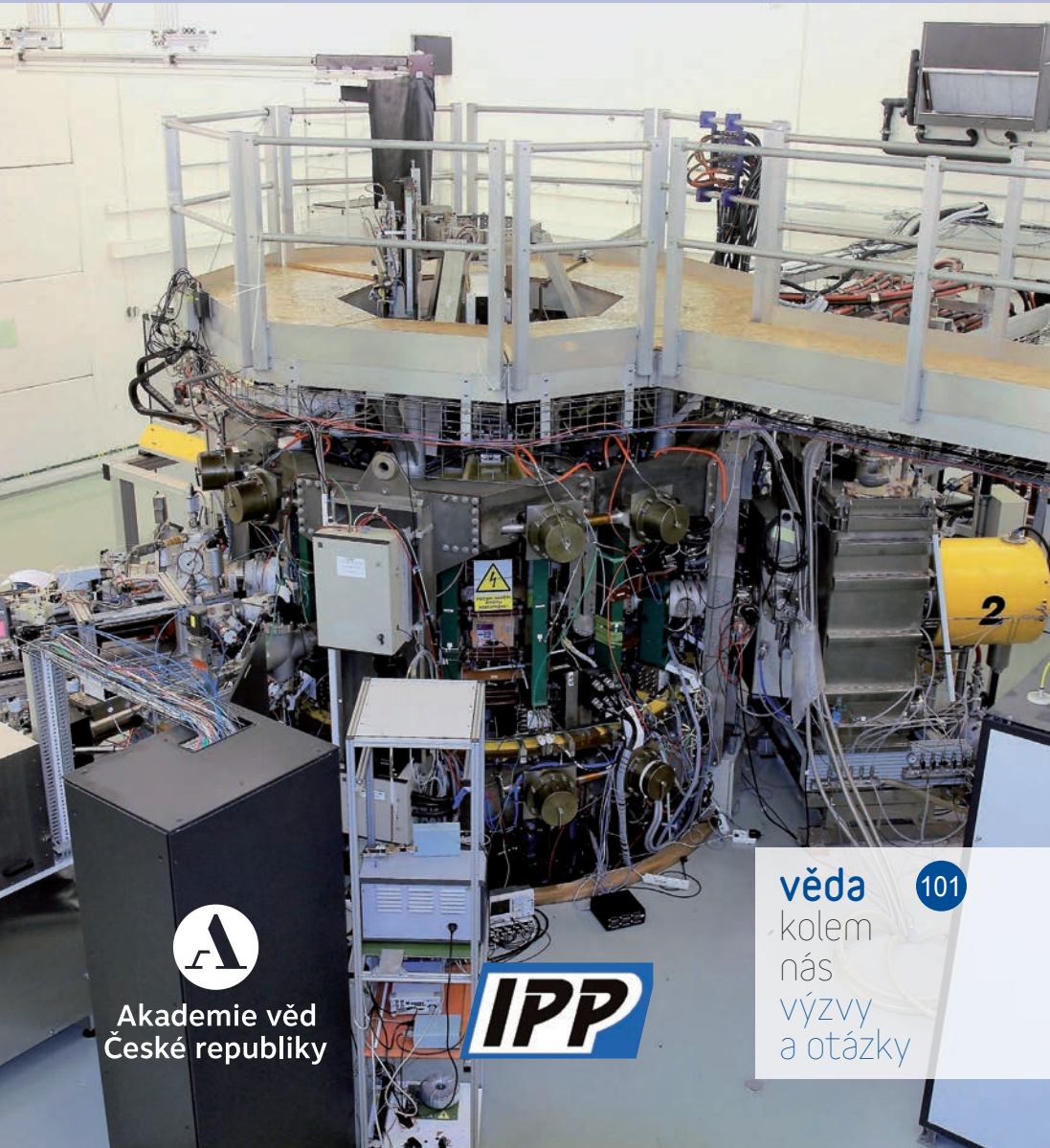


# Tokamak COMPASS



Akademie věd  
České republiky

**IPP**

**věda**

kolem

nás

výzvy

a otázky

101

**Ústav fyziky plazmatu AV ČR, v. v. i., (ÚFP)** patří svým zaměřením na výzkum a aplikace plazmatu mezi přední výzkumné instituce v Evropě i ve světě. V oboru generace a udržení plazmatu, studia jeho vlastností a procesů interakce s materiálem včetně charakterizace a využití výsledků této interakce je ústav ojedinělý komplexností svého přístupu v národním i mezinárodním kontextu. Příkladem může být např. vývoj materiálů schopných odolávat dlouhodobému působení horkého plazmatu v tokamacích. Ty jsou připravovány plazmovými nástřiky (např. vodou stabilizovaným plazmatronem patentovaným ústavem), analyzovány a optimalizovány v oddělení materiálového inženýrství a pak testovány v reálných provozních podmínkách v tokamaku COMPASS. Výzkum vlastností plazmatu a využití jeho potenciálu je velkým tématem pro současné špičkové vědce po celém světě. Fyzika plazmatu je prudece se rozvíjející obor, jehož široké využití sahá od kosmického výzkumu přes energetiku, aplikace v biomedicině či přesné optice až po přípravu nových materiálů se specifickými vlastnostmi. Zejména vývoj bezpečné a udržitelné energie, která zajistí energetickou stabilitu pro budoucí generace, je jednou z největších globálních společenských výzev a podílet se na jejím řešení je jedním z hlavních posláních ÚFP.

Svou činností ÚFP přispívá ke zvyšování úrovně poznání a vzdělanosti a k využití výsledků vědeckého výzkumu a vývoje v praxi. Získává, zpracovává a rozšiřuje vědecké informace, vydává vědecké publikace, poskytuje vědecké posudky, stanoviska a doporučení a provádí vzdělávací činnost. Ve spolupráci s vysokými školami uskutečňuje doktorské studijní programy a vychovává vědecké pracovníky. V rámci předmětu své činnosti rozvíjí mezinárodní spolupráci, včetně organizování společného výzkumu se zahraničními partnery, výměny vědeckých poznatků a přípravy společných publikací. Pořádá domácí i mezinárodní vědecká setkání, konference a semináře a zajišťuje infrastrukturu pro výzkum. Úkoly realizuje samostatně i ve spolupráci s vysokými školami a dalšími vědeckými a odbornými institucemi.



## Tokamaky

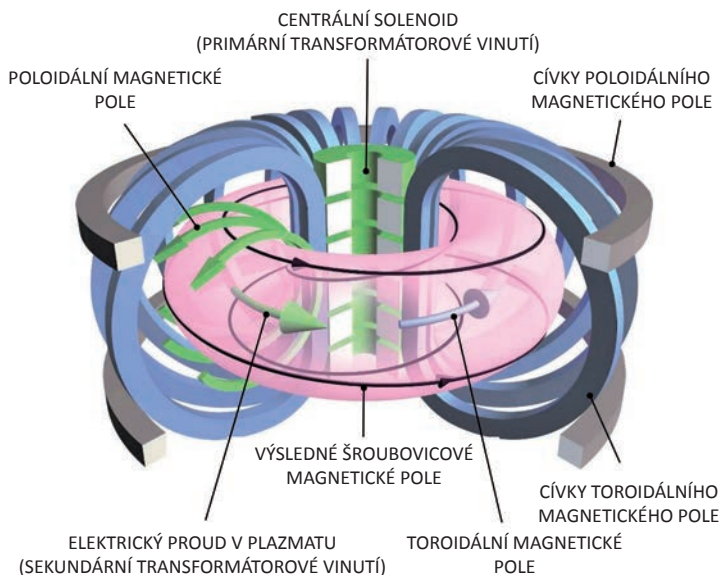
Termojaderná fúze představuje perspektivní zdroj energie, který má potenciál stát se v budoucnu hlavním energetickým zdrojem lidstva. Výzkum termojaderné fúze v současnosti pokročil do fáze přípravy prvních fúzních elektráren. Podle plánu Evropské unie a dalších světových velmocí má být prototyp fúzní elektrárny uveden do provozu okolo roku 2060. Po celém světě pracují desítky fúzních zařízení, která rozvíjejí znalosti o řízené termojaderné fúzi a chování vysokoteplotního plazmatu a slouží k vývoji nezbytných fúzních technologií.

V energetických fúzních reaktorech první generace bude probíhat termojaderná fúzní reakce jader izotopů vodíku deuteria a tritia. Optimální teplota pro průběh reakce je přibližně 160 milionů °C. Reaktanty budou při této teplotě v látkovém skupenství plně ionizovaného plazmatu.

Nejpokročilejším typem fúzních reaktorů jsou tokamaky. Tokamaky jsou v současnosti jediná zařízení, která umožňují dosáhnout potřebných parametrů plazmatu. Proto jsou první fúzní elektrárny připravovány na bázi tokamaku.

