

Jaderná fúze: Věčně vzdálený sen, který se blíží realitě

ET epochtimes.cz/2024/09/14/jaderna-fuze-vecne-vzdaleny-sen-ktery-se-blizi-realite

Kevin Stocklin

14. září 2024

„Jaderná fúze je technologicky nejnáročnější způsob výroby energie, o jaký se kdy lidstvo pokusilo,“ řekl fyzik Robert Fedosejevs.

Výroba téměř neomezené, čisté a bezuhlíkové energie z jaderné fúze – vize, která se zdá být stále nedosažitelná – učinila v posledních několika letech významné kroky k tomu, aby se stala realitou.

Po nedávných významných objevech ve fyzikálních laboratořích zaměřených na generování jaderné fúze se toto úsilí nyní rozšířilo do soukromého sektoru, kde se množí začínající společnosti, které se snaží tento proces učinit komerčně životaschopným – a ziskovým.

Pokud se jim to podaří, bude odměnou bohatý zdroj energie prakticky bez uhlíku, který nezabírá rozsáhlé plochy přírodní krajiny a pobřežních oblastí, jako je tomu u solárních panelů a větrných turbín. A na rozdíl od dnešních jaderných reaktorů produkuje energie z jaderné fúze relativně málo radioaktivního odpadu.

Při fúzi se používají izotopy vodíku tritium a deuterium, nikoliv těžké prvky, jako je uran a plutonium, které se používají při štěpení. Konečnými produkty fúzní reakce jsou helium a neutrony.

Kromě toho, že jaderná fúze produkuje méně odpadu, nepředstavuje podle vědců riziko vzniku řetězových reakcí, jako byla ta v Černobylu.

Pokud se štěpná elektrárna během havárie vypne, „může ještě nějakou dobu vyrábět velké množství energie ze zbytkové aktivity v reaktoru, a proto se taví,“ řekl Jean Barrette, emeritní profesor fyziky na McGillově univerzitě, deníku Epoch Times.

„Zatímco u jaderné fúze vypnete vypínač a je po všem; nemá žádné zbytkové záření.“

Přestože potenciální přínosy jaderné fúze jsou rozmanité, její využití pro výrobu elektřiny zůstává obtížným úkolem.

„Základní proces je dobře známý, a to je samozřejmě to, co pohání hvězdy,“ řekl Robert Fedosejevs, profesor elektrotechniky na Albertské univerzitě a specialista na laserové technologie, deníku Epoch Times. Ale „fúze je technologicky nejnáročnější přístup k výrobě energie, o jaký se kdy lidstvo pokusilo“.

V nitru hvězd vzniká díky obrovské gravitaci intenzivní teplo a tlak, který způsobuje fúzi několika jader vodíku do jediného jádra helia. Při tomto procesu dochází k mírné ztrátě hmotnosti a tato „chybějící“ hmotnost se přeměňuje na obrovské množství energie podle slavné rovnice Alberta Einsteina: $e = mc^2$.

Bez gravitace Slunce je však na Zemi problémem nejen vytvořit kontinuální fúzi, ale také ji provést způsobem, který nevyžaduje více energie, než kolik se jí vyrobí.

V prosinci roku 2022 tuto hranici překročilo zařízení NIF (National Ignition Facility) Národní laboratoře Lawrence Livermora v Kalifornii. Díky práci přibližně 1 000 amerických a mezinárodních vědců vytvořil NIF fúzní reakci, která poprvé vyprodukovala více energie, než spotřebovala.

Zaměstnanci pózují při fotografování v srdci National Ignition Facility v Lawrence Livermore National Laboratory v kalifornském Livermoru. (Steve Jurvetson / CC BY 2.0)

Toho bylo dosaženo vypálením 192 souběžných laserových paprsků do malé kapsle deuteria a tritia (DT) o velikosti zrnka pepře, které se stlačily a zahřály na teplotu mezi 50 a 100 miliony stupňů Kelvina, dokud se nesloučily, přičemž produkty byly iont helia, neutron a energie.

„V podstatě vyrobili několik mega joulů energie z fúze, přičemž do ní šly pouze dva mega jouly energie z laseru,“ řekl Fedosejevs. „To je vědecké měřítko, o které se lidé snažili posledních 50 až 60 let, aby alespoň ukázali, že v laboratoři lze vyrobit více energie na výstupu než na vstupu.“

„Takže není pochyb o tom, že fúze funguje. Jde o to, jak toho technicky dosáhnout jako udržitelného zdroje energie.“

Přechod od laboratoří k funkčním reaktorům

Na přechod od jednorázové, nanosekundové reakce v laboratoři ke spolehlivé a nákladově efektivní výrobě elektřiny se zaměřují vědci, inženýři a investoři po celém světě.

