



Výfučení: V hlavní roli Slunce

Slunce lidstvo už odpradáвна fascinovalo. Je to naše nejbližší hvězda a vděčíme mu za současnou podobu života na Zemi, z galaktického pohledu ovšem nijak nevyniká. Právě jeho blízkost poskytla vhodné podmínky pro staletí soustavného pozorování, jež pomohlo odhalit některé z pro nás fundamentálně neobvyklých dějů a teoreticky nahlédnout pod pokličku ostatních, zhruba podobných, hvězd. Ve Výfučení se vám pokusíme složité sluneční mechanismy přiblížit a podívat se, jak Zemi ovlivňují.

Struktura Slunce

Slunce je žhavá plynná koule tvořená převážně vodíkem (73 %) a heliem (25 %)¹. Při teplotách, které na Slunci panují, si však atomy vodíku ani helia neudrží všechny své elektrony u sebe – elektrony jsou totiž natolik rychlé, že se od jádra odtrhnou. Takové atomy nazýváme ionizované a plynu, který tvoří, říkáme plazma.² Sluneční fyzici znají vlastnosti plazmatu velmi dobře, proto dokáží určit, jak Slunce vypadá uvnitř, a rozdělit jej na několik vrstev.

Jádro

V jádře dosahuje plazma nejvyšších teplot (15 MK)³. Vodíkové kationty (kladně nabitě částice vodíku) zde mají takovou rychlost, že i přes odpudivé elektrické síly do sebe naráží a řetězcem reakcí se slučují na kationty helia – probíhá *termojaderná fúze*. Při ní se uvolňuje velké množství energie v podobě tepla a záření. Jako meziprodukty jaderných reakcí vznikají neutrína (velmi lehké elektricky neutrální částice, které s okolím skoro vůbec neinteragují a Slunce hned opouštějí) a pozitrony (opačné částice k elektronům se stejnými vlastnostmi i hmotností, ale kladným nábojem), které když se s elektronem spojí, společně s ním zaniknou a vyzáří svou energii. Tímto Slunce „spaluje“ vlastní hmotu. Řečeno v číslech, Slunce každou sekundu přemění 700 milionů tun vodíku na helium, z čehož 4 miliony tun materiálu ztratí vyzářením energie. Hmotnost m na energii převádí slavný Einsteinův vzorec $E = mc^2$, kde $c \doteq 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ je rychlost světla. Dosazením tedy zjistíme, že za sekundu Slunce zářením uvolní $E \doteq 3,6 \cdot 10^{26} \text{ J}$ energie, jeho tzv. *zářivý výkon* je tedy $L \doteq 3,6 \cdot 10^{26} \text{ W}$.

Vrstva v zářivé rovnováze

Udělejme na chvíli odbočku. Záření se šíří jako vlna po malých kouscích energie, kvantech, neboli fotonech. Velikost této energie lze vyjádřit součinem Planckovy konstanty h a frekvence f , neboli kmitočtu, tedy počtem vrcholů vlny, které projdou daným bodem za jednotku času. Vzdálenost dvou vrcholů nejkratší pravidelně se opakující části vlny se nazývá vlnová délka λ , ta je pro každou vlnu specifická a podle ní rozlišujeme například barvy světla.

Fotony putující z jádra Slunce se na své cestě musí nejdříve prodrat hustou vrstvou plazmatu, což jim může zabrat řádově statisíce let. Zhruba po každém uraženém centimetru totiž naráží

¹Vlivem termojaderné fúze se složení z dlouhodobého hlediska mění. Podíl vodíku klesá a roste množství helia.

²V češtině používáme rod střední pro fyzikální plazma, zatímco rod ženský pro krevní plazmu.

