



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

TERMONUKLEÁRNÍ FÚZE V ENERGETICE

THERMONUCLEAR FUSION FOR POWER GENERATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jiří Osolsobě

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Tomáš Sitek

BRNO 2023

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Jiří Osolsobě**
Studijní program: Energetika
Studijní obor: bez specializace
Vedoucí práce: **Ing. Tomáš Sitek**
Akademický rok: 2022/23

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Termonukleární fúze v energetice

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Zatímco jaderné štěpení k výrobě energie využívá člověk již více než 60 let, fúzní reaktory jsou stále ještě technologií budoucnosti. Potenciální výhody jsou ale natolik výrazné, že vývoji této technologie je věnováno obrovské úsilí a nemalé finanční prostředky. Práce bude zaměřena na zákonitosti jaderné fúze a aktuální experimentální zařízení.

Cíle bakalářské práce:

- rozebrat principy a zákonitosti jaderné fúze,
- popsat termojaderné fúzní zařízení,
- uvést existující výzkumné projekty,
- nastínit možné budoucí energetické využití této technologie.

Seznam doporučené literatury:

ŘÍPA, Milan. Řízená termojaderná fúze - minulost, současnost a budoucnost. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2020. ISBN 978-80-01-06751-2.

REINDERS, L. J. Sun in a bottle?... Pie in the sky!: The wishful thinking of nuclear fusion energy. Cham, Switzerland: Springer Nature, 2021. ISBN 9783030747343.

MORSE, Edward. Nuclear Fusion. 1. ed. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2018. ISBN 9783319981703.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Řízená termonukleární fúze otevírá možnost využití obdobných principů, jež probíhají ve hvězdách, k produkci energie na planetě Zemi. Fúzní elektrárna by představovala stabilní, bezpečný, bezemisní a v dohledné době nevyčerpatelný zdroj energie. Momentálně nejprobádanějším fúzním zařízením je tokamak využívající magnetické udržení plazmatu, který se pravděpodobně stane reaktorem první fúzní elektrárny. Zlomovým projektem pro další vývoj řízené termonukleární fúze bude mezinárodní tokamak ITER, jehož hlavním cílem bude otestovat řadu klíčových technologií a vhodnost tokamaku jakožto reaktoru fúzní elektrárny. Podle plánů Evropské unie by stavba první fúzní elektrárny EU-DEMO měla započít kolem roku 2040. Tato bakalářská práce poskytuje ucelený přehled o počátcích, současném stavu a budoucích perspektivách termonukleární fúze a jejího energetického využití.

Klíčová slova

Termonukleární fúze, magnetické udržení, inerciální udržení, tokamak, stellarátor, ITER, fúzní elektrárna

ABSTRACT

Controlled thermonuclear fusion opens up the possibility of using similar principles that take place in stars to produce energy on planet Earth. A fusion power plant would represent a stable, safe, emission-free and, for the foreseeable future, inexhaustible source of energy. Currently, the most researched fusion device is a tokamak using magnetic confinement of plasma, which is likely to become the reactor of the first fusion power plant. The international ITER tokamak will be a breakthrough project for the further development of controlled thermonuclear fusion, with the main objective of testing a number of key technologies and the suitability of the tokamak as a fusion power plant reactor. According to the European Union's plans, construction of the first EU-DEMO fusion power plant should start around 2040. This bachelor thesis provides a comprehensive overview of the origins, current status and future prospects of thermonuclear fusion and its energy applications.

Key words

Thermonuclear fusion, magnetic confinement fusion, inertial confinement fusion, tokamak, stellarator, ITER, fusion power plant

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

OSOLSOBĚ, Jiří. Termonukleární fúze v energetice [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/149393>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Tomáš Sitek.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Termonukleární fúze v energetice** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....
Datum

Jméno a příjmení

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji Ing. Tomášovi Sitkovi za cenné rady a připomínky, které mi poskytl při vypracování této práce.

OBSAH

ÚVOD.....	11
1 Historie termonukleární fúze	12
1.1 Začátky nukleární fúze.....	12
1.2 Snahy ovládnutí termonukleární fúze	12
1.3 Cesta k velkým fúzním zařízením	13
1.4 Historie inerciální fúze.....	14
1.5 Český fúzní výzkum	15
2 Princip termonukleární fúze	16
2.1 Obecný princip fúze	16
2.2 Termonukleární fúze ve hvězdách	18
2.2.1 Konkrétní hvězdné termonukleární cykly	18
2.3 Princip řízené termonukleární fúze	19
2.3.1 Nejvhodnější reakce pro řízenou termonukleární fúzi	19
2.3.2 Lawsonovo kritérium	21
2.3.3 Magnetické udržení	23
2.3.4 Inerciální udržení.....	24
3 Tokamak	25
3.1 Princip	25
3.2 Základní části tokamaku	26
3.3 Experimentální tokamaky	27
3.3.1 JET	28
3.3.2 ITER	28
3.4 Problémy	31
4 Stelarátor.....	32
4.1 Princip a typy stelarátoru	32
4.2 Experimentální stelarátory a heliotrony.....	32
4.2.1 Wendelstein 7-X.....	33
5 Zařízení využívající inerciálního udržení	34
5.1 Princip a rozdělení zařízení pro inerciální fúzi	34
5.2 Experimentální inerciální zařízení	34
5.2.1 NIF	34
5.3 Problémy.....	35
6 Budoucnost využití termonukleární fúze.....	36
6.1 Fúzní elektrárna na principu magnetického udržení.....	36
6.1.1 DEMO	36

6.1.2 Princip.....	37
6.2 Fúzní elektrárna na principu inerciálního udržení.....	39
6.3 Překážky a potenciální benefity fúzních elektráren	39
ZÁVĚR	40
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	42
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	50
SEZNAM OBRÁZKŮ	52
SEZNAM TABULEK.....	53

ÚVOD

U mnoha vynálezů a principů vděčíme přírodě za to, že nám poskytla inspiraci a termonukleární fúze není výjimkou. Termonukleární fúze byla odpovědí na otázku, co je zdrojem energie hvězd. Nyní je cílem stejný obecný princip, jaký pohání hvězdy, využít na planetě Zemi ke generování elektrické energie. Záměrem je sestavit elektrárnu, jejíž reaktor by využíval slučování lehkých atomových jader. Takový zdroj by měl řadu potenciálních výhod. První generace reaktorů by jako palivo využívala dostupné deuterium a lithium, přičemž pomyslným popelem, resp. produktem fúzních reakcí by bylo využitelné helium. Fúzní elektrárna by byla rovněž bezpečným, stabilním a bezemisním zdrojem elektrické energie. Se zvyšující se poptávkou po elektrické energii, energetickou krizí a postupným opouštěním od využívání fosilních paliv je tato představa více než lákavá.

Ač konceptů fúzních reaktorů existuje celá řada, v dnešních dnech je nejrozšířenějším fúzním zařízením tokamak. Jedním z klíčových zařízení je právě budovaný mezinárodní projekt ITER. Úkolem tohoto experimentálního tokamaku bude otestovat řadu technologií a demonstrovat využitelnost tokamaku jako potenciálního reaktoru fúzní elektrárny. Na tento projekt by měla navázat demonstrační fúzní elektrárna DEMO, která by již měla být předchůdcem konvenčních fúzních elektráren.

1 Historie termonukleární fúze

Počátky fúzního výzkumu sahají do nedávné minulosti. K dnešním dnům vykrytalizovaly hlavní dva typy fúzních zařízení, které by mohly tvořit reaktor pro budoucí fúzní elektrárnu. Řeč je zejména o tokamaku, který má šance nejvyšší. Dalším zařízením je stelarátor. Alternativní řešení pak představuje inerciální fúze. Konkrétní fúzní reakce, principy a zařízení budou popsány v dalších kapitolách.

1.1 Začátky nukleární fúze

Historie jaderné syntézy se začala psát na počátku minulého století, kdy stále nebylo jasné, jak fungují hvězdy, a především jakým způsobem získávají energii. Ač tato otázka trápila vědce již stovky let, první významný krok učinil Albert Einstein v roce 1905. V tomto roce publikoval čtyři vědecké články, kterými položil základy moderní fyziky. Jedním z nich byl článek o ekvivalenci hmotnosti a energie, z kterého vyplývá známý fyzikální vztah $E = m \cdot c^2$ [1]. Dalším krokem bylo přesné změření atomových hmotností, které na začátku 20. let minulého století provedl za využití hmotnostního spektrografu Francis Aston [2]. Dokázal, že atom helia má menší hmotnost, než je součet samostatných čtyř atomů vodíku, z kterých sloučením vznikne [2]. Na základě těchto znalostí Arthur Eddington v roce 1920 vyslovil o 6 let později publikovanou hypotézu, že ve hvězdách probíhá termonukleární slučování jader vodíku, přičemž se uvolňuje energie [2, 3, 4]. První výpočty potvrzující tuto hypotézu provedli Robert Atkinson a Fritz Houtermans v roce 1929 na základě práce George Gamowa z oblasti kvantové fyziky, konkrétně o tunelovém jevu [5]. O detailní popis fúzních cyklů probíhajících ve hvězdách se postaral Carl Friedrich von Weizsäcker a Hans Bethe, kteří popsali CNO cyklus [3, 5]. Dále pak nezávisle na sobě Hans Bethe a Charles Critchfield objasnili proton-protonový cyklus [3, 5]. První přímou experimentální ukázkou fúze provedl Mark Oliphant, který mimo jiné objevil helium-3 a tritium [4]. Bylo patrné, že se při fúzních reakcích uvolňuje nemalé množství energie. Proto se začaly hledat koncepty zařízení, které by tento princip zisku energie ve hvězdách dokázaly energeticky či vojensky využít.

1.2 Snahy ovládnutí termonukleární fúze

Jaderná fúze začíná být předmětem zájmu po skončení druhé světové války. Nejprve je pozornost věnována především neřízené jaderné fúzi, tedy vodíkové, resp. termonukleární bombě v rámci studené války mezi Sovětským svazem a USA. Na začátku 50. let pak oficiálně zahajují výzkum řízené termonukleární fúze budoucí velmoci v této oblasti. Výzkum probíhá zejména v Sovětském svazu, Spojeném království a Spojených státech amerických. [3, 6]

Velkým zlomem pro mezinárodní výzkum řízené fúze byl rok 1958. V tomto roce se na druhé konferenci o mírovém využití jaderné energie (International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy) v Ženevě zveřejnily čtyři koncepty termonukleárních fúzních zařízení využívající magnetické udržení plazmatu, které byly do té doby utajovány jednotlivými státy. Prvním zveřejněným zařízením byl tokamak, dále pak stelarátor, pinč a magnetická zrcadla. [7]

První návrh tokamaku uskutečnili sovětsí vědci Andrej Sacharov a Igor Tamm v roce 1950 [6]. První zařízení tokamakového typu bylo sestrojeno v roce 1955 [6]. Kolem roku 1958 byl sestrojen první větší kovový tokamak, konkrétně Tokamak T-1 [8]. Návrh stelarátoru byl uskutečněn v USA, postaral se o něj Lyman Spitzer v roce 1951 [9]. První stelarátor byl postaven roku 1953 v Princetonu s názvem Model A [9]. Z USA také pochází koncept magnetického zrcadla, tento koncept byl nezávisle navržen i v SSSR [6, 10]. Ve Velké Británii, kde se systematický výzkum řízené termonukleární fúze rozběhl jako první, byl navržen pinč [6]. Zařízení využívající tzv. pinč efekt, který byl objeven téměř čtyřicet let předtím [6]. Po aféře spojené se špionáží začal být výzkum ve Velké Británii utajován, a už v roce 1951 fungovaly pinče ve všech třech již zmíněných státech [6]. Pinč byl taktéž prvním zařízením, na kterém došlo ke kontrolované termonukleární fúzi. Stalo se tak roku 1958 na americkém zařízení Scylla I [11].

1.3 Cesta k velkým fúzním zařízením

V padesátých letech výzkumu řízené termonukleární fúze vévodí koncept stelarátoru [4]. Klíčovým zařízením, které tento vývoj změnilo, byl své doby rozměrově největší sovětský tokamak T-3, na kterém se podařilo vyrobit relativně klidné a stabilní plazma [6, 8]. Mimo jiné také dosáhnul teploty plazmatu 10 milionů stupňů [8]. Po kontrolních měřeních teploty provedených Velkou Británií začínají koncem 60. let tokamaky na poli výzkumu řízené termonukleární fúze dominovat [6, 8]. V průběhu 70. let pak startuje výstavba velkého počtu tokamaků po celém světě, rovněž jsou některé stelarátory přestavovány na tokamaky [6, 8].

Už v průběhu 70. let se začíná uvažovat nad tokamaky větších rozměrů, které mají značné výhody a mohou přinést uspokojivé výsledky. Důsledkem je dodnes funkční a výzkumně důležitý evropský tokamak JET spuštěný v roce 1983. Dále pak americký tokamak TFTR, který byl již demontován. A také japonský JT-60, který po modernizaci instalací divertoru nesl název JT-60U. Dnes na jeho místě stojí nový již japonsko-evropský plně supravodivý tokamak JT-60SA, na kterém se začínají testovat návrhové režimy pro budoucí tokamak ITER. V 80. letech Sovětský svaz kvůli podfinancování výzkumu termonukleární fúze musel slevit z původního návrhu tokamaku T-20 na menší zařízení T-15 se supravodivými cívkami toroidálního pole. Toto zařízení spuštěné v roce 1988 bylo po krátkém provozu zakonzervováno. Cestou supravodivých tokamaků se taktéž vydala Francie, která ve stejném roce spustila tokamak Tore Supra, jenž po rekonstrukci pracuje dodnes a nese jméno WEST. Konstrukci prvního plně supravodivého tokamaku provedla Čína, která sestrojila tokamak EAST. Krátce na to následovala Jižní Korea s dalším plně supravodivým tokamakem K-STAR. Prvním velkým zcela supravodivým tokamakem využívajícím směs deuteria a tritia bude právě budovaný tokamak ITER. Jedná se o mezinárodní projekt, který má být dalším velkým krokem k budoucí termonukleární fúzní elektrárně. [6, 8]

Ač během 60. a 70. let stelarátory, především kvůli složité výstavbě, nedržely krok s tokamaky, v dnešních dnech dosahují téměř srovnatelných výsledků. Představují zajímavou alternativu, neboť jsou oproti tokamakům schopny kontinuálního provozu. Mezi velké stelarátory se řadí v roce 1998 spuštěné japonské zařízení LHD a německý Wendelstein W7-X, který zahájil provoz v roce 2015. [2]

Výzkum magnetických zrcadel vygradoval v polovině 80. let, avšak tehdejší nová zařízení v porovnání s tehdejšími tokamaky strádala. To vedlo v roce 1987 k úplnému ukončení amerického výzkumu tohoto konceptu. I když se od výzkumu magnetických zrcadel téměř celosvětově upustilo, výzkum tohoto konceptu stále probíhá. Je uskutečňován zejména na japonském zařízení GAMMA10 a v Rusku na zařízeních GDT a GOL-3. [10, 12]

1.4 Historie inerciální fúze

Inerciální udržení plazmatu je druhý základní způsob, jak provést řízenou termonukleární fúzi na Zemi. Počátky výzkumu mají spojitost s vývojem termonukleární bomby na území USA a SSSR po skončení druhé světové války. Inerciální fúze funguje na obdobném základním principu jako termonukleární bomba, ovšem v miniaturním provedení. V případě inerciální fúze se jedná řádově o miligramy fúzního paliva. To se nachází uvnitř kapsle tvaru malé kuličky označované jako terčík. [2] Detailněji je tento způsob popsán v kap. 5.

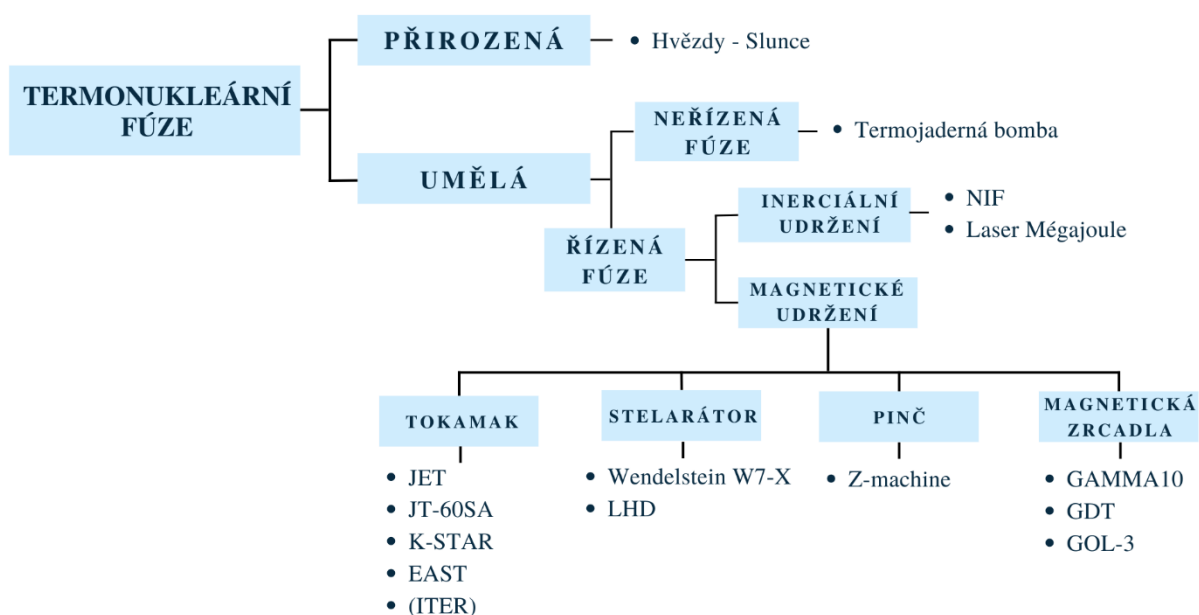
Klíčovým okamžikem pro vývoj inerciální fúze byl rok 1960, kdy Theodore Maimon sestrojil první laser, čímž vyřešil problém s neexistujícím zařízením, které by potenciálně mohlo zapálit inerciální fúzi [2]. Princip dosažení inerciální fúze působením laserového záření na palivový terčík navrhli Nikolaj Basov a Alexandr Prochorov o tři roky později [2]. Zajímavou roli sehrála soukromá americká firma KMS Fusion, které se poprvé podařilo zaznamenat fúzní neutrony, které vznikly v důsledku ozařování fúzního paliva laserem [13]. Stalo se tak roku 1974 [13]. Část problémů vyplývajících z přímého ozařování terčíku laserem tzv. přímo zapalovanou fúzi vyřešil hohlraum, který byl vyvinut v Livermoru v polovině 80. let [2]. Jednalo se o dutý válec z těžkého kovu, do kterého byl vložen palivový terčík. Tento způsob je označován jako nepřímá zapalovaná fúze [2]. Velký posun v oblasti inerciální fúze udělalo federální výzkumné zařízení LLNL (Lawrence Livermore National Laboratory), které po sérii laserových systémů dospělo k dnešnímu jednomu z nejúspěšnějších zařízení v této oblasti [2, 14]. Řeč je o v roce 2009 dostavěném americkém národním zapalovacím zařízení (National Ignition Facility, NIF) [2, 14]. Mezi jeho nejvýznamnější předchůdce se řadí v roce 1974 dokončené lasery Janus a Kyklop, následoval Argus, Shiva, Novette a Nova [2, 14]. Dalším projektem pokoušející se o nepřímé zapálení inerciální fúze je francouzský Megajoulový laser (Laser Mégajoule, LMJ), jehož stavba byla dokončena v roce 2014 [2]. Zařízení LMJ i NIF jsou schopna dodat 1,8 MJ energie [2].

