

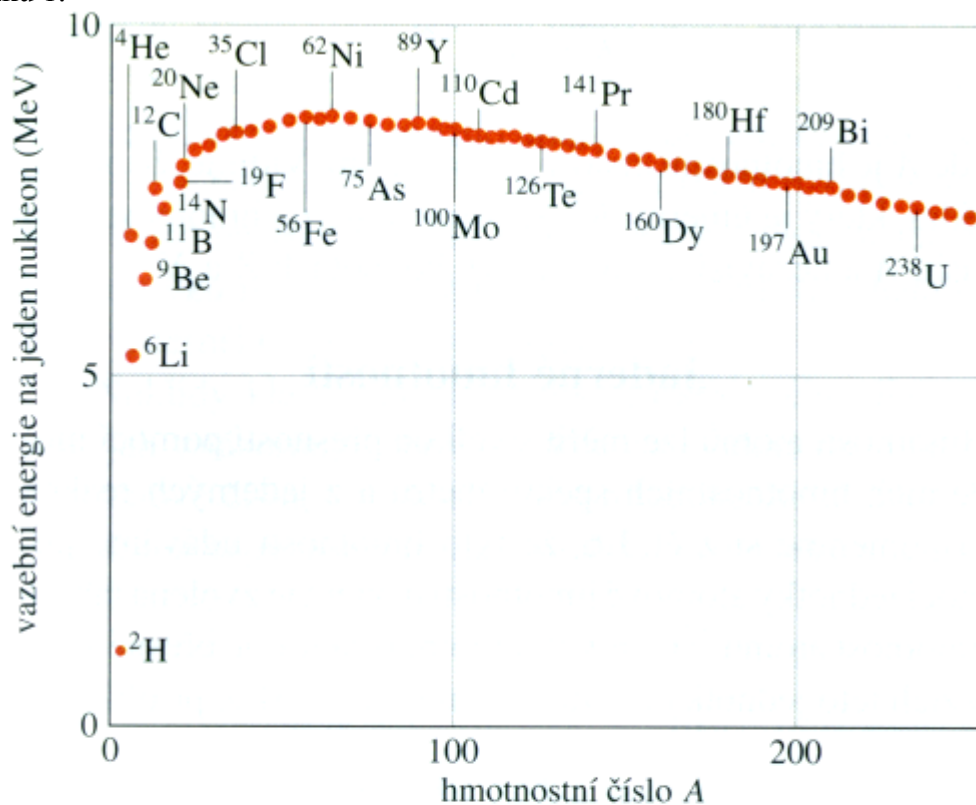
Termojaderná fúze

Jaderná vazebná energie

Celkovou energii potřebnou k roztrhání jádra až na jednotlivé protony a neutrony můžeme vypočítat ze vztahu $Q = \Delta mc^2$, kde hmotnostní úbytek $\Delta m = Zm_p + Nm_n - m_j$.

Nazýváme ji vazebnou energií jádra. Při konkrétních výpočtech vazbové energie atomových jader se ale užívá hmotností celých atomů, které lze snadněji zjistit a bývají v tabulkách.

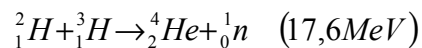
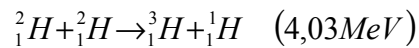
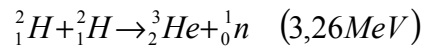
Příklad výpočtu vazbové energie ${}^4\text{He}$. Vezmeme-li hmotnost dvou atomů vodíku ($2 \cdot 1,007825u$) a dvou neutronů ($2 \cdot 1,008665u$) a odečteme hmotnost atomu helia ($4,002604u$), dostaneme výsledek $\Delta m = 0,030377u$. Hmotnost dvou elektronů, které jsme připočetli v atomech vodíku, jsme odečetli v atomu helia, takže výsledek neovlivnily. Pro vazbovou energii obdržíme $Q = 28,3\text{MeV}$. Velmi poučné je sledovat hodnotu vazebné energie připadající na jeden nukleon v jádře v závislosti na hmotnostním čísle. Dostaneme ji vydělením vazebné energie jádra jeho hmotnostním číslem $\left(\frac{Q}{A}\right)$. Tato závislost je zachycena na obrázku 1.



