

Fizika Sunca kroz objektiv teleskopa DKIST

Ivan Milić (University of Colorado, Boulder / LASP / NSO)

Seminar Katedre za Astronomiju 26/04/2022

Glavna poruka

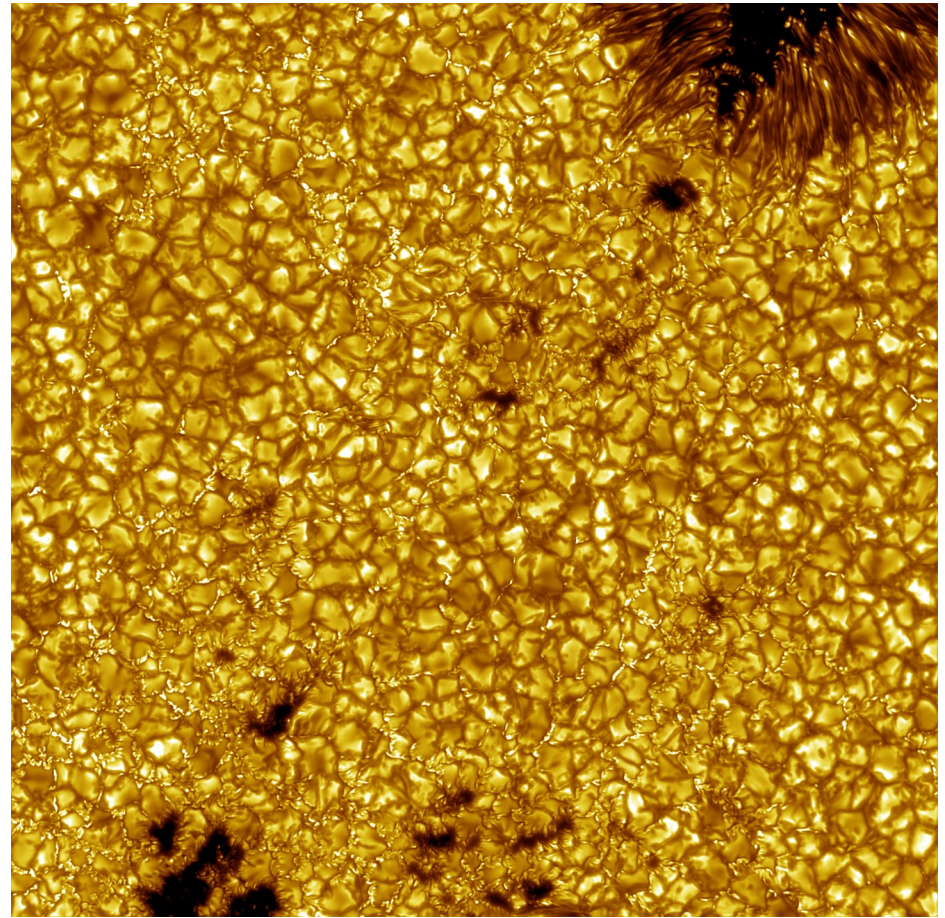
Želimo da posmatramo Sunce velikim teleskopom jer:

- Hoćemo da vidimo jako male stvari (male prostorne skale)
- Hoćemo da detektujemo jako male signale / male promene u signalima (tj. u broju fotona)
- Odgovor na ovo pitanje deluje trivijalno, ali imajte u vidu da je nemoguće unaprediti oba aspekta u isto vreme (uverićemo se za nekoliko slajdova).
- Verovali ili ne, posmatrači Sunca bi voleli da je Sunce još sjajnije

Razlika izmedju Sunca i drugih zvezda



$$\theta = 1.22 \frac{\lambda}{D} = 0.012''$$
$$\rho = R_{\odot}/d = 0.004''$$



$$\theta = 1.22 \frac{\lambda}{D} = 0.083''$$
$$\Delta x = \theta \times 1\text{AU} = 61 \text{ km}$$

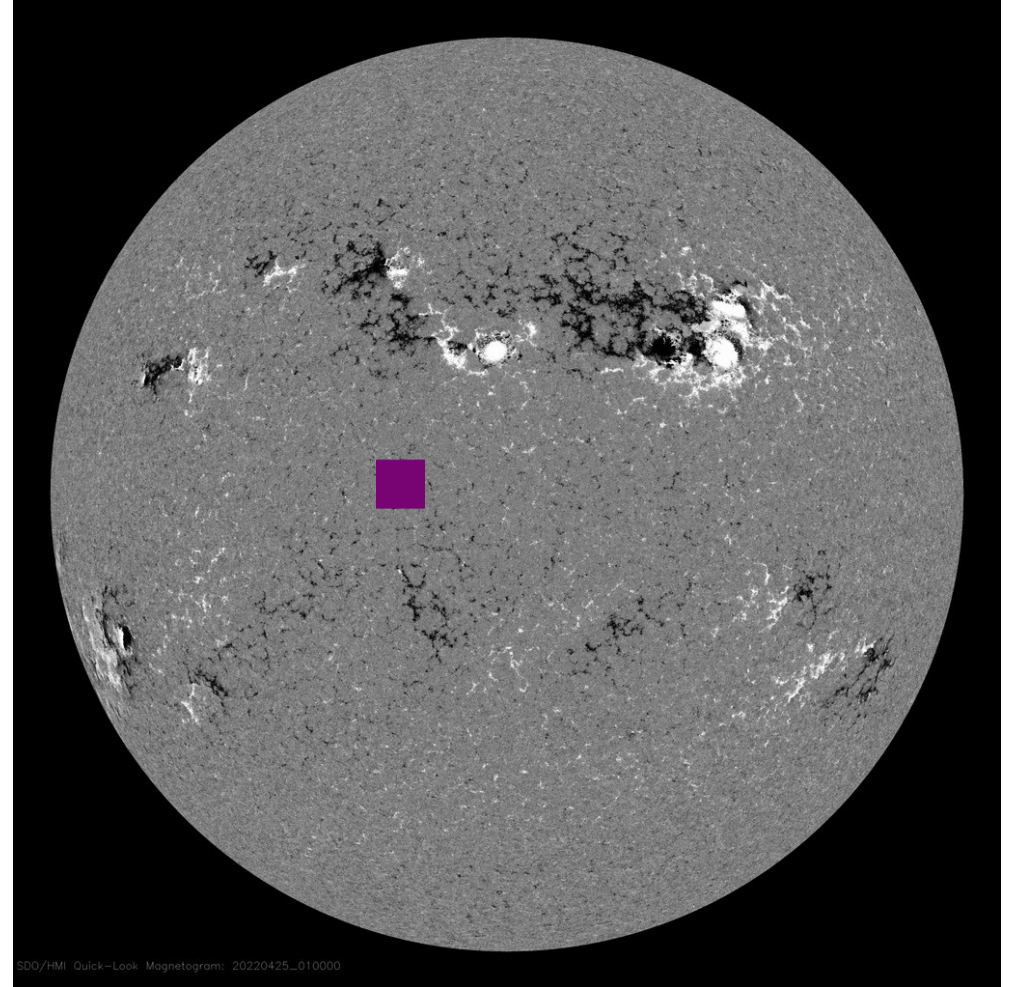
Zašto posmatramo Sunce

- Zato što je izvor života na Zemlji
- Zato što moramo da modelujemo svemirsku vremensku prognozu (space weather)
- Zato što je potrebno da razumemo fundamentalne probleme fizike Sunca kao što je zagrevanje korone
- Zato što posmatranjem Sunca dobijamo fundamentalno drugačiji, unikatan uvid u fiziku zvezda i jonizovanih gasova uopšte. Sunce je jedina zvezda čiju atmosferu možemo da analiziramo u sve tri dimenzije (sve četiri, ako računamo i vreme).

Magnituda -26.8 vam nije dovoljna?

- Bolometrijska prividna magnituda Sunca je zaista -26.8.
- Kolika je prividna magnituda piksela na Suncu veličine 0.1×0.1 lučne sekunde, koji posmatramo u intervalu talasnih dužina širine 1 pm?

Sunce danas (juče). Credits: SDO / HMI

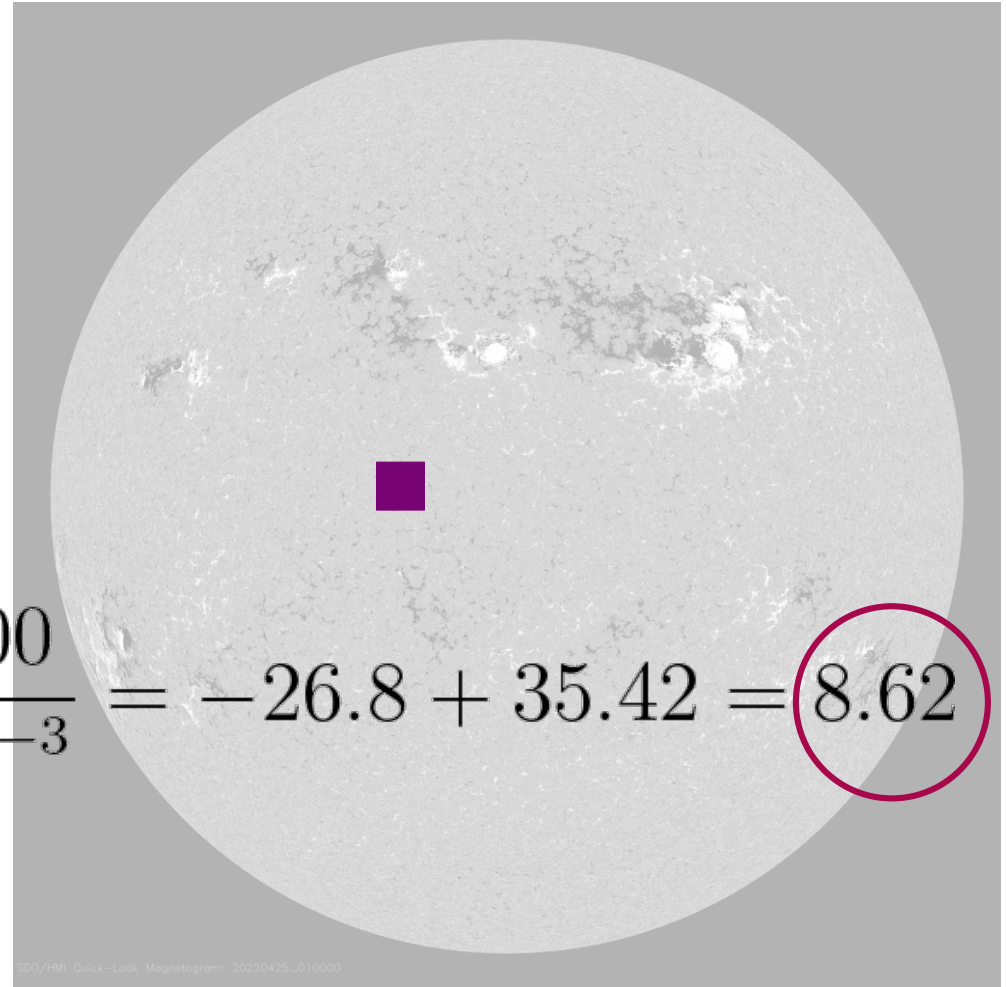


Magnituda -26.8 vam nije dovoljna?

- Bolometrijska prividna magnituda Sunca je zaista -26.8.
- Kolika je prividna magnituda piksela na Suncu veličine 0.1 x 0.1 lučne sekunde, koji posmatramo u intervalu talasnih dužina širine 1 pm?

$$m = m_{\odot} + 2.5 \log \frac{1920^2}{0.1^2} \frac{400}{10^{-3}} = -26.8 + 35.42 = 8.62$$

Sunce danas (juče). Credits: SDO / HMI

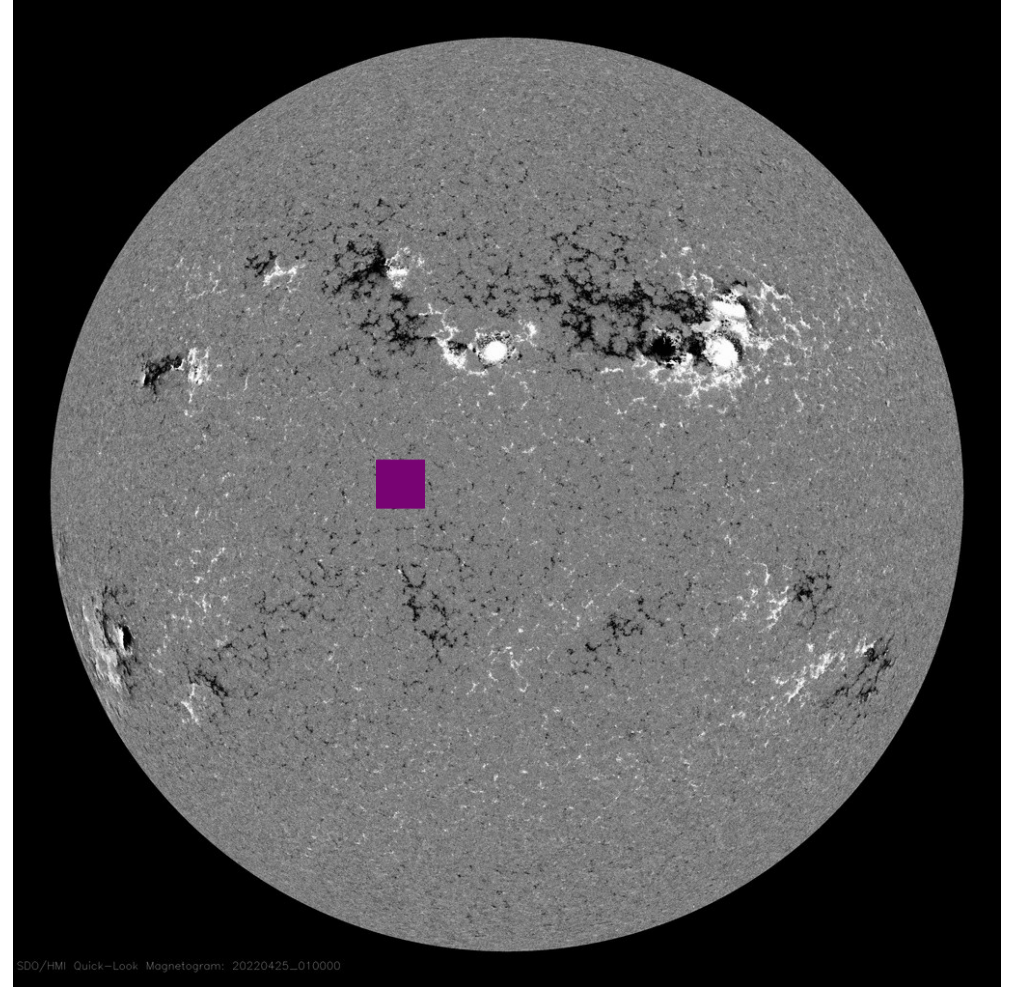


Magnituda -26.8 vam nije dovoljna?

- Bolometrijska prividna magnituda Sunca je zaista -26.8.
- Prividna magnituda ovog pikselčića je mnooogo manja.
- Na ovo dodajte da obično želimo SNR od barem 1000, i da kadenca posmatranja treba da bude:

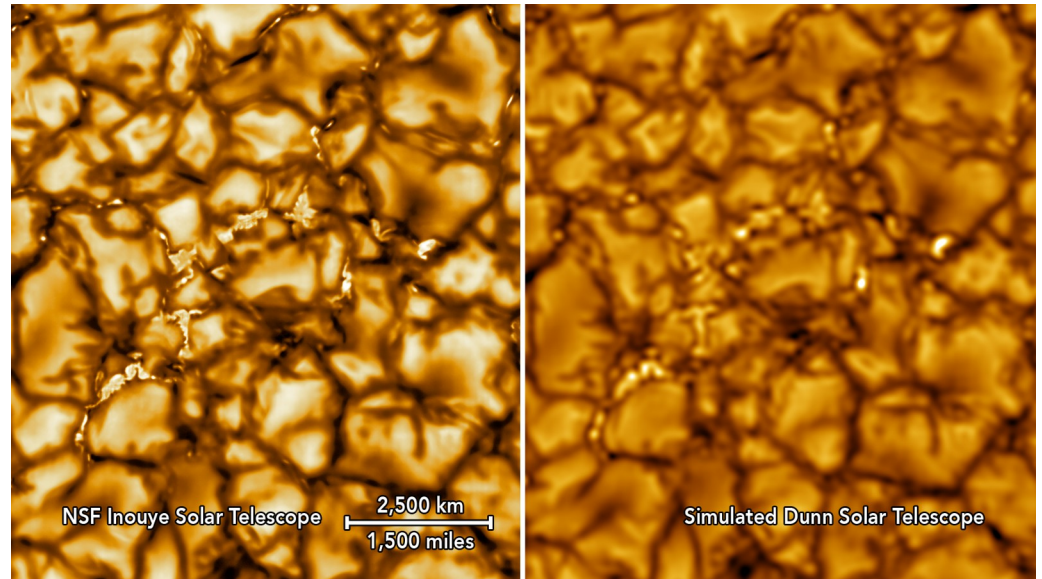
$$t \ll \frac{\Delta x}{v_{\text{zvuka}}} \approx 10 \text{ s}$$

Sunce danas (juče). Credits: SDO / HMI



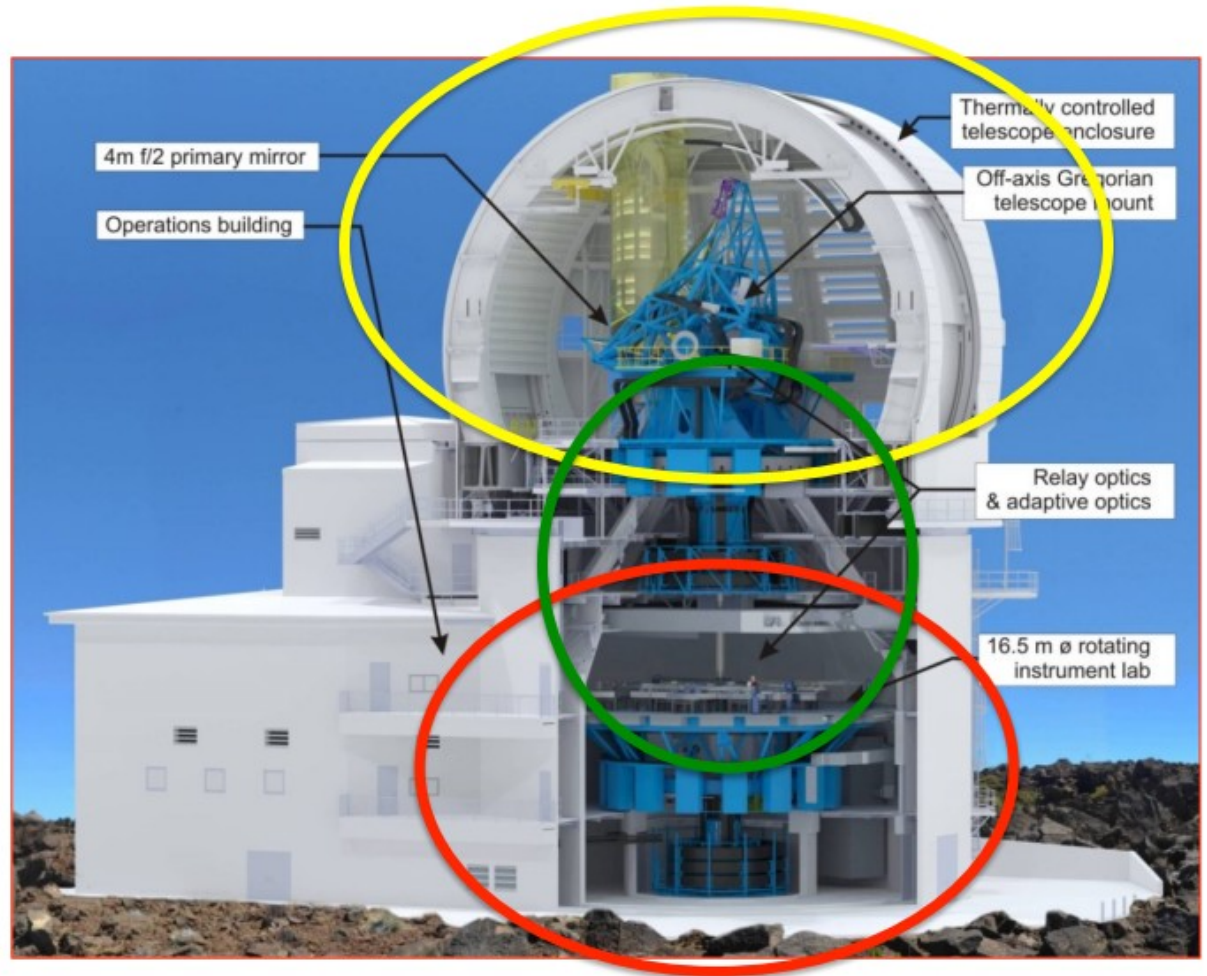
Zvuči kao da vam stvarno fali fotona, šta sad?

