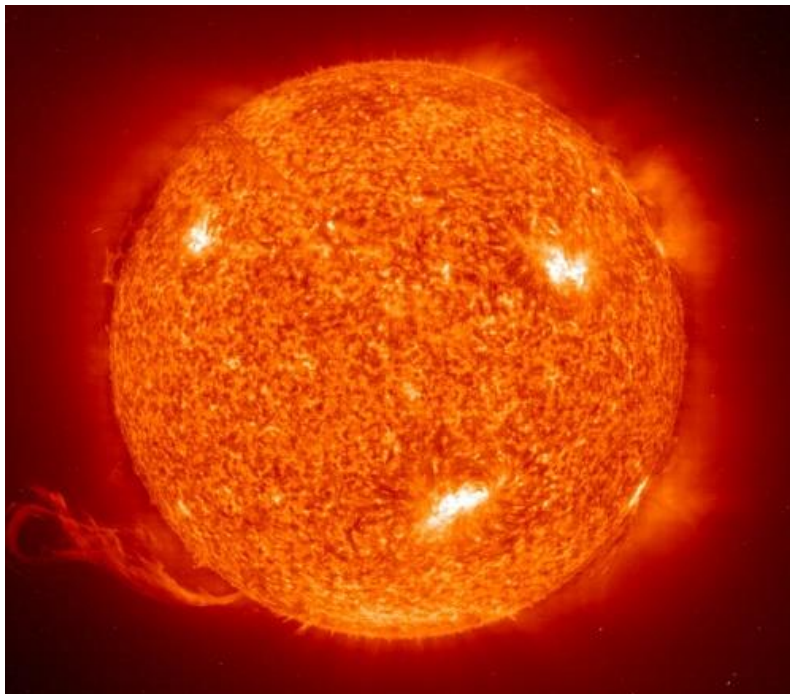


Slunce - otázky a odpovědi

Vladimír Štefl, Josef Trna

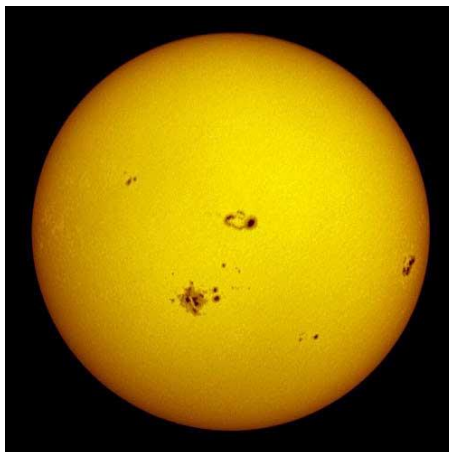


- **Zavřete oči a otočte tvář ke Slunci. Co na tváři cítíte?**

Cítíme zvýšení teploty pokožky. Dochází totiž k přenosu tepla tepelným zářením ze Slunce na naši tvář. Slunce je výrazným zdrojem tepelného (infračerveného) záření.

- **Proč Slunce září?**

Každé zahřáté těleso vydává do svého okolí energii v podobě záření. Slunce má vysokou povrchovou teplotou 5 780 K, vyzařuje tepelné a světelné záření, které vnímáme. Na snímku slunečního povrchu pozorujeme tmavší místa (skvrny), jejichž teplota je nižší přibližně o 1 500 K. Zpravidla lze sledovat několik slunečních skvrn jako na snímku.



- Jak je možné ze znalosti poloměru Slunce, jeho vzdálenosti od Země a na družicích obíhajících Zemi měřené solární konstanty (velikost energie záření dopadající na 1 čtvereční metr plochy za jednu sekundu) stanovit povrchovou teplotu Slunce?

Při známém poloměru Slunce $R_z = 7 \cdot 10^8 \text{ m}$, vzdálenosti Země – Slunce $1 \text{ AU} = 1,496 \cdot 10^{11} \text{ m}$ a solární konstantě $K = 1,37 \cdot 10^3 \text{ W.m}^{-2}$, pomocí aplikace Stefanova-Boltzmannova

zákona $4\pi r^2 K = 4\pi R^2 \sigma T^4$ určíme $T = \left(\frac{Kr^2}{\sigma R^2} \right)^{\frac{1}{4}} = 5780 \text{ K}$.

