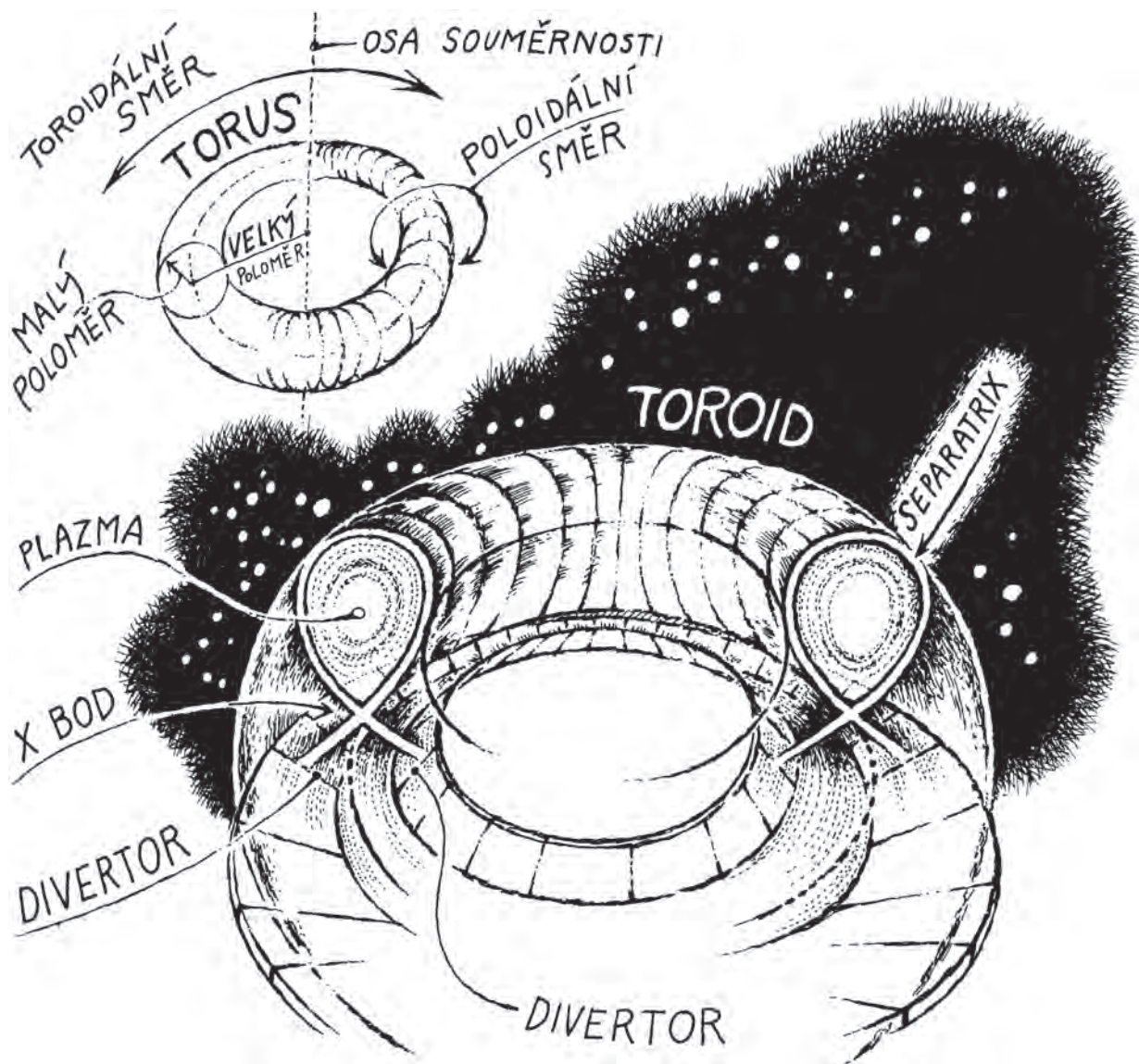
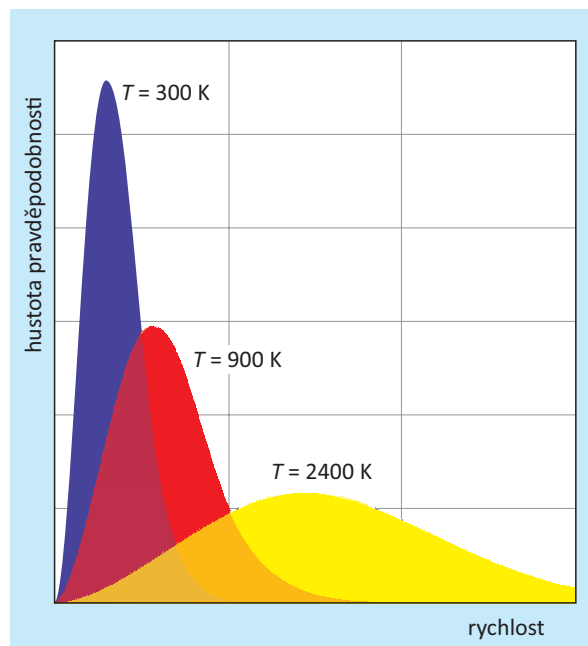




