----

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 = konst. * (N_skvrn + 10 * N_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 => fádní 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 x 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 =>

```
       m v
r_L = ---        (čím "hustší" siločáry, tím větší B a menší r_L)
       q B
```

pro termalizované částice ve fotosféře jsou typické kinetické energie řádu

E_k = kT = 1.38e-23 * 6000 / 1.6e-19 eV = 0.5 eV,

ale při erupcích mohou být elektrony (a ionty) urychleny třeba na E_k =~ 10 keV,
čemuž odpovídá rychlost (nerelativistická; E_0 = 0.51 MeV):

v = sqrt(2 E_k/m) =~ sqrt(2 * 1e5 * 1.6e-19 / 9.1e-31) m/s =~ 60 000 km/s

poblíž sluneční skvrny může být pole B = 1 T:

r_L = 9.1e-31 * 6e7 / (1.6e-19 * 1) m =~ 0.3 mm

pokud má elektron i nenulovou složku rychlosti v || B
=> "šroubovicový" pohyb okolo siločar s proměnným gyračním poloměrem
=> zrychlování/zpomalování E polem

(rychlost oblaků plazmatu v protuberanci je pro srovnání přibližně
100 000 km / 10 minut =~ 150 km/s)

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

<- spojité 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):

```
[ -h'^2/2m \nabla^2 + V(r) ] psi(r,t) = i h' \partial psi / \partial t (r,t);
stacionární verze: [ -h'^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_alfa
                    596 nm  sodíkový dublet
                    486 nm  H_beta
                    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 neutriny:         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...,
kde reakční koeficienty lambda(T, rho, ...)

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

pozorovaný tok neutrin (5.44 +- 0.99)e6 cm^-2 s^-1

OBR neutrinových dalekohledů

význam TUNELOVÉHO JEVU, aby reakce vůbec probíhaly:

OBR průběh potenciálu coulombického && silné interakce

minimum potenciálu ~-2 MeV (na 2e-15 m)
a VRCHOL potenciálu ~ 1 MeV (na 6e-15 m) <- toto je COULOMBOVSKÁ BARIÉRA

ALE typické kinetické energie částic jsou JEN
kT = 1.38e-23 * 1.5e7 / 1.6e-19 eV =~ 1 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 ~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 rozbují,
  během svého života váže atmosférický CO_2 a vytváří vápnité schránky,
  které po úmrtí organismů klesají na dno a vytvářejí sedimenty CaCO_3.
  Úbytek CO_2 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)
