



HAVAITSEVAN TÄHTITIETEEN PK I

SPEKTROMETRIA

Syksy 2024

Thomas Hackman



10. SPEKTROMETRIA

- Sisältö:
 - Peruskäsitteet
 - Spektrometrian käyttö tähtitieteessä
 - Spektrometrin rakenne
 - Spektrin redusointi
 - Spektropolarimetria



10.1 SPEKTROMETRIA: DISPERSIO

- Mitataan kohteen vuontiheyden aallonpituusjakauma F_λ
- Valo hajotetaan dispersioelementillä
- Dispersiokäyrä: $\lambda = \ell(s)$,
 - jossa s on kuvatun spektrin aallonpituusakseli pikseleissä (tai mm:ssä)
 - ℓ :nä käytetään yleensä polynomi
 - Jos lineaarinen approksimaatio on tarpeeksi hyvä
 $\Rightarrow \lambda = Ds$, jossa D on lineaarinen dispersio





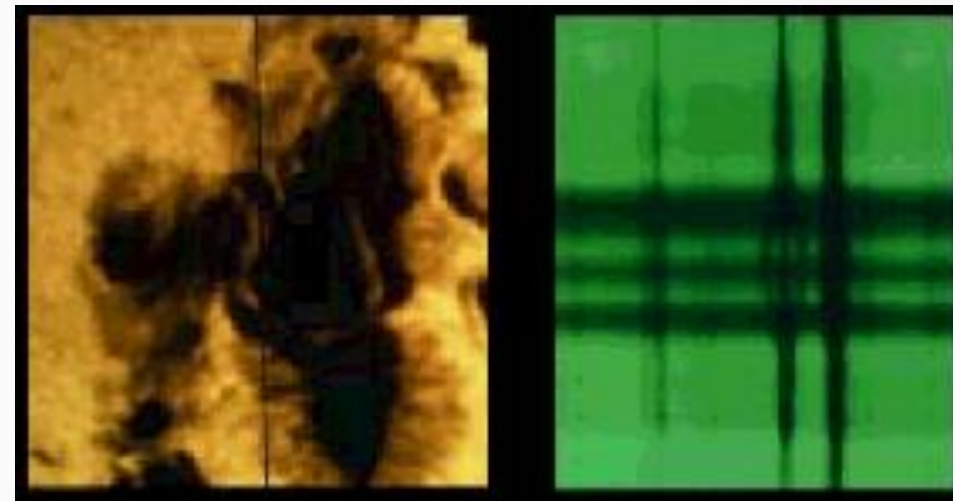
10.2. SPEKTROMETRIA: EROTUSKYKY

- Spektrometrin erotuskyky: $R = \lambda / \Delta\lambda$
 - Matala resoluutio $R \sim 100 - 1000$:
 - Voidaan tutkia himmeämpiä kohteita
 - Laajempi spektrialue samaan kuvaan
 - Useamman kohteen spektri samaan kuvakenttään
 - Mahdollista tehdä absoluuttista *spektrofotometriaa*
 - Korkean resoluutio $R \sim 20\,000 - 1\,000\,000$:
 - Spektrin yksityiskohdat näkyviin
 - Mahdollistaa esim. suuren tarkkuuden säteisnopeusmittaukset



10.3 SPEKTROMETRIAN KÄYTTÖ

- Doppler-effekti:
 - Säteismoisuus
 - Pyöriminen
 - Turbulenssi
- Spektriviivat:
 - Alkuainepitoisuudet
 - Lämpötila
 - Paine ja tiheys
 - Magneettikentät



