

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Josip Kleczek

Stavba slunce a obyčejných hvězd

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 16 (1971), No. 2, 67--72

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/138668>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1971

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

STAVBA SLUNCE A OBYČEJNÝCH HVĚZD

JOSIP KLECZEK, Praha

Je-li něco v tomto světě, co působí dojmem nepoznatelného, je to především nitro hvězd. Aní u nejbližší hvězdy, našeho Slunce, nepronikneme pomocí dalekohledů hlouběji než k „povrchu“ — k fotosféře, nejnižší atmosférické vrstvě. Atmosféra představuje jen velmi nepatrnou část celkové sluneční hmoty, asi jednu deseti-miliardtinu. Až na tento nepatrný zlomek je sluneční hmota skryta pod fotosférou a je proto nepřístupná přímému pozorování.

Podobně je tomu i u ostatních hvězd. Je tedy nějaká naděje, že naše úvahy o teplotě, tlaku a chemickém složení hvězdného nitra nebudou pouhými spekulacemi, ale že budou mít ráz vědeckého poznání? O která fakta můžeme opřít své úvahy, abychom měli jistotu, že náš vypočtený model hvězdy bude — alespoň přibližně — odpovídat skutečnosti? Jsou to především tři základní pozorované charakteristiky, které se týkají hvězdy jako celku: hmota, zářivost a poloměr.

Hmotu hvězdy určujeme z jejího gravitačního působení buď na jiné blízké těleso, nebo na vyzářený foton. Podle dosud získaných výsledků jsou hmoty hvězd omezeny do poměrně úzkého intervalu a neliší se příliš od hmoty našeho Slunce $M_{\odot} = 1.99 \cdot 10^{33}$ g. Velká většina dosud známých hvězdných hmot je v intervalu $0,5 M_{\odot}$ až $5 M_{\odot}$. Jako extrémní hodnoty uveďme třetí složku 61 Cygni s hmotou $0,016 M_{\odot}$ (to je toliko 16krát větší než hmota Jupitera) a nejistý TRUMPLERŮV údaj pro hlavní hvězdu v hvězdokupě 6781 NGC v Ophiuchu, $400 M_{\odot}$.

V mnohem větším rozmezí se však pohybuje *zářivost hvězd*, to je celkové množství energie, kterou hvězda vysílá ve formě záření za jednu vteřinu. Přesně změřená zářivost našeho Slunce slouží za jednotku zářivosti a představuje $L_{\odot} = 0,9 \cdot 10^{26}$ kalorií za vteřinu, to je $3,7 \cdot 10^{26}$ W. Zářivost kterékoliv jiné hvězdy L se určuje podle její absolutní velikosti. Červení trpaslíci mají zářivost desetitisíckrát menší než Slunce, zatímco žhaví obři mají zářivost $2 \cdot 10^4$ krát větší. Tento obrovský rozsah zářivosti je v poměru zářivosti svatojánské mušky k zářivosti silného světlometu.

K nejdůležitějším hvězdným charakteristikám patří *poloměr hvězdy* R , udávající její prostorovou velikost. Přímé stanovení poloměru lze provést interferometrem u zákrytových dvojhvězd, u nepřímých vzdálených obrů a veleobrů. Zdaleka největší počet údajů o velikosti hvězd však byl odvozen z jejich zářivosti a povrchové teploty. Co do velikosti jsou normální hvězdy porovnatelné se Sluncem. Tak Vega má poloměr $2,5 R_{\odot}$ (kde R_{\odot} je $6,9 \cdot 10^{10}$ cm), Sirius $2 R_{\odot}$, zatímco α Centauri je stejně velká jako naše Slunce. Bílí trpaslíci*) jsou naopak mnohem menší. Tak průvodce Siriův

*) Bílí trpaslíci (tvoří asi 3% hvězd) jsou hvězdy, jejichž velikost je srovnatelná s velikostí Země, kdežto hmota s hmotou sluneční. Jejich hustota musí být asi milionkrát větší než průměrná hustota sluneční (tuny látky v krabičce od zápalek).

má poloměr $0,020 R_{\odot}$, hvězda van Maanenova jen $0,006 R_{\odot}$, a je tedy menší než naše Země. Teoreticky odvozené poloměry hvězd neutronových*) mají poloměry 10–30 km, a to podle velikosti hmoty. Druhý extrém tvoří veleobří s poloměry několiksetkrát až tisíckrát většími než R_{\odot} . Tak infračervená složka Aurigae má poloměr $3\,000 R_{\odot}$.