Tokamaky mají tvar prstence (toroidu) a izolují horké plazma od konstrukce reaktoru pomocí magnetického pole. Hlavní částí tokamaku je prstencová vakuová nádoba, okolo které jsou navinuty magnetické cívkvy vytvářející tzv. toroidální magnetické pole. Uprostřed prstence je umístěn centrální solenoid, který indukuje v plazmatu uvnitř nádoby vysoký elektrický proud generující tzv. poloidální magnetické pole. Vodorovně okolo komory jsou navinuty vnější cívkvy poloidálního pole, které stabilizují a formují plazma. Součtem všech magnetických polí vzniká šroubovicové (helikální)

Základní schéma tokamaku



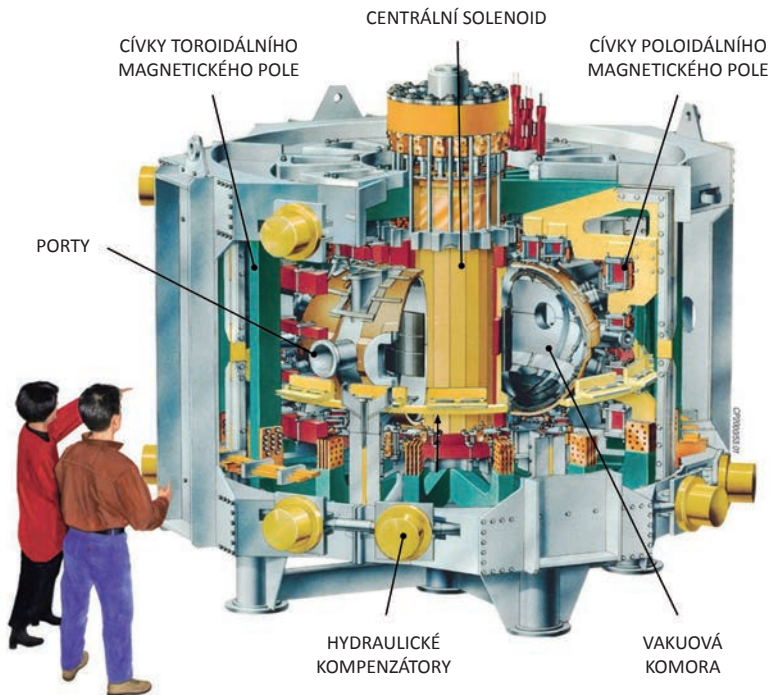
magnetické pole, které brání kontaktu plazmatu s konstrukcí reaktoru. Proud indukovaný v plazmatu současně plazma ohřívá.

Pro dosažení vysokých teplot je plazma ohříváno fyzikálně a technicky sofistikovaným systémem ohřevu. Nejprve je ohřáto vysokým indukovaným elektrickým proudem. Se vzrůstající teplotou ale klesá elektrický odpor plazmatu a ohřev elektrickým proudem se stává neúčinným. Proto další ohřev plazmatu zajišťují svazky urychlených neutrálních atomů a elektromagnetické vlny.

## Tokamak COMPASS

Tokamak COMPASS se svými rozměry řadí k menším tokamakům umožňujícím provoz v režimu s vysokým udržením energie v plazmatu, v tzv. H-módu. H-mód představuje standardní referenční režim mezinárodního tokamaku ITER. Díky své velikosti a tvaru odpovídá plazma tokamaku COMPASS v lineárním měřítku jedné desetíně plazmatu ITER. Kromě tokamaku COMPASS existují pouze dva další tokamaky s konfigurací podobnou ITER a režimem H-mód: tokamak ASDEX-U v německém Garchingu a tokamak JET v britském Culhamu, který je největším fúzním reaktorem na světě. Fyzikální podobnost plazmatu v tokamacích COMPASS, ASDEX-U a JET umožňuje předpovídat parametry plazmatu a extrapolovat je směrem k novému reaktoru ITER.

Řez tokamakem COMPASS



Hlavními součástmi tokamaku COMPASS jsou:

- vakuová nádoba,
- magnetický systém,
- napájecí systém,
- vakuový systém,
- systém rychlé zpětnovazební regulace,
- systém řízení, sběru dat a komunikace,
- chladicí systém,
- systém vypékání komory,
- napouštění pracovního plynu,
- systém pro doutnavý výboj,
- systém hydraulického předpětí,
- systém ohřevu plazmatu.

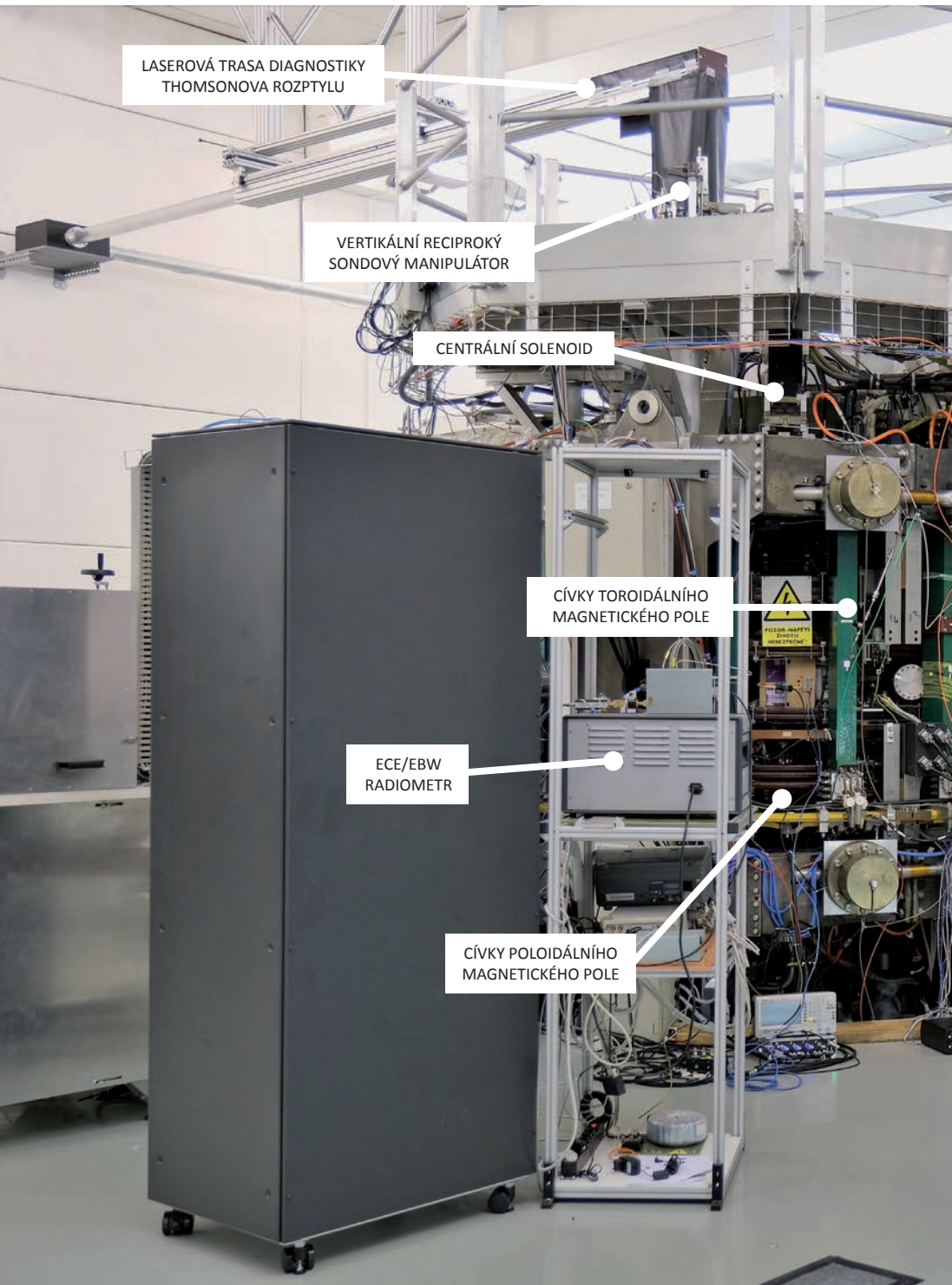
### Základní parametry tokamaku COMPASS

hlavní poloměr $R$	0,56 m
vedlejší poloměr $a$	0,23 m
proud v plazmatu $I_p$	< 400 kA
magnetické pole $B_T$	< 2,1 T
triangularita	~ 0,4
elongace	< 1,8
tvár plazmatu	kruh, elipsa, D-tvar, divertorované plazma
délka pulzu	< 1 s
tlak vakua	$10^{-6}$ Pa
materiál vakuové komory	Inconel 625
materiál vystavený plazmatu	grafit

### Základní parametry systému ohřevu plazmatu tokamaku COMPASS

počet injektorů neutrálních atomů	2
energie svazku	40 keV
celkový iontový proud	$2 \times 12,5$ A
celkový výkon neutrálních částic	$2 \times 310$ kW
délka pulsu	< 300 ms
průměr svazku	< 5 cm

Elektrické napájení systémů tokamaku ve výši 1 MW je zajištěno ze sítě 22 kV s omezeným příkonem. Potřebná energie pro napájení tokamaku (až 90 MJ, resp. 70 MW) se získává postupnou akumulací v rázových generátorech se setrvačником.