- Co je zdrojem energie Slunce?

Zdrojem energie Slunce jsou termojaderné reakce probíhající v jeho jádře, zjednodušeně řečeno ze čtyř protonů postupně reakcemi vzniká jádro atomu helia. Astrofyzikové souhrnně hovoří o syntéze vodíku na helium. Při těchto reakcích dochází k uvolňování jaderné energie po velmi dlouhou dobu.

- Dokážete odhadnout množství hmoty, které se přeměňuje na zářivou energii ve Slunci každou sekundu?

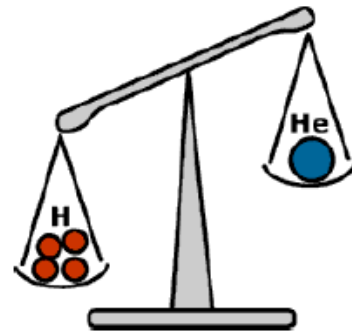
Slunce má zářivý výkon $3,84 \cdot 10^{26} \text{ W}$. Platí Einsteinův vztah: $\Delta E = \Delta mc^2$, proto

$$\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2} = 4,10^9 \text{ kg.s}^{-1} = 4 \text{ milióny tun za sekundu.}$$

Přibližně o řád nižší je úbytek hmotnosti Slunce způsobený slunečním větrem, složeným především z elektronů, protonů a α částic. Naopak existuje nárůst hmotnosti Slunce v důsledku pádu komet případně jiných těles sluneční soustavy. Shrnutí hmotnost Slunce ubývá. To má za následek zmenšení intenzity gravitačního pole, a proto vzdálenosti planet zvolna narůstají.

- Jak velké množství energie se uvolní při termojaderné přeměně vodíku na helium?

Základním zdrojem energie Slunce jsou termojaderné reakce, při kterých se uvolňuje energie odpovídající hmotnostnímu úbytku $\Delta E = \Delta mc^2$. Jeho velikost u termojaderné syntézy jader atomu vodíku - protonů na jádra atomu helia určíme jako rozdíl klidové hmotnosti čtyř protonů a jádra helia $\Delta m = (4 \cdot 1,67 - 6,63) \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 5 \cdot 10^{-29} \text{ kg}$. Dosazením obdržíme uvolněnou energii $\Delta mc^2 = 4,3 \cdot 10^{-12} \text{ J}$. Její velikost se jeví malá, při velkém počtu protonů, ve Slunci jejich počet odhadujeme na $\approx 10^{56}$ je uvolněná energie dostatečná, odpovídá zářivému výkonu hvězd.

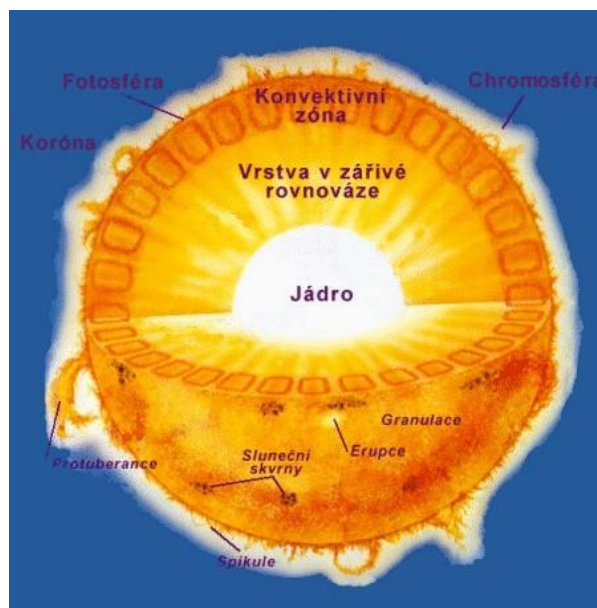


- **Jak je Slunce staré?**

Slunce je staré asi 4,7 miliard roků. Nejstarší horniny na Zemi jsou starší více než 4 miliardy roků, což umíme určovat pomocí radioaktivních metod. Samotná Země je však ještě starší než horniny, zhruba 4,5 miliardy roků. Obě tělesa vznikly z chladného prachoplynného mračka.

