

# Vnútoraná stavba a dynamika Slnka

A. Kučera, *Astronomický ústav SAV, Tatranská Lomnica, akucera @astro.sk*

## Abstrakt:

Prehľadový referát podáva súčasný pohľad na vnútornú stavbu Slnka. V prvej časti je diskutovaná tvorba energie v jadre Slnka, a jej šírenie cez slnečné teleso a podmienky vzniku konvekcie. Ďalej sa referát venuje pohybu pod slnečným povrchom, vnútornému slnečnému magnetizmu, slnečnému dynamu a tvorbe aktívnych oblastí. Na záver sú objasnené princípy helioseizmológie, t.j. vedy o slnečných pulzáciách, a uvedené sú výsledky týkajúce sa rotačných charakteristík povrchu Slnka a jeho podpovrchových vrstiev.

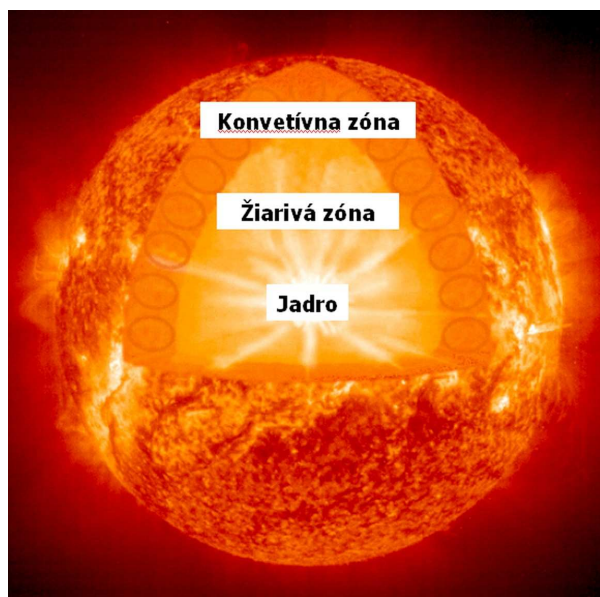
## 1. ÚVOD

Znalosti o vnútornej stavbe Slnka a tvorbe energie v jeho centre sú základom celej astrofyziky. Slnko je hviezdny „etalón“ ktorý máme k našej Zemi najbližšie a tak môžeme skúmať túto hviezdu v mnohých detailoch. V histórii hľadania odpovede na otázky „prečo a ako Slnko žiari“ a „aká je vnútorná stavba Slnka“, nachádzame mnoho omylov. Na druhej strane, k správnym poznatkom prispeli aj zdanlivo nesúvisiace objavy a teórie, ktoré boli často ohodnotené Nobelovou cenou. Napriek úsiliu vynikajúcich vedcov v minulosti, až prudký rozvoj pozorovacej a výpočtovej techniky mohol dať správnu odpoveď na spomínané otázky. Je zrejmé, že poznanie je relatívne a aj v budúcnosti bude zaznamenaný pokrok vo výskume vnútra Slnka, ale môžeme konštatovať, že naše vedomosti o vnútornej stavbe Slnka sa v posledných desiatich rokoch výrazne priblížili k realite. Veľmi významnú úlohu v tomto poznaní zohralo slnečné laboratórium SOHO (Solar and Heliospheric Observatory) a rozvoj novej vednej disciplíny – Helioseizmológie, výskumu vnútorných vrstiev Slnka pomocou analýzy šírenia tlakových vln, t.j. využitím metód ktoré sú používané v geofyzike, v seizmológii pre výskum oblastí pod zemským povrchom. Ďalším významným pokrokom je možnosť pozorovať s veľkým priestorovým rozlíšením množstvo úkazov a javov, ktoré majú síce pôvod pod slnečným povrchom ale prejavujú sa na slnečnom povrchu a v slnečnej atmosfére.

V prvej časti príspevku sa budeme zaoberať fyzikálnymi vlastnosťami a podmienkami v slnečnom jadre v zmysle produkcie a šírenia energie a tvorby neutrín. V druhej časti sa zameriame na vnútorný slnečný magnetizmus a s ním súvisiaci vývoj podpovrchových štruktúr aktívnych oblastí. V tretej časti ozrejmieme princípy helioseizmológie, popíšeme pozorovania potrebné k aplikáciám helioseizmológie a výsledky tejto novej modernej vednej oblasti.

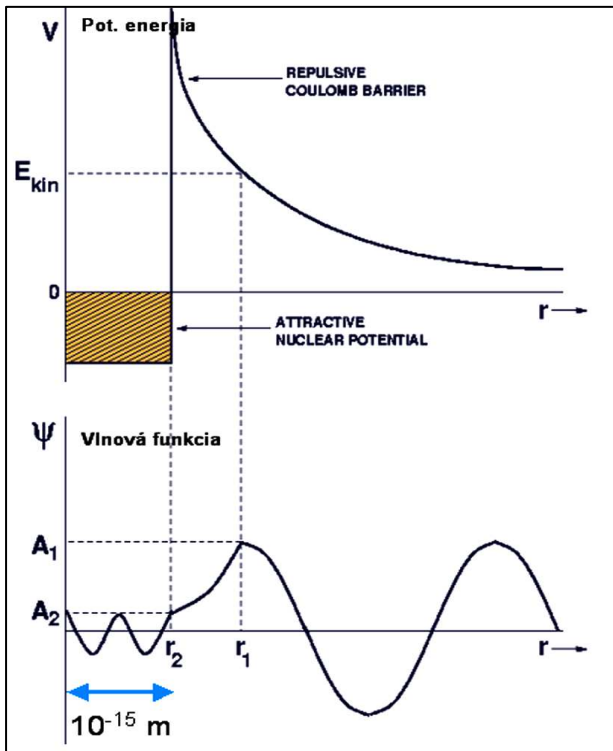
## 2. PRODUKCIA A ŠÍRENIE ENERGIE

Zdroj energie (termojadrové reakcie) sa nachádza v slnečnom jadre siahajúcom približne od stredu Slnka do 0.25 slnečného polomeru. Presná fyzika termojadrových reakcií vo vnútri Slnka je veľmi zložitá, stále



Obr. č. 1. Schematické znázornenie troch hlavných zložiek vnútornej stavby Slnka.

prináša nové objavy a venuje sa jej celá jedna oblasť slnečnej fyziky. V jadre Slnka prebieha viacero typov reakcií, hovoríme o protón-protónovom cykle (PP-cyklus) ktorý má viacero modifikácií (PPI, PPII, PPIII) a o CNO cykle. V Slnku CNO cyklus hrá menej dôležitú úlohu, pretože nastáva hlavne pri vyšších teplotách (väčších ako 15 miliónov K) čo je prípad hviezd omnoho hmotnejších ako Slnko. Základnou reakciou je zrážka dvoch protónov a vytvorenie