- Moramo da žrtvujemo nešto: prostornu, vremensku, spektralnu rezoluciju ili da smanjimo naš odnos signala prema šumu (SNR)
- DKIST nam treba da bismo videli procese na manjim skalama, detektovali slabije signale, imali bolju vremensku rezoluciju, ali ne sve to u isto vreme!
- **Na primer:** poboljšavamo prostornu rezoluciju, ali SNR ostaje isti. Ili, zadržavamo istu prostornu rezoluciju kao na manjem teleskopu ali poboljšavamo SNR, ili...

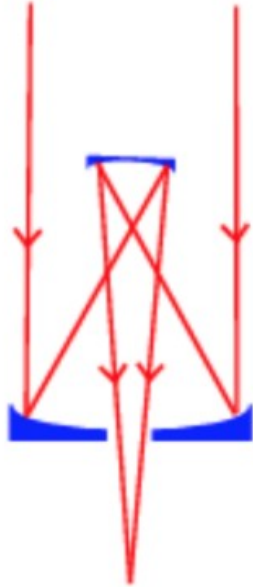


DKIST

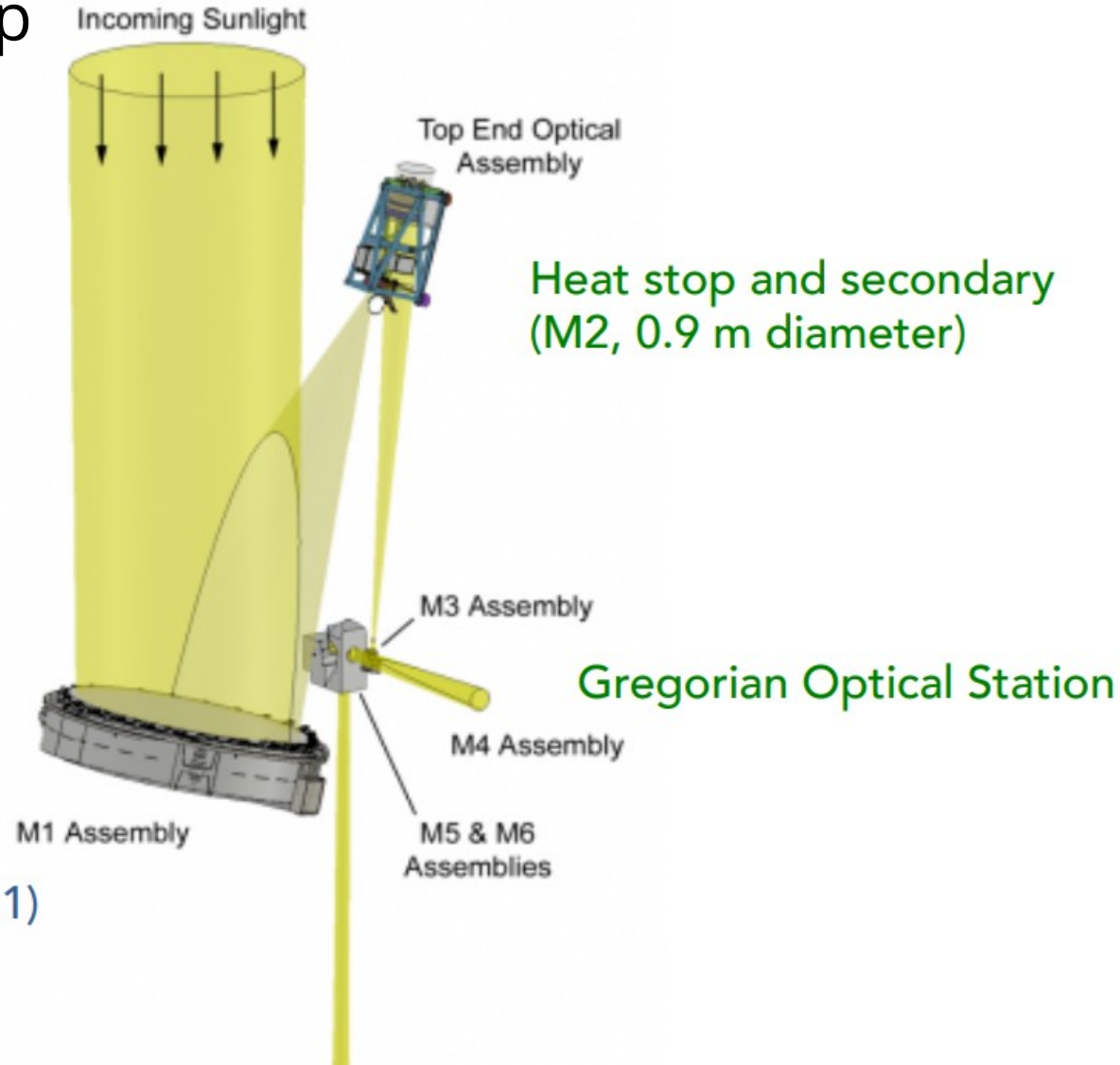
- Najveći solarni teleskop ikada
prečnik ogledala 4m, 28i
najveći optički teleskop
- f/2, alt-az, off-axis
- Gradnja započeta 2012.
Teleskop i tri instrumenta su
trenutno operativni i
posmatranja iz prvog ciklusa
prijava se upravo sprovode



Off-axis Gregorijan teleskop

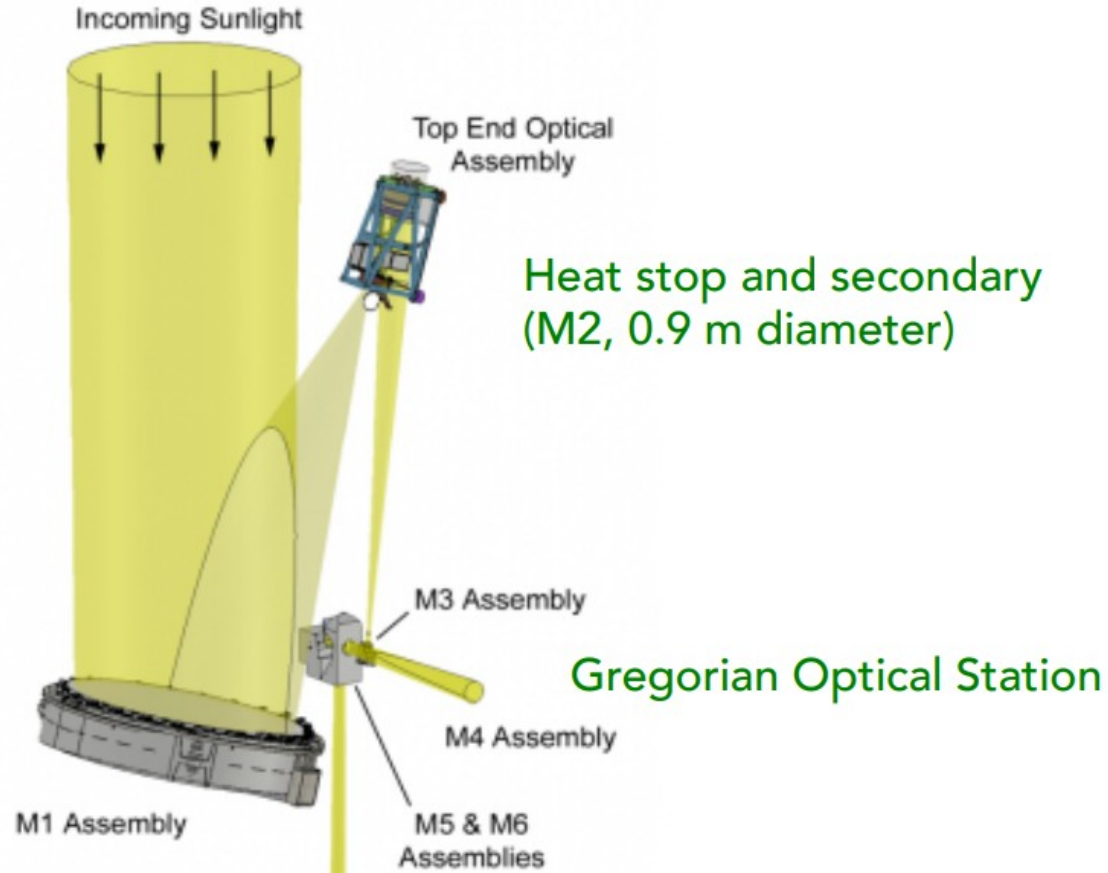


Primary mirror (M1)
4 m diameter
 $f/2$

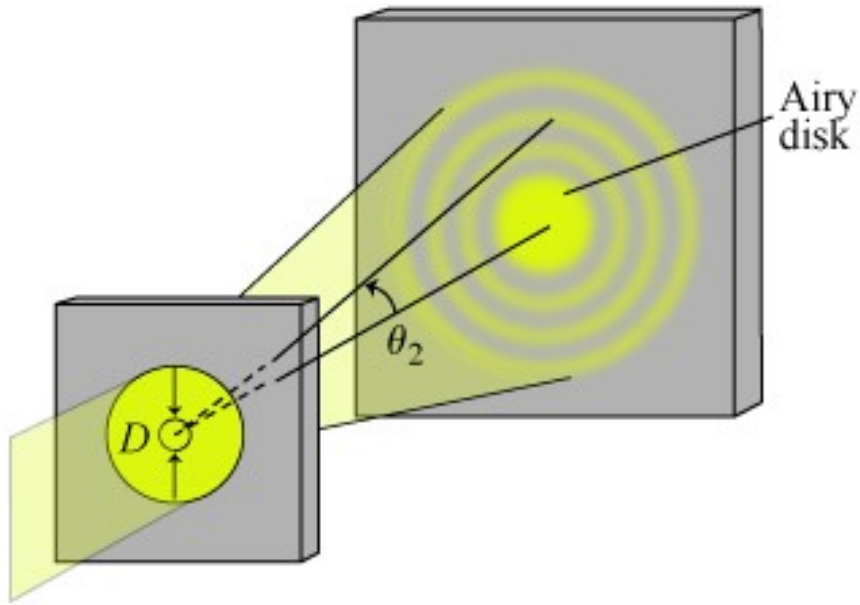


Zašto je teleskop “off-axis” ?

- DKIST je optimizovan za najbolju moguću ugaonu rezoluciju, odnosno za tzv. “imaging”
- Offaxis znači da je primarna apertura slobodna, pa je PSF teleskopa relativno jednostavan (nema tzv. “spider pattern”)



Kako funkcionišu teleskopi i šta utiče na našu sliku



$$I \propto \left[\frac{J_1(\rho)}{\rho} \right]^2 ; \quad \rho = k\theta a/2$$

Naši teleskopi imaju kružne aperture tako da tzv. PSF ima, manje više, ovakav oblik

Airy Disk Patterns and PSFs from Diffraction

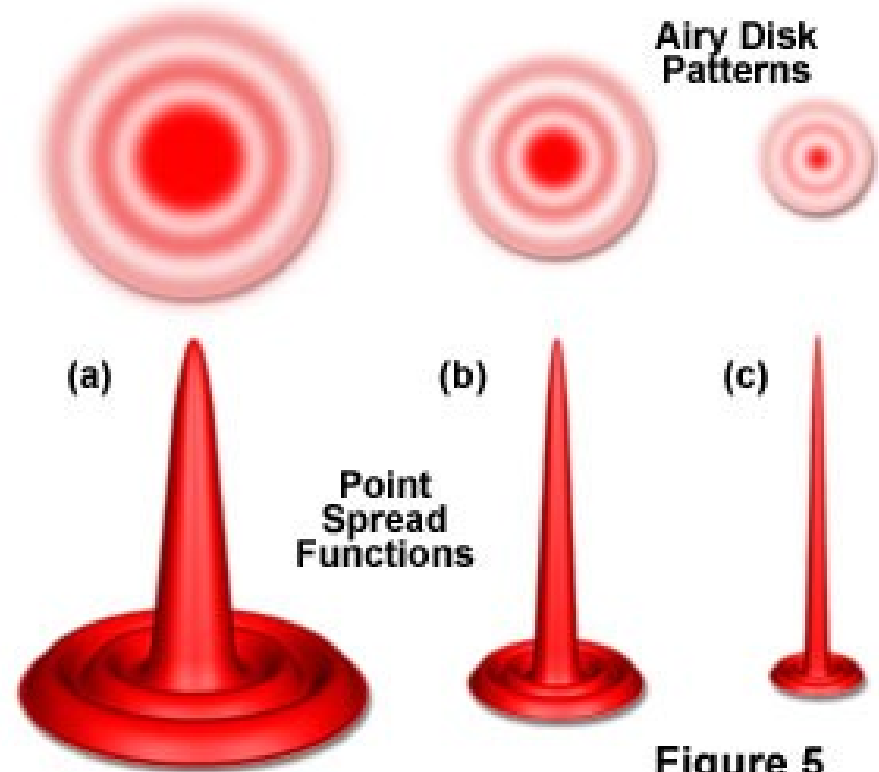


Figure 5

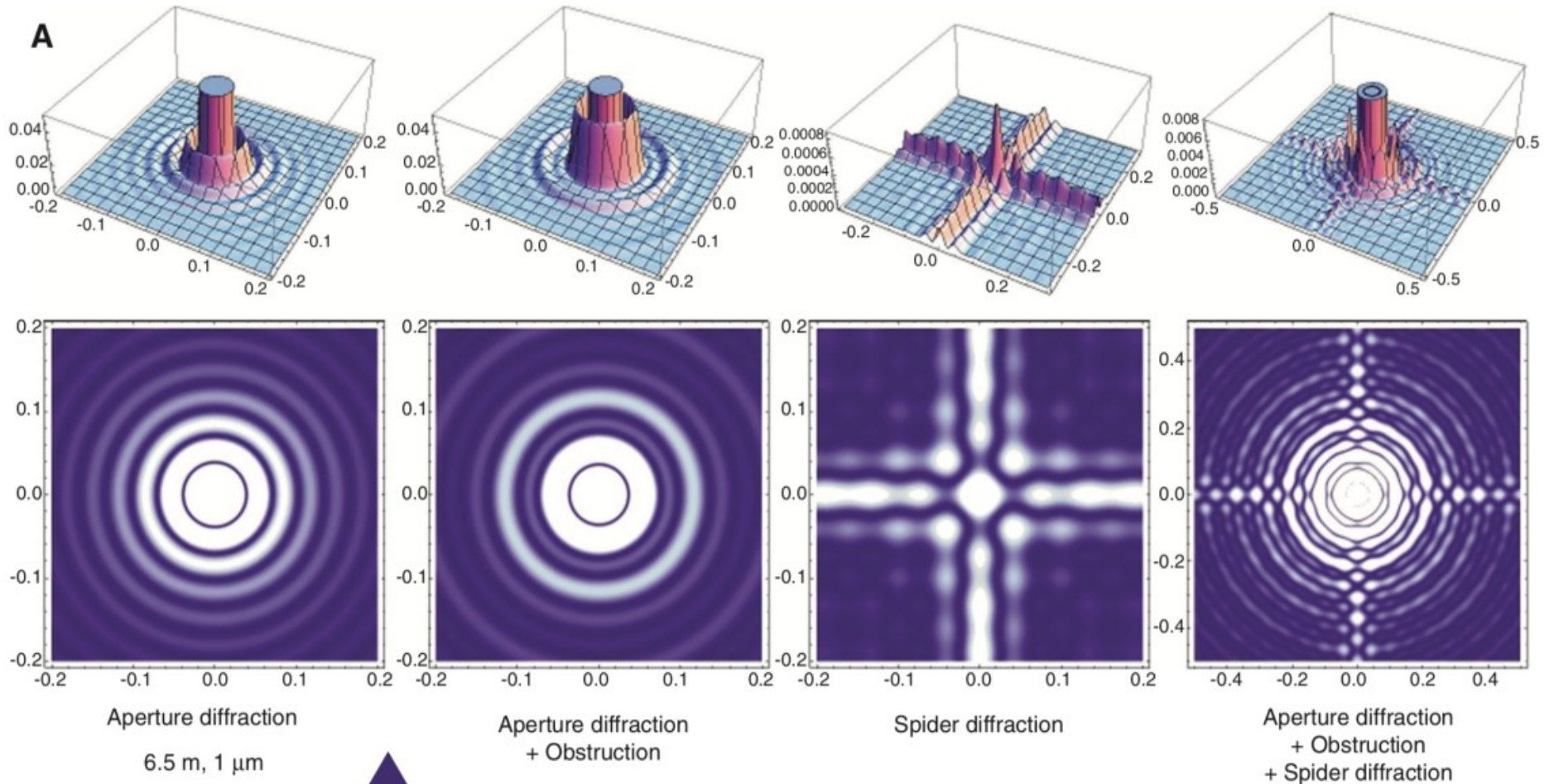
Šta se dešava u žižnoj ravni

- Svaka tačka formirane slike (dakle, svaka tačka na Suncu) je formira svoj Eri (Airy) disk (difrakcionu sliku).
- Ove difrakcione slike su uzajamno nekoherentne, pa svaka tačka u žižnoj ravni sadrži informaciju (signal) iz svih drugih tačaka slike:

$$I(x, y) = \int \int I_0(x', y') PSF(x' - x, y' - y) dx' dy'$$

- PSF zavisi od oblika naše aperture, ali i od stanja Zemljine atmosfere.
- Uz pomoć adaptivne optike i metoda za dekonvoluciju, možemo, teorijski, da postignemo prostornu rezoluciju koja odgovara našem semplovanju.