LASEROVÁ TRASA DIAGNOSTIKY  
THOMSONOVA ROZPTYLU

VERTIKÁLNÍ RECIPROKÝ  
SONDOVÝ MANIPULÁTOR

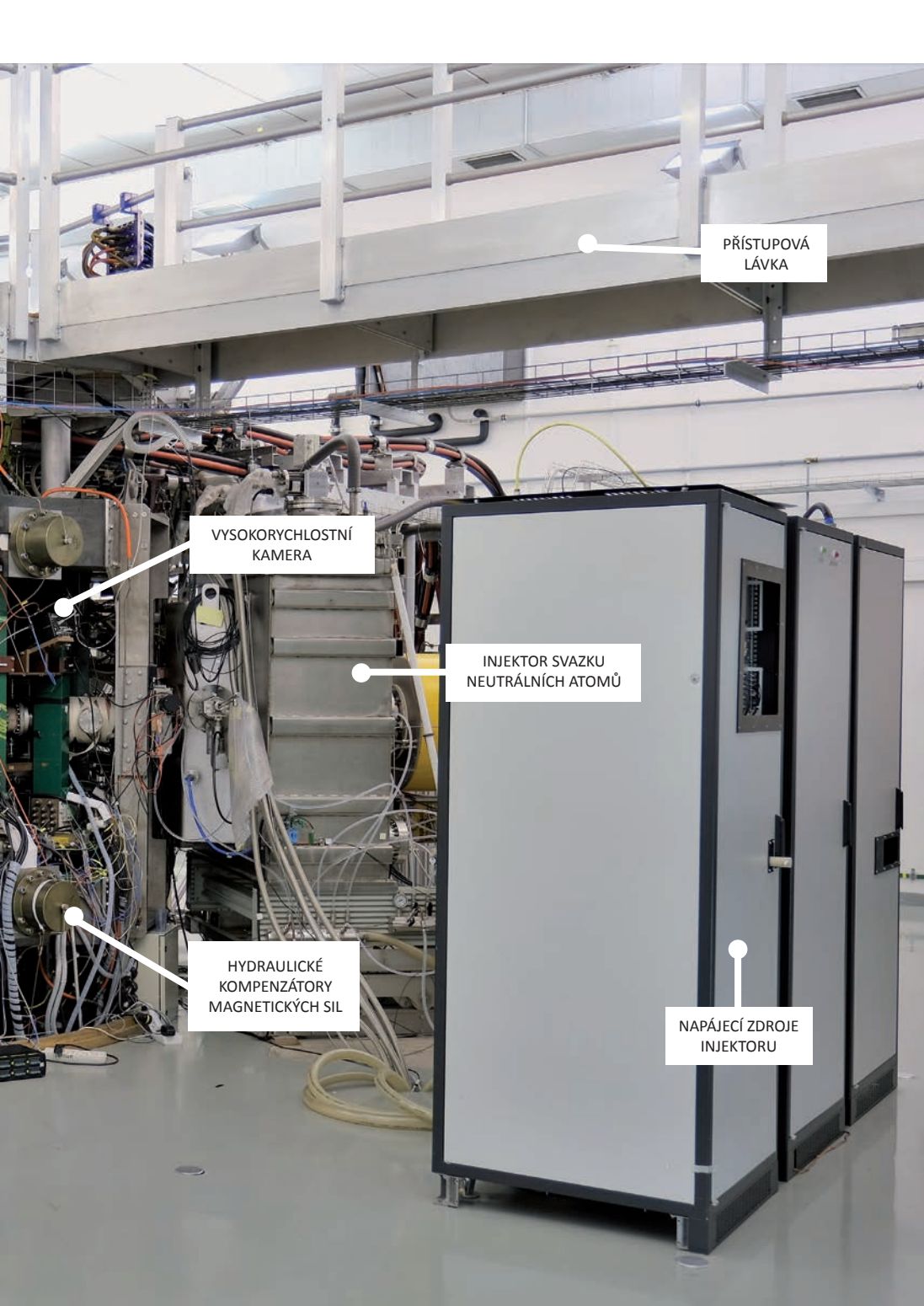
CENTRÁLNÍ SOLENOID

CÍVKY TOROIDÁLNÍHO  
MAGNETICKÉHO POLE

ECE/EBW  
RADIOMETR

CÍVKY POLOIDÁLNÍHO  
MAGNETICKÉHO POLE





PŘÍSTUPOVÁ  
LÁVKA

VYSOKORYCHLOSTNÍ  
KAMERA

INJEKTOR SVAZKU  
NEUTRÁLNÍCH ATOMŮ

HYDRAULICKÉ  
KOMPENZÁTORY  
MAGNETICKÝCH SIL

NAPÁJECÍ ZDROJE  
INJEKTORU

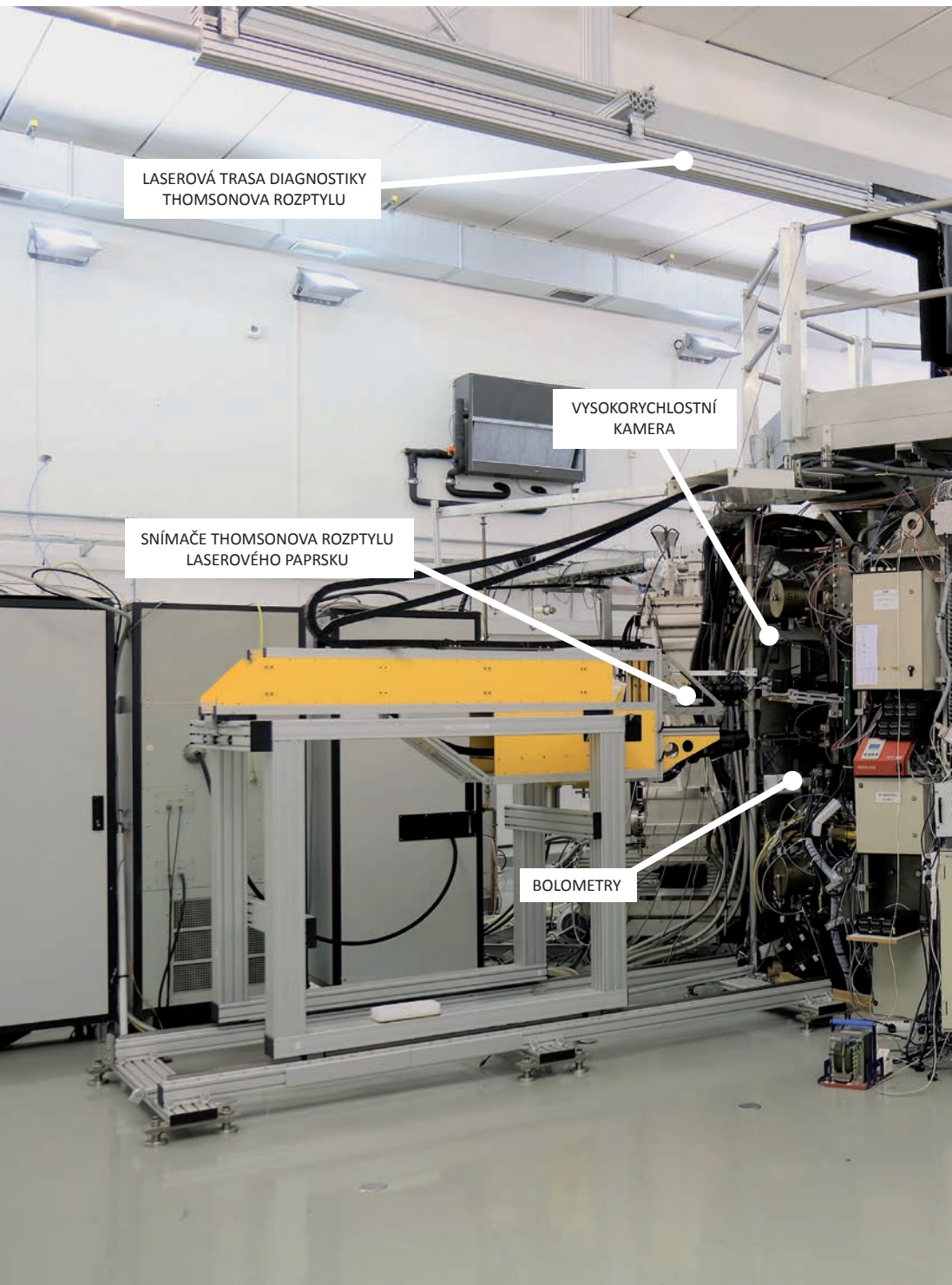


LASEROVÁ TRASA DIAGNOSTIKY  
THOMSONOVA ROZPTYLU