zato neustále ze sevření magnetických silokřivek uniká. Daří se mu to jednak díky srážkám mezi částicemi, ty totiž částicím umožňují „přeskakovat“ z jedné silokřivky magnetického pole na druhou, a jednak kvůli mnoha malým turbulencím, které v plazmatu stále probíhají. Je proto poněkud přesnější si plazma držené magnetickým polem představit třeba jako vodu drženou v mokré houbě, ze které, jak víme, voda za chvíli vyteče. Srovnání s houbou a vodou je a není dobré. Dobré srovnání je to proto, že plazma z magnetického pole „vyteče“ zhruba za srovnatelný čas, v největších zařízeních je to zhruba za jednu sekundu (jde v podstatě o dobu udržení energie plazmatu, o které jsme mluvili na konci minulé kapitoly). Špatné srovnání je to proto, že nesmíme zapomínat, že mluvíme o nepředstavitelně horkém termojaderném plazmatu, ve kterém se nabitě částice běžně pohybují rychlostmi třeba stovek a tisíců kilometrů (!) za sekundu. Jestliže se takhle rychlé částice udrží po dobu jedné sekundy v zařízení, které má velikost sotva několik metrů, je třeba uznat, že magnetické udržení předvádí ve skutečnosti fascinující neprostupnost.

Fakticky je ale docela dobře, že magnetické pole přece jen „sákné“. Díky tomu totiž nebude trvale zadržovat, akumulovat produkty termojaderné fúze, rychlé α částice (připomínáme, že jde o jádra helia).

← Torus vzniká otočením kružnice kolem osy souměrnosti. Vzdálenost středu kružnice od osy je známa pod pojmem velký poloměr. Toroid vzniká otočením obecnějšího, nekruhového tvaru kolem osy souměrnosti. Jde tedy o vhodnější označení pro tvar plazmatu v tokamacích, které dnes mívá složitější průřez. Zejména má zpravidla tzv. X-bod magnetického pole, který horkému plazmatu zajišťuje skutečnou levitaci v prostoru.



Maxwellovo – Boltzmannovo rozdělení velikosti rychlostí částic. Rychlosti jsou na vodorovné ose, výška grafu pak udává relativní zastoupení částic (hustotu pravděpodobnosti výskytu) se zvolenou rychlostí při dané teplotě v plynu či plazmatu.

Jádra helia vznikající termojadernými reakcemi nejprve plazma ohřívají, a to je dobře. U fungujícího termojaderného reaktoru by dokonce měla udržovat potřebnou teplotu pro další fúzní „hoření“ stejně, jako třeba plamínek svíčky udržuje potřebnou teplotu pro další procesy chemického spalování parafínu. Na druhou stranu nemůžeme potřebovat, aby se α částice jako produkty reakce v plazmatu hromadily, tím ředily palivo a překážely dalšímu průběhu reakce. Podobně jako u ohně potřebujeme, aby spaliny odcházely a přitom aby byl zajištěn přístup „kyslíku“.

Ve fúzi sice kyslík nepotřebujeme, zato potřebujeme přístup pro nové palivo, pro deuterium a tritium. Ten se zajišťuje zvenčí a z hlediska tepelné rovnováhy je v tomto směru tak trošku otravným faktem to, že odcházející horké částice jsou nahrazovány částicemi studenými, do kterých je napřed třeba vložit energii a zahřát je na výše uvedené obrovské rychlosti. K celkové energetické bilanci horkého plazmatu s magne-

tickým udržením z hlediska „netěsnosti“ pole se ještě vrátíme v dalších kapitolách, kde se budeme věnovat konkrétně tokamaku ITER. Vrátime se i k metodám, které se mají využívat při doplňování paliva do plazmatu či k odvádění spalin: α částic a neutronů. Na neutrony, které nemají náboj, ovšem magnetické pole nemá žádný vliv a ty tedy z místa reakce odlétají přímočaře pryč, někam do stěny reaktoru.

Stabilní magnetické pole

Vytvoření magnetického pole, které v sobě samém uzavře celé plazma je jedna věc. Vytvoření magnetického pole, které bude stabilní vůči drobným náhodným poruchám plazmatu (například vůči náhodným výhybkám hustoty, teploty, magnetického pole...) je věc druhá. Stabilní magnetické pole je takové, které se po drobné náhodné výchylce některých silokřivek samo vrátí do výchozího stavu.

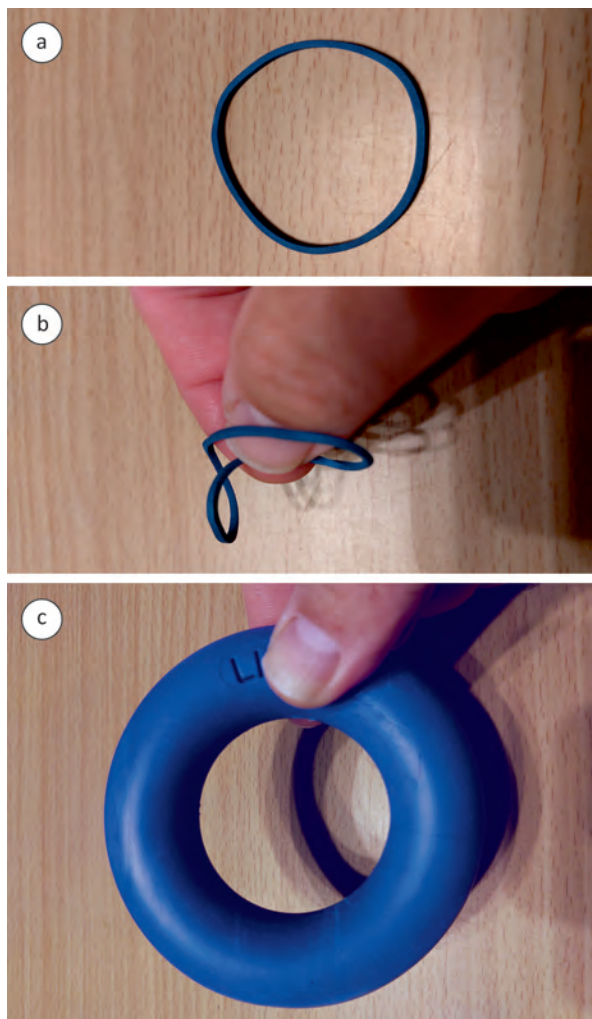
Magnetické pole si lze docela dobře představit jako neviditelné kontinuum v prostoru, které je možné svým způsobem napínat, třeba jako skákací gumu, jako struny na hudebním nástroji, jako ocelové pruty v betonu, nebo jako provázky na sušáku na prádlo. Směr tohoto kontinua udávají silokřivky, které jsou ale jen „pomyslné“ – ve skutečnosti neexistují, ale můžeme je v prostoru vykreslit z libovolného bodu, jaký nás napadne. Zatímco silokřivky udávají směr magnetického pole, velikost magnetického pole udává, jak moc jsou na sebe silokřivky natěsnané, jak moc jsou „napnuté“. Právě proto jsou konfigurace magnetického pole, ve kterých se daří stabilně udržovat plazma déle než jen několik milisekund, založeny

