

Polarizacija rasejanjem kao metod za dijagnostiku magnetnog polja mirnog Sunca

Ivan Milić

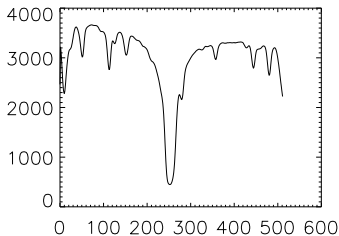
Astronomska opservatorija, Volgina 7, Beograd

Seminar Katedre za Astronomiju

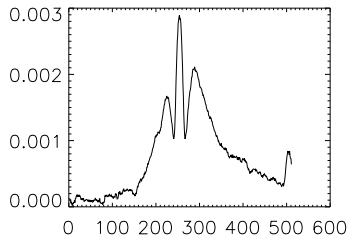
16. oktobar 2012.

Šta je uopšte spektropolarimetrija?

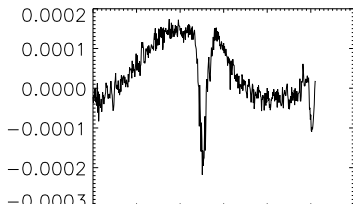
Na 5890 Stokes I



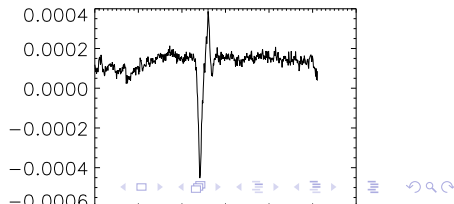
Na 5890 Stokes Q



Na 5890 Stokes U



Na 5890 Stokes V



A šta su onda Stoksovi parametri?

Polarizacija - osobina koja sledi iz transverzalnosti EM talasa: *nije svejedno u kojoj ravni osciluje, npr. \vec{E} .*

Duga istorija istraživanja sa dosta lepih (i korisnih) oktrića.

Svetlost ima "strane" (Isak Njutn).

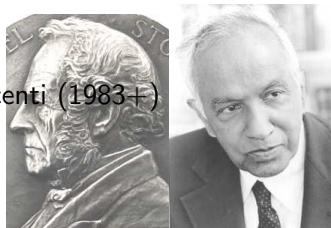
Prvi pravi

formalizam: Džordž Stoks (1852).

Uvodjenje u astrofiziku:

Subramanijan Čandrasekar (1950).

Opis na nivou atoma: Landi Degl'Innocenti (1983+)



Stoksovi parametri

- Razmatramo oscilovanje x i y komponenti vektora električnog polja:

$$E_x(t) = E_1 \cos(\omega t - \phi_1); E_y(t) = E_2 \cos(\omega t - \phi_2) \quad (1)$$

- U opštem slučaju, kompozicija ove dve oscilacije je neka elipsa.
- “Zgodno” (sa strane merenja, a videćemo i strane teorije) je definisati sledeće veličine:

$$I = E_1^2 + E_2^2 \quad (2)$$

$$Q = E_1^2 - E_2^2 \quad (3)$$

$$U = 2E_1E_2 \cos(\phi_1 - \phi_2) \quad (4)$$

$$V = 2E_1E_2 \sin(\phi_1 - \phi_2) \quad (5)$$

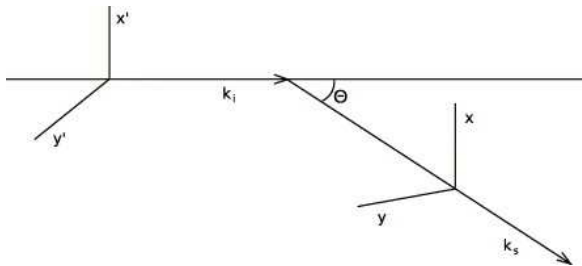
Stoksovi parametri

- Ovo su bile relacije za **jedan** EM talas. Očigledno važi:
$$I^2 = Q^2 + U^2 + V^2$$
- U praksi, mi se srećemo sa velikim skupom EM talasa, pa ćemo izvršiti prostorno i vremensko usrednjavanje svih ovih veličina. Ispostaviće se da je u ovom slučaju:
$$I^2 \geq Q^2 + U^2 + V^2$$
- Da bi smo skratili zapis stavićemo: $\hat{I} = (I, Q, U, V)^\dagger$
- Interakcija između materije i zračenja sada može da se opiše 4x4 matricama, npr:

$$\hat{I}' = \mathbf{R}\hat{I}$$

- *Primer: Šta bi radio običan linearni polarizator?*

Tomsonovo / Rejlijevo rasejanje



$$\mathbf{R}(\theta) = \frac{3}{4} \begin{vmatrix} 1 + \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & 0 & 0 \\ \sin^2 \theta & 1 + \cos^2 \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \cos \theta \end{vmatrix}$$

Prenos zračenja u spektralnim linijama

- Linije formirane apsorpcijom i rasejanjem zračenja
- *Rasejanje*: Radijativna ekscitacija praćena radijativnom deekscitacijom, malo drugačije od rasejanja na čestici

$$\frac{dI(\mu, \nu, \tau)}{d\tau} = I(\mu, \nu, \tau) - S(\nu, \tau)$$

$$S(\nu, \tau) = f(n_i)$$

$$n_i = f(I)$$

Za atom sa dva nivoa vrlo lep oblik jednačina statističke ravnoteže:

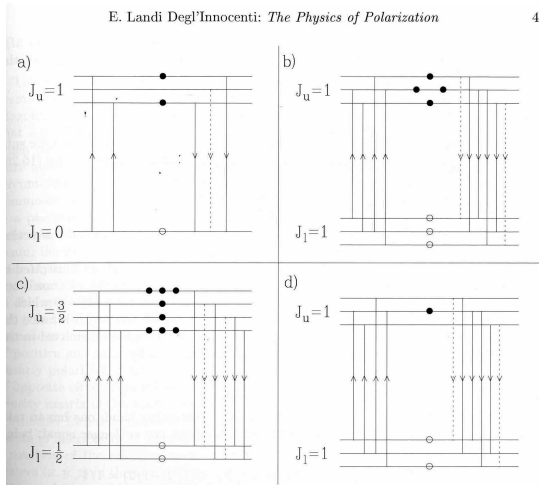
$$S = \varepsilon B + (1 - \varepsilon) \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-1}^1 I(\mu, \nu) \varphi(\nu) d\mu d\nu$$

Bilo bi super kada bismo mogli da imamo sličan formalizam za naš vektor intenziteta (Bommier, 1991+).

Rasejanje u spektralnim linijama

E. Landi Degl'Innocenti: *The Physics of Polarization*

41



Density matrix formalizam

Intenzitet sada postaje 4-vektor, emisivnost takodje, a koeficijent apsorpcije 4-tenzor!

$$\frac{d\hat{I}}{ds} = \hat{\epsilon} - \hat{\eta}\hat{I} \quad (6)$$

- Važe slični principi kuplovanja kao i kod skalarnog slučaja.
- Medjutim, čak i formalno izražavanje tenzora emisije/apsorpcije preko (momenata) intenziteta je vrlo komplikovano. Bilo bi lepo da imamo neki zgodan formalizam. Ovo se, inače, naziva NLTE problem druge vrste.
- Pa, za neke jednostavnije slučajeve imamo! Matrični formalizam!

Ali pre toga...

Sem zračenja, šta još utiče na polarizaciju u atomu?

- *Ne-elastični sudari*: Očigledno da ako atom predje u neko drugo stanje usled sudara sa nekom drugom česticom “gubimo” prelaz, dakle gubimo polarizaciju. RT jezikom rečeno: Manje sudara, veće ε , polje zračenja više dominira u funkciji izvora.
- *Elastični sudari*: Sudari sa jako malom razmenom energije “pretumbaju” raspodele u podnivoima i unište nam polarizaciju. To je tzv. *sudarna depolarizacija*
- *Magnetno polje*: Magnetno polje interaguje sa hiperfinom strukturom nivoa i uklanja degeneraciju. Iako cepanje nije dovoljno da dodje do Zeemanovog efekta, podnivoi počnu da se malo “preklapaju”, takodje uništava polarizaciju, i rotira ravan polarizacije: *Hanle efekat*

