
7. kapitola o Slunci

viditelné světlo:

kotouček (ze všech směrů stejný) => koule
barva BÍLÁ, barvy různých hvězd (AČR) na monitoru, gamut OBR
ostrý, ale "kostrbatý" a barevný okraj (tenká atmosféra - fotosféra, seeing, barevná vada)
okrajové ztemnění (vidím do různých hloubek s různou T) OBR
skvrny, umbra, penumbra, vlákna, jasné body, mosty OBR
fakule
granulace

OBR propustnost atmosféry vs. vlnová délka, družice SOHO
OBR schéma sluneční věže, coelostatu, Lyotova koronografu*

* Vysvětlení funkce koronografu: zobrazení Slunce v ohniskové rovině objektivu O_1, odraz zrcadlovou clonkou B mimo tubus; polní čočka O_2 zobrazuje objektiv do roviny s clonkami C_3, C_4, které potlačují paprsky odchýlené difrakcí na clonách C_1 a B; poslední čočka O_3 pak už jen prodlužuje ohnisko do roviny F_2'. Předtím je řazen úzkopásmový filtr, naladěný tak, že propouští záření horkého řídkého plynu emitujícího v čarách, čímž efektivně potlačuje fotosféru zářící v kontinuu.

při zákrytu, v koronografu, UV nebo úzkopásmových filtrech:

protuberance, filamenty
erupce
chromosféra
koróna, vnitřní vnější
sluneční vítr

OBR ~11 letý cyklus činnosti (projev ve skvrnách, jejich heliografické šířce, počtu erupcí)

relativní (Wolfovo) číslo skvrn: $R = \text{konst.} * (N_{\text{skvrn}} + 10 * N_{\text{skupin}})$

ANIMACE slunečních skvrn (diferenciální rotace 25-33 d), protuberance, konvekce, erupce a rekonexe magnetického pole, ...

vysvětlení útvarů:

(kdyby Slunce byla koule v TD rovnováze => fádni kotouč)

- hlavní jsou změny teploty (Planckův z.)
- ovlivnění konvekcí (granule)
- mag. polem (skvrny, erupce, protuberance)

MAGNETICKÉ POLE na Slunci:

- měření ve fotosféře spektroskopicky pomocí Zeemanova jevu OBR
- změny mag. pole z poloidálního na toroidální a zpět za ~22 let
 <- souhra diferenciální rotace, radiální konvekce a siločar "zamrznutých" v plazmatu

OBR schéma slunečního dynama

Pohyb nabité částice v elektrickém a magnetickém poli:

- > LORENTZOVA SÍLA $F_L = q(E + v \times B)$
- => Larmorova rotace (gyrace) podél magnetických siločar:

dostředivé zrychlení při pohybu po kružnici $a = v^2/r = F_L/m$;
 pro $E = 0$ a v kolmé na $B \Rightarrow$

$$r_L = \frac{m v}{q B}$$
 (čím "hustší" siločáry, tím větší B a menší r_L)

pro termalizované částice ve fotosféře jsou typické kinetické energie řádu

$$E_k = kT = 1.38e-23 * 6000 / 1.6e-19 \text{ eV} = 0.5 \text{ eV},$$

ale při erupcích mohou být elektrony (a ionty) urychleny třeba na $E_k \approx 10 \text{ keV}$,
 čemuž odpovídá rychlost (nerelativistická; $E_0 = 0.51 \text{ MeV}$):

$$v = \sqrt{2 E_k/m} \approx \sqrt{2 * 1e5 * 1.6e-19 / 9.1e-31} \text{ m/s} \approx 60\,000 \text{ km/s}$$

poblíž sluneční skvrny může být pole $B = 1 \text{ T}$:

$$r_L = 9.1e-31 * 6e7 / (1.6e-19 * 1) \text{ m} \approx 0.3 \text{ mm}$$

pokud má elektron i nenulovou složku rychlosti $v \parallel B$
 \Rightarrow "šroubovicový" pohyb okolo siločar s proměnným gyračním poloměrem
 \Rightarrow zrychlování/zpomalování E polem