Obr. č. 2. Znárodnenie Coulombovej bariéry – odpudivej sily dvoch rovnako nabitých častíc. S približovaním sa častíc prudko rastie odpudivá sila („repulsive Coulomb barrier“) a na jej prekonanie je potrebná veľká kinetická energia  $E_{kin}$ . Po prekonaní vzdialenosti  $10^{-15}m$ , sú častice silne viazané jadrovou väzbovou energiou („attractive nuclear potential“). V spodnej časti obrázku, je znázornený princíp tunelového javu, keď vo vyjadrení pohybu častice vlnovou funkciou nastáva nenulová pravdepodobnosť prekonania Coulombovej bariéry.

deuréria. Dve vodíkové jadrá – protóny musia pri zrážke prekonať odpudivú silu tzv. Coulombovu bariéru, aby mohlo dôjsť k ich spojeniu – syntéze. K prekonaniu týchto odpudivých síl dochádza iba pri vysokých teplotách, vtedy majú pohybujúce sa jadrá vodíka veľkú rýchlosť, a bariéra je prekonaná iba vďaka kvantovo-mechanickému efektu nazvanému tunelovému javu. Častice musia prekonať Coulombovu bariéru rovnú elektrostatičkému potenciálu dvoch častíc „ $z_1$ “, „ $z_2$ “ oddelených od seba vzdialenosťou „ $r$ “. Zo vzťahu

$$z_1 z_2 e^2 / 4 \pi \epsilon_0 r$$

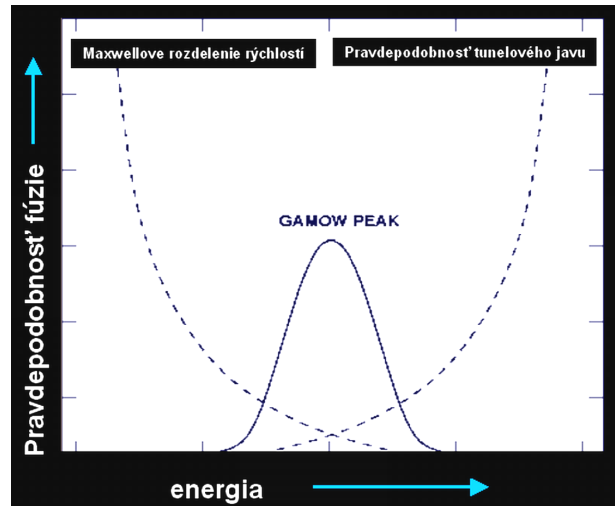
kde,

$$e = \text{náboj elektrónu} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C},$$

$$\epsilon_0 = \text{permitivita vákuu} = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-1},$$

môžeme vypočítať, že daný potenciál sa rovná 1.4 MeV t.j.  $2.3 \times 10^{-15} \text{ J}$ . Aby sme dali časticiam takúto dostatočnú energiu na prekonanie Coulombovej bariéry museli by sme plazmu zohriať na teplotu  $1.6 \times 10^{10} \text{ K}$ , čo je tisíc krát viac ako je teplota vo vnútri Slnka ( $1.5 \times 10^7 \text{ K}$ ). Preto bez tzv. tunelového efektu (kvantová mechanika) by vôbec nedochádzalo v Slnku k termojadrovým reakciám. Avšak aj tak pravdepodobnosť prekonania

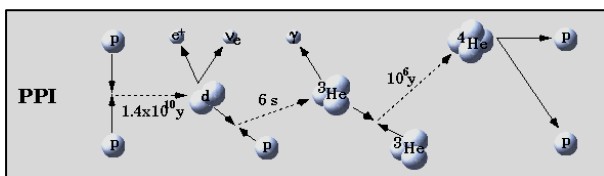
Coulombovej bariéry je veľmi malá. Je daná tzv. Gamowovým píkom. Jednoducho povedané, pravdepodobnosť fúzie potrebuje dostatočné množstvo vysokoenergetických častíc, pričom toto množstvo s rastúcou energiou klesá a potrebujeme dostatočne vysokú pravdepodobnosť tunelového javu, ktorá však začína až od určitej energie. Takže reakcie prebiehajú v úzkom intervale Gamowovho píku (viď Obr. č. 3).



Obr. č.3. „Gamowov pík“ – znázornenie pravdepodobnosti termojadrovej fúzie.

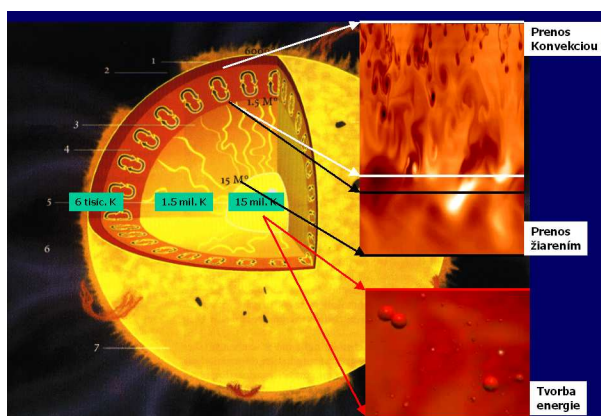
Pravdepodobnosť toho, že dva konkrétne protóny prekonajú odpudivé sily pri náraze do seba je  $1/10^{27}$ . To znamená, že pri  $10^{27}$  zrážkach (t.j.  $10^{27}$  pokusoch o prekonanie odpudivých síl) by sa im iba **jedenkrát** podarilo prekonať odpudivé sily a spojiť sa do izotopu vodíka nazývaného deutérium. Za 1 sekundu urobí protón v Slnku  $10^{10}$  nárazov. Rok má približne  $10^7$  sekúnd takže za rok vykoná protón  $10^{17}$  nárazov a za celú existenciu Slnka ( $10^{10}$  rokov) vykoná  $10^{27}$  zrážok, takže sa mu podarí práve jeden krát spojiť s iným protónom. Vzhľadom na to že zrážky protónov v jadre Slnka sa často opakujú a zrážajú sa tam obrovské množstvá protónov každú sekundu, máme na Slnku dostatočný počet prekonaní odpudivých síl každú sekundu a tým je zaručená kontinuita termojadrovej reakcie v Slnku, a tým aj tvorba energie.