Uvedené hvězdné charakteristiky tvoří základ, z něhož teorie vnitřní stavby hvězd vychází. Z pozorování však vyplývají ještě další potřebné údaje: chemické složení, tlak a teplota hvězdného povrchu. Ač se tyto veličiny vztahují toliko k povrchu hvězdy, mohou být východiskem při výpočtu její vnitřní struktury.

Hvězda jako společenství obrovského množství částic ($\sim 10^{57}$) podléhá především gravitaci**). Gravitace drží pohromadě všechnu látku hvězdy (plazmu, degenerovanou plazmu, neutronový, případně hyperonový plyn), určuje její strukturu i osudy během času. Každá částice hvězdy přitahuje gravitační silou všechny ostatní a naopak. Výsledná gravitační síla působí směrem ke středu hvězdy. Každá osamocená hvězda, která se otáčí zvolna a je neproměnná, má kulový tvar. Takovou hvězdou je naše Slunce. Ani nejpřesnější měření slunečního tělesa nezjistila sebemenší odchylku od dokonalé koule.

Proti gravitačnímu stlačování slunečních vrstev působí tlak plynů. Jeho velikost odhadneme zhruba takto: Středem Slunce si představme rovinu, která je dělí na dvě stejné polokoule. Obě polokoule se přitahují gravitačním působením jejich hmot a naopak se odpuzují tlakem působícím po celé rovině. Protože Slunce je v rovnováze, je tlak na celou rovinu roven přitažlivé síle obou polokoulí. Za zjednodušujícího předpokladu, že hustota v nitru Slunce je všude stejná, vypočteme podle Newtonova gravitačního zákona, že přitažlivá síla je 10^{37} dynů. Právě takový je však celkový tlak rozprostřený na celé ploše průřezu ($1,5 \cdot 10^{22} \text{ cm}^2$). Tedy tlak na jeden cm^2 je $6,7 \cdot 10^{14} \text{ dyn/cm}^2$ ($= 10^{37} \text{ dynů} : 1,5 \cdot 10^{22} \text{ cm}^2$), což odpovídá tlaku *sedmi set milionů atmosfér*. To je spodní mez průměrného tlaku, neboť hustota v nitru slunečním nemůže být všude stejná. Vzrůstá směrem ke středu a dá se obecně dokázat o plynné kouli, že čím je koncentrace plynů směrem ke středu větší, tím je větší přitažlivá síla obou polovin. Tedy průměrný tlak v nitru Slunce je větší než sedm set milionů atmosfér.

Slunce je složeno především z vodíku. Průměrná hustota vypočtená ze známé hmoty a velikosti Slunce, je $1,41 \text{ g/cm}^3$ ***). Má-li se vodík při tak vysoké hustotě

*) Neutronové hvězdy jsou malé hvězdy — zbytky po hvězdném kolapsu. Hustota neutronových hvězd je mnoho miliard gramů v krychlovém centimetru (tisíce tun látky v krabici od zápalek).

***) Ostatní interakce spolupracují. Tak jaderné interakce uvolňují energii, zahřívají nitro a jsou tedy zdrojem hvězdného záření; elektromagnetické se uplatňují v přenosu fotonů nitrem a při jejich vyzáření na povrchu; slabé interakce se uplatňují při β -rozpadu a při emisi neutrin z jádra hvězdy.

***) Průměrná hustota Země je $5,5 \text{ g/cm}^3$ — značně větší než Slunce. Pro zajímavost hustota obřích planet Jupitera je $1,3 \text{ g/cm}^3$ a Saturna dokonce $0,7 \text{ g/cm}^3$, t.j. menší než vody, takže by se Saturn vznášel v oceánu, kdyby tak velký existoval.

chovat jako plyn, potom podle stavové rovnice plynů vyplývá teplota *tři miliony stupňů*. To je průměrná hodnota. Ve skutečnosti je teplota ve středových oblastech hvězdy značně vyšší.