(rychlost oblaků plazmatu v protuberanci je pro srovnání přibližně
 $100\,000 \text{ km} / 10 \text{ minut} \approx 150 \text{ km/s}$)

ABSORPČNÍ SPEKTRUM Slunce (podrobnější rozbor v 10. kapitole) OBR

<- spojitě záření z hustých částí fotosféry (podobné planckovskému AČR)
 prochází POLOPRŮHLEDNÝMI řidšími chladnějšími vrstvami fotosféry,
 jejíž atomy mají DISKRÉTNÍ energetické hladiny * a absorbují tedy selektivně
 (deexcitovat se mohou srážkově)

* protože pohyb elektronu je OMEZEN elektrickým potenciálem iontu,
 čímž podle řešení Schrödingerovy rovnice ** vzniká kvantování energie

** diferenciální rce pro komplexní vlnovou fci $\psi(r,t)$:
 $[-\hbar^2/2m \nabla^2 + V(r)] \psi(r,t) = i \hbar \partial \psi / \partial t (r,t)$;
 stacionární verze: $[-\hbar^2/2m \nabla^2 + V(r)] \psi(r) = E \psi(r)$;
 hustota pravděpodobnosti výskytu částice je $|\psi(r,t)|^2$

nejnápadnější čáry: 653 nm H_{α}
 596 nm sodíkový dublet
 486 nm H_{β}
 393 nm (blízko UV) H K čáry vápníku
 Balmerův skok v UV

místně též EMISNÍ ČÁRY (v nichž září HORKÝ ŘÍDKÝ PLYN, např. v koróně, v erupcích)

pro vznik konkrétních čar musí být vhodné podmínky

OBR průběh teploty ve fotosféře, chromosféře a koróně a místa vzniku čar

Helioseismologie:

- dopplerovská měření rychlostí na POVRCHU Slunce (z posuvů spektrálních čar)
- > rekonstrukce šíření vln v nitru
- > rychlost šíření vln závisí na rho, T, rychlostech proudění plazmatu *
- > vnitřní struktura Slunce:

jádro, zóna zářivé rovnováhy, konvektivní zóna

* např. šíří-li ve vlny po směru a proti směru proudění, objeví se na povrchu oscilace o dvou blízkých frekvencích, jejichž rozdíl je úměrný rychlosti proudění

OBR vnitřní stavba Slunce

OBR průběh rho, T, X, Y v závislosti na r

OBR rychlosti proudění ve směru rotace, k pólům i v radiálním směru

termonukleární reakce v jádře:

- proton-protonový řetězec s energetikou reakcí OBR
- schéma CNO cyklu OBR

rozepsaný proton-protonový řetězec (PPI):

p + p -> e+ + nu + D	1,18 MeV	<- jako kvanta záření plus E_kinetická produktů
e+ + e- -> 2gamma	~~~~	<- (anihilace; m0_elektronu c^2 = 0,51 MeV)
p + p -> e+ + nu + D	1,18 MeV	<- (slabá interakce)
e+ + e- -> 2gamma		
D + p -> gamma + He3	5,49 MeV	<- (silná interakce)
D + p -> gamma + He3	5,49 MeV	
He3 + He3 -> He4 + p + p	12,86 MeV	<- (silná interakce; E uvolněná pouze v podobě E_K!)

suma reakcí: "4p + 2e- -> He4 + 6gamma + 2nu"

baryonové číslo: +4 -> +4

náboj: +2 -> +2

suma uvolněné (využitelné) energie: 26,20 MeV

energie odnášená 2 neutrinami: 0,54 MeV <- tato NENÍ VYUŽITELNÁ pro ohřev plazmatu protože nu interagují s látkou jen slabě

=> KROMĚ 4 PROTONŮ SE SPOTŘEBOVÁVAJÍ I 2 ELEKTRONY!