na velmi silném hlavním magnetickém poli, kterým je pole toroidální, tedy pole ve směru delšího obvodu prstence. Konkrétně to platí v případě tokamaků a stelarátorů. U těch si můžeme prstenec magnetických silokřivek představit jako silný prstenec z gumy (například posilovač prstů), který drží tvar mnohem pevněji, než pro srovnání tenká gumička do vlasů (u té lze snadno nestabilitu ilustrovat jejím překroucením mezi prsty do osmičky, viz obr. na str. 60).

Jak se dá z uvedené analogie správně odvodit, porucha plazmatu v intenzivním magnetickém poli se transformuje na „rozeznění“, na rozvlnění silokřivek podobně, jako když smyčec rozezní napnutou strunu nebo jako když silný vítr rozechvěje železobetonovou konstrukci a přitom ji nemůže výrazným způsobem vychýlit z jejího místa. Kmitání magnetických silokřivek (které se dá snadno měřit například indukcí elektrického proudu v miniaturních cívkách,

→ *Postavit stabilní most pomocí lan není vůbec jednoduché a určitě je důležité jejich dostatečné napětí. Silokřivky v plazmatu hrají z hlediska stability podobnou roli. Na fotografii je viadukt Milau ve Francii. Foto: G. Mathieu, Foster Partners.*





Gumička je příkladem toroidálních sil. Roli magnetického pole má pružnost (a). Stačí malá kolmá (poloidální) výchylka a nestabilita způsobí zhroucení (b). Analogii v říši fyziky plazmatu je smyčková nestabilita. Posílení pevnosti v toroidálním směru vede k stabilnějšímu tvaru, například u posilovače prstů (c).

tzv. magnetických sondách) se proto považuje za stabilizující jev. U slabého pole (třeba právě u pinčů) by po malé výchylce naopak mohlo dojít ke změně konfigurace magnetického pole (příkladem může takzvaná smyčková nestabilita, která připomíná kroucení blesku, viz obr. na str. 48). Velká změna konfigurace pole končí kolizí plazmatu se stěnou, a následně rychlým vychladnutím plazmatu. Takové velké nestabilitě, která vede k zániku plazmatu, se říká **disrupce**. Tento název odkazuje především na skutečnost, že po tepelném kolapsu plazmatu okamžitě následuje jeho rekombinace na špatně vodivý plyn, čili médium ve výbojové komoře přestane být dobrým vodičem elektrického proudu.

Za stabilizaci plazmatu intenzivním magnetickým polem v toroidálním směru platíme vysokou cenu. Touto cenou je špatné využití tlaku magnetického pole k udržení plazmatu. Zatímco u pinčů se v prvním přiblížení dá předpokládat, že tlak vnějšího magnetického pole se rovná obyčejnému (tzv. hydrodynamickému) tlaku plazmatu, u tokamaků a stelarátorů má z důvodu stability vysokou energii (tj. tlak) i magnetické pole uvnitř plazmatu. U tokamaků a stelarátorů je nakonec tepelná energie plazmatu s termojadernými teplotami odhadem asi tak třicetkrát menší než energie stabilního magnetického pole. Pro jednoduchost lze říci, že uvnitř stabilních konfigurací magnetické pole tlačí samo na sebe.

Potřeba tak silného pole nás bohužel značně technicky omezuje. Cívkami, které dokážou silné magnetické pole produkovat (technicky lze dosáhnout řádově několik tesla), musí protékat nezvykle vysoký elektrický proud, což je náročné jak mechanicky (cívky pod proudem působí svým magnetickým polem

na sousední cívky obrovskými silami), tak i energetiky. Cívky, které jsou nejčastěji měděné, se značně velkým elektrickým proudem, který v nich teče, rychle zahřívají, je třeba řešit jejich chlazení po experimentu i efekty tepelné roztažnosti. Spotřeba elektřiny i tepelná roztažnost materiálu omezuje možnou dobu pro experiment řádově na sekundy. Aby k zahřívání cívek nedocházelo, a tím pádem abychom mohli s termionukleárním plazmatem pracovat déle (dnes až desítky minut), přecházejí moderní tokamaky k využití supravodičů v cívkách. Tím se ale konstrukce tokamaku velmi prodražuje a stejně tak se prodražuje

je i jeho provoz (je třeba zajistit chlazení supravodičů na teploty blízké absolutní nule, a navíc i mzdové prostředky pro další vysoce kvalifikovaný personál).