- **Jaká je stavba nitra Slunce?**

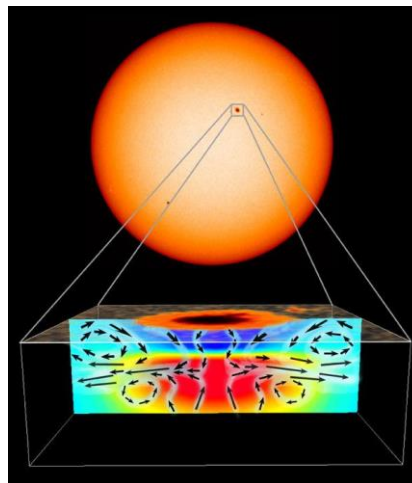
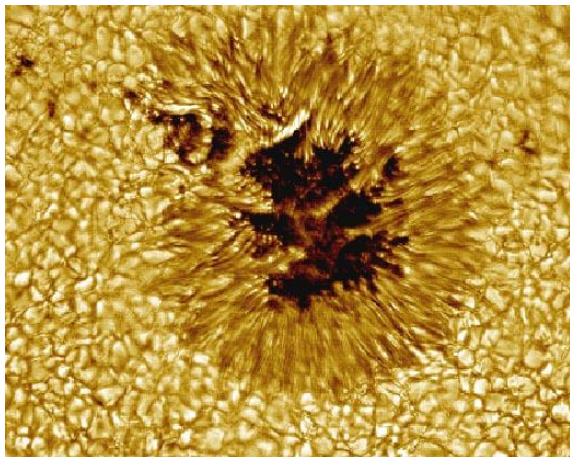
Do vzdálenosti $0,25 R_S$ od středu sahá centrální část – jádro Slunce, kde probíhají termonukleární reakce. Dále následuje oblast do zhruba $0,7 R_S$, kde se přenáší energie zářením. V poslední konvektivní vrstvě se teplo šíří prouděním, zóna, sahá až k povrchovým vrstvám. Důsledkem konvekce je granulace (tj. zrnění) sluneční povrchu. Atmosféru Slunce tvoří postupně směrem od povrchu jednotlivé vrstvy - fotosféra, chromosféra a koróna.



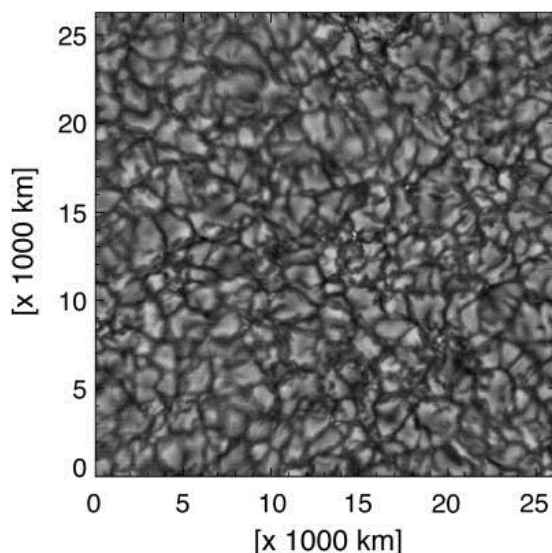
- Co představují a granule? Jak objasňujeme jejich vznik na povrchu Slunce?

sluneční skvrny

Skvrny jsou tmavá místa na povrchu Slunce, jejichž teplota je zhruba o 1 500 K nižší než okolní. Vznikají tak, že silná magnetická pole v některých místech u povrchu zadržují pohyb nabitých částic plazmy, zmenšuje se tepelný tok z nitra Slunce, a proto se v místě skvrny povrch ochlazuje.