Off-axis vs on-axis

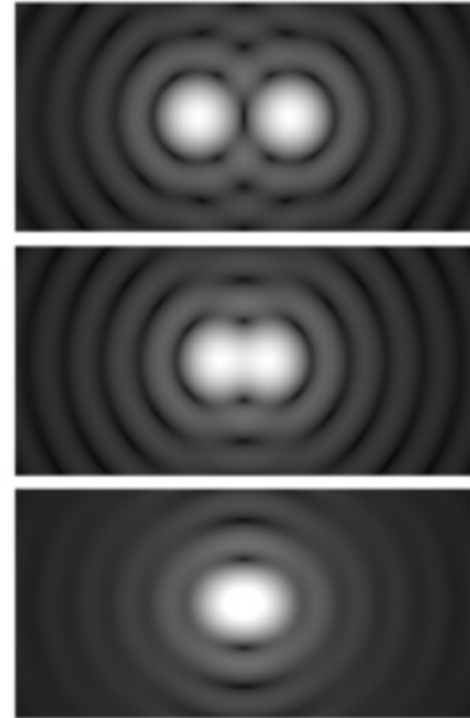
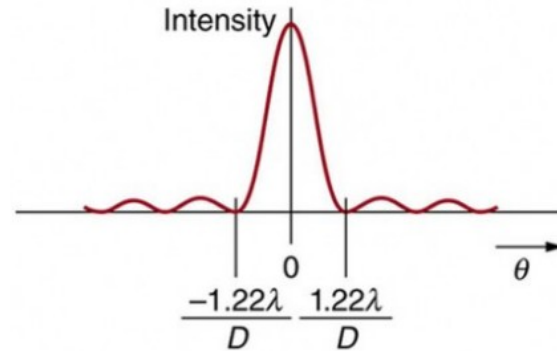


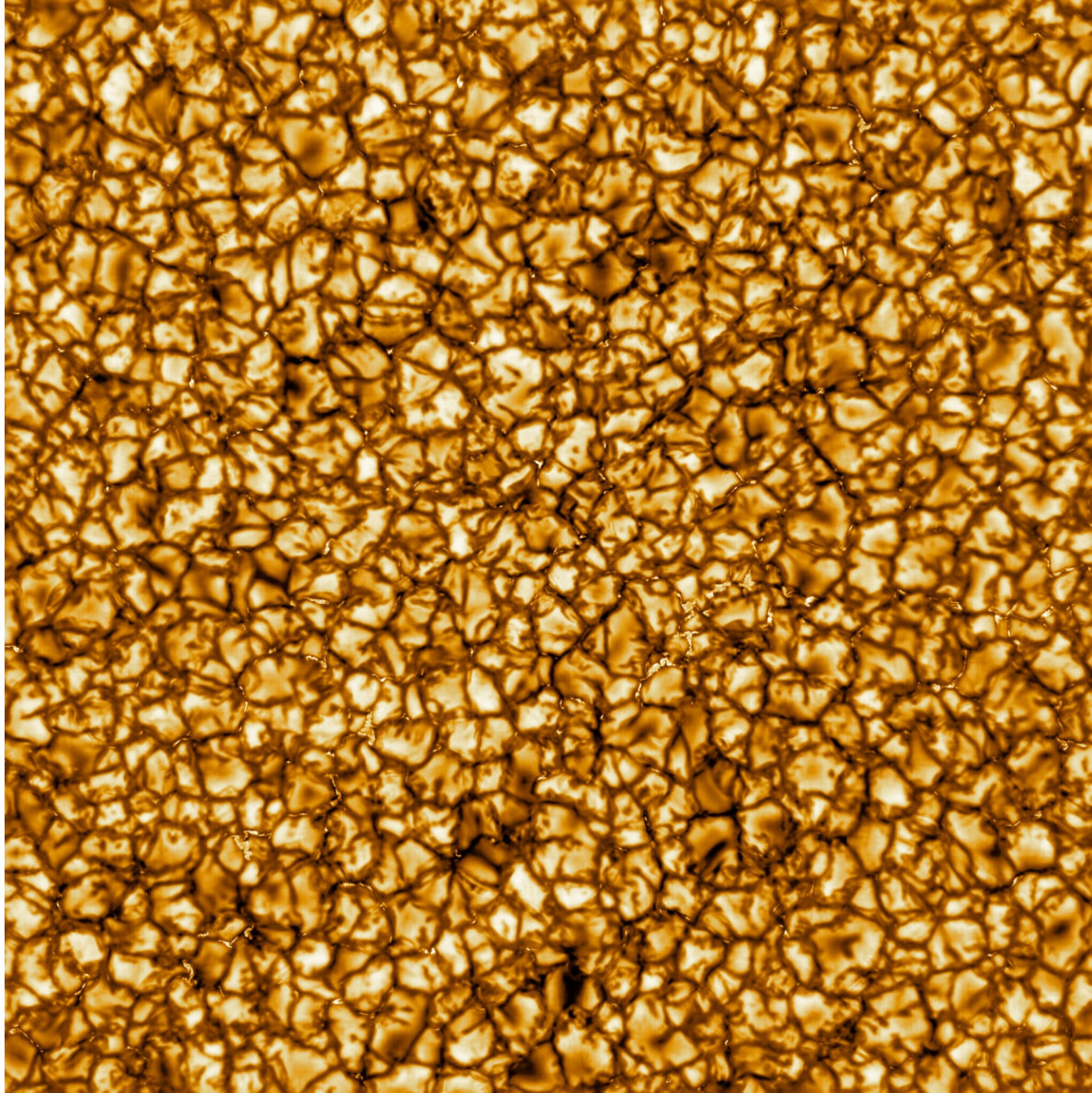
Vratimo se na pitanje od ranije

- Zašto moramo da žrtvuujemo nešto, čak i sa novim teleskopom.
- **Broj fotona po jednoj “jedinici rezolucije” je konstantan.** Zašto?
- Ukoliko je razdvojna moć našeg teleskopa Δx , optimalna veličina piksela na slici je $\Delta x/2$ (Nyquist)

$$\Delta x = 1.22 \frac{\lambda}{D} f$$

- Površina našeg piksela opada sa D^2 , dok ukupna količina fotona raste sa D^2 !
- Situacija je čak malo gora, jer moramo da smanjimo ekspoziciju

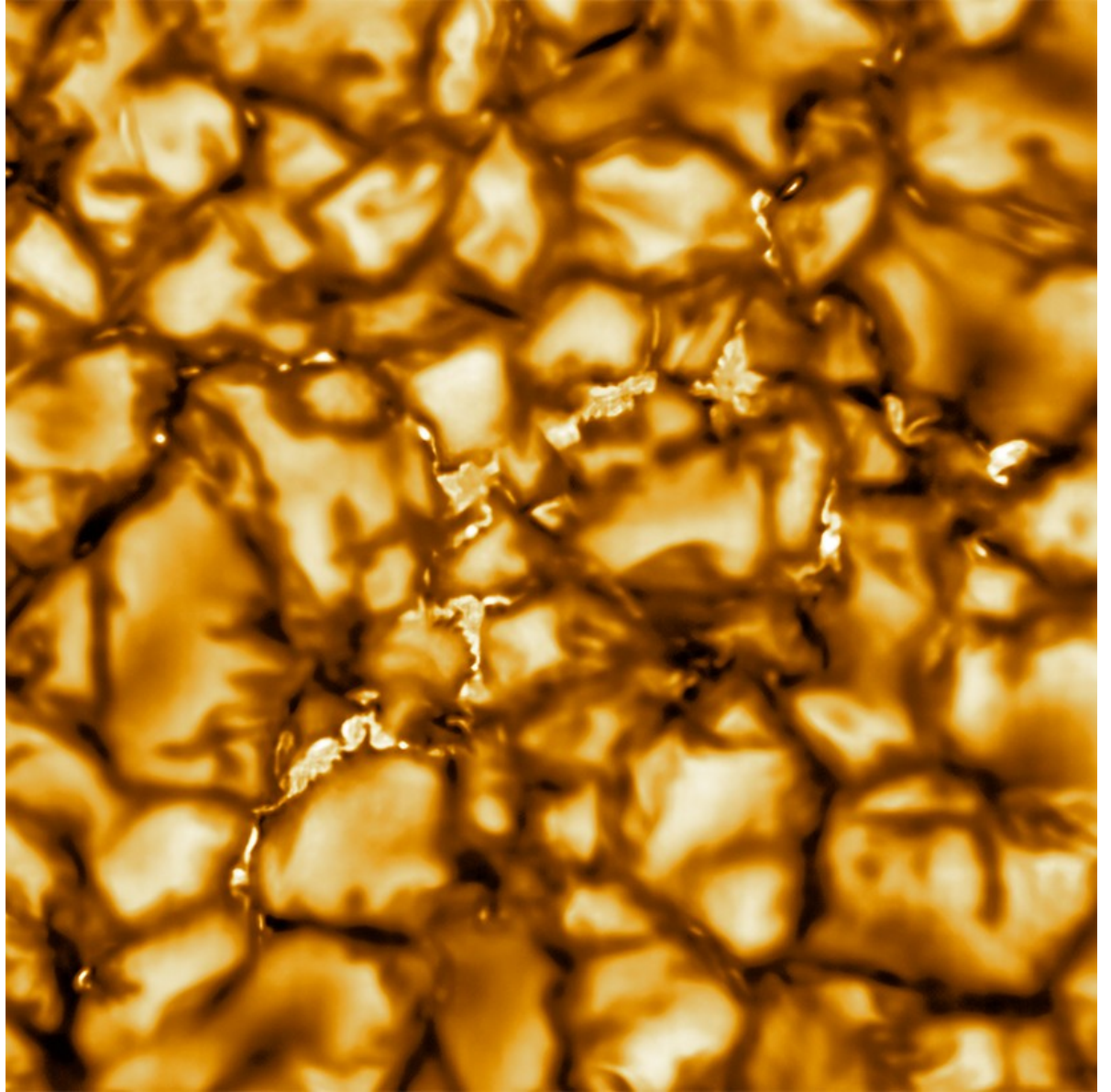


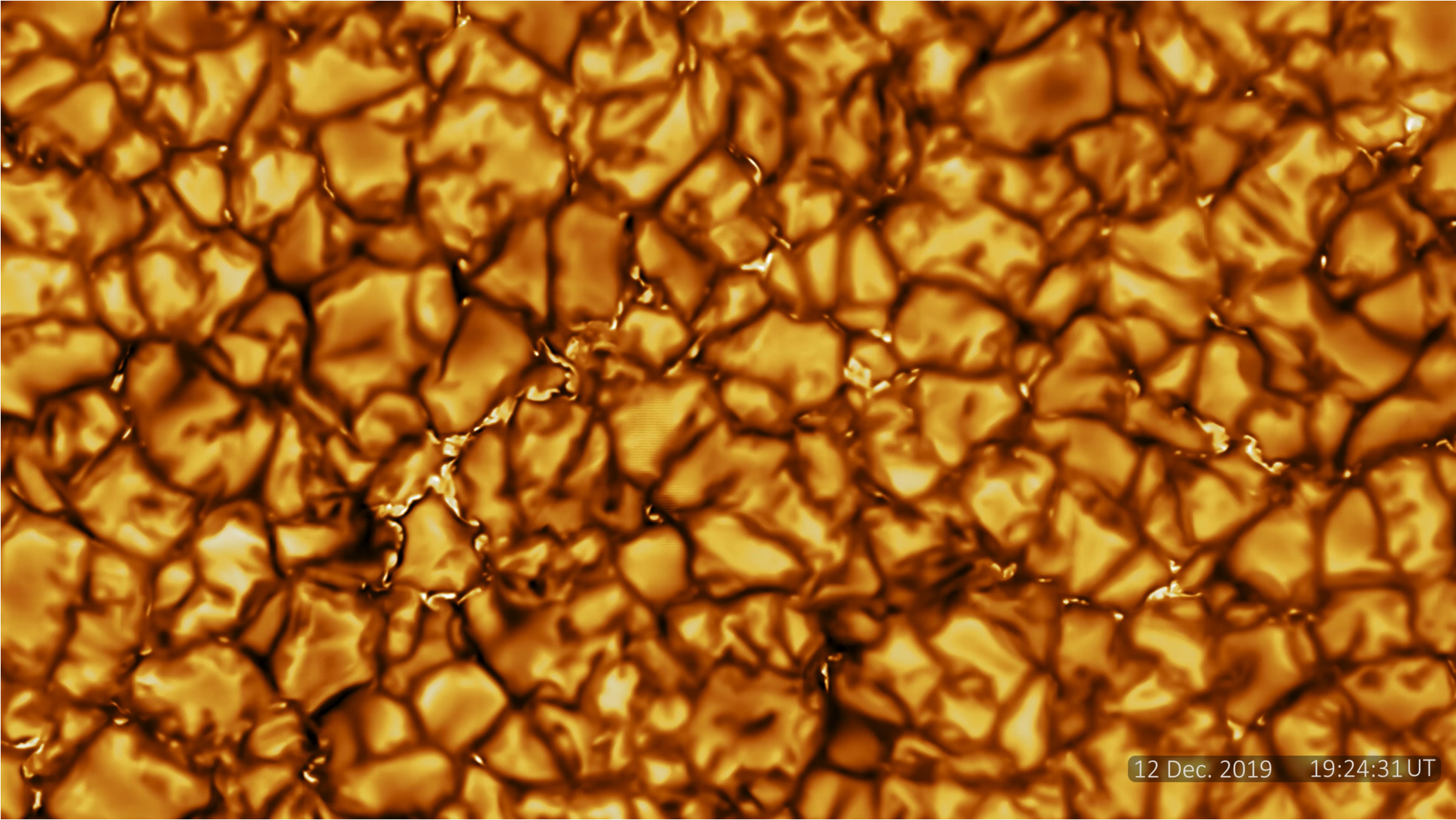


DKIST first light images. Credits:
AURA / NSF / NSO

- Rezolucija ove slike je blizu teorijske razdvojne moći DKIST teleskopa.
- Pikseli su nekih ~ 20km!

DKIST first light images. Credits:
AURA / NSF / NSO



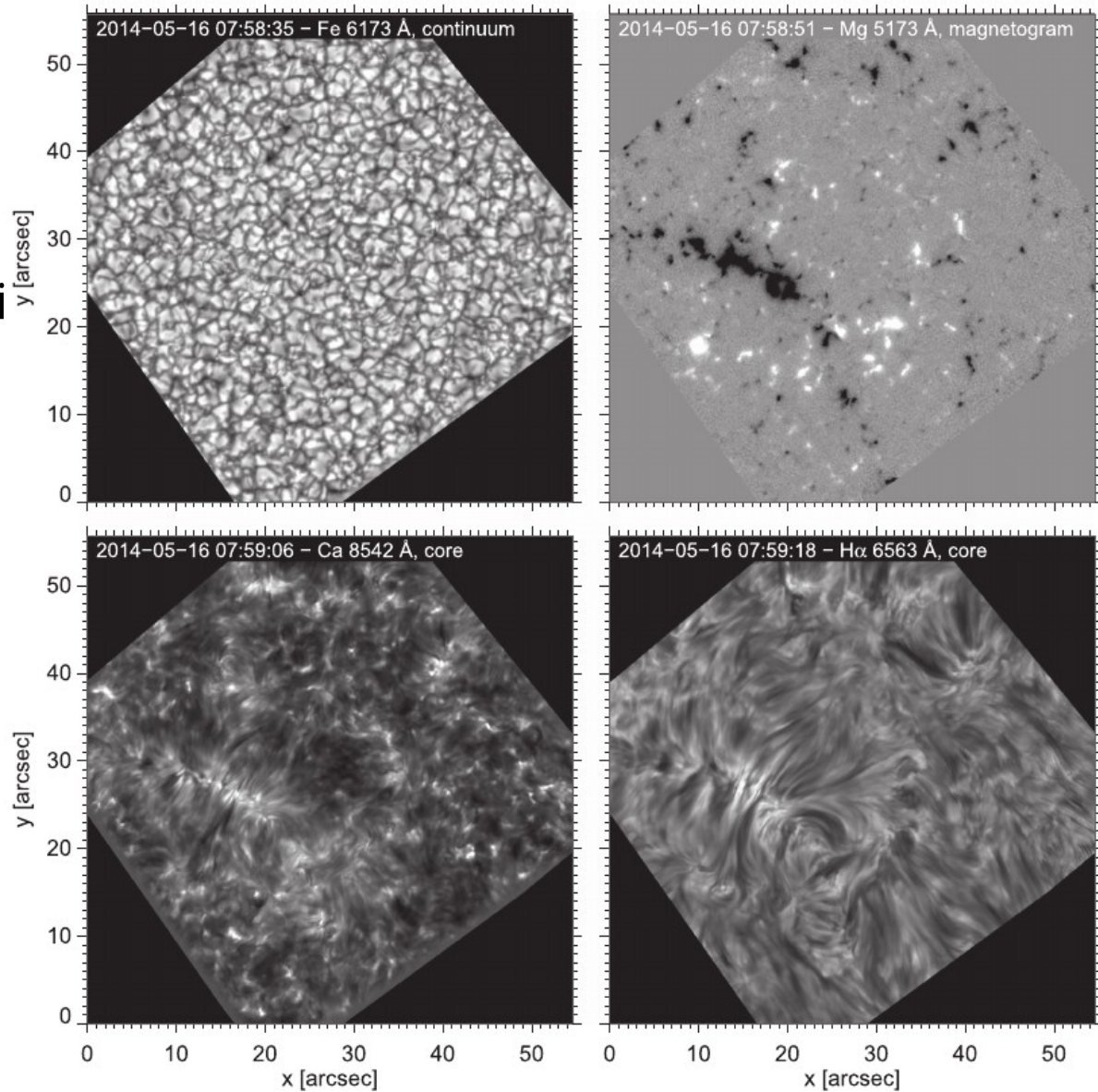


12 Dec. 2019 19:24:31 UT

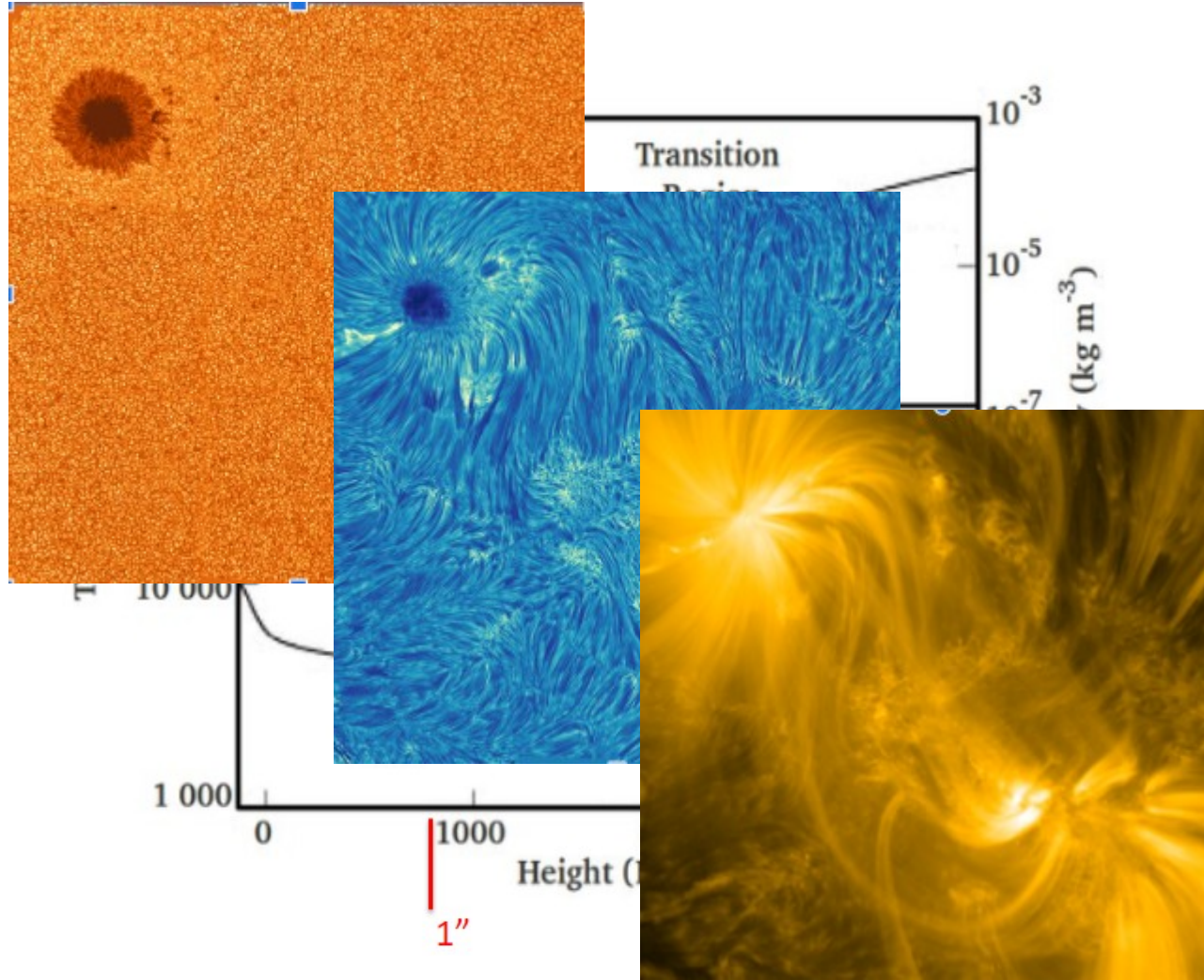
Atmosfera Sunca izgleda drugačije na različitim talasnim dužinama

- Glavna “paradigma” naše oblasti je da različite talasne dužine nose informacije sa različitim visina (dubina).
- Posmatranjem različitih spektralnih linija, ili čak šetajući kroz jednu spektralnu liniju, dobijamo uvid u 3D strukturu atmosfere Sunca

Gošić, et al. 2018. Swedish Solar Tower (1m)

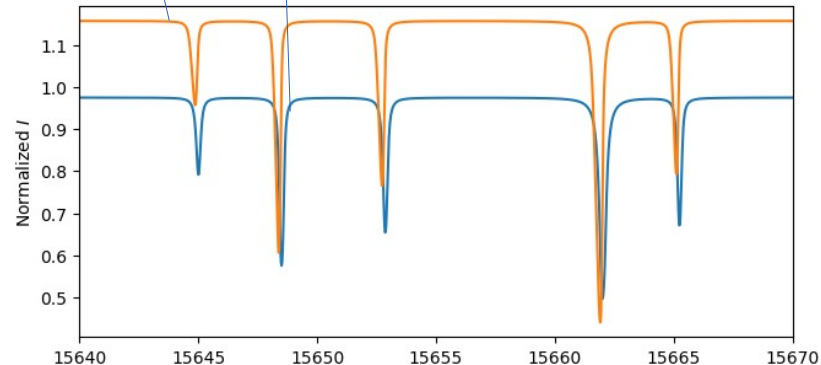
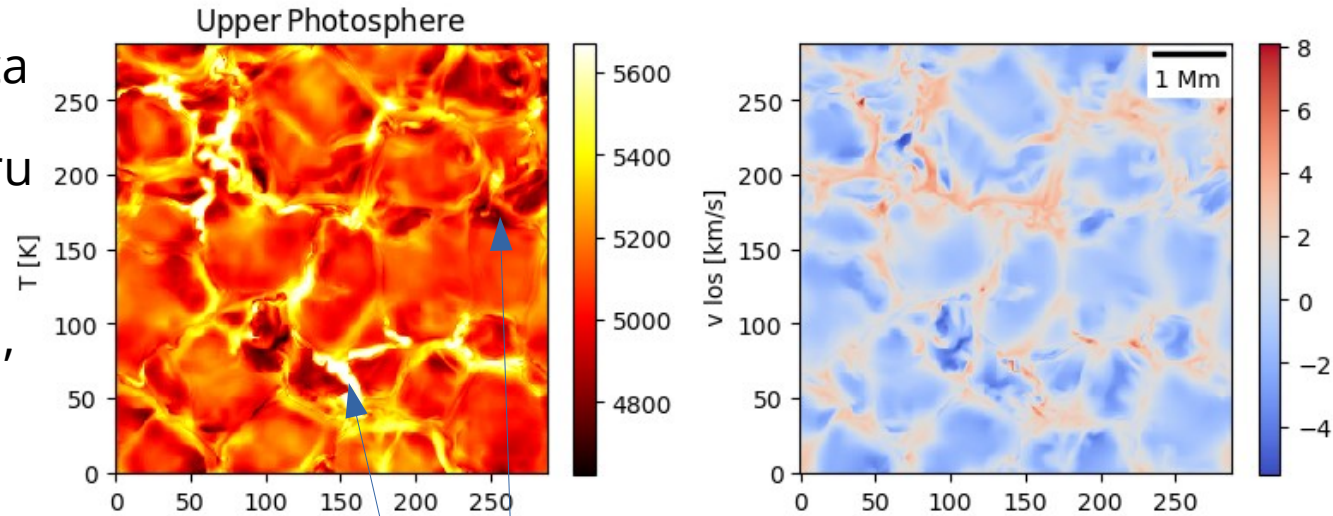