VYSOKORYCHLOSTNÍ  
KAMERA

SNÍMAČE THOMSONOVA ROZPTYLU  
LASEROVÉHO PAPRSKU

BOLOMETRY

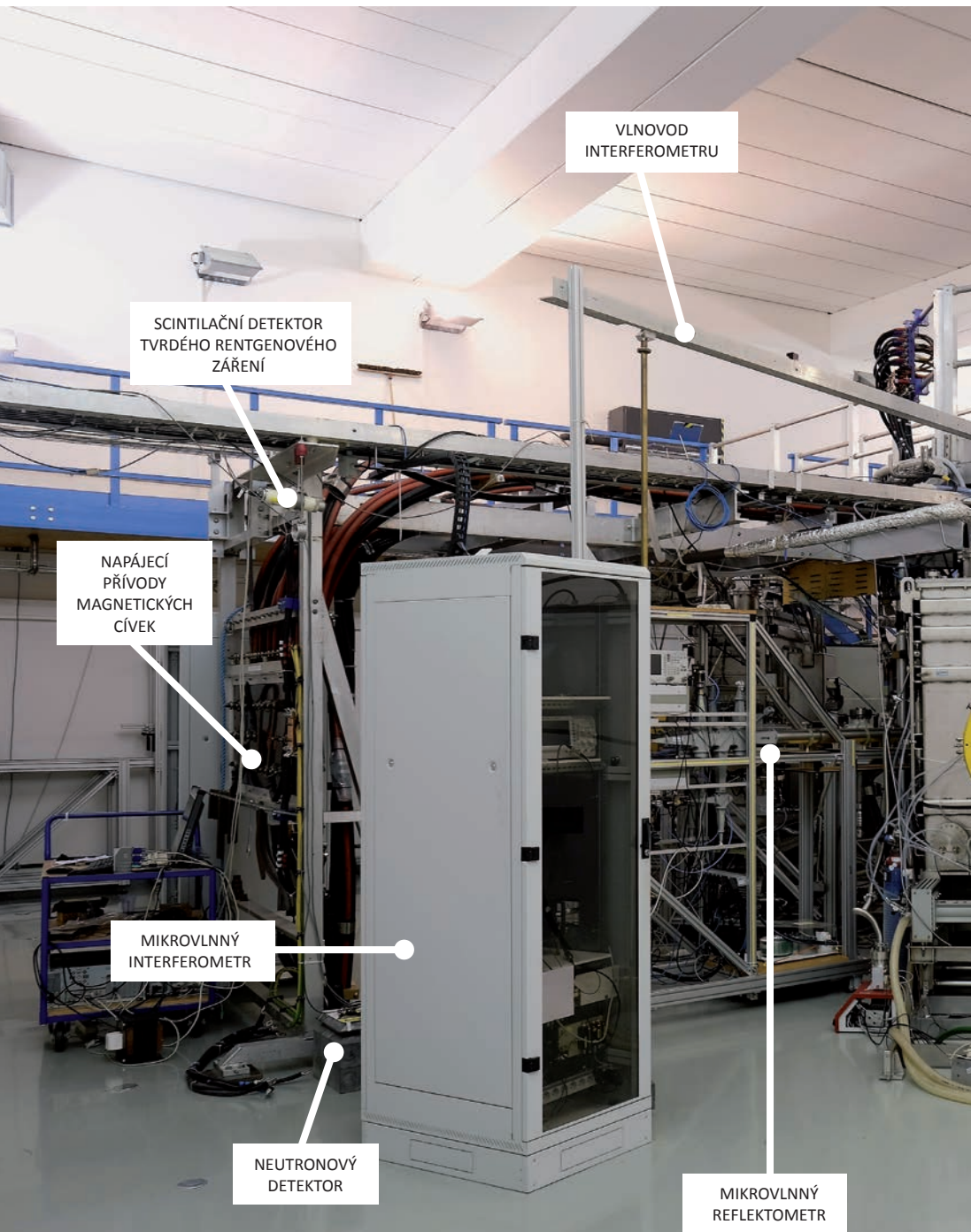


VAKUOVÝ  
SYSTÉM

TERMOVIZNÍ  
KAMERA

HORIZONTÁLNÍ  
RECIPROKÝ  
SONDOVÝ  
MANIPULÁTOR

LITHIOVÝ  
DIAGNOSTICKÝ  
SVAZEK



SCINTILAČNÍ DETEKTOR  
TVRDÉHO RENTGENOVÉHO  
ZÁŘENÍ

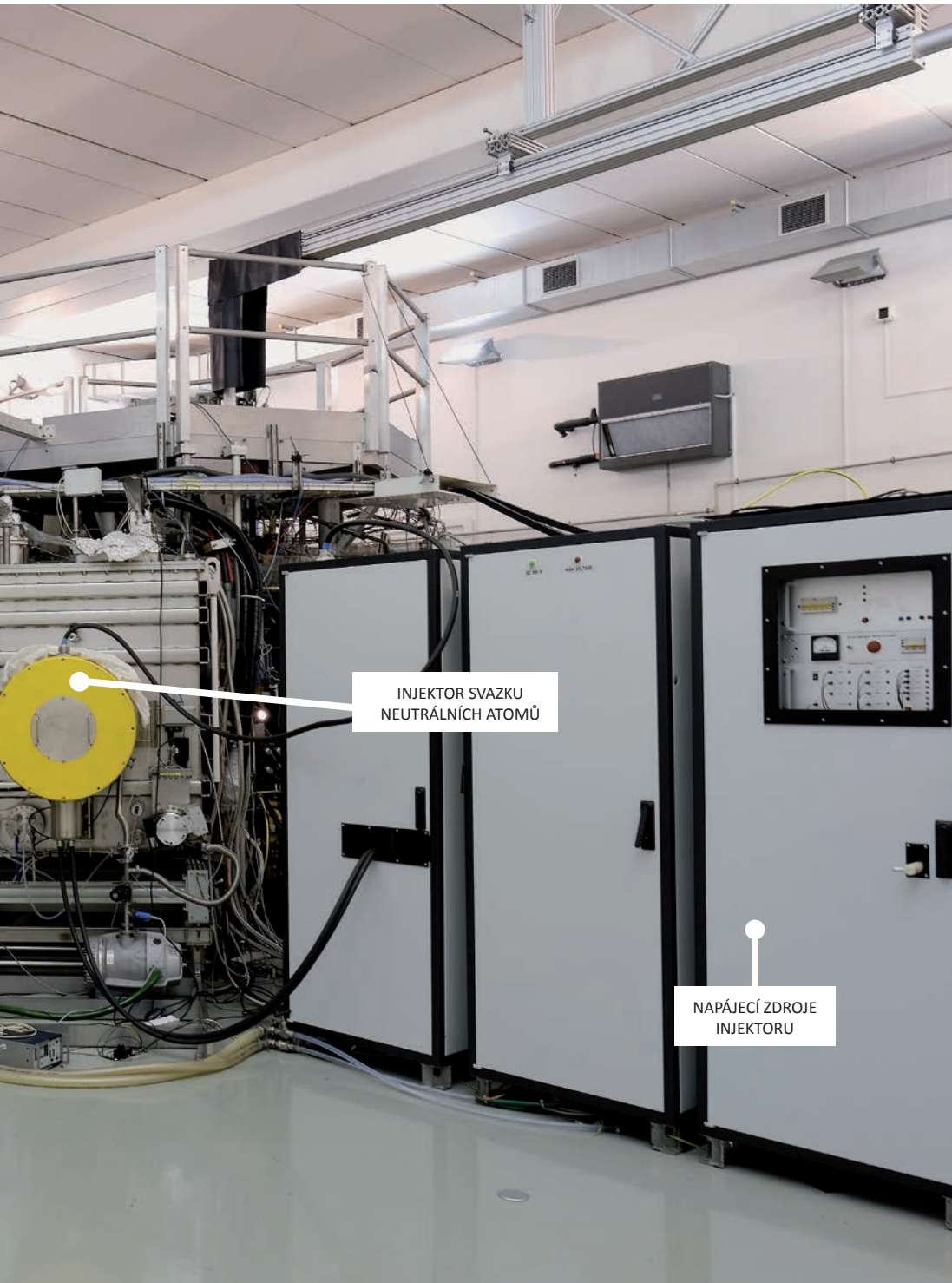
VLNOVOD  
INTERFEROMETRU

NAPÁJECÍ  
PŘÍVODY  
MAGNETICKÝCH  
CÍVEK

MIKROVLNNÝ  
INTERFEROMETR

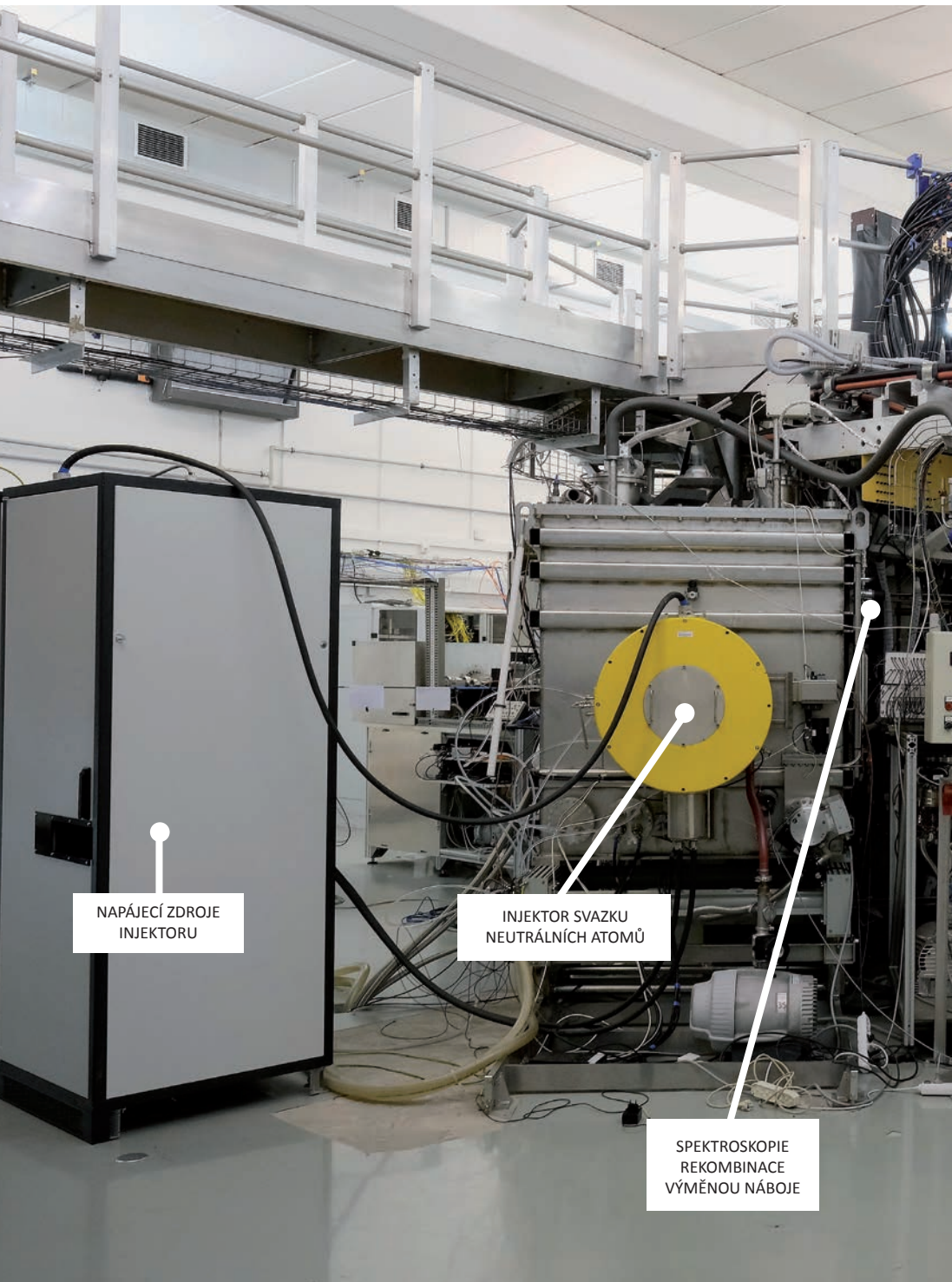
NEUTRONOVÝ  
DETEKTOR

MIKROVLNNÝ  
