Otázka: Termonukleární reakce ve hvězdách

Předmět: Fyzika (FMD)

Přidal(a): Salamans

Seminární práce z předmětu FM

Autor práce: Jakub Steiner

Obsah

1 Proč slunce září?

2 Termojaderné reakce (Obecně)

2.1 Podmínky pro vznik reakce

2.2 Ve hvězdách

2.3 Energie reakce

3 Částicová Fyzika

3.1 Elementární částice

3.1.1 Leptony a Kvarky

3.1.2 Polní Bosony

3.2 Složené částice

3.3 Antičástice

4 Konkrétní reakce

4.1 Proton-protonový cyklus

4.1.1 Varianta I

4.1.2 Varianta II

4.1.3 Varianta III

4.2 CNO cyklus

4.2.1 Průběh reakce

4.3 3 alfa proces

4.3.1 Průběh reakce

4.4 Spalování těžkých prvků

4.4.1 Spalování uhlíku

4.4.2 Spalování neonu

4.4.3 Spalování kyslíku

4.4.4 Spalování Křemíku

Termonukleární reakce ve hvězdách

1 Proč slunce září?

Lidé si tuto otázku kladli tisíce let a za tu dobu vymysleli spoustu teorii, ať už více čí méně reálných. První myšlenkou bylo patrně, že hvězda zkrátka hoří a vyzařuje do okolí energii. Vědci si však rychle uvědomili, že tato teorie není příliš reálná. Pokud by slunce skutečně hořelo

spálilo by veškerou svou hmotu asi za 3021 let. Další teorie byly postupně vymýšleny a vyvraceny. Až ve 30. letech 20. století díky předchozím objevům radiace a Einsteinovu vzorci $E=m*c^2$ si vědci uvědomili, že v nitru hvězd dochází k termojaderným reakcím.

2 Termojaderné reakce (Obecně)

Termojaderné neboli termonukleární reakce jsou chemicko-fyzikální proces, při kterém dochází ke štěpení nebo slučování atomových jader. Štěpení jádra atomu znamená, že z jednoho atomu těžšího prvku vzniknou dva atomy lehčích prvků, zatímco slučování (fúze) značí, že ze dvou atomů lehčích prvků vznikne jeden těžší atom. Tyto reakce mají tedy diametrálně opačný průběh. Obě tyto reakce jsou exoenergické a exotermické, takže se během nich uvolňuje ohromné množství energie a tepla do okolí.

Štěpení atomů těžkých prvků na prvky lehčí se v současnosti hojně využívá jako zdroj energie. K provedení této reakce není zapotřebí natolik extrémních podmínek a jsme tedy schopni ji provést na zemi v jadernách elektrárnách a využít její uvolněnou energii k výrobě elektrického proudu.

Fúze ovšem probíhá při mnohem extrémnějších podmínkách než štěpení. Přesto že první umělá jaderná fúze byla provedena již v roce 1919 fyzikem a Ernstem Rutherfordem, řízená fúze je dodnes ve fázi výzkumu a experimentů. Pokud by se lidstvu podařilo zvládnout řízenou termonukleární fúzi, získali bychom třikrát tak větší energii na jeden atom než při štěpení jader. Avšak neřízenou fúzi jsme již byli schopni využít (zneužít) k vývoji termonukleárních zbraní. Fúze tedy probíhá především ve vesmíru, hlavně v jádrech hvězd kde je dostatečná teplota i tlak.

2.1 Podmínky pro vznik reakce

Aby se jádro atomu spojilo s jiným atomem je zapotřebí jej nejprve „rozbít“. Fyzikálně řečeno překonat elektromagnetické síly, které přitahují kladně nabité jádro atomu k jeho záporně nabitému obalu. Té to hranici síly se také říká Coulombova odpudivá bariéra. Tyto síly lze překonat srážkou atomů. Ty však musí mít dostatečnou rychlostí na to, aby se k sobě atomy přiblížili na tam malou vzdálenost, že převládnou přitažlivé jaderné síly a atomy se spojí.

2.2 Ve hvězdách

V jádrech hvězd jsou téměř ideální podmínky pro zažehnutí termonukleární fúze. Teploty se běžně pohybují okolo miliónů kelvinů a vyšší tlaky než 10 atmosfér nejsou výjimkou. V nitru hvězd se plyn zahřeje na tak vysokou teplotu, že při srážkách jeho atomů dochází k odtržení elektronů z atomárních obalů a přechází v plazmu s vysokou energií. Část tepelné energie, kterou atom přijme se přemění na energii kinetickou a tím pádem získá dostatečnou rychlost pro zažehnutí termonukleární fúze (viz. 2.1). Částicím je zapotřebí dodat ohromné množství tepla, z tohoto důvodu se těmto reakcím říká **termo**nukleární.