³V celém Výfučení uvádíme teplotu v jednotkách kelvin (K) a v jeho násobcích, např. v megakelvinech (MK). Prakticky jde o Celsiovu stupnici posunutou o 273,15 °C níž. Bod tání vody 0 °C je tedy 273,15 K.

na volný elektron, který foton pohltí a vyzáří ve zcela náhodném směru. Jde o vrstvu v zářivé rovnováze: z jádra přijde zhruba tolik fotonů, kolik jich vrstvu stihne opustit.

Konvektivní vrstva

Nad vrstvou v zářivé rovnováze se nachází méně hustá konvektivní zóna, ve které dochází k přenosu energie z jádra nikoliv zářením, ale vzestupnými a sestupnými proudy, tj. *konvekcí*. Částice sluneční hmoty ohřáté na teplotu 2 MK se dostanou až k povrchu, kde vychladnou na „pouhé“ tisíce kelvinů a klesají zase zpátky do hlubin. Jejich přítomnost je zjevná na snímcích Slunce, kde rozeznáme zrnečnou strukturu, *granulaci*, patřící hřebenům proudů.

Jejich rychlost – cca $2 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ – byla určena pomocí Dopplerova efektu. Při relativním přibližování zdroje se totiž vlnová délka pozorovateli zdá kratší a mluvíme o *modrém posuvu*, při vzdalování se naopak jeví delší a mluvíme o *rudém posuvu*. Relativní rychlost zdroje a pozorovatele *v* souvisí s posunutím vlnové délky podle vztahu

$$\frac{v}{c} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda},$$

kde $\Delta\lambda$ vyjadřuje, o kolik se původní vlnová délka λ změnila. Veličiny $\Delta\lambda$ i v jsou kladné pro relativní přibližování a záporné pro vzdalování.

Ze školy možná víte, že při pohybu elektrického náboje vzniká magnetické pole, stejný princip funguje i zde. Navíc je podpořen nerovnoměrnou rotací Slunce. Nitro se totiž kolem své osy otáčí jako pevné těleso, podobně jako Země, ale ve vyšších vrstvách, včetně té konvektivní, trvá na rovníku jedna otáčka 25 dní, zatímco na pólech asi 35 dní. Důsledkem je složité, silné magnetické pole, jehož siločáry⁴ vystupují vysoko nad povrch a tvoří smyčky – k nim se ještě vrátíme.

Fotosféra

Když se fotony z jádra dostanou k povrchu Slunce, úzké vrstvě zvané fotosféra, mohou již odletět pryč do prostoru. My se u ní však na chvíli pozastavme. Fotony, které se oddělily od elektronů, mají různé vlnové délky, v některých však Slunce vyzařuje více než v jiných. To popisuje tzv. *Wienův posunovací zákon*, jenž svazuje teplotu *absolutně černého tělesa* s vlnovou délkou maxima jeho vyzařování. Absolutně černé těleso je ideální model tělesa, které všechno záření absorbuje a žádné neodráží a jehož intenzitu vyzařování ovlivňuje pouze jeho teplota, nikoliv chemické složení. Absolutně černé těleso vyzařuje nejintenzivněji na vlnové délce

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T},$$

kde $b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$ je Wienova konstanta⁵ a T teplota tělesa v kelvinech. Slunce můžeme považovat za absolutně černé těleso, protože vzhledem k množství fotonů, které na různých vlnových délkách vyzařuje, má jeho odrazivost na rozložení intenzit jeho spektra jen velmi malý vliv. Doposud teplota plazmatu klesla až na $T = 5800 \text{ K}$, Slunce tedy nejintenzivněji vyzařuje na vlnových délkách okolo

$$\lambda_{\max} = \frac{2,9 \cdot 10^{-3}}{5800} \text{ m} = 500 \text{ nm}.$$

⁴Ve správné fyzikální terminologii se jedná o *magnetické indukční čáry*, což jsou uzavřené křivky orientované ze severního pólu magnetu do jižního. Můžeme je zviditelnit například nasypáním železných pilin do pole magnetu. Naopak siločáry jsou myšlené čáry, jejichž tečna ukazuje směr působící síly v daném poli.