Nyní si stručně řekneme, jaké konfigurace magnetických polí pro „velmi horké donuty“ se ukázaly jako nejzajímavější z hlediska zvládnutí Lawsonova kritéria pro uskutečnění termojaderné fúze. Nejprve se zaměříme na stelarátory vznikající na západní straně železné opony a poté na tokamaky.

První horký donut, který byl sevřen toroidálním magnetickým polem supravodiče, byl v roce 1979 moskevský T-7, později provozovaný v Číně jak HT-7 (do roku 2013). Zdroj: ASIPP.



Horké donuty původní, čili americké – stelarátory

Dodnes je velká pozornost fúzní komunity věnována stelarátorům (neboli, dle názvu, strojům na hvězdy). První myšlenky na tuto konfiguraci se objevily na Univerzitě v Princetonu pod vedením úspěšného plazmového fyzika Lymana Spitzera. Jejich systematický výzkum prokazatelně začal počátkem padesátých let 20. století a do roku 1958 podléhal, stejně jako fúzní výzkum jinde ve světě, poměrně přísnému utajení. Ve stelarátorech je magnetické pole konfigurováno tak, že toroidální pole je hodně silné, aby bylo stabilní, ale na rozdíl od jiných konfigurací v plazmatu stelarátoru neteče žádný elektrický proud, tím pádem se plazma nemůže na magnetickém poli nijak podílet a také nemůže být ohříváno Jouleovým jevem. Stelarátory nepoužívají elektrický proud v plazmatu záměrně, aby se vyhnuly hned dvěma vážným problémům s elektrickým proudem v plazmatu: za prvé, elektrický proud je zdrojem obtížně zvladatelných tzv. *proudových nestabilit*, které zpravidla končí disruptcí. Jednou z nich je i smyčková nestabilita (viz obr. na str. 48), o které jsme již psali. Tato nestabilita proto stelarátorům z principu nehrozí. Za druhé jde samozřejmě o to, že elektrický proud je v plazmatu zpravidla indukován podle Faradayova zákona časovou změnou vnějšího magnetického pole – takže pokud stelarátor nepotřebuje proud, nepotřebuje ani časovou změnu proudu, takže může rovnou udržovat výboj vysokoteplotního plazmatu kontinuálně. Je to zkrátka tak, že konfigurace magnetického pole stelarátoru je zcela definována proudy v cívkách vně plazmatu. Ty vlastně jen vytvářejí něco, čemu teoretičtí fyzikové rádi říkají okrajové podmínky. Cívkami teče

stálý elektrický proud, nic v této konfiguraci principiálně nepotřebuje nějaký vývoj v čase.

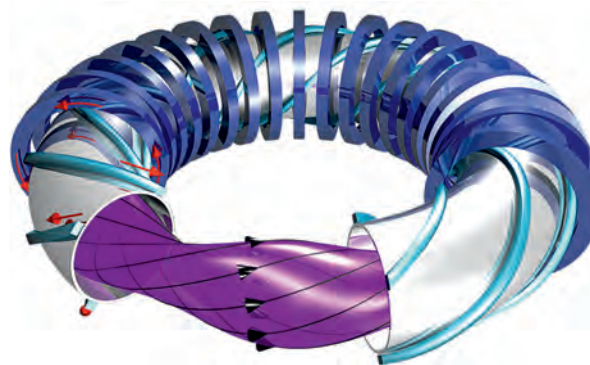
Myšlenku stelarátorů začaly rozvíjet Spojené státy na univerzitě v Princetonu jen o pár let dříve, než začali Sověti pracovat na vývoji tokamaků (o těch si povíme vzápětí). Stejně jako jejich moskevští kolegové si i američtí odborníci dobře uvědomovali, že pro udržení rovnovážného plazmatu je důležité přimět částice k velmi rychlému pohybu nejen v toroidálním, ale také v poloidálním směru. Co ale s tím, jestliže v plazmatu není elektrický proud, který by stočil silokřivky magnetického pole tak, jak je třeba? To znamená tak, aby se nabitě částice uzavřené v plazmatu silokřivkami pohybovaly jak kolem zařízení, tak i kolem horkého plazmatu? První konstrukce stelarátoru byla jednoduchá a postavená podle vzoru závodních okruhů – fyzikové stočili prstenec stelarátoru do osmičky, viz obr. na protistraně, takže se každá nabitá částice střídavě ocitala na „kratší“ a „delší“ dráze stáčející se silokřivky, střídavě na jedné a druhé straně od horkého středu plazmatu. Takový tvar plazmatu se ovšem ukázal jako překombinovaný, proto již v dalších experimentech vymysleli fyzikové důmyslné řešení, ve kterém „osmičku plazmatu“ transformovali zpátky do prstence. K tomu bylo nutné pomoci dodatečných, kolem vakuové nádoby se obtáčejících cívek, dát v poloidálním směru magnetickému poli a tedy i plazmatu nepravidelný tvar (třeba elipsu, nebo trojúhelník) a tento tvar vnějším magnetickým polem v toroidálním směru otáčet, samozřejmě tak, aby se po oběhu kolem dokola geometrický tvar pole a plazmatu uzavřel zase sám do sebe.