Plazma musí mít rovněž velkou hustotu, aby docházelo k více srážkám atomů a tím se zvýšilo celkové množství uvolněné energie. Plazma je v nitru hvězdy stlačována gravitačními silami hvězdy, čímž je zajištěna ohromná hustota plazmy.

2.3 Energie reakce

Celkovou energii uvolněnou při reakci, lze vypočítat slavným Einsteinovým vzorcem $E=m*c^2$. Ve všech těchto reakcích v jádru slunce má výsledné jádro nepatrně menší hmotnost než součet hmotností původních jader. Tento rozdíl v hmotnostech dosadíme za písmeno *m*, taky se tomuto rozdílu říká hmotnostní schodek. Za *c* dosadíme rychlost světla, tedy 299 792 458 metrů za sekundu. Pro energii uvolněnou při termonukleárních reakcích se může používat jednotka elektronvolt (eV). Přičemž se 1 eV rovná $1{,}6*10^{-19}$ joulů.

3 Částicová Fyzika

Abychom mohli skutečně porozumět termonukleárním reakcím, musíme nejdříve něco vědět o částicích, na které se atomy prvků rozpadají během těchto reakcí. A jak už název napovídá, částicová fyzika studuje právě tyto částice. Experimenty s částicemi probíhají v urychlovačích částic, kde dochází ke srážkám a rozpadům částic. Touto metodou byly již objeveny stovky různých částic, které se od sebe liší nábojem, hmotností, spinem a dalšími vlastnostmi.
K popisu částic slouží tzv. standartní model elementárních částic.

Fyzikové dnes rozdělují částice do dvou velkých skupin, složené částice s vnitřní strukturou a elementární částice bez vnitřní struktury.

3.1 Elementární částice

I elementární částice se dále dělí do podskupin na základě jejich specifických vlastností.

3.1.1 Leptony a Kvarky

Jak Leptony, tak Kvarky jsou základními stavebními jednotkami všech atomů (a tedy i hmoty kolem nás kterou atomy tvoří). Částice těchto dvou typů mají spin $^1/_2$.

K dnešnímu dni bylo objeveno celkem 6 leptonů. Leptony rovněž nepodléhají silné interakci (viz. 3.1.2). V běžných látkách se nejčastěji vyskytují elektrony s nábojem -1 a neutrina s nábojem 0. Hlavně s neutrinem se bude setkávat u konkrétních reakcí.

Kvarky na rozdíl od Leptonů podléhají silné interakci. Existuje celkem 6 rozdílných kvarků, ale nejčastěji se vyskytuje Kvark u (up) s nábojem $+^2/_3$ a Kvark d (down) s nábojem $-^1/_3$.

3.1.2 Polní Bosony

Jsou další skupinou elementárních částic. Mají celočíselný spin a jsou nositeli silové interakce. Silná interakce je síla, která drží pohromadě protony a neutrony, tím že působí na kvarky (viz. 3.2). Taktéž silná interakce váže protony a neutrony v jádře atomu a tím drží celý atom pohromadě. Typickým příkladem bosonu je foton. V termonukleárních reakcích se budeme setkávat s fotonem gama záření.

3.2 Složené částice

Složené částice se skládají z kvarků a antikvarků (viz. Dopsat). Patří zde například proton (1 kvark d, 2 kvarky u, celkový náboj +1) a neutron (1 kvark u, 2 kvarky d, celkový náboj 0).

3.3 Antičástice

Většina částic má i svoji antičástici. Antičástice mají stejné vlastnosti jako částice původní až na náboj, který má sice shodnou velikost s původní částicí, ale opačný náboj. Např. antielektron neboli pozitron má totožné vlastnosti s elektronem, ale má náboj -1. S pozitronem se budeme často setkávat při konkrétních reakcích. Dále např. antikvark u (náboj $-{}^{2}/_{3}$), dokonce existuje i antineutrino.

4 Konkrétní reakce

4.1 Proton-protonový cyklus

Proton-protonový cyklus je reakce, při které z jader vodíku stávají v konečné fázi jádra hélia. Tato reakce převažuje ve hvězdách s hmotností 0,08 až 1,75 hmotnosti slunce, tedy i v naší nejbližší hvězdě. Cyklus má mnoho variant vývoje, ale vždy se uvolní asi 26,2 MeV energie, která se projeví jako fotony gama záření a kinetická energie jader hélia.