„Jsme velmi, velmi daleko od funkčních zařízení,“ řekl Barrette. „Potřebujete úspěch v mnoha a mnoha směrech.“

„Není to jedna věc, která jim chybí. Právě teď jim chybí mnoho věcí, které všechny musí fungovat, aby vznikl efektivní reaktor.“

První z nich je, jak vytvořit trvalé reakce prostřednictvím fúze, aby bylo možné vyrábět elektřinu pro základní zatížení. Vývoj v této oblasti se ubírá dvěma cestami: laserovým inerciálním udržením fúze, což je proces používaný v NIF, a magnetickým udržením fúze, které využívá magnetické pole k simulaci intenzivní gravitace uvnitř hvězd.

Laserová fúze, kterou Fedosejevs popisuje jako „mikroimpulzi ve vakuové nádobě poháněnou ultrakrátkým laserovým pulsem“, zaujala vedoucí postavení, pokud jde o získání čisté energie z reakce. Terče s palivem DT jsou pečlivě rozmístěny a všechny lasery jsou přesně zaměřeny do prostoru o šířce lidského vlasu.

Poté se jednou vystřelí a pak se musí znovu nabít a zaměřit. Tento proces umožňuje přibližně jednu reakci denně.

Aby se lasery staly životaschopnými pro výrobu elektřiny, musely by podle Barretta vypálit alespoň 100krát za sekundu, a přestože vyřešení tohoto a dalších problémů není nemožné, „jsou nyní stále ve fázi výzkumu“.

Inovátoři v této oblasti pracují na vývoji výkonnějších laserů, které mohou pracovat mnohem vyšší rychlostí, aby mohly vyrábět energii nepřetržitě.

Srpnová zpráva v časopise *Physics Today*, kterou napsali jaderní vědci Stefano Atzeni a Debra Callahanová, však uvádí, že fúze na bázi laseru v NIF byla prováděna pomocí 30 let staré laserové technologie a že pokrok v technologii laserů a terčů nyní pokročil natolik, že laserová fúze je nadále považována za potenciálně komerčně životaschopnou.

(Nahoře) Technici pracují na terči (vpravo) v National Ignition Facility (NIF) v Lawrence Livermore National Laboratory. (Dole vlevo) Ilustrační obrázek ukazuje terčovou peletu NIF uvnitř hohlraumové kapsle s laserovými paprsky vstupujícími otvory na obou koncích. Paprsky stlačují a zahřívají terč na podmínky nezbytné pro vznik jaderné fúze. (Dole vpravo) Pohled na kryogenně chlazený terč, jak jej vidí laser přes vstupní otvor hohlraumové kapsle. (Ministerstvo energetiky USA)

Na rozdíl od laserové fúze je magnetická fúze založena na silném magnetickém poli, které vytváří podmínky nezbytné pro uskutečnění fúze.

Při magnetické fúzi využívá zařízení zvané tokamak, jehož konstrukce vznikla v Sovětském svazu v 50. letech 20. století, magnetické pole k omezení, stlačení a ohřevu DT plazmatu v reaktoru ve tvaru donutu zvaném torus. Jakmile dojde k fúzi, produktem je iont helia a neutron. Tyto neutrony mohou procházet magnetickým polem a při průchodu jsou zachycovány „přikrývkou“ vně stěny; ta je hlavním zdrojem tepla, které by nakonec generovalo elektřinu.

V průběhu desetiletí od tohoto objevu se vědci snažili vyvinout stále silnější magnety, které by generovaly více energie po delší dobu.

V roce 1982 vytvořila Princetonská laboratoř fyziky plazmatu Tokamak Fusion Test Reactor (TFTR), který stanovil řadu světových rekordů, včetně zahřátí plazmatu na 510 milionů stupňů Celsia, což je mnohem více než 100 milionů stupňů potřebných pro komerční fúzi. Tyto teploty převyšují teploty v centru Slunce, které NASA odhaduje na 15 milionů stupňů Celsia.

V roce 1994 vyrobil TFTR rekordních 10,7 milionu wattů řízené fúzní energie, což by stačilo na napájení více než 3 000 domácností.

Francouzský tokamak ITER, jehož zahájení provozu je naplánováno na rok 2034, bude vytvářet magnetické pole, jehož síla je 280 000krát větší než síla zemského pole.