Výsledkom všetkých reakcií (PPI, PPII, PPIII) a CNO cyklu je vznik hélia a uvoľnenie energie. Populárne povedané, v jadre Slnka sa „spaľuje“ vodík na hélium a po „vyhorení“ vodíka v centre sa reakcie presúvajú ďalej od centra, ale stále ostávajú v jadre Slnka. Na obrázku č. 4 je ukázaná schéma základnej termojadrovej reakcie PPI pri ktorej dochádza k spojeniu dvoch protónov „p“ do deutéria „d“, následnému spojeniu s ďalším protónom a vytvoreniu izotopu hélia  $^3\text{He}$  a spojení dvoch izotopov hélia  $^3\text{He}$  do hélia  $^4\text{He}$ . Prítom vzniká pozitron  $e^+$ , neutríno  $\nu_e$  a žiarenie  $\gamma$ . Všimnite si v schéme údaj „ $1.4 \times 10^{10} \text{ y}$ “ (y znamená roky), ktorý ukazuje, že dva konkrétne protóny sa spoja t.j. prekonajú vzájomné odpudivé sily keď sa budú opakovane, neustále zrážať 10 miliárd rokov.



Obr. č. 4. Schéma reakcie PPI.

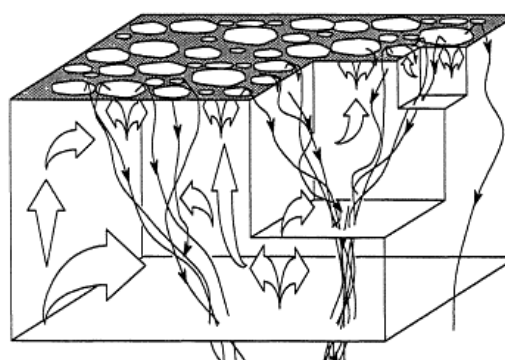
Energia vo vnútri Slnka vzniká z premeny hmoty na energiu podľa Einsteinovej rovnice  $E=mc^2$ . Potrebovali sme ale nájsť v jadre Slnka takú hmotu, ktorá by sa mohla podľa uvedenej rovnice premieňať na energiu. Dlhú dobu sa nedarilo prísť na to, odkiaľ by sa dala takáto hmotnosť v jadre Slnka získať. Úplne nezávisle a pri riešení iného fyzikálneho problému (získovanie hmotností rôznych prvkov) prišiel Francis Aston na to, že hélium je o 0.7% ľahšie (presnejšie – menej hmotné) ako súčet hmotností štyroch atómov vodíka. Tak sa hmotnosť potrebná na premenu na energiu našla. Tých 0.7% hmotnosti „zhori“ pri termojadrových reakciách na energiu. Vzhľadom na to, že Slnko má obrovskú hmotnosť ( $2 \times 10^{30}$  kg = 333 000 hmotností Zeme) zásoba hmoty určenej na „zhorenie“ vydrží na 100 miliárd rokov. Avšak zo scenára života Slnka vieme, že nie všetka jeho hmotnosť sa môže premeniť na energiu, ale iba tá časť, čo sa nachádza blízko jadra. Aj táto časť však vydrží na viac ako 10 miliárd rokov.



Obr. č. 5. Mechanizmy prenosu energie vo vnútri Slnka.

Energia vyrobená vo vnútri Slnka sa šíri k povrchu vo forme žiarenia veľmi pomaly. Cesta z jadra Slnka na povrch trvá fotónu až milión rokov pretože jeho stredná voľná dráha v Slnku je iba 1 cm.. Najprv je to tvrdé gama žiarenie, ale postupne mnohonásobným absorbovaním a emitovaním sa vlnová dĺžka žiarenia predlžuje, t.j. energia jednotlivého fotónu sa znižuje, až nakoniec fotón opúšťa Slnko hlavne ako fotón viditeľného svetla. Jeho vlnová dĺžka je nakoniec na povrchu Slnka okolo 500 nm. Energia sa v Slnku neprenáša stále rovnako, ale rozoznávame dva režimy (viď Obr. č. 5.), prenos energie žiarením a prenos energie konvekciou – premiešavaním horúcich vrstiev. Od jadra Slnka sa

približne do dvoch tretín slnečného polomeru prenáša energia žiarením. Potom v jednej tretine slnečného polomeru pod povrchom nastávajú také fyzikálne podmienky, že je výhodnejšie šírenie energie konvekciou. Horúce masy plazmy sa posúvajú hore, odovzdávajú energiu, ochladzujú sa a padajú naspäť do spodných častí. Tento zlom v spôsobe prenosu energie nastáva v miestach, kde je splnené tzv. Schwarzschildovo kritérium t.j. tam kde je veľký gradient (prudká zmena) teploty. Toto je práve jednu tretinu polomeru pod povrchom Slnka, pretože až sem zasahuje prudký pokles teploty ku ktorému dochádza na slnečnom povrchu v dôsledku vyžarovania energie do okolitého prostredia. Tesne pod slnečným povrchom dochádza k fragmentácii konvekcie na menšie celky (viď Obr.č. 6.) a hovoríme o granúlárnej konvekcii.

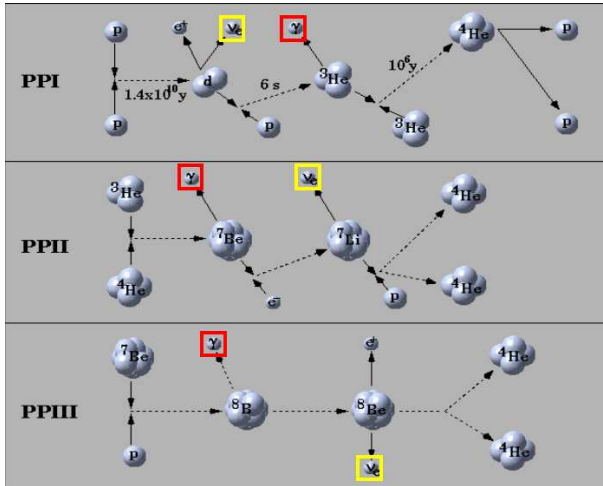


Obr. č. 6. Fragmentácia konvekcie tesne pod slnečným povrchom na menšie celky.