4.1.1 Varianta I

Tato varianta probíhá při teplotách 7 až 18 miliónů kelvinů a při hustotě plazmy přibližně 100 g/cm^3. Nejdříve dojde k reakci dvou jader vodíku a vniká těžší jádro vodíku $_1H^2$, tzv. deuteria. Zároveň se uvolní energie ve formě pozitronu a neutrina. Tato úvodní reakce trvá nejdéle z celého cyklu.

Dále se jádro deuteria srazí s dalším jádrem vodíku. Vznikne izotop hélia $_2He^3$ a uvolní se foton gama záření.

V posledním kroku dojde ke srážce dvou jader $_2He^3$. Vzniká jádro hélia $_2He^4$ a dvě jádra atomů vodíku.

Obrázek 3, Schéma proton-protonového cyklu, varianta I

4.1.2 Varianta II

Tato varianta nastává při teplotách 14 až 23 miliónů kelvinů. První dva kroky jsou totožné s první variantou.

Ve třetím kroku se však izotop hélia $_2He^3$ spojí se samotným héliem a vnikne jádro beryllia $_4Be^7$ a foton gama záření.

Beryllium se následně srazí s elektronem a vznikne lithium $_3Li^8$ a neutrino.

Lithium dále reaguje s vodíkem za vzniku beryllia $_4Be^8$.

Beryllium je však v tomto stavu nestabilní a rozpadá se na dvě jádra atomů hélia.

4.1.3 Varianta III

Touto cestou se vydává proton protonový cyklus při teplotách překračujících 23 miliónů kelvinů. K této reakci na Slunci téměř nedochází. Během reakce dochází ke vzniku vysokoenergetických neutrin. První tři kroky jsou totožné s variantou II.

Ve čtvrtém kroku se jádro beryllia $_4Be^7$ nesrazí s elektronem, ale s jádrem vodíku a vznikne těžší jádro beryllia $_5Be^8$ a do okolí se uvolní foton gama záření.

Avšak těžké jádro beryllia je velice nestabilní a rozpadá se na beryllium $_4B^8$, pozitron a neutrino

Poslední krok je shodný s variantou II, tedy jádro atomu beryllia se rozpadá na dvě jádra hélia

Obrázek 4, Schéma proton-protonového cyklu, varianta II (vlevo) a varianta III (vpravo)

4.2 CNO cyklus

CNO cyklus je další reakcí probíhající v jádrech hvězd. Stejně jako u proton-protonového cyklu dochází k přeměně jader vodíku na jádra hélia. Reakce dostala svůj název podle katalyzátorů, které se během ní uplatňují, tedy uhlíku, dusíku a kyslíku. CNO cyklus je hlavním zdrojem

energii pro hvězdy těžší než 1,75 hmotnosti Slunce, je to způsobeno především ohromnou počáteční teplotou, která je zapotřebí k zažehnutí reakce a menší hvězdy zkrátka těchto teplot nedosahují. Energie reakce se uvolní v podobě 3 fotonů gama záření, dvou neutrin a dvou pozitronů.

4.2.1 Průběh reakce

Na začátku celého cyklu dojde k reakci uhlíku ${}_{6}C^{12}$ s jádrem vodíku a vzniká dusík ${}_{7}N^{13}$ a uvolní se foton gama záření. Dusík je však v tomto stavu nestabilní a podléhá samovolnému rozpadu. Rozpadá se na jádro uhlíku ${}_{6}C^{13}$, neutrino a pozitron.

Uhlík dále reaguje s vodíkem za vzniku dusíku ${}_{7}N^{14}$ a fotonu gama záření. Dusík následně reaguje taktéž s vodíkem a dostaneme jádro kyslík ${}_{8}O^{15}$ a znovu se do okolí uvolní foton gama záření.

Kyslík je ale nestabilní a rozpadá se na jádro dusíku ${}_{7}N^{15}$, pozitron a neutrino. Nastává finální krok. Dusíku přijme další jádro vodíku a dojde ke vzniku hélia ${}_{2}He^{4}$ a jádra uhlíku ${}_{6}C^{12}$. Uhlík je následně použit k zažehnutí dalšího CNO cyklu.

Toto je nejčastější průběh CNO cyklu, kdy jako finální produkt vzniká uhlík, ale existují i další možné varianty CNO cyklu, konkrétně tři. Dochází u nich ke vzniku fluoru, který se ale hned rozpadá na kyslík nebo na izotop kyslíku. Vždy dochází ke vzniku jádra hélia. Druhým finálním produktem může být kyslík anebo dusík.