Obr. 1: Vazebná energie na jeden nukleon pro některé typické nuklidy. Nuklid ${}^{62}\text{Ni}$ má největší hodnotu vazebné energie na jeden nukleon ze všech stabilních nuklidů ($8,79460 \pm \pm 0,00003 \text{ MeV/nukleon}$). Všimněme si také, že α -částice (${}^4\text{He}$) má výrazně větší vazebnou energii na jeden nukleon než její sousedé v periodické tabulce, a je tedy obzvlášť stabilní.

Pokles křivky vazebních energií pro velká hmotnostní čísla říká, že nukleony budou pevněji vázány ve dvou středně hmotných nuklidech než v jednom nuklidu s velkým hmotnostním číslem. To znamená, že při jaderném štěpení se může uvolnit energie.

Pokles křivky vazebních energií pro malá hmotnostní čísla říká, že k uvolnění energie může dojít i při sloučení dvou nuklidů s malým hmotnostním číslem do jednoho středně hmotného. Jako příklad uveďme některé reakce mezi těžkými izotopy vodíku:



Této reakci říkáme **jaderná fúze**. Slučování jader je ztíženo působením odpudivé coulombovské síly, která zabraňuje dvěma kladně nabitým částicím přiblížit se natolik, aby se začaly projevovat přitažlivé jaderné síly a napomohly fúzování. Výška Coulombovy potenciálové bariéry závisí na nábojích a poloměrech obou interagujících jader.

Pro dosažení užitečně velkého výkonu je třeba, aby jaderná fúze probíhala v určitém objemu hmoty. Nejnadějnější cestou je takové zvýšení teploty látky, že částice mají už díky svému tepelnému pohybu dostatečnou energii pro překonání Coulombovy bariéry. Takovou reakci nazýváme **termojaderná fúze**.

Při termojaderném výzkumu je zvykem udávat teploty pomocí kinetické energie E_k interagujících částic ze vztahu $E_k = kT$ kde E_k je kinetická energie odpovídající nejpravděpodobnější rychlosti interagujících částic, k je Boltzmannova konstanta a T je teplota v Kelvinech. (př.: $1,3keV$).

Pokožové teplotě odpovídá $E_k \approx 0,03keV$. Částice s takovouto energií nemá však žádnou naději na překonání potenciálové bariéry. Dokonce ani ve středu Slunce, kde $kT = 1,3keV$, nevypadá na první pohled možnost termojaderné fúze nadějně. Přesto ale víme, že k termojaderné fúzi v nitru Slunce dochází a dokonce je to dominantní vlastnost Slunce i ostatních hvězd.

Tuto záhadu lze objasnit, vezmeme-li do úvahy následující skutečnosti:

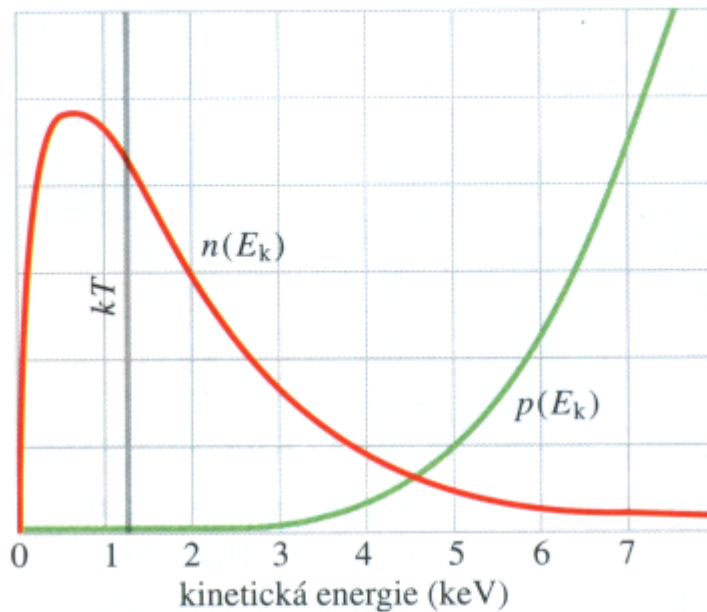
1. Energie určená z rovnice $E_k = kT$ je energie částic s nejpravděpodobnější