### 3. SLNEČNÉ NEUTRÍNA

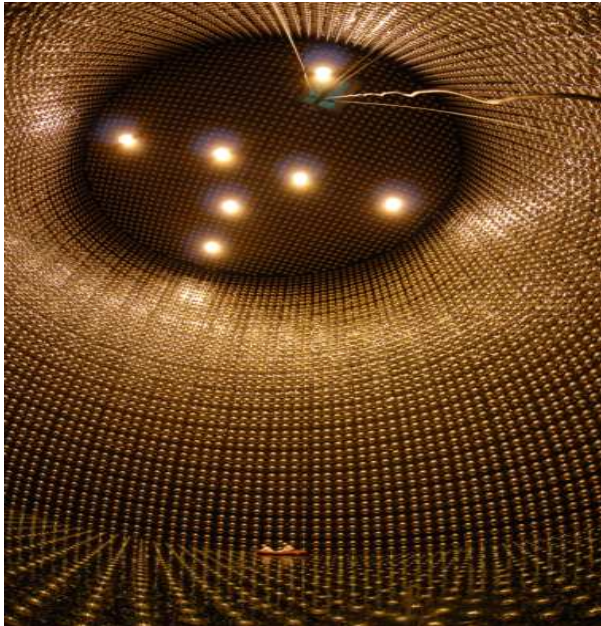
Okrem žiarenia, vznikajú pri termojadrových reakciách aj exotické častice – neutrína (viď Obr. č. 7., kde je neutrínno označené ako „ $\nu_e$ “ a gama žiarenie ako  $\gamma$ ). Pri našich znalostiach o reakciách prebiehajúcich vo vnútri Slnka sme schopní spočítať produkciu neutrín v Slnku za každú sekundu a prepočítať ich výskyt vo vzdialenosti Zeme od Slnka. Počet neutrín pri Zemi je rovný  $6 \times 10^{14} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , inými slovami, každú sekundu preletí cez ľudskú dlaň 7 biliónov neutrín. Neutrína nás informujú o tom, čo sa deje vo vnútri Slnka práve teraz. Na ich ceste zo Slnka ich nezastaví ani obrovská masa slnečného telesa. Za osem minút doletia zo stredu Slnka až k Zemi. Keďže neutrína takmer nereagujú s hmotou, je veľmi ťažké ich zachytiť nejakým detektorom na Zemi. Napriek tomu, v experimente prebiehajúcim už v 60-tych rokoch minulého storočia sa podarilo neutrína zachytiť. Hlboko pod zemou bola vybudovaná obrovská nádrž v ktorej bolo 378 000 litrov roztoku chlóru (podobný čistiacemu roztoku v čistiarňach šatstva) v ktorom sa z času na čas zachytilo jednotlivé neutrínno. Neutrínno môže veľmi zriedka interagovať s atómom chlóru,  $^{37}\text{Cl}$  a vytvorí tak rádioaktívny izotop argónu,  $^{37}\text{Ar}$ . Každý týždeň sa niekoľko atómov chlóru zmenilo vplyvom zachytených neutrín na argón.





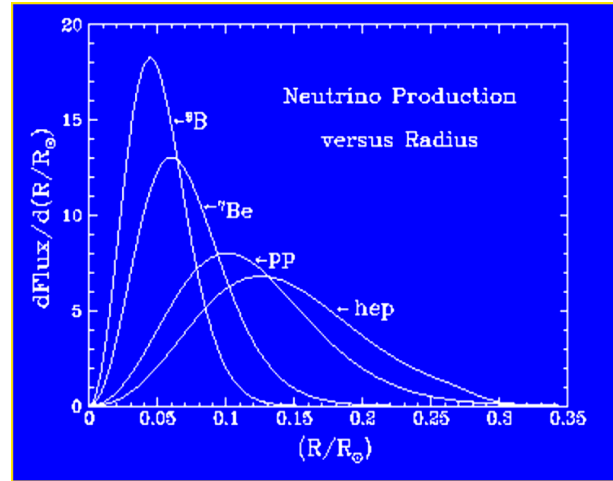
Obr. č. 7. Produkcia neutrín v PP cykle.

Úlohou bolo nájsť a spočítať tieto izotopy v nádrži podobnej plaveckému bazénu. Veľmi precíznou metódou sa to podarilo a zistilo sa, že zo Slnka prúdi o jednu tretinu až jenu polovicu menej neutrín ako by malo byť. Vznikol tzv. problém slnečných neutrín. Problém slnečných neutrín vyvolal polemiku, či je zlý tzv. Štandardný model Slnka ktorý popisuje fyziku celého slnečného telesa a aj časový vývoj Slnka ako hviezdy, alebo je chyba v časticovej fyzike popisujúcej neutrína samotné. V súčasnosti je všeobecný súhlas, že



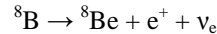
Obr. č. 8. Neutrínový detektor SUPER KAMIOKANDE

nezrovnalosti v Štandardnom modeli Slnka nie sú, ale problém je v samotnej exotickkej častici – neutríne. Má rôzne formy, osciluje a mení sa z jednej formy na druhú a tak komplikuje svoju detekciu a správne spočítanie jeho výskytu a produkcie v Slnku. Od čias prvého neutrínového experimentu bolo postavených viacero obrovských detektorov neutrín (príklad je na Obr. č.8.),



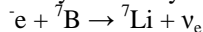
Obr. č. 9. Produkcia neutrín v závislosti na vzdialenosti od stredu Slnka .

ktoré sú citlivé na rôzne energie neutrín a tak bolo možné zostaviť „neutrínové spektrum“ a taktiež predstavu o tom, kde v Slnku sa produkujú jednotlivé typy neutrín. Obrázok č. 9., ukazuje, produkciu neutrín v závislosti na slnečnom polomere. Na osi x je vzdialenosť od centra Slnka vyjadrená v pomere k slnečnému polomeru od 0 do 0.35 a na osi y je produkcia toku neutrín od rôznych reťazových reakcií. Vidíme, že presne v strede Slnka sa už žiadne neutrína neprodujú, pretože tam už neprebiehajú termojadrové reakcie, proste tam už vodík „vyhorel“. Reakcie sa posunuli trochu ďalej od stredu Slnka pričom najproduktívnejšia je reakcia označovaná  $^8\text{B}$ :

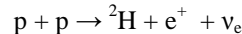


t.j rozpad bóru na izotop berýlia, pozitron a neutríno. Ďalšie hlavné reakcie produkujúce neutrína sú:

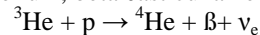
$^7\text{Be}$  - syntéza berýlia a elektrónu na lítium a neutríno :



pp - zrážka protónov s následnou produkciou deutéria, pozitronu a neutrína :



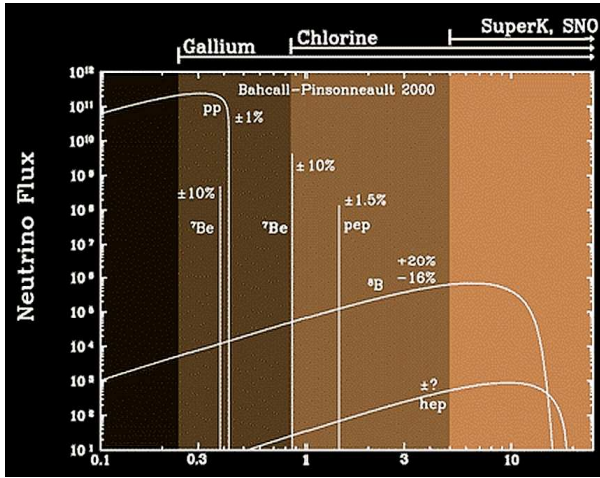
hep - zrážka izotopu hélia s protónom produkujúca hélium, beta časticu a neutríno:



Obrázok č. 9. názorne ilustruje, že v rôznej vzdialenosti od stredu Slnka prebiehajú rôzne reakcie, produkujúce rôzne množstvo neutrín.