REFLEKTOMETR



INJEKTOR SVAZKU  
NEUTRÁLNÍCH ATOMŮ

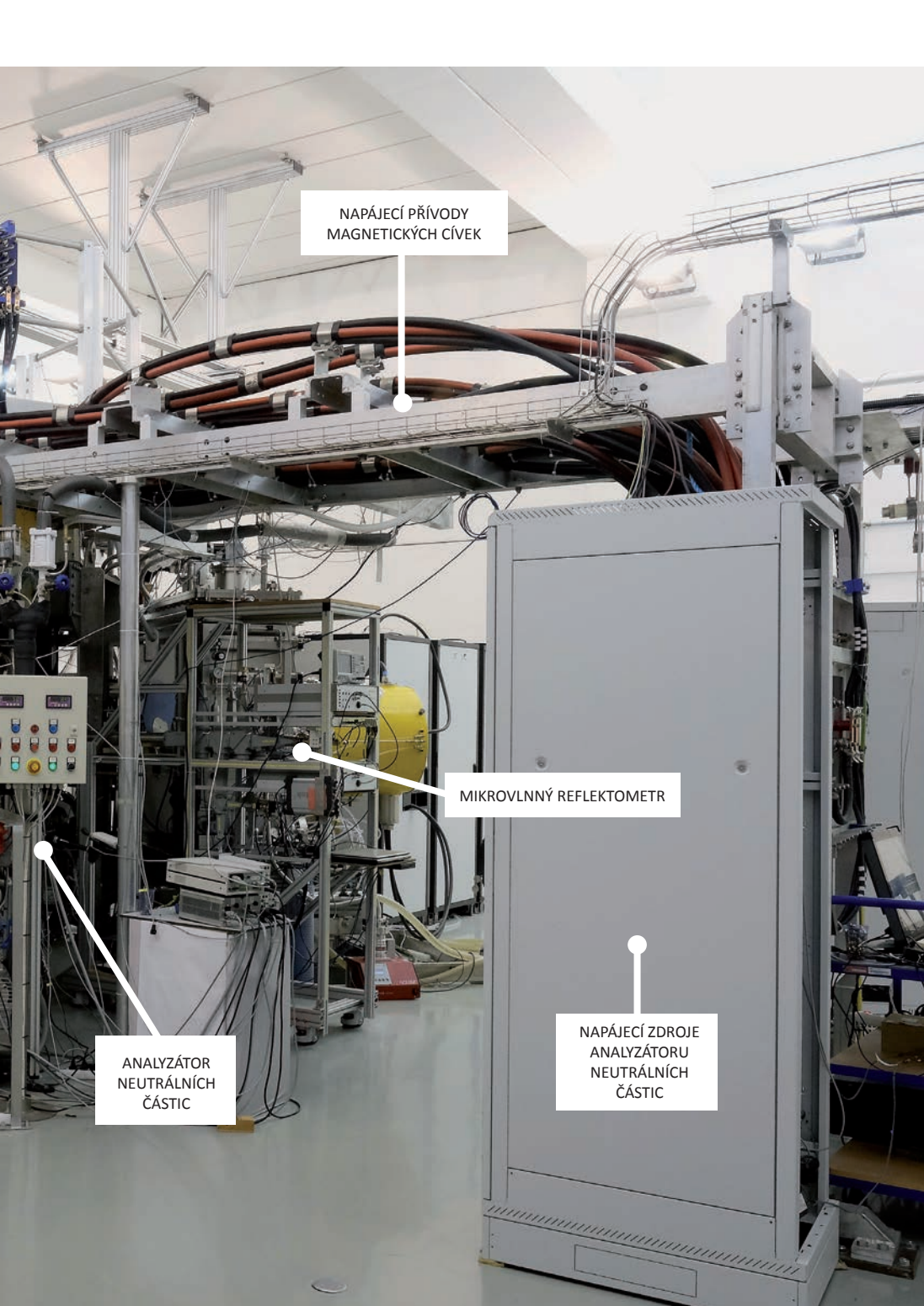
NAPÁJECÍ ZDROJE  
INJEKTORU



NAPÁJECÍ ZDROJE  
INJEKTORU

INJEKTOR SVAZKU  
NEUTRÁLNÍCH ATOMŮ

SPEKTROSKOPIE  
REKOMBINACE  
VÝMĚNOU NÁBOJE

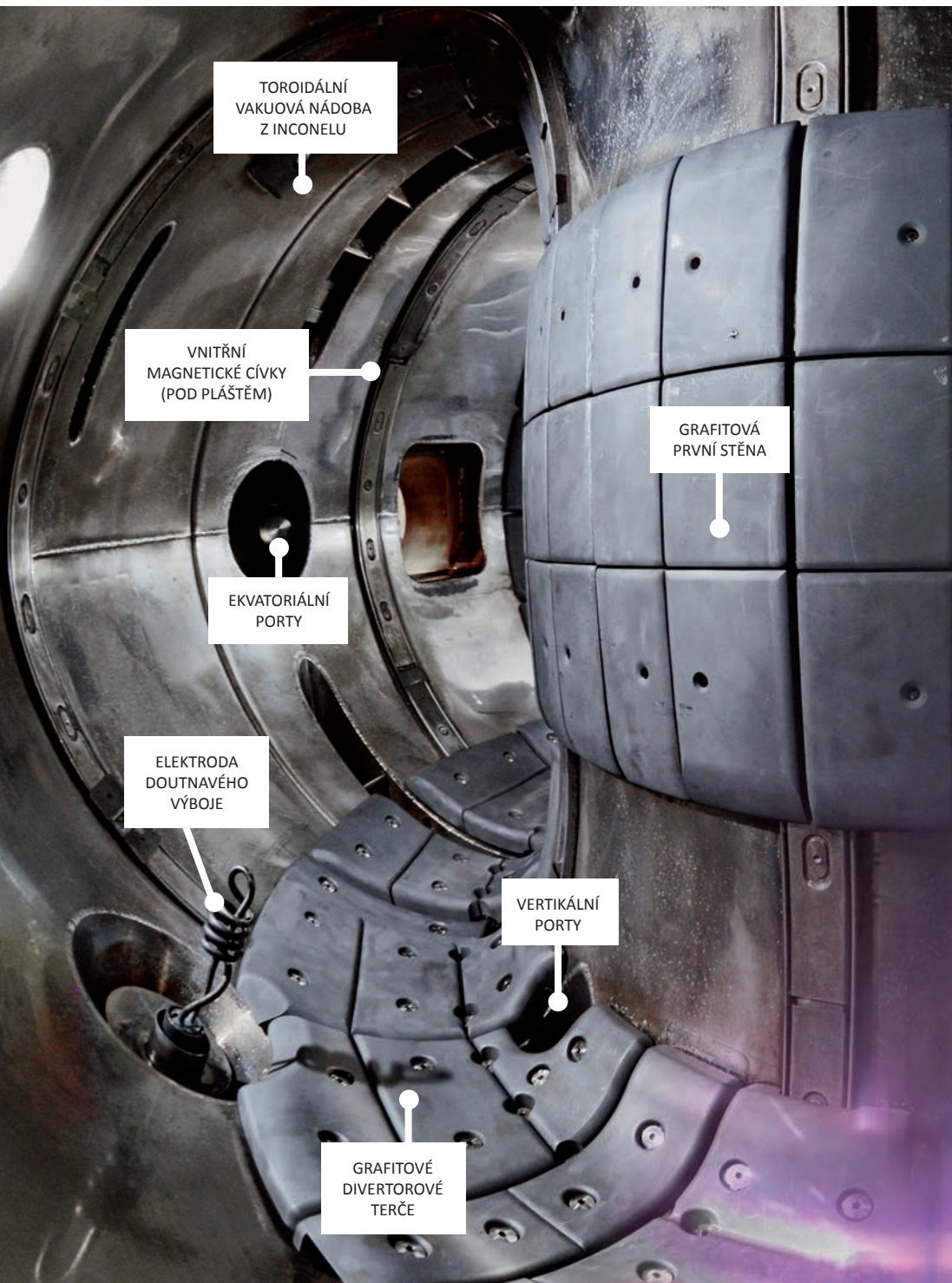


NAPÁJECÍ PŘÍVODY  
MAGNETICKÝCH CÍVEK

MIKROVLNNÝ REFLEKTOMETR

ANALYZÁTOR  
NEUTRÁLNÍCH  
ČÁSTIC

NAPÁJECÍ ZDROJE  
ANALYZÁTORU  
NEUTRÁLNÍCH  
ČÁSTIC



TOROIDÁLNÍ  
VAKUOVÁ NÁDOBA  
Z INCONELU

VNITŘNÍ  
MAGNETICKÉ CÍVKY  
(POD PLÁŠTĚM)

