

## TOKAMAK - princip činnosti

Základem TOKAMAKu je vakuová komora, v níž se vlivem extrémně vysokých [teplot](#) a [tlaků](#) vodík tvořící [palivo](#) stává plazmou, tedy vysoce ionizovaným horkým plynem. Tento plyn, který má téměř milionkrát nižší hustotu ve srovnání s běžným [vzduchem](#), obsahuje jak kladně nabitá [jádra atomů](#) tak záporně nabitě [elektrony](#). Tak fyzikové a technologové simulují fúzní [reakci](#), která probíhá v [nitrech hvězd](#). Při této reakci se lehká jádra spojují do těžších jader za uvolnění [energie](#).

Energie, která se tímto způsobem uvolní, je rozdíl [vazebné energie](#) jader vstupujících a vystupujících z reakce.

Nabitě částice tvořící plazmat jsou formovány do požadovaného tvaru a kontrolovány pomocí silného [magnetického pole](#) vznikajícího v obřích [cívkách](#) umístěných kolem nádoby tokamaku. Pomocí magnetického pole je horké plazma udržováno ve správné vzdálenosti od stěn nádoby.

Při interakci horkého plazmatu a stěny nádoby by materiál stěny tak velkou teplotu, kterou plazma má, nevydržel a nádoba by se roztavila.

Před začátkem celého procesu jsou z komory odčerpány vzduch a veškeré nečistoty. Poté jsou zapojeny cívky vytvářející magnetické pole udržující plazmat uvnitř vakuové komory a až poté je dovnitř komory přivedeno palivo. Vzhledem k tomu, že se jedná o nabitě částice, pohybují se uvnitř nádoby pod vlivem magnetického pole a vytvářejí tak poměrně silný [elektrický proud](#). [Částice](#) se pohybují ve směru [magnetických indukčních čar](#) poměrně komplikovaného magnetického pole uvnitř [vakuové nádoby](#).

[Pohyb](#) částic uvnitř nádoby lze považovat za elektrický proud proto, že částice jsou nabitě. A pokud se nabitě částice pohybují, hovoříme o elektrickém proudu.

Elektrický proud uvnitř nádoby tvoří vlastně [závit](#) cívky - nabitě částice plazmatu se tedy pohybují po magnetických indukčních čarách.

Jako palivo se ve fúzním [reaktoru](#) používají [izotopy](#) vodíku: [deuterium](#)  ${}^2_1\text{H}$  a [tritium](#)  ${}^3_1\text{H}$ . Ačkoli by bylo možné spustit fúzní reakce i s jinými jádry malých hmotností, reakce deuterium - tritium je nejefektivnější. Tato reakce produkuje jádro helia, které má větší hmotnost než izotopy vodíku, a [neutron](#):  ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + n$ . Při této reakci se uvolní energie 17,59 MeV.

V každém okamžiku se nachází v plazmatu palivo o hmotnosti pouze několika gramů.

Na první pohled se to může zdát divné a zdánlivě odporovat [zákonu zachování hmotnosti](#), ale je nutné si uvědomit, že při reakci se uvolňuje také energie. A na tu lze (díky [Einsteinovu vztahu mezi hmotností a energií](#)) pohlížet jako na hmotnost. Takže zákon zachování hmotnosti či [zákon zachování energie](#) jsou splněny.

Výše popsaná reakce je stejná, jaká probíhá i v [jádro Slunce](#) při teplotách  $15 \cdot 10^6$  °C. Při laboratorních podmínkách se ukazuje, že je efektivnější zahřát plazmat na teplotu 10krát vyšší.

Získávání obou izotopů vodíku je přitom relativně snadné. Deuterium se získává destilací vody v libovolné formě, což je neškodný a prakticky nevyčerpatelný zdroj. V každém [metru](#) krychlovém mořské vody je 33 gramů deuteria. Deuterium je ale běžně získáváno pouze pro vědecké a průmyslové aplikace.

Tritium je rychle se rozpadající radioaktivní izotop vodíku ([poločas rozpadu](#) je 12,3 let), který se vyskytuje v přírodě pouze ve stopovém množství. Tritium vzniká při [jaderné reakci](#) lithia s neutronem. Proto se do [pokrytí stěn](#) vakuové nádoby TOKAMAKu přidává lithium: neutrony uvolňované při fúzní reakci dopadají na pokrytí stěn, čímž se získává další tritium podle reakce  ${}^6_3\text{Li} + n \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^3_1\text{H}$ . Lithium z ověřeného zdroje v [zemské kůře](#) může poskytovat zásoby dostačující na provoz fúzních reakcí na dobu delší než 1000 let. Navíc může být lithium získáváno i z mořské

vody, kde jsou jeho zásoby prakticky nevyčerpatelné - postačovalo by k pokrytí světových požadavků na energii na dobu šesti milionů let. [Světové](#) zásoby tritia jsou odhadovány na 20 kg, které by [ITERu](#) vydrželo na celou odhadovanou dobu provozu. Koncept výroby tritia přímo ve fúzním reaktoru v pokrytí stěn je velmi důležitý pro budoucí využití fúzních reakcí ve větší míře.