Anglie provozuje také tokamak zvaný Joint European Torus (JET), kterému se rovněž podařilo vyrobit rekordní množství energie z jaderné fúze. Kromě toho vědci z 35 zemí spolupracují na tokamaku ITER ve Francii, který bude největším supravodivým magnetem, jaký byl kdy postaven, a jehož provoz má být zahájen v roce 2034.

„Bude vytvářet magnetické pole o síle 13 tesla, což odpovídá 280 000násobku magnetického pole Země,“ uvádí se ve zprávě amerického ministerstva energetiky (DOE). Zatímco laserová fúze v současné době vede, pokud jde o prokázaný energetický výkon,

magnetická fúze může být slibnější pro výrobu nepřetržitého energetického výkonu potřebného pro výrobu elektřiny v základním zatížení.

„Tokamaky mohou udržovat plazmové proudy na úrovni megaampérů, což odpovídá elektrickému proudu v nejsilnějších blescích,“ uvádí DOE. „Vědci zabývající se fúzní energií se domnívají, že tokamaky jsou vedoucí koncepcí udržení plazmatu pro budoucí fúzní elektrárny.“

Pozadu nezůstala ani Čína, která vybuodovala experimentální pokročilý supravodivý tokamak v Hefei, který rovněž úspěšně funguje.

(Nahoře) Tokamak laboratoře Princeton Plasma Physics Laboratory, nazvaný National Spherical Torus Experiment-Upgrade (NSTX-U).

(Dole) Stroj tokamaku ITER ve francouzském Saint-Paul-Lez-Durance dne 9. září 2021. (Michael Livingston / PPPL Communications, Daniel Cole / AP Photo)

Výzvy týkající se „pláště“

Vedle snahy o vývoj komerčně životaschopných fúzních reakcí je neméně velkou překážkou vyřešení otázky, jak postavit funkční a odolnou fyzickou strukturu, která by tyto reakce zachycovala a čerpala z nich energii.

„Měli jsme nápad ‚dáme slunce do láhve‘ a ukázalo se, že nejtěžší část nebyla ve skutečnosti vytvořit slunce,“ řekl Eric Emdee, výzkumný fyzik z Princeton Plasma Physics Laboratory, deníku Epoch Times.

„Vytvořili jsme plazma s velmi vysokou teplotou, teplotou optimální pro vznik termojaderné fúze.“

„Nejtěžší je vytvořit tu láhev.“

V reaktoru tokamak je plazma DT, obsažené v magnetickém poli, obklopeno fyzickým pláštěm (zdí), nazývanou plazmový obklad (PFC), která musí odolat 100 milionům stupňů tepla vznikajícího při samotné reakci.

Jsme ve fázi, kdy přecházíme od experimentů k návrhům prototypů reaktorů.

Eric Emdee, výzkumný fyzik, Princeton Plasma Physics Laboratory

Podobně jako při slunečních erupcích uniká během reakcí část plazmatu z magnetického pole a hrozí poškození pláště nádoby. Kromě toho mohou materiály z pláště interagovat s plazmou, zředit ji a snížit schopnost DT se fúzovat.

„Jsme v bodě, kdy přecházíme od experimentů k návrhům prototypů reaktorů, ale stále musíme určit, jak dosáhnout přijatelných interakcí mezi plazmatem a materiály,“ řekl Emdee. „Jak vymyslíme konstrukci stěn nádoby, která bude ekonomická? Jaké materiály bychom mohli použít, aby byly pro plazma nejvhodnější?“

Emdeeho výzkum se zaměřuje na materiály pro PFC, které by mohly tyto problémy vyřešit a odvést teplo tak, aby nedošlo k poškození reaktoru. Zkoumá použití kapalných kovů k odvádění tepla, například kapalného lithia, které by proudilo podél stěny tokamaku.

Vedle problémů s reakcí a ochranou před znečištěním má své problémy i samotná výroba paliva pro jadernou fúzi, která je umocněna nutností vyrábět ho ve velkém množství.

Atzeni a Callahanová píší, že pro laserovou fúzi se v současné době terčíky s palivem vytvářejí ručně v pracovně náročném procesu. Aby se však tato technologie stala komerčně životaschopnou, musely by se v reaktoru každý den, kdy je v provozu, používat miliony palivových terčíků a schopnost hromadné výroby DT paliva zatím nebyla prokázána.

Deuteria je dostatek a lze ho nalézt v mořské vodě, ale tritium se musí „vypěstovat“ z prvků, jako je lithium. Při magnetické fúzi lze tritium vyrábět v samotném tokamaku.