Zeemanin ilmiö auringonpilkun spektrissä



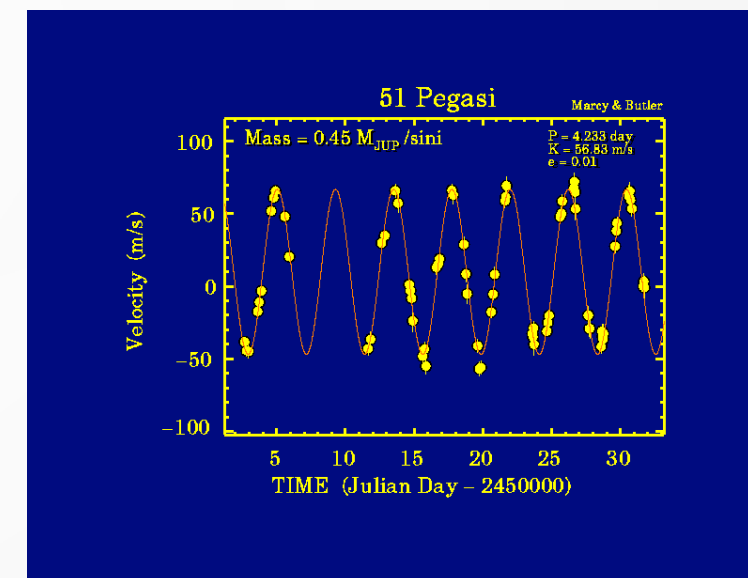
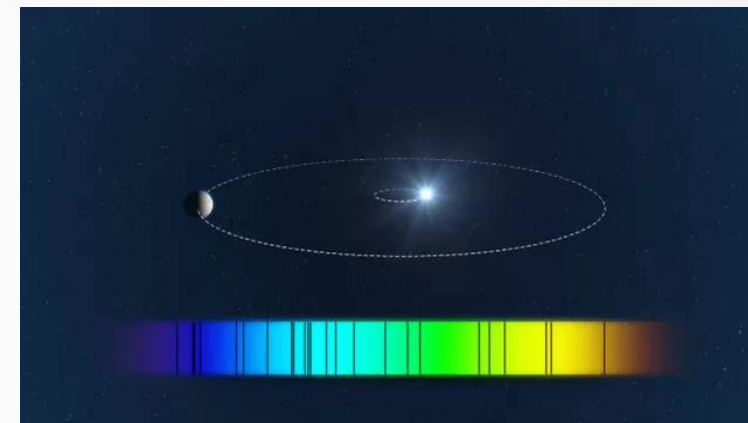
10.3 SPEKTROMETRIAN KÄYTTÖ TÄHTITIEESSÄ

- Doppler-siirtymä $\mapsto$ kohteen radiaalinopeus
 - **Kosmologia:** Esim. maailmankaikkeuden laajeneminen
 - **Galaksit:** Galaksijoukkojen dynamiikka $\mapsto$ pimeän aineen määrä
 - **Tähtipopulaatiot:** Tähtijoukot, tähtien ominaisliikkeet
 - **Taivaanmekaniikka:** Kaksoistähdet, eksoplaneetat
 - **Tähtien rakenne:** Tähtien pyöriminen, tähden fotosfäärien sykkiminen ja turbulenssi



10.4 TÄHTI-PLANEETTAJÄRJESTELMÄT

- Eksoplaneettojen havaitsemiseen säteisnopeusmenetelmällä:
 - Planeetta ja tähti kiertävät radoillaan yhteistä massakeskipistettä
 - Planeettaa ei nähdä, tähden säteisliike voidaan havaita
 - Ensimmäinen löytö: 51 Peg b (1995)
 - Säteisnopeusmenetelmällä on havaittu n. 1300 eksoplaneettaa (11/2024)





10.4 EKSOPLANEETAN MASSA JA RATA

- Oletetaan ympyrärata
 - Tähti: m_1, a_1
 - Planeetta: m_2, a_2
- Havaitaan jaksottainen Dopplersiirtymä, jonka amplitudi on

$$\Delta\lambda \Rightarrow v_r = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} c$$

- Periodista P saadaan kulmanopeus $P \Rightarrow n = \frac{2\pi}{P}$
- $\Rightarrow$ tähden radalle saamme projisoidun isoakselin puolikkaan:
$$a_1 \sin i = \frac{v_r}{n}$$



10.4 EKSOPLANEETTA (JATK.)

- Merkitään $a = a_1 + a_2 \Rightarrow$
- Kepler III:

$$a^3 = (m_1 + m_2)P^2, [a] = \text{AU}, [m_{1,2}] = M_{\odot}, [P] = \text{vuosi}$$

$$m_1 a_1 = m_2 a_2 \Rightarrow a_1^3 = \frac{m_2^3}{(m_1 + m_2)^2} P^2$$

$$m_2 \ll m_1 \Rightarrow m_2 \approx a_1 \left(\frac{m_1}{P} \right)^{\frac{2}{3}}$$