Obrázok č. 10. ukazuje tok neutrín v závislosti na ich energii. Hovoríme o tzv. neutrínovom spektre. Vidíme, že najviac neutrín (presnejšie najväčší tok neutrín) má nízke energie – pp neutrína a najmenej neutrín má vysoké energie - hep neutrína. Ďalší typ - pep neutrína vznikajú reakciou:  $p + e^- + p \rightarrow ^2\text{H} + \nu_e$  t.j. spojením dvoch protónov a elektrónu vznikne deutérium a neutríno. Všimnite si, že  $^7\text{Be}$  reakcia a pep reakcia produkuje neutrína iba s presne stanovenou energiou (kolmé čiary), zatiaľ čo neutrína produkované pp reakciou,  $^8\text{B}$  reakciou a hep reakciou môžu mať rôzne energie (krivky v grafe). Rôznou pozadovou farbou sú označené oblasti energií neutrín ktoré môžu byť

mapované pomocou rôznych druhov neutrínových experimentov. Každý experiment totiž meria neutrína len v určitom rozsahu energií.



Obr. č. 10. Neutrínové spektrum. Obrázok ukazuje citlivosť neutrínových detektorov a závislosť toku neutrín na energii a na type ich produkcie.

#### 4. MAGNETICKÉ POLE

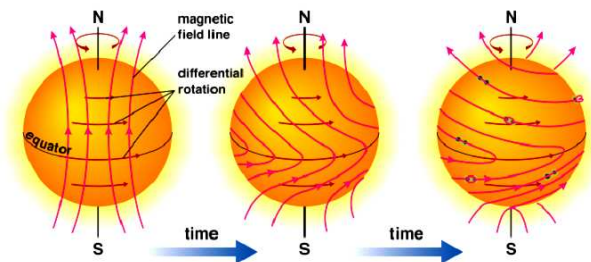
Pôvodné, fosílné magnetické pole oblaku, z ktorého vzniklo Slnko, je na Slnku v pravidelných periódach menené z približne dipólového poľa na zložitú magnetické pole aktívnych oblastí a rozpadom tohto poľa aktívnych oblastí sa zase vracia Slnko k dipólovému poľu. Hovoríme o 22-ročnom magnetickom cykle slnečnej aktivity, pretože až po 22 rokoch sa kladná polarita magnetického poľa vráti na pôvodné miesto t.j. napríklad späť na severný slnečný pól, pričom zmenu aktivity pozorujeme približne každých 11 rokov. Obrázok č. 11. schematicky znázorňuje navíjanie magnetického poľa v dôsledku diferenciálnej rotácie. V skutočnosti sa tento proces odohráva v hĺbke 175 tisíc km pod slnečným povrchom na vrstve nazývanej „tachocline“, kde je rozhranie žiarivej a konvektívnej zóny a kde pracuje slnečné dynamo. Základom pre popis vývoja magnetických polí na Slnku sú magneto-hydrodynamické rovnice, z ktorých najdôležitejšia je tzv. indukčná rovnica

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{V} \times \mathbf{B}) + \eta \nabla^2 \mathbf{B},$$

ktorá hovorí, že zmena magnetického poľa (presnejšie magnetickej indukcie) za čas je určovaná dvomi procesmi, interakciou pohybujúcej sa plazmy ( $\mathbf{V}$ ) s magnetickým poľom ( $\mathbf{B}$ ) (prvý člen na pravej strane rovnice) a difúziou magnetického poľa ( $\eta$ ) (druhý člen na pravej strane rovnice). To, ktorý proces bude v danom fyzikálnom prostredí prevládať, je určené tzv. Reynoldsovým magnetickým číslom  $R_m$

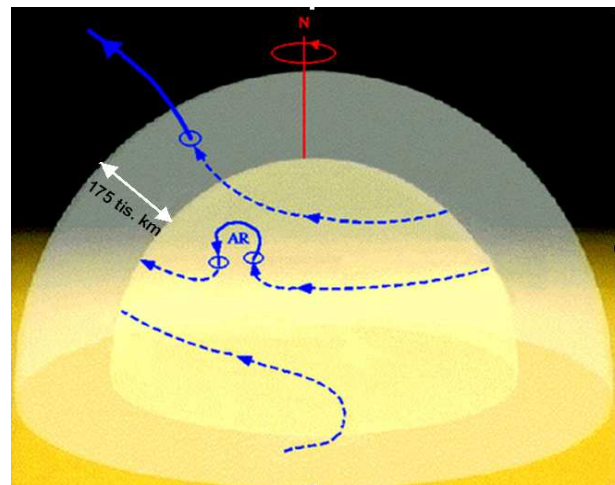
$$R_m = \frac{UL}{\eta},$$

kde  $U$  je typická rýchlosť plazmy,  $L$  je charakteristická dĺžka na ktorej prúdenie prebieha a  $\eta$  je magnetická difúzivita. Ak je  $R_m$  omnoho väčšie ako 1 (čo je práve prípad Slnka), potom je difúzia magnetického poľa zanedbateľná a prevláda unášavý pohyb plazmy. Hovoríme, že siločiar magnetického poľa sú „vmrznuté“ do plazmy a preto nasledujú jej pohyb. Tento proces sa podieľa jednak na vzniku aktívnych oblastí, pretože siločiar sú navíjané diferenciálnou rotáciou, ale aj na zániku aktívnych oblastí, pretože koncentrované magnetické pole škvŕn je „rozoberané“ práve vplyvom pohybu okolitej fotosférickej plazmy. Keby mala slnečná škvŕna zaniknúť iba v dôsledku difúzie magnetického poľa (druhý člen v indukčnej rovnici), trvalo by jej to 3000 rokov. Reálne sa ale škvŕna rozpadne omnoho rýchlejšie - za týždne až mesiace.



Obr. č. 11. Proces navíjania magnetických siločiar diferenciálnou rotáciou Slnka (© Addison Wesley)

Navíjaním a zhŕňovaním magnetického poľa, dochádza ku vzniku koncentrovaných magnetických slučiek, ktoré sú vytlačované na slnečný povrch a vytvoria tam slnečné slučky a škvŕny. Obrázok č. 12. ukazuje v akej hĺbke pod slnečným povrchom dochádza k navíjaniu magnetického poľa a ku vzniku slučiek. AR znamená „Active Region“, t.j. tú časť magnetickej slučky, ktorá po vynorení na slnečný povrch vytvorí aktívnu oblasť reprezentovanú hlavne slnečnými škvŕnami.