„K tomu potřebujete palivový cyklus, v němž se neutrony z vaší fúzní energie zachytí v lithiu, aby se tritium rozmnožilo, a pak musíte tritium extrahovat a použít jako palivo,“ řekl Fedosejevs.

„Existuje tedy řada detailů, které jsou stále velkou výzvou, ale které se z vědeckého hlediska zdají být řešitelné, i když to zatím nikdo neudělal v takovém měřítku, jaké by byla potřeba pro reaktor.“

(Nahoře) Pracovník kontroluje zkušební tokamakový fúzní reaktor.

(Dole vlevo) Cílem návrhu terče Saturn je prozkoumat možnost demonstrace zážehu v National Ignition Facility pomocí konfigurace Polar-Direct-Drive. Kapsle je upevněna na speciálně navrženém prstenci pomocí pavoučích hedvábných vláken. (Vpravo dole)

Ilustrace ukazuje simulaci, která pomocí kódu GTS Weixinga Wanga zobrazuje turbulence v jádře tokamaku v Argonne National Laboratory. Cílem výzkumníků je posunout fúzní počítačové kódy a související algoritmy blíže k definování vlastností udržení plazmatu potřebných k zažehnutí experimentálního fúzního reaktoru ITER.

(Ministerstvo energetiky USA)

Rostoucí investiční kapitál

Dalším prvkem nezbytným pro rozvoj elektřiny z jaderné fúze jsou peníze. I zde však existuje důvod k optimismu.

V posledních letech se množí start-upy, které se snaží vyvinout komerční fúzi. Často se jedná o odnože univerzit, které se zabývají výzkumem fúze, jako jsou MIT a Princeton, a často spolupracují s akademickou obcí na výzkumu a vývoji.

Mnohé z nich získaly vládní dotace. V květnu 2023 oznámilo Ministerstvo energetiky USA dotace ve výši 46 milionů dolarů na rozvoj komerční fúze, které byly poskytnuty osmi společnostem

v sedmi státech. Příjemci byly společnosti Commonwealth Fusion Systems, Focused Energy Inc, Princeton Stellarators Inc, Reolta Fusion Inc, Tokamak Energy Inc, Type One Energy Group, Xcimer Energy Inc a Zap Energy Inc.

„Během pěti až deseti let vyřeší těchto osm příjemců vědecké a technologické problémy a vytvoří návrhy pilotního zařízení pro jadernou fúzi, které pomohou přivést jadernou fúzi k technické i komerční životaschopnosti,“ uvedlo Ministerstvo energetiky USA (DOE).

V červnu DOE oznámilo svou Strategii pro fúzní energii 2024, která poskytne dalších 180 milionů dolarů na vývoj elektřiny založené na fúzní reakci.

„Vývoj energie z jaderné fúze jako čistého, bezpečného a vydatného zdroje energie se stal celosvětovým závodem a USA zůstanou v čele,“ uvedl v prohlášení náměstek ministerstva energetiky David Turk.

Současně se za poslední dva roky zdvojnásobil soukromý investiční kapitál do jaderné fúze a podle časopisu *EnergyWorld* dosáhne v roce 2023 celkové výše téměř šest miliard dolarů.

V loňském roce podepsala společnost Helion Energy, start-up se sídlem ve státě Washington, dohodu se společností Microsoft o dodávce 50 megawattů elektřiny z jaderné fúze do roku 2028.

„Není pochyb o tom, že nás čeká ještě hodně práce, ale jsme přesvědčeni o tom, že jsme schopni dodat první fúzní elektrárnu na světě,“ uvedl v prohlášení spoluzakladatel a generální ředitel společnosti Helion David Kirtley.

Zatímco investoři vyjadřují ambice, že komerční fúze by se mohla stát realitou do deseti let, mnozí zasvěcení vidí před sebou delší cestu.

„Pokud se jim podaří udržet toto tempo [investic], pak si myslím, že jsme na dobré cestě k tomu, abychom se do poloviny 30. let dočkali demoverzí a snad i výstavby konstrukčních reaktorů na začátku 40. let,“ řekl Fedosejevs.

Emdee má opatrnější výhled.

„Řekl bych, že optimistické odhady dodávek energie do sítě z jaderné fúze jsou možná ve 40. letech 20. století,“ řekl. „Ale konzervativnější odhady, které osobně považuji za realističtější, jsou 60. nebo 70. léta 20. století.“

—ete—