Atmosferu Sunca obično zamišljamo ovako:



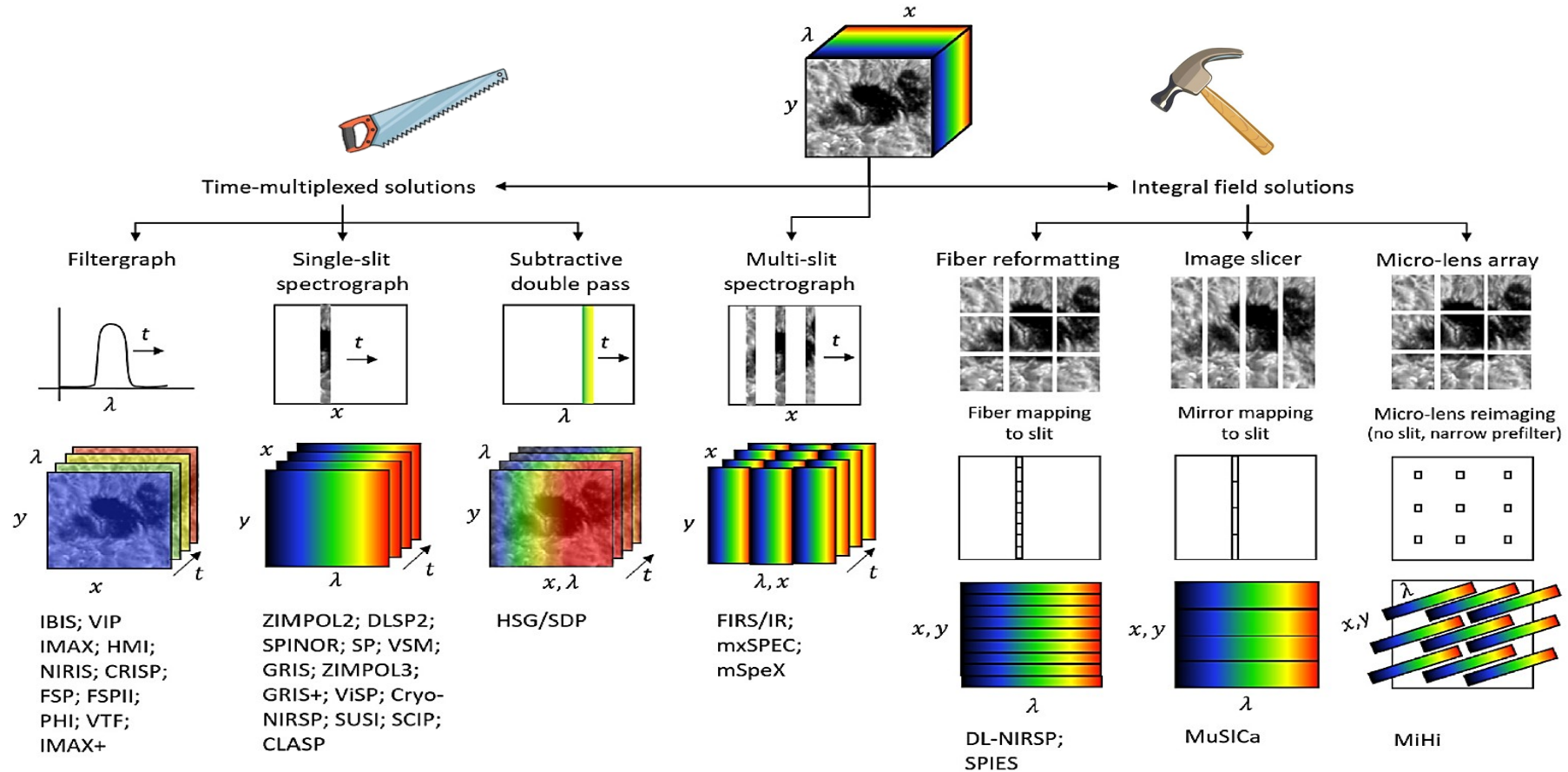
Šta se dešava sa svetlošću koju posmatramo

- Spektar nastaje prenosom zračenja kroz atmosferu Sunca
- Svetlost prolazi kroz atmosferu Zemlje i dolazi do teleskopa
- Putuje kroz naš optički sistem, prolazi kroz disperzioni element
- CCD beleži količinu svetlosti u različitim tačkama i talasnim dužinama
- Analiziramo spektre i uživamo u neslućenim radostima



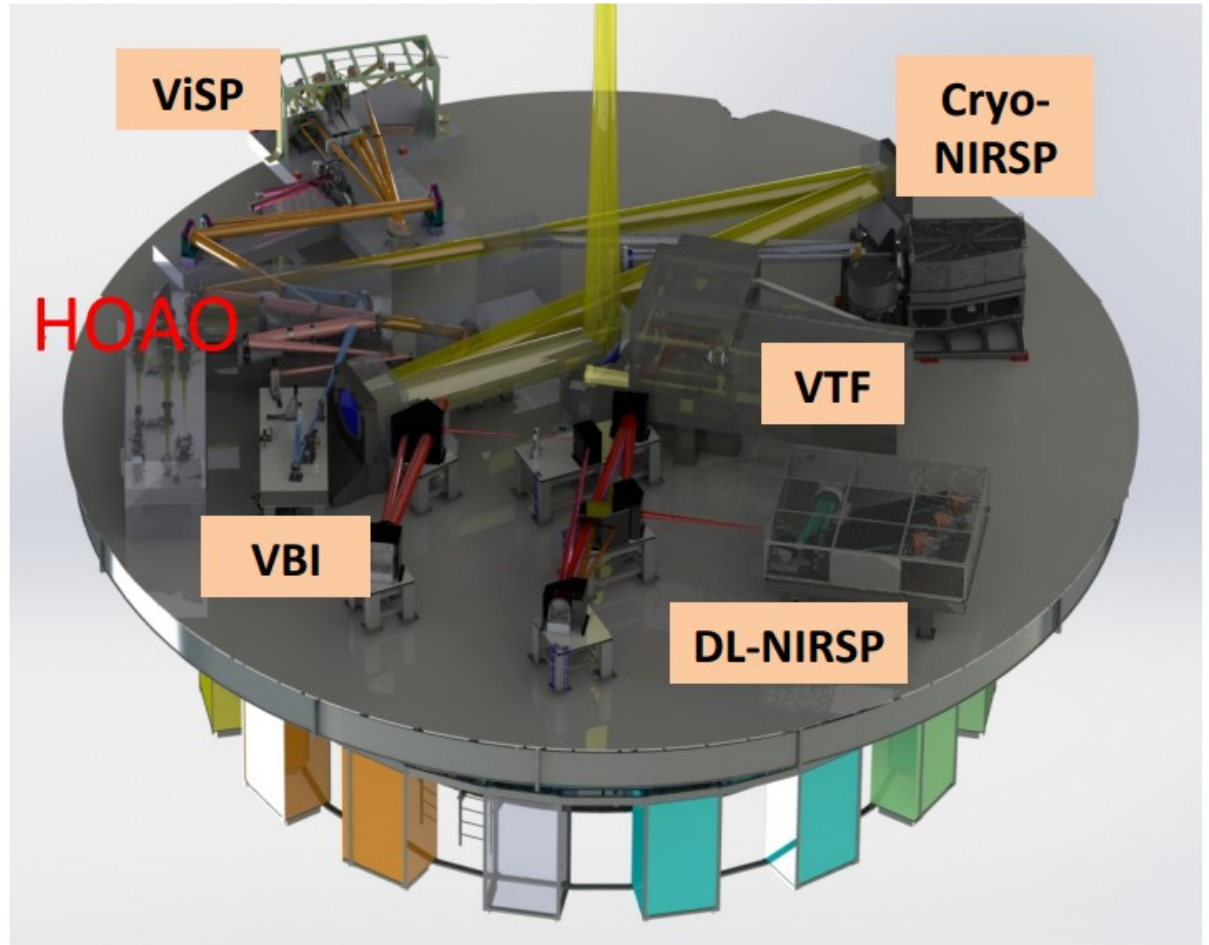
MURAM quiet Sun simulation, courtesy of T. Riethmüller

Spectroscopic mapping



Kako DKIST analizira Sunčevu svetlost

- ViSP : Visible Spectropolarimeter
- VTF: Visible Tunable Filtergraph
- VBI: Visible Broadband Imager
- DL-NIRSP: Diffraction Limited Near Infrared Spectropolarimeter
- Cryo-NIRSP



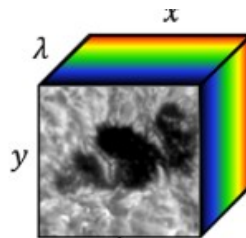
VTF (+ VBI)

ViSP; Cryo-NIRSP

DL-NIRSP

Time-multiplexed solutions

Integral field solutions



Filtergraph

IBIS; VIP
IMAX; HMI;
NIRIS; CRISP;
FSP; FSPII;
FHI; VTF;
IMAX+

Single-slit spectrograph

ZIMPOL2; DLSP2;
SPINOR; SP; VSM;
CRIS; ZIMPOL3;
GRIS+; ViSP; Cryo-
NIRSP; SUSI; SCIP;
CLASP

Subtractive double pass

HSG/SDP

Multi-slit spectrograph

FIRS/IR;
mxSPEC;
mSpeX

Fiber reformatting

Fiber mapping to slit

DL-NIRSP;
SPIES

Image slicer

Mirror mapping to slit

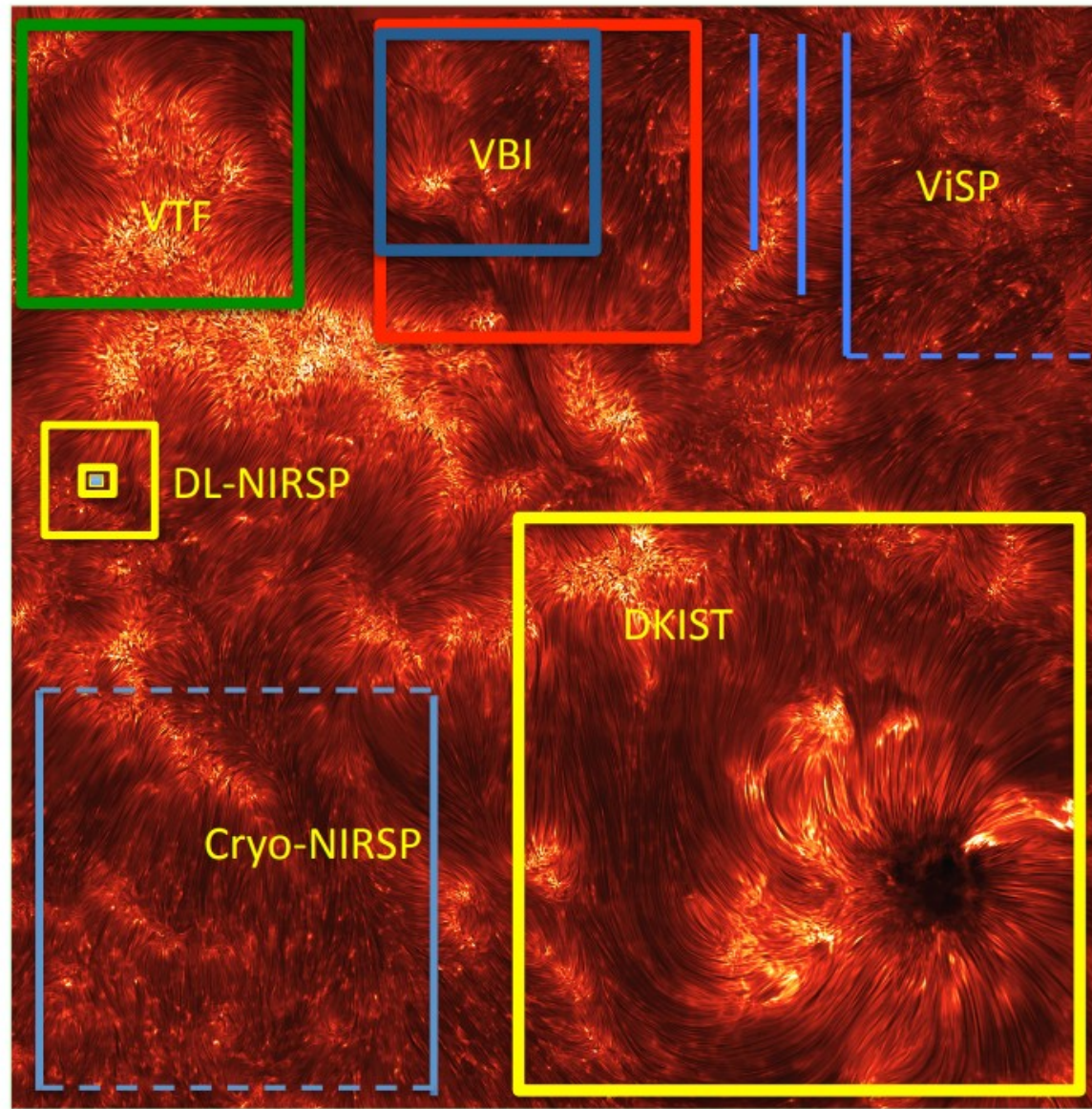
MuSiCa

Micro-lens array

Micro-lens reimaging (no slit, narrow prefilter)

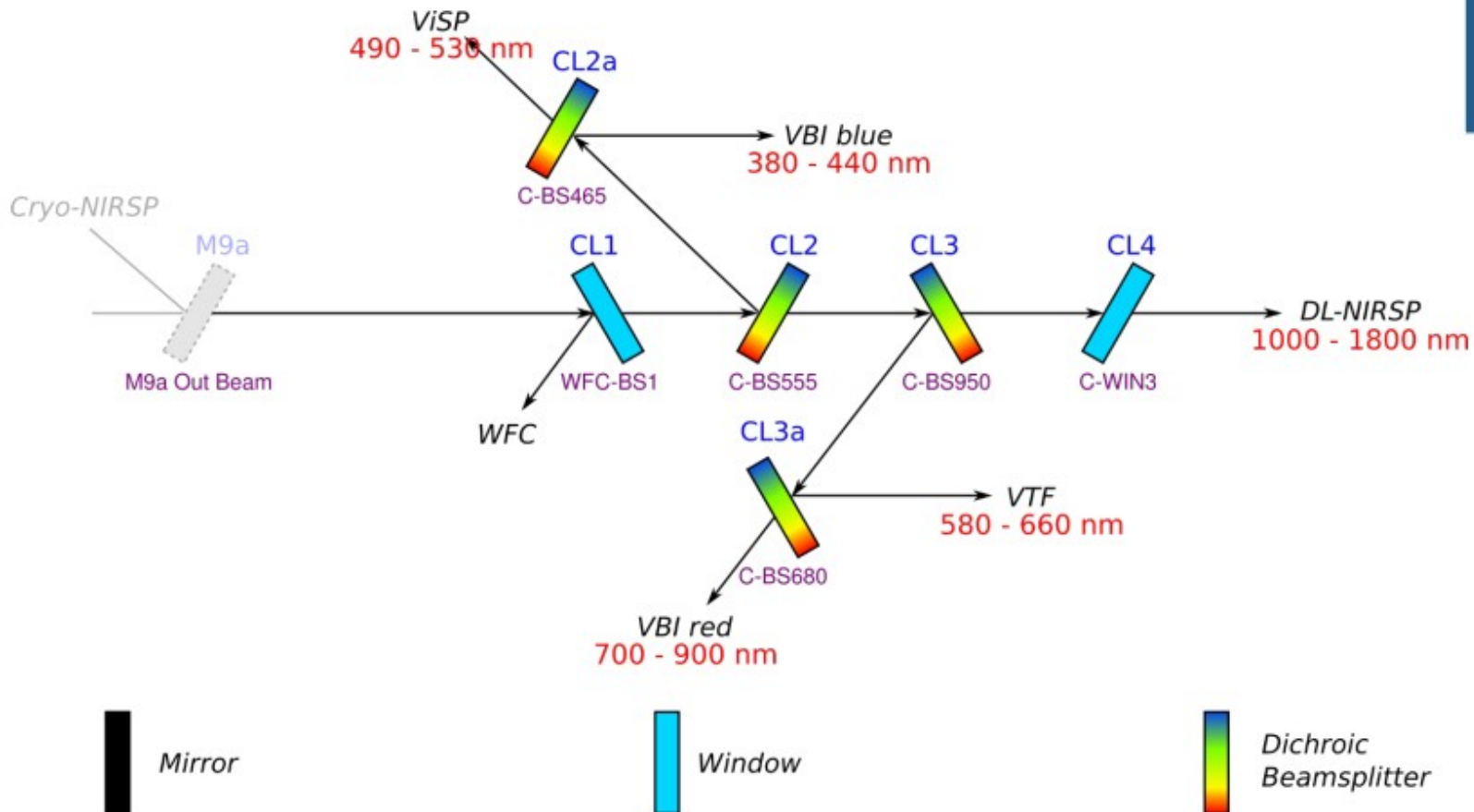
MiHi

- Ovo su okvirna vidna polja instrumenata. Vidimo da je teleskop zaista koncipiran za posmatranje jako malih detalja (što ima smisla, imamo mnogo tzv. full-disk^{4'} teleskopa)
- Vidna polja različitih instrumenata se poklapaju, tako da...