⁵Tuto konstantu lze odvodit z fundamentálních konstant a její hodnotu tak známe přesně.

Výsledek zhruba odpovídá vlnové délce zeleného světla. Slunce však vyzařuje v celém viditelném spektru, vnímáme jej tedy jako bílé. Kvůli zemské atmosféře, která rozptyluje světlo, se nám na Zemi může jevit, že barva Slunce se v průběhu dne mění (např. večer se jeví načervenalé).

Pro zajímavost zmiňme, že na začátku spočítaný zářivý výkon Slunce můžeme pro absolutně černá tělesa vyjádřit i na základě Stefanova–Boltzmannova zákona pomocí povrchové teploty a poloměru Slunce využitím vzorce

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4,$$

kde $\sigma \doteq 5,7 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ je Stefanova–Boltzmannova konstanta a $4\pi R^2$ je povrch koule. Dosazením se přesvědčíme, že si výsledky skutečně zhruba odpovídají, tj. $L \doteq 3,9 \cdot 10^{26} \text{ W}$.

Atmosféra Slunce

Konče fotosférou, mluvíme dále o atmosféře Slunce. Její hustota se sice vyrovná laboratornímu vakuu, procesy v ní přesto přímo ovlivňují Zemi. Povrch Slunce obaluje *chromosféra* a nad ní se nachází *koróna*. Ani jednu vrstvu bychom bez využití speciálních filtrů družic neviděli, protože je za normálních okolností přesvítí fotosféra. Při zatmění Slunce lze korónu pozorovat i okem, stejného principu využívají pro pozorování Slunce také mnohé satelity.

Magnetické pole Slunce

Sluneční magnetické pole je, oproti zemskému, dvojího původu. Jedno globální, s póly poblíž heliografických (zeměpisných) pólů, má zhruba stejnou sílu a charakter jako to zemské. Druhé, lokální, je asi stokrát silnější. Přesné vysvětlení jejich vzniku stále neexistuje, avšak jak jsme dříve zmínili, souvisí s rozdíly v pohybu elektronů na rozhraní dvou vrstev.

Plazma reaguje na silné magnetické pole. Na nabitě částice pohybující se v homogenním magnetickém poli působí síla, která je nutí magnetické siločáry spirálově obkružovat. Elektrony a ionty tímto zůstávají spjaty se siločárami Lorentzovou silou⁶ a hovoříme o tzv. *zamrzlém magnetickém poli v plazmatu*. Plazma a siločáry se tedy navzájem ovlivňují, přičemž ve fotosféře převažuje vliv energie plazmatu kvůli sluneční rotaci, naopak v atmosféře převládá magnetické pole. V důsledku rotace Slunce se siločáry namotávají po slunečním obvodu až do té míry, že vznikne nové, opačně orientované magnetické pole, které to staré vyruší. Globální i lokální magnetické pole se přepóluje, k čemuž pravidelně dochází jednou za zhruba 11 let.

Sluneční skvrny

Elektrony a ionty krouží kolem siločar vlivem Lorentzovy síly, což omezuje příčný pohyb plazmatu vůči magnetickým siločarám. Magnetické pole takto potlačuje tepelné proudění plazmatu. Proto se ve fotosféře na místech, kde z povrchu vystupuje silné lokální magnetické pole, nachází chladnější ($T \approx 4000 \text{ K}$) plyn, jehož okolí jej přesvítí, a nám se tudíž jeví jako tmavá pole, která mohou být velikostně srovnatelná s planetou Zemí. Jde o *sluneční skvrny*. Sluneční skvrny se obvykle vyskytují v párech opačných polarit – z jednoho místa magnetické siločáry vystupují, do druhého vcházejí. Siločáry tedy tvoří oblouk, magnetickou smyčku, na obou koncích „ukotvenou“ ve slunečních skvrnách a pronikající až do koróny. Rozdělíme-li skvrny párované do dvojic na vedoucí a následné, zjistíme, že na severní polokouli mají vedoucí skvrny stejnou polaritu, zatímco na jižní polaritu opačnou a vždy za přibližně 11 let se tyto polaritu obrátí.