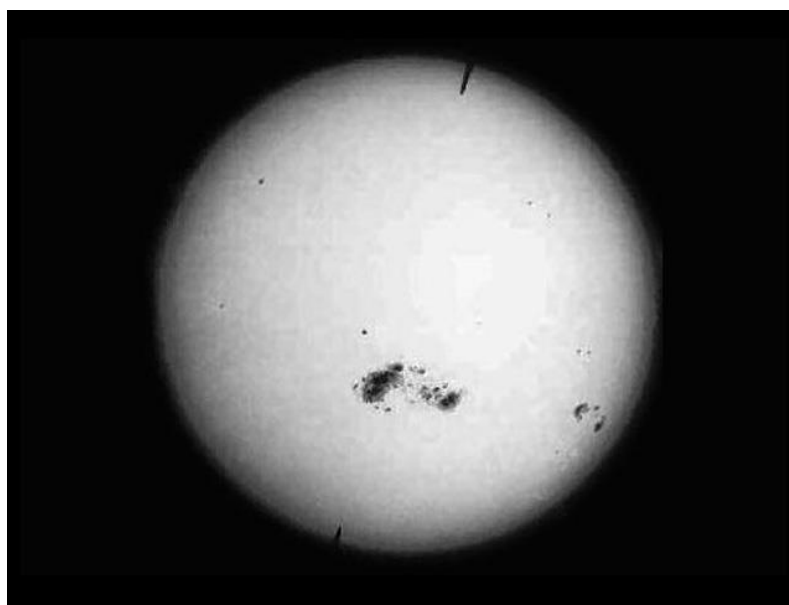


Slunce na obloze se vyznačuje středním úhlovým průměrem 1 920“. Při klidných atmosférických podmínkách na Zemi sluneční dalekohled umožňuje rozlišit detaily $\sim 1''$, což ve vzdálenosti 1 AU odpovídá ≈ 700 km na povrchu Slunce. Sluneční granule (zrnění), což jsou jednotlivé světlé oblasti, se vyznačují velikostí $\approx (500 - 1500)$ km a dobou existence ≈ 10 minut. Reprezentují vrcholy výstupných konvektivních proudů z nitra Slunce. Jejich teplota oproti tmavému prostoru mezi nimi je vyšší o několik set stupňů.



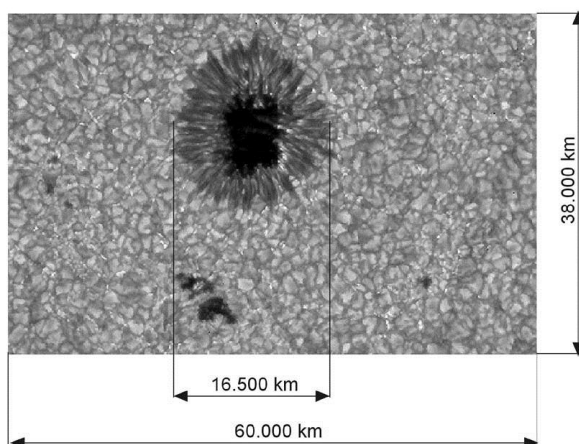
Typická velikost rozvinuté skvrny tvoří úhlově zhruba 50“, průměr $\approx 35\,000$ km. Pro srovnání velikost průměru disku Země bychom pozorovali ve vzdálenosti AU pod úhlem 18“.

Jedna z největších dosud pozorovaných slunečních skvrn, viz snímek, měla počátkem dubna 1947 rozlohu 18 000 milionů km^2 , s délkou 300 000 km a šířkou 145 000 km.