1.5 Český fúzní výzkum

Na území České republiky se nachází dva tokamaky. Prvním je GOLEM, původem sovětský tokamak, jenž nejprve nesl název TM-1. V roce 1977 byl darován Ústavu fyziky plazmatu Akademie věd (ÚFP AV) a o osm let později zrekonstruován a překřtěn na nový název CASTOR (Czech Academy of Sciences TORus). Své nynější pojmenování tokamak získal po přesunu z ÚFP AV, kde byl jeho provoz ukončen roku 2006, na Fakultu jadernou a fyzikálně inženýrskou ČVUT. Tam dodnes slouží ke vzdělávacím účelům. Druhý tokamak nese název COMPASS. Po ukončení provozu v Anglii byl přesunut na ÚFP AV, kde bylo jeho oficiální spuštění provedeno roku 2009. Od té doby se podílel na výzkumu řízené termonukleární fúze. V roce 2021 byl jeho provoz ukončen a na jeho místě se nyní buduje nový tokamak COMPASS-U, jehož spuštění se podle oficiálních stránek [15] plánuje na rok 2025. [8, 16]

2 Princip termonukleární fúze

Z obecného hlediska je fúze děj, při kterém dochází ke slučování lehkých atomových jader za vzniku jádra těžšího. Během této reakce se může uvolňovat velké množství energie. Fúze je jedna ze základních reakcí ve vesmíru, která probíhá v každé hvězdě hlavní posloupnosti [23]. Použití identických fúzních řetězců probíhajících ve hvězdách je k dosažení fúze na Zemi nereálné. Zatímco ve hvězdách je plazma udržováno gravitačně, na Zemi se k řízené termonukleární fúzi využívá zejména magnetického či inerciálního udržení. Základní rozdělení termonukleární fúze zobrazuje Obr. 2.1. Opačnou reakci jaderné fúzi představuje již běžně energeticky využívané jaderné štěpení.



Obr. 2.1 Základní rozdělení termonukleární fúze

2.1 Obecný princip fúze

Jak bylo uvedeno v první kapitole, Francis Aston experimentálně zjistil, že existuje rozdíl hmotnosti mezi atomovým jádrem a součtem jednotlivých nukleonů ho tvořících. Tento rozdíl je často označován jako hmotnostní schodek jádra. [17]

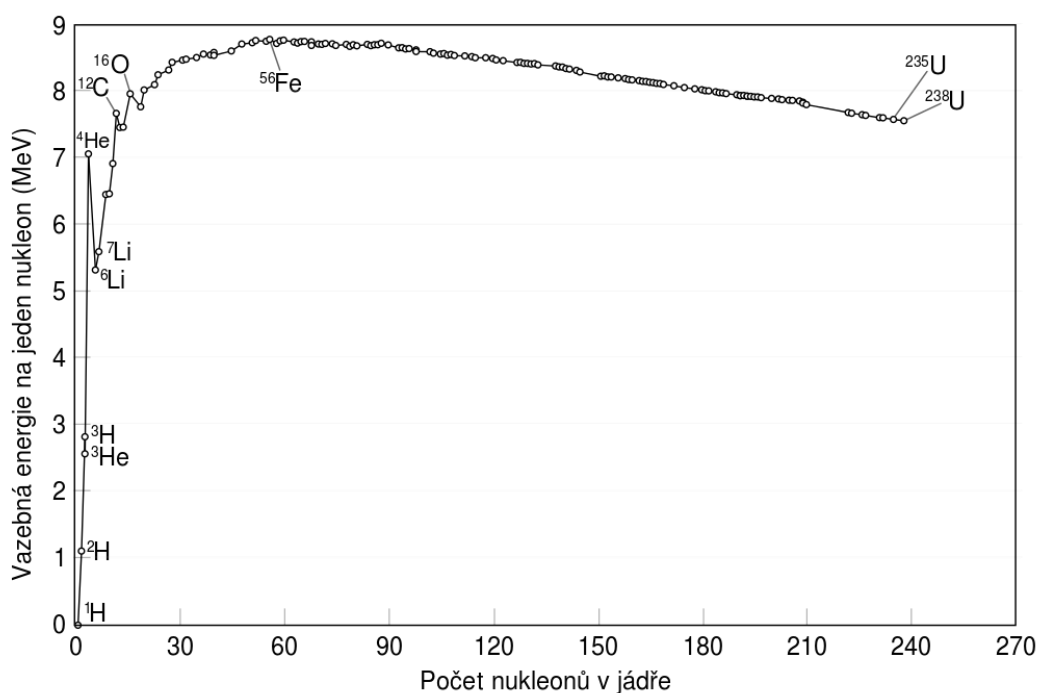
Práce Alberta Einsteina objasnila, že hmotnost je přímo úměrná energii, když definoval klidovou energii E_0 , viz rovnice 2.1. Rozdíl součtu klidových energií jednotlivých nukleonů a klidové energie atomového jádra se označuje jako vazební energie jádra, viz rovnice 2.2. Tato energie představuje energii, která se uvolní při sloučení jednotlivých nukleonů resp., kterou musíme dodat, abychom atomové jádro rozdělili na jednotlivé nukleony. Kde M_j je hmotnost jádra a $\sum m_n$ je celková hmotnost neutronů a protonů jádro tvořící. Poměr vazební energie E_V a nukleonového čísla A se označuje vazební energie na jeden nukleon ε_V , viz rovnice 2.3. [18]

$$E_0 = m \cdot c^2 \quad (2.1)$$

$$E_V = \sum (m_n \cdot c^2) - M_j \cdot c^2 \quad (2.2)$$

$$\varepsilon_V = \frac{E_V}{A} \quad (2.3)$$

Závislost vazebné energie vztažené na jeden nukleon v jádře a nukleonového čísla je vyobrazena na Obr. 2.2. Z grafu je patrné, že při slučování lehkých jader (p-p cyklus viz 2.2.1 či D-T reakce viz 2.3.1) na jádra těžších prvků se může uvolnit energie. Uvolnění energie lze taktéž docílit opačným procesem, a to štěpením jader těžkých (typicky U^{235} v jaderných elektrárnách) [18].



Obr. 2.2 Závislost vazebné energie na jeden nukleon na nukleonovém čísle. Převzato z: [19]

Aby došlo ke sloučení dvou lehkých atomových jader, musí jádra překonat odpudivé síly, které tvoří tzv. Coulombovu potenciálovou bariéru a dostat se natolik blízko, aby začala působit síla jaderná. Jaderná síla je síla velmi malého dosahu a představuje druhotný projev silné interakce, která působí mezi kvarky uvnitř protonů či neutronů. Síla, jež působí na kladná jádra odpudivě, se nazývá Coulombova. Definuje ji Coulombův zákon, podle kterého se částice se souhlasným nábojem odpuzují. Pro překonání Coulombovy potenciálové bariéry je třeba, aby jádra měla dostatečně velkou kinetickou energii. Pokud se dostatečně kinetické energie dosáhne prostřednictvím zvýšení teploty, pak mluvíme o termonukleární fúzi. V této oblasti se teplota vyjadřuje prostřednictvím kinetické energie interagujících částic v jednotkách elektrovolt, viz rovnice 2.4, kde E_k je kinetická energie odpovídající nejpravděpodobnější rychlosti interagujících částic, T je teplota a k Boltzmanova konstanta. [18]

$$E_k = T \cdot k \quad (2.4)$$

Překonání potenciálové bariéry jádra může usnadnit jev z oblasti kvantové fyziky tzv. tunelový jev, podle kterého má částice určitou pravděpodobnost, že projde potenciálovou bariérou i při kinetických energiích nižších, než je výška potenciálové bariéry. Praktický příklad tohoto jevu se odehrává v nitru Slunce. To má teplotu přibližně $1,5 \cdot 10^7$ K, což odpovídá kinetické energii interagujících částic přibližně 1,3 keV, přičemž výška potenciálové bariéry pro dva protony je přibližně 400 keV, tedy by k žádné termonukleární fúzi docházet nemělo. Další skutečností umožňující fúzi v tomto případě je skutečnost, že kinetická energie částic je v rovnici 2.4 určená pro nejpravděpodobnější rychlosti, tedy existuje chvost s částicemi o daleko vyšších rychlostech, které již mohou mít dostatečně velkou kinetickou energii. [18]

Při těchto teplotách se látka nachází ve formě plazmatu. To je mnohdy nazýváno jako čtvrté skupenství hmoty. Podle definice [20] je plazma „kvazineutrální soubor částic s volnými nosiči nábojů, který vykazuje kolektivní chování“. Plazma je vodivé, kolektivně reaguje na magnetická a elektrická pole, která taky samo vytváří [20, 21]. Existuje celá řada jeho druhů a dělení. Plazma je také spjato s vyzařováním (brzděné, synchronní a rekombinační) a řadou nestabilit, jež značně komplikují konstrukci termonukleárních reaktorů [20, 21].

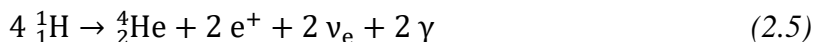
2.2 Termonukleární fúze ve hvězdách

Hvězdy, jednou z nich je i Slunce, jsou vesmírné objekty kulovitěho tvaru, které jsou tvořeny plazmatem, a v kterých probíhá termonukleární fúze. energii vyzařují ve formě elektromagnetického záření. Slunce a termonukleární fúze v něm probíhající jsou nezbytné pro život na planetě Zemi. Hrají hlavní roli v procesu zvaném fotosyntéza. Z hlediska energetického využití jsou příčinou vzniku fosilních paliv a umožňují lidstvu získávat elektrickou a tepelnou energii prostřednictvím obnovitelných zdrojů (vyjma geotermální energie). [22]

Podle teorie raného vesmíru v důsledku rané nukleosyntézy přibližně 3 minuty po velkém třesku atomární část vesmíru tvořili zejména vodík a helium (ve stopovém množství i lithium). Za vznikem těžších prvků stojí hvězdy. Například převážná část atomů tvořících živé organismy, tedy i nás, vznikla uvnitř červených obrů asymptotické větve. Ve hvězdách dochází za vysokých teplot a tlaků ke slučování lehkých jader na jádra těžší. Tímto procesem, jehož základem je slučování vodíků na helium, mohou vznikat v některých typech hvězd nejvýše atomy železa. Těžší prvky vznikají ve vývojovém stadiu hmotných hvězd zvaném supernova. [23]

2.2.1 Konkrétní hvězdné termonukleární cykly

Termonukleární fúze ve hvězdách sleduje stejný obecný princip, který je popsán v kapitole 2.1. Pro hvězdu je z energetického hlediska dominantní jadernou reakcí postupné slučování vodíku za vzniku helia, souhrnně zapsanou viz rov 2.5, kde e^+ je pozitron, γ představuje vyzařenou energii ve formě fotonů a ν_e označuje neutrino. V závislosti na teplotě v centru hvězdy probíhá buďto především proton-protonový (p-p) cyklus anebo uhlíko-dusíko-kyslíkový (CNO) cyklus. Při teplotách $7 \cdot 10^6$ K až $18 \cdot 10^6$ K je energeticky dominantní první zmíněný řetězec, při vyšších hodnotách teploty pak CNO cyklus. [23]



V Tab. 2.1 jsou uvedeny dvě nejčastější varianty p-p cyklu. Obě varianty p-p cyklu zmíněné v Tab. 2.1 mají shodnou počáteční reakci. Tato reakce, při které vzniká izotop vodíku (deuterium) trvá nejdéle, konkrétně proběhne v jedné z 10^{26} proton-protonových srážek [18]. To je jeden z důvodů, proč nelze použít totožné cykly pro řízenou termonukleární fúzi na Zemi. Výťažnost jednoho p-p cyklu je 26,2 MeV. CNO cyklus probíhající v nitru hmotných hvězd má výťažnost nižší a to 25 MeV. Další významnou fúzní reakcí probíhající ve hvězdách je heliová reakce 3α , při níž vzniká stabilní uhlík a uvolňuje se 7,4 MeV energie. [23]

Tab. 2.1 Přehled hlavních reakcí probíhajících ve hvězdách [23]

p-p cyklus 1. typ	p-p cyklus 2. typ	CNO cyklus
$\text{}^1_1\text{H} + \text{}^1_1\text{H} \rightarrow \text{}^2_1\text{D} + \text{e}^+ + \text{v}_e$	$\text{}^1_1\text{H} + \text{}^1_1\text{H} \rightarrow \text{}^2_1\text{D} + \text{e}^+ + \text{v}_e$	$\text{}^{12}_6\text{C} + \text{}^1_1\text{H} \rightarrow \text{}^{13}_7\text{N} + \gamma$
$\text{}^2_1\text{D} + \text{}^1_1\text{H} \rightarrow \text{}^3_2\text{He} + \gamma$	$\text{}^2_1\text{D} + \text{}^1_1\text{H} \rightarrow \text{}^3_2\text{He} + \gamma$	$\text{}^{13}_7\text{N} \rightarrow \text{}^{13}_6\text{C} + \text{v}_e + \text{e}^+$
$\text{}^3_2\text{He} + \text{}^3_2\text{He} \rightarrow \text{}^4_2\text{He} + 2 \text{}^1_1\text{H}$	$\text{}^3_2\text{He} + \text{}^4_2\text{He} \rightarrow \text{}^7_4\text{Be} + \gamma$	$\text{}^{13}_6\text{C} + \text{}^1_1\text{H} \rightarrow \text{}^{14}_7\text{N} + \gamma$
	$\text{}^7_4\text{Be} + \text{e}^- \rightarrow \text{}^7_3\text{Li} + \text{v}_e$	$\text{}^{14}_7\text{N} + \text{}^1_1\text{H} \rightarrow \text{}^{15}_8\text{O} + \gamma$
	$\text{}^7_3\text{Li} + \text{}^1_1\text{H} \rightarrow 2 \text{}^4_2\text{He}$	$\text{}^{15}_8\text{O} \rightarrow \text{}^{15}_7\text{N} + \text{v}_e + \text{e}^+$
		$\text{}^{15}_7\text{N} + \text{}^1_1\text{H} \rightarrow \text{}^{12}_6\text{C} + \text{}^4_2\text{He}$

2.3 Princip řízení termonukleární fúze

Požadavkům na fúzní reakce využitelné pro produkci energie na Zemi fúzní řetězce hvězd zmíněné v kapitole 2.2 nedokážou vyhovět. Proto v dnešní době existuje celá řada vhodných reakcí, které jsou pro řízenou termonukleární fúzi vhodné. Ty jsou popsány v kapitole 2.3.1, z nichž se pro první fúzní elektrárny jako nejvhodnější jeví D-T reakce. Jak již bylo předesláno, na Zemi se uskutečňují především dva typy udržení plazmatu k vytvoření vhodných podmínek pro fúzní reakce. Jedná se o magnetické udržení, viz kapitola 2.3.3, čehož využívá hlavně tokamak a stellarátor, ale také pinč a magnetická zrcadla. Dále se používá inerciální udržení, viz kapitola 2.3.4, při tomto typu je vhodných podmínek dosaženo nejčastěji za využití laserových zařízení. Základní podmínky, kterých musí být při fúzi dosaženo pak popisuje Lawsonovo kritérium viz kapitola 2.3.2.

2.3.1 Nejvhodnější reakce pro řízenou termonukleární fúzi

V Tab. 2.2 jsou zobrazeny vhodné fúzní reakce. Vhodnost jednotlivých reakcí se určuje podle řady faktorů. Jedním z nich je závislost účinného průřezu, který vyjadřuje pravděpodobnost srážky dvou částic vedoucí k fúzi na teplotě [24]. Tato závislost je vyobrazena pro jednotlivé reakce na Obr. 2.3. Mezi další faktory se například řadí celková energie fúzních produktů, energie nesená výslednými nabitými částicemi a neutronicita, jež slouží jako ukazatel vzniklých problémů spojených s fúzními neutrony, jako je např. radiační poškození materiálů [24].

