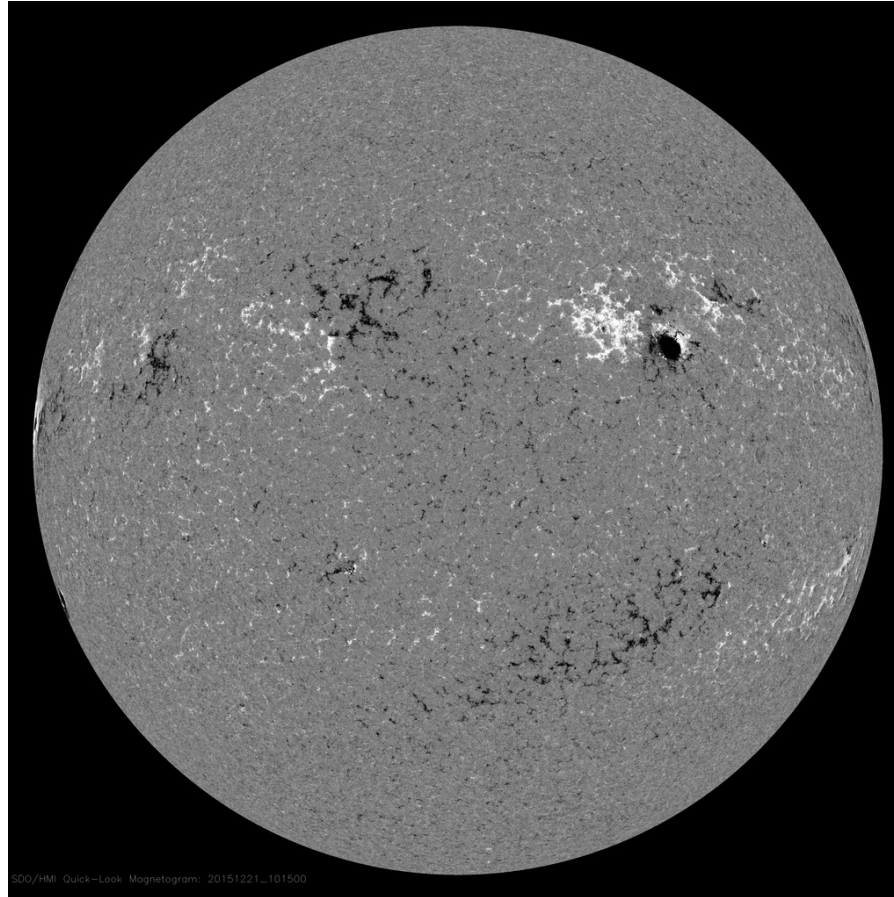


# Spektropolarimetrija Sunca (i zvezda)



Ivan Milić

*(Max Planck Institute for Solar System Research,  
Goettingen, Germany)*



# Plan

## **Sunce:**

- Malo istorije
- Zeemanov efekat
- Prenos zračenja i inverzija
- Polarizacija rasejanjem u linijama
- Protuberance

## **Zvezde:**

- ZD imaging
- Polarizacija tokom tranzita egzoplanetom
- Diskovi

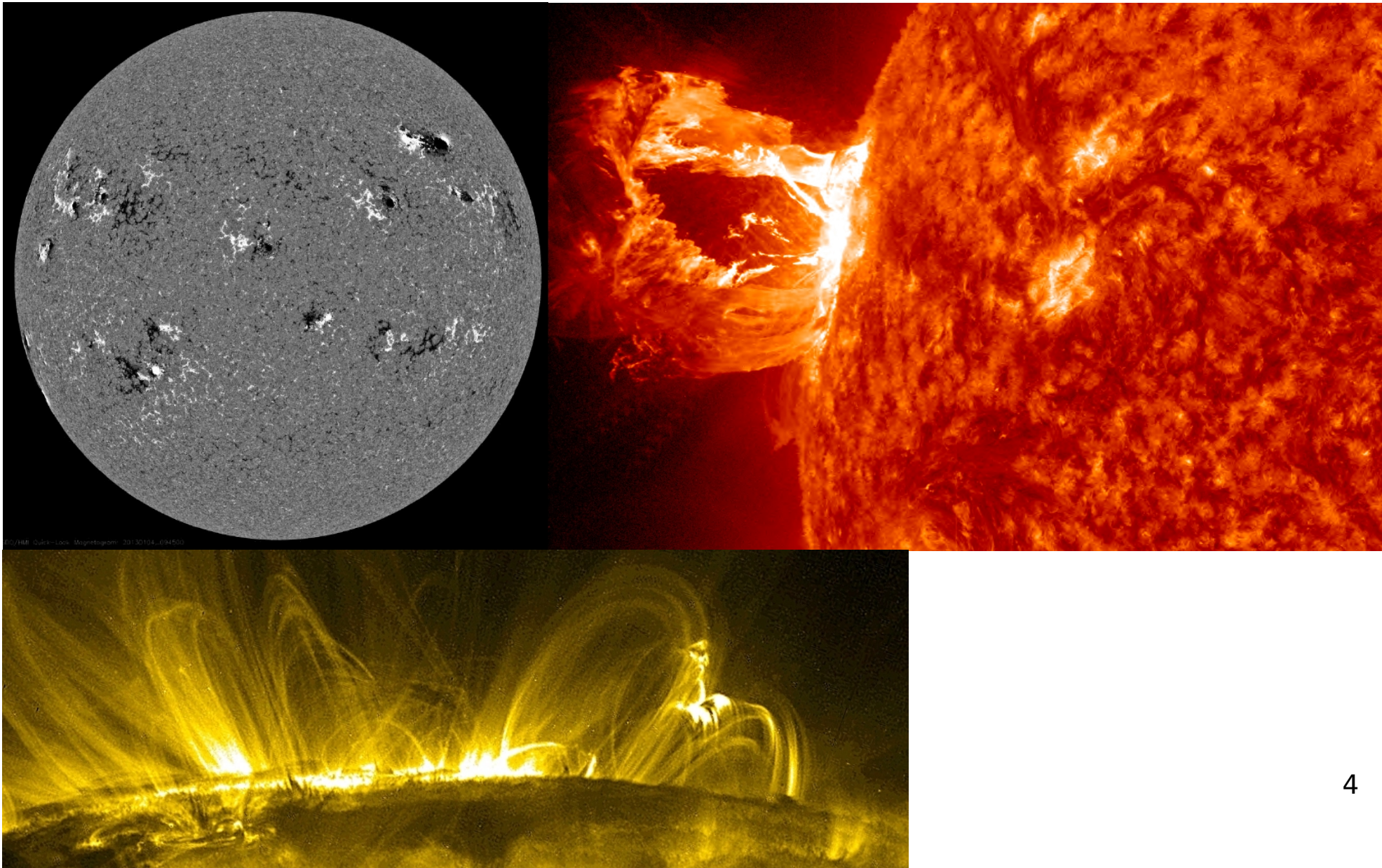


Pojedinačni fotoni su 100 %  
polarizovani

Idealno simetrični objekti emituju  
potpuno nepolarizovanu svetlost

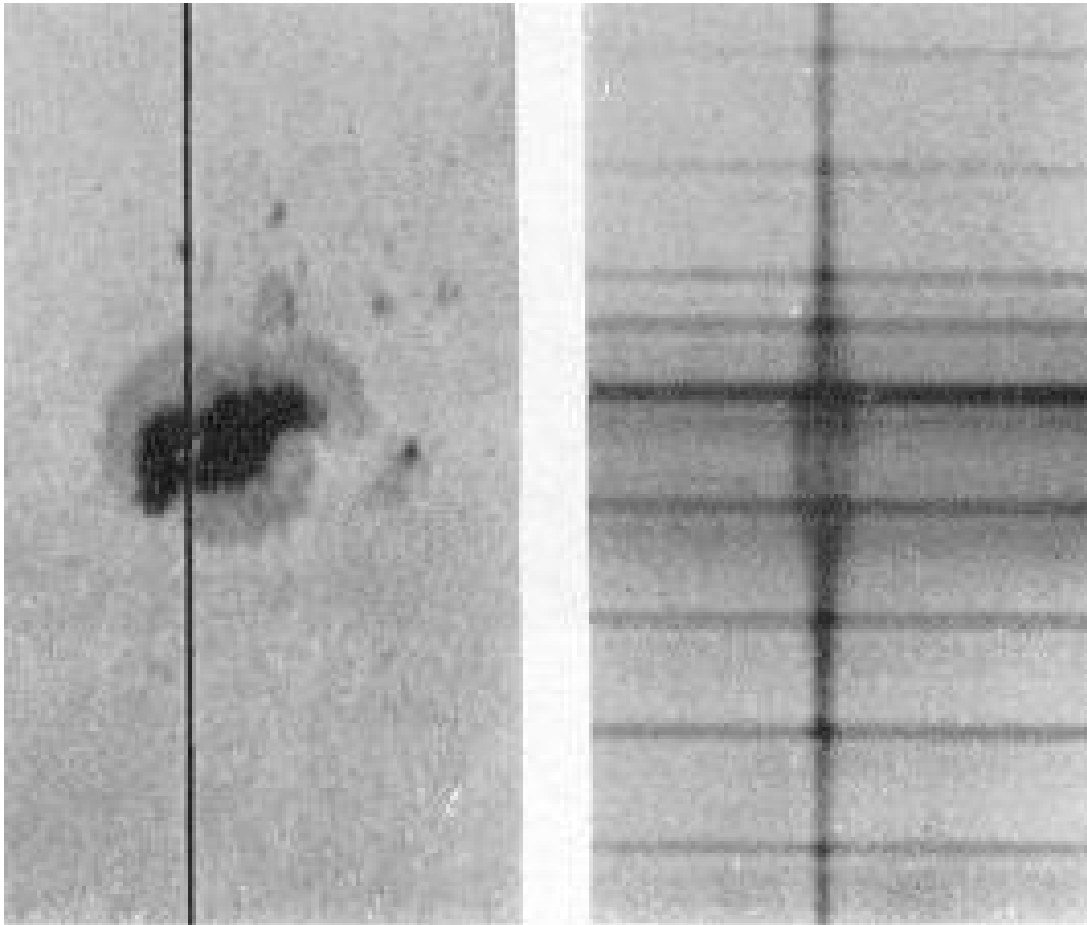
Prisustvo polarizacije uvek  
ukazuje na neku anizotropiju