Vzájemnými [srážkami](#) částice se částice nejen ionizují, ale též silně zahřívají. Každá srážka částic přitom znamená lokální přerušení elektrického proudu vytvořeného pohybem částic. Proto každá srážka částic vlastně zvyšuje [elektrický odpor](#), což vede ke zvýšení teploty plazmatu. Paradoxně ovšem s rostoucí teplotou plazmatu klesá jeho odpor, a tedy klesá i [teplota](#), kterým se plazma může dále ohřívat. Tomuto způsobu ohřevu se říká **ohmický ohřev**.

Souvislost elektrického [odporu vodiče](#) s teplem uvolňovaným tímto vodičem známe z rychlovarných konvic, fénů, ... Odporovým vodičem (tj. vodičem s velkým elektrickým odporem) prochází elektrický proud a vodič se tak ohřívá. V případě kovových vodičů ale s rostoucí teplotou jejich odpor roste.

Tento způsob ohřevu ale není dostatečný k dosažení stavu, při kterém začne probíhat fúzní reakce. Plazma se musí ohřát na fúzní teplotu, která se pohybuje mezi  $150 \cdot 10^6 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $300 \cdot 10^6 \text{ }^\circ\text{C}$ . Urychlené částice se postupně dostávají blíž k sobě i přes odpudivé [elektrostatické síly](#). Toto přiblížení částic umožní zažehnutí fúzní reakce.

Cíleně je nutné dosáhnout reakce jader, která jsou ovšem nabitá kladně, a proto se tedy odpuzují. Proto je nutné tyto odpudivé elektrostatické síly překonat!

Pro zvýšení teploty plazmatu na požadovanou teplotu je tedy nutné používat i další, externí, metody ohřevu plazmatu. Existují dvě možnosti, jak tento ohřev realizovat:

1. neutrální injektáž [svazku částic](#);
2. vysokofrekvenční [elektromagnetické vlnění](#).

Neutrální injektáž svazku částic je založena na vstřelování vysokoenergetických částic do plazmatu. Mimo nádobu TOKAMAKu jsou kladně nabitá deuterony urychleny na potřebnou energii. Poté jsou zbaveny svého náboje a pokračují přímo do oblasti, kde se nachází plazma. V důsledku velmi intenzivních srážek s částicemi plazmatu těmito částicím předávají svou [kinetickou energii](#). Kinetická energie částic plazmatu tak roste, čímž roste i teplota plazmatu jako celku. [Výkon](#), který musejí vstřelované částice přinášet, se pohybuje v řádu megawattů.

Ohřev pomocí vysokofrekvenčního elektromagnetického vlnění byl navržen pro ITER. Toto vlnění vstupuje do plazmatu a interaguje s nabitými částicemi. Tím zvyšuje [velikost rychlosti](#) jejich chaotického pohybu, což se projeví zvýšením teploty plazmatu. V ITERu se používají tři typy vlnění, které se navzájem liší [frekvencí](#), vhodné pro urychlení iontů a elektronů uvnitř nádoby TOKAMAKu.

Tento způsob ohřevu funguje tedy úplně stejně jako ohřev potravin v [mikrovlánné troubě](#).

