, LabelStyle -> {GrayLevel[0]}};
```

(\*definice bodů pro lepší přehlednost\*)

```
g2 = Graphics[{{PointSize[Medium], Blue, Point[{INc / 1000, LCOE}]}];
g3 = Graphics[{{PointSize[Medium], Green, Point[
{INc / 2000, \frac{\sum_{t=1}^{40} (OU + Npal + LO + INvym) * (1 + r)^{-t}}{\sum_{t=1}^{40} W * (1 + r)^{-t}} + \frac{\sum_{t=-9}^0 IN * 0.5 * (1 + r)^{-t}}{\sum_{t=1}^{40} W * (1 + r)^{-t}}}}]}];
Show[g1, g2, g3]
```

(\*závislost LCOE na velikosti

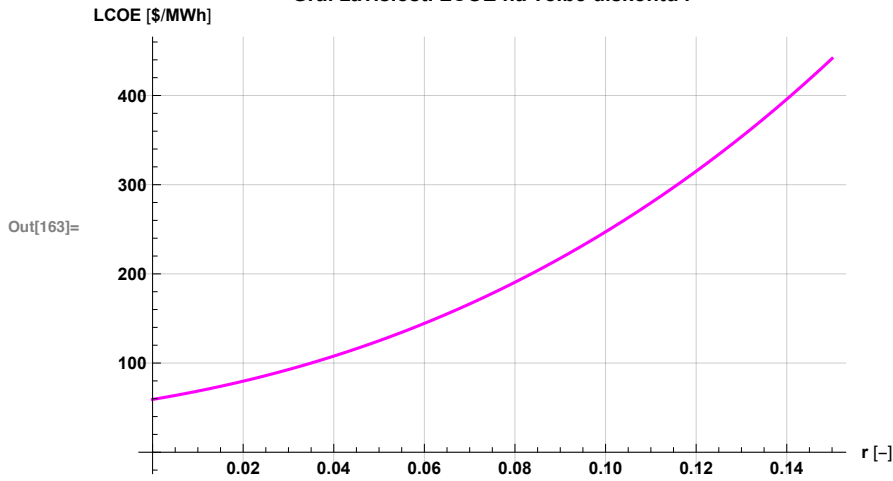
ročních investic do vyměnitelných komponent \*)

```
p1 = Plot[{\frac{\sum_{t=1}^{40} (OU + Npal + LO + Y) * (1 + r)^{-t}}{\sum_{t=1}^{40} W * (1 + r)^{-t}} + \frac{\sum_{t=-9}^0 IN * (1 + r)^{-t}}{\sum_{t=1}^{40} W * (1 + r)^{-t}}},
{Y, 0, 170}, AxesOrigin -> {0, 0}, Filling -> None, PlotStyle -> {Magenta},
AxesLabel -> {"Investice do vym. komp. [M$/rok]", "LCOE [$/MWh]"},
PlotLabel -> "Graf závislosti LCOE na velikosti ročních
investic do vyměnitelných komponent při r=0.05",
GridLines -> Automatic, AxesStyle -> Black, LabelStyle -> {GrayLevel[0]}};
```

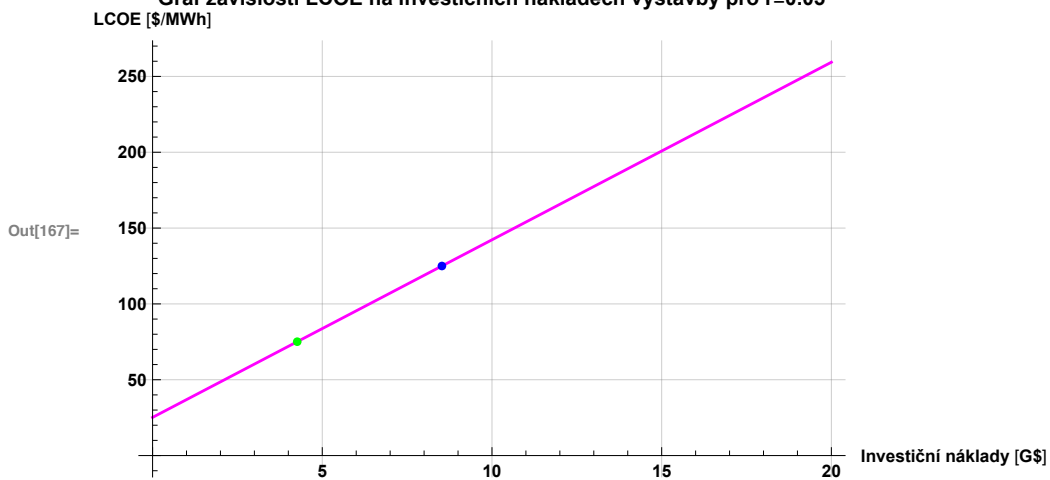
(\*definice bodů pro lepší přehlednost\*)

```
p2 = Graphics[{{PointSize[Medium], Blue, Point[{INvym, LCOE}]}];
p3 = Graphics[{{PointSize[Medium], Green, Point[
{INvym / 2, \frac{\sum_{t=1}^{40} (OU + Npal + LO + INvym * 0.5) * (1 + r)^{-t}}{\sum_{t=1}^{40} W * (1 + r)^{-t}} + \frac{\sum_{t=-9}^0 IN * (1 + r)^{-t}}{\sum_{t=1}^{40} W * (1 + r)^{-t}}}}]}];
Show[p1, p2, p3]
```

Graf závislosti LCOE na volbě diskontu r



Graf závislosti LCOE na investičních nákladech výstavby pro r=0.05



Graf závislosti LCOE na velikosti ročních investic do vyměnitelných komponent při r=0.05