# Postojanje magnetnog polja u Sunčevoj atmosferi je maltene očigledno



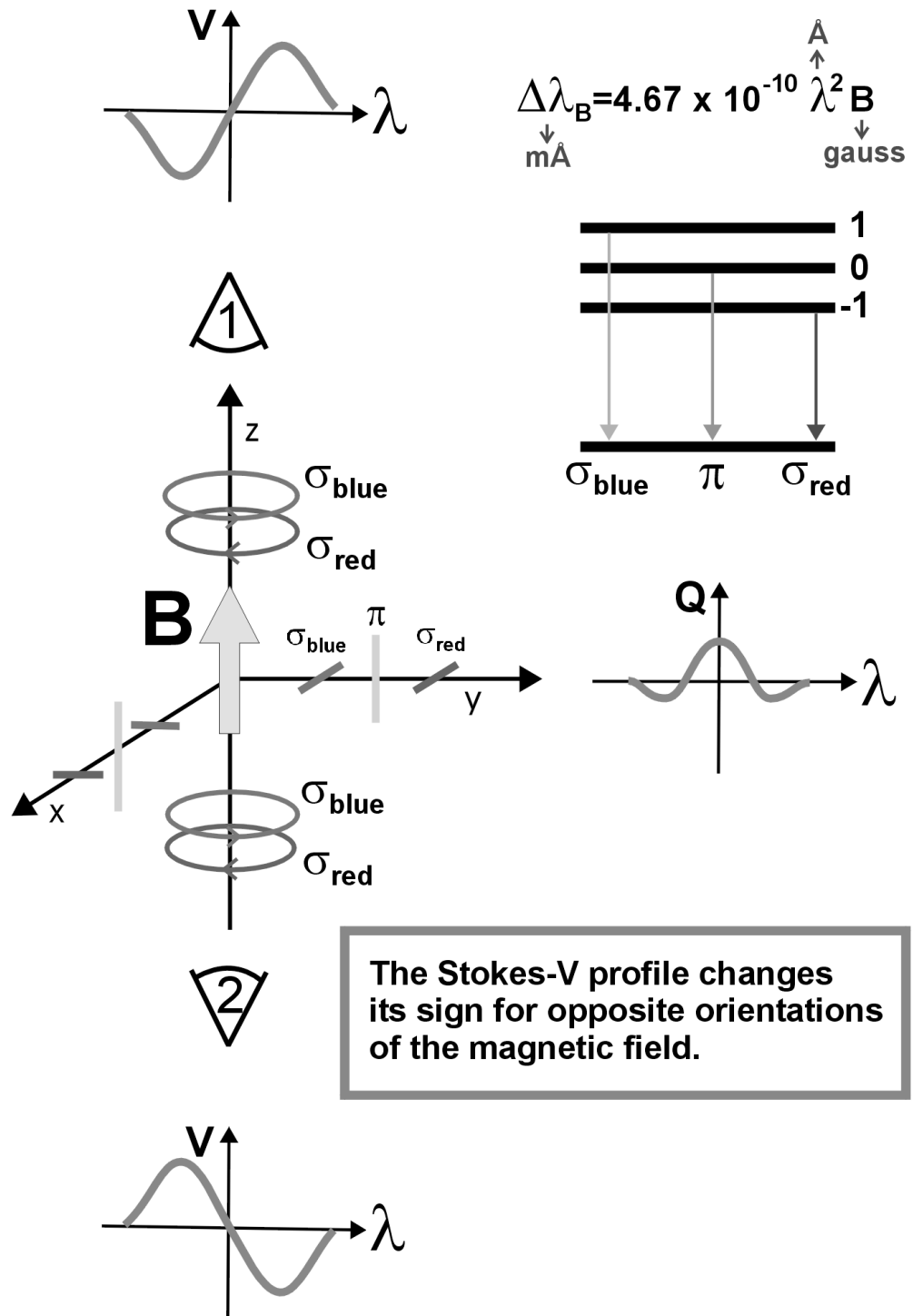
# Ali, kako da budemo sigurni?

G. E. Hale je prvi posmatrao efekat za koji je Piter Zeeman dobio Nobelovu nagradu 1902.



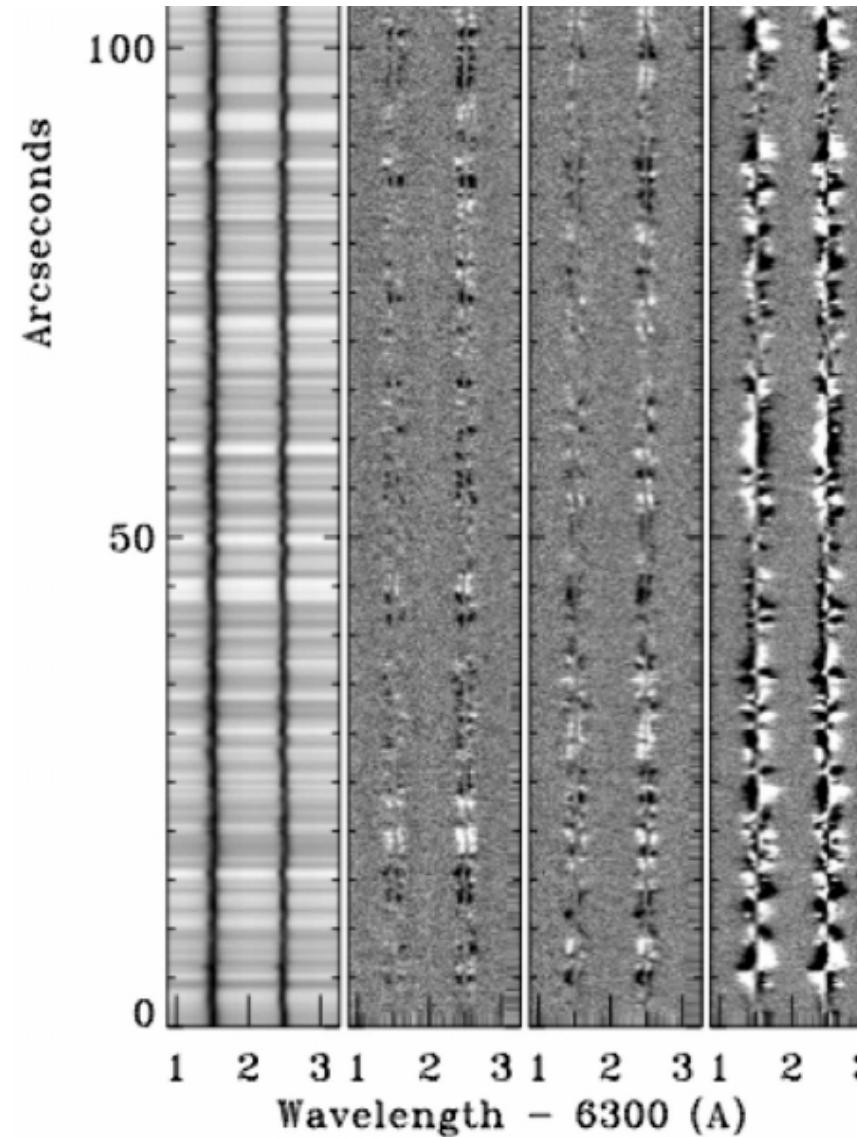
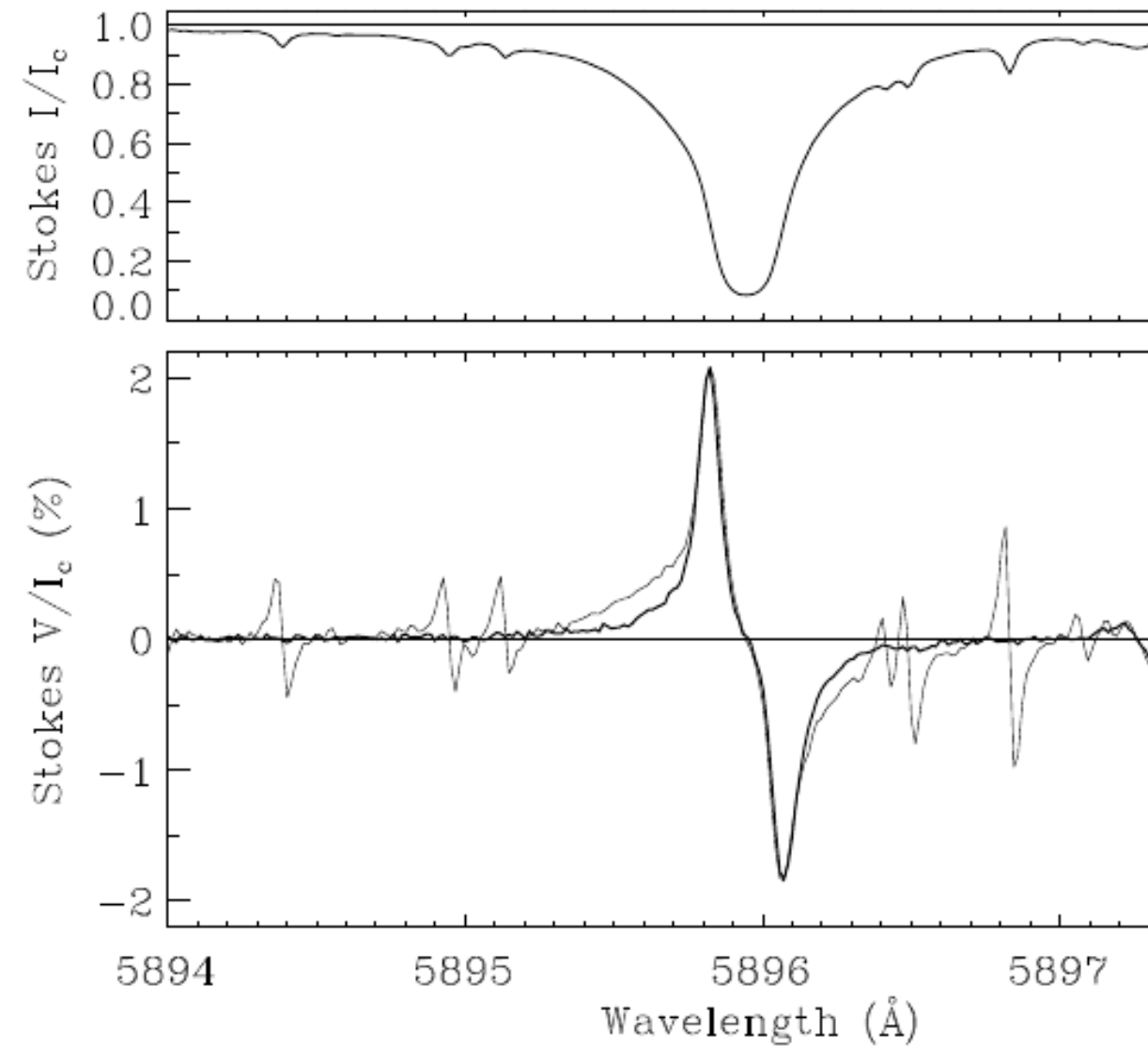
*Hale et al. (1919)*

# The Zeeman Effect



Thanks to Andres Asensio Ramos for the figure (and inspiration!)

# Ne samo intenzitet, već i kružno polarizovana



Stenflo (1984) and Lites et al (2008)

