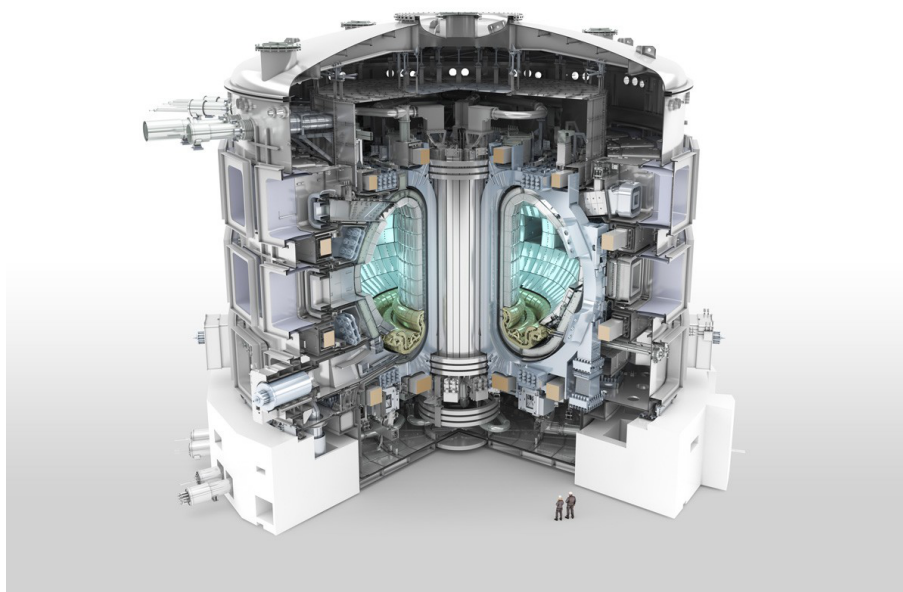


Kapitola 1

Tokamak

1.1 Tokamak

Tokamak je zařízení schopné udržet vysokoteplotní plazma. To je zajištěno pomocí levitace vysokoteplotního plazmatu zprostředkované vhodnou konfigurací elektromagnetických polí (*Nebude stačit magnetické pole?*). Tedy tokamak řadíme mezi zařízení s **magnetickým udržením** plazmatu. V současné době se jedná o nejnadějnější způsob realizace termojaderné fúze jako budoucí elektrárny v pozemských podmínkách díky dosavadním výsledkům.



Obrázek 1.1: Největší **+plánovaný, ne?+** tokamak současnosti jménem ITER, který je zároveň největším mezinárodním projektem v oblasti termojaderné fúze vůbec. Převzato z [iter_tokamak].

1.1.1 Původ

Toto zařízení je původem z Ruska. Název **Tokamak** je z ruská zkratka **TO**roidalnaja **KA**mera i **MA**gnitnyje **K**atuški, což v překladu znamená **toroidální komora**

s **magnetickými cívkami** [tokamak_puvod]. Tento koncept se poprvé objevil v 50. letech minulého století v Kurčatově ústavu v Sovětském svazu s jehož myšlenkou přišli poprvé Igor Jevgeněvič Tamm a Andrej Sacharov. První tokamak byl postaven v roce 1951 jako experimentální zařízení potvrzující Kruskal-Shafranovovy podmínky stability.