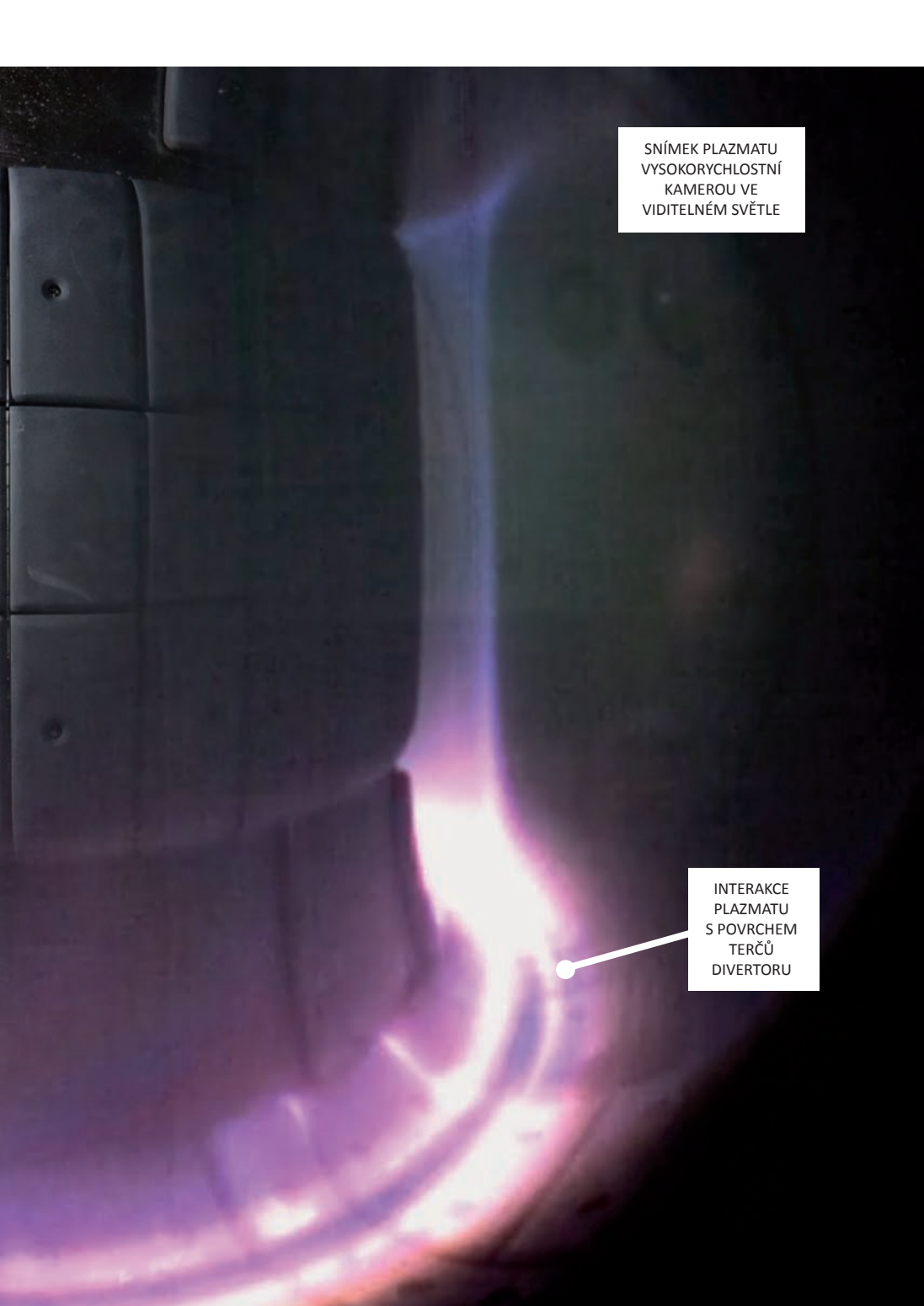
GRAFITOVÁ  
PRVNÍ STĚNA

EKVATORIÁLNÍ  
PORTY

ELEKTRODA  
DOUTNAVĚHO  
VÝBOJE

VERTIKÁLNÍ  
PORTY

GRAFITOVÉ  
DIVERTOROVÉ  
TERČE



SNÍMEK PLAZMATU  
VYSOKORYCHLOSTNÍ  
KAMEROU VE  
VIDITELNÉM SVĚTLE

INTERAKCE  
PLAZMATU  
S POVRCHEM  
TERČŮ  
DIVERTORU





Dvojice rázových generátorů

Pro provoz tokamaku je potřeba v reálném čase monitorovat základní parametry plazmatu, jako je prostorové rozložení teploty, tlaku a hustoty elektronů a iontů nebo obsah nečistot v plazmatu, a identifikovat probíhající procesy, jako jsou transport plazmatu, elektrický proud nebo změny magnetického pole. Měření a sledování parametrů plazmatu komplikuje jeho vysoká teplota, která až na výjimky (Langmuirovy a ball-pen sondy) vylučuje použití kontaktních senzorů. Proto je diagnostika plazmatu postavena především na měření a analýze elektromagnetického pole a záření. Pasivní metody sledují magnetické a elektrické pole, rentgenové záření, radiové záření, viditelné a infračervené záření nebo neutrální částice a ionty vylétávající z plazmatu. Aktivní metody analyzují záření, které je emitováno při interakci plazmatu s laserovými, mikrovlnnými nebo částicovými svazky.

Tokamak COMPASS je vybaven následujícími diagnostickými přístroji.

- Magnetická diagnostika (400 cívek):
  - Rogowského cívky,
  - indukční smyčky,
  - diamagnetické cívky,
  - pick-up (Mirnovovy) cívky,
  - sedlové cívky.
- Mikrovlnná diagnostika:
  - 2mm interferometr,
  - okrajový mikrovlnný reflektometr K & Ka pásma,
  - ECE/EBW radiometr.

- Spektroskopická a optická diagnostika:
  - Thomsonův rozptyl s vysokým rozlišením pro středové a okrajové plazma,
  - dvě rychlé kamery pro viditelné světlo,
  - fotomultiplikátory,
  - HR2000+ spektrometry pro blízké UV, viditelné a blízké infračervené záření,
  - HR2000+ spektrometr pro H & D vyzářování,
  - rychlé AXUV bolometry,
  - polovodičové detektory rentgenového záření,
  - scintilační detektor a kamera pro tvrdé rentgenové záření,
  - infračervená kamera, rychlá divertorová termografie.
- Svazková a částicová diagnostika:
  - neutronové scintilační detektory,
  - diagnostika používající lithiový svazek (BES, ABP),
  - analyzátor neutrálních částic,
  - spektroskopie rekombinace výměnou náboje (tzv. *charge exchange*),
  - detekce fúzních produktů.
- Elektrostatické sondy:
  - horizontální a vertikální reciproké sondové manipulátory,
  - pole divertorových Langmuirových a ball-pen sond,
  - Langmuirovy sondy v limiterových dlaždicích,
  - U-sonda.

Kontrolní místnost tokamaku COMPASS



Tokamak COMPASS je ovládán systémem řízení plazmatu v reálném čase. Tento systém v průběhu experimentálního výboje nastavuje parametry plazmatu, například elektrický proud tekoucí plazmatem, polohu a tvar plazmatu uvnitř vakuové komory nebo hustotu plazmatu. Díky řízení v reálném čase je možné studovat vlastnosti plazmatu za kontrolovaných podmínek. Další důležitou funkcí systému řízení je ochrana tokamaku před stavy, které by ho mohly poškodit.

Charakteristickým rysem systému je velice rychlá odezva. Jádro řídicího systému tokamaku COMPASS zpracovává dvě výpočetní vlákna, první s rychlostí odezvy 50 mikrosekund a druhé s rychlostí odezvy 500 mikrosekund. Kvůli složitosti fyzikálních procesů probíhajících v horkém plazmatu poskytují jednotlivá měřená data pouze dílčí informace a řídicí systém tyto informace zpracovává, vyhodnocuje a výsledky zobrazuje obsluze tokamaku.

## Historie projektu COMPASS

Tokamak COMPASS byl zkonstruován v druhé polovině osmdesátých let ve výzkumné laboratoři UKAEA Culham (United Kingdom Atomic Energy Authority) ve Velké Británii, která v té době představovala a dodnes představuje jedno z klíčových světových center výzkumu termojaderné fúze, mimo jiné i proto, že provozuje největší tokamak na světě JET.

Tokamak COMPASS byl navržen pro studium magnetohydrodynamických nestabilit plazmatu. Původně byl vybaven vakuovou komorou s kruhovým průřezem, ale již v té době bylo známo, že vertikálně elongované plazma s průřezem ve tvaru písmena D poskytuje plazmatu vyšší stabilitu, a to je pak schopno dosáhnout vyšších parametrů. Proto byl COMPASS v roce 1992 přestavěn, získal vakuovou komoru s průřezem D a nové označení COMPASS-D. Současně byl vybaven mikrovlnným ohřevem plazmatu pomocí elektromagnetických vln na elektronové cyklotronní frekvenci (ECRH) s frekvencí 60 GHz a výkonem až 1,5 MW. Vzhledem k dosaženým parametrům byl schopen pracovat v tzv. H-módu, režimu s vysokým udržením energie v plazmatu. Během devadesátých let pracovala na tokamaku COMPASS-D v UKAEA řada špičkových vědců z celého světa a podařilo se jim získat mnoho významných výsledků v oblasti stability plazmatu a porozumění fyzice H-módu a doprovodných nestabilit. Koncem devadesátých let se na tomto zařízení například podařilo poprvé na světě prokázat vliv tzv. vnějších poruchových polí na potlačení nestabilit doprovázejících H-mód (tzv. ELMy) a dosažené výsledky se posléze staly základem pro celosvětově úsilí při vývoji této metody pro tokamak ITER.

Během devadesátých let probíhal v UKAEA souběžně s výzkumem na tokamaku COMPASS-D také program tzv. sférických tokamaků, který byl ve fázi konstrukce nového zařízení – tokamaku MAST. Toto zařízení bylo dokončeno koncem devadesátých let. Původní záměr provozovat oba tokamaky současně se ale ukázal finančně a personálně nerealistický. Proto byl provoz tokamaku COMPASS-D pozastaven a Evropská komise, resp. EURATOM, který původně spolufinancoval konstrukci tokamaku, hledal nového provozovatele, protože vědecký potenciál tokamaku ještě nebyl zdaleka vyčerpán. V té době se ukazovala čím dál vyšší relevance tokamaku COMPASS-D k projektu ITER. Stejný tvar plazmatu, který byl ovšem v případě COMPASS-D desetkrát menší, nabízel vysoký potenciál poskytovat důležitá data

pro škálování procesů směrem k tokamaku ITER a provádět flexibilně dedikované experimenty.