⁶Lorentzova síla je síla, která působí na pohybující se nabitě částice (jako jsou elektrony nebo ionty) v magnetickém, případně i v elektrickém, poli.

Během tohoto období slunečních skvrn přibývá a vyskytují se blíže rovníku – nastává *sluneční maximum*, ke konci jejich počet opět klesne do přibližně původního stavu.

Erupce

Pohyby slunečních skvrn (například kvůli rotaci Slunce) ovlivňují tvar v nich ukotvených magnetických smyček. Když se dvě opačně orientované siločáry k sobě přiblíží, může dojít k jejich přepojení do energeticky výhodnější konfigurace smyček. Nastává erupce, prudký výbuch, během něž se za pár desítek sekund uvolní obrovské množství energie (řádově 10^{25} J), jež ohřeje koronální plazma a urychlí okolní elektrony. Ve většině případů však není energie plazmatu dostatečná na překonání magnetického pole. V těchto situacích plazma ze Slunce vytryskne, ale magnetické pole jej stočí ve smyčce zpět do fotosféry. Tomuto jevu se říká *sluneční protuberance*.

Sluneční vítr

Přepojením siločar může dojít k *výronu koronální hmoty*, kdy se oblak plazmatu s magnetickým polem úplně odtrhne a poměrně velkou rychlostí unikne ze Slunce.

Proudy ionizovaných částic však ze Slunce odlétají neustále, nejen jako výrony koronální hmoty, které jsou pouze speciálním případem *slunečního větru*. Rozeznáváme dva druhy slunečního větru, *rychlý* a *pomalý*. Rychlý sluneční vítr pochází z míst, kde vystupují magnetické siločáry ze Slunce do meziplanetárního prostoru. Plazma po nich může jednoduše putovat pryč ze Slunce rychlostí okolo $800 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. Naopak pomalý sluneční vítr přichází z koronálních smyček. Jeho částice mají typickou rychlost $400 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ a po dalším urychlení mohou uniknout z vlivu Slunce.

Kvůli působení částic slunečního větru na proudy prachu a plynu míří ohony komet od Slunce. Když ionty narazí na magnetické pole Země, jsou buď odkloněny a putují dále do prostoru, nebo spirálově dokrouží až k magnetickým pólům Země, které je přitahují. Tady se srazí s molekulami vzduchu, předají jim energii, jež se následně vyzáří, což pozorujeme jako polární záři. V období vyššího slunečního maxima pronikne do horní vrstvy atmosféry Země více částic slunečního větru, a proto můžeme polární záři vidět i v nižších geografických šířkách (např. i v Česku). Má-li sluneční vítr dostatečnou sílu, může narušit ochrannou zemskou magnetosféru a tím vyvolat vysoké elektrické proudy v pozemských vodičích, které v nejhorším případě vyhoří. Poškodit se můžou i satelity mimo zemské magnetické pole, například se jim více opotřebovávají sluneční panely. Snaha o předcházení náhlým velkoplošným selháním techniky vedla ke vzniku oboru *kosmického počasí*, jež se zabývá předpovědí dějů na Slunci.

Natálie Lászlóová
natalie.laszloova@vyfuk.org

Michaela Urbanová
michaela.urbanova@vyfuk.org

Korespondenční seminář Výfuk je organizován studenty a přáteli MFF UK. Je zastřešen Oddělením propagace a mediální komunikace MFF UK a podporován Katedrou didaktiky fyziky MFF UK, jejími zaměstnanci a Jednotou českých matematiků a fyziků. Realizace projektu byla podpořena Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy.

Toto dílo je šířeno pod licencí Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported.
Pro zobrazení kopie této licence navštivte <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>.