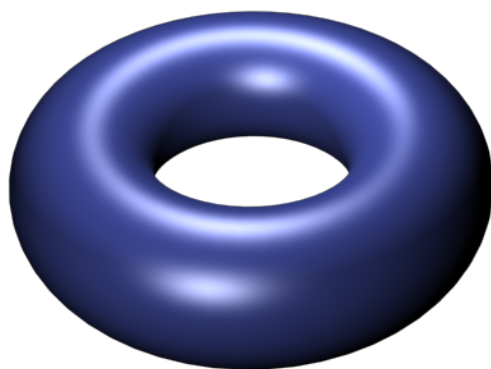
1.1.2 Současnost

Termojaderná fúze jako nadějný budoucí zdroj čisté energie v čele s tokamaky je předmětem intenzivního výzkumu. V současné době se v jižní Francii staví největší tokamak na světě s názvem **ITER** vyobrazený na 1.1. Jedná se o zkratku **I**nternational **T**hermonuclear **E**xperimental **R**eactor, ale latinsky to znamená **CESTA**. Cílem tohoto mezinárodního projektu je technologická demonstrace schopnosti vytvořit a udržet termojadernou fúzi s kladným energetickým ziskem. Podle dostupných informací by první spuštění mělo proběhnout v průběhu roku 2025, ale vzhledem k současnému konfliktu mezi Ukrajinou a Ruskem bude dokončení tohoto projektu i z tohoto důvodu pravděpodobně opožděno (*Honzo, to je naivní vysvětlení zpoždění tohoto projektu. Dohledejte a dopište, nebo to vypustte. Rusko napadlo Ukrajinu v roce 2022!*).

1.1.3 !Princip! fungování

Komora

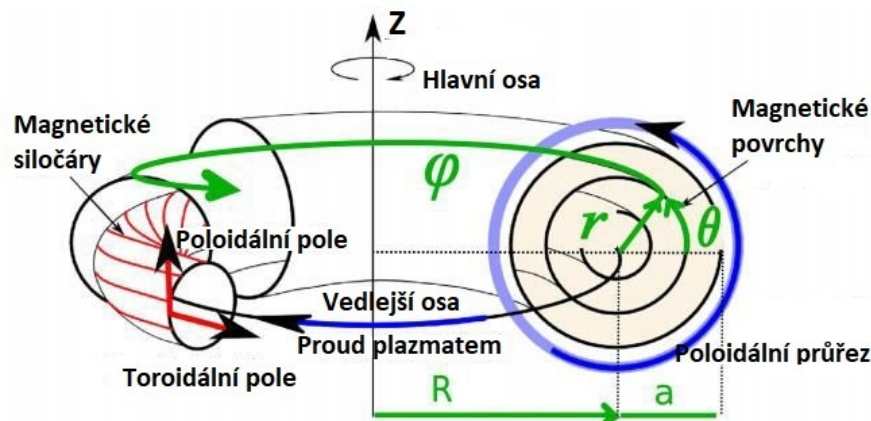
Každý tokamak je charakterizován specifickým tvarem komory, který je nejčastěji (*Tady si tedy podle mne protiřečíte s tím, co říkáte vzápětí o D-shape*) ve tvaru **Toru**, též řečeno **Anuloidu** vyobrazeno na 1.2.



Obrázek 1.2: Torus neboli Anuloid jako geometrický útvar. Převzato z [anuloid].

Jedná se o tvar, který vznikne rotací kružnice reprezentující průřez komorou okolo osy, která leží ve stejné rovině a zároveň nemá žádné společné body. Tuto vzdálenost v případě tokamaků označujeme jako **velký poloměr** R a v případě kružnicového průřezu je poloměr této rotované kružnice označován jako **malý poloměr** r (*Co je pak a??*), které lze vidět na příloženém obrázku 1.3. Mezi tokamaky disponující komorou ve tvaru toru patří například český tokamak GOLEM.

(*Honzo, kam v této úvaze řadíte tokamaky s D tvarem komory a s divertorem?*)



Obrázek 1.3: Zavedení souřadnic (*vyjmenujte je*) pro radiální profil **OVĚŘIT** tokamaků a ukázkou příslušných fyzikálních veličin v plazmatu. Obrázek převzat a upraven z [tokamak_coordinates].

Posledních pár let (*To bude víc, ověřte, kdy to bylo poprvé*) se používají spíše modernější průřezy komorou označované jako D Shape, tj. průřez komorou ve tvaru D, kterým **+bude+** disponuje i samotný budoucí tokamak ITER, který je na obrázku 1.1 kde tento tvar lze vidět. V případě všech možných konfigurací má komora primární funkci jako vakuová nádoba, která navíc modeluje svým tvarem vzniklou elektromagnetickou konfiguraci plazmatu a navíc musí odolat vysokým teplotám.