Předběžný zájem o tokamak vyjádřilo několik států, které byly signatáři Evropské dohody o fúzním výzkumu EFDA (European Fusion Development Agreement). Protože se Česká republika připojila k EFDA již v roce 1999, mohla o tokamak také projevit zájem.

Ústav fyziky plazmatu AV ČR, v. v. i., (ÚFP), který byl pověřen koordinací výzkumu termojaderné fúze v rámci České republiky, v té době provozoval malý tokamak CASTOR s kruhovým průřezem plazmatu. Tokamak, který ÚFP získal z Kurčatova ústavu v Moskvě v roce 1975 a zprovoznil v roce 1977, prošel za 25 let provozu několika modernizacemi, avšak vzhledem ke svým parametrům, limiterové geometrii plazmatu a omezenému diagnostickému vybavení postupně ztrácel relevanci k aktuálním výzkumným tématům. Proto již počátkem nového milénia začala skupina studentů a mladých vědeckých pracovníků připravovat projekt přestavby tokamaku CASTOR na zařízení s tzv. divertorovou konfigurací a vertikálně elongovaným plazmatem.

Vyzdvihnutí tokamaku COMPASS z laboratoře UKAEA v září 2007





Slavnostní odhalení tokamaku v dubnu 2008

Když se v roce 2004 objevila informace o možnosti převzít moderní tokamak COMPASS-D, začala skupina pod vedením mladého pracovníka Radomíra Pánka za významné podpory tehdejšího ředitele ÚFP Pavla Chrásky připravovat rozvalu o finanční a personální náročnosti případné instalace tohoto zařízení v ÚFP. Brzy se ukázalo, že by si akce vyžádala na tu dobu pro vědecký projekt v České republice neobvykle vysoké investiční náklady, a to kvůli potřebě vybudovat novou experimentální halu, nové napájecí zdroje a další podpůrné technologie. Přesto ÚFP nakonec vyjádřil o tokamak zájem a zahájil jednání s klíčovými evropskými laboratorými v oblasti fúzního výzkumu, jejichž podpora byla nutná nejen z odborného, ale také z politického hlediska. Nakonec se ÚFP podařilo ve výběrovém řízení uspět a bylo rozhodnuto, že COMPASS-D bude poskytnut do České republiky. Avšak tím teprve začala těžká a složitá cesta. Prvním úkolem bylo získat od EURATOM, resp. EFDA, status preferenčního projektu, který mimo jiné znamenal finanční příspěvek od EURATOM až do výše 40 % investičních nákladů. Proto bylo nutné projít náročným dvoukolovým oponentním řízením. Byl vypracován detailní projekt celého záměru, který byl následně obhajován před dvěma mezinárodními komisemi složenými z předních fúzních odborníků. To se úspěšně podařilo v rekordně krátké době zhruba jednoho roku a EURATOM status preferenčního projektu schválil.

Souběžně s žádostí na EURATOM bylo nutné zajistit v té době nebyvalou finanční dotaci na realizaci nové výzkumné infrastruktury i v tuzemsku. To se také po řadě jednání podařilo a celkové investiční náklady ve výši 400 mil. Kč byly hrazeny přibližně rovným dílem z prostředků poskytnutých vládou ČR, Akademií věd ČR, společenstvím EURATOM a ÚFP.

Technická příprava projektu byla neméně náročná. Jedním z hlavních problémů bylo zajistit pro tokamak COMPASS (tento název byl používán pro zařízení instalované v ÚFP) elektrický příkon cca 70 MW po dobu alespoň jedné sekundy.

Tak vysoký příkon ale nebylo možné získat z elektrické sítě vzhledem k maximálnímu dostupnému příkonu 1 MW. Proto bylo nutné vyvinout speciální napájecí systém využívající akumulace energie v rotační formě pomocí rázových generátorů. Vzhledem k unikátnosti celého systému nebylo ovšem snadné najít dodavatele takového systému. Další výzvy čekaly při návrhu a realizaci experimentální haly a velkých monolitických konstrukcí nebo při vývoji speciálního řídicího systému. Vše se nakonec podařilo připravit v rekordně krátkém čase během cca jednoho a půl roku a v polovině roku 2006 započala výstavba experimentální haly, montážní haly a nové administrativní budovy. Paralelně se stavebními pracemi probíhal návrh a konstrukce systému napájení. Stavební práce byly dokončeny devět měsíců od zahájení a tokamak COMPASS, který byl v té době demontován pracovníky ÚFP v anglickém Culhamu, mohl být transportován a usazen na své finální umístění v nové experimentální hale. Vysoká náročnost načasování stavebních prací, technologické připravenosti a transportu tokamaku vyvolávala v realizačním týmu napětí, avšak díky společnému úsilí projektového týmu ÚFP a dodavatelských organizací všechno proběhlo úspěšně.

Samotný tokamak byl v UKAEA demontován během čtyř návštěv skupiny fyziků a techniků ÚFP. Z důvodu zjednodušení a urychlení prací jak při demontáži v Culhamu, tak i při následné montáži v Praze, bylo rozhodnuto transportovat

Čestní hosté na slavnostní inauguraci tokamaku COMPASS: zleva ministr průmyslu a obchodu Martin Říman, prof. Hardo Bruhns, velvyslankyně UK v ČR Linda Duffield, ředitel EURATOM Octavio Quintana Triaz a ředitel UKAEA Sir Chris Llewellyn Smith





Tým tokamaku COMPASS při vytvoření prvního plazmatu 9. prosince 2008

Dosažení H-módu 3. prosince 2012. Zleva Pavel Háček, Vladimír Weinzettl, Jozef Varju, Radomír Pánek, Jan Stöckel, Petr Vondráček, Martin Hron, Josef Havlíček a Jan Horáček



vlastní tokamak vcelku jako nadrozměrný náklad. Největší překážku představoval starý mostový jeřáb v hale tokamaku v Culhamu, který měl nosnost pouhých 15 tun, zatímco odhad váhy odstrojeného tokamaku byl 25 tun. Proto bylo rozhodnuto tokamak vyzvednout skrze demontovanou střechu haly pomocí externího jeřábu. Vzhledem k velikosti haly a váze tokamaku byl použit v tehdejší době největší dostupný jeřáb ve Velké Británii s nosností 800 tun. I tento jeřáb byl ale schopen za podmínek omezeného přístupu k laboratoři zvednout náklad o maximální váze pouze 25 tun, což bylo na hraně odhadované hmotnosti tokamaku. Potenciální riziko neúspěchu tím nepříjemně narostlo. Pro vyzvednutí bylo navíc nezbytné provést mimo halu řadu přípravných prací pro příjezd a instalaci jeřábu, jako například vybetonování masivních opěrných bloků. Samotné vyzvednutí tokamaku trvalo přibližně 12 hodin a podařilo se na první pokus, i když se posléze ukázalo, že váha tokamaku byla skutečně velmi blízko limitu toho, co jeřáb mohl vyzvednout. Tokamak pak byl připevněn na speciální masivní transportní rám, dokonale obedněn a jako nadrozměrný transport s rozměry cca  $4 \times 4 \times 4$  m vyrazil do Prahy, spolu s dalšími pěti nákladními automobily s ostatními díly.

Po příjezdu do ÚFP byl tokamak instalován do již téměř hotové experimentální haly. Krátce po instalaci zařízení do experimentální haly proběhla v dubnu 2008 slavnostní inaugurace tokamaku COMPASS za přítomnosti reprezentantů EURATOM, velvyslankyně Velké Británie, ministra průmyslu a obchodu České republiky a dalších významných hostů.

Během následujících 12 měsíců byl instalován systém napájení tokamaku a řada dalších systémů, především řídicí systém, vakuový systém, bezpečnostní systém pro ochranu osob i zařízení nebo systém pro řízení dopravy pracovních plynů. V Budkerově ústavu jaderné fyziky v ruském Novosibirsku byl v té době pro COMPASS sestavován systém ohřevu plazmatu využívající generace svazku neutrálních atomů deuteria s vysokou energií o celkovém výkonu přes 600 kW.

Intenzivní nasazení týmu v ÚFP, který se v tu dobu postupně významně rozrůstal o další mladé spolupracovníky, vyústilo dne 9. prosince 2008 v úspěšné vytvoření prvního plazmatu. Základní funkce tokamaku tak byly zprovozněny zhruba dva roky od začátku projektu. Poté následovala řada dalších kroků spočívajících v instalaci nových diagnostických a ohřevových systémů a zdokonalování systému řízení. Na základě postupného zvyšování parametrů plazmatu bylo v roce 2012 úspěšně dosaženo režimu H-módu. Tím se tokamak COMPASS zařadil mezi přední světové tokamaky s vysokou relevancí k projektu ITER a během svého provozu v ÚFP umožnil realizovat řadu vědeckých experimentů v oblasti fyziky termojaderného plazmatu se zásadními dopady pro projekt ITER.