rychlostí, definována jako $W = \int_{\varphi_i}^{\varphi_f} dW \int_{V_i}^{V_f} p dV$ (práce spojená se změnou objemu).

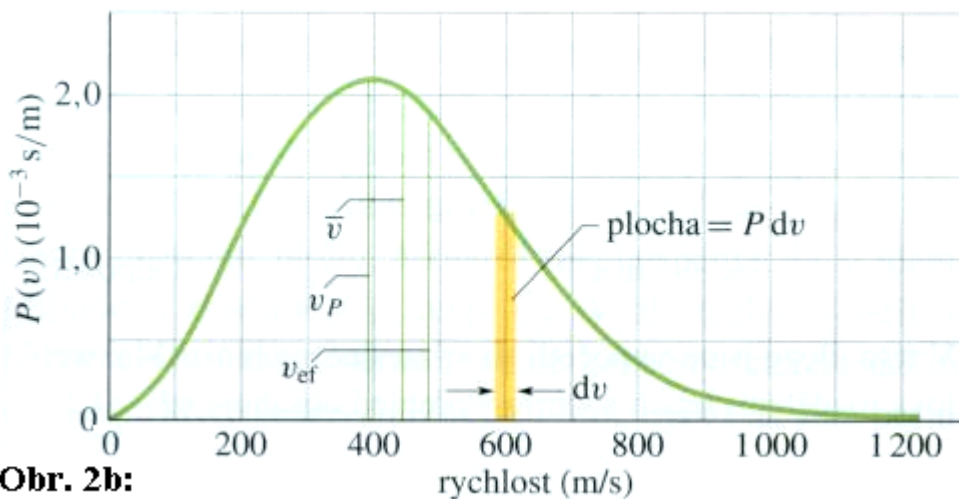
Existuje ale protáhlý chvost částic s mnohem většími energiemi.

2. Výšky potenciálové bariéry, které uvažujeme, jsou spočteny z hodnoty maxima odpovídající křivky. K tunelování bariérou může však docházet i při energiích podstatně nižších, než jsou tato maxima, jak je tomu v případě α - rozpadu.

Na obrázku 2a jsou tyto úvahy znázorněny graficky.



Obr. 2a: Křivka označená $n(E_k)$ udává koncentraci protonů na jednotku energie ve středu Slunce. Křivka označená $p(E_k)$ udává pravděpodobnost průchodu bariérou u proton–protonových srážek při teplotě středu Slunce. Svislou čárou je vyznačena hodnota kT při této teplotě. Všimněte si, že obě křivky jsou vykresleny v grafu s neurčenou (pro každou křivku jinou) stupnicí na svislé ose.



Obr. 2b: Maxwellovo rozdělení rychlostí pro kyslík při teplotě $T = 300 \text{ K}$.