Obr. č. 12. Slnečné dynamo.





**Obr. č. 13. Vynáranie magnetickej slučky na slnečný povrch.**

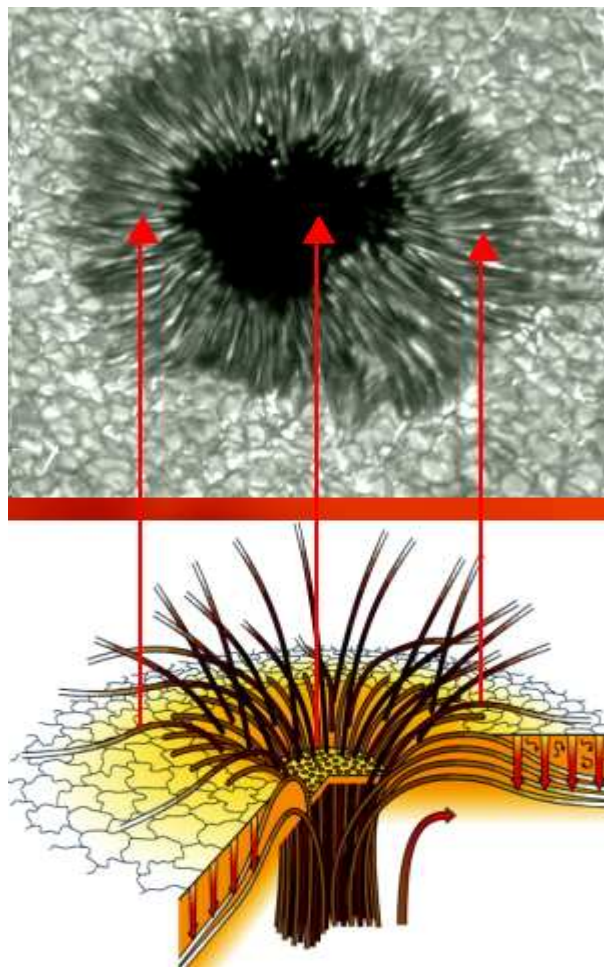
Obrázok č. 13. schematicky dokumentuje toto vynáranie magnetickej slučky na slnečný povrch a na Obrázku č. 14 je porovnanie reálneho pozorovania škvry s modelom jej štruktúry pod slnečným povrchom. Časový, približne dvojhodinový vývoj slnečnej škvry pozorovaný Holandským otvoreným teleskopom (DOT) na Kanárskych ostrovoch ukázal zrejme prúdenie plazmy vo vejárovitých silotrubiciach. Veľkosť škvry je približne rovnaká ako veľkosť Zeme. Dolný panel znázorňuje magnetické siločiaru zhustené v oblasti stredu slnečnej škvry a vejárovito sa rozširujúce von zo slnečnej škvry. Magnetické pole sústredené v centre slnečnej škvry má za následok aj to, že plazma zospodu nemôže prúdiť nahor, a preto je centrum slnečnej škvry chladnejšie -

tmavšie ako okolitá plazma. V centre škvry je teplota približne 4500 K, zatiaľ čo v okolitej fotosfére – granulácii je teplota 6700 K.

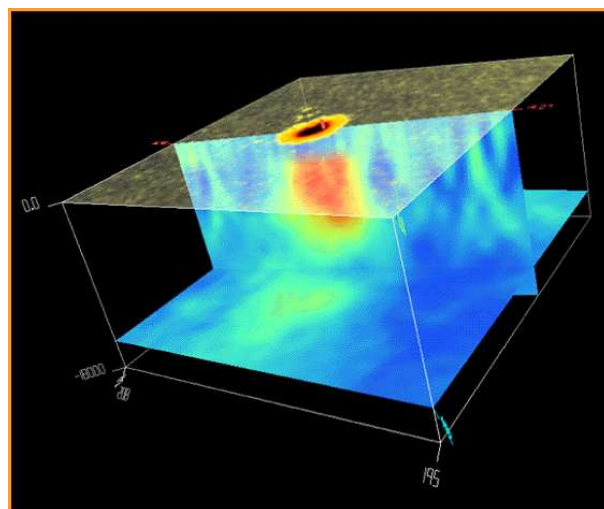
Helioseizmológia (viď ďalej) nám dovolila nazrieť aj pod slnečnú škvru, zmerať tam teplotu a odhaliť prúdenie plazmy. Obrázok č. 15. ukazuje reálne pozorovanie slnečnej škvry (horná šedá plocha a farebná škvry) a model fyzikálneho stavu pod slnečnou škvrou. Potvrdilo sa, že pod slnečnou škvrou je horúcejšia oblasť oproti okoliu, pretože horúca plazma prichádzajúca z vnútorných častí pod slnečným povrchom nemôže prúdiť nahor ale odteká do bočných strán. Tesne pod slnečnú škvru je preto nasávaná chladnejšia plazma z okolitých povrchových oblastí a preto je táto časť v porovnaní s okolitým prostredím chladnejšia – modrá farba a vo väčšej hĺbke je horúcejšia plazma – červená farba. Rozmery znázornenej kocky sú: šírka 80 000 km x 80 000 km a výška 24 000 km.

## 5. HELIOSEIZMOLÓGIA

Helioseizmológia je vedná disciplína zaoberajúca sa študovaním kmitov a vlnením pozorovaným na slnečnom povrchu. Cieľom tohto štúdia je zistiť fyzikálne vlastnosti a dynamiku podpovrchových a hlbších vnútorných oblastí Slnka. Hovoríme o slnečných osciláciách. Súvislé 24-hodinové pozorovania slnečného povrchu robené družicou SOHO, dovoľujú merať kmity slnečného povrchu veľmi detailne. Oscilácie sa merajú z Dopplerovského posunu spektrálnych čiar (viď Obr. č. 16). Pri meraniach urobených z obrázkov celého slnečného disku hovoríme o tzv. celodiskových doplergramoch. Dopplergram vznikne tak, že pre každé miesto