## „Weak field“ aproksimacija

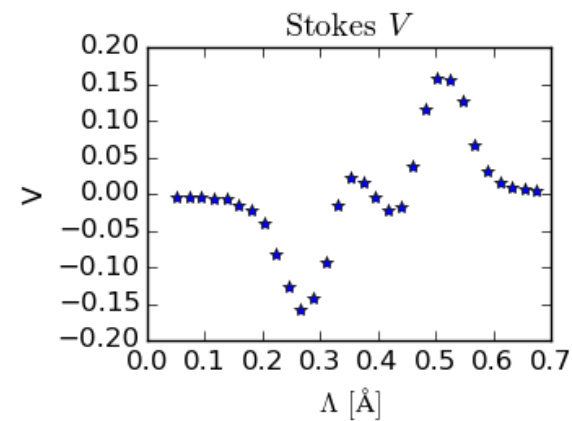
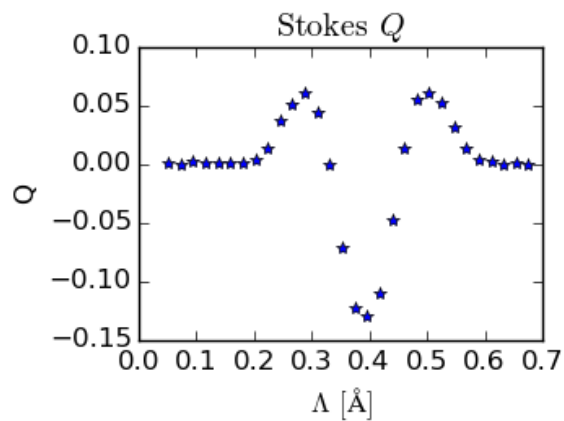
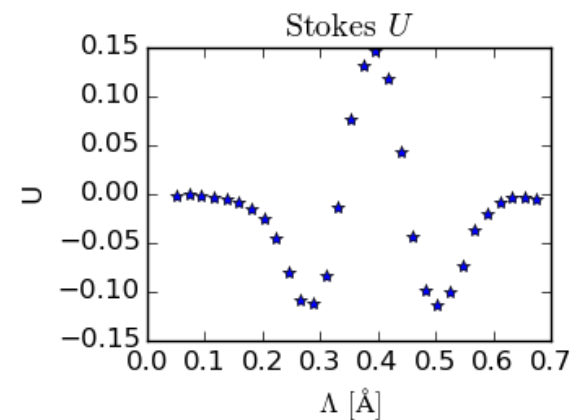
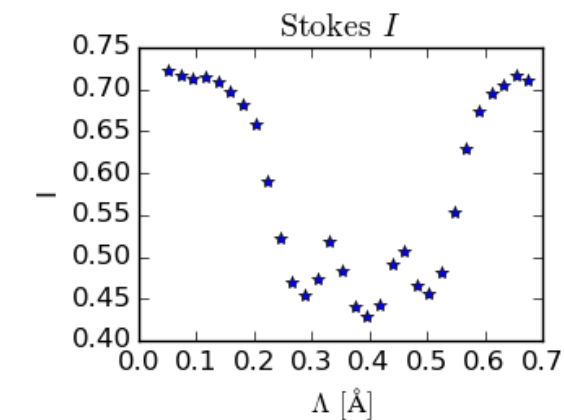
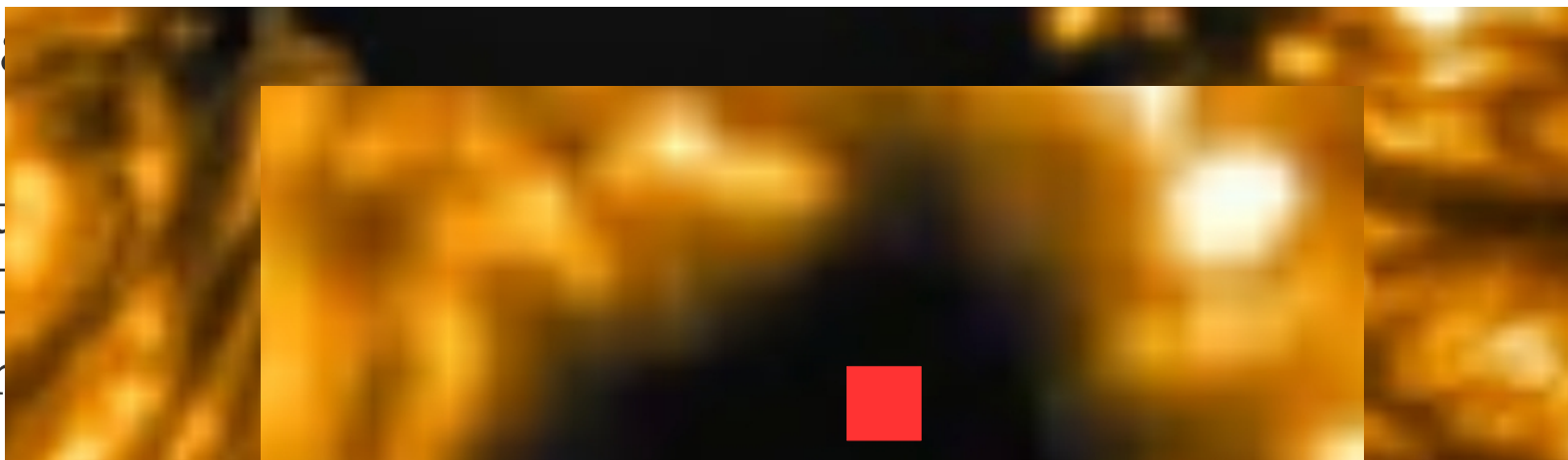
$$V \approx -\Delta\lambda_H \partial I_0 / \partial \lambda$$

- Iz ovoga možemo da izračunamo cepanje, a zatim i magnetno polje.
- Pretpostavljamo da je magnetno polje konstantno u datom „elementu“ (atmosfera)
- **Pitanje:** Šta mi u stvari merimo na ovaj način?



# A št

- Spekt  
niz 11  
talasr
- Filter  
atmos  
talasr





Dakle, podaci su:

Zavisnost četiri Stoksova parametra od talasne dužine, razlučena (ili usrednjena) prostorno i vremenski.

# Šta je naš model?

- Formalno gledano, naš model je model cele atmosfere, tj zavisnost temperature, gustine, pritiska, brzina i magnetnog polja od položaja i vremena
- Ovo je previše komplikovano
- Rešenje? Pretpostavi, Uprosti, Fiksiraj, Parametrizuj

# Inverzija

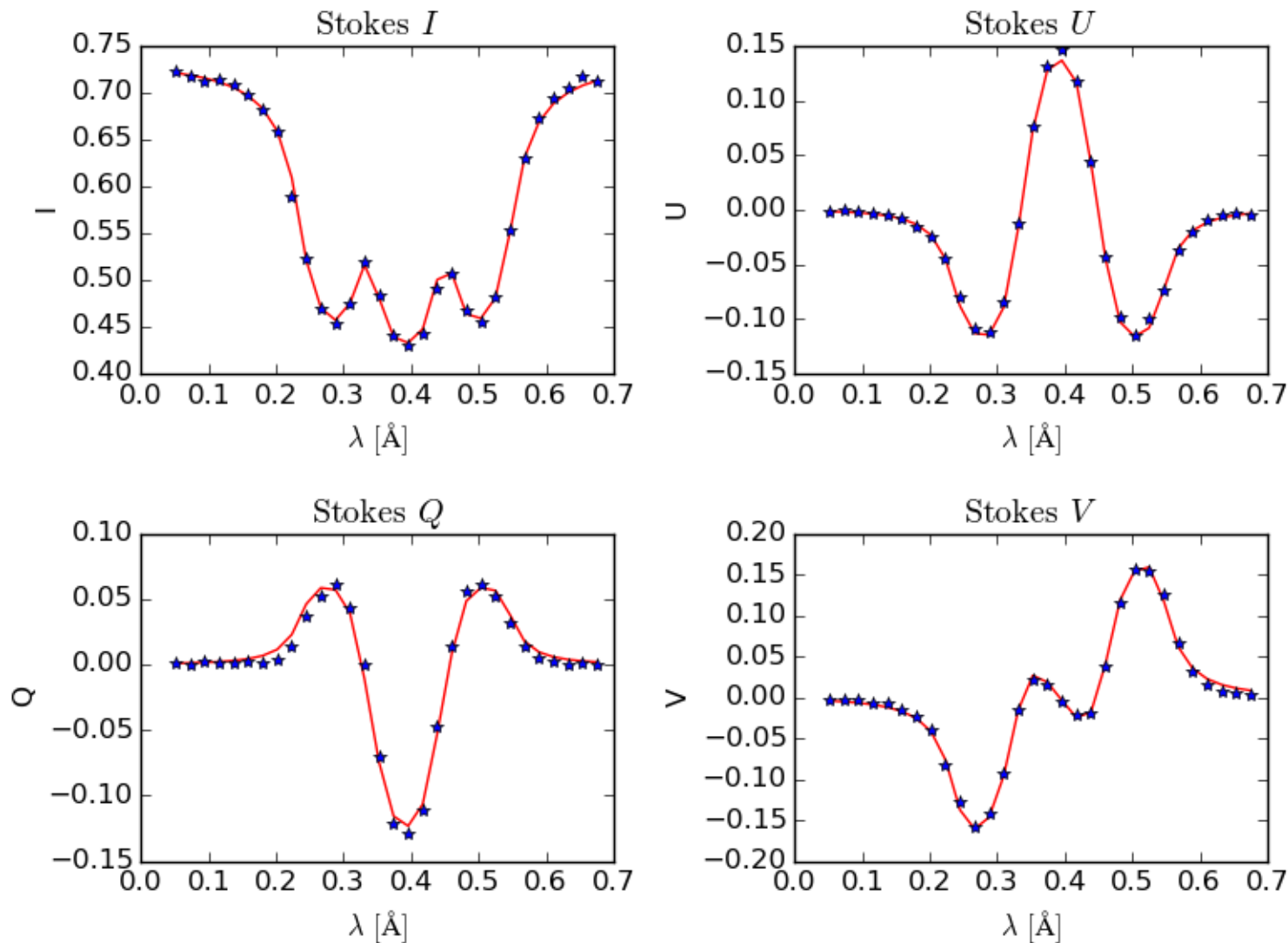
- Cilj je da fiksiramo model (tj. broj parametara i mapiranje) i da onda „mikarimo“ parametre tako da se izračunati i posmatrani spektar poklope

$$\chi^2(\mathbf{x}) \equiv \frac{1}{\nu} \sum_{s=0}^3 \sum_{i=1}^q [I_s^{\text{obs}}(\lambda_i) - I_s^{\text{syn}}(\lambda_i; \mathbf{x})]^2 w_{s,i}^2$$

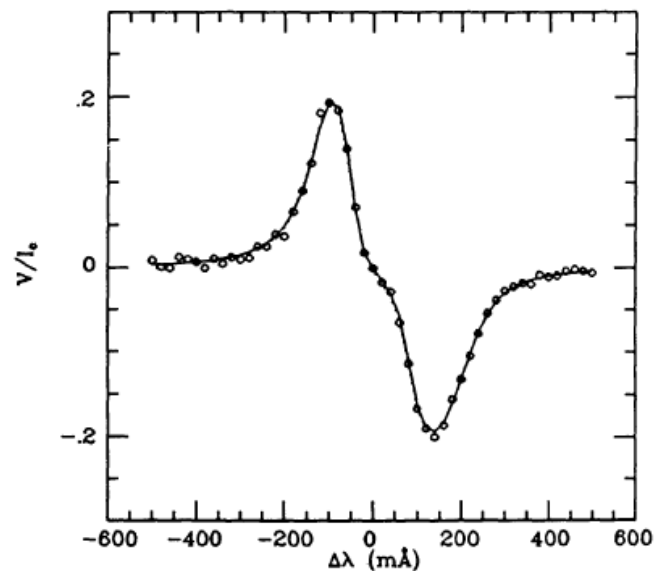
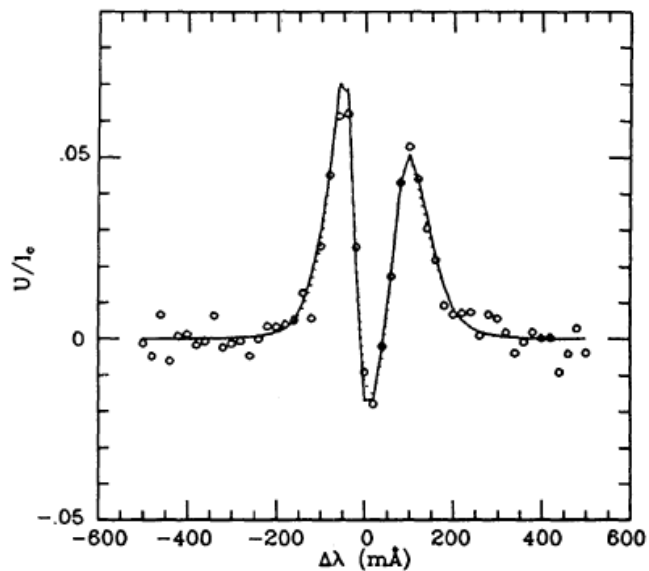
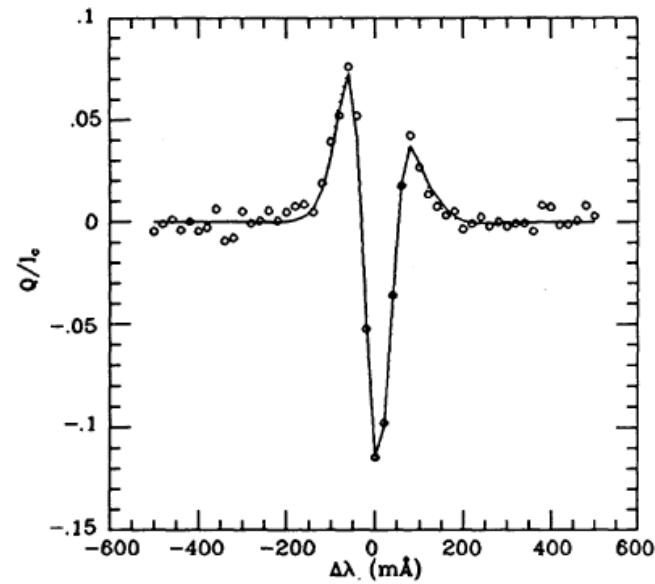
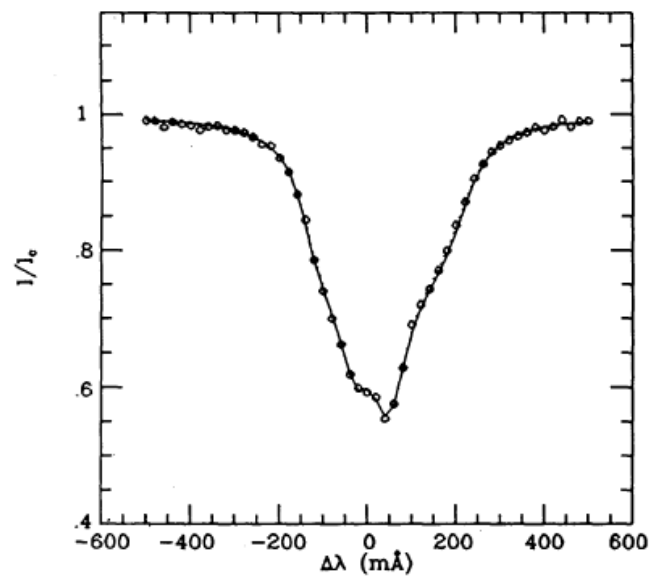
- Prelazimo iz jedne muke (obrada posmatranja, izračunavanje greške), preko druge muke (izračunavanje spektra na osnovu modela), na treću muku: minimizaciju i optimizaciju.