Křivka označená $n(E_k)$ je křivka Maxwelova rozdělení, udávající koncentraci protonů na jednotku energie ve středu Slunce, odpovídající teplotě ve středu slunce. Tato křivka se odlišuje od křivky Maxwellova rozdělení na obrázku 2b v tom, že nezávisle proměnnou je energie, nikoli rychlost. (Maxwellovo rozdělení rychlostí molekul

$$P(v) = 4\pi \left(\frac{m_m}{2\pi RT} \right)^{\frac{3}{2}} v^2 e^{-\frac{m_m v^2}{2RT}} \text{) Pro určitou kinetickou energii } E_k \text{ je výraz } n(E_k) dE_k \text{ úměrný}$$

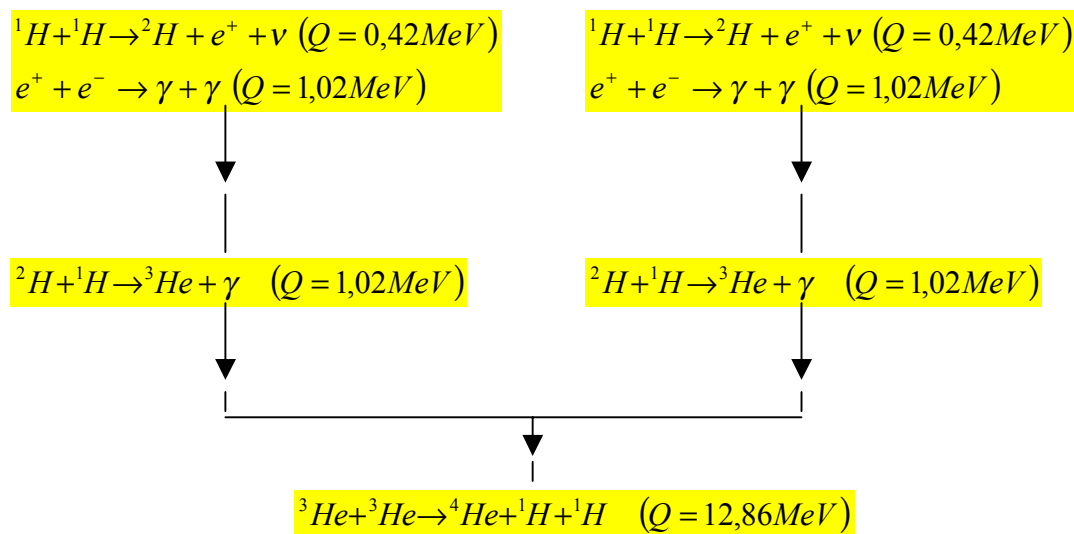
pravděpodobnosti, že proton bude mít kinetickou energii mezi E_k a $E_k + dE_k$. Hodnota kT v nitru Slunce je na obrázku vyznačena svislou čarou. Je vidět, že mnoho protonů v nitru Slunce má energii větší, než je tato hodnota.

Křivka označená $p(E_k)$ udává pravděpodobnost průchodu bariérou při srážce dvou protonů při teplotě středu Slunce. Tvar obou křivek vykreslených na obrázku 2a naznačuje, že bude existovat určitá energie protonu, při které se bude proton-protonová fúze uskutečňovat nejčastěji. Při energiích mnohem vyšších než tato hodnota je sice potenciálová bariéra snadněji prostupná, ale protonů s touto energií je příliš málo. Naopak při mnohem nižších energiích než tato hodnota má tyto energie spousta protonů, ale bariéra je příliš neprostupná.

Termojaderná fúze ve Slunci a dalších hvězdách

Slunce vyzařuje energii s výkonem $3,9 \cdot 10^{26} W$ a činí tak již několik miliard let. Odkud se bere všechna ta energie? Chemické hoření můžeme vyloučit. Kdyby se Slunce skládalo z uhlí a kyslíku (ve vhodné poměru pro spalování) vydrželo by pouze nějakých 1000 let. Jiná možnost je, že se slunce pomalu smršťuje vlivem vlastních gravitačních sil. Přeměnou gravitační potenciální energie na tepelnou energii by si Slunce mohlo udržovat teplotu a přitom stále zářit. Výpočet ale ukazuje, že ani tento mechanismus nevyhovuje. Vedl by totiž také k příliš krátké době života Slunce, nejméně 500 krát. Takže zůstává pouze termojaderná fúze. Slunce nespaluje uhlík, ale vodík, a to v jaderné peci, nikoli atomové nebo chemické.