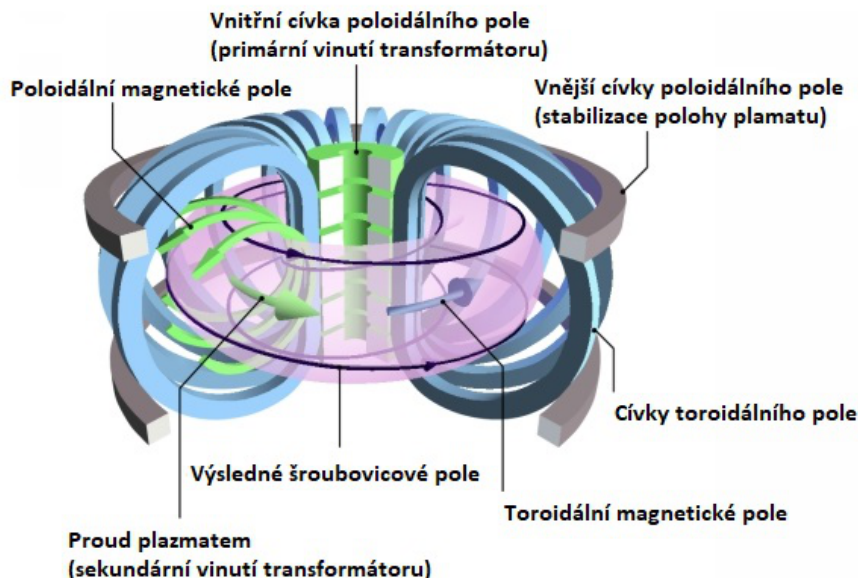
Toroidální a Poloidální magnetické pole

Jak už víme, tak k zažehnutí termojaderné fúze je zapotřebí dosažení nemalé teploty pro překonání Coulombovské bariéry. Proto je zapotřebí v případě magnetického udržení ~~horkou plazmu~~/***horké plazmu*** nechat levitovat a tím stabilizovat podmínky v reaktoru resp. ve vakuové komoře **+,+** aby nedošlo k jejímu poškození. Tohoto efektu docílujeme pomocí složení **Toroidálního** a **Poloidálního** magnetického pole.

Poloidální magnetické pole je generováno pomocí cívek, které obepínají samotnou komoru v tzv. toroidálním směru jak lze vidět na přiloženém schématu **??**. **Toroidální** (*je to přesně naopak!*) magnetické pole je generováno prostřednictvím proudu plazmatem **+,+** o kterém si více řekneme v další sekci. Při složení těchto dvou magnetických polí vznikne **šroubovicové magnetické pole**. Toto pole je také někdy označováno jako **helikální** a díky toroidální geometrii a faktu, že částice plazmatu obíhají kolem magnetických siločárek nedochází k úniku částic jako například ve válcové konfiguraci (*To neříkáte dobře*) **OVĚŘIT**. Vzniklá elektromagnetická konfigurace je řešením pohybové rovnice dané Lorentzovou silou (*To není dobře zformulováno*), která je generována v důsledku působení vnějšími poli a je dána vztahem:

$$\vec{F}_L = \vec{F}_e + \vec{F}_m = q \cdot (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}), \quad (1.1)$$

kde \vec{F}_e je elektrická síla, \vec{F}_m je magnetická síla, q je náboj, \vec{E} je intenzita elektrického pole a \vec{B} je magnetická indukce. Vzniklé helikální pole je schopno zábránit tzv. ∇B driftu v důsledku zakřivení siločárek, které vede k oddělení jednotlivých nábojů a stojí za vznikem elektrostatického pole. Vzniklé elektrostatické pole kvůli



Obrázek 1.4: Schéma tokamaku reprezentující základní komponenty potřebné pro jeho provoz. Převzato a upraveno z [tokamak_wiki].