Redukujmo problem

Ograničimo se za sada na sledeći slučaj:

- Razmatramo atom sa dva nivoa koji naleže na kontinuum. Dozvoljavamo rasejanje u kontinuumu (kontinuum je takodje polarizovan).
- Magnetno polje postoji ali je “mikroturbulentno”. Ne možemo da razlučimo orijentaciju ali “osećamo” neki srednji intenzitet. Ovakvo je npr. magnetno polje *mirnog Sunca*.
- Geometrija je 1D, ovo znači da intenzitet zavisi samo od jednog ugla, θ , $\cos \theta = \mu$
- Najdivnija posledica ovih aproksimacija je što će ne-dijagonalni elementi matrice apsorpcije da nestanu i nama ostaje stara dobra optička dubina τ za sve četiri komponente vektora intenziteta. Ups! Sada ih je kanda ostalo samo **dve!**

Mikroturbulentni Hanle efekat

Rešavamo:

$$\frac{d\hat{I}}{d\tau} = (\phi_\nu + \beta)(\hat{I} - \hat{S}) \quad (7)$$

Gde je funkcija izvora za liniju:

$$\hat{S}_l(\mu) = (1 - \epsilon) \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-1}^1 \hat{P}(\mu, \mu') \hat{I} d\mu \phi_\nu d\nu + \epsilon B_t \quad (8)$$

Naravno, kao i u svakom lepom NLTE problemu, treba brzo, tačno i stabilno rešiti ove dve spregnute jednačine. Medjutim, pre nego što predjemo na numeriku, hajde da vidimo gde se krije koji fizički proces:

Mikroturbulentni Hanle efekat

Ovde je:

$$\epsilon = C_{ul}/(C_{ul} + A_{ul})$$

$$\hat{P} = \hat{P}_{is} + W_C W_B W_2 \begin{pmatrix} (\frac{1}{3} - \mu^2)(1 - 3\mu'^2) & (1 - 3\mu^2)(1 - \mu'^2) \\ (1 - \mu^2)(1 - 3\mu'^2) & 3(1 - \mu^2)(1 - \mu'^2) \end{pmatrix}$$

$$W_C = \frac{\Gamma_R}{\Gamma_R + \Gamma_I + D^{(2)}}$$

$$W_B = 1 - \frac{2}{5} \left[\frac{\Gamma_H^2}{1 + \Gamma_H^2} + \frac{4\Gamma_H^2}{1 + 4\Gamma_H^2} \right]$$

$$\Gamma_H = 0.88 \frac{gB}{\Gamma_R + \Gamma_I + D^{(2)}}$$

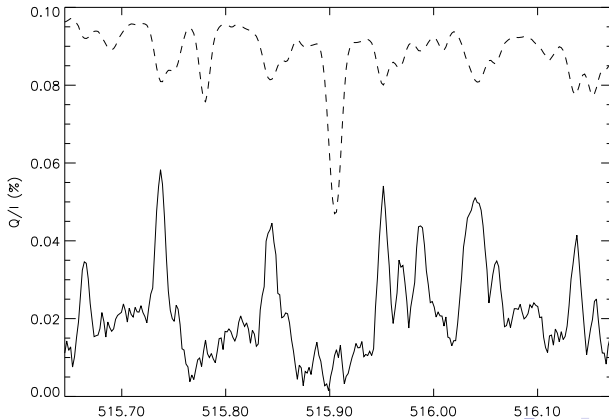
$$W_2 = f(J_u, J_l)$$

Metodi za rešavanje

- Kao i svaki drugi sistem jednačina (zapazimo da je linearan - analogno atomu sa dva nivoa u skalarnom problemu), možemo ga rešiti direktno: **Ovo je užasno skupo!**
- Naravno, treba nam iterativni metod: **Rešavanje jednačina na smenu (\wedge iteracija) sporo i neefikasno.**
- Optimalno rešenje: Ignorirati polarizaciju, rešiti skalarni problem, iterativno popraviti za polarizaciju: **Radi lepo za umerene vrednosti polarizacije (do par %)**
- PALI (Polarized Accelerated Lambda Iteration)
(Faurobert-Scholl, Frisch & Nagendra, 1997)

Može li ovo nečemu da služi?