Hrubý odhad tlaku a teploty uvnitř Slunce nás poučil, že při studiu hvězdného nitra se budeme setkávat s neobvykle vysokými tlaky, s teplotami mnohem vyššími, než dovedeme vytvořit v našich laboratořích. Zatím co fyzikové sledují vlastnosti hmoty při teplotách několik tisíc stupňů a při tlacích desítek tisíc atmosfér, počítá astrofyzik při studiu hvězdného nitra s teplotami a tlaky o několik řádů vyššími. To je důvod, že *nitro* Slunce (a mnoha jiných hvězd) má vlastnosti dokonalé plazmy, jejíž tlak p , hustota n a teplota T se řídí stavovou rovnicí ideálního plynu

$$(1) \quad p = n \cdot k \cdot T, \quad k = \text{Boltzmannova konstanta}.$$

Vlastnosti pevných a kapalných látek jsou mnohem složitější než vlastnosti dokonalé plazmy. Proto strukturu Slunce (hvězd) známe patrně mnohem lépe než složitou stavbu blízkých planet včetně Země, na jejímž povrchu žijeme.

Rovnice (1) je jedna z několika základních rovnic, které popisují fyzikální vlastnosti a chemické složení ve slunečním (hvězdném) nitru. I ostatní rovnice jsou stejně jednoduché. Vyjadřují skutečnosti, jako např., že proti gravitaci v každém místě působí stejně velký tlak (podmínka mechanické rovnováhy). Kdyby tomu tak nebylo, projevilo by se to ve změně objemu a zářivosti. Převaha gravitace nad tlakem by znamenala smrštění a zvýšení zářivosti. Naopak převaha tlaku by měla za následek rozepnutí hvězdy a zmenšení její zářivosti*). Oba procesy ve hvězdách skutečně probíhají, dojde-li k porušení rovnováhy (gravitační smrštění, expanze obrů a střídání obou u některých proměnných hvězd). Většina hvězd (včetně Slunce) však žije po značnou část svého dlouhého života v mechanické rovnováze. Také žádné nálezy — ani paleontologické ani geologické — nespovídají o tom, že by zářivost Slunce v posledních 2–3 miliardách let významně kolísala.

Také ostatní rovnice mají samozřejmou platnost. Jejich řešení provádějí moderní počítačové stroje. Výsledkem je tzv. model Slunce (hvězdy): pro každé místo v nitru známe jeho teplotu, hustotu, tlak, chemické složení a můžeme říci, zda se energie v daném místě přenáší zářením nebo konvekcí čili vedením.

Z modelu se také dozvíme, zda gravitace ve středové oblasti (jádra) hvězdy nezmáčkla plazmu natolik, že ji zdegenerovala. Naše Slunce degenerované jádro nemá. Červení trpaslíci — hvězdy s vysokou středovou hustotou — naopak degenerovaná jádra mají. Jsou ovšem i zcela degenerované hvězdy — bílí trpaslíci, neutronové

*) Např. pokud jde o hmotu, Jupiter je největší možnou planetou. Kdyby byl několikrát větší, jeho vlastní gravitace by ho stiskla do značně menšího objemu — degeneroval by. Kdyby byl však desetkrát větší, stal by se zářící hvězdou. U blízké Barnardovy hvězdy byla v r. 1963 objevena planeta, která má hmotu 1,6krát větší než Jupiter a je skutečně menší než Jupiter.

hvězdy*). I jejich teorie je celkem dobře propracovaná. V případě bílých trpaslíků dobře vysvětluje všechny pozorované vlastnosti.

Dosud jsme se zabývali nitrem Slunce a hvězd, to jest tou částí, v níž je převážná většina hmoty a z které k nám nepřicházejí žádné fotony. Vnější obal, viditelný, z něhož přichází přímo všechno elektromagnetické (ne však neutrinové!) záření, se nazývá *atmosféra*. Např. každý foton slunečního záření je vyzářen elektronem ve sluneční atmosféře. Prakticky všechny fotony jsou vyzářeny spodní vrstvou sluneční atmosféry – fotosférou. Žádný foton není vyzářen přímo z vrstev pod povrchem. Fotosféra je poměrně tenká (asi 300 km hluboká) vrstva. V ní volné elektrony recombinovaly s neutrálními vodíkovými atomy a vytvářejí záporný iont vodíku



V rovnici $h\nu$ značí vyzářený foton, lépe řečeno jeho energii; h je Planckova konstanta, ν je frekvence fotonu. Kinetická energie elektronů je různá, neboť jejich rychlosti jsou rozloženy podle Maxwellova rozdělení. Bude proto různá i energie fotonu $h\nu$, tedy i frekvence (vlnová délka) záření. Fotosférické fotony vnímá naše oko jako bílé světlo, které lze spektrografem rozložit na původní složky – sluneční spektrum. Z vodíkových atomů je ionizována velmi malá část (méně než 0,1%) a k dobré elektrické vodivosti přispívají atomy jiných prvků, hlavně kovů.