# Milne-Eddingtonova atmosfera

Ništa ne zavisi od dubine, sem Plankove funkcije  
(tj. Temperature)

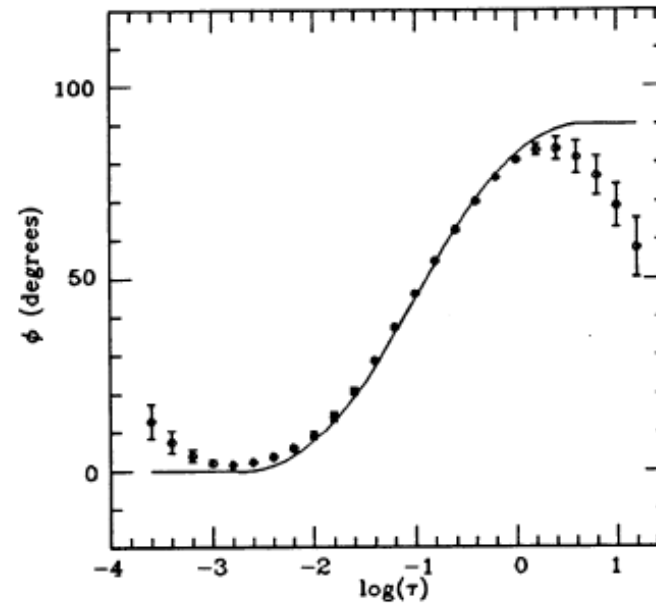
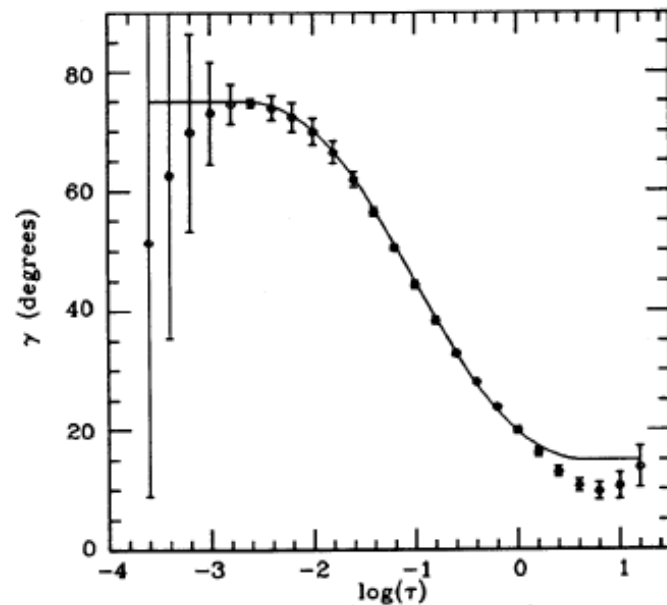
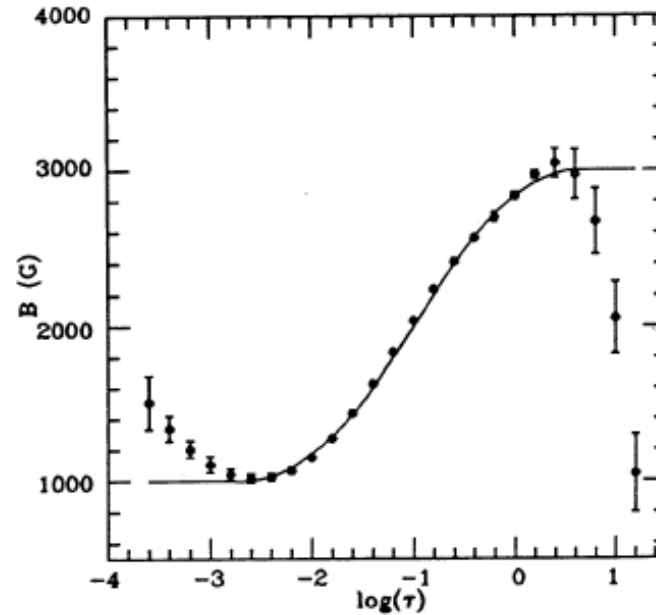
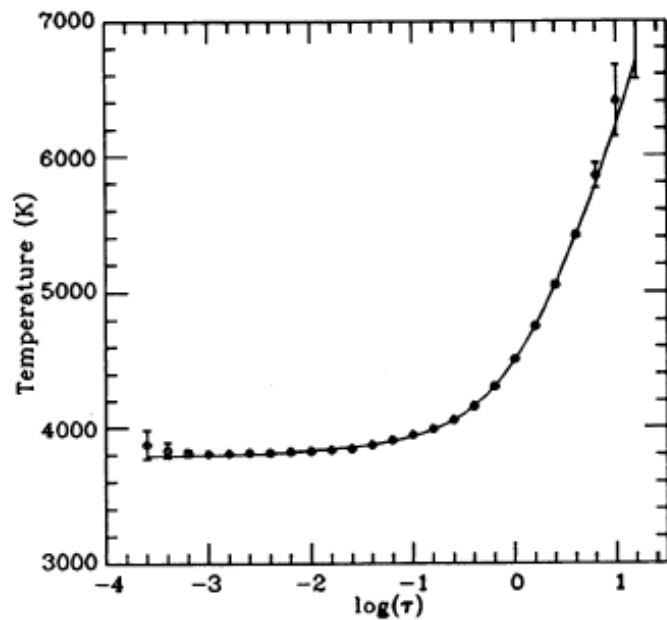


# Šta raditi kada ovo očigledno nije slučaj?



Ruiz Cobo & del Toro Iniesta (1992)

# Zavisnost parametara od dubine

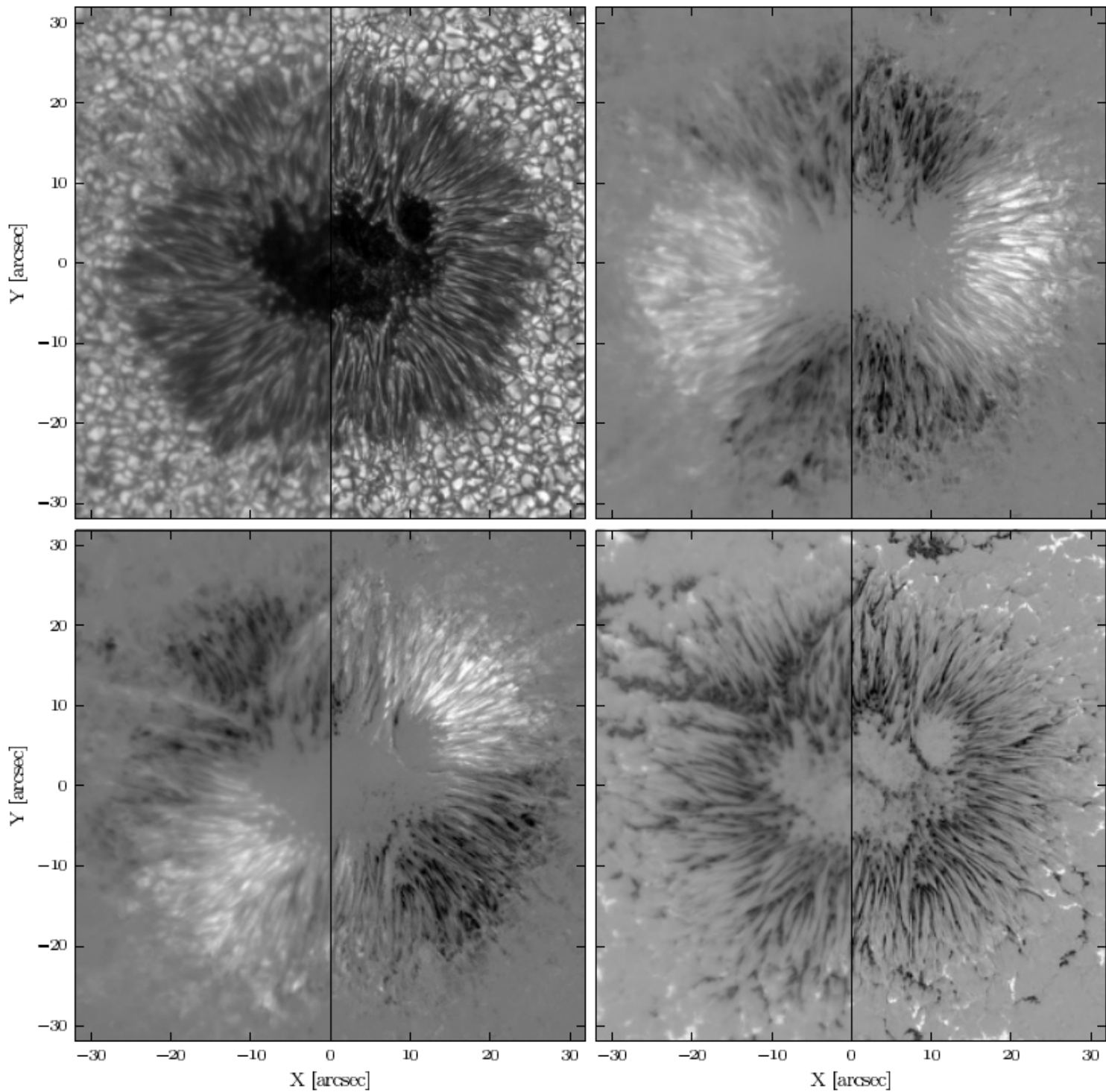


Ruiz Cobo & del Toro Iniesta (1992)

# State of the art: Spatially coupled inversion

- Pikseli komuniciraju jedan sa drugim usled PSF-a teleskopa, ukoliko znamo PSF...
- Možemo da naše posmatranje, koje je 3D data kocka (x,y,talasna dužina) predstavimo kao akciju dva operatora na 3D kocku koja predstavlja atmosferu
- Prvi operator: Prenos zračenja (1D, recimo)
- Drugi operator: Prostorna spregnutost usled PSF-a

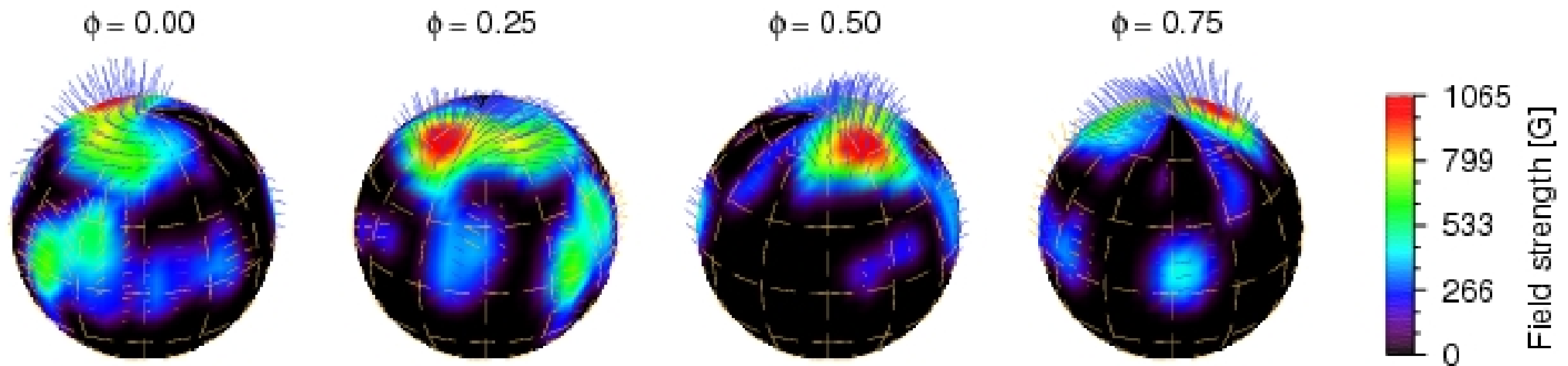




From van Noort (2012)