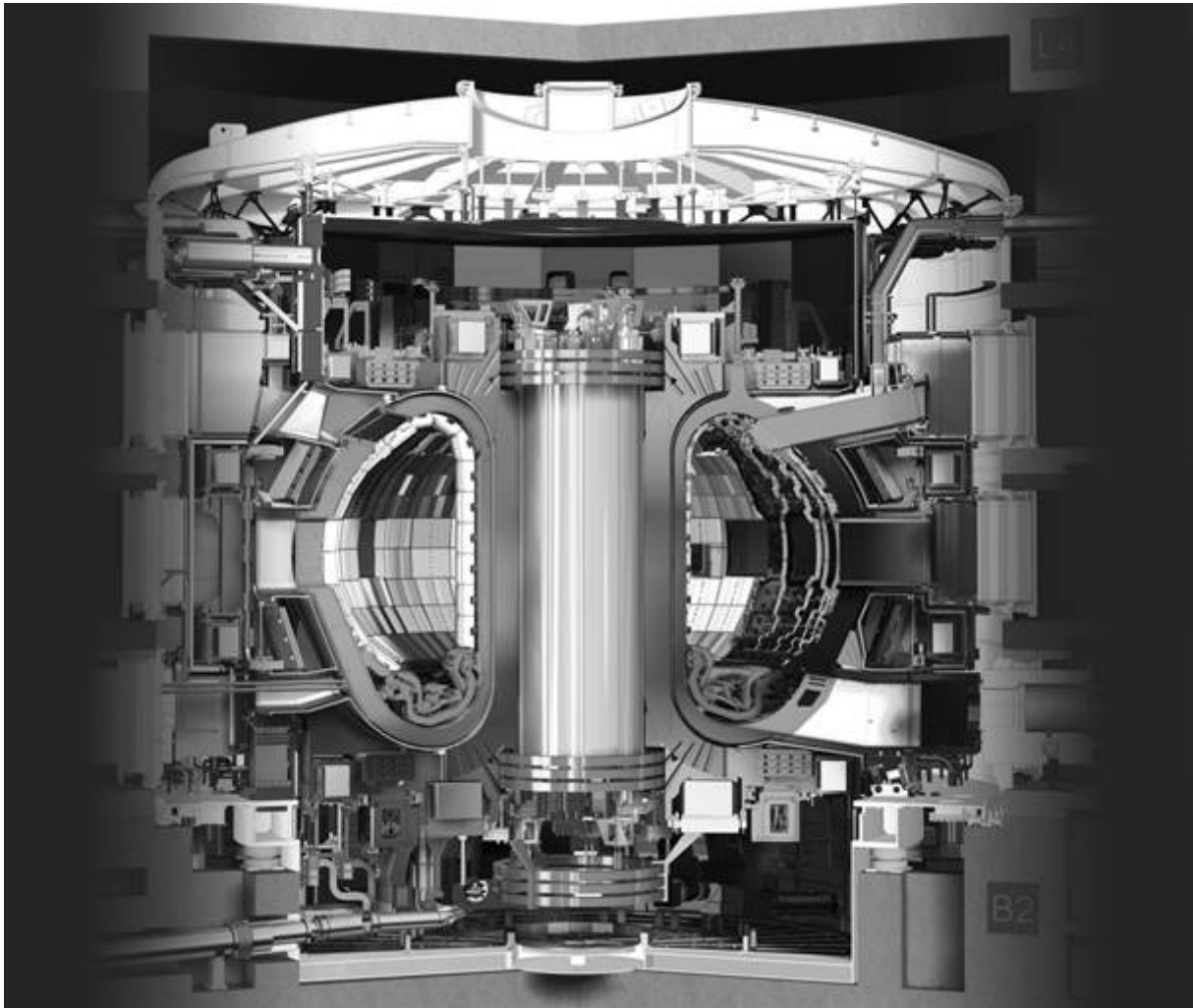
Ohmický ohřev, ohřev pomocí svazku částic i ohřev pomocí elektromagnetického vlnění se používají současně. Ideálním stavem z hlediska provozu fúzního reaktoru je vytvořit stav nazývaný **hořící plazma**. Jedná se o stav, při kterém je energie jádra helia vznikajícího při fúzních reakcích dostatečná k udržování požadované teploty plazmatu. V tomto případě může být výkon externích zdrojů tepla postupně snižován, případně mohou být tyto zdroje zcela odstaveny. Hořící plazma, ve kterém je minimálně 50 % energie uvolňované při fúzních reakcích spotřebováno ke stabilnímu udržení průběhu těchto reakcí, je nezbytným krokem pro dosažení požadovaného výkonu fúzních [generátorů](#). V TOKAMAKu ITERu je energie nutná na ohřev plazmatu ze 66 % dodávána vznikajícími jádry helia.

Podmínky, které musí plazma splňovat, jsou popsány Lawsonovým kritériem.

Přibližně 80 % energie, která se při fúzní reakci v plazmatu uvolní, je odnášena neutrony. Ty jsou elektricky neutrální, a proto na ně nepůsobí ani elektrostatická síla ani [magnetická síla](#) udržující částice plazmatu uvnitř nádoby TOKAMAKu. Neutrony jsou pohlcovány stěnami nádoby, kterou procházejí, a jejich kinetická energie se mění na teplo odebírané stěnám chladící [tekutinou](#). Tato energie je dále využitelná na přeměnu na elektrickou energii v turbínách.

Z ekologického hlediska se jedná o jednu z nejčistších výrobních technologií elektrického proudu (ve srovnání s [tepelnými elektrárnami](#), ...).

TOKAMAK (viz obr. 129) v ITERu je zatím největší tokamak na světě: jeho hmotnost je 23000 tun a výstupní výkon 500 MW.



Obr. 129