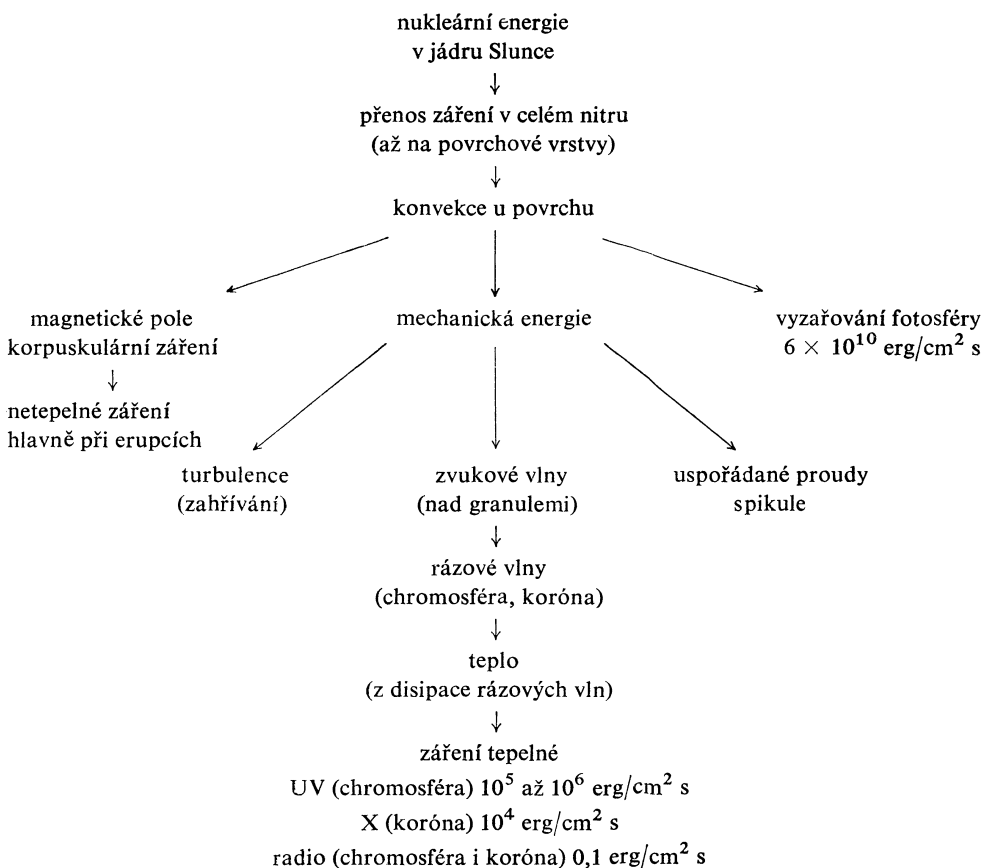
Na dno fotosféry zasahují z nitra *konvektivní proudy*, jejichž vrcholy se nám jeví jako jasnější zrnka, *granule*. Bez konvekce v podfotosférických vrstvách bychom pozorovali sluneční povrch hladký, bez granulace. Bez konvekce by fotosféra představovala celou sluneční atmosféru, v níž by teplota klesala se vzdáleností od povrchu. A je možné, že bychom ani nevěděli, co jsou sluneční skvrny. Proč dochází na Slunci (na hvězdách či v jiném plazmatickém útvaru) ke konvekci? Jakým mechanismem konvekce vytváří hořejší vrstvy atmosféry, to je chromosféru a korónu? Všechnu pestrost dění na slunečním povrchu i jeho odezvu na naší planetě způsobuje konvektivní vrstva pod fotosférou. Bez ní by nebyly protuberance, koróna, skvrny, sluneční vítr, ani polární záře.