Tab. 2.2 Přehled vhodných fúzních reakcí [24]

$D + D \rightarrow T (1,01 \text{ MeV}) + p (3,02 \text{ MeV})$	(50%)	(2.6)
$\rightarrow {}^3_2\text{He} (0,82 \text{ MeV}) + n (2,45 \text{ MeV})$	(50%)	(2.7)
$D + T \rightarrow {}^4_2\text{He} (3,5 \text{ MeV}) + n (14,1 \text{ MeV})$		(2.8)
$D + {}^3_2\text{He} \rightarrow {}^4_2\text{He} + 2p + 11,3 \text{ MeV}$		(2.9)
$T + T \rightarrow {}^4_2\text{He} (3,6 \text{ MeV}) + p (14,7 \text{ MeV})$		(2.10)
${}^3_2\text{He} + {}^3_2\text{He} \rightarrow {}^4_2\text{He} + 2p$		(2.11)
${}^3_2\text{He} + T \rightarrow {}^4_2\text{He} + n + p + 12,1 \text{ MeV}$	(51%)	(2.12)
$\rightarrow {}^4_2\text{He} (4,8 \text{ MeV}) + D (9,5 \text{ MeV})$	(43%)	(2.13)
$\rightarrow {}^4_2\text{He} (0,5 \text{ MeV}) + n (1,9 \text{ MeV}) + p (11,9 \text{ MeV})$	(6%)	(2.14)
$p + {}^{11}_5\text{B} \rightarrow 3 {}^4_2\text{He} + 8,7 \text{ MeV}$		(2.15)

Z Obr. 2.3 je patrné, že reakce D-T (2.8), tedy reakce mezi jádry deuteria a tritia, má pro nejnižší teploty největší účinný průřez v porovnání s ostatními reakcemi. Reakce D-T, pro kterou je hodnota ideální teploty rovna přibližně $160 \cdot 10^6 \text{ K}$, bude reakcí probíhající v první generaci reaktorů (a taktéž v tokamaku ITER) [3][24]. Nutně se ovšem nejedná o obecně nejvhodnější reakci směrem do vzdálené budoucnosti [24]. Velkou nevýhodou D-T reakce je produkce neutronů o vysoké energii, resp. vysoká neutronicita [24]. Neutrony jsou absorbovány jednotlivými vnitřními částmi fúzní komory, což klade nároky na vnitřní materiály a indikuje sekundární radioaktivitu [24][2].

Deuterium je stabilní izotop vodíku (v rovnicích označovaný D), jehož jádro se skládá z protonu a neutronu. Relativně hojně se vyskytuje na Zemi, konkrétně přibližně 0,0156 % vody v oceánech tvoří těžká (D_2O) a polotěžká (HDO) voda [25]. Deuterium je možné získat prostřednictvím elektrolýzy vody [2].

Tritium je radioaktivní izotop vodíku (v rovnicích označovaný T), jehož jádro tvoří proton a dva neutrony. Na Zemi se vyskytuje vzácně, přibližně 10^{-16} % vodíku ve vzduchu a vodě představuje tritium [25]. Přírodně vzniká v horních vrstvách atmosféry vlivem vesmírného ionizujícího záření, a jeho poločas rozpadu je 12,323 let [26]. Musí být tedy produkováno uměle, nyní se tak děje zejména ve štěpných reaktorech CANDU [26]. Očekává se, že v budoucnu se tritium bude generovat přímo v tokamaku prostřednictvím reakcí lithia obsaženého v blanketu reaktoru a neutronů pocházejících z fúzních reakcí viz Tab. 2.3 [2][26].

Tab. 2.3 Reakce produkující tritium [26]

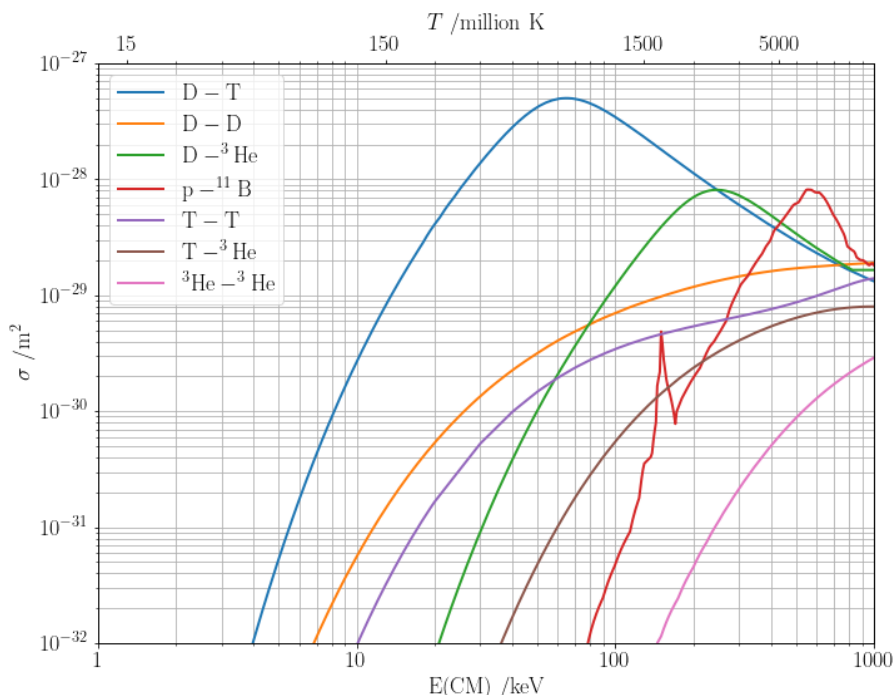
${}^6_3\text{Li} + n \rightarrow {}^4_2\text{He} + T + 4,784 \text{ MeV}$	(2.16)
${}^7_3\text{Li} + n \rightarrow {}^4_2\text{He} + T + n - 2,467 \text{ MeV}$	(2.17)

První reakcí uvedenou v Tab. 2.2 je tzv. D-D reakce, tedy reakce mezi jádry dvou deuterií. Jedná se o reakci, jež se nyní uplatňuje téměř ve všech provozovaných experimentálních

fúzních zařízeních [26]. Tato reakce má dvě větve, které nastanou se stejnou 50% pravděpodobností. Produkty reakce jsou v prvním případě (2.6) jádro tritia a neutron, v druhém (2.7) se jedná o jádro vzácného izotopu helia ^3He a proton [24]. Výhodou je relativně snadno dostupné palivo – deuterium. Ovšem ve srovnání s D-T reakcí mají v intervalu 10–100 keV obě větve přibližně stokrát menší účinný průřez [27].

D- ^3He reakce (2.9) je reakcí, která již částečně řeší problém s neutrony tím, že je přímo neprodukuje, taktéž nevyužívá radioaktivní palivo [27]. Optimální teploty pro tuto reakci dosahují více než 50 keV (580 mil. K) [24]. Palivo představuje těžko dostupný izotop helia ^3He , přičemž některé ambiciózní projekty dokonce hovoří o jeho možné těžbě na Měsíci [25]. Při této reakci ovšem parazitně probíhá i reakce D-D, jejíž produktem už je radioaktivní tritium a neutrony, kromě toho tritium dále podléhá reakcím D-T, které taktéž produkují neutrony [24]. Neutronicitu je možno minimalizovat zvolením vhodného poměru paliva, ovšem nejde ji snížit pod několik procent, proto nelze reakce D- ^3He pokládat za aneutronické [24, 25].

Aneutronické reakce jsou takové reakce, u kterých je celková energie neutronů nižší než 1 % celkové fúzní energie [24]. Zástupcem takové reakce je reakce jádra boru a protonu (2.15), která v porovnání s fúzí jader izotopů vodíku vyžaduje přibližně o 10^9 K vyšší teploty [25].



Obr. 2.3 Graf závislosti účinného průřezu na kinetické energii interagujících částic pro jednotlivé fúzní reakce. Převzato z: [28]

2.3.2 Lawsonovo kritérium

Nejprve je třeba definovat faktor zesílení. Faktor zesílení se označuje Q a jedná se o poměr výstupního fúzního výkonu a vstupního výkonu, resp. fúzního výkonu P_F a výkonu externího ohřevu plazmatu P_H viz (2.16) [3, 24].

$$Q = \frac{P_F}{P_H} \quad (2.16)$$

Stav kdy $Q = 1$ se nazývá vědecké vyrovnání nebo také vědecký zlom (scientific breakeven), tedy se jedná o stav, kdy výkon externího ohřevu plazmatu P_H odpovídá velikosti fúzního výkonu P_F [3, 25, 29]. Stav kdy $Q = \infty$ se nazývá zapálení (ignition), tedy se jedná o stav, kdy je fúzní reakce soběstačná a není zapotřebí externího ohřevu k vyrovnání ztrát plazmatu, resp. $P_H = 0$ [3, 29]. Pro daný stav je ohřev plazmatu v případě reakce D-T zajištěn jejími produkty, konkrétně alfa částicemi (jádry ^4He), jež jsou pro kladný náboj zachyceny magnetickým polem v plazmatu, kde předávají svou energii [3, 24, 29]. Dalším termínem je inženýrské vyrovnání neboli inženýrský zlom (engineering breakeven), ten se již nevztahuje pouze na reaktor nýbrž na celou fúzní elektrárnu, a vyjadřuje rovnost spotřeby elektrárny a jejího hrubého výkonu [3, 29].

Faktor zesílení Q taktéž umožňuje porovnat výsledky experimentů na jednotlivých fúzních zařízeních. Stav vědeckého vyrovnání bylo dosaženo 5.12.2022 na americkém zařízení NIF (podrobněji v kap. 4.2) využívajícího inerciálního udržení, konkrétně bylo dosaženo hodnoty $Q = 1,5$ [30]. Evropský tokamak JET (podrobněji popsán v kap. 3.3) využívající magnetické udržení dosáhl s D-T palivem hodnoty $Q = 0,67$ [25]. Právě budovaný ITER je projektován na hodnotu $Q = 10$, prototyp fúzní elektrárny DEMO by měl dosáhnout $Q \approx 35$ [31].

Dnešní pojetí Lawsonova kritéria (2.17) stanovuje pro výše uvedené stavy minimální mezní hodnotu na základě vztahu mezi hustotou jader n , dobou udržení energie τ_E a teplotou plazmatu T [3, 31, 32]. Kde doba udržení τ_E je poměr mezi energií plazmatu a ztrátovým výkonem [31].

$$n \cdot \tau_E \geq f(T) \quad (2.17)$$

Za předpokladu dostatečně vysoké teploty může být Lawsonovo kritérium (2.17) splněno dvěma základními způsoby [18]. Buďto je dosaženo nízkou hustotou jader ($\approx 10^{20} \text{ m}^{-3}$) a dlouhou dobou udržení ($\approx 1 \text{ s}$) – magnetické udržení, nebo vysokou hustotou jader ($\approx 10^{31} \text{ m}^{-3}$) a krátkou dobou udržení ($\approx 10^{-10} \text{ s}$) – inerciální udržení [3][29]. Oba principy jsou podrobně popsány v kapitolách 2.3.3 a 2.3.4.

Lawsonovo kritérium lze taktéž vyjádřit ve formě tzv. trojného součinu (2.18) [32]. Nejčastěji se tak děje pro tokamaky a obecně zařízení s magnetickým udržením [31][32]. V Tab. 2.4 jsou zobrazeny konkrétní hodnoty trojného součinu pro stav vědeckého vyrovnání a zapálení.

$$n \cdot T \cdot \tau_E \geq f(T) \quad (2.18)$$

Tab. 2.4 Hodnoty trojného součinu pro jednotlivé stavy při optimální teplotě pro D-T reakci odpovídající cca. $160 \cdot 10^6 \text{ K}$ [31]

	$Q = 1$	$Q = \infty$
$n \cdot T \cdot \tau_E \text{ [m}^{-3} \cdot \text{keV} \cdot \text{s]}$	$0,926 \cdot 10^{21}$	$5,554 \cdot 10^{21}$

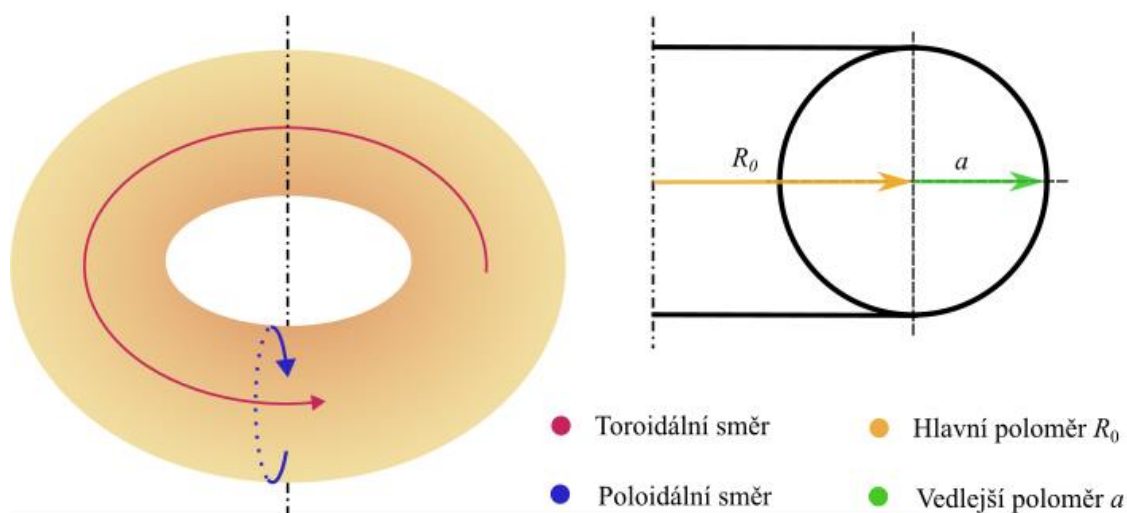
2.3.3 Magnetické udržení

Jak bylo uvedeno v kap. 2.1 plazma se skládá (za předpokladu plně ionizovaného plazmatu) z volných nosičů náboje, konkrétně ze záporně nabitých elektronů a kladných atomových jader – iontů [20]. Tuto skutečnost uplatňuje magnetické udržení (magnetic confinement fusion, MCF), které prostřednictvím magnetických polí svazuje nabitě částice, resp. plazma uvnitř komory a zamezuje kontaktu s jejími stěnami [32]. Na nabitě částice v magnetickém poli působí Lorenzova síla \vec{F}_B , která je rovna součinu náboje částice Q a vektorového součinu její rychlosti \vec{v} a magnetické indukce \vec{B} viz (2.19) [18].

$$\vec{F}_B = Q \cdot \vec{v} \times \vec{B} \quad (2.19)$$

V homogenním magnetickém poli se pak částice pohybuje (za předpokladu nenulové složky rychlosti ve směru vektoru B) po šroubovici, která má osu ležící ve směru magnetického pole [18]. Larmorův poloměr označuje příčný poloměr této šroubovice a např. pro jádro deuteria tzv. deuteron nabývá (za předpokladu stejné teploty a magnetického pole) přibližně 60krát větších hodnot v porovnání s elektronem [2].

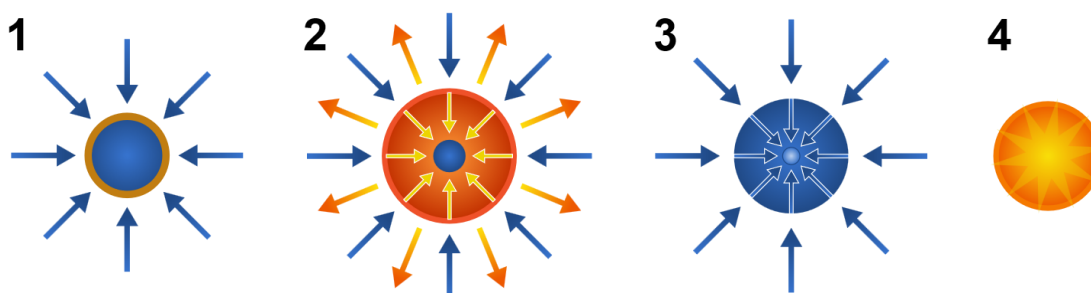
Zařízení využívajících magnetické udržení existuje celá řada, tato práce je zaměřena na ty s největším potenciálním energetickým využitím v relativně blízké budoucnosti. Řeč je zejména o tokamaku (viz Obr. 3.1) a stellarátoru (viz Obr. 4.1), u nichž se dá blíže specifikovat, že využívají tzv. toroidální udržení plazmatu (toroid je geometrický objekt podobný donutu, viz Obr. 2.4) [2]. Při použití pouze toroidálního magnetického pole by docházelo k únikům nabitých částic z vnitřního prostoru toroidu způsobenými tzv. drifty [21]. Zmíněné koncepty tento problém minimalizují odlišným způsobem, tokamak vytvořením dodatečného poloidálního magnetického pole generovaného elektrickým proudem v plazmatu, zatímco klasický stellarátor generuje poloidální pole prostřednictvím šikmého vinutí [2, 3, 21]. V případě tokamaku je elektrický proud v plazmatu buzen indukčně [3, 21]. Jednotlivé směry magnetického pole jsou vyobrazeny na Obr. 2.4. Kombinaci poloidálního a toroidálního magnetické pole označujeme jako pole helikální či šroubovicové [3, 21]. Zařízení generující zmíněná pole k udržení plazmatu uvnitř komory jsou podrobně rozebrána v kapitolách 3 a 4.