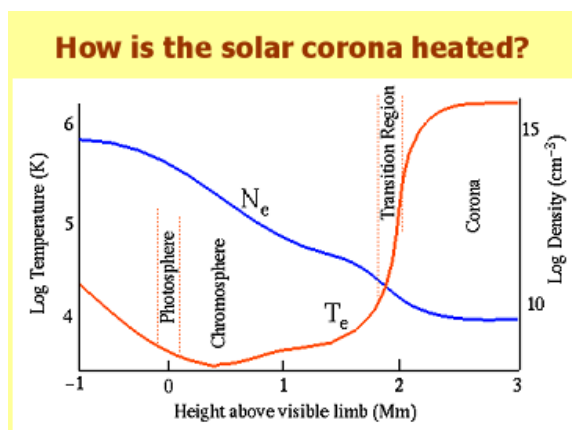
- Na snímku je menší skvrna o průměru 16 500 km. Můžeme ji pozorovat lidským okem při předpokládané rozlišitelnosti 1' ? Samozřejmě je nepřímé pozorování slunečního disku pomocí speciálních zařízení. Při přímém pohledu na Slunce by došlo k poškození zraku!

Ve vztahu $\alpha = \frac{S}{r}$ určíme $S = r \cdot \alpha = 43\,000\text{ km}$ při $\alpha = 1'$. Sluneční skvrna nebude okem pozorovatelná.



- Proč koróna, nejvyšší vrstva atmosféry Slunce, má velmi vysokou teplotu až miliony kelvinů!

Energie podpovrchových konvektivních proudů ve Slunci vytváří tzv. rázové vlny (obdobné například akustickým), které se šíří atmosférou Slunce až do koróny. Přenáší energii, zvyšují kinetickou energii částic v koróně, jejichž hustota je menší než ve spodnějších vrstvách atmosféry. Ve



vedlejším grafu modrá křivka zachycuje pokles koncentrace elektronů a červená křivka nárůst teploty, obojí s rostoucí výškou nad povrchem Slunce. Tedy ve vyšších vrstvách atmosféry Slunce je energie předávána mnohem menšímu počtu částic, jejichž průměrná energie na jednu částici tak může být vyšší. Další způsobem uvolňování energie v horních vrstvách atmosféry Slunce jsou tzv. rekonexe magnetického pole.

Snímek koróny Slunce pořízený při úplném zatmění Mgr. D. Korčákovou, Ph.D. z AÚ AV v Ondřejově.



- Proč je obraz Slunce u horizontu zploštělý?



Zploštění je vyvoláno refrakcí (lomem světelných paprsků v atmosféře), která vertikálně zmenšuje velikost disku. Svislý průměr je tak zkrácen o několik %. Za běžných podmínek se velikost slunečního kotouče v horizontálním směru nemění. U horizontu tak jsou úhlové rozměry slunečního disku 32' x 27'.

- **Proč je Slunce při východu respektive západu zabarveno červeně?**

Atmosféra je znečištěna prachovými aerosolovými částicemi. Je-li Slunce u obzoru, prochází sluneční paprsky delší vrstvou atmosféry, než když je Slunce vysoko nad obzorem v zenitu. Nejvíce se rozptýluje světlo o malých vlnových délkách, tedy modré. Nestací se rozptýlit červená, případně oranžová část spektra.

- **Proč astronomové zdůrazňují, že sluneční zatmění pozorovaná ze Země jsou výjimečná v celé sluneční soustavě?**

Důvodem je téměř shodná úhlová velikost obou kosmických těles (Slunce a Měsíce) při sledování zatmění ze Země.

- **Jaký bude důsledek pro úplná zatmění Slunce, jestliže se Měsíc pozvolna vzdaluje od Země?**

Úplná zatmění Slunce se změní na prstencová, neboť úhlová velikost Měsíce bude menší než Slunce.

- **Proč k určování vzdálenosti Slunce nepoužíváme radarovou metodu?**

Radarový signál se od plazmatického tělesa odráží velmi špatně.