I někteří odborníci si bohužel často myslí, že je to právě rychlost stáčení této periodické poruchy magnetického pole, která přímo vede ke stáčení magnetické silokřivky stelarátoru v poloidálním směru. Není to pravda. Lze ukázat, že periodické, opakující se změny tvaru magnetického pole při pohybu částice v toroidálním směru pouze vytvářejí poruchu, která se nakonec u pohybu každé nabitě částice sečte celkově na dosti pomalý oběh nabitých částic v poloidálním směru. Nakonec to většinou vychází tak, že se velká část částic pohybuje po trajektoriích velmi podobných, jako kdyby byly v tokamaku! Neplatí to ale obecně. Svět stelarátorů je dnes mnohem a mnohem pestřejší než svět tokamaků, existuje řada zařízení s rozličnými konfiguracemi, řada variant, které jsou ve světě fúzního výzkumu známy pod jmény jako klasický stelarátor, torsatron, heliac, pokročilý stelarátor a další (viz str. 107). Za zvláštní zmínku stojí alespoň heliac (pracuje pod názvem TJ-II třeba ve španělském Madridu), ve kterém se místo stáčející se cívky kolem obyčejné rovinné cívky stáčí samotné plazma, samozřejmě i včetně vakuové nádoby.

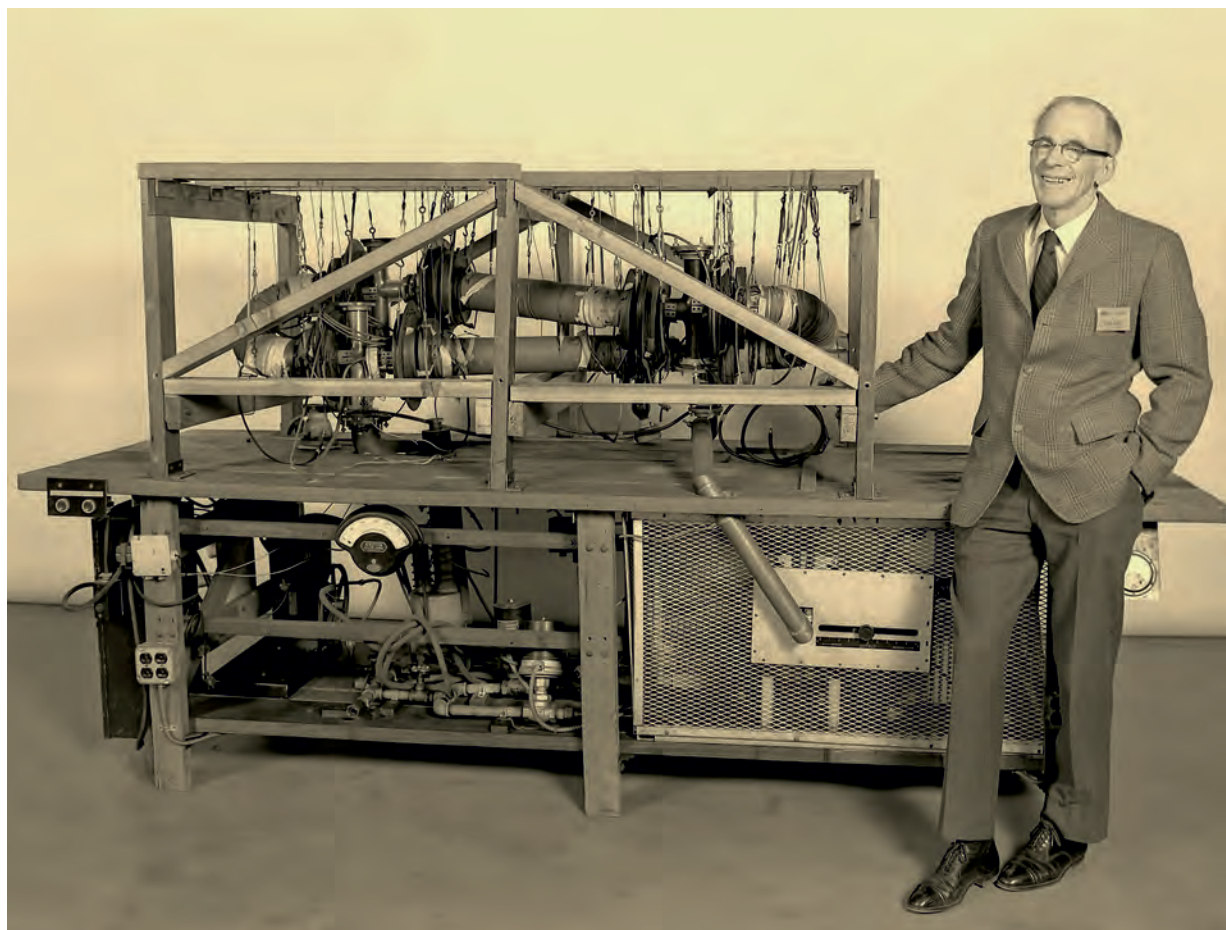
Celkově lze říci, že se stelarátorům daří stabilně udržovat vysokoteplotní plazma po neomezeně dlouhou dobu (pokud se nepřehřívají cívky, což se v poslední době zpravidla řeší pomocí supravodičů), a pokud se pak od plazmatu nepřehřívá stěna (a to lze pro změnu řešit jejím chlazením vodou). Stelarátory přitom nemusejí nijak zápolit s proudovými nestabilitami. Cena, kterou za to platí, je především ztráta rotační symetrie donutu. Při konfiguraci cívek a zpravidla i vakuové komory je třeba počítat s pe-

riodicitou zařízení v toroidálním směru. Je to větší komplikace, než se může na první pohled zdát. Vyrobit příslušné cívky a nádobu je totiž technicky mnohem komplikovanější než vyrobit (už tak celkem neobvyklou) geometrii toroidální. Toroidálně periodické plazma ve stelarátorech se také podstatně obtížněji modeluje na počítačích než rotačně symetrické plazma toroidální. Nejspíš právě v souvislosti s touto komplikací se objevila i hlavní nevýhoda stelarátorů, kterou je horší doba udržení tepla plazmatu než v tokamacích srovnatelné velikosti (nebo, lépe řečeno, srovnatelných konstrukčních nákladů).