Jaderná fúze ve Slunci je vícestupňový proces, ve kterém je spálen vodík na hélium. Vodík je palivo a hélium popel. Zde je proton-protonový řetězec, kterým se tento proces uskutečňuje:



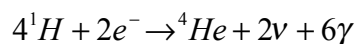
Řetězec p-p začíná srážkou dvou protonů (${}^1\text{H} + {}^1\text{H}$) které vytvoří deuteron (${}^2\text{H}$) a zároveň pozitron (e^+) a neutrino (ν). Pozitron velmi rychle potká volný elektron (e^-) ve Slunci a obě částice anihilují, jejich energie se objeví jako dva fotony záření γ ($e^- + e^+ \rightarrow \gamma + \gamma$).

Dvojice takových událostí je popsána v horním řádku předchozího schématu. Tyto události jsou ve skutečnosti velmi řídké. Pouze v jedné z 10^{26} proton-protonových srážek se vytvoří deuteron. V obrovské většině se protony prostě pružně odrazí. Je to právě pomalost tohoto tohoto jevu řídí rychlost produkce energie a chrání Slunce před explozí. Bez ohledu na

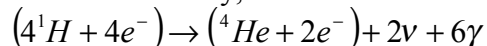
tuto pomalost je ve velkém a hustém nitru Slunce tak obrovský počet protonů, že deuterium ve Slunci vzniká právě popsaným způsobem v množství 10^{12} kg / s

Jakmile však jednou deuterium vznikne, rychle se srazí s jiným protonem a vytvoří jádro ${}^3\text{He}$, jak ukazuje prostřední řádek schématu. Dvě taková jádra se ${}^3\text{He}$ se případně mohou sejít (během 10^5) let a vytvořit α - částici (${}^4\text{He}$) a dva protony, jak ukazuje spodní řádek schématu.

Jak vyčteme ze schématu, celkově spočívá proton-protonový řetězec v kombinaci čtyř protonů a dvou elektronů do α - částice, vyzaření dvou neutrin a šesti fotonů záření γ :



Nyní přidejme na každou stranu dva elektrony, takže dostaneme



Symbole v obou závorkách již představují atomy vodíku a helia.

Energie uvolněná v reakci popsané touto rovnicí je:

$$Q = \Delta mc^2 = (4(1,007825u) - 4,00263u)(931,5 \text{ MeV / } u) = \underline{\underline{26,7 \text{ MeV}}}$$

kde $1,007825u$ je hmotnost vodíkového a $4,00263u$ hmotnost heliového atomu. Neutrina mají nulovou nebo zanedbatelně malou hmotnost a fotony γ - záření mají hmotnost nulovou, proto tyto částice ve výpočtu energie reakce nevystupují.

Stejnou hodnotu Q dostaneme sečtením hodnot Q pro jednotlivé stupně proton-protonového řetězce výše uvedeného schématu.

Asi $0,5 \text{ MeV}$ z této energie odnášejí ze Slunce obě neutrina z rovnice

$({}^4\text{H} + 4e^-) \rightarrow ({}^4\text{He} + 2e^-) + 2\nu + 6\gamma$. Zbývající energie se ukládá v nitru Slunce jako tepelná energie.

Spalování vodíku ve Slunci je svým způsobem alchymie v obřím měřítku, neboť jeden prvek se přeměňuje na jiný. K této přeměně vodíku na hélium dochází ve Slunci při teplotě 10^8 K .

Spalování vodíku probíhá na Slunci po dobu přibližně $5 \cdot 10^9$ let a výpočty ukazují, že zásoby vodíku postačují na zhruba stejnou dobu do budoucnosti. Pak se však nitro Slunce složené potom převážně z helia, začne ochlazovat a Slunce se začne hroutit působením své vlastní gravitace. To opět povede k růstu teploty nitra, která způsobí expanzi vnějšího obalu a Slunce se dostane do stadia hvězdy, nazývanému červený obr.