Možemo da koristimo više njih u isto vreme:

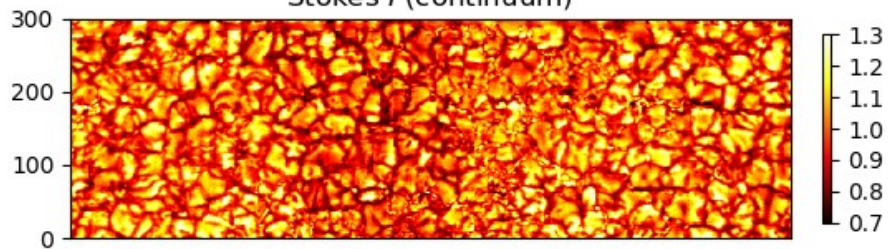
FIDO
TOOL



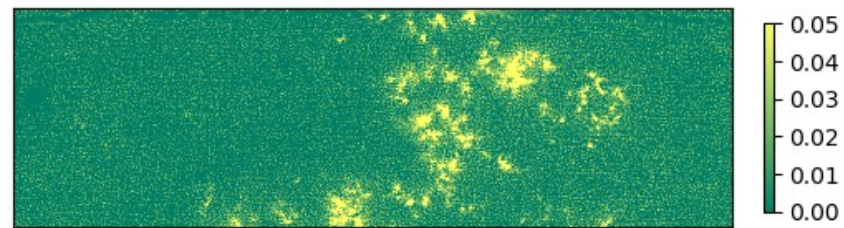
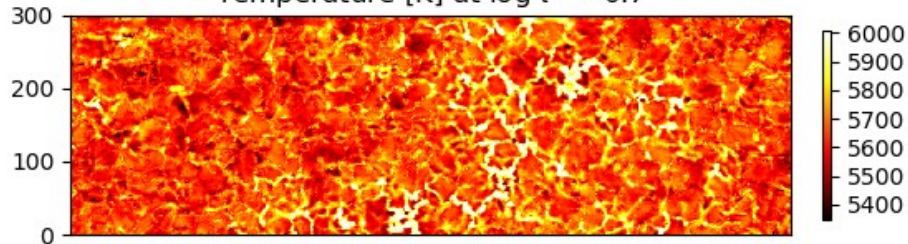
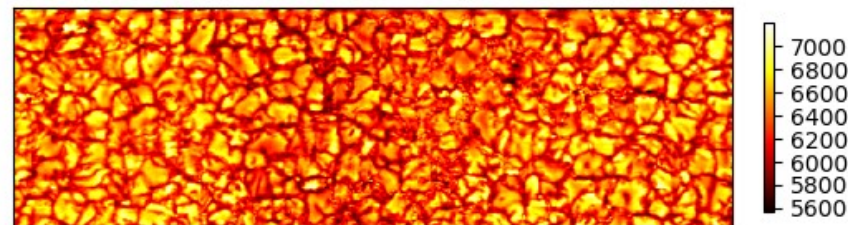
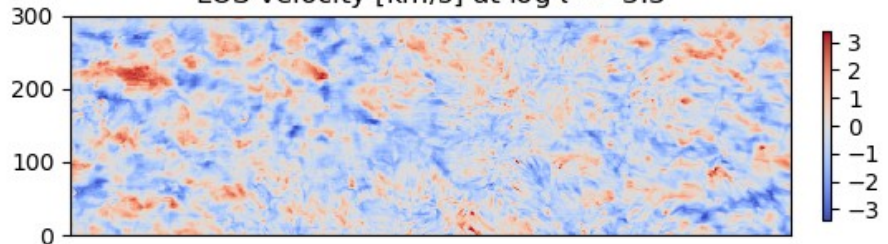
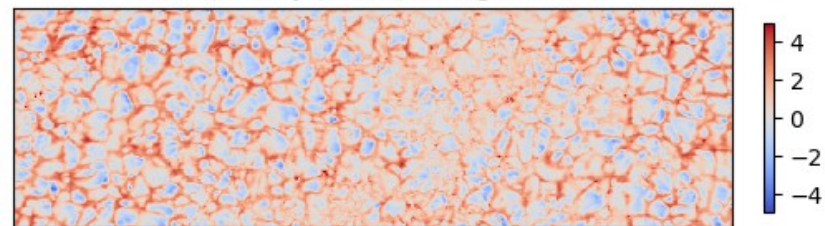
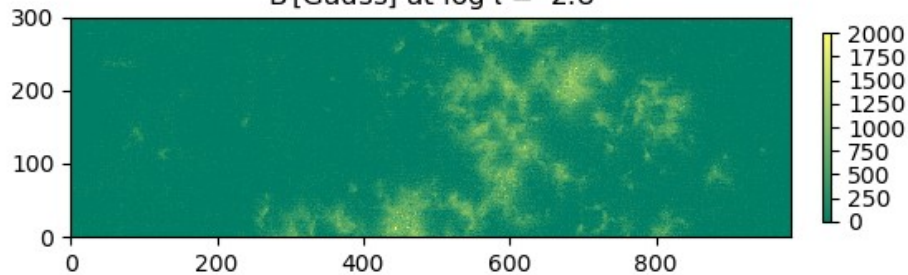
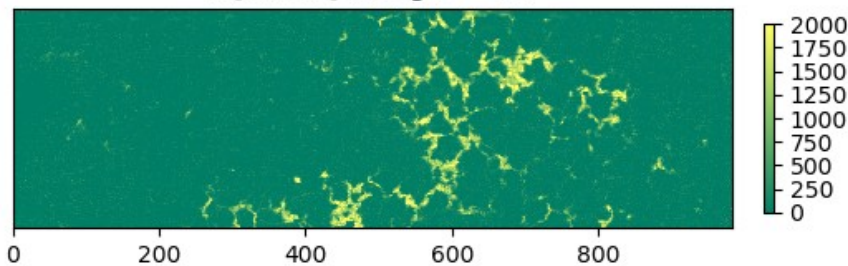
Šta želimo da postignemo ovime?

- Generalan princip: Mnogo talasnih dužina, velika rezolucija, rekonstruišemo atmosferu Sunca u 3D.
- Šta se nadamo da ćemo naći / izmeriti uz pomoć 4-metarskog teleskopa?
- Nekoliko, prilično subjektivno odabranih primera
- Ali pre toga, mali podsetnik na to kako interpretiramo spektropolarimetrijska posmatranja

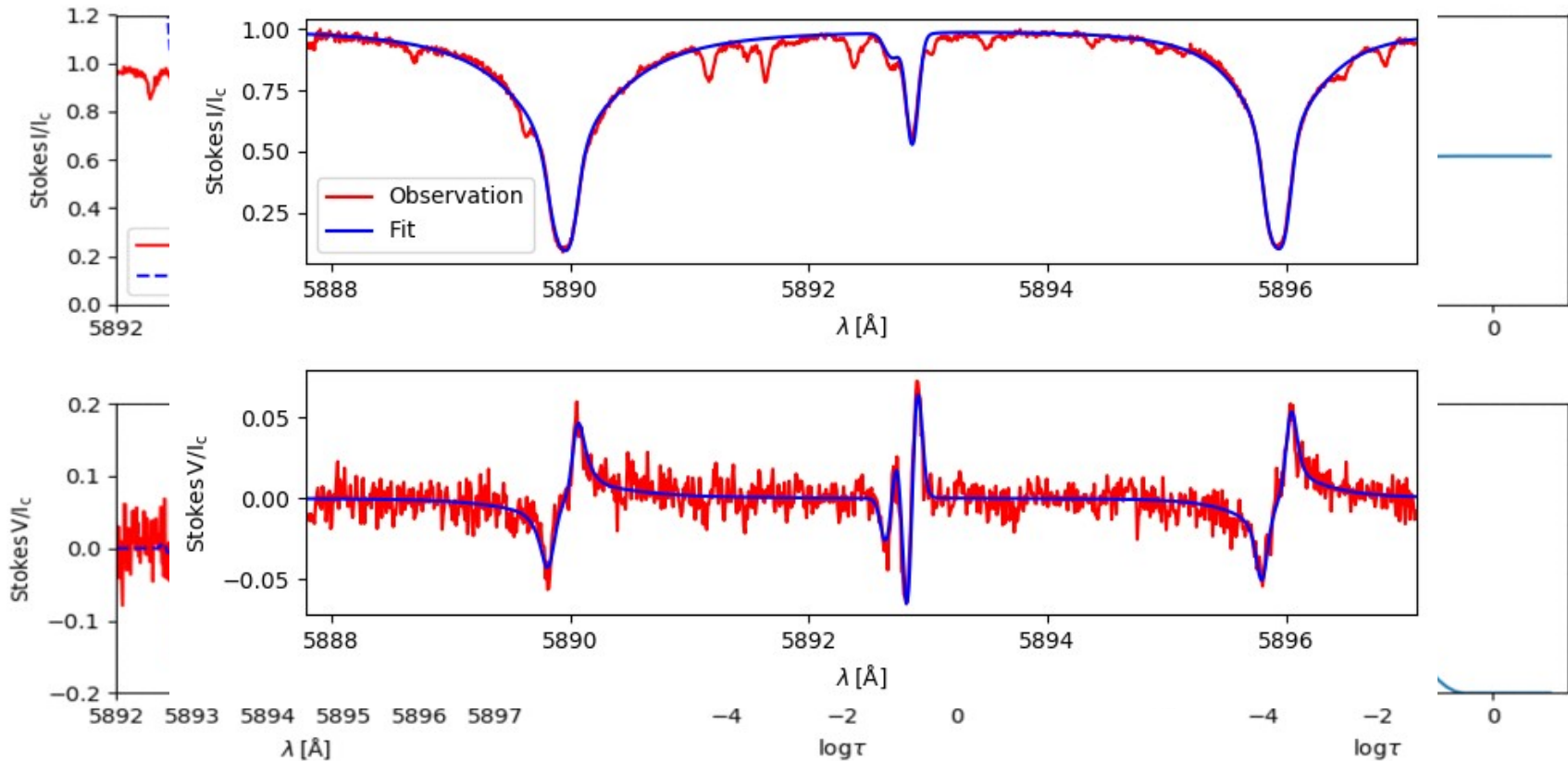
Stokes I (continuum)



Stokes V (Sodium D1 line)

Temperature [K] at $\log \tau = -0.7$ Temperature [K] at $\log \tau = 0.0$ LOS velocity [km/s] at $\log \tau = -3.3$ LOS velocity [km/s] at $\log \tau = -0.5$ B [Gauss] at $\log \tau = -2.8$ B [Gauss] at $\log \tau = -0.3$ 

Kako dobijamo ove mape?

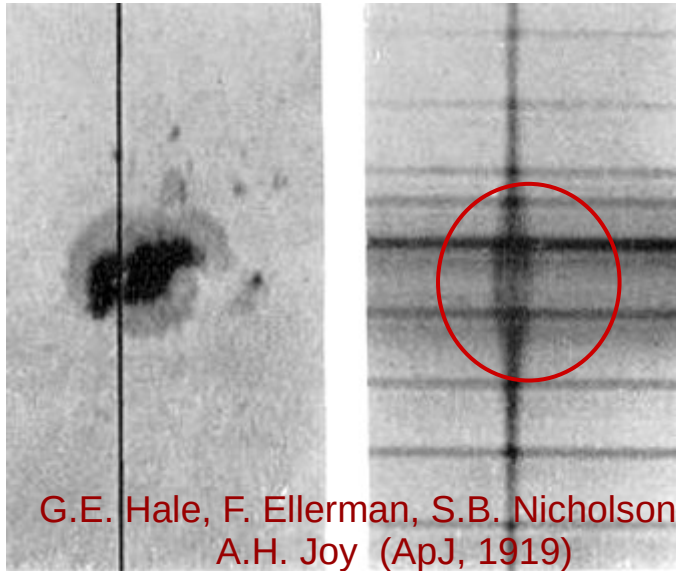


$$\frac{dI_\lambda}{dz} = -\chi_\lambda I_\lambda + j_\lambda$$

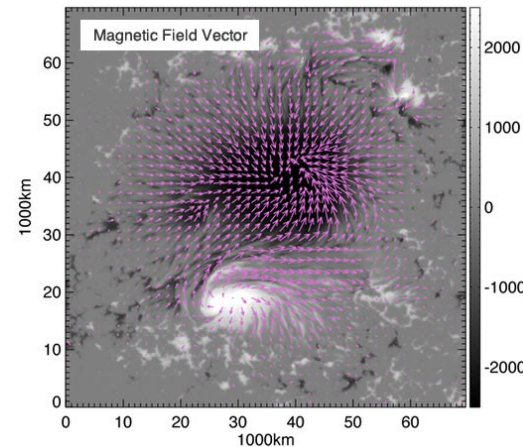
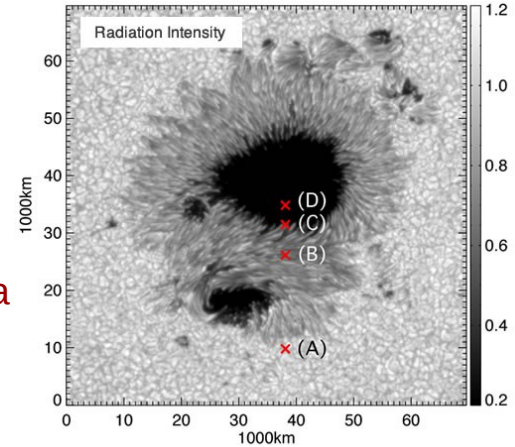
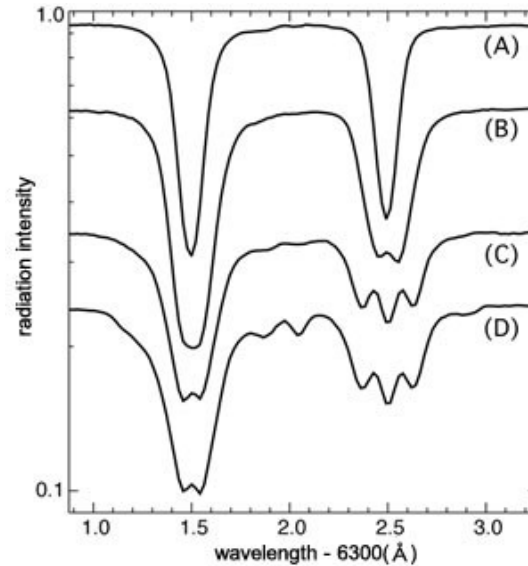
Inverzija: fitovanje modela atmosfere na posmatrani (polarizovani) spektar. Spektar i atmosfera su povezani kroz jednačinu prenosa zračenja

Problem #1: Slaba magnetna polja

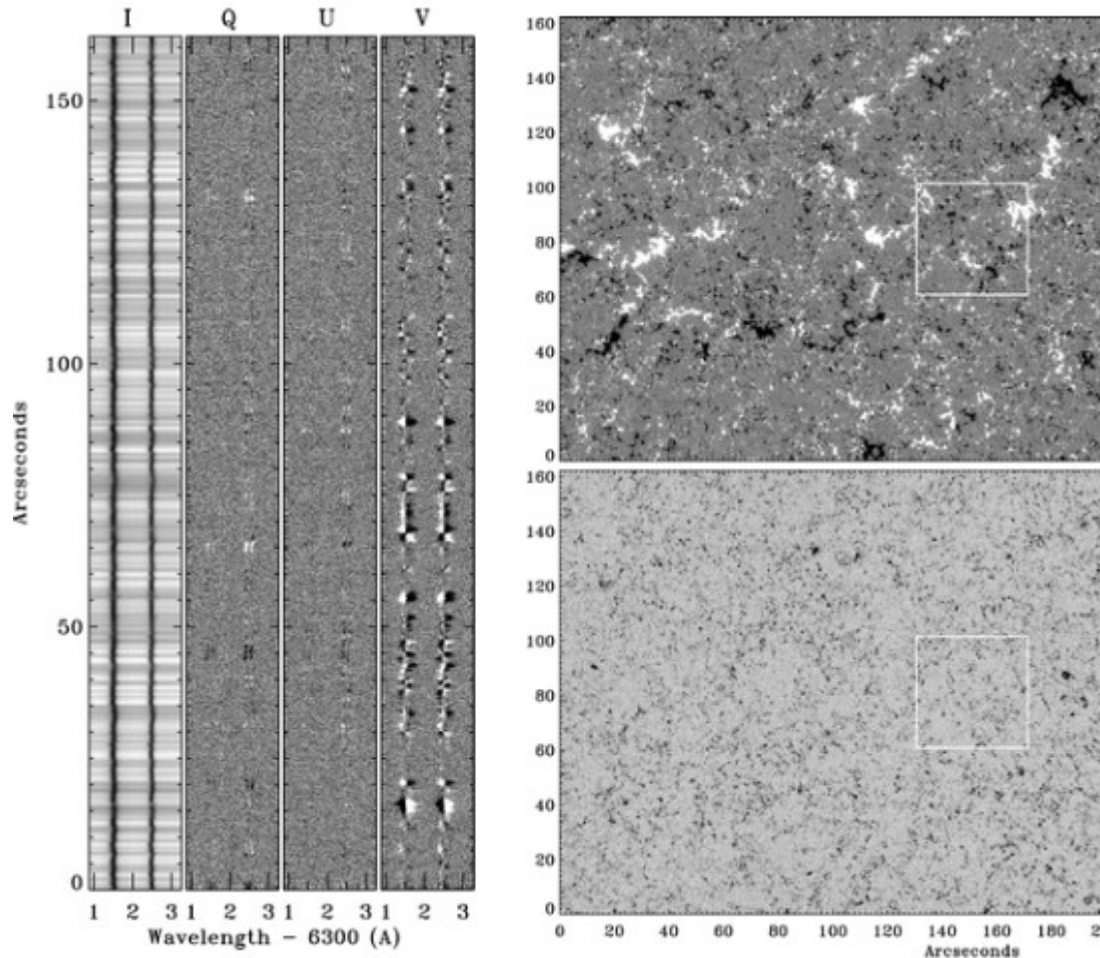
- Magnetna polja figurišu praktično svim argumentima za posmatranje Sunca: rekonekcija, zagrevanje korone, space weather, 11-godišnji ciklus...
- Već više od 100 godina znamo da na Suncu postoji magnetno polje (a po svemu sudeći, postojalo je i pre toga)



Credits: Yukio Katsukawa



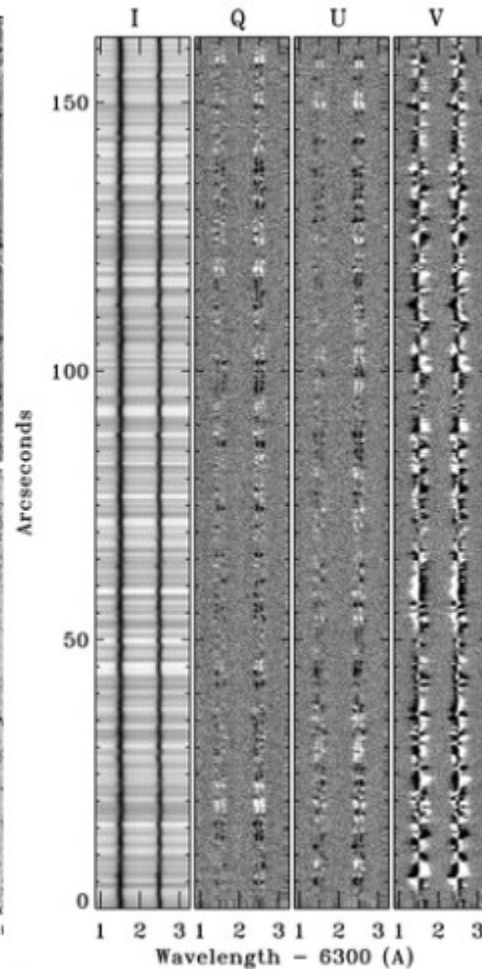
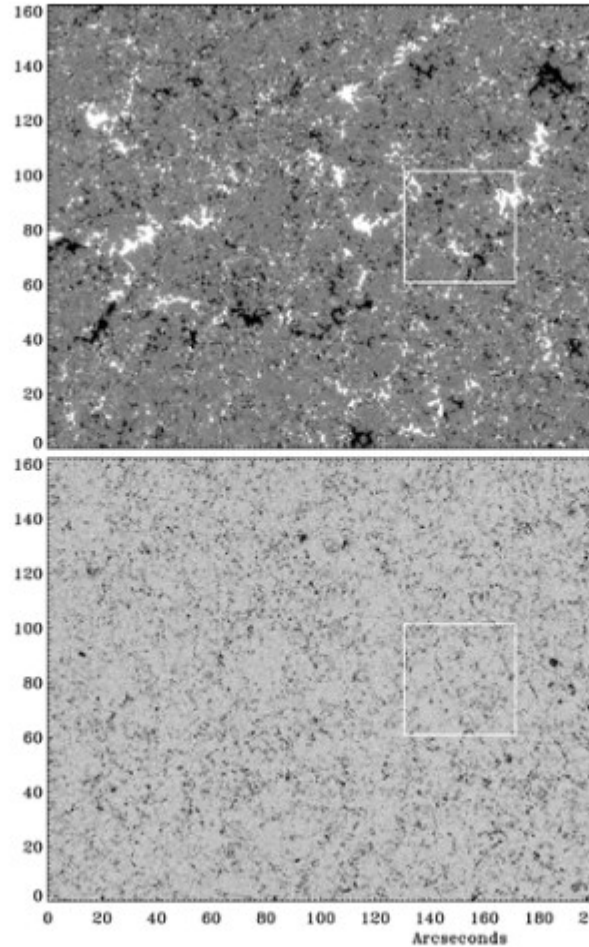
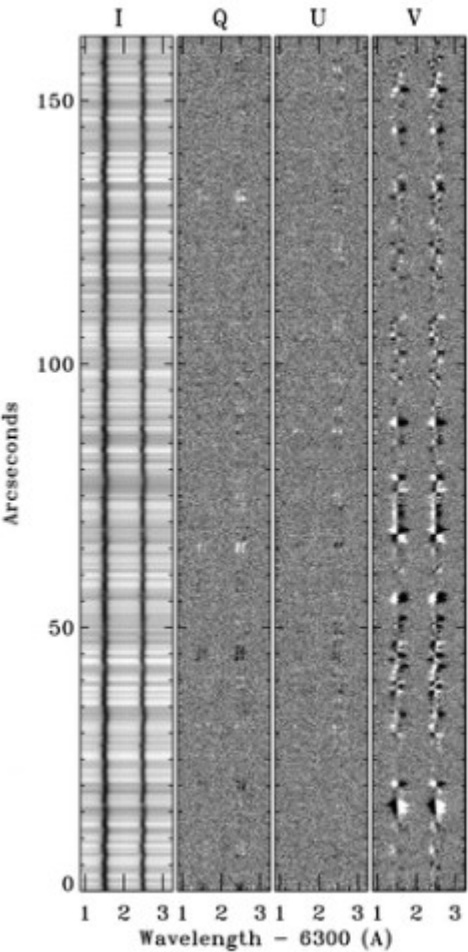
Problem #1: Slaba magnetna polja