- **Porovnejte střední hustotu Slunce a Země, budete překvapeni výsledkem. Jaký závěr lze z výsledku učinit?**

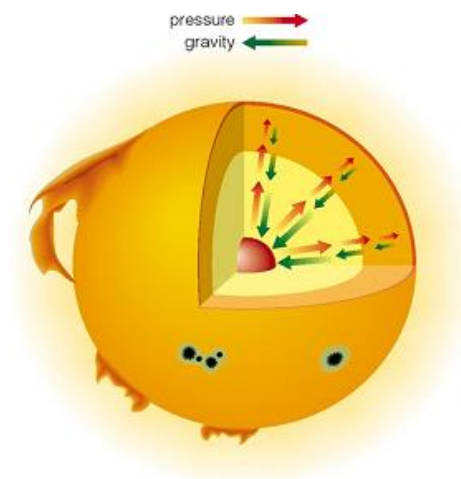
Předpokládáme zadání hmotnosti a poloměru Slunce a Země, $M_S = 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$, $R_S = 7 \cdot 10^8 \text{ m}$, $M_Z = 6 \cdot 10^{24} \text{ kg}$, $R_Z = 6,4 \cdot 10^6 \text{ m}$. Střední hustota Slunce je $\rho_S = 1,4 \cdot 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$, Země $\rho_Z = 5,5 \cdot 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$. Země má tedy 4krát vyšší hustotu. Připomínáme, že poloměr Slunce je 109krát větší.



- **Můžeme zkoumat fyzikální podmínky v nitru Slunce?**

Slunce jakož i hvězdy si můžeme představit jako sféricko-symetrické plynné koule v rovnovážném stavu, které se skládají z velkého počtu částic, především elektronů, protonů a α částic. Například celkový

počet částic v Slunci je vyjádřen číslem 10^{57} částic. Všechny se vzájemně přitahují podle zákona všeobecné gravitace. Pro každou dvojici částic je přitažlivá síla malá, ale celkově velký počet částic způsobuje, že výsledná síla vzájemné přitažlivosti je dostatečně veliká, aby udržela všechny částice plynné koule pohromadě. Slunce je ve stavu hydrostatické rovnováhy, což znamená, že síly působící na každý objemový element jsou v rovnováze. Tíhu elementu kompenzuje vztlaková síla vznikající tím, že tlak směrem ke středu hvězdy roste. Situaci v nitru Slunce vystihuje obrázek akrobatů, kde nejspodnější z nich nese tíhu všech na něm stojících. Představme si válec se základnou S , výškou Δr , osa válce směřuje radiálně ke středu hvězdy. Tlakové síly působící na plášť válce se vyrovnávají. Na spodní podstavu působící síla je rovna pS , na horní podstavu $(p + \Delta p)S$. Rozdíl těchto sil ΔpS označíme F_1 . Válec má tíhu $F_2 = \rho S \Delta r g$. Platí $F_1 + F_2 = 0$. Odtud vyplývá rovnice hydrostatické rovnováhy $\Delta p = -\rho g \Delta r$. Protože ρ a g jsou kladné veličiny, platí $\frac{\Delta p}{\Delta r} < 0$, tedy tlak od středu hvězdy monotónně klesá. Ve hvězdě působí tlak p_g plynu $p_g = \frac{A}{\mu} \rho T$, kde A je plynová konstanta $A = 8,31 \cdot 10^3 \text{ J.kg.K}^{-1}$, μ je střední relativní hmotnost připadající na jednu částici. U hvězd horní části hlavní posloupnosti je výrazný tlak záření $p_r = \frac{aT^4}{3}$, kde $a = 7,55 \cdot 10^{-16} \text{ J.m}^{-3} \cdot \text{K}^{-4}$.