Obr. 2.4 Ilustrační znázornění jednotlivých směrů a poloměrů

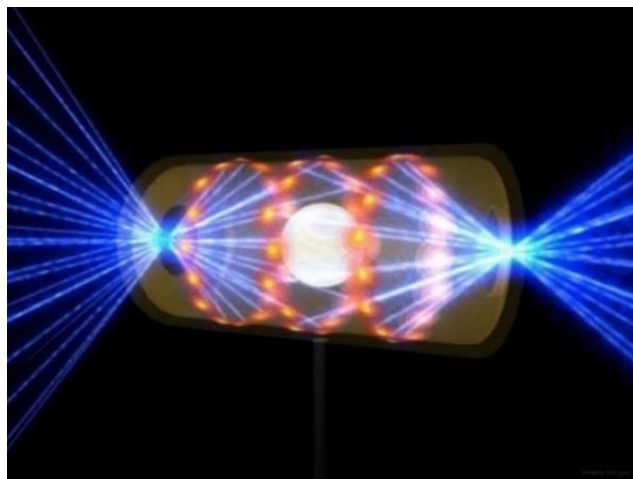
2.3.4 Inerciální udržení

Inerciální udržení (inertial confinement fusion, ICF) se zcela liší od předchozího zmiňovaného. Palivem je malá kapsle tvaru kuličky, jejíž obal tvoří plast, popř. jiný materiál (např. diamant) a náplň se skládá ze směsi deuteria a tritia [2, 29, 34]. Tato „palivová kulička“ je v literatuře označována výrazem terčik, ten má průměr kolem jednoho milimetru [2, 34]. Základní princip a jednotlivé fáze ICF zobrazuje Obr. 2.5. Nejprve je terčik ohříván, ohřev je nejčastěji iniciovaný početným množstvím laserových svazků [2, 29]. Následuje imploze, která je reakcí na odpařování (ablaci) vnější vrstvy terčíku, a ten je komprimován [2, 29]. Jakmile parametry (teplota a hustota) středu terčíku dosáhnou potřebných hodnot k zapálení, dochází k výsledné termonukleární fúzní reakci, která se od středu šíří stlačeným palivem [2, 29, 34].



Obr. 2.5 Fáze inerciálního udržení (1. ohřev, 2. imploze, 3. zapálení, 4. fúze). Převzato z:[33]

Rozlišujeme dva základní způsoby ICF, řeč je o přímém a nepřímém zapálení. Při přímém zapálení je palivový terčik přímo ozařován laserovými paprsky (Obr. 2.5) [34]. Tento způsob se potýká s problematickým docílením rovnoměrného ozařování terčíku [2, 29]. Při nehomogenním zahřívání dochází k Rayleighově-Taylorově nestabilitě [2, 29]. K dosažení rovnoměrnějšího ozařování byl vyvinut hohlraum, který tvoří nezbytnou komponentu nepřímého zapalované fúze [2, 29]. Hohlraum je zobrazen na Obr. 2.6 a jedná se o dutý válec s průměrem řádově jednotek milimetrů vyrobený z prvku o vysokém protonovém čísle (např. zlato), v kterém je umístěn palivový terčik [2, 29, 34]. Vnitřní stěnu hohlraumu ozařují laserové paprsky, které materiál zahřejí a vytvoří husté plazma, to emituje infračervené záření, které ohřívá terčik [2, 29, 34]. Mezi další způsoby patří rychlé a rázové zapálení [2, 29].



Obr. 2.6 Palivový terčik uvnitř hohlraumu při nepřímě zapalované fúzi. Převzato z: [35]

3 Tokamak

Tokamak je nejrozšířenější experimentální zařízení pro řízenou termonukleární fúzi na planetě Zemi. Podle informačního systému fúzních zařízení (Fusion Device Information System, FusDIS) [36] je právě v provozu 55 tokamaků, 8 jich je ve výstavbě a 14 plánovaných. Nejvíce tokamaků je momentálně provozovaných na území Japonska, konkrétně 11 [36].

3.1 Princip

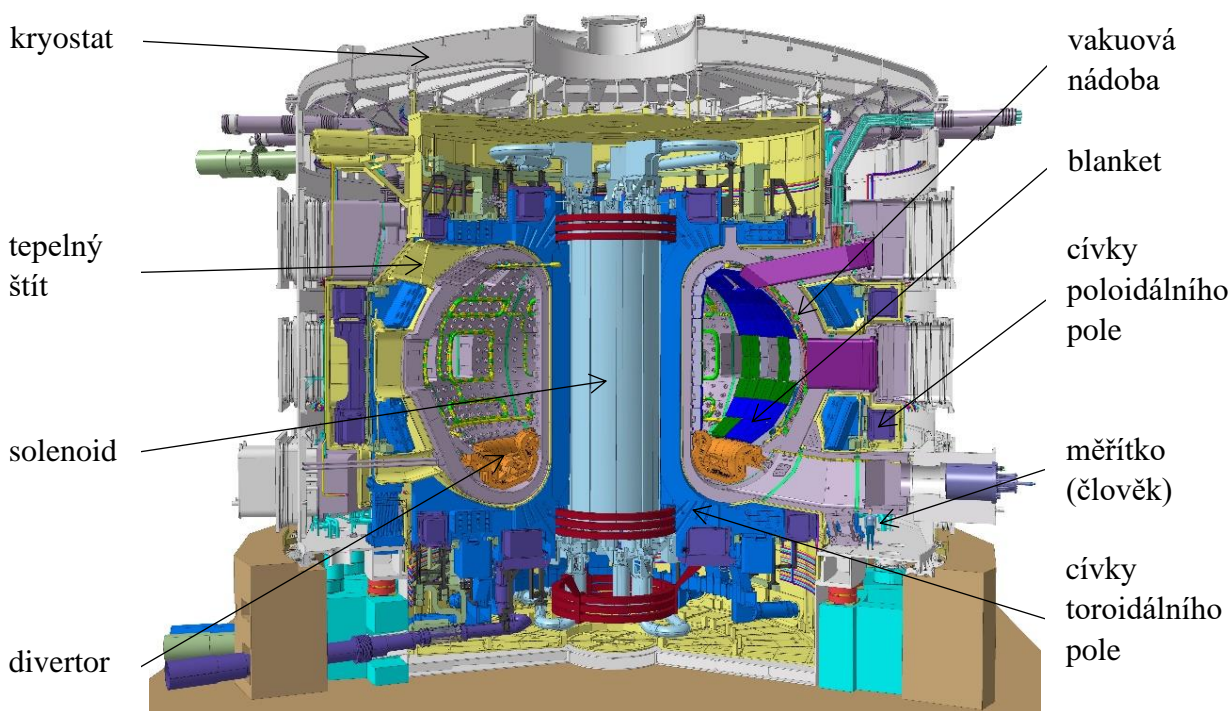
Tokamak, jehož schéma je vyobrazeno na Obr. 3.1, využívá princip magnetického udržení, který byl popsán v kapitole 2.3.3. Plazma je uzavřeno ve vakuové toroidální komoře a spoutáno helikálním magnetickým polem [3]. Průřez komory měl dříve, stejně jako plazma uvnitř, kruhový tvar [32]. Nyní je využívána vhodnější geometrie, a to průřez tvaru D viz Obr. 3.1 [29, 34]. Složku toroidálního magnetického pole generují toroidální cívky, které jsou umístěny kolem nádoby [3]. Poloidální magnetické pole je generováno vnějšími cívkami poloidálního pole a elektrickým proudem, který protéká plazmatem v toroidálním směru a je indukován dle Faradayova zákona [3, 25]. V tokamaku je využíváno principu transformátoru, kde plazma tvoří závit sekundárního vinutí a centrální solenoid (dříve byla komora umístěna na transformátorovém jádru) představuje vinutí primární [3, 25, 37]. Centrální solenoid je napájen zvyšujícím se stejnosměrným proudem [37]. Neboť nelze nepřetržitě zvyšovat proud primárním vinutím, tokamaky fungují v pulzním režimu [37]. Konkrétní délky pulzů jsou uvedeny v Tab. 3.1. Průchodem elektrického proudu plazmatem dochází k tzv. ohmickému ohřevu či Joulovu ději a plazma se zahřívá [2]. Plazma, které má se zvyšující se teplotou nižší elektrický odpor, lze tímto způsobem maximálně ohřát na teploty nižší než 50 mil. K [2]. Existují tak další způsoby ohřevu plazmatu a kompenzace jeho tepelných ztrát [3].

Dalšími způsoby vnějšího ohřevu plazmatu jsou ohřev rezonančními elektromagnetickými vlnami a ohřev neutrálními svazky [3]. První způsob, u kterého je k ohřevu plazmatu využito rezonance, zahrnuje tzv. iontový a elektronový cyklotronový rezonanční ohřev [3, 29]. Pro rezonanci s ionty je využito radiových frekvencí a pro rezonanci s elektrony frekvencí mikrovlnných (konkrétní hodnoty f pro ITER jsou uvedeny v kap. 3.3.2) [3]. Během ohřevu neutrálními svazky jsou do reaktoru prostřednictvím injektorů vstříkovány svazky neutrálních atomů (typicky atomy deuteria) o vysoké kinetické energii [2, 3]. U reakce D-T v plazmatu taktéž probíhá samoohřev iniciovaný částí produktů (jádry hélia) z termonukleárních fúzních reakcí zmíněný v kap. 2.3.2. Pětinu termonukleární reakcí uvolněné energie odnáší jádro helia (částice α) ve formě kinetické energie a $\frac{1}{5}$ energie neutron, ten na rozdíl od kladně nabitého jádra není zachycen uvnitř tokamaku, ale prostupuje do okolních komponent [3]. V nynějších tokamacích zajišťuje ohřev částicemi α nejvýše 13 % z celkového potřebného výkonu, u tokamaku ITER by měl tento samoohřev nahradit až $\frac{2}{3}$ vnějšího ohřevu [3]. V popsaném zařízení dochází k řadě plazmových nestabilit, které mohou vést ke kontaktu plazmatu s vnitřní konstrukcí tokamaku [38]. Konkrétně se jedná o ubíhající elektrony, změny vertikální polohy plazmatu, disrupce a nestability lokalizované na okraji plazmatu (Edge Localized Mode, ELM) [38]. Disrupce je nejzávažnější nestabilitou, kdy plazmatem tokamaku přestává proudit elektrický proud, načež dochází ke ztrátě udržení plazmatu a jeho kolapsu [2, 38]. Tepelný tok při této nestabilitě trvající cca 0,1–10 ms dosahuje až 15 GW/m² [38]. Náročně odstranitelné

ELM nestability mohou po dobu cca 0,5 ms dosahovat až $1\text{--}10\text{ GW/m}^2$ a největšího tepelného toku až 40 GW/m^2 po dobu 0,1–5 ms dosahují úzce lokalizované ubíhající elektrony [38]. Nutno zmínit, že vlivem nestability nemůže dojít k nukleární havárii [38]. Při velké nestabilitě dojde k ochlazení plazmatu a následnému ukončení fúzních reakcí [38].

3.2 Základní části tokamaku

Mezi hlavní komponenty moderního tokamaku patří centrální solenoid, cívky toroidálního pole, vnější cívky poloidálního pole, vakuová nádoba, kryostat, blanket a divertor [3, 40]. Zmíněné části jsou vyobrazeny na Obr. 3.1, který zachycuje počítačový model tokamaku ITER.



Obr. 3.1 Řez tokamakem ITER. Převzato z: [39]

Funkce centrálního solenoidu a toroidálních cívek byla popsána v kapitole 2.3.3. Vnější poloidální cívky zajišťují řízení vertikální a radiální polohy plazmatu a jeho tvarování [3, 8]. Vakuová nádoba je umístěna uvnitř kryostatu a je vyčerpávána na tzv. velmi vysoké vakuum [3]. Mezi kryostatem a vakuovou nádobou se nachází tepelný štít, který tvoří tepelné stínění a snižuje tepelné zatěžování komponent (zejména cívek) [41]. Mezi hlavní části vnitřku vakuové nádoby označované taktéž jako jaderná zóna patří blanket, divertor a tzv. první stěna [3]. Blanket se nachází uvnitř vakuové nádoby a pokrývá její vnitřní stěny [42]. Blanket absorbuje neutronový tok a transformuje jeho kinetickou energii na teplo, které je prostřednictvím média (vody) odváděno [3]. Tato část bude hrát klíčovou roli v budoucí fúzní elektrárně, kdy v blanketu obsažené lithium bude v reakci s fúzními neutrony plodit tritium nezbytné k D-T reakci, viz kapitola 2.3.1 [3]. Tokamak ITER bude prvním tokamakem, kde bude zmíněná komponenta instalována [38]. Část tokamaku nacházející se nejbližší plazmatu se nazývá první stěna, ta přichází do přímého kontaktu s plazmatem a jejím cílem je ochrana konstrukce tokamaku [3]. Komponentou v dolní části vakuové komory, jež taktéž přichází do přímého kontaktu s plazmatem, se nazývá divertor [3]. Divertor zajišťuje čištění plazmatu, kdy

odčerpává plazma obsahující nečistoty, produkty reakce (helium), ale také nevyhořelé palivo [3]. Nečistoty vznikají interakcí plazmatu se stěnou tokamaku, nejčastěji se jedná o uhlíkové a kyslíkové atomy, jejichž důsledkem dochází k ochlazení okraje plazmatu a jeho následné destabilizaci [2]. Divertor je nejvíce tepelně namáhaná část tokamaku, nominální tepelný tok na divertorové terče je schopen dosáhnout až $150 \text{ MW}\cdot\text{m}^{-2}$, při nestabilitách v plazmatu může nabývat hodnot až $20 \text{ GW}\cdot\text{m}^{-2}$ [3]. Divertor dále přispívá k dosažení režimu lepšího udržení částic a energie v plazmatu nazývaného tzv. H-mód [2, 3]. Všechny zmíněné komponenty se nachází uvnitř vakuového kryostatu.

3.3 Experimentální tokamaky

V Tab. 3.1 jsou porovnány největší provozované a v následující Tab. 3.2 právě konstruované tokamaky. Tokamaky jsou porovnávány z hlediska hlavních parametrů, tj. hlavního poloměru plazmatu R_0 (Obr. 2.4), vedlejšího poloměru plazmatu a (Obr. 2.4), velikosti proudu plazmatem I_p a velikosti toroidálního magnetického pole (na ose plazmatu) B_0 [2, 43].

Tab. 3.1 Přehled největších momentálně provozovaných tokamaků [43]

Označení	Umístění	Spuštění	R_0 [m]	a [m]	I_p [MA]	B_0 [T]	Doba výboje [s]
JT-60SA	JPN	2023	2,96	1,18	5,5	2,25	100
JET	GBR	1983	2,96	1,25	5	3,4	60
WEST	FRA	2016	2,5	0,5	1	3,7	≤ 1000
KSTAR	KOR	2008	1,8	0,5	2	3,5	300
HL-2M	CHN	2020	1,78	0,65	3	3	10
EAST	CHN	2006	1,7	0,4	1	3,5	1-1000
DIII-D	USA	1986	1,7	0,6	2	2,17	10
HL-2A	CHN	2002	1,65	0,4	0,48	2,8	5
ASDEX Upgrade	DEU	1991	1,65	0,5	1,4	3,2	10

Tab. 3.2 Přehled tokamaků ve výstavbě [43]

Označení	Umístění	Plánované spuštění	R_0 [m]	a [m]	I_p [MA]	B_0 [T]	Doba výboje [s]
ITER	FRA	2036	6,2	2	15	5,3	≤ 3000
DTT	ITA	2026	2,19	0,69	5,5	6	100
SPARC	USA	?	1,85	0,57	8,7	12,2	?
COMPASS Upgrade	CZE	2023	0,894	0,27	2	5	1-3

3.3.1 JET

Evropský tokamak JET (Joint European Torus) je situován ve Velké Británii v laboratoři CCFE (Culham Centre for Fusion Energy). Prvního plazmatu na něm bylo dosaženo v červnu 1983. Tokamak JET byl prvním tokamakem, který použil palivovou směs deuteria a tritia (D-T). K prvnímu experimentu s tímto palivem došlo v roce 1991. Dnes se jedná o jediný provozovaný tokamak, který s tímto palivem může experimentovat (ostatní tokamaky pracují typicky s D-D palivem). V posledních letech tokamak JET slouží jako experimentální tokamak pro dnes již budovaný tokamak ITER. Jeho cílem je výzkum a testování technologií pro zmíněné zařízení, ale také příprava na jeho provoz. Za tímto účelem byl taktéž modernizován. Roku 2011 byla jeho první stěna zhotovena z beryllia, z kterého bude rovněž vyrobená první stěna tokamaku ITER. Na tokamaku ITER se bude taky nacházet wolframový divertor, který je zhotoven z totožného materiálu, jako nynější divertor tokamaku JET. [44]

Základní parametry tokamaku JET jsou uvedeny v Tab. 3.1. Tokamak JET disponuje 32 toroidálními měděnými vodou chlazenými cívkami tvaru D a železným jádrem o hmotnosti 2600 t [2, 25]. Využívá dodatečného ohřevu plazmatu skládajícího se z ohřevu neutrálními svazky (34 MW), iontového cyklotronového rezonančního ohřevu (10 MW) a ohřevu na dolní hybridní frekvenci (7 MW) [44]. Celkový objem plazmatu v tokamaku JET je 90 m³ [44]. Souhrnný špičkový elektrický příkon celého tokamaku dosahuje 700 MW [25]. Odběr tak velkého příkonu přímo z elektrické sítě je problematický, a proto se v areálu tokamaku nachází dva setrvačníky [2]. Každý z nich má špičkový výkon 400 MW a je opatřen rotorem o hmotnosti 775 t, které zajišťují akumulaci a následnou dodávku elektrické energie [2]. Část výkonu je taktéž dodávána přímo z elektrické sítě [2]. Tokamak JET je z důvodů využívání D-T paliva taktéž vybaven dálkovým manipulačním zařízením, jež umožňuje provádět uvnitř tokamaku inženýrské úkony bez přítomnosti lidské obsluhy [44].

Dne 21.12.2021 JET vyprodukoval 59 MJ energie během 5 s pulzu, přičemž bylo využito 170 µg D-T paliva [44]. Tím překonal svůj rekord z roku 1997, který činil 21,7 MJ uvolněné fúzní energie [44]. Z hlediska velikosti faktoru zesílení Q rekord tokamakových zařízení ovšem zdolán nebyl, neboť v roce 1997 jeho fúzní špičkový výkon činil 16 MW při 24 MW výkonu vnějšího ohřevu plazmatu, tj. dle rov. 2.16 $Q = 0,67$ [25]. Fúzní, resp. tepelný výkon 16 MW tokamaku v porovnání s příkonem 700 MW celého zařízení se nezdá být energeticky atraktivní, využitelnost principu tokamaku ke generování elektrické energie bude popsán v kapitole 6.