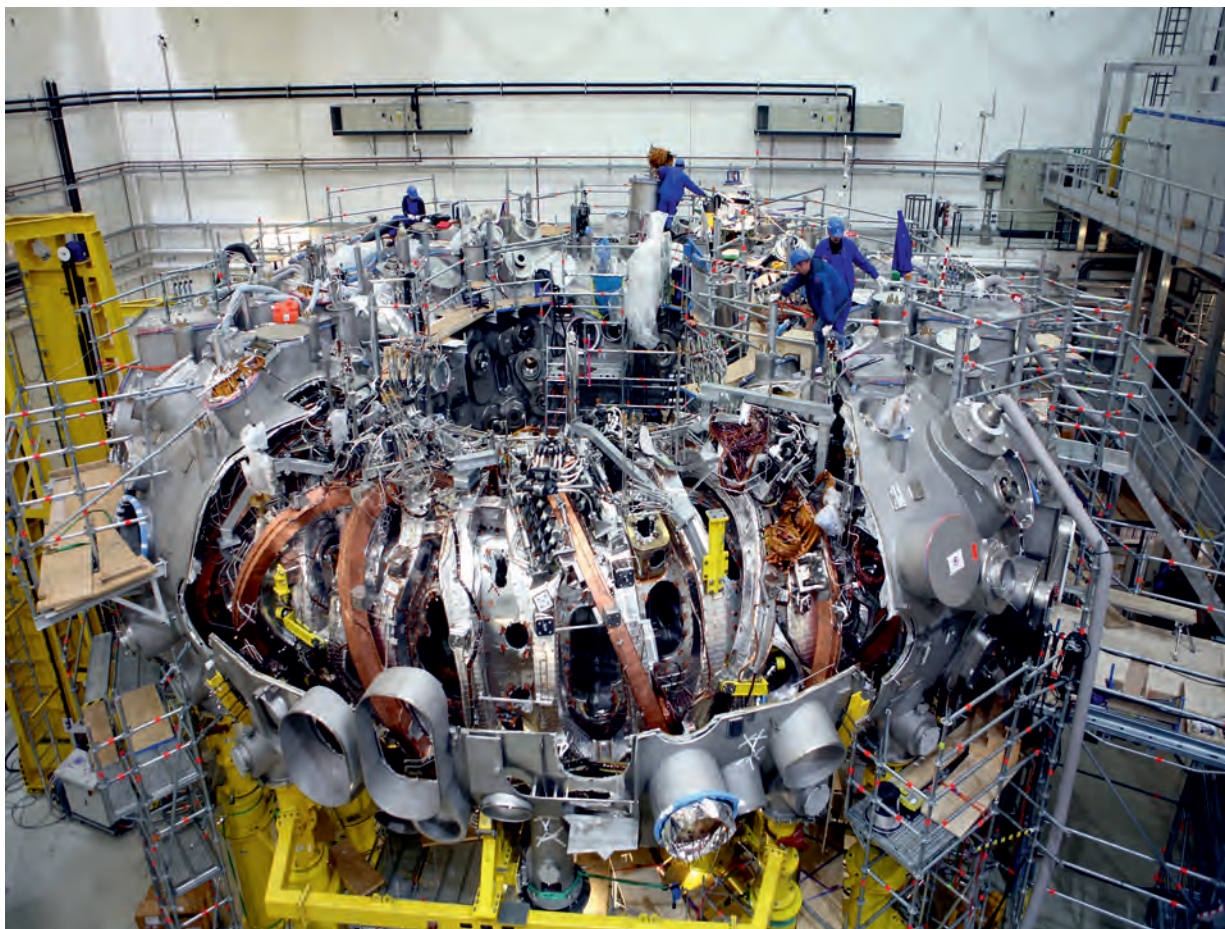
Doba udržení tepla je přitom klíčová z hlediska Lawsonova kritéria a není ani z hlediska moderní fyziky snadno srozumitelná (či předvídatelná), protože souvisí se složitým turbulentním chováním vysokoteplotního plazmatu. Jednou z menších nevýhod stelarátorů je například i skutečnost, že při průrazu



Konfigurace klasického stelarátoru: Cívky toroidálního pole a šroubovicové cívky, které periodicky deformují průřez plazmatu. Zdroj: IAEA, IPP MPG.



Lyman Spitzer a jeho Model A stellarator, zkonstruovaný v roce 1953 v rámci projektu Matterhorn. Spitzer byl vynikajícím teoretikem, odvodil mj. vztah pro vodivost plazmatu, který je po něm pojmenován. Jeho nezměrné úsilí vedlo k umístění dalekohledu Copernicus a Hubblova dalekohledu na oběžnou dráhu. Zdroj: PPPL.