- Ovo su posmatranja HINODE/SOT teleskopom (50 cm)
- Obilje kružne polarizacije (B u pravcu posmatrača), i tragovi linearne polarizacije (B normalno na pravac posmatrača)
- Za SNR ~ 1000 , dobijamo da je osetljivost 5 Gaussa u paralelnom i 100 Gaussa u normalnom magnetnom polju.
- Medjutim

Lites et al. (2008)

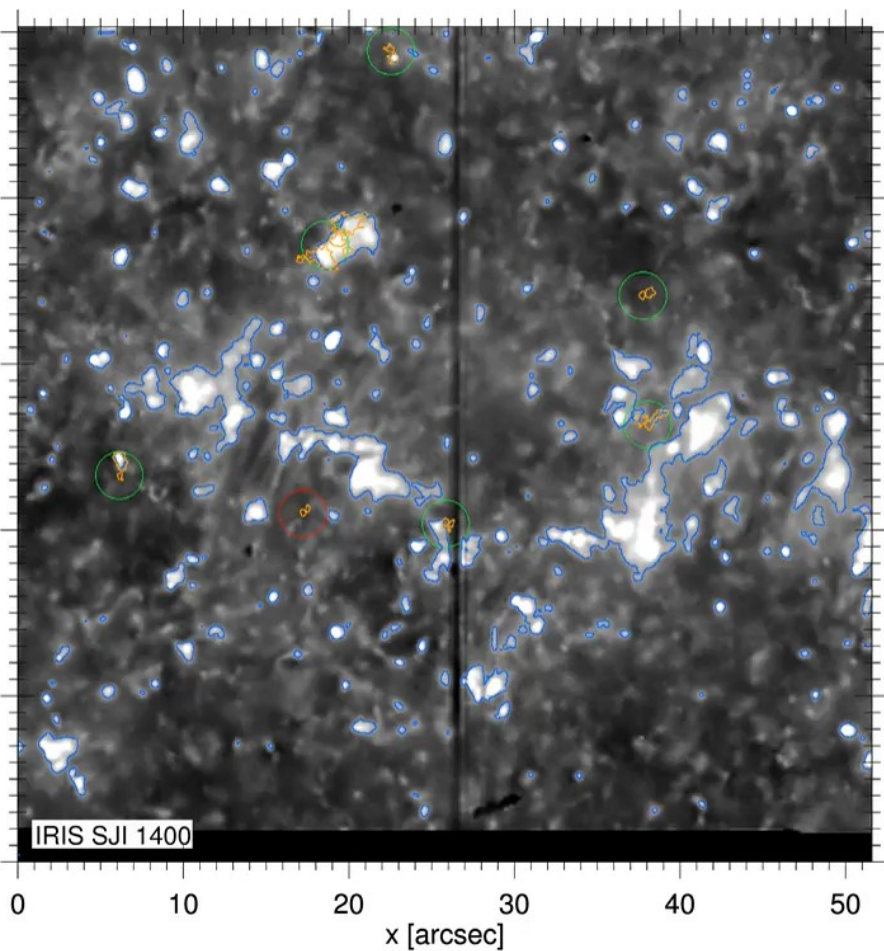
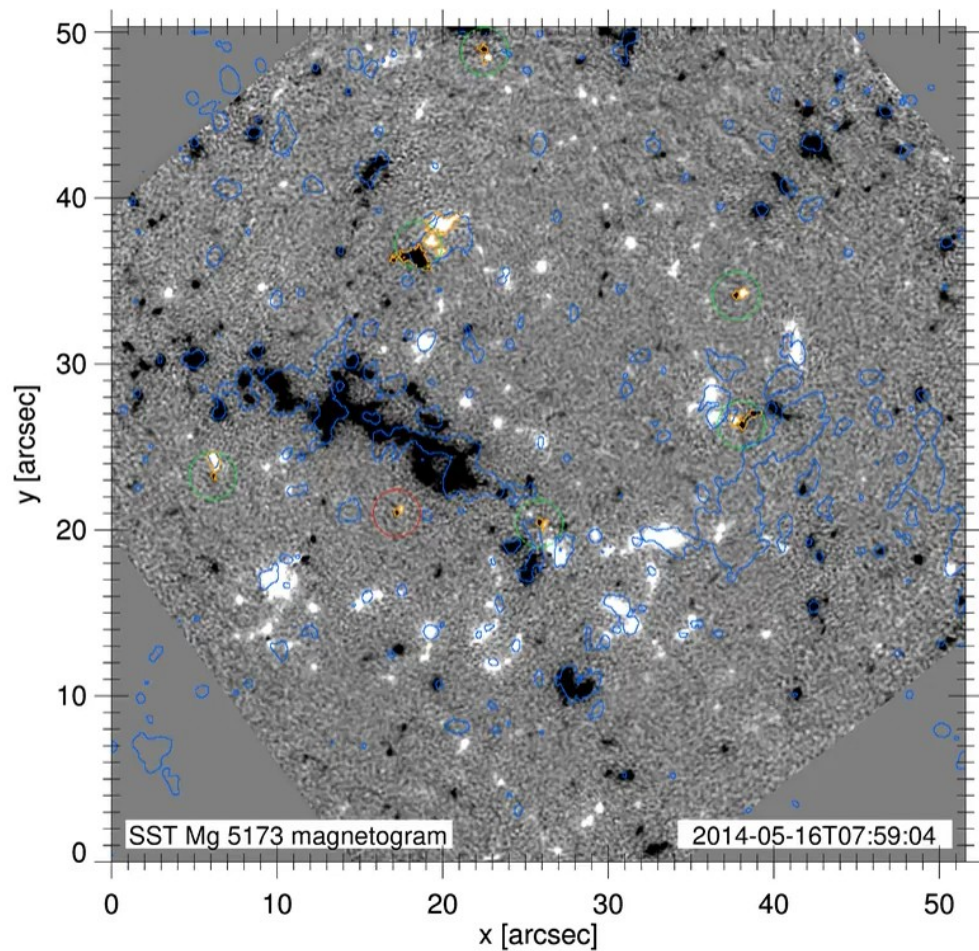
Problem #1: Slaba magnetna polja



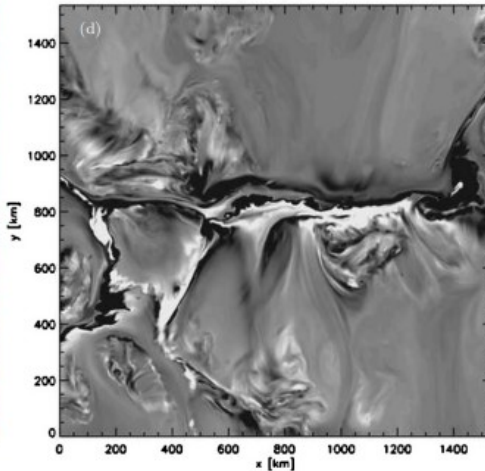
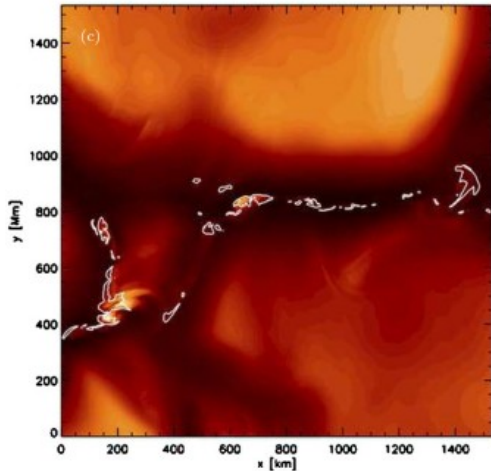
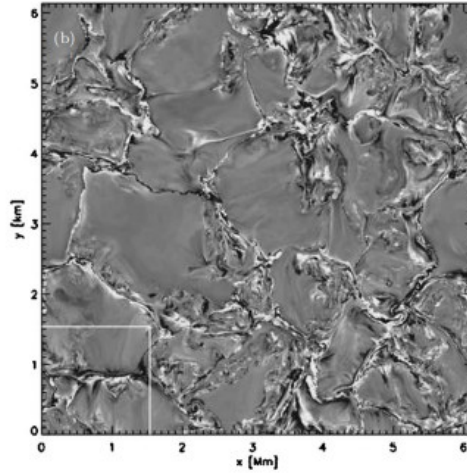
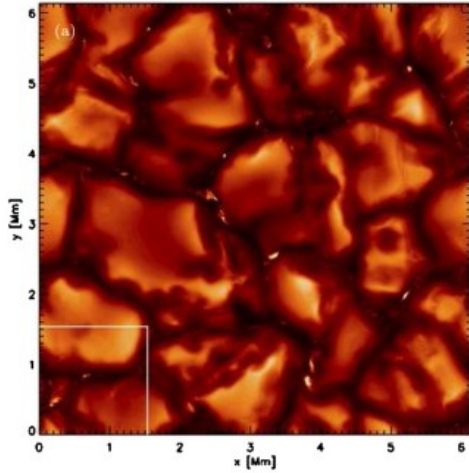
- SNR ~ 4 puta bolji
- Po cenu ekspozicije od 70s
- Odakle dolaze ova magnetna polja, kakva im je raspodela, i šta nam to govori o atmosferi?
- 70s je mnogo!

Lites et al. (2008)

Ako se setimo predavanja Milana Gošića (Gošić et al 2018)



Problem #2: Magnetna polja na malim skalama

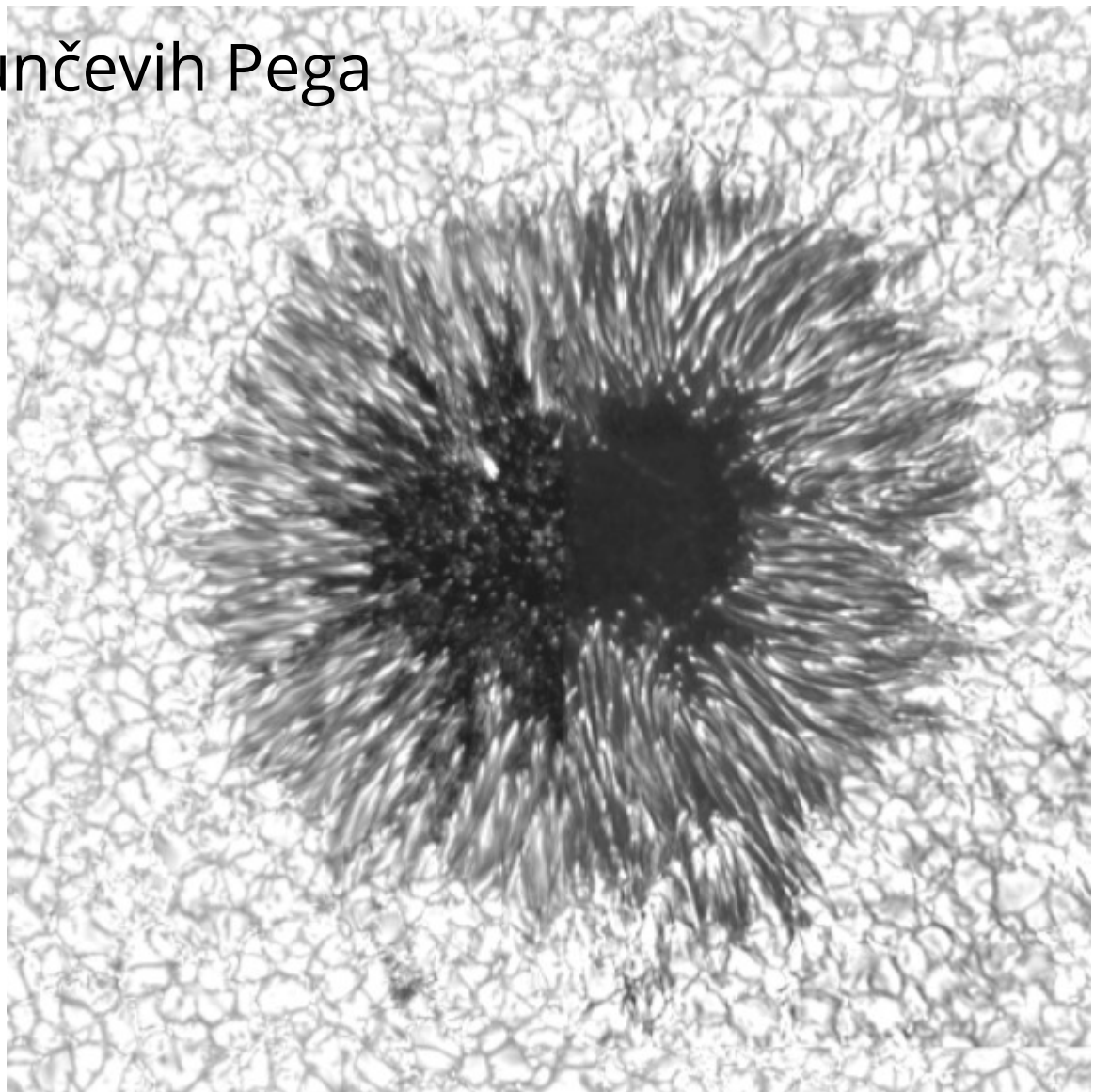


Rempel, 2014

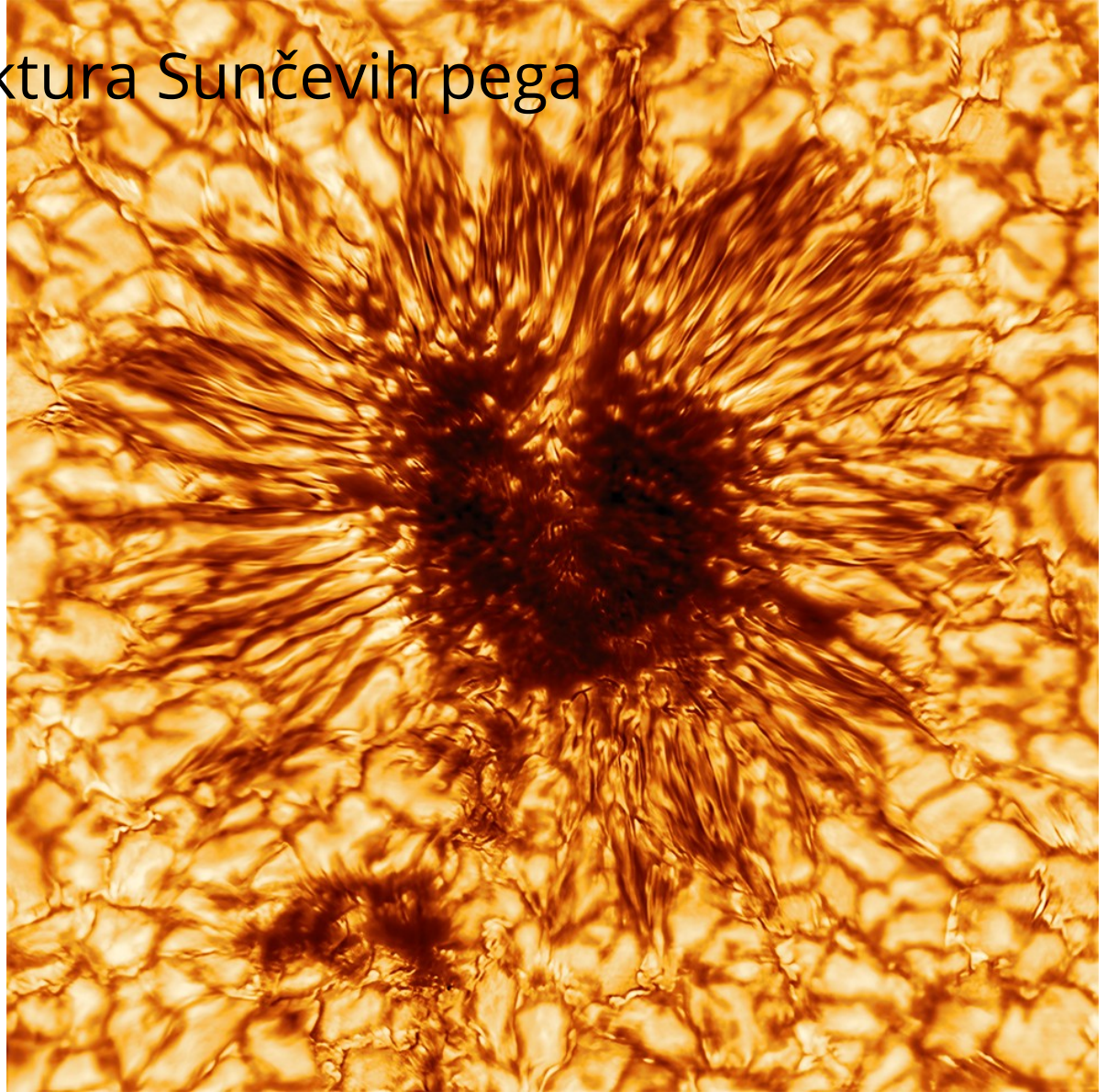
- Radijativno-Magnetohidrodinamičke simulacije predviđaju magnetna polja na jako malim skalama (tzv. Local dynamo)
- Magnetno polje nije unipolarno na ovim skalama. Zeemanov efekat bi se “pokratio”
- Potreban nam je instrument koji može da razluči ove skale
- Numerička rezolucija ovih simulacija je ~ 2 km, tako da je ova struktura “stvarna”

Problem #3: Fina struktura Sunčevih Pega

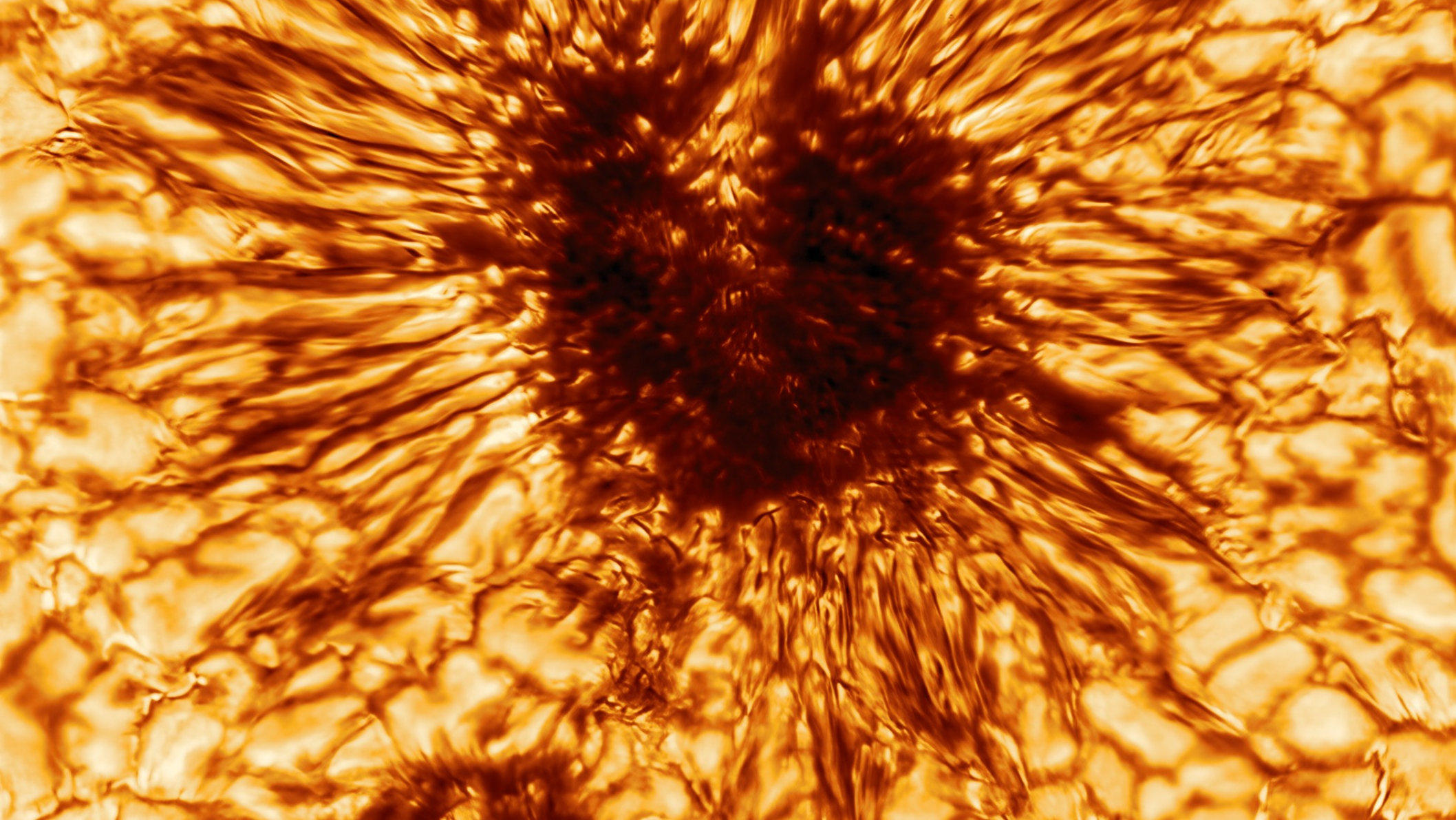
- Simulacije (Rempel 2011+), predviđaju jako male (70 km) svetle tačke u umbri.
- Posmatranja su ograničena razdvojnomoći, ali i kontrastom u odnosu na okolno Sunce
- Dosta prostora za unapredjenje!