3.3.2 ITER

Tokamak ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) bude největším tokamakem na světě jehož cílem je demonstrovat proveditelnost fúze jako zdroje energie, na jehož působení by měla navázat první demonstrační fúzní elektrárna DEMO (kap. 6.1.1) [45]. Nyní probíhá jeho výstavba na jihu Francie, přičemž dosažení prvního plazmatu bylo plánováno na prosinec 2025, ale vlivem dopadů pandemie Covid-19 bude nejspíše posunuto. [45]. V roce 2036 by pak měly započít experimenty na plný výkon tokamaku [43]. Na projektu ITER se podílí ekonomiky 35 zemí tvořících 85 % celosvětového HDP, konkrétně se jedná o Spojené státy, Rusko, Jižní Koreu, Japonsko, Indii, Čínu, Švýcarsko, Velkou Británii a členské státy

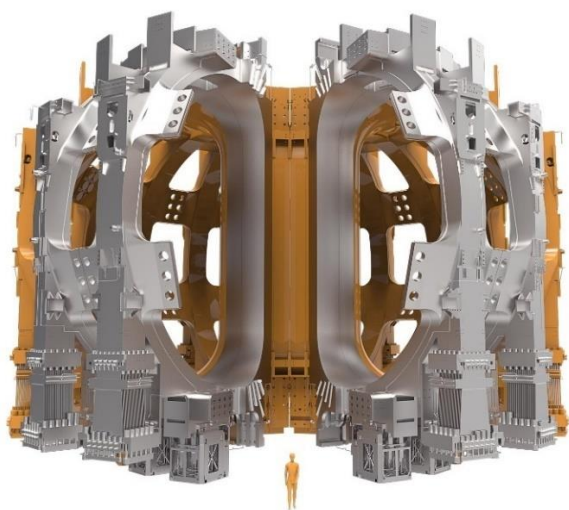
Evropské unie [45, 46]. Organizace ITER dále spolupracuje s Austrálií, Kazachstánem a Kanadou, s nimiž uzavřela nečlenské dohody [46].

Podle oficiálních stránek [45] je ITER navržen, aby naplnil pět hlavních cílů:

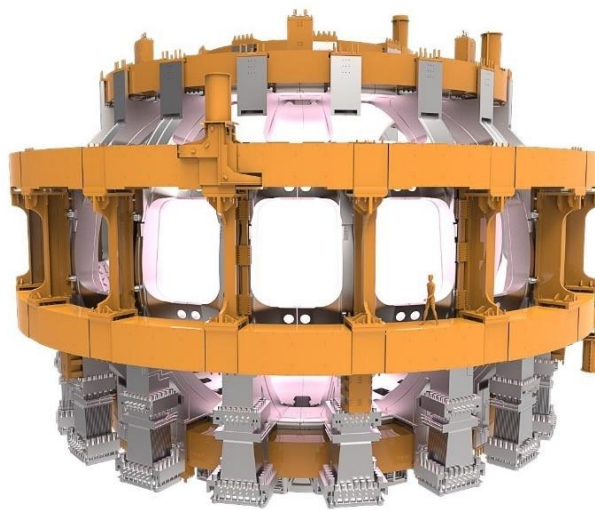
1. dosáhnout D-T plazmatu, jehož teplota bude udržována převážně samoohřevem jádry ^4He ,
2. generovat 500 MW fúzní energie, resp. dosáhnout faktoru zesílení $Q \geq 10$,
3. testovat reaktorové technologie pro budoucí fúzní elektrárnu,
4. demonstrovat možnost plazení tritia uvnitř vakuové nádoby,
5. ukázat bezpečnost technologie fúzních zařízení.

Základní charakteristiky tokamaku ITER jsou uvedeny v Tab. 3.2 a jeho grafické znázornění na Obr. 3.1. V areálu o rozloze 42 ha uvnitř 23000 t hmotného tokamaku se bude nacházet plazma o teplotě 150 mil. °C a objemu 840 m³, což je cca 10× větší objem než v případě zmiňovaného tokamaku JET [40, 45]. ITER by měl dosáhnout faktoru zesílení $Q = 10$ tj. fúzního výkonu 500 MW za využití vnějšího ohřevu o výkonu 50 MW, viz rovnice 2.16 [45]. Externí ohřev bude zajištěn ohřevem neutrálními svazky s kinetickou energií částic (atomů deuteria) 1 MeV, elektronovým cyklotronovým rezonančním ohřevem o frekvencích 170 GHz a iontovým cyklotronovým rezonančním ohřevem o frekvencích 40–55 MHz [29, 47]. Celkový elektrický příkon zařízení ITER se bude dle provozního stavu pohybovat mezi 110–620 MW [48]. Elektrickou síť ITER bude tvořit stabilní elektrická síť (Steady State Electrical Network, SSEN) a pulzní elektrická síť (Pulsed Power Electrical Network, PPEN) [48, 49]. SSEN bude zajišťovat chod zejména kryogenního a chladicího systému, které budou spotřebovávat z celkových 120 MW přibližně 80 %, ale také provozních zařízení a kanceláří [48, 49]. Druhá část elektrické sítě PPEN, jejíž špičkový výkon bude maximálně 500 MW, bude zajišťovat především chod supravodivých cívek a systémů ohřevu plazmatu [48, 49].

Magnetický systém bude tvořen 18 toroidálními cívkami (Obr. 3.2) tvaru D, 6 prstencovými vnějšími cívkami poloidálního pole (Obr. 3.3), centrálním solenoidem, 18 supravodivými korekčními cívkami a dalšími dvěma nesupravodivými magnetickými systémy nacházejícími se uvnitř vakuové komory (2 vertikální stabilizační cívky a sada 27 cívek ELM) [50]. Cívky toroidálního pole a centrální solenoid budou zhotoveny ze slitiny Nb₃Sn, oproti tomu cívky poloidálního pole a cívky korekční využijí slitinu Nb-Ti [29, 50]. K tomu, aby se tyto materiály staly supravodivými, budou prostřednictvím kapalného helia proudícího uvnitř vodiče ochlazovány na teplotu 4 K (−269 °C) [29, 50]. Toroidální cívky, přičemž jedna má rozměry 9 × 17 m a hmotnost 630 t, budou generovat toroidální magnetické pole o maximální hodnotě 11,8 T [50]. Magnetické pole poloidálních cívek bude maximálně dosahovat 6 T, a pole centrálního solenoidu bude maximálně nabývat hodnoty 13 T [50]. Centrální solenoid i s konstrukcí vysoký 18 m bude v plazmatu po dobu 300–500 s generovat elektrický proud o velikosti 15 MA [50].



Obr. 3.2 Toroidální cívky ITER.
Převzato z: [51]



Obr. 3.3 Vnější poloidální cívky ITER.
Převzato z: [52]

V prázdném prostoru na Obr. 3.2, který obepínají cívky toroidálního pole, se bude nacházet vakuová nádoba. Vakuová nádoba o objemu 1400 m^3 , jejíž dvouplášťovou stěnou bude cirkulovat chladicí voda a bude cca z 55 % vyplněna ocelovými bloky (z bórované a feromagnetické nerezové oceli) k zajištění stínění neutronových toků [41]. Mezi vakuovou nádobou a kryostatem budou dále umístěny dvě vrstvy tepelného štítu, který bude sestaven z panelů o nízké emisivitě povrchu ($\varepsilon < 0,05$), jež budou chlazené plynným heliem (80–100K) [41]. Magnetické cívky včetně reaktoru tokamaku bude obklopotvat téměř 30 m vysoký vakuový kryostat o objemu 16000 m^3 [40].

Blanket tokamaku pokrývající vnitřek vakuové nádoby bude tvořen 440 moduly vyrobenými z oceli AISI 316 LN-IG, které budou chlazeny vodou o parametrech $70 \text{ }^\circ\text{C}$ a 4 MPa [3, 42]. Z této oceli bude zhotovena i vakuová komora, nosná konstrukce divertoru a nosná konstrukce první stěny [38]. Na moduly blanketu budou umístěny panely první stěny, jejichž svrchní 10 mm tlustá vrstva bude tvořena berylliem [3, 42]. Těchto panelů se uvnitř reaktoru budou nacházet dva typy, které budou dimenzovány na tepelný tok dosahující až 2 MWm^{-2} a $4,7 \text{ MWm}^{-2}$ [42]. Tyto panely budou během provozu tokamaku ITER minimálně jednou vyměněny [42]. Vodou chlazený divertor bude tvořen celkově z 54 kazetových sestav, jež budou opatřeny wolframovými monobloky [38, 53]. Vertikální divertorový terč bude v ustáleném stavu zatěžován tepelným tokem 10 MWm^{-2} [53].

Chlazení supravodivých cívek, kryopump a tepelného štítu bude zajištěno kryogenním systémem [29, 40]. Potřebný chladicí výkon obstará kryostanice využívající 23 šroubových a radiálních kompresorů o elektrickém instalovaném příkonu 39 MW [54]. Ta bude tvořena zařízením k produkci zkapalněného dusíku a systémem ke zkapalňování helia [55]. Kapalný dusík bude v kryostanici z 90 % využit k předchlazování helia [54]. Chlazení plazmatu nejbližších částí tokamaku, konkrétně blanketu (jeho modulů a panelů první stěny), divertoru a stěn vakuové komory, bude zajišťovat vodní chladicí systém (Tokamak Cooling Water

System, TCWS) [41, 42, 56]. V 36 km dlouhém potrubí TCWS ITER bude proudit voda o průtoku $5 \text{ m}^3/\text{s}$, jejíž zdroj bude nedaleký Canal de Provence [56, 57]. Systém bude zajišťovat odvod až 1,1 GW tepelné energie z reaktoru [56, 57]. Teplo bude odváděno prostřednictvím chladících věží systému HRS (Heat Rejection System) [57].

Dávkování fúzního paliva bude zajištěno zejména vstřikováním plynné formy paliva a za využití paletového systému, který bude vstřelovat pelety s fúzním palivem rychlostí $300 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ [26]. Malou část deuteria do reaktoru také dodá systém ohřevu neutrálními svazky [26].

3.4 Problémy

Problém pro provoz tokamaku představují plazmové nestability, konkrétně disrupce a ELM nestability [25]. Další překážkou jsou obrovské nároky kladené na materiály vystavené neutronovým tokům [25]. Pro srovnání fúzní neutrony mají energii 14,1 MeV, přičemž průměrná hodnota energie neutronů produkovaných štěpnými reakcemi je 2 MeV [25]. Problémem z hlediska budoucího energetického využití tokamaku, jako reaktoru elektrárny, je také jeho pulzní provozní charakter, jenž vychází z jeho principu, který je popsán v kap. 3.1. Proto se vyvíjí způsoby neinduktivního generování elektrického proudu v plazmatu, jedním z mechanismů je tzv. bootstrapový proud, dále pak je možné využít svazek neutrálních částic, popř. elektromagnetické vlny [2]. Dalším potenciálním problémem do doby, než bude zvládnutá technologie plození tritia uvnitř tokamaku, může být nedostatek tritia. V současnosti celosvětové zásoby tritia činí přibližně 27 kg, přičemž tokamak ITER by během svého provozu měl spotřebovat přibližně 20 kg [26].

Mezi potenciální problémy projektu ITER ve své publikaci [25] L. J. Reinders uvádí složitost a velikost celkového systému obsahujícího přes milion částí, vysokou výslednou cenu predikovanou na více než 53 mld. €, nezbytnost nových technologií a v neposlední řadě riziko spojené s enormní energií uložené v supravodivých cívkách a s disrupcemi plazmatu. O energetickém využití této technologie dále pojednává kap. 6.

4 Stelarátor

Stelarátorů popř. heliotronů je nyní v provozu 12, přičemž nejvíce se jich nachází v USA a to 4 [36]. Existuje celá řada odlišných konfigurací konceptu stelarátoru mezi které patří klasický stelarátor, torsatron (v Japonsku je označován jako heliotron) a moderní typ modulárního stelarátoru označovaný helias [2, 24].

4.1 Princip a typy stelarátoru

Stelarátor, jak bylo uvedeno v kap. 2.3.3, užívá obdobně jako tokamak magnetického udržení plazmatu. Základní skutečností, kterou se princip stelarátoru odlišuje od tokamaku je nepřítomnost elektrického proudu v plazmatu [29]. Výhodou absence elektrického proudu v plazmatu je možnost kontinuálního provozu a nepřítomnost nestabilit s ním spojených (disrupcí) [29]. Neboť plazmatem neprotéká elektrický proud, poloidální i toroidální magnetické pole je oproti tokamaku generováno pouze vnějšími cívkami. Podle uskupení cívek se stelarátory dělí na jednotlivé konfigurace [2].

Klasický stelarátor disponuje obdobně jako tokamak sadou cívek toroidálního magnetického pole a dále pod nimi kolem plazmatu šroubovicově navinutou sadou helikálních cívek [2]. Helikální cívky tvoří páry a elektrický proud protéká v každé z dvojice cívek opačným směrem [2]. Dle počtu párů helikálních cívek se stelarátory rozlišují na s dvěma ($l = 2$) a třemi ($l = 3$) páry helikálního vinutí [2]. Od počtu párů cívek se odvíjí i tvar příčného průřezu plazmatu, pro $l = 2$ je průřez eliptický a pro $l = 3$ trojúhelníkový [2].

Konfigurace zvaná heliotron sadu cívek toroidálního magnetického pole neobsahuje [2]. Magnetické pole (poloidální i toroidální složka) je generováno pouze sadou helikálních cívek, kterou protéká proud nyní již v jednom směru [2]. Kvůli vyrovnání vertikální složky magnetického pole může tato konfigurace taktéž obsahovat cívky poloidálního pole, tak je tomu např. u heliotronu LHD [2].

Modulární stelarátor tzv. helias se skládá z nerovinných prostorově tvarovaných modulárních cívek viz Obr. 4.1, jež generují obě složky magnetického pole [2, 24, 29]. Zástupcem této konfigurace je Wendelstein 7-X, který je detailněji popsán v kapitole 4.2.1.

Obdobě jako u tokamaků je u stelarátorů aplikován ohřev rezonančními elektromagnetickými vlnami a svazky neutrálních částic [29]. Další odlišnost od tokamaků představuje tvar magnetických ploch, zatímco tokamak je osově symetrický a magnetické plochy mají po celé ose stejný kruhový nebo D tvar, tvar magnetických ploch u stelarátoru je po ose proměnlivý, a tedy osově nesymetrický [2].

4.2 Experimentální stelarátory a heliotrony

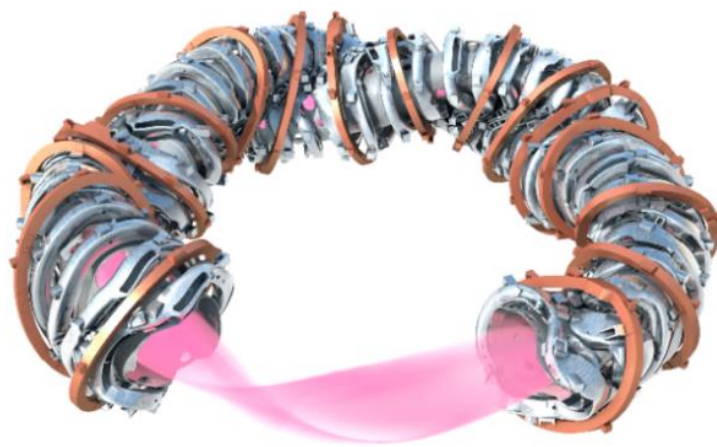
V Tab. 4.1 jsou uvedeny a porovnány v dnešních dnech největší fungující fúzní zařízení pracující na principu stelarátoru. Jsou porovnány z hlediska stejných parametrů jako tokamaky.

Tab. 4.1 Přehled největších momentálně provozovaných stelarátorů a heliotronů [43]

Označení	Umístění	Spuštění	Typ	R_0 [m]	a [m]	B_0 [T]
Wendelstein 7-X	DEU	2015	stelarátor	5,5	0,53	3
LHD	JPN	1998	heliotron	3,9	0,65	4
Uragan-2M	UKR	2006	stelarátor	1,7	0,22	2,4
TJ-II	ESP	1997	stelarátor	1,5	0,22	0,95
HSX	USA	1999	stelarátor	1,2	0,15	1,25

4.2.1 Wendelstein 7-X

Wendelstein 7-X je zástupce konfigurace helias [2]. Jedná se o jeden z největších stelarátorů na světě, jehož základní parametry jsou uvedeny v Tab. 4.1. Jeho cílem je posoudit vhodnost konceptu stelarátoru, jakožto reaktoru pro budoucí fúzní elektrárnu [58]. Nachází se v německém Greifswaldu, kde na něm v prosinci 2015 bylo vyrobeno první plazma [58]. Nyní prochází 3. provozní fází, která zahrnuje provoz stelarátoru s vodou chlazeným divertorem [59]. Dosavadně nejlepšího výsledku bylo dosaženo 15.2.2023, kdy během 480 s dlouhého pulzu Wendelstein 7-X vyprodukoval 1,3 GJ tepelné energie, tzn. průměrný výkon činil 2,7 MW [60].