Konstrukce moderního supravodivého stelarátoru s optimalizovaným tvarem cívek, které generují magnetické pole v prvním přiblížení podobné magnetickému poli klasického stelarátoru. Na obrázku je stelarátor Wendelstein 7X, který pracuje v německém Greifswaldu. Foto: Anja Richter Ullmann (2011), AAAS.

plazmatu nelze použít Jouleův ohřev, a že i další ohřev plazmatu musí být zcela založen na speciálních systémech ohřevu, které by rozhodně neměly v plazmatu generovat elektrické proudy (na rozdíl od tokamaků, kde naopak o neinduktivní generování elektrického proudu usilujeme...). I malé elektrické proudy by u stellarátorů narušovaly velmi pečlivě ustavenou konfiguraci magnetického pole. V současné době nejmodernější a nejvýznamnější stellarátor, německý supravodivý Wendelstein 7-X, se během projektové a konstrukční fáze zaměřil právě na co nejpresnější tvar magnetického pole, jehož přesná konfigurace byla velmi pečlivě vypočtena na základě několika optimalizačních strategií. Díky tomu němečtí odborníci věří, že takto optimalizovaný stellarátor by

mohl mít dobu udržení tepla plazmatu srovnatelnou s tokamaky. První výsledky experimentů na tomto velkém stellarátoru naznačují, že přinejmenším do určité míry šlo o správnou strategii.

Obří stellarátor Wendelstein 7-X byl zprovozněn v roce 2015 v Institutu Maxe Plancka pro fyziku plazmatu v německém Greifswaldu. Pojmenován je podle hory v bavorských Alpách (obdobně byl kdysi pojmenován i projekt Matterhorn). Plazmový prstenec má velký poloměr 5,5 metru a šířku přibližně metr. Plazma ve stellarátoru tak má objem 30 m^3 a hustotu 3×10^{20} částic v metru krychlovém. Magnetické pole je až 3 tesla. Výboj s mikrovlnným ohřevem by měl probíhat až po dobu 30 minut. Doba udržení tepla byla změřena až 0,2 sekundy.

Velmi oblíbené horké donuty z východu – tokamaky

Momentálně jsou nejnadějnějším kandidátem na zvládnutí fúze tokamaky – také téměř všechny rekordy termojaderné fúze byly dosaženy na tokamacích. ITER má konfiguraci tokamaku, a to proto, že při daných nákladech (při dané velikosti) mají tokamaky nejvyšší dobu udržení tepla v plazmatu, čili jsou nejblíže ke splnění Lawsonova kritéria. Jsou ale i odborníci, kteří mluví o „tokamafii“ a argumentují tak, že za dobrými výsledky tokamaků stojí především fakt, že se do nich investovalo zdaleka nejvíce intenzivní odborné práce, peněz, zkrátka, že je to tím, že se staly nejrozšířenější experimentální konfigurací.

Tokamak se pozná podle dvou charakteristických znaků. Prvním je silné, stabilní toroidální pole, které je tvořeno tzv. cívkami toroidálního magnetického

pole, což je, zjednodušeně řečeno, normální cívka (solenoid) stočená do prstence. Druhým charakteristickým znakem je elektrický proud, který je do prstencového plazmatu indukovan. V konfiguraci typu tokamak tvoří vysokoteplotní, dobře vodivé plazma vlastně jediný sekundární závit transformátoru, zapojený nakrátko (do zkratu), takže v něm primární vinutí s mnoha závity může indukovat obrovský elektrický proud (milióny ampér jsou v dnešních tokamacích docela běžné). Dřívější tokamaky často svou konstrukcí skutečně transformátor připomínaly, protože měly i železné jádro. To je konstrukční komplikací, na druhou stranu má výhodu, že do sebe „spoutává“ silokřivky primárního vinutí. Tokamak pak nemá prakticky žádné rozptylové magnetic-

ké pole (ani hlavní pole od cívek toroidálního pole nemá žádné silokřivky vně tokamaku). Rozptylové pole ruší chování řady přístrojů v okolí tokamaku. V plazmatu i u některých přístrojů musí být kompenzováno dodatečnými cívkami. Ostatně toroidní transformátory jsou dodnes oblíbené ve slaboproudé elektronice (třeba u kvalitních zesilovačů) právě proto, že nemají rozptylové magnetické pole a nevytvářejí ve svém okolí nežádoucí šum. Dnes je primární vinutí zpravidla vinuto jako válcová cívka a umístěno na ose tokamaku (tokamak pak funguje jako symetrický vzduchový transformátor), a proto se primárnímu vinutí dnes nejčastěji říká centrální solenoid.

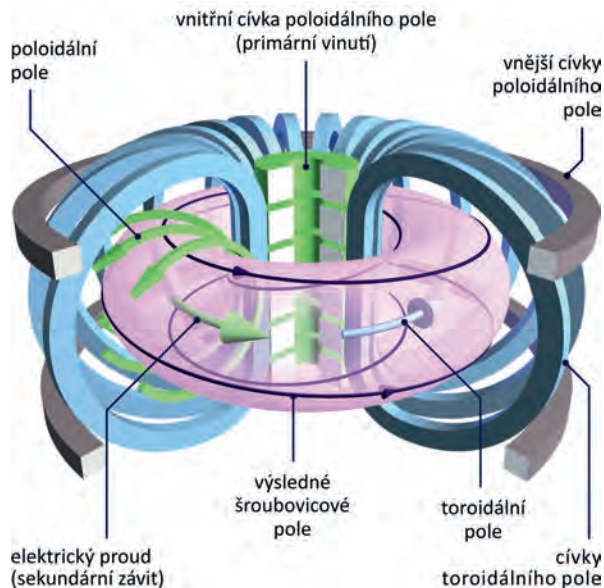
Elektrický proud má dnes v plazmatu tokamaku dvě nezávislé role (připomeňme, že ve stellarátorech naopak proud v plazmatu neexistuje):