$\vec{E} \times \vec{B}$ driftu vedlo k difundování plazmatu ven z komory. Díky helikální geometrii, které stáčí siločivky magnetického pole, dochází ke zkratování parazitického elektrostatického pole a zabraňuje tak úniku částic ven z komory, resp. na stěnu komory.

Komentář: Zde je úplný zmatek, tohle musíte předělat. Někde to nastudujte a udělejte správně a každou zmiňovanou veličinu označte jasným symbolem. Nemůžete označit vzniklou sílu jako elektromagnetickou konfiguraci pole.

Plazma v důsledku různých elektromagnetických driftů má tendence jako celek se různě pohybovat v komoře tokamaku. Abychom k tomuto vychýlení předešli a zabránili tak potenciálnímu dotyku s komorou, tak je zapotřebí plazma v čase vychylovat proti směru tohoto působení. K tomu slouží vnější poloidální cívky umístěné okolo komory v poloidálním směru tvořící tzv. kvadrupol viz (*Dávejte před všechny reference obrázků 'obrázek'*) ??, který je schopen díky jisté orientaci tekoucího proudu vodičem vytvořit homogenní magnetické pole v libovolném směru (*Ani náhodou, pouze ve vertikálním a horizontálním ... jedině pak jako nějakou složeninu ...*) tak, aby výsledná Lorentzova síla tlačila plazma buď v horizontálním směru (vlevo na ??), nebo vertikálním směru (vpravo na ??).

Tento podpůrný způsob stabilizace je velmi efektivní, ale zároveň velmi náročný na provedení. Zde je zapotřebí měřit aktuální hodnoty plazmatu v řádech pikosekund (*max. desítky, stovky μs*), vyhodnocovat změny a vytvořit příslušnou odpověď prostřednictvím zpětnovazebního řízení. (*A my to stejně děláme na shot to shot bázi*)
Komentář: Nepatří stabilizace polohy plazmatu logicky spíše někde více dozadu? Ještě jsme ani neporazili neutrální plyn



Obrázek 1.5: Schéma tekoucího proudu poloidálními cívkami pro vychýlení plazmatu příslušným směrem. Převzato z [Jindra_DP].

Ohřev plazmatu a vznik proudu plazmatem

Jedním z sbposledních nezbytných počátečních kroků *++* aby mohla proběhnout termojaderná fúze v pozemských podmínkách je ionizované plazma dostatečně zahřát. Nejefektivnějším (*Ne, ne, nesmysl*) a také nezbytným prvkem tokamaku je využití transformátoru jednak jako zdroj ohmického ohřevu, tak i prvek nezbytný (*Jazyková neobratnost*) pro generování poloidálního pole potřebného pro dosažení šroubovicového pole (*Ne*) .

Díky vodivosti plazmatu (*Nelíbí se mi to*) jsme schopni pomocí primárních cívek umístěných na samotném transformátoru indukovat napětí v plazmatu U_{loop} a vede (*Jazyková neobratnost*) ke vzniku indukovaného proudu plazmatem I_{pl} , kde plazma má roli sekundárního vinutí jako jeden závit na krátko, který je ve zkratu (*2x to-těž*) . Díky vysokému transformačnímu poměru je ve vodivém plazmatu dosahováno proudů v řádech až stovek kA . Díky takto vysokým proudům dochází k enormnímu zahřátí plazmatu v důsledku působení ohmického ohřevu, jehož příkon P_{OH} je dán vztahem (*A co až se transformátor nasytí? To může být velmi rychle*) :

$$P_{OH} = U_{loop} \cdot I_{pl}. \quad (1.2)$$

Jak již bylo řečeno, indukovaný proud plazmatem má navíc sekundární roli nezbytnou pro stabilizaci plazmatu, protože v důsledku Ampérova zákona vzniká okolo tekoucího proudu plazmatem poloidální magnetické pole, které je potřebné pro vznik výsledného šroubovicového pole. (*Tady je to dobře.*)