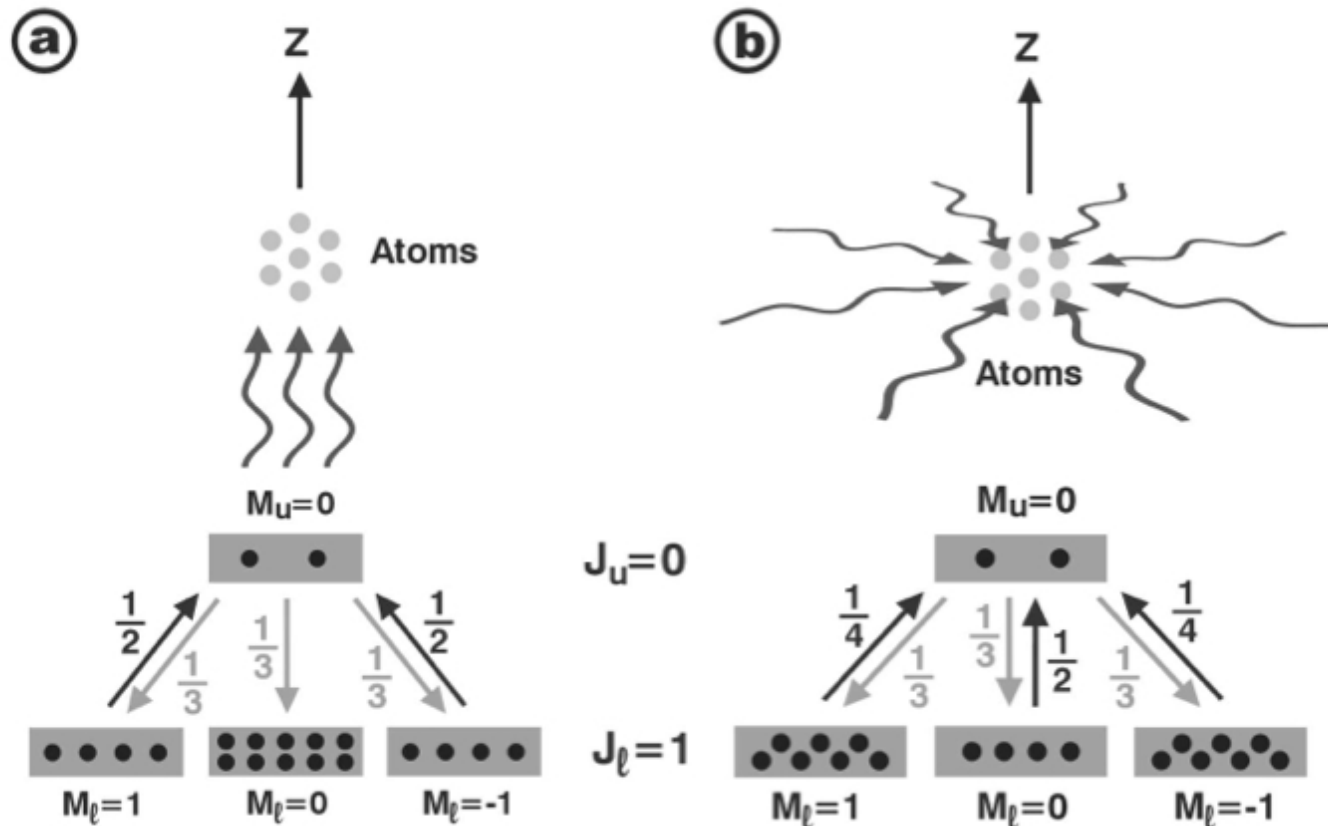
# Zvezde

- Na Suncu vidimo detalje i do  $\sim 50$  km.
- Ne zvezdama **ne vidimo detalje**.
- Kako onda nastaju slike kao ova?
- Fizika je ista, posmatranja (i ograničenja su potpuno drugačiji)



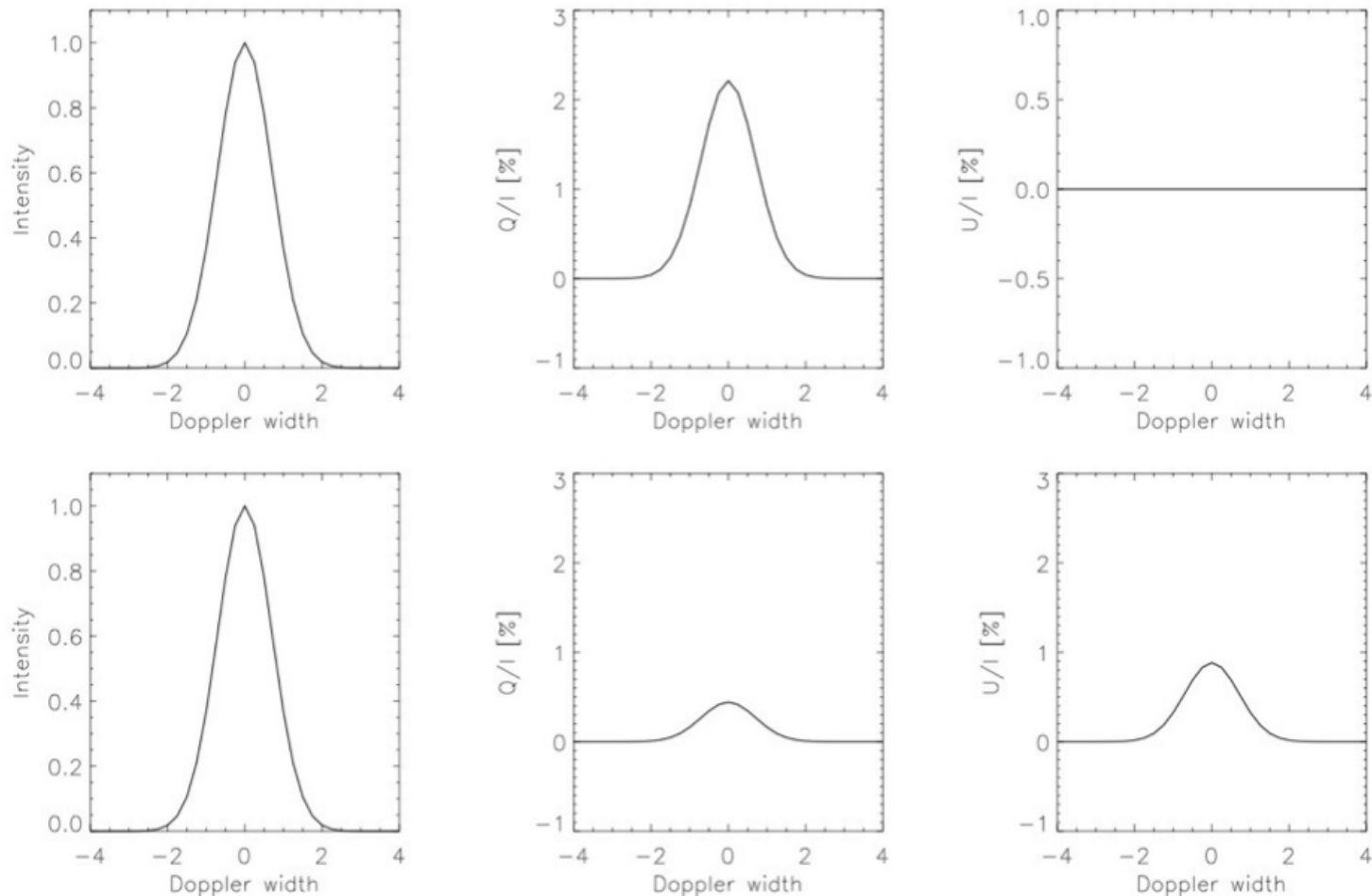
# Polarizacija rasejanjem u linijama

Linearna polarizacija prouzrokovana rasejanjem anizotropnog zračenja na atomima (ili molekulima)



# Hanle efekat

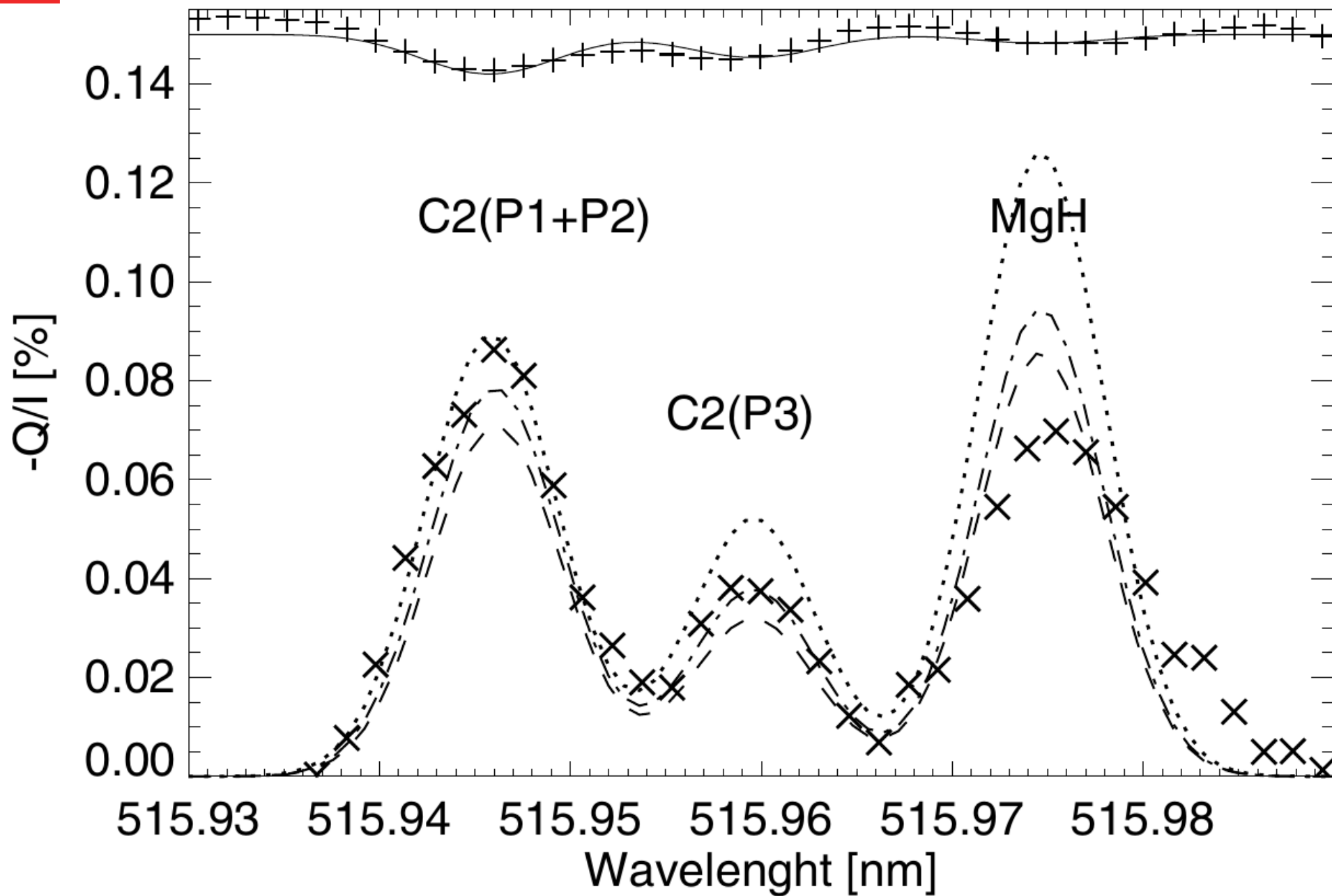
Ako je magnetno polje nagnuto u odnosu na osu simetrije upadnog zračenja → rotiranje ravni polarizacije