Obr. 4.1 Magnetický systém Wendelstein 7-X. Převzato: [64]

Magnetické pole generuje sada 50 nerovinných (neplanárních) supravodivých niob-titanových magnetických cívek a další sada 20 již rovinných supravodivých cívek [2, 58, 61]. Rovinné (oranžově) a nerovinné (stříbrně) magnetické cívky, jež jsou ochlazovány na teplotu 3,4 K, vyobrazuje Obr. 4.1. [62]. Plazma o objemu 30 m³ dosahuje teplot 60–130 mil. °C a hustoty až 3·10²⁰ m⁻³ [63]. Palivem je vodík (¹H) a těžký vodík (deuterium, ²H) [62, 63]. Pro udržení vhodných teplot jsou využity metody elektronového cyklotronového rezonančního ohřevu (140 GHz), iontového cyklotronového ohřevu a neutrálních svazků [62]. Celkový výkon plazmového ohřevu činí 14 MW a v rámci dalších provozních fází je v plánu ho zvyšovat [62]. Maximální délka plazmového pulzu by měla dosahovat až 30 min [63]. Stelarátor je taktéž vybaven vodou chlazeným divertorem s grafitovým povrchem [62].

5 Zařízení využívající inerciálního udržení

Po celém světě je v dnešních dnech v provozu 6 zařízení pro inerciální fúzi a dalších 5 je plánovaných [36]. Obecně platí, že většina fúzních zařízení je ve veřejném sektoru, u inerciální fúze ovšem všech 5 plánovaných projektů pochází ze sektoru soukromého, mezi tyto zařízení patří např. Marvel Fusion, HB11 a Machine 4 [36].

5.1 Princip a rozdělení zařízení pro inerciální fúzi

Obecný princip inerciální fúze je popsán v kap. 2.3.4. Nejčastěji je jako zapalovač inerciální fúze využit, ostatně jak je tomu i u dvou největších projektů NIF a LJM, velký neodymový laser [2]. Vlnová délka vyzařovaného infračerveného záření neodymovým laserem není pro stlačení terčíku vhodná [2]. Proto je využito optických prvků, prostřednictvím kterých je vlnová délka zkrácena a posunuta do oblasti spektra UV záření [2]. Účinnost přeměny elektrické energie na UV záření je u velkých neodymových laserů velmi nízká (< 1 %), a proto se hledají alternativní cesty [2]. Jednou z nich je např. použití LED diod v laseru namísto výbojek, či použití svazků energetických lehkých iontů [2].

Základní dva způsoby inerciálního udržení plazmatu (přímé a nepřímé zapálení) jsou popsány v kap. 2.3.4. Zkoumají se taktéž nové způsoby zapálení konkrétně tzv. rychlé zapálení (fast ignition) a nejmodernější tzv. rázové zapálení (shock ignition) [2]. Rychlé zapálení využívá dvou laserů, přičemž jeden slouží ke stlačení terčíku a druhý k jeho zahřátí a zapálení ve chvíli největšího stlačení [2]. U rázového zapálení je využito jednoho laseru, který terčík bez ohřátí stlačí a následně vyvolá sférickou rázovou vlnu v důsledku níž dojde k zapálení [2].

5.2 Experimentální inerciální zařízení

V Tab. 4.1 jsou uvedeny a porovnány v dnešních dnech největší fungující fúzní zařízení pracující na principu inerciálního udržení. V tabulce jsou jednotlivé experimentální zařízení srovnány z hlediska počtu svazků a špičkové energie dodávané terčíku.

Tab. 5.1 Přehled vybraných momentálně provozovaných zařízení na inerciální fúzi

Název	Umístění	Spuštění	Počet svazků	Energie [kJ]	Zdroj
NIF	USA	2009	192	> 2 000	[65]
LMJ	FRA	2014	176	> 1 000	[66]
GEKKO XII	JPN	1983	12	10	[2]
OMEGA	USA	1995	60	30	[67]

5.2.1 NIF

Americké NIF (National Ignition Facility) v Lawrenceově národní laboratoři v Livermoru je v dnešních dnech největším a nejúspěšnějším zařízením na inerciální fúzi na světě [34]. NIF využívá principu nepřímo zapalované fúze a jeho základní parametry zobrazuje Tab. 5.1 [34].

Dne 5.12.2022 se zařízení NIF stalo prvním fúzním zařízením, jež dosáhlo stavu vědeckého vyrovnání (viz 2.3.2) [30]. Konkrétní hodnota faktoru zesílení dosáhla hodnoty $Q = 1,5$, kdy výstupní fúzní energie měla hodnotu $P_F = 3,15$ MJ a velikost energie dodané terčíku byla rovna $P_H = 2,05$ MJ [30]. Protože podrobnější parametry z daného experimentu nebyly doposud zveřejněny, v Tab. 5.2 jsou uvedeny parametry, kterých bylo dosaženo v předchozím nejuspěšnějším pokusu dne 8.8.2021 [68].

Tab. 5.2 Dosažené parametry na NIF experiment N210808 [68]

Energie laserů do terčíku	1,92	MJ
Fúzní energie	1,37	MJ
Faktor zesílení	0,71	-
Výkon laseru	441	TW
Tlak v palivu	569	Gbar
Teplota v palivu	11	keV

Neodymové lasery vyzařují infračervené záření ($\lambda = 1,053$ μm), které je dále konvertováno nelineárními krystaly na UV záření ($\lambda = 351$ nm) [2]. Synchronizovaný dopad laserových paprsků na hohlraum probíhá uvnitř terčíkové komory, která má 10 m v průměru [2]. Dopad paprsků na cíl musí být soustředěný s velkou přesností konkrétně s tolerancí 60 μm [2]. Velké nároky jsou taktéž kladeny na výrobu terčíku, který je umístěn uvnitř hohlraumu a na samotný hohlraum [34]. Tyto dvě komponenty jsou od začátku projektu NIF neustále zdokonalovány [34]. Při výše zmíněném experimentu byl použitý palivový terčík o poloměru 1,05 mm s názvem HYBRID-E [34]. Jeho svrchní slupku označovanou taktéž jako ablátor, která byla vyrobena z materiálu HDC (High Destiny Carbon), vyplňovala tenká vrstva D-T paliva v pevném skupenství a zbylý vnitřní prostor byl zaplněn D-T plynem [34, 68]. Hohlraum o výšce ~ 1 cm byl vyroben z ochuzeného uranu a zlata [68].

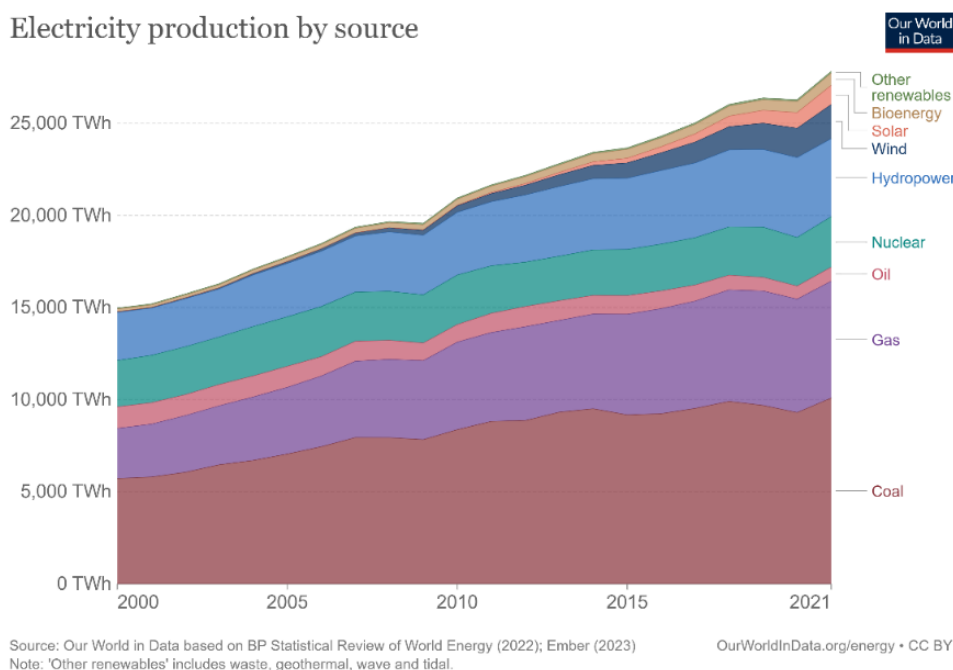
5.3 Problémy

Jeden z velkých problémů pro potenciální energetické využití inerciální fúze je nízká účinnost velkých neodymových laserů [2][34]. Konkrétně NIF z energie ~ 400 MJ uložené v kondenzátorech baterií vyprodukuje infračervený laserový pulz o energii 3–4 MJ, ten je následně konvertován na UV záření o energii ~ 2 MJ [34]. Vlivem nejrůznějších ztrát je z energie UV záření absorbováno terčíkem pouze 10–20 % [34].

Další nevýhodou je v případě laserů NIF a LMJ nízká repetice, která činí 8 h [69]. Pro energetické využití se jako vhodná opakovací frekvence uvádí 10–15 Hz [69]. Z energetického hlediska taktéž není vhodný impulzní charakter systému, který by navíc extrémně zatěžoval první stěnu terčíkové komory [69]. Dalšími potížemi jsou nestability terčíku a jeho problematické rovnoměrné stlačení [69].

6 Budoucnost využití termonukleární fúze

Z Obr. 6.1 je patrné, že s neustálým vývojem lidstva jsou spojeny neustále se zvyšující nároky na využívání, resp. spotřebu elektrické energie. Nejvíce se na celosvětové produkci elektrické energie podílí elektrárny spalující fosilní paliva. Mimo možnou vyčerpatelnost těchto zdrojů je ústup od jejich používání motivován Pařížskou dohodou [70]. Prostřednictvím Pařížské dohody se 195 států zavázalo přispět ke zpomalení rychlosti globálního oteplování zejména postupným snižováním emisí skleníkových plynů [70, 71]. V této kapitole je popsáno, jak by eventuálně fúzní elektrárny byly schopny přispět do energetického mixu a zda mají potenciál nabídnout lidstvu v dohledné budoucnosti neomezený zdroj energie.



Obr. 6.1 Celosvětová produkce elektrické energie z jednotlivých zdrojů. Převzato: [72]

6.1 Fúzní elektrárna na principu magnetického udržení

Fúzní elektrárny se od stávajících jaderných elektráren nebudou vyjma reaktoru, reaktorové haly a přidružených systémů výrazně lišit [26, 69, 73]. Reaktor bude pracovat na principu jednoho z výše popsaných fúzních zařízení. Nyní k tomu má nejbližše tokamak a jestli se nic ve fúzním výzkumu radikálně nezmění, první fúzní elektrárny by měli využít jeho principu [73].

6.1.1 DEMO

Demonstrační fúzní elektrárna DEMO (Demonstration fusion power plant) by měla být pomyslným mezistupněm mezi projektem ITER a komerční fúzní elektrárnou [3, 29]. Zatímco projekt ITER se nese ve znamení bohaté mezinárodní spolupráce, vyjma spolupráce EU a Japonska plánuje každá fúzní velmoc svoji vlastní demonstrační fúzní elektrárnu [74]. Základní parametry evropského a japonského návrhu reaktoru DEMO jsou uvedeny v Tab. 6.1.

Čína chystá jako mezistupeň mezi elektrárnou DEMO a projektem ITER vybudovat tokamak CFETR (China Fusion Engineering Test Reactor), jehož výstavba je nyní plánována [74]. Stavba čínského DEMO by potom měla být zahájena ve 30. letech [74]. Indie taktéž plánuje mezistupeň v podobě zařízení SST-2, jehož výstavba by měla započít kolem roku 2027 [74]. Zahájení výstavby indického DEMO je plánováno o 10 let později [74]. Jižní Korea plánuje do roku 2037 vybudovat K-DEMO, jehož provoz bude rozdělen do dvou fází, přičemž generování elektrické energie je naplánováno v druhé fázi, která nastane po roce 2050 [74]. Rusko má v plánu fúzně-štěpné hybridní zařízení DEMO-FNS, které je součástí cíle vybudovat fúzní elektrárnu do roku 2050 [74]. Spojené státy americké počítají s výstavbou DEMO po roce 2050 [74]. Stavba japonského JA DEMO by měla započít v roce 2035 [75]. Plán Evropské unie EU-DEMO je nyní v etapě koncepčního návrhu [75]. Evropská fúzní strategie je popsána v dokumentu [76] European Research Roadmap to the Realisation of Fusion Energy z roku 2018. Tento plán je rozdělen do tří základních fází:

1. První fáze (< 2030) – spuštění tokamaku ITER a koncepční návrh DEMO
2. Druhá fáze (2030–2040) – výzkumná činnost tokamaku ITER při plném výkonu a inženýrský návrh DEMO
3. Třetí fáze (> 2040) – stavba a provoz DEMO

Dle dokumentu [76] je pro dosažení první výroby elektrické energie z fúzního zdroje na počátku 2. poloviny 21. století nezbytné zahájení výstavby EU-DEMO již na začátku 40. let 20. století, resp. v období kdy by měl tokamak ITER dosáhnout $Q = 10$. Dále je v dokumentu definováno 8 misí, resp. výzev kterými by se měl výzkum zabývat, aby bylo dosaženo úspěšné realizace fúzní elektrárny. Mezi tyto mise patří: provozní režimy plazmatu, odvod tepla z reaktoru, radiačně odolné materiály, soběstačnost tritia, bezpečnost, DEMO, ekonomická konkurenceschopnost produkované elektřiny a stellarátory [76].

Tab. 6.1 Základní parametry reaktorů koncepčních návrhů DEMO [36]

Označení	Umístění	R_0 [m]	a [m]	I_p [MA]	B_0 [T]
EU-DEMO1	EU	9	2,9	17,75	5,86
JA-DEMO	JPN	8,5	2,42	12,3	6

6.1.2 Princip

Tokamak, který byl popsán v kap. 3, bude tvořit fúzní reaktorovou část elektrárny, přičemž by měl dosahovat faktoru zesílení $Q \leq 35$ [73]. Teplo uvolněné fúzní reakcí bude primárně odváděno prostřednictvím teplonosných médií, jež budou chladit divertor, blanket, první stěnu a vakuovou nádobu [26, 77]. Zmíněné komponenty absorbující neutronový a tepelný tok budou pracovat v různých tepelných režimech a je možné, že i s různými teplonosnými médii [3, 26]. Studie Power plant conceptual studies in Europe [78] představila 5 evropských koncepčních návrhů fúzních elektráren, všechny o elektrickém výkonu v rozmezí přibližně

1300–1500 MWe. Koncepty zde využívají ke chlazení blanketu vodu, helium nebo LiPb [78]. U divertoru se předpokládá využití vody, popř. helia [78]. Vzhledem k více typům chladicích médií operujících v jednotlivých komponentech, návrhy fúzní elektrárny obsahují několik primárních okruhů [26]. Příklady možných termomechanických parametrů médií cirkulujících jednotlivými komponentami fúzní elektrárny jsou uvedeny v Tab. 6.2.

Tab. 6.2 Příklad předpokládaných parametrů jednotlivých komponent fúzního reaktoru [77]

	První stěna, blanket	Divertor	Vakuová komora
Teplonosné medium	helium	voda	voda
Vstupní teplota [°C]	300	150	190
Výstupní teplota [°C]	500	161,5	200
Tlak [MPa]	8	5	3,15
Tepelný výkon [MW]	2176	259	65

Propojení primárních okruhů a okruhu sekundárního budou zprostředkovávat výměníky tepla [2]. Sekundární okruh fúzní elektrárny EU-DEMO bude pracovat na principu Rankinova-Clausiova (R-C) parního cyklu [77]. Mezi další uvažované termodynamické cykly se řadí Ericssonův-Braytonův (E-B) cyklus s nadkritickým CO₂ a nadkritický R-C cyklus [78]. Studie [77] popisuje potenciální výhody ve využití zmiňovaného E-B cyklu s nadkritickým CO₂, která tkví zejména ve vyšší čisté účinnosti v porovnání s R-C cyklem [77].

Blanket představuje klíčovou komponentu pro fúzní elektrárnu, nejen z důvodu odvodu výkonu, ale taktéž bude umožňovat reakce produkující tritium viz. Tab. 2.3. Návrhů blanketu je po celém světě přes 20 a stále není jednoznačná optimální konstrukce [38]. Pro EU-DEMO jsou v současné době navrženy 4 koncepty blanketu, jmenovitě: HCPB (Helium Cooled Pebble Bed), HCLL (Helium Cooled Lithium Lead), WCLL (Water Cooled Lithium Lead) a DCLL (Dual Coolant Lithium Lead) [79]. Na vhodném návrhu blanketu probíhá intenzivní výzkum a 6 různých konceptů blanketu z celého světa bude testováno na tokamaku ITER [69, 73].

Palivové hospodářství fúzní elektrárny bude zahrnovat 4 zdroje tritia a deuteria [26]. Fúzní palivo se bude získávat extrakcí z lithia, teplonosných médií a vody, dále pak evakuací vakuové komory [26]. Helium, jakožto odpadní produkt fúzních D-T reakcí bude odčerpáváno z komory, za horní hranici obsahu helia v plazmatu se považuje přibližně 10 % [2].

Reaktor, primární okruhy a tritiové hospodářství budou umístěny v ochranných kontejnmentech [26]. Vnitroreaktorové komponenty budou vystaveny vysokoenergetickým neutronovým tokům, a proto budou muset být vyměňovány [80]. Elektrárna pro tento úkon bude opatřena speciálním zařízením a porty, prostřednictvím nichž bude zajištěna výměna divertorových kazet a částí blanketu [80]. Z tohoto důvodu probíhá intenzivní výzkum a vyvíjí se odolné nízkoaktivovatelné materiály, např. feriticko-martenzitická ocel (EUROFER), dále se studují slitiny vanadu a křemíkohlíkaté kompozity [2, 29].

6.2 Fúzní elektrárna na principu inerciálního udržení

V porovnání s magnetickým udržením představuje inerciální udržení v současné době méně vhodnou variantu pro energetické využití viz 5.3. Fúzní elektrárnu, jejíž reaktor by byl založen na principu inerciálního udržení, by tvořily čtyři základní části [24]. Zapalovač (např. laser), výrobní terčíku, terčíková komora a systémy na odvod tepla a recyklaci tritia [29]. Dané uskupení má mnoho nevýhod. Hlavní komplikace využití fúzní elektrárny na principu inerciálního udržení jsou:

- problematika s nestabilitou terčíku,
- absence vhodného zapalovače (výkonné neodymové lasery mají nízkou účinnost a nízkou repetici),
- pulzní režim,
- extrémní mechanické a tepelné zatěžování první stěny terčíkové komory vlivem neustálých výbuchů [2, 69].