PPII: E_neutrin

p + p -> e+ + nu + D	1,18 MeV	0,27 MeV
e+ + e- -> 2gamma		
D + P -> gamma + He3	5,49 MeV	
He3 + He4 -> gamma + Be7	1,59 MeV	
Be7 + e- -> nu + gamma + Li7	0,05 MeV	0,82 MeV
Li7 + p -> He4 + He4	17,35 MeV	

 "4p + 2e- -> He4 + 5gamma + 2nu" 25,66 MeV 1,09 MeV

PPIII (málo pravděpodobný, existuje ale i PPIV):

p + p -> e+ + nu + D	1,18 MeV	0,27 MeV
e+ + e- -> 2gamma		
D + P -> gamma + He3	5,49 MeV	

He3 + He4 -> gamma + Be7	1,59 MeV	
Be7 + p -> gamma + B8	0,14 MeV	
B8 -> e+ + nu + Be8*	8,37 MeV	6,71 MeV <- zde je vysokoenergetické neutrino!
e+ + e- -> 2gamma		(důležité pro měření nu toku ze S.)
Be8* -> He4 + He4	3,00 MeV	

 "4p + 2e- -> He4 + 7gamma + 2nu" 19,77 MeV 6,98 MeV

OBR vazebná energie na nukleon

další TN reakce běžné při vyšších teplotách (v jiných hvězdách)

- 3-alpha proces (extrémně nestabilní 8Be)
 - 2 4He -> 8Be + gamma (většina 8Be se rozpadne, ale...)
 - 8Be + 4He -> 12C + gamma
- Ne, O, Si, Fe

rovnice popisující změny koncentrací vypadají jako $dn/dt = \lambda * n^2 \dots$,
 kde reakční koeficienty $\lambda(T, \rho, \dots)$

neutrinový problém a jeho řešení NEUTRINOVÝMI OSCILACEMI (Fukuda et al. 1998)

pozorovaný tok neutrin $(5.44 \pm 0.99)e6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

OBR neutrinových dalekohledů

význam TUNELOVÉHO JEVU, aby reakce vůbec probíhaly:

OBR průběh potenciálu coulombického && silné interakce

minimum potenciálu $\sim -2 \text{ MeV}$ (na $2e-15 \text{ m}$)

a VRCHOL potenciálu $\sim 1 \text{ MeV}$ (na $6e-15 \text{ m}$) <- toto je COULOMBOVSKÁ BARIÉRA

ALE typické kinetické energie částic jsou JEN

$kT = 1.38e-23 * 1.5e7 / 1.6e-19 \text{ eV} \approx 1 \text{ keV}$

Když ze Schrödingerovy rce vypočítám vlnovou funkci $\psi(r)$
 pro proton (pohybující se v potenciálu druhého protonu)
 a hustotu pravděpodobnosti jeho výskytu jako $|\psi(r)|^2$,
 zjistím, že je nenulová i ZA coulombovskou bariérou!

=> kvantové procesy určují, jak vypadá záření přicházející ze Slunce
 ("vidím" diskrétní hladiny energie atomů) i energetiku T-N reakcí
 (kde probíhá tunelový jev).

OBR luminozita a rozměr Slunce v minulosti a v budoucnosti

- mladé Slunce mělo luminozitu $\sim 70 \%$ dnešní a postupně se zvyšuje;

pozn. na Zemi existuje ŽIVOT už 3.5 Gy a povrchová teplota se příliš nemění
 - to je zřejmě působeno živými organismy (zejména mořským planktonem)
 a koloběhem OXIDU UHLIČITÉHO: při zvýšení teploty se plankton rozbývá,
 během svého života váže atmosférický CO₂ a vytváří vápnité schránky,
 které po úmrtí organismů klesají na dno a vytvářejí sedimenty CaCO₃.
 Úbytek CO₂ v atmosféře pak vede k oslabení SKLENÍKOVÉHO JEVU a opětovnému
 snížení teploty na Zemi.

- při přeměně na červeného obra dojde k podstatné ZTRÁTĚ HMOTY,
což podle 3. Keplerova z. vede ke vzdálení planet (a "záchraně" Země)

(vývoj * podrobněji viz v kapitole 12)