Jestliže teplota nitra opět dosáhne 10^8 K , může opět dojít k uvolňování energie spalováním helia na uhlík. Jak se hvězda vyvíjí a stává se teplejší, může dojít k vytváření dalších prvků při jiných typech jaderné fúze. Touto cestou nemohou být vytvořeny prvky hmotnější než s hmotnostním číslem $A \approx 56$. Hmotnostnímu číslu $A = 56$ odpovídá maximum na křivce vazební energie na obrázku 1, takže fúze, která vytváří nuklidy za touto hranicí, probíhá s pohlcováním, nikoli uvolňováním energie.

Předpokládáme, že prvky s hmotnostním číslem větším než $A \approx 56$ vznikají zachytem neutronů při katalyzmických explozích hvězd, kterým říkáme supernovy. Při výbuchu supernovy je vnější obal hvězdy vymrštěn do vnějšího prostoru, kde se smíchá s řidoučkou látkou vyplňující mezihvězdný prostor a stane se tak její součástí. Z této látky, stále obohacované odpadem z hvězdných explozí, se pak opět vytvářejí nové hvězdy kondenzací vlivem gravitační síly.

Skutečnost, že se na Zemi vyskytují prvky hmotnější než vodík a helium, naznačuje, že naše sluneční soustava vznikla kondenzací mezihvězdné hmoty, která obsahovala zbytky po takových explozích. Všechny prvky kolem nás, včetně těch v našich tělech, byly tedy vyrobeny v nitrech dávno neexistujících hvězd.

Řízená termojaderná fúze

K první trmojaderné reakci na zemi došlo na atolu Eniwetok, když USA nechaly vybuchnout zařízení, které uvolnilo energii ekvivalentní 10 milionů tun TNT. Vysoké teploty a hustoty potřebné pro zažehnutí reakce byly dosaženy tím, že se jako rozbuška použila atomová puma založená na štěpné reakci

Získat dlouhodobě pracující a říditelný zdroj energie, reaktor pracující na základě termojaderné fúze je však mnohem obtížnější. K dosažení tohoto cíle však velmi intenzivně směřuje úsilí v mnoha zemích světa, protože mnoho lidí považuje reaktor na principu termojaderné fúze za zdroj budoucnosti, alespoň pokud jde o výrobu elektřiny.

Proton-protonový řetězec z výše uvedeného seznamu není vhodný pro pozemský reaktor, protože je beznadějně pomalý. Na Slunci probíhá reakce úspěšně pouze díky obrovské hustotě protonů v nitru Slunce. Nejvýhodnější pro použití na Zemi se zdají být dvě reakce deuteron-deuteronové (d-d)



a deutron-tritonová (d-t) (Jádro izotopu vodíku ${}^3\text{H}$ -tritium se nazývá triton. Je to radionuklid s poločasem rozpadu 12,3 roku.) ${}^2\text{H} + {}^3\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + n \quad (Q = +17,59\text{MeV})$

Deuterium, které je v těchto reakcích zdroj deuteronů, má izotopický výskyt jen 1:6700, ale je dostupné v neomezeném množství jako složka mořské vody. Zastánci využívání jaderné energie popisují naše možnosti v budoucnu, a budou spálena všechna fosilní paliva, jako volbu ze dvou moností:

- a) Štěpení uranu získaného z rud
- b) Fúze deuteria získaného z vody

Pro úspěšný návrh termojaderného reaktoru musíme splnit tři podmínky:

1. **Vysoká hustota částic n .** Hustota interagujících částic musí být natolik vysoká, aby zajistila dostatečný počet d-d srážek. Při požadovaných vysokých teplotách je deuterium úplně ionizováno, takže vytváří navenek neutrální plazma (ionizovaný plyn) deuteronů a elektronů.
2. **Vysoká teplota plazmatu T .** Plazma musí být horké. jinak by totiž neměly deutrony při srážce dostatečnou energii k překonání Coulombovy potenciální bariéry, která se snaží udržet je od sebe. Laboratorně bylo dosaženo iontové teploty plazmatu 35keV , což odpovídá $4 \cdot 10^8 \text{ K}$. To je asi 30krát větší teplota, než je teplota středu slunce.
3. **Dlouhá doba záření τ .** Velký problém je udržování horkého plazmatu s potřebně vysokou hustotou a teplotou po tak dlouhou dobu, aby došlo k fúzi dostatečného množství paliva. Je jasné, že žádná pevná nádoba nemůže odolat tak vysokým teplotám, proto musíme použít důmyslné techniky pro udržení plazmatu.

Lze ukázat, že pro úspěšný chod termojaderného reaktoru, pracujícího s d-t reakcí, je třeba mít $n\tau > 10^{20} \text{ s} \cdot \text{m}^{-3}$. Tato podmínka je známá jako Lawsonovo kritérium, říká, že musíme buď udržet mnohočástic po delší dobu. Kromě splnění podmínek kritéria je ještě dále nutné, aby teplota plazmatu byla dostatečně vysoká.

V současnosti se především studují dvě cesty, jak se dostat k řízenému uvolňování jaderné energie. Ačkoliv zatím ani jedna z nich nebyla úspěšná, jsou stále rozvíjeny jednak proto, že jsou stále slibné, jednak pro možnou velkou důležitost řízené fúze při řešení energetických problémů světa v budoucnosti.

Magnetické udržování

V jednom z těchto přístupů se pro udržování plazmatu v nádobě prstencového tvaru používá vhodně tvarované magnetické pole. Zařízení se nazývá **tokamaku**. Koncepce tokamaku se zrodila koncem padesátých let v Sovětském svazu. Jeho název je odvozen z

ruských slov "*Troidal'naja kamera s magnetyymi katuskami*". Magnetické síly působí na nabitě částice, které tvoří horké plazma, a zabraňují částicím plazmatu dopadat na stěny nádoby. Následující obrázek ukazuje jedno takové zařízení.



Plazma je zahříváno jednak tím, že jsou v něm indukované elektrické proudy, jednak ostřelováním plazmatu zvnějšku svazkem urychlených částic. Prvním cílem pokusů je dosáhnout vyrovnání, které nastane při splnění Lawsonova kritéria či při jeho překročení. Konečným cílem pak je zažehnutí, které spouští samostatně se udržující termojadernou reakci s čistým ziskem energie. Do roku 2000 nebylo dosaženo zažehnutí na žádném zařízení s magnetickým udržováním plazmatu.

Inerciální udržování

Tato technika udržování a ohřevu paliva pro fúzi až k dosažení potřebných parametrů pro termojadernou reakci začíná tzv. otloukáním pevné tabletky paliva ze všech stran intenzivními laserovými svazky. To vede k odpaření jistého množství materiálu z povrchu tabletky. Odpaření materiálu způsobí vznik rázové vlny směřující dovnitř tabletky, která stlačí jádro tabletky a zvýší v něm jak hustotu částic, tak teplotu. Jev se nazývá inerciální udržování, protože:

- palivo se udržuje v jádře tabletky
- částice díky své setrvačné (inerciální) hmotnosti neunikají z tabletky zahřáté během velmi krátkého časového intervalu, kdy působí "úder" laserů.

Laserová fúze, užívající techniky inerciálního udržování, se studuje v mnoha světových laboratořích. Například v Lawrence Livermore Laboratory se mají tabletky složené z deuteria a tritia, každá o velikosti menší než zrnko písku, otloukávat pulzy 10 synchronizovaných vysoce výkonných laserů symetricky rozmístěných kolem tabletky. Pulzní lasery jsou navrženy tak, aby v souhrnu dodávaly každé tabletce energii asi 200 kJ v době kratší než jedna nanosekunda. To odpovídá výkonu v době trvání pulzu asi $2 \cdot 10^{14} W$, což je asi 100 krát více než celkový trvalý výkon elektráren na celém světě!