Da, atom sa dva nivoa koji naleže na kontinuum dovoljno realistično reprezentuje neke molekulske linije u Sunčevoj atmosferi.



Cilj

- Semi-empirijski modeli Sunčeve atmosfere postoje već neko vreme i dosta dobro opisuju fotosferu i nižu hromosferu.
- Model atmosfere i molekulske konstante bi trebalo da su nam već poznate iz modelovanja “običnog” spektra, *osim*:
- **Koeficijenta sudarne depolarizacije:** pretpostavimo da linearno zavisi od nekog efikasnog preseka i da je srazmeran koncentraciji kolizionog partnera, npr. neutralnog vodonika.
- **Mikroturbulentnog magnetnog polja:** U principu zavisno od dubine.
- Dalje: Rezultati iz Milić & Faurobert (2012a, 2012b)

Šta želimo?

- Da simultano odredimo magnetno polje (B) i presek za sudarnu depolarizaciju.
- Ovo je radjeno mnogo puta; tzv. *Differential Hanle effect* metod
- Medjutim, mi želimo da, **simultano**, reprodukujemo posmatranja **na različitim pozicijama na disku (μ) u različitim linijama (MgH i C_2)**
- Ukupno $9 \times 3 = 27$ “merenja” (Mislimo da je besmisleno fitovati profil kao takav, ograničavamo se na polarizaciju u centru linije)

Zašto konstantno magnetno polje ne radi posao?

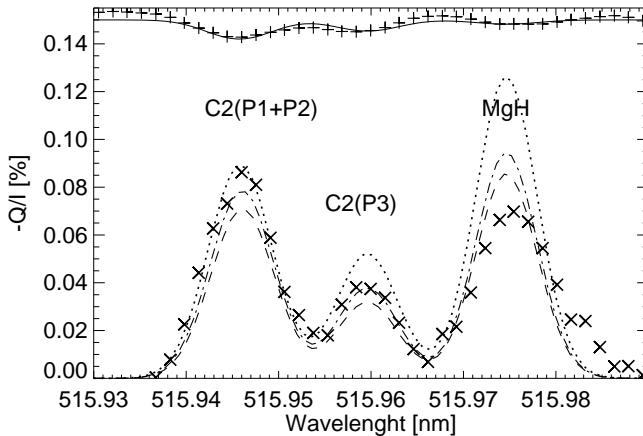
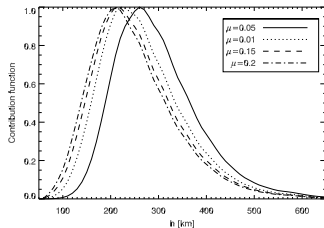
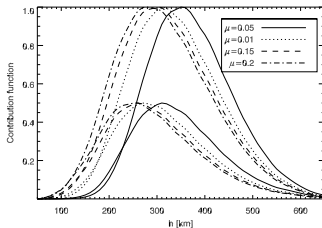


Figure: Tačkice: $B = 12G$, crtice: $28G$, crtice-tačkice: $23G$

Rešenje?

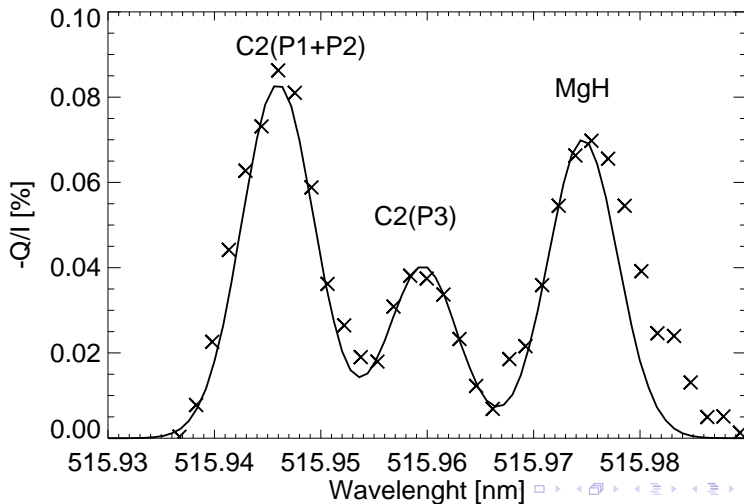
- Od ranije poznato da procenjeno mikroturbulentno magnetno polje *izrazito* zavisi od toga koji metod, pa čak i koji element koristimo
- Odgovor, naravno, leži u dubini formiranja linija.
- Medjutim, klasični metodi interpretacije (contribution function, response function...) nisu dovoljno dobri pošto su ove funkcije **previše grube!**