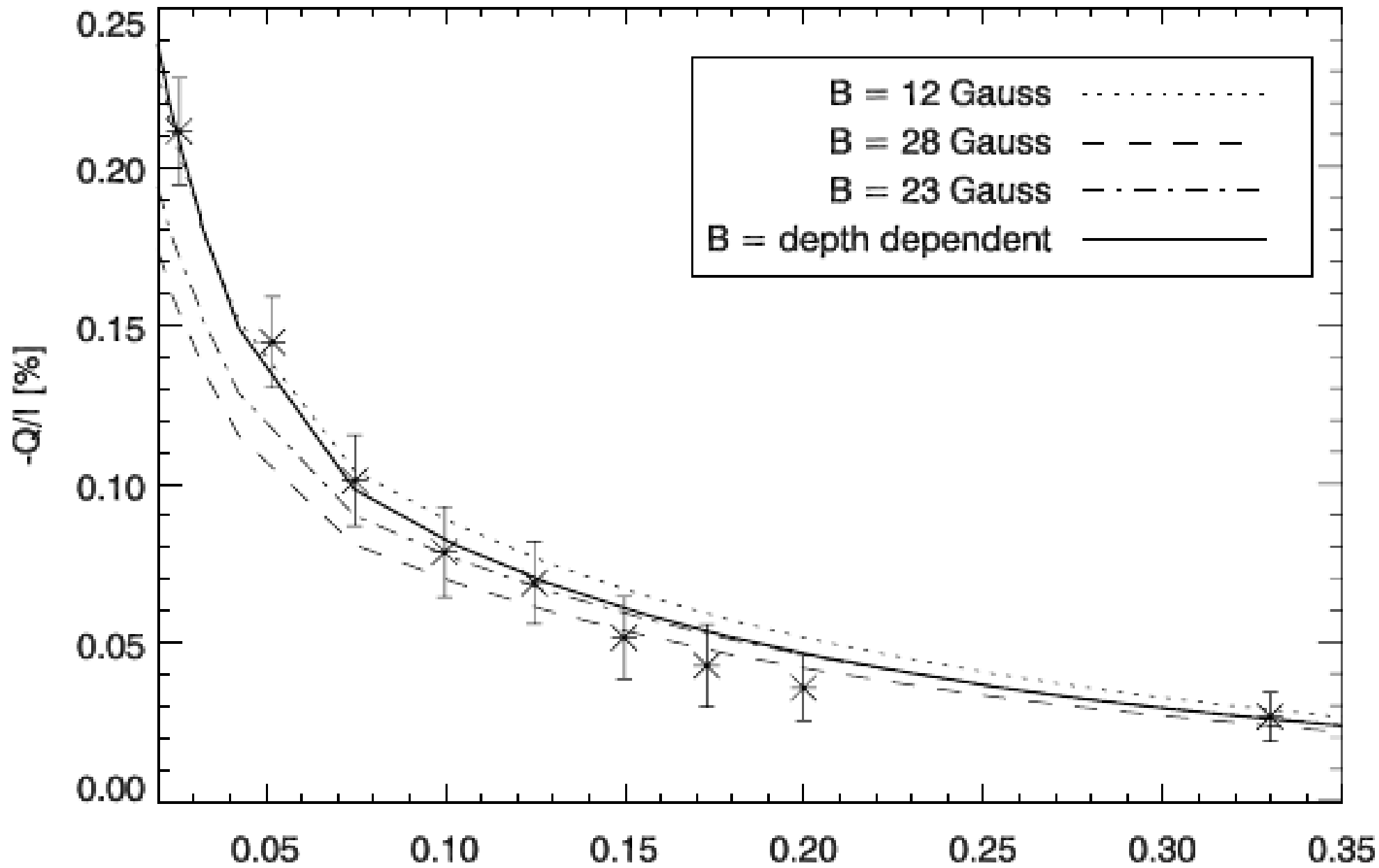
Landi degl'Innocenti & Landolfi (2004)

# Ako je magnetno polje „turbulentno“

- Rotacija će da se „pokrati“ ali depolarizacija neće
- Ukupna polarizacija će da se smanji
- Svi „Zeeman-ovski“ uticaji će da se pokrate
- **Problem:** Magnetno polje nije jedini razlog za depolarizaciju

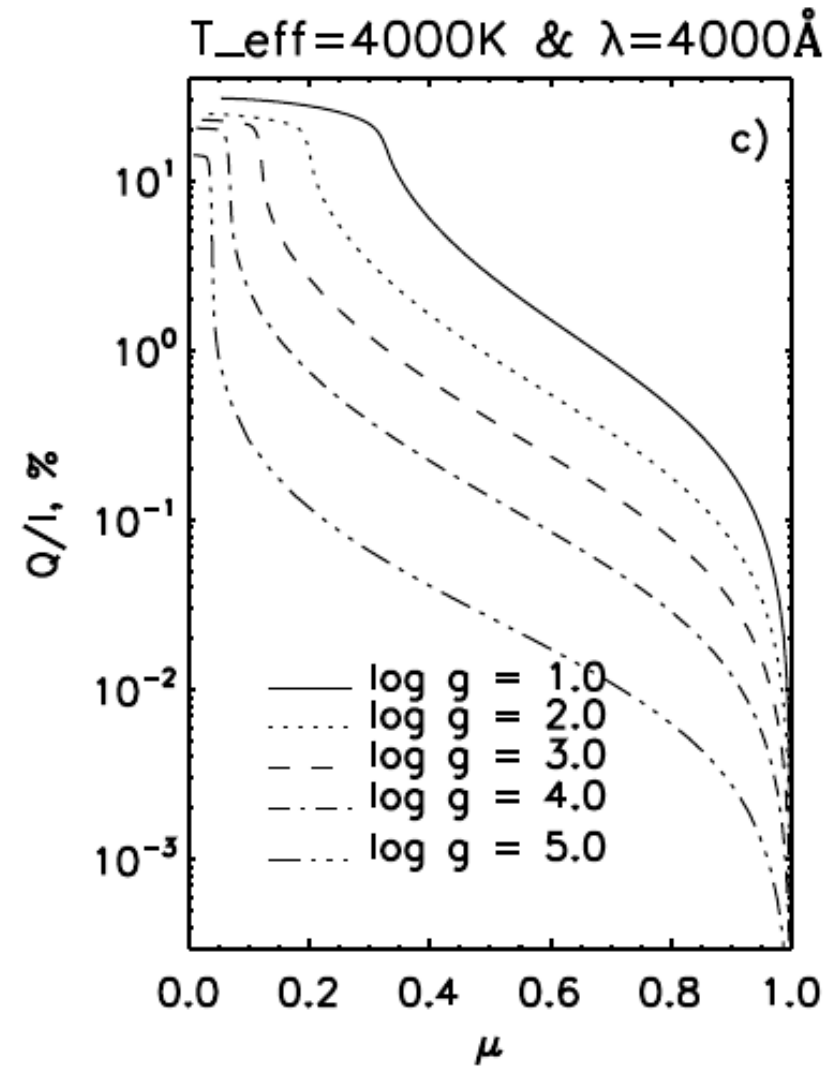
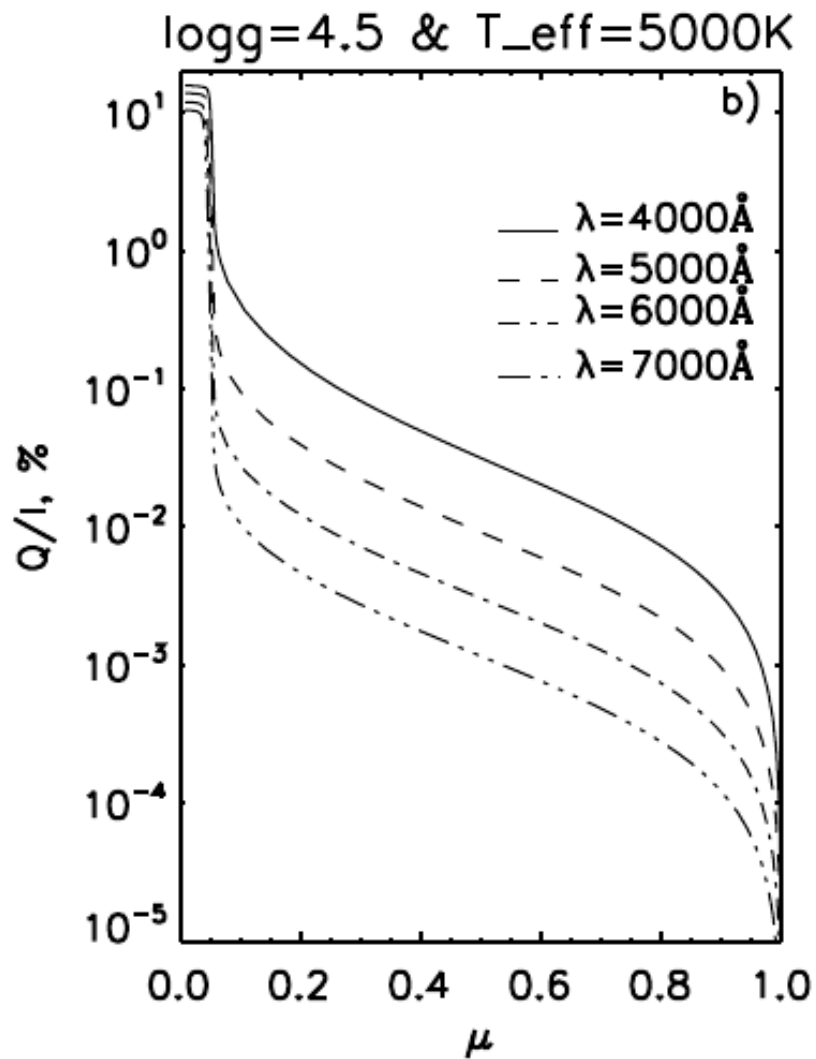


Milić & Faurobert (2012)