4.3 3 alfa proces

Neboli Salpeterův proces je reakce, při které již nedochází ke spalování vodíky, ale spalují se tří jádra hélia na jedno jádro uhlíku. 3 alfa proces nastává v jádrech starších hvězd, které již spálili 95% svých zásob vodíku a nejsou již schopny získávat většinu své energie pomocí proton-protonového cyklu nebo CNO cyklu. K zažehnutí hélia jsou zapotřebí teploty mezi 100 až 150 kelvinů, což jsou výrazně vyšší teploty, než tomu bylo u vodíku. Je to způsobeno tím, že elektromagnetické síly v héliu jsou podstatně silnější než ve vodíku. Aby hvězda dosáhla těchto

ohromných teplot ve svém jádře, musí se začít rozpínat a tím postupuje do dalšího stádia svého vývoje. Hélium se spaluje mnohem rychleji, než vodík a tak hvězda v tomto stádiu dlouho nevydrží. Během reakce se uvolní energie v celkové hodnotě 7,275 MeV

4.3.1 Průběh reakce

V prvním kroku dochází ke srážce dvou jader hélia $_2H^4$ a vznikne jádro beryllia $_4B^8$ a foton gama záření. Tato reakce je endoenergetická. Což značí, že k jejímu průběhu je nutno dodat energii a to hodnotě 0,095 MeV.

Následně reaguje beryllium s dalším jádrem hélia $_2H^4$ a dochází ke vzniku jádra uhlíku $_6C^{12}$ a dalšího fotonu gama záření. Tímto 3 alfa proces končí.

Jádro uhlíku může zůstat v tomto stabilním stavu v nitru hvězdy anebo může dojít se srážce s dalším jádrem hélia a touto srážkou by vzniklo stabilní jádro kyslíku $_8O^{16}$. Tato reakce, ale již není součástí 3 alfa procesu.

4.4 Spalování těžkých prvků

Těžké prvky jsou schopny spalovat jen ty nejhmotnější hvězdy, vážící od 11 do 50 hmotnosti Slunce. Takovéto hvězdy jsou schopny spalovat těžké prvky až ve svém posledním stádiu vývoje, když už vypotřebovali svoje zásoby vodíky a hélia. Ke spalování těžkých prvků jsou zapotřebí až miliardy kelvinů, tyto prvky hoří ještě rychleji než héliu a navíc jich je v jádře hvězdy velmi malé množství. Takže je životnost hvězd v tomto stádiu vývoje opravdu minimální. Jenom v tomto stádiu dochází v nitru hvězdy ne jenom k fúzi, ale i ke štěpení jader některých těžkých prvků (někdy až na samotný vodík).

4.4.1 Spalování uhlíku

Nastává při teplotách 0,5 až 1 miliarda kelvinů. Jádro uhlíku reaguje jenom srážkou s jiným Jádrem uhlíku a tehdy mohou nastat tři varianty:

- Vznikne jádro sodík $_{11}Na^{23}$ a jádro vodíku.
- Vznikne jádro neonu $_{10}Ne^{20}$ a jádro hélia $_{2}He^{4}$.
- Vznikne jádro hořčíku $_{12}Mg^{24}$ a uvolní se foton gama záření.

4.4.2 Spalování neonu

Probíhá při teplotách 1 až 1,5 miliard kelvinů. Neon reaguje dvěma způsoby:

- Neon $_{10}Ne^{20}$ se srazí s fotonem gama záření a vznikne kyslík $_{8}O^{16}$ a hélium $_{2}He^{4}$.
- Neon se razí s jádrem hélia $_{2}He^{4}$ a dojde ke vzniku jádra hořčíku $_{12}Mg^{24}$ a fotonu gama záření.

4.4.3 Spalování kyslíku

Ke spalování kyslíku dochází při teplotách nad 1,5 miliard kelvinů. Stejně jako uhlík, kyslík vždy reaguje s dalším jádrem kyslíku. Tato reakce má tři možná vyústění:

- Vznikne jádro fosforu $_{15}P^{31}$ a vodík.
- Vznikne jádro síry $_{16}S^{31}$ a neutrino.
- Vznikne jádro křemíku $_{14}Si^{28}$ a jádro hélia $_{2}He^{4}$.

4.4.4 Spalování Křemíku

Nastává při teplotách okolo 3 miliard kelvinů. Jádro křemíku $_{14}Si^{28}$ reaguje s fotonem gama záření. Tato reakce má také tři různé varianty:

- Vznikne jádro hliníku $_{13}Al^{27}$ a vodík.
- Vznikne jádro křemíku $_{14}Si^{27}$ a neutrino.
- Vznikne jádro hořčíku $_{12}Mg^{24}$ a jádro hélia $_{2}He^{4}$.