Ohmický ohřev plazmatu má však svá omezení mezi které patří například omezená schopnost indukovat proud plazmatem prostřednictvím magnetického indukčního toku tekoucího kovovým jádrem. Tato schopnost je limitována tzv. nasycením transformátorového jádra, kdy dojde k dosažení maximální hodnoty magnetického indukčního toku a jádro není nadále schopno spolehlivě generovat indukovaný proud v sekundárním vinutí (plazmatu). Dalším nezanedbatelným faktorem je klesání odporu plazmatu během výboje a ohmický ohřev se tak stává neefektivním. Také pro indukování proudu prostřednictvím transformátorového jádra je zapotřebí dostatečná změna proudu, která může mít za následek postupné zahřívání komponent (*Kde jste to vzal?*) , jako jsou například přírodní kabely, které v tomto důsledku mění své fyzikální vlastnosti a dochází k jejich degradaci (*Kde jste to vzal?*).

Z toho důvodu budoucí tokamaky budou pracovat v tzv. pulzním režimu (*Nesmysl*)

. Proto bude zapotřebí ještě doprovodných zdrojů ohřevu jako je například pomocí neutrálních částic, nebo pomocí mikrovlnných zdrojů, které by měli (*hrubka*) zachovat kontinuální provoz elektrárny.

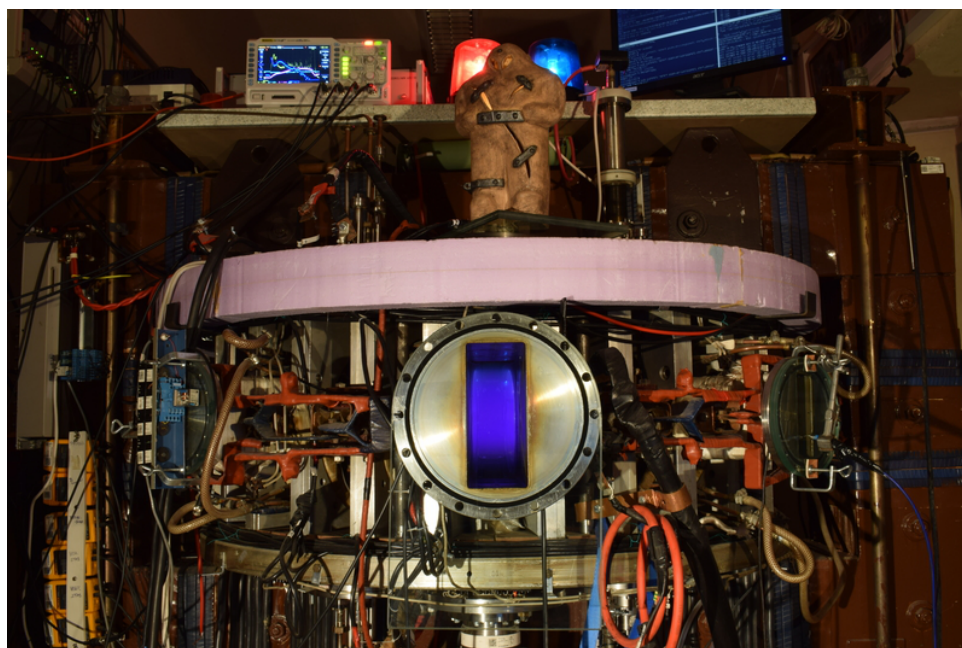
Vzniklé poloidální pole obvykle bývá výrazně menší než toroidální což má za následek malou helicitu (šroubovitost pole). To znamená, že během jednoho oběhu pomyslného bodu po silokřivce v poloidálním směru dojde k výrazně méně oběhům v toroidálním směru, což může vést hned k řadě nestabilit v plazmatu. Tato vlastnost je reprezentována pomocí tzv. bezpečnostního faktoru q , který je dán vztahem:

$$q = \frac{r \cdot B_t}{R \cdot B_p}, \quad (1.3)$$

kde r je malý poloměr (*Souřadnice, nebo poloměr plazmatu? Kdesi jste uváděl a*), R je velký poloměr, B_t je magnetická indukce v toroidálním směru a B_p je magnetická indukce v poloidálním směru. Obecně platí, že při vyšších hodnotách q vedou k vyšší stabilitě systému (*Jazyková neobratnost*). Nejnižších hodnot q je dosahováno na okrajích plazmatu, kde jsou také nejvíce zastoupeny různé nestability v plazmatu. Výše uvedený vzorec funguje pro tokamaky s ~~radiálním~~/**kruhovým** profilem komory (jako je například tokamak GOLEM), není tedy příliš použitelný pro modernější typy využívající například profil komory ve tvaru D, kde je zapotřebí tento vzorec příslušně modifikovat.

1.2 Tokamak GOLEM

Tokamak GOLEM je nejstarší (*Ne, není nejstarší*) a zároveň tedy nejdéle fungující tokamak na světě. Jednalo se o první zařízení určené pro základní výzkum mikrovlnného ohřevu pod označením **TM-1** nebo **TM-1-MH**, které se zařazovalo do kategorie malých tokamaků. Pod tímto označením se zařízení do května 1976 nacházelo v Ústavu atomové energie I. V. Kurčatova v Moskvě a poté bylo přesunuto do Ústavu fyziky plazmatu ČSAV, kde dostalo nové jméno **CASTOR**. V roce 2006 bylo zařízení nahrazeno větším a modernějším tokamakem jménem **COMPASS** a **CASTOR** byl převezen na Fakultu jadernou a fyzikálně inženýrskou.

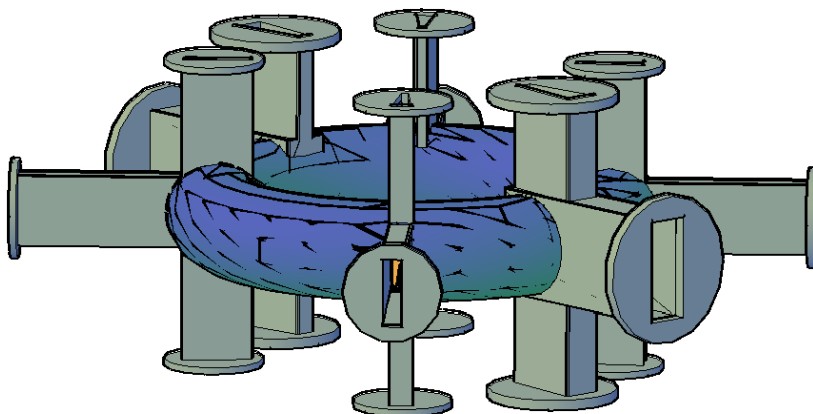


Obrázek 1.6: Fotografie tokamaku Golem. Převzato z [tokamak_golem_foto]

Pod označením **GOLEM** vykonává novou misi v oblasti zejména vzdělávání studentů v oboru termojaderné fúze po celém světě díky jeho důmyslnému^{+,+} na dálku řízenému^{+,+} systému jménem **Dirigent**, pomocí kterého ovládat lze provoz tokamaku odkudkoli prostřednictvím internetu.

1.2.1 Komora

Vakuová komora tokamaku GOLEM je kruhového průřezu a je vyrobena z 0,2 mm tlustého nerezového plechu. V komoře se nachází šest diagnostických sekcí ve tvaru T a každá sekce disponuje třemi porty, které lze vidět na obrázku ?? . Okolo samotné komory je navíc ještě 10 mm silný měděný plášť. Plášť se skládá z dvou vertikálních a dvou horizontálních částí a každá z nich má svoji specifickou funkci. Vertikální část pláště zabraňuje tvorbě závitu nakrátko a horizontální část umožňuje pronikání magnetického pole dovnitř komory (*Divné, odkud to pochází?*) .