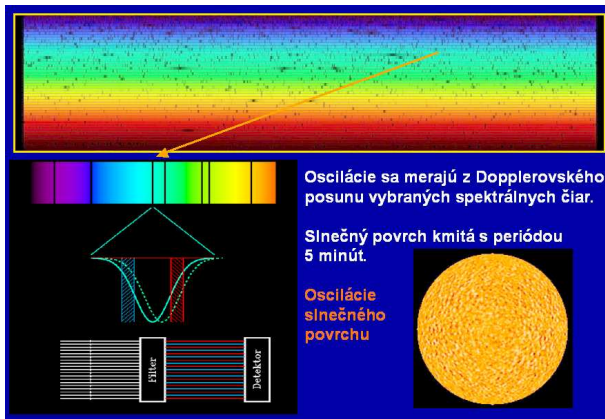


**Obr. č. 14. Magnetická štruktúra slnečnej škvry**



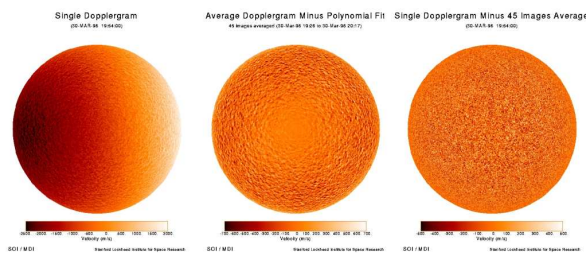
**Obr. č. 15. Anatomia škvry pod slnečným povrchom.**

na obrázku vypočítame rýchlosť približovania či vzdľavovania sa slnečného povrchu a na dané miesto nanesieme vo farebnej škále vypočítanú rýchlosť (svetlá - smer dole, od nás, tmavá - smer hore, k nám). Pre daný okamih, tak získame rozloženie rýchlostí na



Obr. č. 16. Princíp merania slnečných oscilácií využitím Dopplerovského posunu spektrálnych čiar.

povrchu Slnka. Séria Dopplergramov získaných z dlhých pozorovaní nám tak dáva informáciu o osciláciách slnečného povrchu. Z Dopplergramov sa najprv odčíta rotácia Slnka, ktorá by skresľovala merania lokálnych kmitaní. Ukážka reálnych Dopplergramov je na Obr. č.17. Podstata slnečných oscilácií je nasledovná.



Obr. č. 17. Príklad Dopplergramov. Vľavo je Dopplergram bez odpočítanej rotácie Slnka a preto je ľavá strana Dopplergramu tmavá - blíží sa k nám s rýchlosťou 2 km/h a pravá sa s rovnakou rýchlosťou vzdáva od nás. Vpravo je už Dopplergram s odpočítanou slnečnou rotáciou a tak je použiteľný pre výskum oscilácií.

Tlakové vlny šíriace sa v slnečnom telese (viď Obr. č. 18.) rozkmitajú slnečný povrch. Tlakové vlny vznikajú zložitým mechanizmom tzv. magnetokonvekciou pri ktorej sa generuje slnečným dynamom lokálne magnetické pole Slnka a vznikajú konvektívne pohyby, ktoré sú sprevádzané aj vlnením. Treba zdôrazniť, že zatiaľ čo pri konvekcii plazma skutočne tečie z jedného miesta na druhé, t.j. dochádza k reálnemu preskupovaniu hmoty, vlnenie zodpovedné za kmitanie, slnečného povrchu nepremiestňuje plazmu trvale, ale plazma sa pri prechode vlny iba zhusťuje a zrieduje lokálne – podobne ako vzduch na Zemi pri prechode zvukovej vlny. Jedná sa vlastne v oboch prípadoch o tlakovú vlnu, šíriacu sa stlačiteľným prostredím. V Obr. č. 18 sú znázornené vlny s rôznou periódou, pričom platí, že čím kratšia je perióda vlny, tým menej hlboko pod slnečný povrch vlna preniká a tak mapuje iba podpovrchové vrstvy. Vlny s väčšou periódou prenikajú hlbšie pod

povrch a sú zdrojom informácií o vnútornej stavbe a dynamike Slnka.

Teória helioseizmológie je relatívne zložitá a pre praktické výpočty je potrebná extrémne výkonná výpočtová technika. Oscilácie sférického objektu (Slnka) s relatívne malými amplitúdami môžeme popísať vo forme tzv. sférickej harmonickej funkcie v závislosti na heliografickej šírke (uhol  $\theta$  je meraný od pólu) a heliografickej dĺžke  $\Phi$

$$Y_l^m(\theta, \phi) = (-1)^m c_{lm} P_l^m(\cos \theta) \exp(im\phi),$$

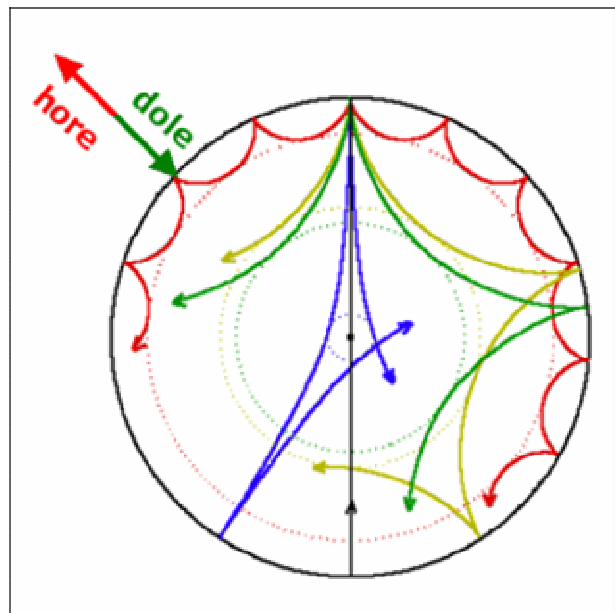
kde  $P_l^m$  je Legendrova funkcia a normalizačný člen  $c_{lm}$

$$c_{lm}^2 = \frac{(2l+1)(l-m)!}{4\pi(l+m)!},$$

je zvolený tak, aby integrál z

$$|Y_l^m|^2$$

cez celú sféru bol rovný jednej, t.j. zjednodušene povedané, aby vlna okolo sféry mala celočíselný násobok periód a tým uzavretú dráhu. Stupeň  $l$  nám



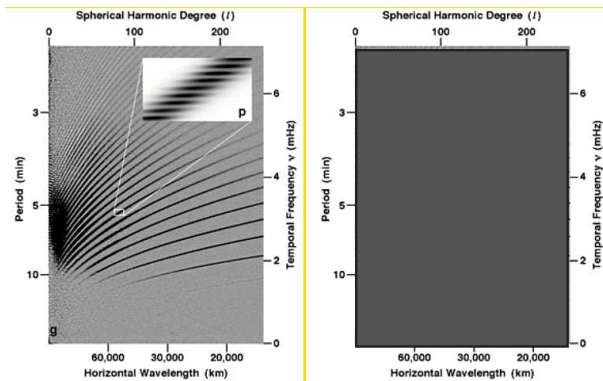
Obr. č. 18. Šírenie vln vo vnútri Slnka.