Na otázku, proč Slunce volí pro přenos energie pod fotosférou konvekci místo záření, je snadná odpověď: konvekce je účinnější než záření. Teplota v nitru klesá se vzdáleností od středu. V centrální oblasti je třináct milionů stupňů Kelvina, ve fotosféře je teplota šest tisíc stupňů Kelvina. Tento pokles teploty (gradient teploty) je příčinou stálého toku energie z centrálních oblastí k povrchu. Do vzdálenosti přes šest set tisíc kilometrů od středu se přenos děje zářením. Výše klesá teplota natolik, že vodík již může existovat v neutrálním stavu, elektrony recombinovaly s protony. Tím se ovšem značně sníží průzračnost slunečního materiálu (vzroste opacita), vzroste

*) Jak jsme již uvedli, překvapující vlastností bílých trpaslíků je jejich velká hustota (asi milionkrát větší než průměrná hustota sluneční). Při takové hustotě je látka degenerovaná a její tlak závisí pouze na hustotě. Nejzajímavější vlastností degenerovaných hvězd je pokles jejich poloměru s hmotou – čím je hmota trpaslíka větší, tím je menší jeho objem.

gradient teploty materiálu a přenos zářením se stává méně efektivním než přenos konvekcí. Horká oblaka žhavých plynů vystupují z hloubky asi 50 000 km k fotosféře a chladnější proudy klesají do hloubek nitra. Hnací silou konvekce je vztlak. Za stejného tlaku v horkém oblaku a v chladnějším okolí je hustota v horkém oblaku menší a podle Archimedova zákona na horký oblak působí vztlak. Přenos energie v konvektivní vrstvě se tedy děje (částečně) ve formě kinetické energie horkých oblaků, kdežto v hlubokých vrstvách nitra pouze zářením.

Kinetická energie tvoří ve fotosféře zlomek celkové energie, přenášené směrem ven ze Slunce. V porovnání s proudem záření je tok mechanické energie fotosférou velmi malý, avšak pro existenci horní chromosféry a koróny je daleko důležitější.



Řetězec přeměn energie na Slunci

Zdrojem mechanické energie ve fotosféře je vodíková konvektivní zóna. Stoupající horká oblaka se zastavují na dně fotosféry, vyzařují svou energetickou zásobu, ochlazují se, houstnou a padají zpět ke dnu konvektivní zóny. Pokud jsou nahoře, pozorujeme je po dobu 6–8 minut jako jasnou granuli, o průměru asi 1 500–2 000 km. Kinetická energie horkého oblaku se na dně fotosféry mění v chaotické turbulentní pohyby. Energie turbulence přechází jednak v teplo, jednak ve zvukové vlny různých délek.

Při pohybu zvukových vln nahoru, to jest do míst s klesající hustotou, roste rychlost částic ve vlně. Zvukové vlny se mění v rázové, které se absorbují nad fotosférou a zahřívají na vysokou teplotu chromosféru a korónu. Celý řetěz přeměn energie, již je zahřívána chromosféra a koróna, lze tedy schematicky zapsat (viz schema na str. 71).

Takovým způsobem dnes vysvětluje sluneční fyzika prudký zvrát teploty nad fotosférou a celou stavbu Slunce a obyčejných hvězd.

O JEDNOTKÁCH ROVINNÉHO A PROSTOROVÉHO ÚHLU

EMIL SLAVÍČEK, Praha

ÚVOD

V tomto článku se budu zabývat postavením rovinného úhlu a prostorového úhlu v soustavě veličin, resp. postavením jednotek těchto úhlů v mezinárodní soustavě jednotek.

Důvodem, který mne k tomu vede, jsou stále dohady o tom, zda jednotky radián a steradián jsou jednotkami základními nebo jednotkami odvozenými. Nejednotnost názorů na tuto velmi závažnou otázku se projevila např. na jednáních o revizi ČSN 01–1301 „Fyzikální veličiny a jednotky ve vědě a praxi“ a byla do jisté míry podporována tím, že XI. Generální konference pro míry a váhy vytvořila pro radián a steradián zvláštní skupinu „doplňkových jednotek“ (unités supplémentaires), aniž toto rozhodnutí zdůvodnila nebo komentovala.

ZÁKLADNÍ POZNATKY Z TEORIE

Pojem *veličina* (fyzikální veličina) považujeme za základní pojem a nedefinujeme jej. Zhruba řečeno veličina je každý fyzikální pojem, který má kromě významu kvalitativního i význam kvantitativní. Mohli bychom také říci, že veličinou je každá měřitelná a srovnávatelná vlastnost objektivní reality.