## Výzkumná témata řešená na tokamaku v bodech

- fyzika H-módu
- charakterizace módu s vysokým udržením a doprovodných nestabilit
- charakterizace kvazikoherentních módů
- fyzika pedestalu
- práh L–H přechodu, izotopický efekt
- nestability ELM, jejich kontrola pomocí magnetické perturbace a vertikálních rázů





Výzkumný tým při výstřelu č. 10 000 (30. dubna 2015)

- fyzikální podstata kontroly okrajových nestabilit v tokamacích
- studium zonálních toků a alfvénovských módů v plazmatu
- transport v okrajovém plazmatu a *scrape-off layer*
- charakterizace nemaxwellovského rozdělení energie elektronů v okrajovém fúzním plazmatu

Mezinárodní experimentální škola EMTRAIC 2016

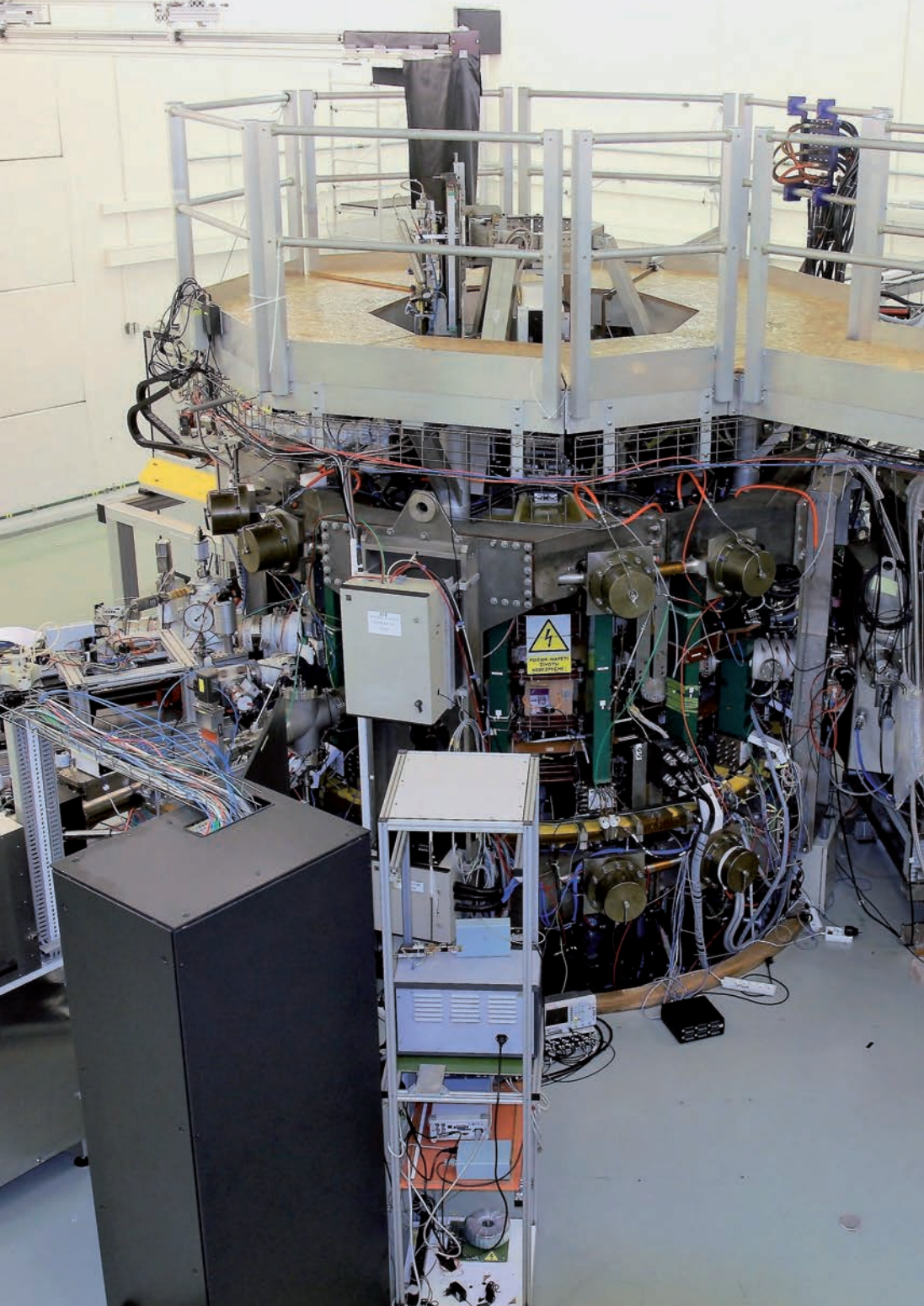


- studium dynamiky okrajové transportní bariéry
- turbulentní struktury a intermitence v okrajovém plazmatu
- výzkum okraje plazmatu pomocí dvojice hluboko zasunutých sond
- MHD rovnováha a nestability
- měření poloidální závislosti magnetického pole generovaného reakcí plazmatu na rezonanční magnetickou poruchu
- charakterizace geodezického akustického módu
- interakce plazmatu se stěnou
- kvantitativní předpověď tepelného toku na okraji plazmatu v tokamacích
- rychlé měření tepelného toku v divertorové oblasti pomocí ball-pen sond se submikrosekundovým časovým rozlišením
- fyzika ubíhajících elektronů a disrupcí
- ztráty ubíhajících elektronů v MHD aktivním plazmatu
- vývoj pokročilých diagnostických metod
- integrované modelování a vývoj kódů

## Výchova nové generace odborníků

Důležitou součástí aktivit na tokamaku COMPASS je výchova a příprava odborníků. Již více než 10 let probíhá na Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT v Praze (FJFI) ve spolupráci s ÚFP výuka studentů v oboru fyziky a techniky termojaderného plazmatu a v nedávné době zde byl zahájen také navazující doktorský studijní program. Studenti řeší na tokamaku výzkumné úkoly bakalářského, magisterského i doktorského studia. V rámci doktorského studia studenti obvykle získávají v ÚFP i pracovní úvazek a mohou se tak vědecké práci věnovat naplno.

Celosvětově unikátní jsou každoročně pořádané mezinárodní experimentální školy SUMTRAIC (Summer Training Course) a EMTRAIC (Erasmus Mundus Training Course). V jejich rámci studenti získávají praktické znalosti a dovednosti v oblasti provozu tokamaků a fyziky termojaderného plazmatu. Druhá z výše zmíněných škol je součástí evropského vzdělávacího programu Erasmus Mundus Fusion Master.



ÚFP má v současné době šest výzkumných oddělení:

- Tokamak
- Laserové plazma
- Materiálové inženýrství
- Impulsní plazmové systémy
- Plazmochemické technologie
- Centrum TOPTEC.

Výzkum termojaderné fúze je začleněn do mezinárodního programu EURATOM v rámci konsorcia EUROfusion. Ústav od roku 2009 provozuje tokamak COMPASS a současně se podílí na využívání společného evropského tokamaku JET a dalších konsorciálních zařízení, tokamaků ASDEX-U a TCV, vyvíjí diagnostické přístroje pro fúzní reaktory ITER a DEMO a intenzivně spolupracuje s vědeckými pracovišti po celém světě.

Výzkumný tým tokamaku COMPASS se zabývá experimentálním a teoretickým výzkumem fyziky vysokoteplotního plazmatu, které je drženo magnetickým polem s cílem realizace termojaderné reakce jako nevyčerpatelného a čistého zdroje energie. K hlavním výzkumným cílům patří především studium procesů a tepelných toků v okrajovém plazmatu, studium přechodu do provozních režimů s vysokým udržením energie a souvisejících plazmových nestabilit, studium ubíhajících elektromagnetických nebo studium disrupcí plazmatu. Široká experimentální základna, komplexní přístup, hluboké propojení experimentálních a teoretických prací a rozsáhlá spolupráce se zahraničními i domácími výzkumnými organizacemi umožňují ústavu dosahovat ve světovém měřítku unikátních a špičkových výsledků.

V roce 2019 uběhlo deset let od zahájení vědeckého využívání tokamaku COMPASS pro výzkum termojaderné fúze. Pokročilá geometrie plazmatu a schopnost dosažení H-módu s vysokým udržením energie umožnily široké využití tokamaku ve výzkumu fyziky termojaderného plazmatu. K hlavním cílům výzkumu patřilo studium procesů v okrajovém plazmatu, tepelných toků v plazmatu, studium přechodu do provozních režimů se zvýšeným udržením energie a souvisejících plazmových nestabilit nebo studium ubíhajících elektronů. Tokamak se stal součástí evropské sítě fúzních experimentálních zařízení a zapojil se do celosvětového fúzního výzkumu. Výsledky získané na tokamaku COMPASS zařadily Českou republiku mezi země s pokročilým výzkumem termojaderné fúze.

#### V EDICI VĚDA KOLEM NÁS PŘIPRAVUJEME:

M. Hlavačka, V. Kessler, D. Smrček: **Databáze dějin všedního dne**

Jaroslav Pánek: **Josef Janáček**

L. Kollerová, A. Pospíšilová, P. Janošová: **Šikana na školách**

#### V EDICI MIMO JINÉ VYŠLO:

Jiří Padevět: **Vyhlažovací tábor Kulmhof/Chełmno a jeho české oběti**

Pavel Žďárský: **Alois Musil**

H. Ulbrechtová, S. Ulbrecht, K. S. Jobst: **Krym v dějinách, literatuře a médiích**

Edice Věda kolem nás | Výzvy a otázky

*Tokamak COMPASS* | S. Entler, R. Pánek, M. Hron, V. Weinzettl, A. Havránek

Vydalo Středisko společných činností AV ČR, v. v. i. Grafická úprava dle osnovy Jakuba Krče a sazba Serifa. Odpovědná redaktorka Petra Královcová. Vydání 1., 2020. Ediční číslo 12682. Tisk **SERIFA**<sup>®</sup>, s. r. o., Jinonická 80, 158 00 Praha 5.

ISSN 2464-6245

Evidováno MK ČR pod e. č. E 22344

Další svazky získáte na:

[www.vedakolemnas.cz](http://www.vedakolemnas.cz) | [www.academia.cz](http://www.academia.cz)