Obrázek 1.7: Model vakuové komory neboli lineru tokamaku Golem (*liner i s porty?*) .

1.2.2 Toroidální cívky

Toroidální magnetické pole na tokamaku GOLEM je zprostředkováno pomocí 28 cívek, které obepínají vakuovou komoru. Cívky jsou schopny dosáhnout magnetických polí v okolo $B_t \approx 0,3T$. (*podle mě v amplitudě až 0.5 T*) V současné době jsou napájeny pomocí kondenzátorové baterie, což má za následek nekontrolované uvolnění energie do těchto cívek.

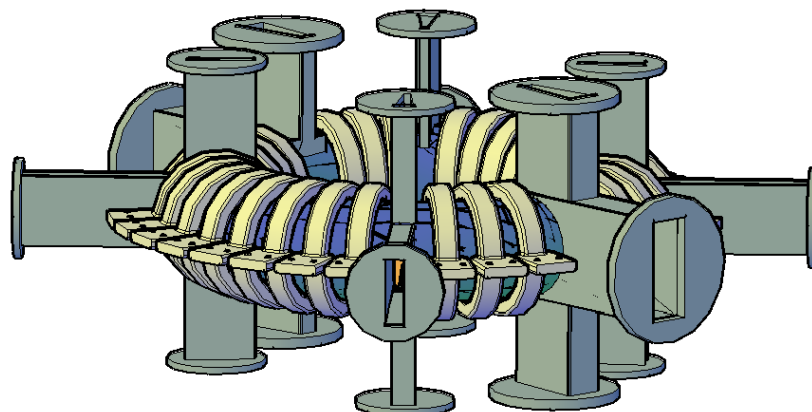
Cívky jsou navzájem propojeny měděnými pláty pro společné napájení všech cívek a zakryté v hliníkových boxech jako pasivní chladič (*Odkud to pochází?*) , ale také kvůli bezpečnosti (*Jak?*) . Vše je zobrazeno na obrázku ??.

1.2.3 Ionizace

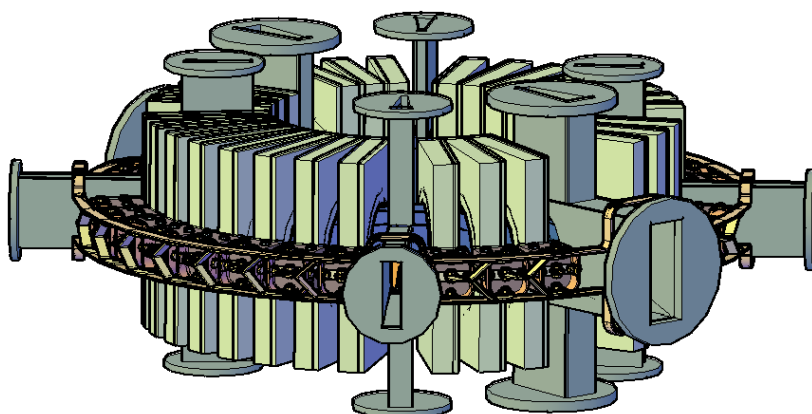
Na tokamaku GOLEM je použita srážková ionizace pomocí urychlených elektronů. Jako zdroj elektronů je použito wolframové vlákno z klasické žárovky bez skleněné části. Uvolněné emitované elektrony jsou dále rozptýleny po komoře pomocí vytvoření elektrického potenciálu na komoře, která je schopna elektrony urychlit a tak ionizovat pracovní plyn. (*Ne*)

1.2.4 Ohřev a generování proudu plazmatem

Pro tuto bakalářskou práci nejvíce stěžejní částí tokamaku GOLEM je indukovaní proudu plazmatem, které na tokamaku Golem probíhá prostřednictvím masiv-