V pracujícím termojaderném reaktoru s laserovou fúzí by tabletky měly vybuchovat jako miniaturní vodíkové bomby v počtu snad 10 až 100 za sekundu. Použitelnost laserové fúze jako základu práce termojaderných reaktorů nebyla do roku 2000 ověřena.

Vliv termojaderné fúze na životní prostředí

Současná výroba energie je spojena s velkým množstvím odpadů, neboť palivo o určité hmotnosti se přeměňuje na přibližně stejné množství odpadu. Tyto odpady vypouštíme do životního prostředí či ukládáme jako tuhé, kapalné a plynné látky. To způsobuje zamoření biosféry různými skleníkovými plyny a škodlivinami, jako například emisemi CO_2 , SO_2 , NO_2 , CO , popílku, produkcí popela a nebezpečného radioaktivního vyhořelého paliva z jaderných elektráren. Za nejperspektivnější náhradu fosilních paliv se považuje sluneční a větrná energie, energie biomasy, energie moří a oceánů, geotermální energie a také energie jaderné syntézy.

Pokud potřebná zařízení prokážou svou způsobilost z hlediska možnosti výstavby, provozu a údržby, mohla by fúze hrát v příštích letech velmi významnou úlohu při krytí světové spotřeby energie. Velkou předností tohoto řešení by bylo, že ekologické a bezpečnostní aspekty fúzního energetického průmyslu se zdají být pro společnost přijatelné. Předpokládá se, že provoz budoucích termojaderných elektráren bude v porovnání se současnou jadernou energetikou podstatně méně rizikový.

Získání energie jadernou syntézou má řadu předností před energií ze štěpných reakcí. Předně palivo je k dispozici v téměř neomezeném množství (deuterium v oceánech by ji poskytlo lidstvu na miliony let). Při těchto reakcích nevznikají štěpné produkty, odpadá vnější palivový cyklus, přepracování a ukládání vyhořelého paliva. Nehrozí také nebezpečí výbuchu, alespoň jaderného. U těchto reakcí neexistuje kritická velikost, a nadto by v termojaderném reaktoru bylo vždy nanejvýš několik gramů paliva. Neutrony vznikající při reakci deuteria a tritia vyvolávají sice určitou sekundární radioaktivitu konstrukčních materiálů, ale ta je menší než radioaktivita štěpných produktů a nemůže ohrozit okolí. Je třeba jisté opatrnosti při manipulaci s tritiem, ale lze ji technicky zvládnout. Navíc bude v budoucnosti možno přejít na takzvané čisté reakce, bez tritia, neutronů a záření gama. Změny mikroklimatu jsou srovnatelné se změnami, které působí jaderné elektrárny o stejném výkonu.

Primární částice vystupující z fúzních reakcí nejsou radioaktivní. Nevyhnutelná absorpce fúzních neutronů v konstrukcích a dalších materiálech vede ke vzniku radioaktivních nuklidů, které však nejsou pohyblivé ani příliš dlouhodobé, což usnadňuje jejich zachycování a likvidaci.

Při spalování vodíkového paliva vzniká ^4He , které se běžně vyskytuje v atmosféře (v horní vrstvě značně a v dolních vzácně). Není nutné ho vypouštět, je možné ho dále technicky využívat (pro náplň zářivek, pro chlazení aj.). Izotop ^4He není radioaktivní ani chemicky toxický.

Literatura:

Halliday D., Resnick R., Walker J., **Fyzika** - Vysokoškolská učebnice obecné fyziky, část 5
VUT Brno -Nakladatelství VUTIUM a PROMETHEUS Praha
Jelen J., **Fyzika II** - ČVUT Praha, Fakulta elektrotechnická

Internet:

<http://server.ipp.cas.cz/~vwei/work/vesmir/vesmir.htm>