Problem #3 Fina Struktura Sunčevih pega

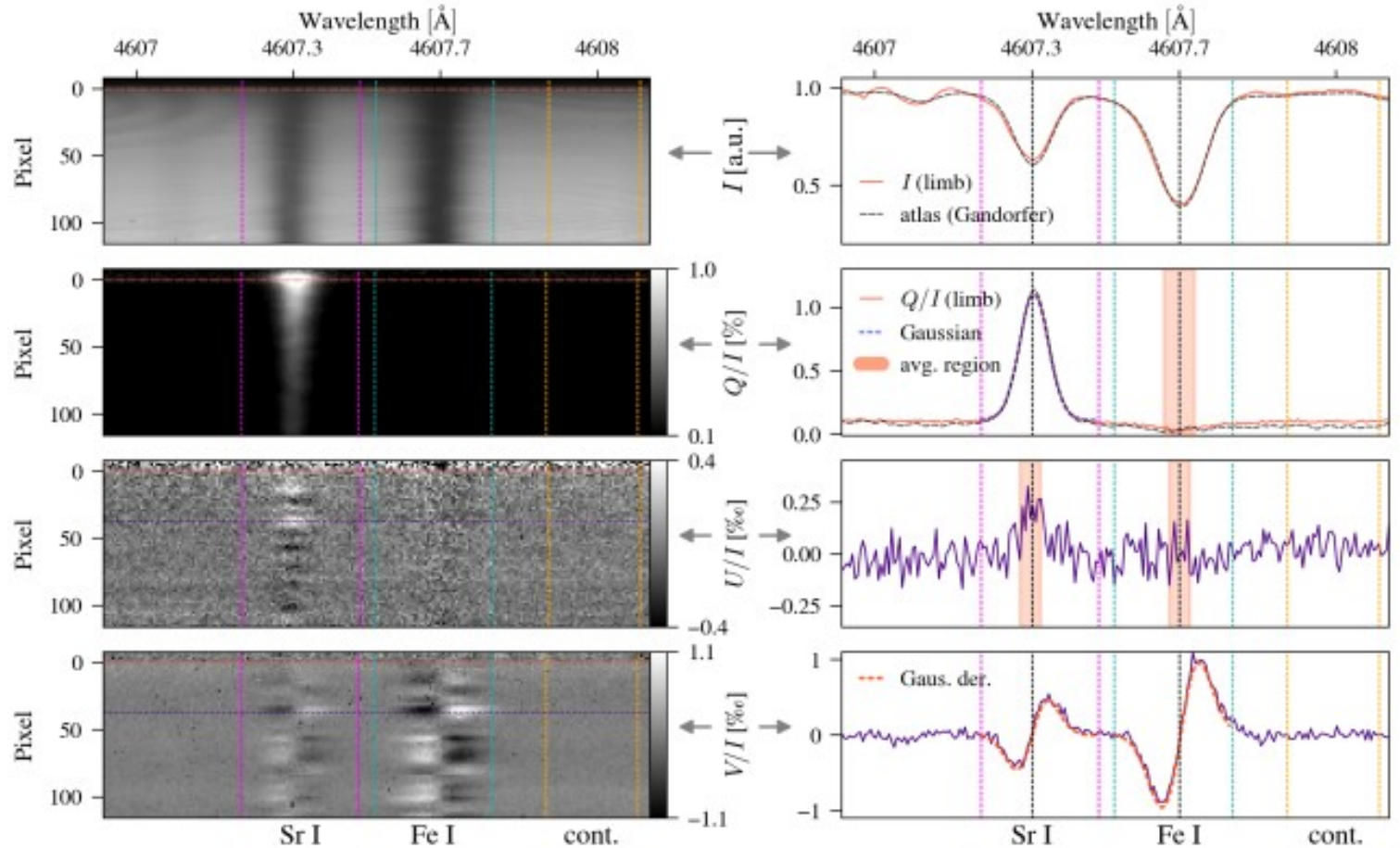


DKIST first light images. Credits:
AURA / NSF / NSO



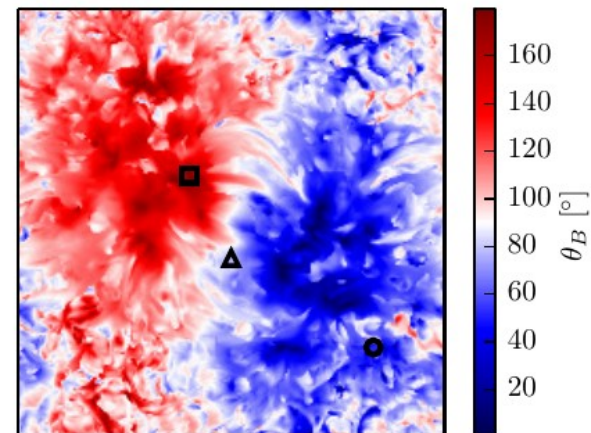
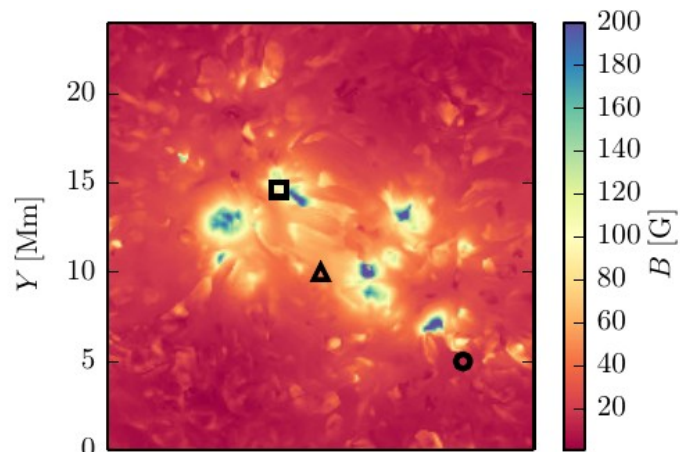
Problem #4: Hanle efekat na malim strukturama

Fundamentalno drugačiji proces u odnosu na Zemanov efekat. Možda još jedan put ka detekciji lokalnog dinamo-mehanizma

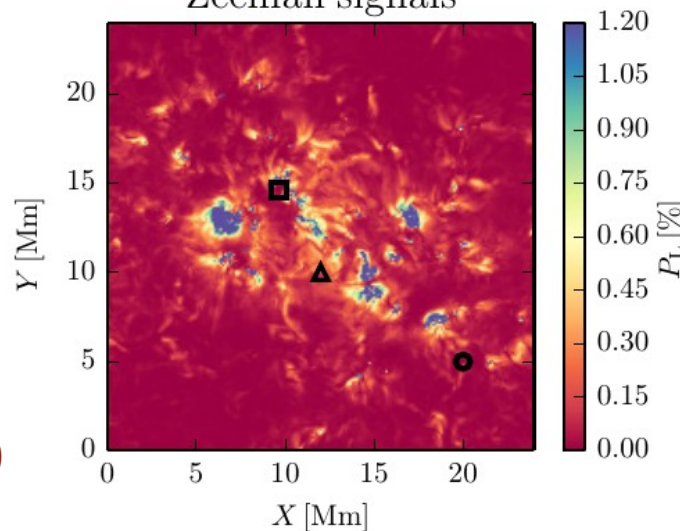


Problem #4: Hanle efekat na malim strukturama

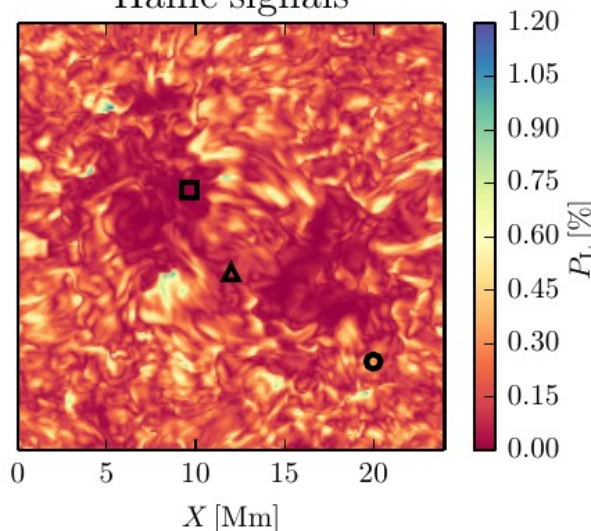
Ovo je nešto što još uvek nije posmatrano. ViSP i VTF su pravi kandidati da konačno vidimo mape linearne polarizacije usled Hanle efekta.



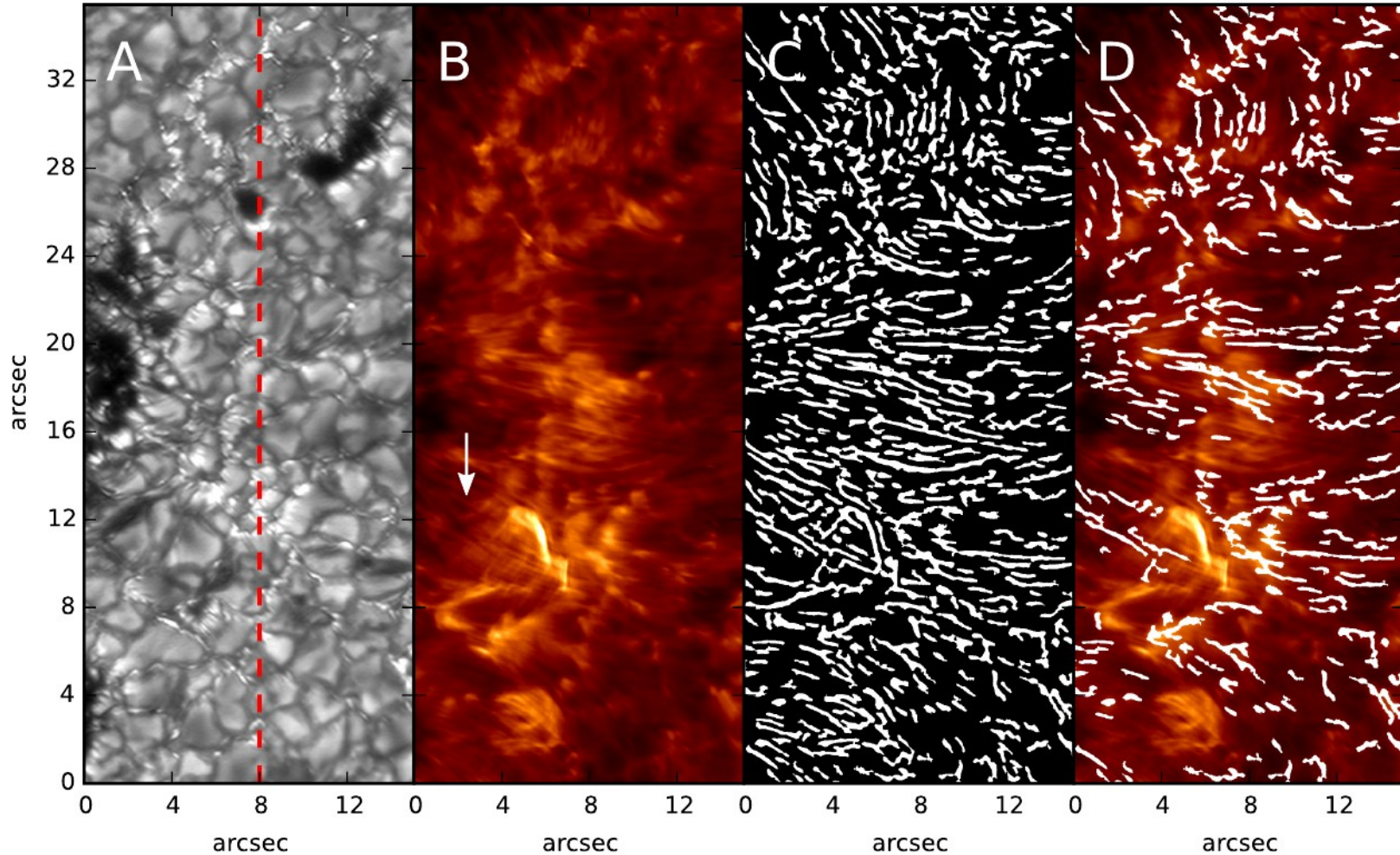
Zeeman signals



Hanle signals

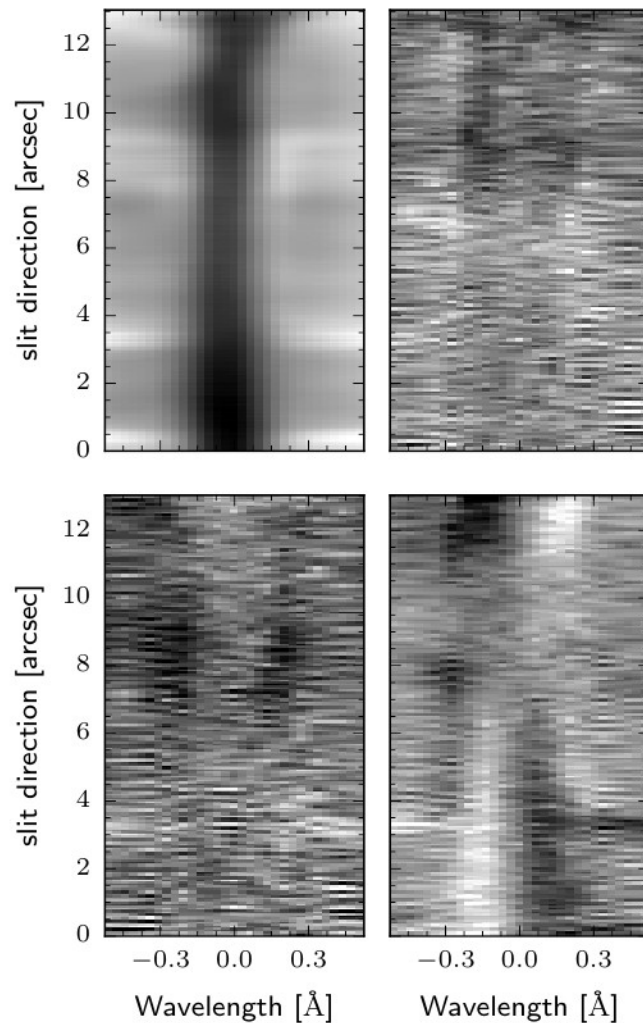
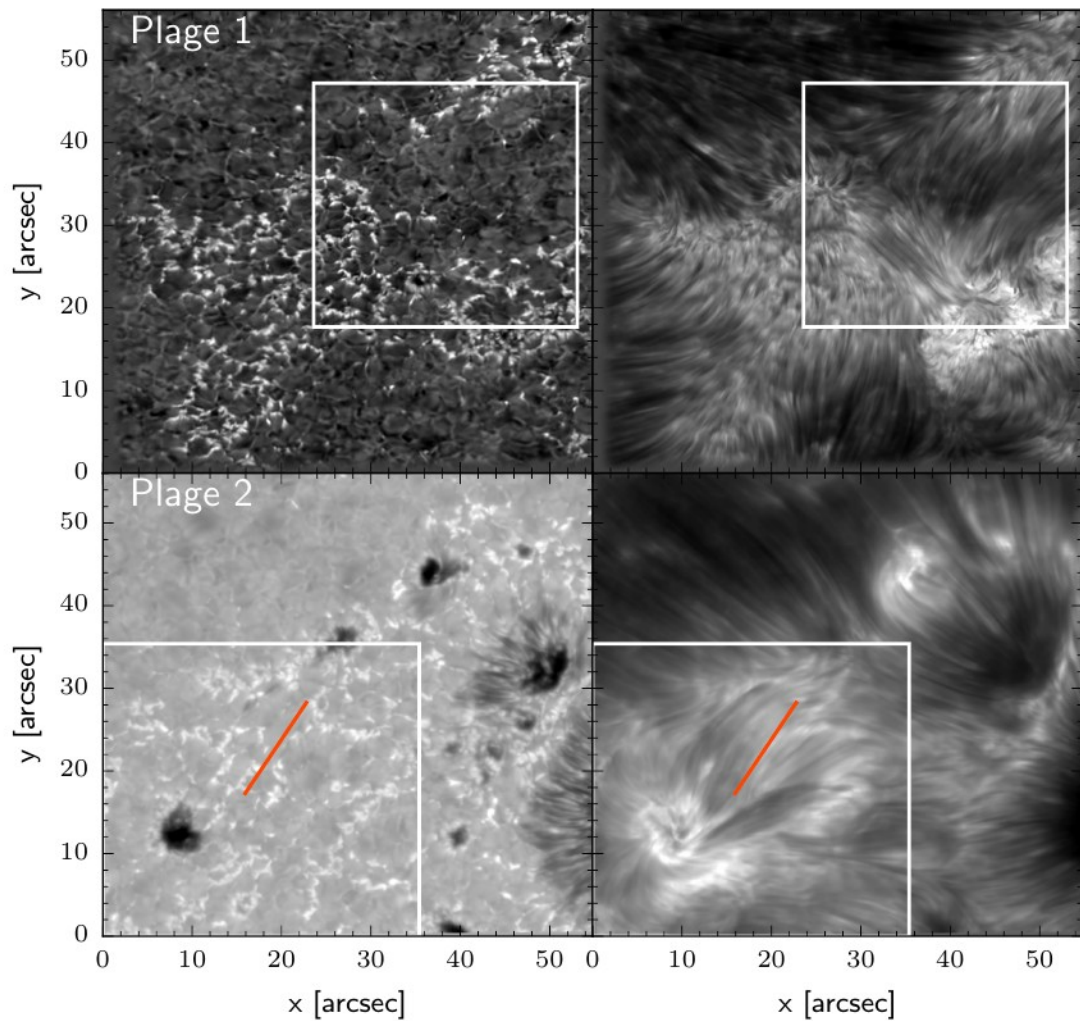