udáva celkový počet nódov (uzlov kmitania) na slnečnom povrchu a stupeň  $m$  celkový počet nódov na rovníku. Aplikovaním vyššie, zjednodušene, uvedeného matematického prístupu sa dá ukázať, že kmitanie slnečného povrchu nie je chaotické akoby sa na prvý pohľad zdalo ale v skutočnosti je to vzájomná rezonancia miliónov kmitov. Pomocou výkonných počítačov vieme tieto kmity analyzovať a tak skúmať slnečné vnútro. Obrázok č. 19. ukazuje v špeciálnom tzv. k-omega diagrame rozdiel medzi rezonanciou mnohých kmitov – ľavá strana čo odpovedá situácii na Slnku a chaotickými náhodnými pohybmi – pravá strana. Vidíme, že niektoré periody a vlnové dĺžky sú v ľavej strane obrázka preferované – tmavé pásiky, zatiaľ čo v



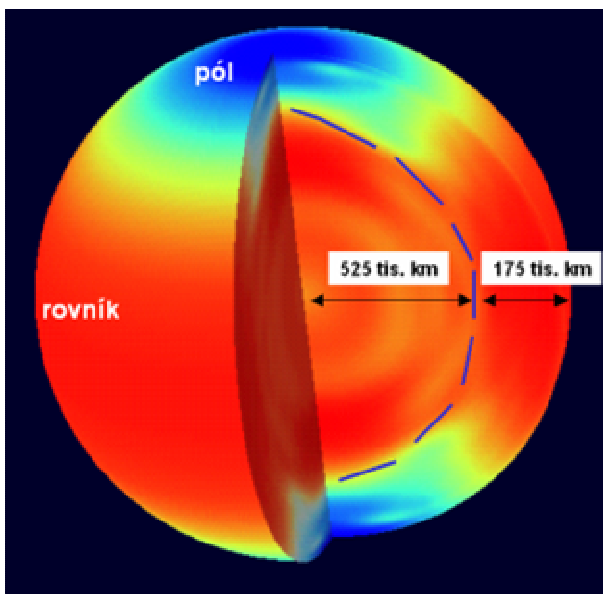
pravej strane pri chaotickom pohybe sa nenachádza žiadna významná, preferovaná perióda.

Helioseizmológiou môžeme zistiť rotačné vlastnosti Slnka. Využívame pri tom fakt, že rotácia slnečného telesa mení charakteristiku kmitov a z týchto zmien môžeme určiť rýchlosť rotácie a aj jej smer. Helioseizmológia tak potvrdila tzv. diferenciálnu rotáciu Slnka.



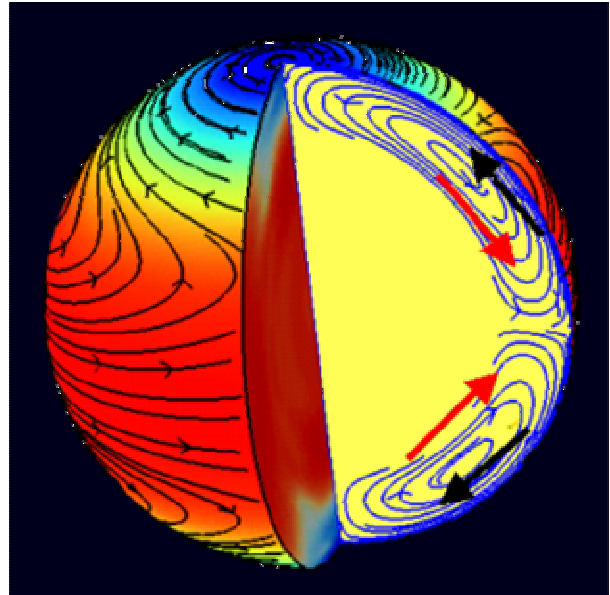
**Obr. č. 19.** Ukážka, že oscilácie na Slnku nemajú chaotický, náhodný charakter ale vykazujú kmity s preferovanými periódami. Ľavá strana predstavuje skutočné merania, a pravá ukazuje, ako by vyzeralo meranie pri náhodných chaotických kmítoch.

To znamená, že na slnečnom rovníku Slnko rotuje rýchlejšie, a bližšie k slnečným pólom je rýchlosť rotácie menšia. Táto vlastnosť rotácie Slnka je dávno známa. Helioseizmológia však umožňuje, zistiť rotačné charakteristiky Slnka aj v jeho vnútri. Práve preto, že vlny vystupujúce na povrch Slnka prechádzajú slnečným vnútrom, môžu na svojej ceste „mapovať“ vlastnosti slnečného vnútra a priniesť túto informáciu na povrch, kde sme schopní si ju „prečítať“. Obrázok č. 21. ukazuje rotačné charakteristiky vo vnútri Slnka. Do



**Obr. č. 20.** Rotačné charakteristiky vo vnútri Slnka. Červená farba znamená rýchlu rotáciu, modrá farba pomalú.

hlbky 175 000 kilometrov Slnko rotuje rovnako ako na povrchu, t.j. diferenciálne. Smerom k pólom sa rýchlosť rotácie spomaľuje (červená farba na rovníku, modrá na pólach). Ale hlbšie, od 175 000 do centra, Slnko rotuje ako tuhé teleso, to znamená, že všade, ako na rovníku tak aj pri pólach rotuje rovnakou rýchlosťou (červená farba je všade). Navyiac, pomocou dlhých a nepretržitých (24 hodín, niekoľko rokov) helioseizmológických pozorovaní pomocou družice SOHO sme zistili,



**Obr. č. 21.** Meridionálne prúdenie vo vnútri Slnka.

že rotačné charakteristiky slnečného povrchu aj slnečného vnútra sa s časom menia, odchyľujú sa od ideálnej diferenciálnej rotácie aj v závislosti na fáze 11-ročného cyklu slnečnej aktivity. Raz rotujú rýchlejšie – predbiehajú diferenciálnu rotáciu, a potom rotujú pomalšie, zaostávajú za ideálnou diferenciálnou rotáciou. Hlbšie v jadre Slnka striedanie takýchto rýchlostí nebolo zistené čo súhlasí s predstavou, že jadro rotuje ako tuhé teleso bez ohľadu na fázu cyklu slnečnej aktivity. Helioseizmológia odhalila aj ďalšiu zložku pohybu plazmy pod slnečným povrchom. Jedná sa o tzv. „meridionálne prúdenie“ t.j. pohyb plazmy od slnečného rovníka smerom k pólom tesne pod povrchom Slnka a následné prúdenie od pólom k rovníku vo väčších hĺbkach.

Ukázali sme si výsledky výskumu slnečného vnútra a výskumu vrstiev tesne pod slnečným povrchom. Všetko čo sa deje pod slnečným povrchom, má veľký dopad na dianie na slnečnom povrchu a v slnečnej atmosfére a prenáša sa do medziplanetárneho prostredia s dopadom na našu Zem. Preto je našou snahou porozumieť týmto mechanizmom čo najlepšie, aby sme mohli vplyvy Slnka na Zem predvídať.