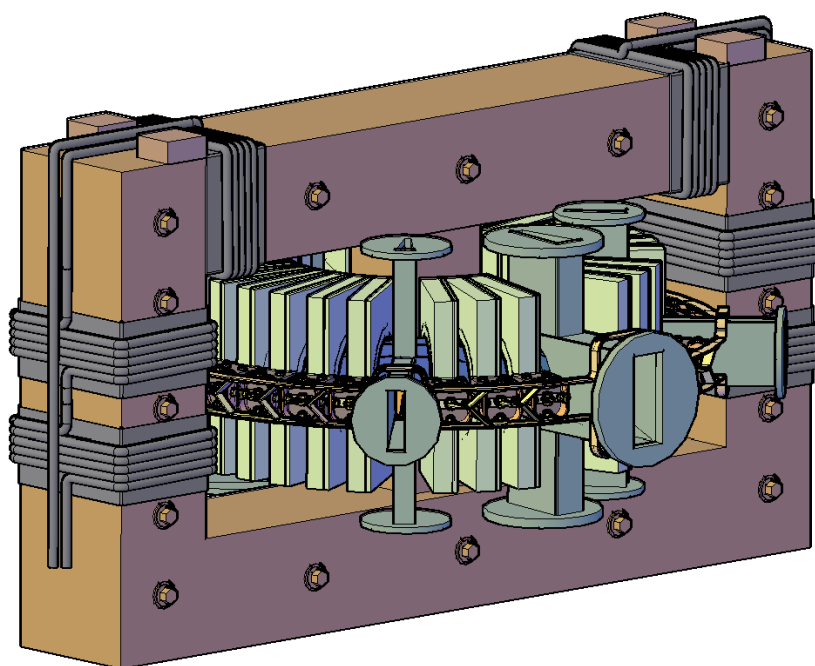


Obrázek 1.8: Model toroidálních cívek okolo komory tokamaku Golem.



Obrázek 1.9: Model toroidálních cívek okolo komory tokamaku Golem včetně napájecí kaskády a krycích hliníkových boxů.

ního kovového transformátorového jádra ve tvaru osmičky. Na transformátorové jádro je namotáno šest navzájem propojených primárních vinutí vždy po šesti závitech, které díky protékajícímu proudu a Ampérově zákonu (*Není to málo?*) generují ve vodivém plazmatu proud. Tento proud je hlavním zdrojem ohřevu v podobě ohmického ohřevu a je také důležitý pro stabilizaci plazmatu v tokamaku. V současné době probíhá napájení primárního vinutí též prostřednictvím kondenzátorové baterie. Kvůli nekontrolovanému toku energie z kondenzátorové baterie máme znemožněno více ovládat stabilizaci v důsledku nemožnosti ovládnutí proudu plazmatem, který stojí za generováním poloidálního magnetického pole nutného pro stabilizaci plazmatu. V následující kapitole se na tuto oblast zaměříme detailněji. (*Tady to plantáte. Musíme si probrat, které stabilizace se tam odehrávají: polohy/proudu/..*)



Obrázek 1.10: Model transformátorového jádra a namotaného primárního vinutí tokamaku Golem.

1.2.5 Základní parametry tokamaku GOLEM

Základní specifikace tokamaku GOLEM	
Velký poloměr komory	$R = 0,4m$
Malý poloměr komory	$r = 0,1m$
Poloměr plazmatu (limiterový)	$a = 0,085m$
Toroidální magnetické pole	$B_t \approx 0,3T$ (<i>I více</i>)
Počet cívek generující B_t	$N = 28$
Proud plazmatem	$I_p \approx 1kA$ (<i>I více</i>)
Délka výboje	$\tau \approx 10ms$ (<i>I více</i>)
Centrální elektronová teplota	$T_e \approx 40eV$ (<i>I více</i>)
Tlak pracovního plynu	$10mPa \leq p_{H_2} \leq 200mPa$ (<i>jinak</i>)
Safety faktor na okraji plazmatu	$q \approx 15$ (<i>Odkud jste to vzal?</i>)

(+ hustota, OPRAVIT všechny jednotky ...)

Tabulka 1.1: Tabulka základních parametrů tokamaku GOLEM