Problem #5: Struktura fibrila / spikula



Problem #5: Struktura fibrila / spikula

Asensio Ramos et al 2017

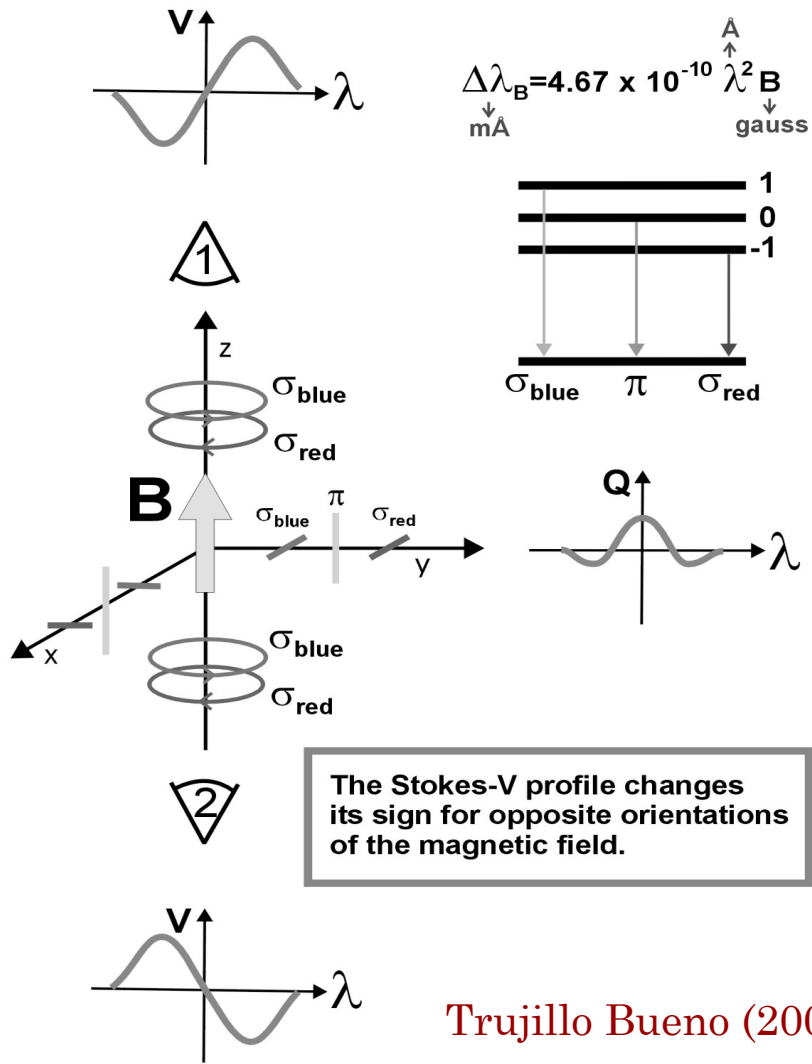


Glavna poruka

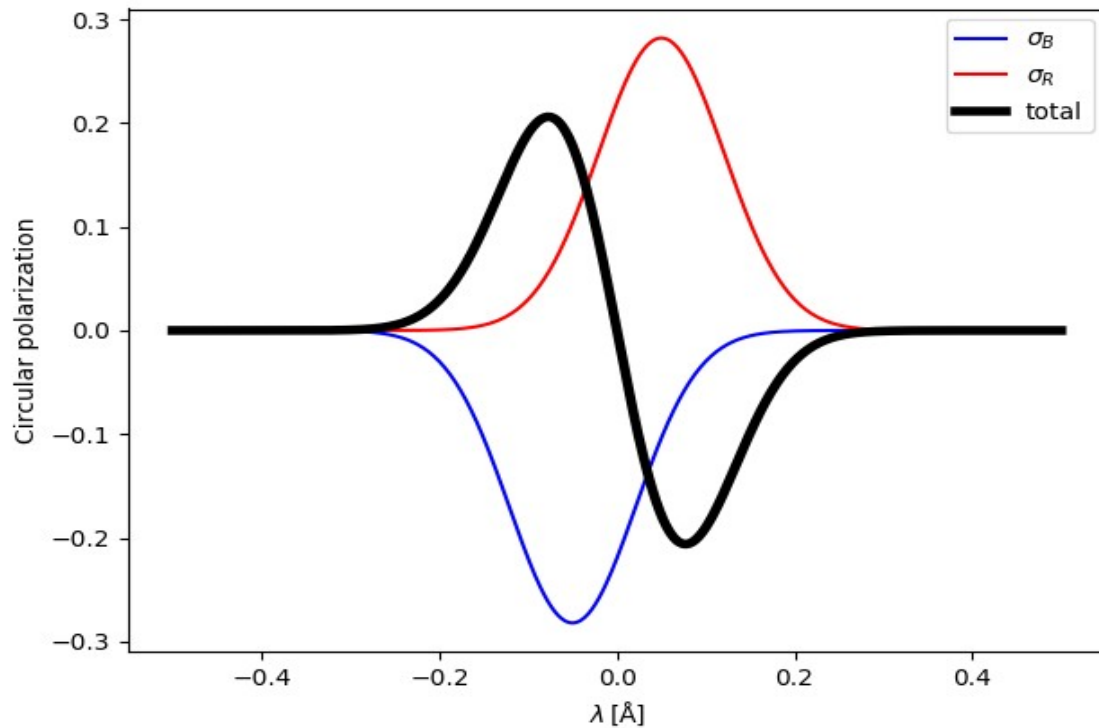
Želimo da posmatramo Sunce velikim teleskopom jer:

- Hoćemo da vidimo jako male stvari (male prostorne skale)
- Hoćemo da detektujemo jako male signale / male promene u signalima
- DKIST nam daje priliku da napredujemo na ovim frontovima (uz izvesne kompromise).
- Tema za istraživanje ima puno i u pitanju je fascinantna spoj teorijske (astro) fizike i posmatračkih disciplina
- Pitanja? Komentari? Kritike?

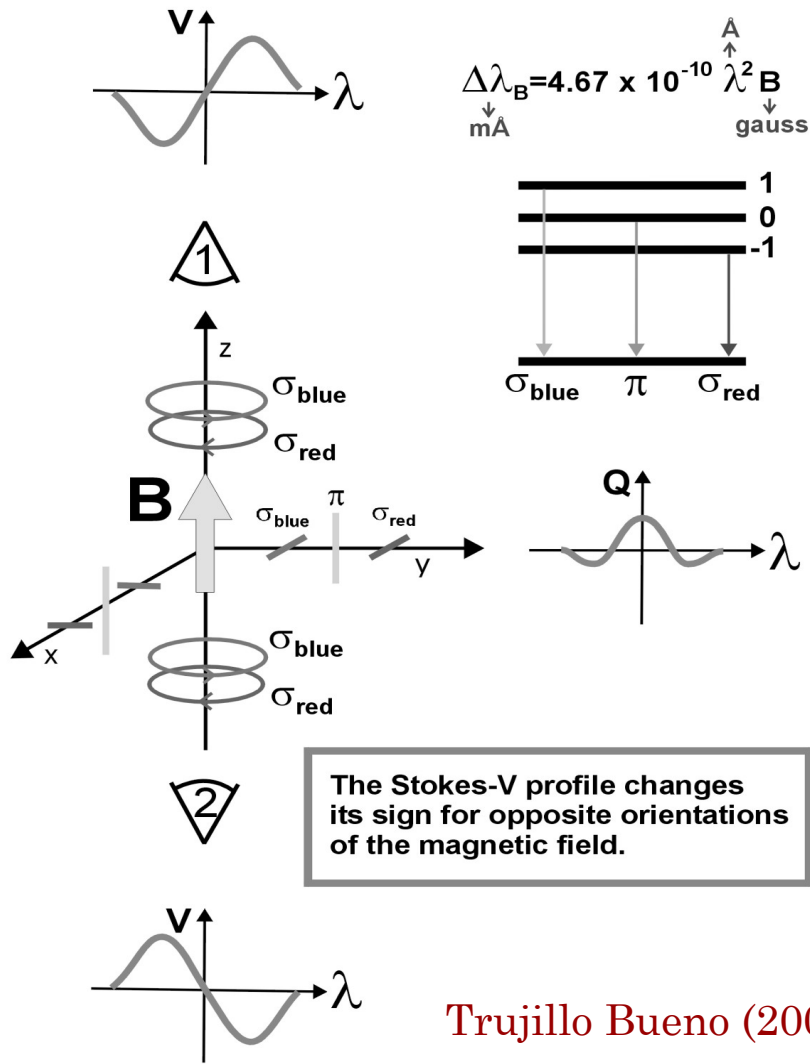
The Zeeman Effect



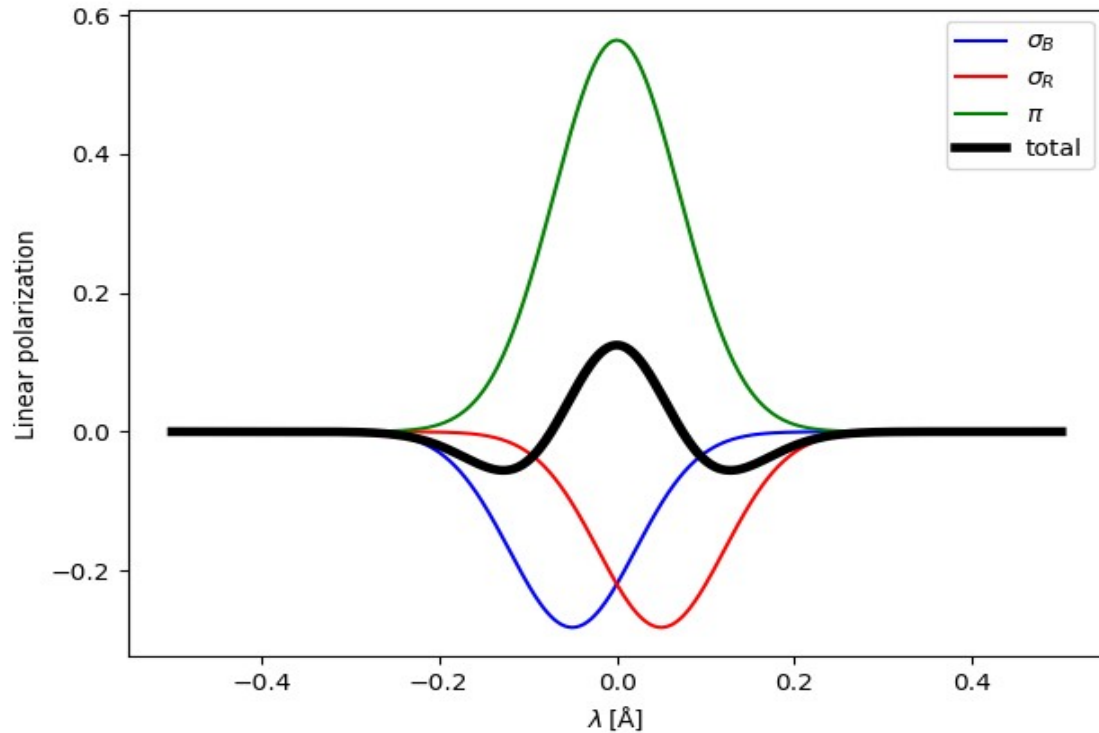
Otkud polarizacija?



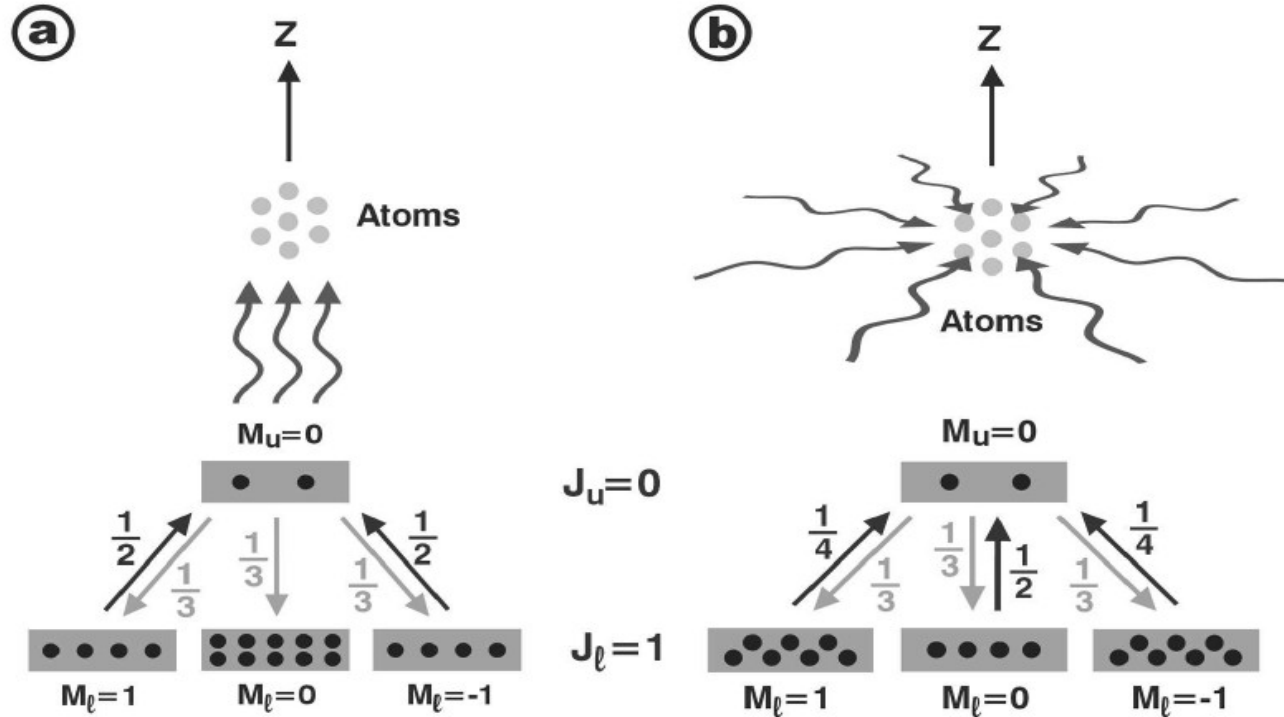
The Zeeman Effect



Otkud polarizacija?



Polarizacija rasejanjem u spektralnim linijama



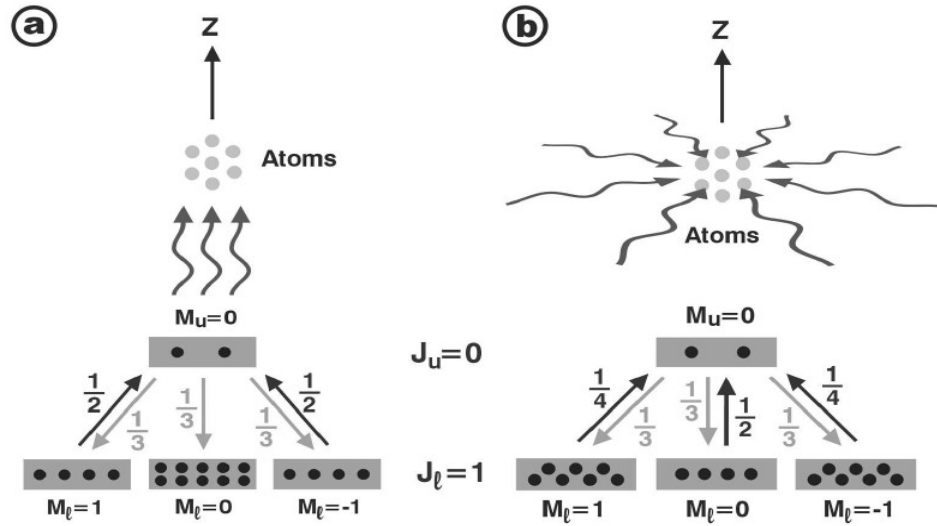
Selektivna apsorpcija

Nejednake populacije ovih podnivoa dovode do tzv. polarizacije atomskih nivoa

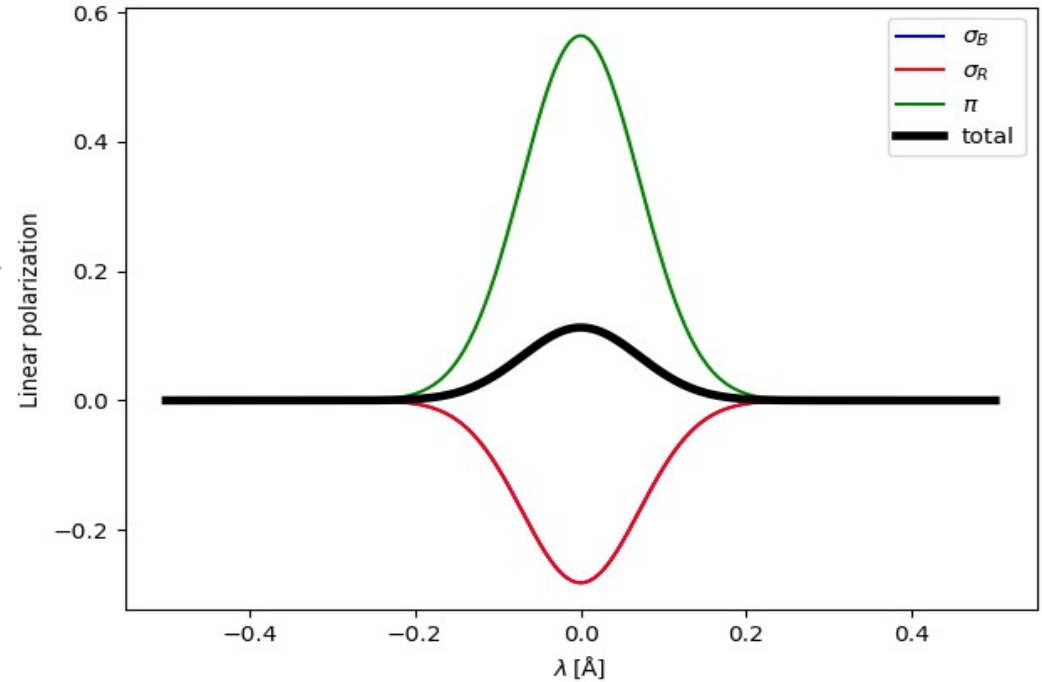
Koja dovodi do polarizacije emitovane svetlosti

from Trujillo Bueno (2003)

Polarizacija rasejanjem, analogija sa Zemanovim efektom

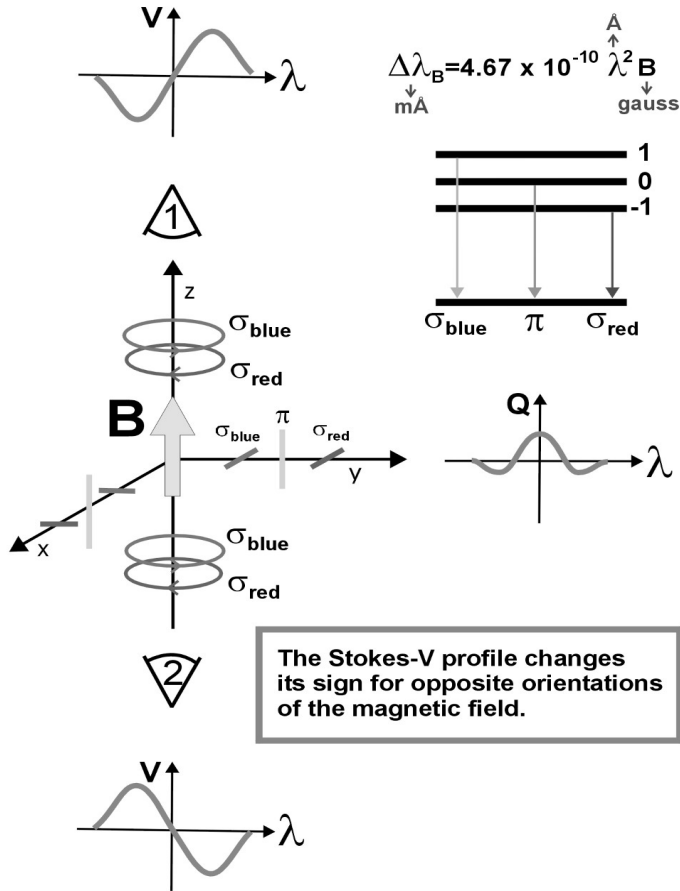


from Trujillo Bueno (2003)



Situacija je naravno malo komplikovanija

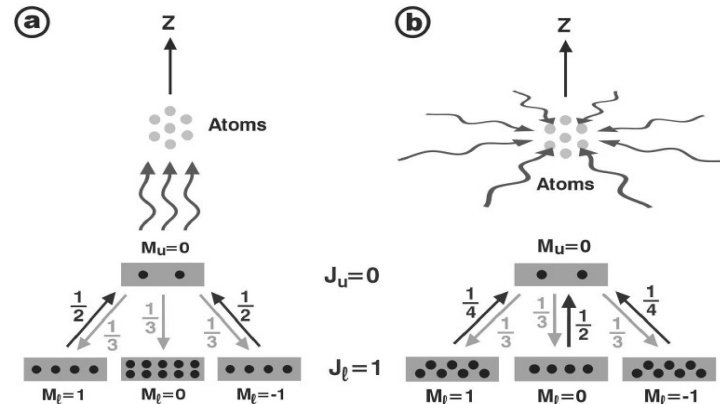
The Zeeman Effect



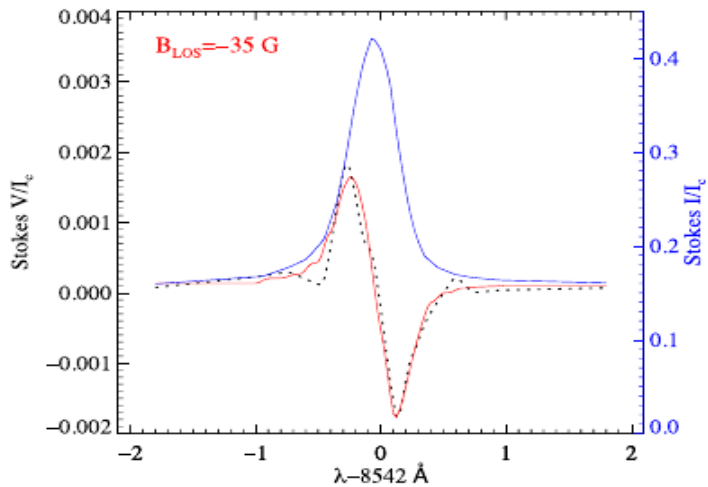
Trujillo Bueno (2006)

Potrebno je rešiti jednačinu prenosa polarizovanog zračenja

$$\frac{d}{dz} \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \eta_I & \eta_Q & \eta_U & \eta_V \\ \eta_Q & \eta_I & -\rho_V & -\rho_U \\ \eta_U & -\rho_V & \eta_I & \rho_Q \\ \eta_V & \rho_U & -\rho_Q & \eta_I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I - S \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix}$$



Fensi teme – magnetna polja i koronalnim petljama



Izgleda da su ta magnetna polja i 10 puta jača od onoga što smo očekivali

Kuridze et al. (2019)