Na již zmíněný projekt NIF měl navazovat projekt LIFE (Laser Inertial Fusion Energy), který měl demonstrovat energetické využití inerciální fúze [2]. Od projektu bylo ovšem v roce 2014 upuštěno [81]. Proto v této práci nebude tato problematika více rozváděna.

6.3 Překážky a potenciální benefity fúzních elektráren

Nesporných výhod, které by přineslo zvládnutí této technologie je mnoho, mnoho je ovšem i překážek, kterým ještě musí fúzní výzkum čelit.

Koncept fúzní elektrárny představuje bezpečný a stabilní zdroj energie, který neprodukuje emise ani radioaktivní vyhořelé palivo [73, 82]. Jako odpadní materiál produkuje dobře využitelné helium [73]. Fúzní palivo, resp. deuterium a lithium je v dohledné době nevyčerpatelné [73]. Deuterium, jak bylo uvedeno v kap. 2.3.1, je přirozená složka mořské vody, z které bude filtrováno [69]. Lithium, nezbytné pro produkci tritia, se hojně vyskytuje v zemské kůře a v oceánech [26, 73]. Fúzní elektrárna o výkonu 1 GWe by za rok provozu spotřebovala méně než 1 t deuteria a tritia [82]. Z 1 kg fúzního paliva se fúzní reakcí přemění přibližně stejné množství energie jako spálením 10 000 000 kg uhlí [82].

První generace elektráren (využívající reakce D-T) ovšem budou způsobovat sekundární radioaktivitu komponent uvnitř reaktoru, tyto komponenty budou vyměňovány a očekává se, že objem sekundárně radioaktivního odpadu budou větší než u štěpných elektráren [25, 73]. Mezi další nevýhody patří obrovské investiční náklady, složitost reaktoru, odborný personál a fakt, že technologie jako taková ještě není v potřebném rozsahu zvládnutá [25]. Příkladem je klíčová komponenta – blanket, který prostřednictvím reakcí s lithiem bude produkovat fúzní palivo – tritium. Blanket je podroben intenzivnímu výzkumu, avšak plození tritia ještě nikdy nebylo v tokamaku demonstrováno (testovací moduly blanketu budou ověřeny na tokamaku ITER) [38]. Problémy jednotlivých typů potenciálních reaktorů fúzní elektrárny jsou popsány v kapitolách 3, 4 a 5.

ZÁVĚR

Řízená termonukleární fúze představuje slibnou alternativu k současným fosilním zdrojům elektrické energie. Vzhledem k potenciálním výhodám, které tato technologie přináší, je fúznímu výzkumu věnováno velké vědecké úsilí a taktéž nemalé finanční prostředky. Momentálně se fúzní výzkum zabývá zejména třemi typy fúzních zařízení, kterými jsou tokamak, stelarátor a zařízení využívající inerciální fúzi. Nyní se jako nejvhodnější fúzní zařízení pro potenciální energetické využití jeví tokamak. Ač je tokamak nejrozšířenějším typem a nejpravděpodobnějším reaktorem první fúzní elektrárny, stále má svá omezení a problémy, kterými se musí fúzní výzkum zabývat, jedná se např. o nestability plazmatu a pulzní provozní charakter. Stelarátor je výrazně méně zastoupeným typem fúzního zařízení, avšak oproti tokamaku má výhodu zejména v možnosti kontinuálního provozu, jeho nevýhodou je složitá geometrie magnetických cívek. Inerciální fúze se v posledních letech, zejména prostřednictvím zařízení NIF, může pochlubit vynikajícími experimentálními výsledky. Energetické využití tohoto konceptu je ovšem velmi problematické, zejména kvůli pulznímu charakteru a absenci vhodného zapalovače, který by měl dostatečnou účinnost, výkon a repetici.

Stěžejním zařízením pro další vývoj řízené termonukleární fúze bude tokamak ITER, který otestuje řadu zásadních technologií pro budoucí fúzní elektrárnu, ověří vhodnost tokamaku jako reaktoru fúzní elektrárny, ukáže bezpečnost technologie a bude demonstrovat možnosti plození tritia uvnitř reaktoru. Dalším krokem ke konvenční fúzní elektrárně bude demonstrační fúzní elektrárna DEMO. Podle evropské koncepce by výstavba EU-DEMO měla započít kolem roku 2040 a zahájení provozu je plánováno na počátku 2. poloviny 21. století.

Fúzní elektrárna představuje potenciálně neomezený, ekologický, bezemisní, stabilní a bezpečný zdroj energie. Palivem bude deuterium a lithium. Deuterium je snadno dostupné v mořské vodě a prostřednictvím lithia se bude uvnitř tokamaku produkovat pro D-T reakci nezbytné tritium. Odpadním produktem fúzních reakcí bude helium. I přes to, že využívání jaderné energie u veřejnosti vzbuzuje možné bezpečnostní obavy, fúzní elektrárny budou bezpečné. Fúzní reakce probíhají za extrémních tlaků a teplot, při závadě způsobené např. velkými nestabilitami plazmatu dojde k jeho ochlazení a okamžitému ukončení fúzních reakcí. Nukleární výbuch fúzního paliva je proto vyloučený.

V cestě ke komerčnímu využívání fúzních elektráren ovšem stojí řada technických a technologických překážek a problémů. Využívání této technologie s sebou taktéž nese nevýhody i skepticismus z řad některých odborníků. Největším momentálním problémem je skutečnost, že technologie není doposud v potřebném rozsahu zvládnutá a některé klíčové komponenty jako např. blanket, ještě nebyli uvnitř tokamaku experimentálně testovány. Nevýhodou první generace fúzních elektráren bude produkce sekundárně radioaktivního odpadu – vnitřoreaktorových komponent, které budou pravidelně vyměňovány. Fúzní elektrárna bude taktéž představovat velice složitou a investičně nákladnou technologii, která bude vyžadovat odborný personál.

Výzkum fúze je kvůli velkým vynakládaným finančním prostředkům občas kritizován. Dle mého subjektivního názoru ho má smysl nadále podporovat. I když je pravděpodobné, že v nejbližších letech a desetiletích se fúzní elektrárny nebudou podílet na zpomalení globálního oteplování. Fúzní elektrárna je komplexním vědeckým a inženýrským problémem a k její realizaci se bude muset lidské vědění posunout v mnoha přidružených oblastech, jako je např. materiálové inženýrství. Využití takto nabytých znalostí může být následně využito i pro jiné aplikace např. vesmírné pohony.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] NOVOTNÝ, Jan. a Rainer SCHIMMING. Annus mirabilis 1905. *Vesmír* [online]. 2005, roč. 84, č. 9 [cit. 2022-11-05]. ISSN: 0042-4544. Dostupné z: <https://vesmir.cz/cz/casopis/archiv-casopisu/2005/cislo-9/annus-mirabilis-1905.html>
- [2] MCCRACKEN, Garry a Peter SCOTT. *Fúze: Energie vesmíru*. 2. vyd. Praha: Academia, 2019. ISBN 978-80-200-2986-7.
- [3] ENTLER, Slavomír, et al. *Budoucnost energetiky: jaderná fúze* [online]. Praha: Středisko společných činností AV ČR, 2019 [cit. 2022-11-05]. ISBN 978-80-200-3007-8. Dostupné z: <https://www.academia.cz/uploads/media/preview/0001/06/21842ad99060b912743ec2dbe1ffa58321268c09.pdf>
- [4] History of fusion. *EUROfusion* [online]. Garching, EUROfusion Consortium Research Institutions, ©2022 [cit. 2022-11-05]. Dostupné z: https://eurofusion.org/fusion/history-of-fusion/?fbclid=IwAR3vNM1fAZrhgdPh1EnocuW0q21AhYx1ApvGau3p0I_YmTKwhAZutB_s1w
- [5] WOLSCHIN, Georg. Thermonuclear Processes in Stars and Stellar Neutrinos. In: CASTELL, Lutz a Otfried ISCHEBECK. *Time, Quantum and Information* [online]. Springer, Berlin, Heidelberg, 2003 [cit. 2022-11-06]. ISBN 978-3-662-10557-3. Dostupné z: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-10557-3_7
- [6] ŘÍPA, Milan. *Historie výzkumu řízené termojaderné fúze* [online]. Středisko společných činností AV ČR, 2019 [cit. 2022-11-06]. Dostupné z: <https://www.academia.cz/uploads/media/preview/0001/04/87ddf160c1a4aadd8a2963858dd94d07e7675f65.pdf>
- [7] NBARBARINO, Matteo. A brief history of nuclear fusion. *Nature physics* [online]. London: Nature Publishing Group, 2020, **16**(9), 890-893 [cit. 2022-05-06]. ISSN 1745-2473. Dostupné z: [doi:10.1038/s41567-020-0940-7](https://doi.org/10.1038/s41567-020-0940-7)
- [8] MLYNÁŘ, Jan. Stručná historie tokamaků. *Aldebaran Bulletin* [online]. 2021, **19**(36) [cit. 2022-11-09]. ISSN: 1214-1674. Dostupné z: https://www.aldebaran.cz/bulletin/2021_36_tok.php
- [9] Timeline. *Princeton Plasma Physics Laboratory* [online]. Princeton, The Trustees of Princeton University, ©2022 [cit. 2022-11-09]. Dostupné z: <https://www.pppl.gov/timeline>
- [10] BEKLEMISHEV, A.D., et al. Magnetic mirrors: history, results and future prospects. *Вопросы атомной науки и техники* [online]. 2012, **6**(82), s. 8-12 [cit. 2022-11-30]. ISSN 1562-6016. Dostupné z: https://vant.kipt.kharkov.ua/ARTICLE/VANT_2012_6/article_2012_6_8.pdf
- [11] PHILLIPS, James. Magnetic fusion. *Los Alamos Science* [online]. Los Alamos Scientific Laboratory, 1983, vol. 7, 64-67. ISSN 0273-7116 [cit. 2022-11-30]. Dostupné z: <https://library.lanl.gov/cgi-bin/getfile?00285870.pdf>

- [12] STOTT, P. Looking back at half a century of fusion research [online]. France, 2004 [cit. 2022-11-26]. Dostupné z: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/36/033/36033126.pdf
- [13] ŘÍPA, Milan. Profesori laserové fúze – Bruecker a Siegel. *Třípól* [online]. Tábor, Simopt [cit. 2022-11-28]. Dostupné z: <https://www.3pol.cz/cz/rubriky/jaderna-fyzika-a-energetika/2428-profesori-laserove-fuze-bruecker-a-siegel>
- [14] 45 Years of Laser Leadership. *Lawrence Livermore National Laboratory* [online]. Livermore, Lawrence Livermore National Security [cit. 2022-11-28]. Dostupné z: <https://lasers.llnl.gov/10-years-of-dedication/laser-leadership>
- [15] COMPASS Upgrade. *Institute of Plasma Physics of the CAS* [online]. Praha, Institute of Plasma Physics of the CAS [cit. 2022-12-01]. Dostupné z: https://www.ipp.cas.cz/vedecka_struktura_ufp/tokamak/compass_u/
- [16] SVOBODA, Luděk. Ústav fyziky plazmatu AV ČR aneb 60 let špičkového výzkumu ve veřejném zájmu. In: *Akademie věd České republiky* [online]. Praha, Středisko společných činností AV ČR, 26. 11. 2019 [cit. 2022-12-01]. Dostupné z: <https://www.avcr.cz/cs/o-nas/aktuality/Ustav-fyziky-plazmatu-AV-CR-aneb-60-let-spickoveho-vyzkumu-ve-verejnem-zajmu/>
- [17] Vazebná energie jader. *cez* [online]. Praha, ČEZ, a. s., © 2023 [cit. 2022-12-16]. Dostupné z: https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/03/vazebnerg_6.html
- [18] HALLIDAY, David, Robert RESNICK, Jearl WALKER a Petr DUB. Fyzika. Svazek 2. 2. přeprac. vyd. Brno: VUTIUM, 2013, 1 sv. (různé stránkování) : obr., barev. fot., grafy. ISBN 978-80-214-4123-1.
- [19] Binding energy curve - common isotopes-CZ. In: *Wikimedia commons* [online]. 22.8.2009 13:57 [cit. 2023-02-15]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Binding_energy_curve_-_common_isotopes-CZ.svg
- [20] Plazmový vesmír | Co je to plazma?. *Aldebaran* [online]. Praha, Aldebaran Group for Astrophysics [cit. 2023-02-05]. Dostupné z: <https://www.aldebaran.cz/astrofyzika/plazma/basics.php>
- [21] KULHÁNEK, Petr. *Úvod do teorie plazmatu* [online]. AGA, 2017 [cit. 2023-02-05]. ISBN 978-80904582-2-2. Dostupné z: <https://www.aldebaran.cz/studium/fpla.pdf>
- [22] TURGEON, Andrew a Elizabeth MORSE. Sun. In: *National Geographic* [online]. Washington, National Geographic Society, ©2022, 06.03.2023 [cit. 2022-12-19]. Dostupné z: <https://education.nationalgeographic.org/resource/sun/>
- [23] MIKULÁŠEK, Zdeněk a Jiří Krtička. *Základy fyziky hvězd* [online]. 2005 [cit. 2022-12-19] Dostupné z: <https://astro.physics.muni.cz/download/documents/skripta/F3080.pdf>

- [24] KIKUCHI, Mitsuru, Karl LACKNER a Minh Quang TRAN. *Fusion Physics* [online]. Vídeň: International Atomic Energy Agency, 2012 [cit. 2023-12-20]. ISBN 978-92-0-130410-0. Dostupné z: <https://www.iaea.org/publications/8879/fusion-physics>
- [25] REINDERS, L. J. *Sun in a Bottle?... Pie in the Sky!: The Wishful Thinking of Nuclear Fusion Energy*. Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2021. ISBN 978-3-030-74733-6
- [26] ELTNER, Slavomír, Jan MLYNÁŘ a Václav DOSTÁL. Základy fúzní energetiky V. – Výroba elektřiny. In: *TZB-info* [online]. Praha, Topinfo s.r.o, ©2023, 19.09.2016 [cit. 23-01-2023]. Dostupné z: <https://energetika.tzb-info.cz/elektroenergetika/14704-zaklady-fuzni-energetiky-v-vyroba-elektriny>
- [27] ATZENI, Stefano a Jürgen MEYER-TER-VEHN. *The Physics of Inertial Fusion: BeamPlasma Interaction, Hydrodynamics, Hot Dense Matter, International Series of Monographs on Physics* [online]. Oxford: Oxford University Press, 2004, s. 13 [cit. 23-01-2023]. ISBN: 9780191714030. Dostupné z: https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=HiaQDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR15&dq=The+Physics+of+Inertial+Fusion:+Beam+Plasma+Interaction,+Hydrodynamics,+&ots=ahTmE11e0P&sig=3bFA_RGMhio3zorBqoBxdsw59o0&redir_esc=y#v=onepage&q=The%20Physics%20of%20Inertial%20Fusion%3A%20Beam%20Plasma%20Interaction%2C%20Hydrodynamics%2C&f=false
- [28] HILL, Christian. [Nuclear fusion cross sections]. *scipython.com* [online]. 30.03.2021 [cit. 2023-01-23]. Dostupné z: <https://scipython.com/blog/nuclear-fusion-cross-sections/>
- [29] ŘÍPA, Milan. *Řízená termojaderná fúze: minulost, současnost a budoucnost*. Praha: Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2020. ISBN 978-80-01-06751-2
- [30] Lawrence Livermore National Laboratory achieves fusion ignition, *Lawrence Livermore National Laboratory* [online]. Livermore, Lawrence Livermore National Security [cit. 2023-02-05]. Dostupné z: <https://www.llnl.gov/news/national-ignition-facility-achieves-fusion-ignition>
- [31] ELTNER, Slavomír. Lawsonovo kritérium – kritérium fúzní energetiky. *Československý časopis pro fyziku* [online]. 2014, **64**(3) [cit. 2023-02-07]. ISSN 1804-8536. Dostupné z: <https://www.digitalniknihovna.cz/knav/view/uuid:b1435ade-4d6e-477c-b943-5f505ae0663a?article=uuid:5f00f24f-32e0-4d71-91ca-93b587e890df>
- [32] ELTNER, Slavomír, Jan MLYNÁŘ a Václav DOSTÁL. Základy fúzní energetiky II. – Základní fyzika fúzních reaktorů. In: *TZB-info* [online]. Praha, Topinfo s.r.o, ©2023, 08.08.2016 [cit. 2023-02-07]. Dostupné z: <https://energetika.tzb-info.cz/elektroenergetika/14538-zaklady-fuzni-energetiky-ii-zakladni-fyzika-fuznich-reaktoru>
- [33] ESHAM, Benjamin D. Inertial confinement fusion. In: Wikimedia commons [online]. 5.7.2009 [cit. 2023-02-14]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Inertial_confinement_fusion.svg