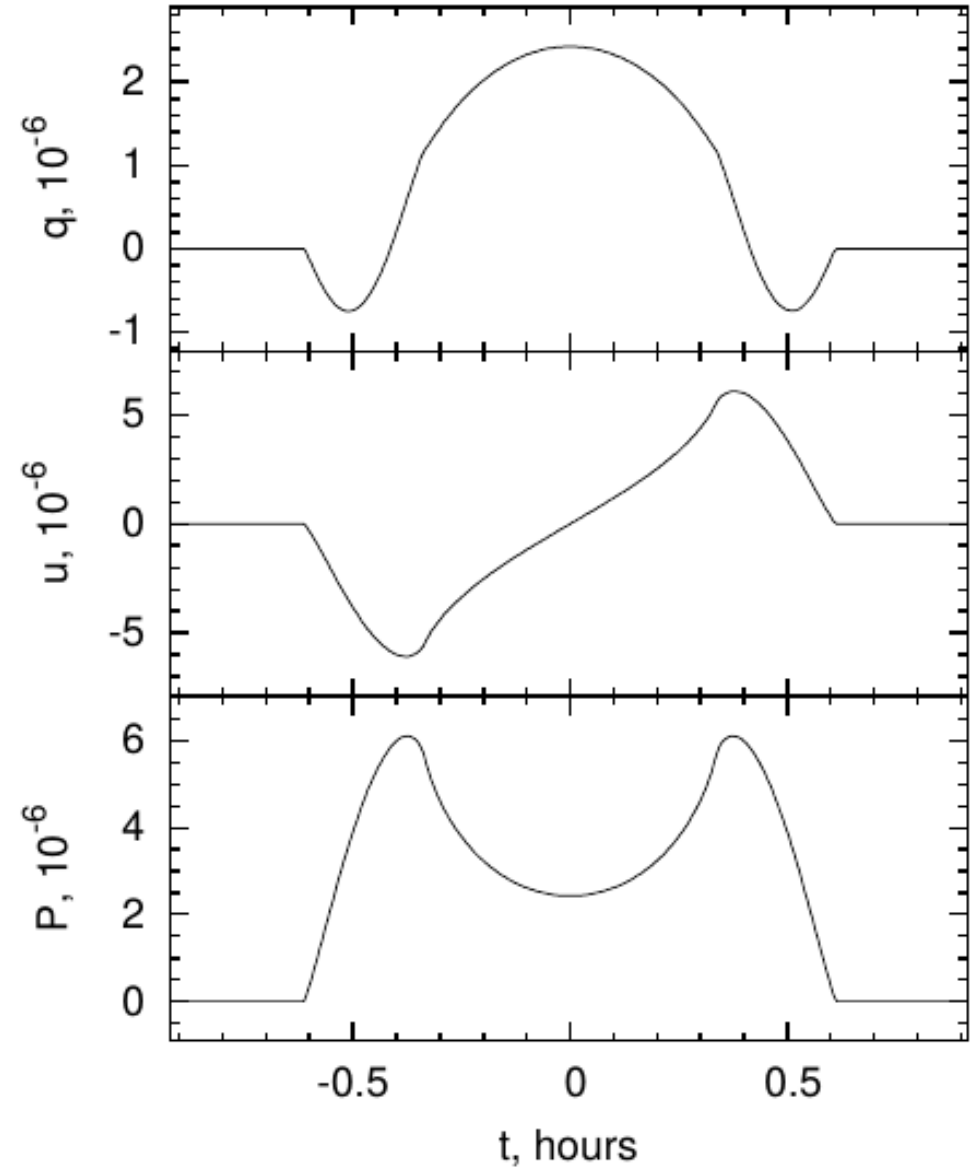
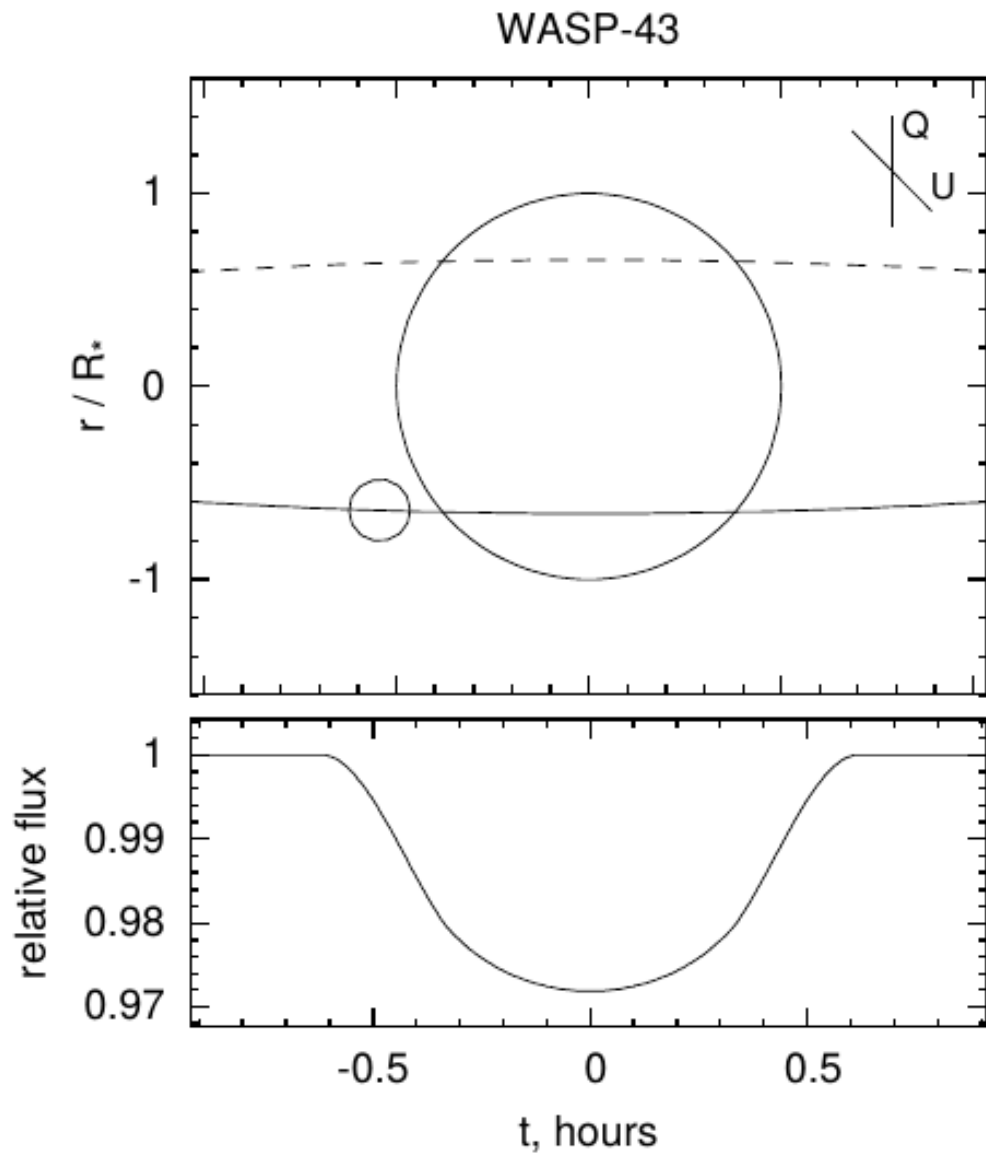
From Milić & Faurobert (2012)

# Možemo li ovo da posmatramo na zvezdama?



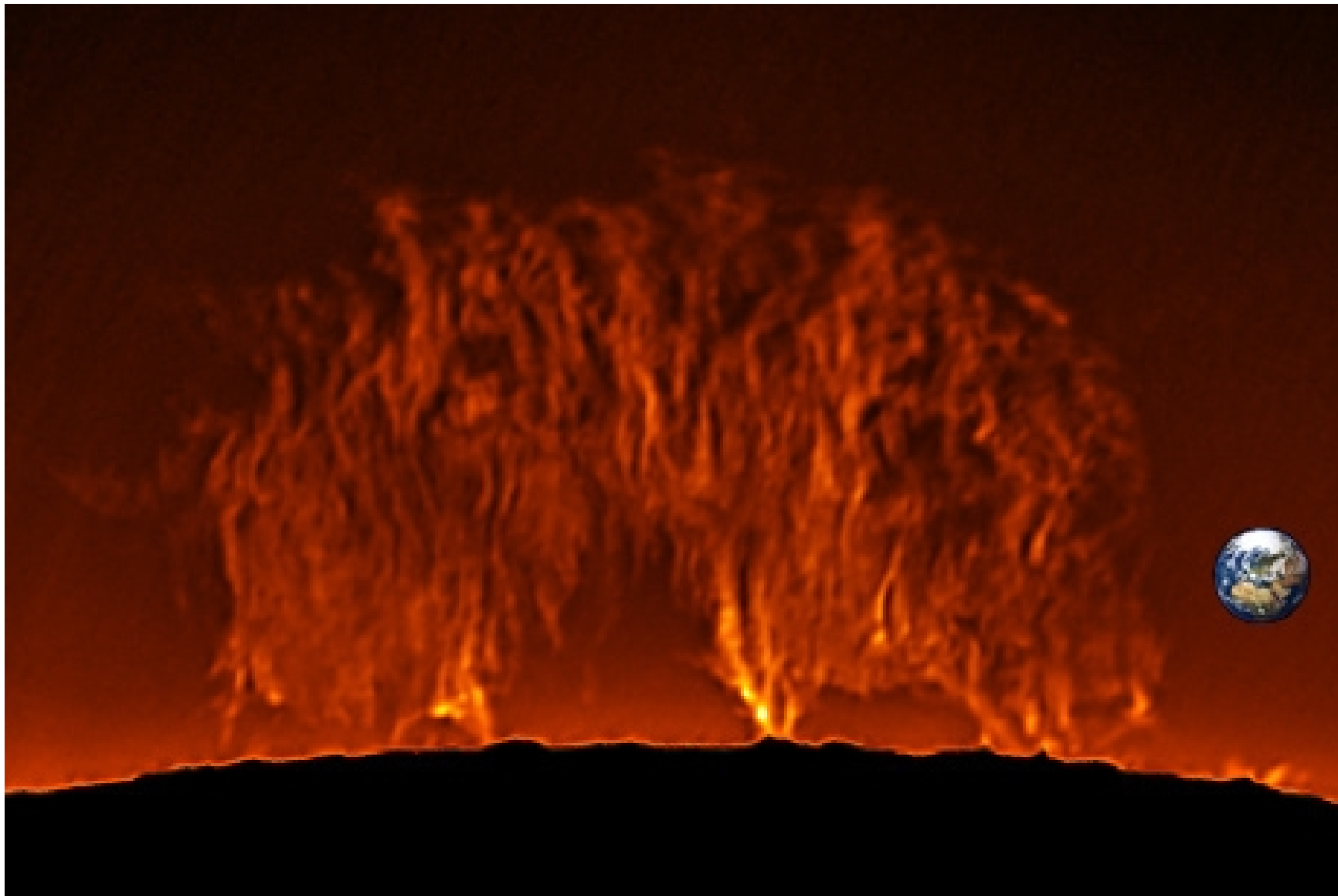


# Možemo li ovo da posmatramo na zvezdama?



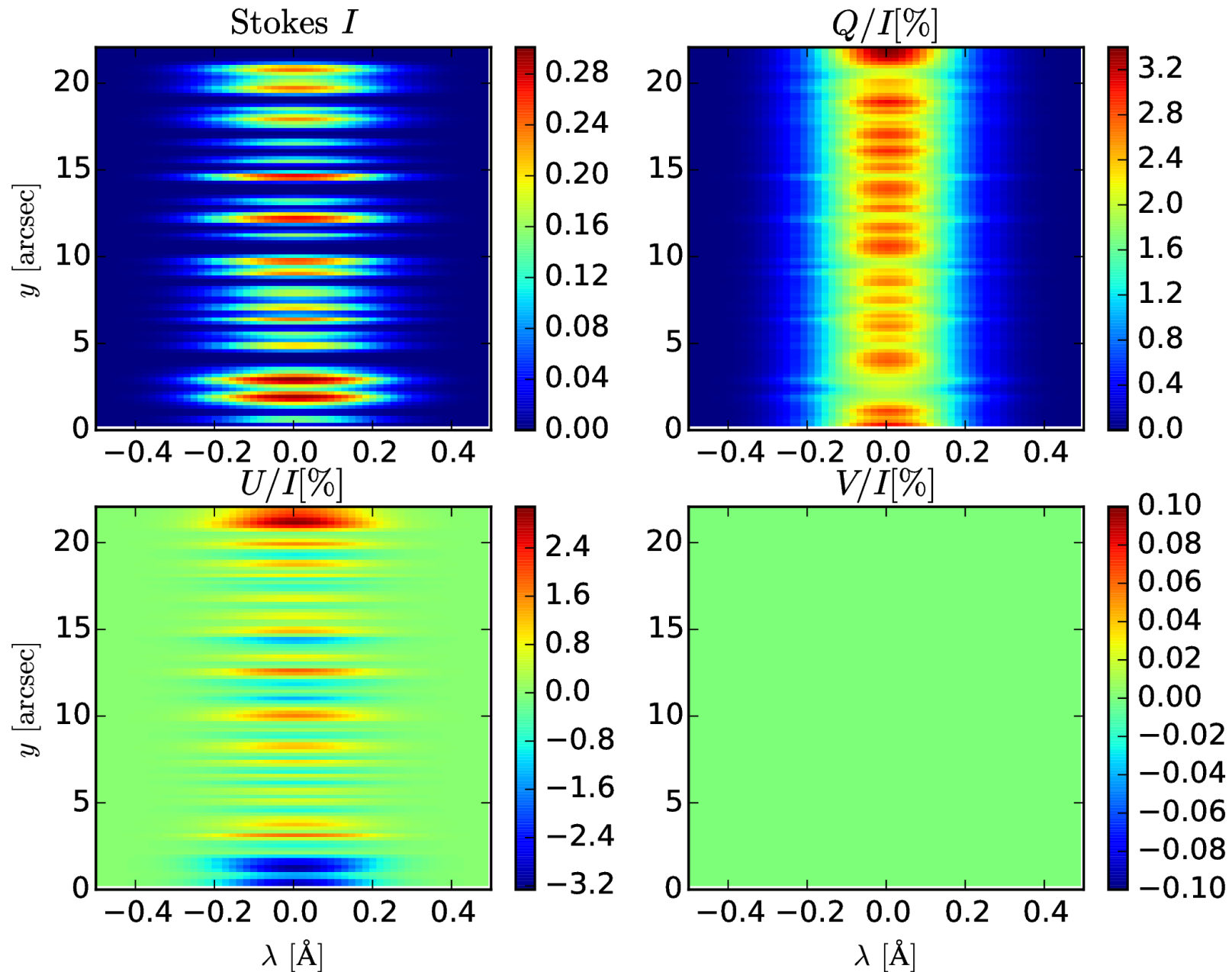
Kostogryz et al. (2015)