Za první, dodnes je klíčové, že proud tekoucí v plazmatu spolu cívkami toroidálního magnetického pole spoluvytváří magnetické pole. Podle Ampérova zákona totiž vzniká kolem protékajícího elektrického proudu magnetické pole. Toto pole má v případě tokamaku název poloidální magnetické pole, a právě to je ve skutečnosti primárně zodpovědné za udržení plazmatu, a spolu s toroidálním magnetickým polem vede na pozvolné šroubovicové obtáčení silokřivek kolem vysokoteplotního plazmatu. Toto obtáčení popisuje veličina, které se ve fyzice říká helicity magnetického pole. Lze ukázat, že právě toto šroubovicové obtáčení je nutnou podmínkou pro rovnováhu mezi magnetickými silami a tlakem, který vytváří vysokoteplotní plazma.

Za druhé, proud v plazmatu plazma také zahřívá pomocí tzv. Jouleova jevu, stejného jevu, který zahřívá elektrická kamínka, starou žárovku nebo vodu

ve varné konvici. Jak brzy ukážeme, Jouleův jev sám o sobě k dosažení termojaderných teplot v tokamacích ani stellarátorech nestačí, bez ohřevu pomocí svazku rychlých atomů nebo elektromagnetického vlnění by to nešlo. Jouleův ohřev v tokamacích nicméně dodnes hraje klíčovou roli při počátečním ohřevu plazmatu a při jeho ionizaci, tj. při takzvaném průrazu plazmatického výboje.

Tokamaky zkrátka charakterizuje silné, stabilizující toroidální pole a vysoký elektrický proud v plazmatu. Další významnou a často zmiňovanou **výhodnou** vlastností tokamaků je také jejich toroidální symetrie, neboli skutečnost, že tokamak je



Princip tokamaku – základní uspořádání cívek pro rovnovážné udržení plazmatu a složky magnetického pole v plazmatu.

Zdroj: EUROfusion.

v dobrém přiblížení rotačně symetrický kolem své osy. Tím pádem i v experimentech lze zpravidla předpokládat, že se fyzikální podmínky v toroidálním směru nijak významně nemění a že se v něm nebude výrazně měnit ani chování vysokoteplotního plazmatu, ani třeba množství termojaderných reakcí.

Vedle relativně nízké hustoty plazmatu a požadavku na další investice do výkonných systémů ohřevu plazmatu je principiální **nevýhodou** tokamaků i skutečnost, že elektrický proud je v plazmatu tokamaku indukován. Indukce je (podle svého jména) založena na změně magnetického pole vytvářeného primárním vinutím (centrálním solenoidem), která technicky může probíhat pouze od nějaké co nejmenší (záporné) intenzity magnetického pole, po nějakou technicky největší možnou intenzitu magnetického pole. Indukce proudu v plazmatu bude

První francouzský tokamak TFR (1973) měl výrazné železné jádro transformátoru (oranžové), pozdější a mnohem větší společný evropský tokamak JET se mu tím nápadně podobá. Oba tokamaky přitom mají primární vinutí ve formě centrálního solenoidu. Zdroj EUROfusion.



proto nutně časově omezená na dobu, po kterou se v primárním vinutí může magnetické pole měnit (narůst). Proud v plazmatu ovšem tokamaky nutně potřebují k existenci plazmatu proto, aby doplňoval konfiguraci magnetického pole o poloidální složku. Neznamená to ale, že by tokamaky byly odsouzeny pouze k pulznímu provozu, že by bylo kontinuální udržení horkého plazmatu v tokamacích principiálně nemožné. Fyzikové s inženýry totiž již několik desetiletí pracují na tzv. neinduktivním vlečení proudu, kdy je elektrický proud v horkém plazmatu generován například systémy ohřevu. Hodně může pomoci i tzv. samoindukovaný elektrický proud, který se vytváří v plazmatu přirozeně, samovolně v důsledku strmého nárůstu tlaku plazmatu směrem do centra. Samoindukovaný proud je natolik zvláštní věc, že se pro něj v anglické literatuře zažil název „bootstrap current“ podle anglického slova pro přezky od bot, za které sám sebe z močálu vytáhl baron Prášil. Jako by plazma tokamaků dokázalo samo sebe vytahovat ze smrtelného nebezpečí, které pro něj představuje

→ **1.** První tokamak T-1 zkonstruovaný v moskevském ústavu jaderného výzkumu v roce 1958. Konfigurací podobná, ale mnohem menší zařízení byla v Moskvě provozována již o několik let dříve, nicméně ještě nenesla jméno tokamak a neměla kovovou nádobu. **2.** Tokamak T-3, jehož průlomové výsledky zahájily v roce 1968 cestu tokamaků do celého světa. **3.** Prvním tokamakem spuštěným za hranicemi Sovětského svazu bylo zařízení ST (Symmetric Torus) které vzniklo v roce 1970 rychlou přestavbou stellarátoru Model C v Princetonu, USA. ST potvrdil přednosti konfigurace tokamak. **4.** Britský tokamak CLEO se stal v roce 1972 prvním tokamakem zkonstruovaným v Evropě. Experimentoval s řízením polohy plazmatu a také nejspíš vůbec poprvé s ohřevem plazmatu pomocí svazku neutrálních částic. Zdroj: Archiv PPPL.