- [34] ŘEZÁČ, Karel. Zapálení termojaderné reakce téměř dosaženo. *Aldebaran Bulletin* [online]. 2022, 20(4) [cit. 2023-17-02]. ISSN: 1214-1674. Dostupné z: https://www.aldebaran.cz/bulletin/2022_04_nif.php
- [35] NIF Hohlräum. In: *Lawrence Livermore National Laboratory* [online]. Livermor: Lawrence Livermore National Laboratory [cit. 2023-2-17]. Dostupné z: <https://lasers.llnl.gov/content/assets/images/media/photo-gallery/large/nif-1209-18059.jpg>
- [36] Fusion Device Information System – FusDIS. *International Atomic Energy Agency* [online]. Vídeň, IAEA [cit. 2023-02-20]. Dostupné z: <https://nucleus.iaea.org/sites/fusionportal/Pages/FusDIS.aspx>
- [37] ENTLER, Slavomír, et al. *Výzkum termojaderného plazmatu na tokamaku COMPASS* [online]. Praha: Středisko společných činností AV ČR, 2019 [cit. 2023-02-23]. ISBN 978-80-200-3109-9. Dostupné z: <https://www.ipp.cas.cz/miranda2/export/sitesavcr/ufp/ufp-v-mediich/Publications/Vyzkum-termojaderneho-plazmatu-na-tokamaku-COMPASS.pdf>
- [38] ELTNER, Slavomír, Jan MLYNÁŘ a Václav DOSTÁL *Základy fúzní energetiky IV. – Jaderné komponenty*. In: TZB-info [online]. Praha, Topinfo s.r.o, ©2023, 12.09.2016 [cit. 24-02-2023]. Dostupné z: <https://energetika.tzb-info.cz/elektroenergetika/14669-zaklady-fuzni-energetiky-iv-jaderne-komponenty>
- [39] ITER Design Office. THE LARGEST TOKAMAK IN THE WORLD. *ITER* [online] 16.01.2013 [cit. 24-02-2023]. Dostupné z: <https://www.iter.org/doc/all/content/com/gallery/media/7%20-%20technical/in-cryostat%20overview%20130116.jpg>
- [40] Machine. *ITER* [online]. St. Paul-lez-Durance, ITER Organization, © 2023 [cit. 2023-02-24]. Dostupné z: <https://www.iter.org/mach>
- [41] Vacuum vessel. *ITER* [online]. St. Paul-lez-Durance, ITER Organization, © 2023 [cit. 2023-02-24]. Dostupné z: <https://www.iter.org/mach/vacuumvessel>
- [42] Blanket. *ITER* [online]. St. Paul-lez-Durance, ITER Organization, © 2023 [cit. 2023-02-24]. Dostupné z: <https://www.iter.org/mach/blanket>
- [43] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *World Survey of Fusion Devices 2022* [online]. Vienna: IAEA, 2022 [cit. 2023-02-28]. ISBN 978-92-0-143122-6. Dostupné z: <https://www.iaea.org/publications/15253/world-survey-of-fusion-devices-2022>
- [44] JET. *EUROfusion* [online]. Garching, EUROfusion Consortium Research Institutions, ©2023 [cit. 2023-03-02]. Dostupné z: <https://euro-fusion.org/devices/jet/>
- [45] WHAT IS ITER?. *ITER* [online]. St. Paul-lez-Durance, ITER Organization, © 2023 [cit. 2023-03-03]. Dostupné z: <https://www.iter.org/proj/inafewlines>

- [46] ITER Members. *ITER* [online]. St. Paul-lez-Durance, ITER Organization, © 2023 [cit. 2023-03-03]. Dostupné z: <https://www.iter.org/proj/Countries>
- [47] External Heating Systems. *ITER* [online]. St. Paul-lez-Durance, ITER Organization, © 2023 [cit. 2023-13-03]. Dostupné z: <https://www.iter.org/mach/heating>
- [48] Power Supply. *ITER* [online]. St. Paul-lez-Durance, ITER Organization, © 2023 [cit. 2023-10-03]. Dostupné z: <https://www.iter.org/mach/PowerSupply>
- [49] HOURTOULE, Joel, et al. *ITER electrical distribution system*. In: 2013 IEEE 25th Symposium on Fusion Engineering (SOFE). IEEE, 2013. p. 1-5. Dostupné z: doi: 10.1109/SOFE.2013.6635314
- [50] Magnets. *ITER* [online]. St. Paul-lez-Durance, ITER Organization, © 2023 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://www.iter.org/mach/magnets>
- [51] TOROIDAL FIELD COILS. In: *ITER* [online]. St. Paul-lez-Durance, ITER Organization, © 2023, 15.04.2015 [cit. 2023-03-08]. Dostupné z: https://www.iter.org/doc/all/content/com/gallery/media/7%20-%20technical/tf_overview_no_plasma.jpg
- [52] POLOIDAL FIELD COILS. In: *ITER* [online]. St. Paul-lez-Durance, ITER Organization, © 2023, 15.02.2016 [cit. 2023-03-08]. Dostupné z: https://www.iter.org/doc/all/content/com/gallery/media/7%20-%20technical/pf_overview.jpg
- [53] Divertor. *ITER* [online]. St. Paul-lez-Durance, ITER Organization, © 2023 [cit. 2023-03-08]. Dostupné z: <https://www.iter.org/mach/divertor>
- [54] FAUVE, E, E MONNERET, T VOIGT, G VINCENT, A FORGEAS a M SIMON. *ITER Cryoplant Infrastructures*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering [online]. Bristol: IOP Publishing, 2017, **171**(1), 12008 [cit. 2023-03-14]. ISSN 1757-8981. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/171/1/012008
- [55] Cryoplant. *ITER* [online]. St. Paul-lez-Durance, ITER Organization, © 2023 [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: <https://www.iter.org/construction/cryoplant>
- [56] Cooling water. *ITER* [online]. St. Paul-lez-Durance, ITER Organization, © 2023 [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: <https://www.iter.org/mach/CoolingWater>
- [57] K. D. Final design achieved. In: *ITER* [online]. St. Paul-lez-Durance, ITER Organization, © 2023, 22.01.2018 [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: <https://www.iter.org/newsline/-/2897>
- [58] Wendelstein 7-X. *Max Planck institute for Plasma Physics* [online]. Garching, Max-PlanckGesellschaft, ©2023 [cit. 2023-03-25]. Dostupné z: <https://www.ipp.mpg.de/w7x>
- [59] Milestones. *Max Planck institute for Plasma Physics* [online]. Garching, Max-PlanckGesellschaft, ©2023 [cit. 2023-03-25]. Dostupné z: <https://www.ipp.mpg.de/17019/meilensteine>

- [60] Wendelstein 7-X reaches milestone: Power plasma with gigajoule energy turnover generated for eight minutes. *Max Planck institute for Plasma Physics* [online]. Garching, Max-PlanckGesellschaft, ©2023 [cit-2023-03-28]. Dostupné z: https://www.ipp.mpg.de/5322229/01_23
- [61] Technological planning. *Max Planck institute for Plasma Physics* [online]. Garching, Max-PlanckGesellschaft, ©2023 [cit-2023-03-25]. Dostupné z: <https://www.ipp.mpg.de/2815279/technologie>
- [62] KLINGER, T., et al. Overview of first Wendelstein 7-X high-performance operation. *Nuclear Fusion* [online]. 2019, vol. 59, no. 11 [cit. 2023-03-23]. ISSN: 1741-4326 Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1741-4326/ab03a7/pdf>
- [63] Introduction: the Wendelstein 7-X stellarator. *Max Planck institute for Plasma Physics* [online]. Garching, Max-PlanckGesellschaft, ©2023 [cit-2023-03-25]. Dostupné z: <https://www.ipp.mpg.de/16931/einfuehrung>
- [64] MPI for Plasma Physics. Plasma vessel and superconducting stellarator magnet coils as well as planar magnet coils of the Wendelstein 7-X fusion device. *Max Planck institute for Plasma Physics* [online]. Garching, Max-PlanckGesellschaft, ©2023 [cit-2023-03-25]. Dostupné z: https://www.ipp.mpg.de/4000517/3_6_w7x1452183608.png?t=eyJkb19ub3RfdHJhb nNmb3JtIjlp0cnVILCJvYmpfaWQiOjQwMDA1MTd9-- dd31f2432e90d41758326f23ffffe3316a418986
- [65] How NIF Works. *Lawrence Livermore National Laboratory* [online]. Livermore, Lawrence Livermore National Security [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: <https://lasers.llnl.gov/about/how-nif-works>
- [66] DESCRIPTION DE L'INSTALLATION LMJ, *Laser Mégajoule* [online]. Bruyères-le-Châtel, CEA DAM, © 2022 [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: <https://www-lmj.cea.fr/lmj-description.html>
- [67] OMEGA Laser System. *Laboratory for laser energetics* [online]. Rochester, Laboratory for Laser Energetics, © 2023 [cit-2023-03-26] Dostupné z: <https://www.lle.rochester.edu/index.php/omega-laser-facility-2/omega-laser-system/>
- [68] ACREE, R., M. AGGLETON, D. A. ALESSI, et al. Lawson Criterion for Ignition Exceeded in an Inertial Fusion Experiment. *Physical review letters* [online]. United States: American Physical Society (APS), 2022, **129**(7), 075001-075001 [cit. 2023-04-01]. ISSN 0031-9007. Dostupné z: doi:10.1103/PhysRevLett.129.075001
- [69] ENTLER, Slavomír. Jaderná fúze, budoucnost energetiky v roce 2022. In: *YouTube* [online]. 29.11.2022 [cit. 2023-04-04]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=WuSoOBaiJlc>. Zveřejněno na kanálu FEL ZČU
- [70] Pařížská dohoda. *Ministerstvo životního prostředí* [online]. Praha, Ministerstvo životního prostředí, © 2008–2023 [cit. 2023-04-10]. Dostupné z: https://www.mzp.cz/cz/parizska_dohoda

- [71] Status of treaties. *United Nations: treaty Collections* [online]. OSN [2023-04-10]. Dostupné z: https://treaties.un.org/pages/ViewDetails.aspx?src=TREATY&mtdsg_no=XXVII-7-d&chapter=27&clang=_en
- [72] Electricity production by source: World. In: *Our World Data* [online]. [cit. 2023-04-10]. Dostupné z: <https://ourworldindata.org/grapher/electricity-prod-source-stacked>
- [73] ENTLER, Slavomír. Jaderná fúze – budoucnost energetiky. *Energetika* [online]. 2015, č. 3, s. 136-142 [cit. 2023-04-10]. ISSN 0375-8842. Dostupné z: <https://www.ipp.cas.cz/miranda2/export/sitesavcr/ufp/ufp-v-mediich/Publications/Jaderna-fuze-budoucnost-energetiky.pdf?fbclid=IwAR2GFkxuCkp8X4-bLEiy2UJMRPITILnAdTxhkRsPVUbQq9htEXbVQZZgDPM>
- [74] BARBARINO, Matteo. Charting the International Roadmap to a Demonstration Fusion Power Plant. In: *International Atomic Energy Agency* [online]. Vídeň, IAEA, © 1998–2023, 11.05.2018 [cit. 2023-04-12]. Dostupné z: <https://www.iaea.org/newscenter/news/charting-the-international-roadmap-to-a-demonstration-fusion-power-plant>
- [75] CHATZIS, Irena a Matteo BARBARINO. Demonstration Fusion Plants: A stepping stone to large-scale, commercial electricity production. In: *International Atomic Energy Agency* [online]. Vídeň, IAEA, © 1998–2023 [cit. 2023-04-12]. Dostupné z: <https://www.iaea.org/bulletin/demonstration-fusion-plants>
- [76] EUROfusion. *European Research Roadmap to the Realisation of Fusion Energy: long version* [online]. Garching / Munich: EUROfusion, 2018 [cit. 2023-04-18]. ISBN 978-3-00-061152-0. Dostupné z: https://euro-fusion.org/wp-content/uploads/2022/10/2018_Research_roadmap_long_version_01.pdf
- [77] VESELY, L., V. DOSTAL a S. ENTLER. Study of the cooling systems with S-CO₂ for the DEMO fusion power reactor. *Fusion engineering and design* [online]. LAUSANNE: Elsevier B.V, 2017, **124**, 244-247 [cit. 2023-04-19]. ISSN 0920-3796. Dostupné z: doi:10.1016/j.fusengdes.2017.05.029
- [78] MAISONNIER, D, D CAMPBELL, I COOK, et al. Power plant conceptual studies in Europe. *Nuclear fusion* [online]. VIENNA: IOP Publishing, 2007, **47**(11), 1524-1532 [cit. 2023-04-21]. ISSN 0029-5515. Dostupné z: doi:10.1088/0029-5515/47/11/014
- [79] BOCCACCINI, L.V., G. AIELLO, J. AUBERT, et al. Objectives and status of EUROfusion DEMO blanket studies. *Fusion engineering and design* [online]. LAUSANNE: Elsevier B.V, 2016, **109-111**, 1199-1206 [cit. 2023-04-22]. ISSN 0920-3796. Dostupné z: doi:10.1016/j.fusengdes.2015.12.054
- [80] CROFTS, Oliver, Antony LOVING, Marc TORRANCE, et al. EU DEMO Remote Maintenance System development during the Pre-Concept Design Phase. *Fusion engineering and design* [online]. Amsterdam: Elsevier B.V, 2022, **179**, 113121 [cit. 2023-04-25]. ISSN 0920-3796. Dostupné z: doi:10.1016/j.fusengdes.2022.113121

- [81] KRAMER, David. Livermore ends LIFE. *Physics today* [online]. MELVILLE: Amer Inst Physics, 2014, **67**(4), 26-27 [cit. 2023-04-25]. ISSN 0031-9228. Dostupné z: doi:10.1063/PT.3.2344
- [82] Bringing the power source of the stars down to Earth could give us low-carbon electricity for millennia to come. Culham Centre for Fusion Energy [online]. Abingdon: UKAEA, [cit. 2023-04-28]. Dostupné z: <https://ccfe.ukaea.uk/fusion-energy/fusion-in-brief/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Veličina	Jednotka
A	Nukleonové číslo	-
a	Vedlejší poloměr plazmatu	m
B	Magnetická indukce	T
B_0	Velikost toroidálního magnetického pole	T
c	Rychlost světla	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
E	Energie	J
E_0	Klidová energie	eV
E_V	Vazební energie	eV
E_k	Kinetická energie	eV
F_B	Lorentzova síla	N
I_p	Velikost proudu plazmatem	A
k	Boltzmanova konstanta	$\text{J}\cdot\text{K}^{-1}$
M_j	Hmotnost jádra	kg
m	Hmotnost	kg
m_n	Hmotnost nukleonu	kg
n	Hustota jader	m^{-3}
P_H	Výkon externího ohřevu plazmatu	W
P_F	Fúzní výkon	W
Q	Faktor zesílení	-
q	Náboj částice	C
R_0	Hlavní poloměr plazmatu	m
T	Teplota	K, eV
v	Rychlost	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
λ	Vlnová délka	m
ε_V	Vazební energie na jeden nukleon	eV
τ_E	Doba udržení plazmatu	s

Zkratka	Význam
<i>CASTOR</i>	Czech Academy of Sciences TORus
<i>CCFE</i>	Culham Centre for Fusion Energy
<i>CFETR</i>	China Fusion Engineering Test Reactor
<i>D</i>	Deuterium
<i>DEMO</i>	Demonstration Fusion Power Plant
<i>ELM</i>	Edge Localized Mode
<i>HRS</i>	Heat Rejection System
<i>ICF</i>	Inertial Confinement Fusion
<i>ITER</i>	International Thermonuclear Experimental Reactor
<i>JE</i>	Jaderná elektrárna
<i>JET</i>	Joint European Torus
<i>LIFE</i>	Laser Inertial Fusion Energy
<i>LLNL</i>	Lawrence Livermore National Laboratory
<i>LMJ</i>	Laser Mégajoule
<i>MCF</i>	Magnetic Confinement Fusion
<i>NIF</i>	National Ignition Facility
<i>T</i>	Tritium
<i>TCWS</i>	Tokamak Cooling Water System
<i>CHN</i>	Čína
<i>CZE</i>	Česká republika
<i>DEU</i>	Německo
<i>ESP</i>	Španělsko
<i>GBR</i>	Velká Británie
<i>ITA</i>	Itálie
<i>JPN</i>	Japonsko
<i>KOR</i>	Korejská republika
<i>USA</i>	Spojené státy
<i>UKR</i>	Ukrajina

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1 Základní rozdělení termonukleární fúze

Obr. 2.2 Závislost vazební energie na jeden nukleon na nukleonovém čísle. Převzato z: [19]

Obr. 2.3 Graf závislosti účinného průřezu na kinetické energii interagujících částic pro jednotlivé fúzní reakce. Převzato z: [28]

Obr. 2.4 Ilustrační znázornění jednotlivých směrů a poloměrů

Obr. 2.5 Fáze inerciálního udržení (1. ohřev, 2. imploze, 3. zapálení, 4. fúze). Převzato z:[33]

Obr. 2.6 Palivový terčík uvnitř hohlraumu při nepřímo zapalované fúzi. Převzato z: [35]

Obr. 3.1 Řez tokamakem ITER. Převzato z: [39]

Obr. 3.2 Toroidální cívky ITER. Převzato z: [51]

Obr. 3.3 Vnější poloidální cívky ITER. Převzato z: [52]

Obr. 4.1 Magnetický systém Wendelstein 7-X. Převzato: [64]

Obr. 6.1 Celosvětová produkce elektrické energie z jednotlivých zdrojů. Převzato: [72]

SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1 Přehled hlavních reakcí probíhajících ve hvězdách [23]

Tab. 2.2 Přehled vhodných fúzních reakcí [24]

Tab. 2.3 Reakce produkující tritium [26]

Tab. 2.4 Hodnoty trojného součinu pro jednotlivé stavy při optimální teplotě pro D-T reakci odpovídající cca. $160 \cdot 10^6$ K [31]

Tab. 3.1 Přehled největších momentálně provozovaných tokamaků [43]

Tab. 3.2 Přehled tokamaků ve výstavbě [43]

Tab. 4.1 Přehled největších momentálně provozovaných stelarátorů a heliotronů [43]

Tab. 5.1 Přehled vybraných momentálně provozovaných zařízení na inerciální fúzi

Tab. 5.2 Dosažené parametry na NIF experiment N210808 [68]

Tab. 6.1 Základní parametry reaktorů koncepčních návrhů DEMO [36]

Tab. 6.2 Příklad předpokládaných parametrů jednotlivých komponent fúzního reaktoru [77]