I přes velkou vzdálenost Slunce od nás a nemožnost přímého pozorování nitra, existují metody jeho studia. Lze využít zákon všeobecné gravitace a upravenou stavovou rovnici plynů, zjednodušeným způsobem provést odhad centrálního tlaku a teploty v nitru Slunce. Nejprve provedeme odhad centrálního tlaku p_c . Tlak záření p_r pro hvězdy s hmotnostmi

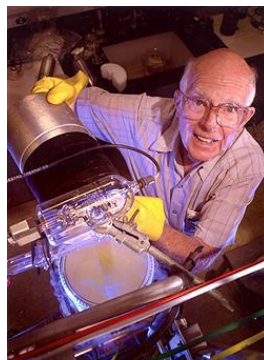
srovnatelnými s hmotností Slunce je mnohem menší než tlak plynu p_g proto můžeme tlak záření zanedbávat. Vyjdeme z rovnice hydrostatické rovnováhy zapsané zjednodušeně $p = p_g$. Tuto podmínku si můžeme názorně představit tak, že tlak plynu v blízkosti středu plynné koule se musí rovnat tlaku vytvářenému tíhou sloupce plynu s příčným průřezem 1 m^2 a výškou rovnou poloměru koule - hvězdy. Tíha sloupce plynu je rovna síle, kterou je přitahována ke středu koule. Dosadíme do zákona všeobecné gravitace $F = G \frac{Mm_2}{\left(\frac{R}{2}\right)^2}$, kde

M je hmotnost celé koule a m_2 je hmotnost výše definovaného sloupce plynu. Označíme-li symbolem ρ průměrnou hustotu plynu v sloupci, pak $m_2 = \rho R$, kde R je poloměr koule. Vzdálenost mezi středy koule a sloupce plynu je $r = \frac{R}{2}$. Za těchto podmínek je tíha vytyčeného sloupce plynu na m^2 rovna $p_c = G \frac{M\rho R}{\left(\frac{R}{2}\right)^2} = 4G \frac{\rho M}{R}$. Po dosazení základních

charakteristik Slunce, $M = 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$, $R = 7 \cdot 10^8 \text{ m}$, $\rho = 1,4 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ obdržíme $p_c \approx 10^{15} \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$. Dále provedeme výpočet průměrné teploty v nitru Slunce T . Budeme předpokládat, že přibližně platí $p = \frac{p_c}{2}$, kde p je průměrný tlak ve vzdálenosti $r = \frac{R}{2}$ od středu Slunce. Dosazením do vztahu pro tlak obdržíme $p = \frac{2G\rho M}{R}$. Ze stavové rovnice vyjádříme $T = p \frac{\mu}{\rho A} = \frac{2G\mu M}{R}$. Odtud po dosazení, při $\mu = 0,6$ získáme $T \approx 10^7 \text{ K}$.

- **Můžeme zkoumat nitro hvězd?**

Při termojaderných reakcích vznikají v nitru Slunce neutrino, která lze na Zemi detekovat. Jejich analýza umožňuje zkoumat fyzikální podmínky v nitru hvězd, například teplotu. Z energie neutrín poznáme, jaké konkrétní typy termonukleárních reakcí v nitru probíhají. Shrnutí nitro hvězd přímo



Raymond Davis Jr., čerstvý nositel Nobelovy ceny.
Foto Brookhaven National Laboratory.



Davisův experiment běžel nepřetržitě od roku 1970 do roku 1994 a za tu dobu vzniklo v Davisově cisterně díky slunečním neutrinům asi 2200 atomů radioaktivního argonu. Foto R. Davis.