# „Van-atmosferski“ objekti - protuberance



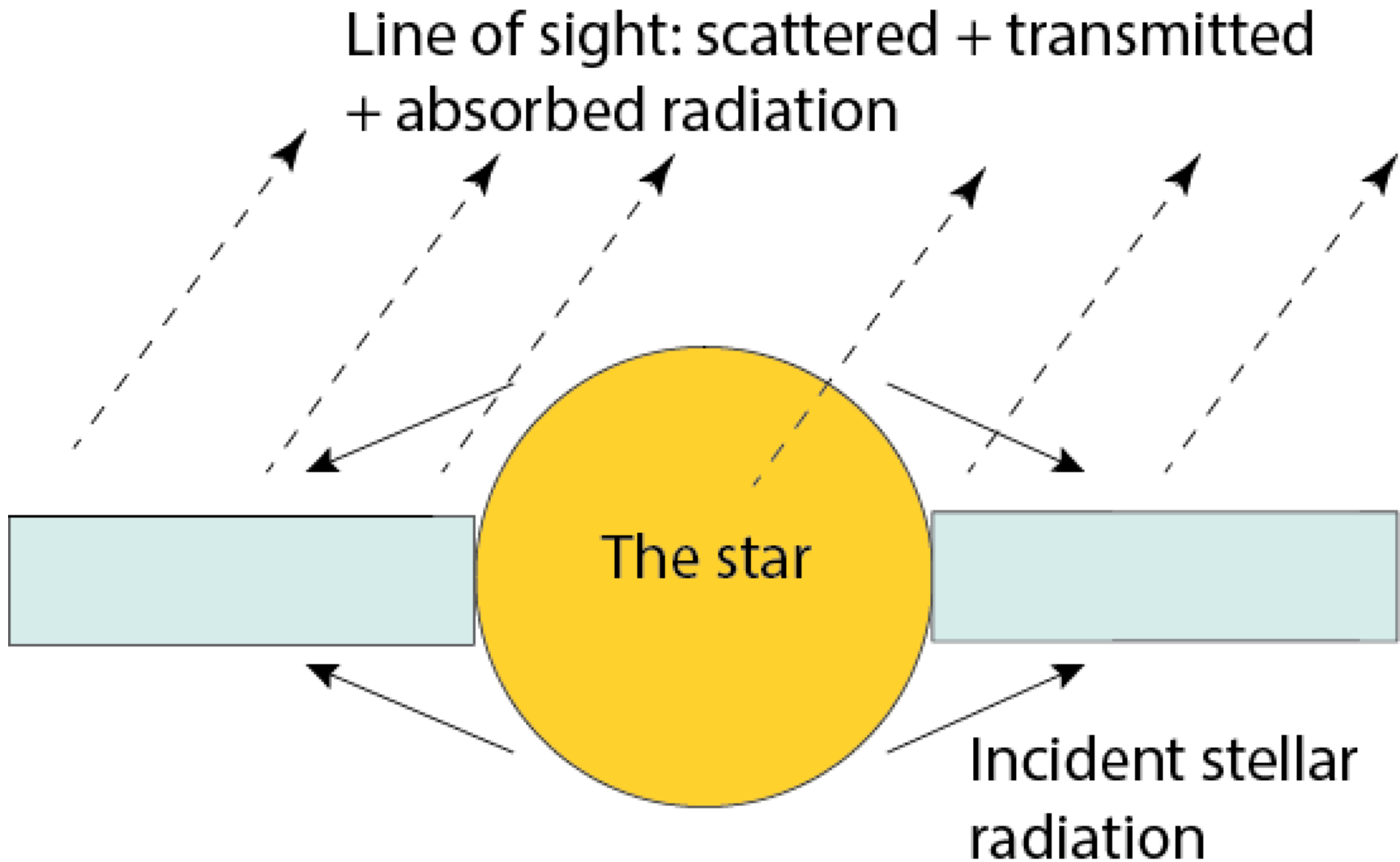
Slika: Joseph Brimacombe

# „Van-atmosferski“ objekti - protuberance

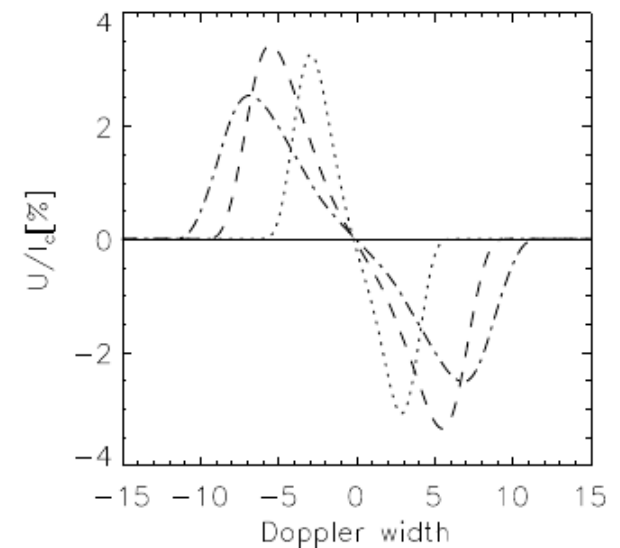
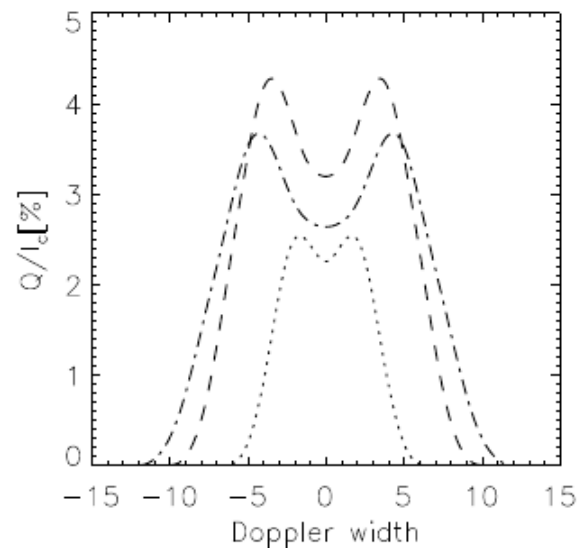
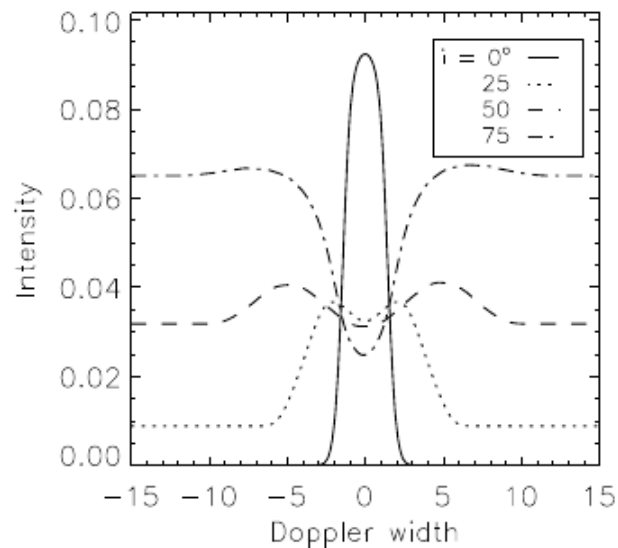
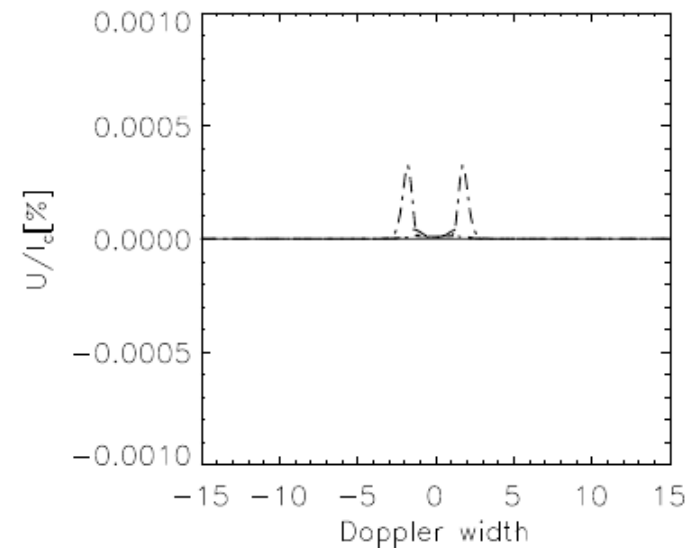
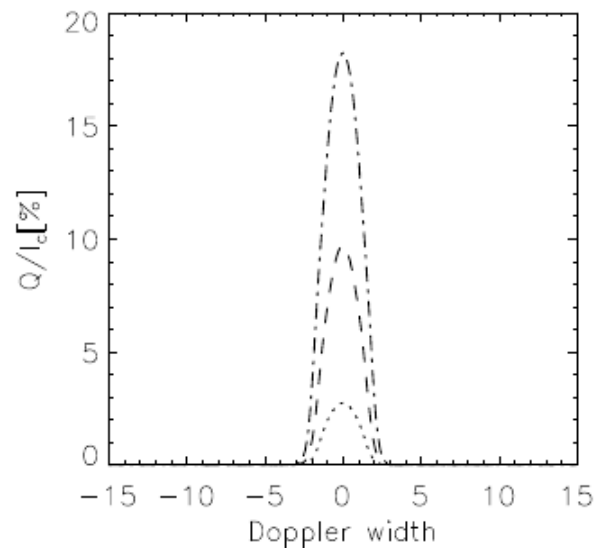
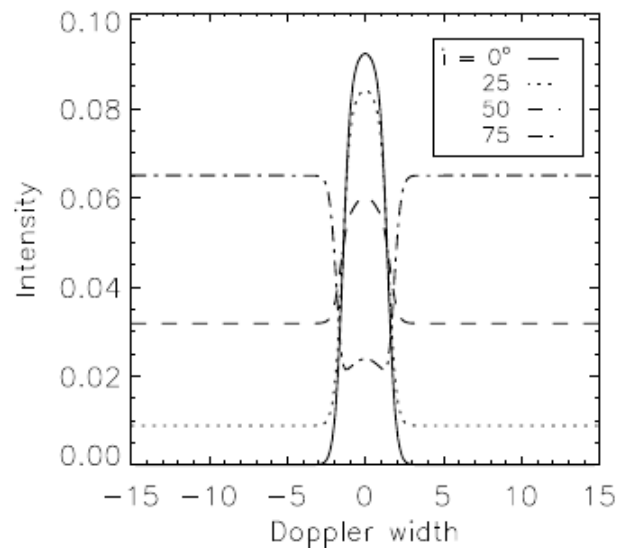


Milić, Faurobert & Atanacković (in prep.)

# „Van-atmosferski“ objekti - diskovi



# „Van-atmosferski“ objekti - diskovi



# Za kraj

- Polarizacija je indikator magnetnog polja, ili geometrije rasejanja
- Otvara dodatne mogućnosti u dijagnostici
- Nekad je potrebno rasplesti različite efekte, što ne mora da bude naivno
- Modeli su komplikovani, pa je zaključivanje („merenje“) teško