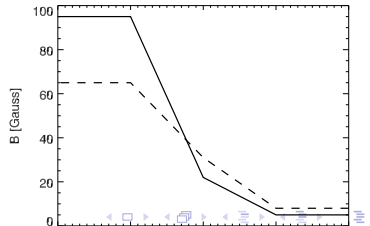
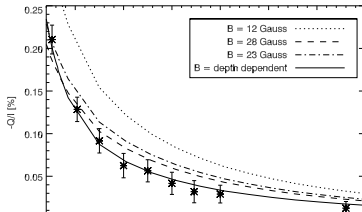
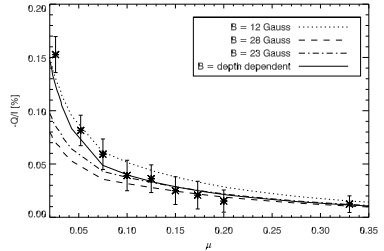
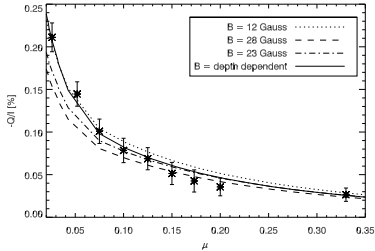
Rešenje?

- Jedino potpuno korektno rešenje je, na neki način, uključiti u model magnetno polje koje zavisi od dubine.
- Kompromis: Odaberemo tri tačke u atmosferi gde je $\langle B \rangle$ slobodan parametar. Izmedju tih tačaka polje varira linearno, a ispod i iznad njih je konstantno. (Tačke biramo tako da pokriju celu oblast formiranja linija)
- 3 vrednosti magnetnog polja + presek za sudarnu depolarizaciju = 4 parametra koja se odredjuju rešavanjem inverznog zadatka.

Rezultati



Rezultati



Šta dalje?

- Naravno, pravi test ovih rezultata je: i) korišćenje novih posmatranja ; ii) korišćenje još linija
- Takodje, ne treba zaboraviti da mnoge aproksimacije mogu da se relaksiraju. Verovatno je najvažnije uvideti da atmosfera Sunca, čak i mirnog, **nije** jednodimenzionalna. Naoko male temperaturne fluktuacije mogu da se odraze na prisustvo/odsustvo molekula. Granulaciju da ne pominjemo.
- Sve ovo treba testirati, i, paralelno, razvijati *metode nezavisne od modela atmosfere* koji nam omogućavaju da dijagnostikujemo magnetno polje na alternativan način.

Zaključak

- Hanle efekat je izuzetno moćan alat koji nam pruža uvid u razne aspekte magnetnog polja Sunca (vidi npr. Faurobert-Scholl, 1990/1991 za Hanle efekat razlučenog magnetnog polja)
- Teorija je nekompletna: PRD tretiramo isključivo heuristički, multilevel PRD *nikako*.
- Numeričke “simulacije” su zahtevne (pre svega memorijski), ali neophodne da bi se uzeli u obzir kompleksni atomski modeli i 3D struktura atmosfere. (Za neke nove rezultate pogledati Stépan & Trujillo Bueno 2011/2012)
- Ipak, čak i jednostavni modeli, nekad i bez potrebe za striktnim prenosom zračenja mogu mnogo da nas nauče (npr. Edigio Landi Degl’Innocenti, Nature, 1998)

Pitanja? Komentari? Kritike?