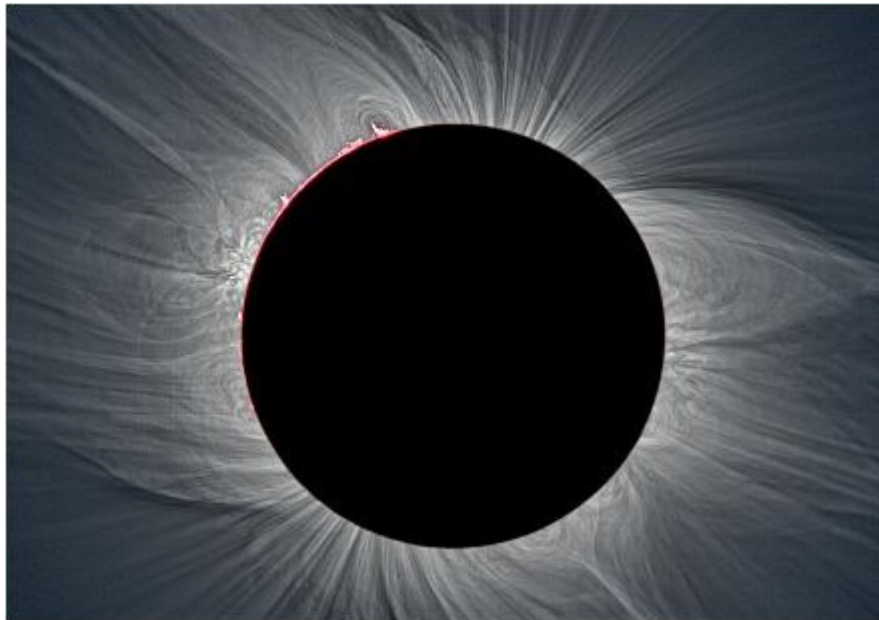
pozorovat nemůžeme, k dispozici máme pouze detekci neutrín. Za jejich detekci a analýzu obdrželi R. Davies (1914) a M. Koshiba (1926) Nobelovu cenu za fyziku v roce 2002.

- Slunce je pro nás především zdrojem světelného záření, vyzařuje však i v jiných spektrálních oborech. Víte, jak vypadá rozložení vyzářené energie v různých spektrálních oborech v případě klidného Slunce?

Je následující:

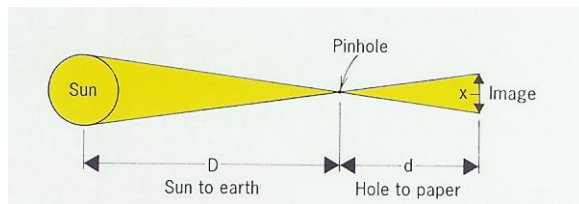
<i>rádiové záření</i>	$\lambda > 2 \text{ } \mu\text{m}$	6 %
<i>infračervené záření</i>	$\lambda (0,78 - 2) \text{ } \mu\text{m}$	38 %
<i>viditelné záření</i>	$\lambda (0,78 - 0,38) \text{ } \mu\text{m}$	49 %
<i>ultrafialové záření</i>	$\lambda (0,38 - 0,10) \text{ } \mu\text{m}$	7 %
<i>rentgenové záření</i>	$\lambda < 0,10 \text{ } \mu\text{m}$	0,01 %.

- Můžeme pozorovat sluneční korónu?



Koróna má oproti Slunci menší jas zhruba milionkrát, takže ji normálně nelze pozorovat. Pouze při zatměních ji můžeme pouhým okem vidět až do vzdálenosti několika poloměrů Slunce. Dobře je na obrázku pozorovatelná zářivá struktura koróny, kopírující rozložení siločar magnetického pole. Energie je v ní přenášena zářením a magnetickými poli. Teplota dosahuje $(1 - 2) \cdot 10^6 \text{ K}$. Koróna je zdrojem slunečního větru.

- **Můžeme určit průměr Slunce pomocí jednoduchého experimentu s papírem s dírou a stínítkem?**



Z geometrie situace vyplývá, že průměr Slunce určíme ze vztahu $S = D \frac{x}{d}$.

Literatura:

- [1] Domanski, J., Štefl, V.: Zatmění Slunce. Školská fyzika 5, (1998) č. 3, s. 3.
- [2] Grygar, J.: Hvězdná budoucnost energetiky. Školská fyzika 6, (2000), č. 2, s. 6.
- [3] Kleczek, J.: Velká encyklopedie vesmíru. Academie, Praha 2002.
- [4] Kippenhahn, R.: Odhalená tajemství Slunce. Mladá fronta, Praha 1999.
- [5] Šolc, M. aj.: Fyzika hvězd a vesmíru. SPN, Praha 1987.
- [6] Štefl, V., Domanski, J.: Slunce a jiné hvězdy. MFI 18, (2009) č. 8, s. 472.
- [7] Vanýsek, V.: Základy astronomie a astrofyziky. Academia, Praha 1980.