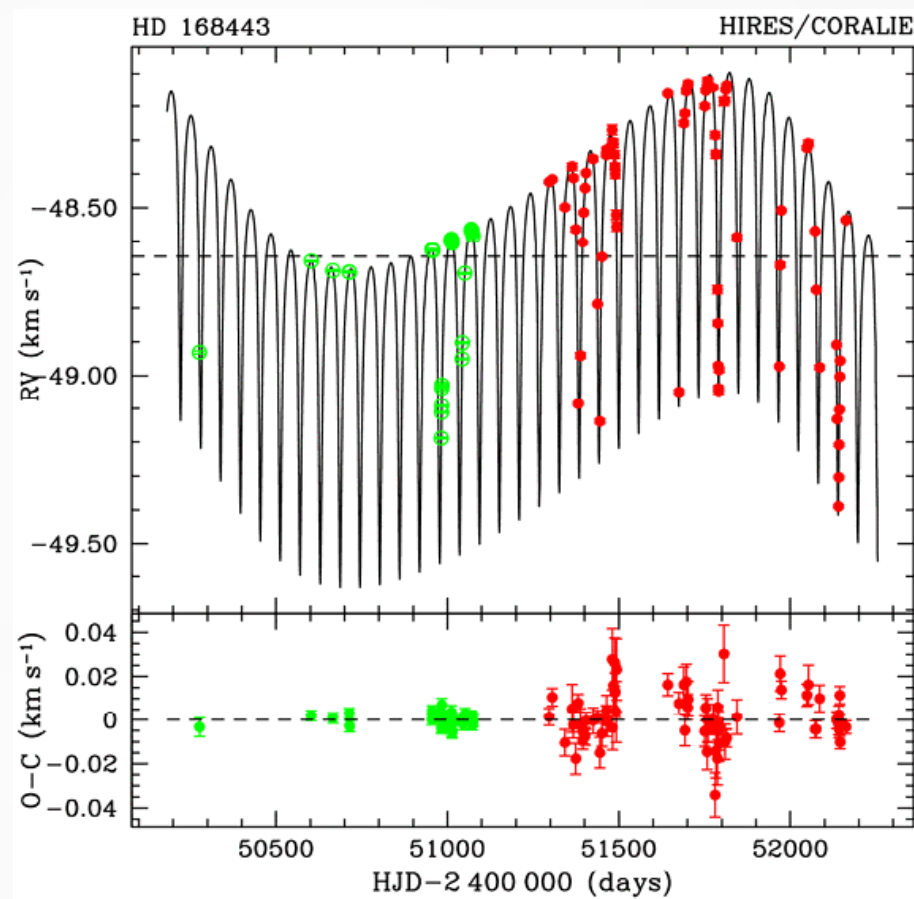
10.4 EKSOPLANEETTA (JATK.)

- Tähten massa saadaan esim. HR-diagrammasta + tähtimalleista
- Havainnoista saadaan säteismoisuus, joka on projektio rataliikkeestä
- Saamme siis alarajat massalle ja radalle:
 $a_2 \sin i$ ja $m_2 \sin i$, jossa i on ratatason inklinaation
- Jossain tapauksissa i voidaan arvioida: Esim. ylikulku



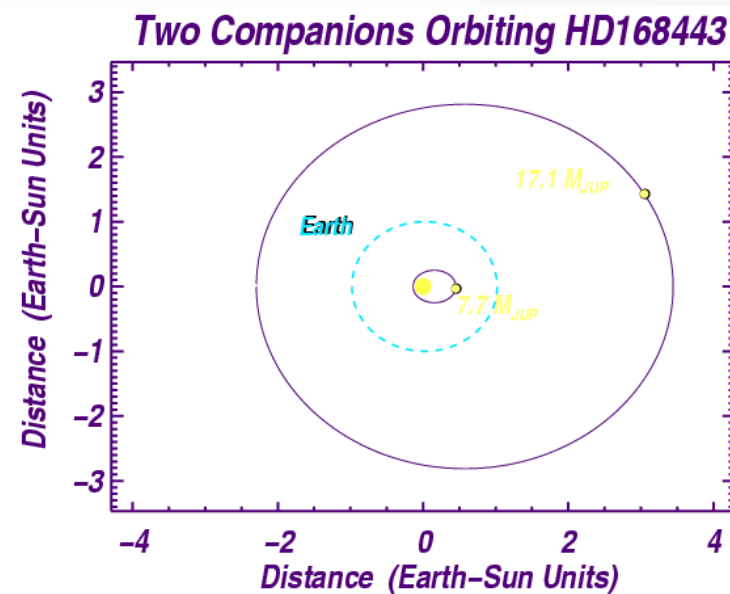
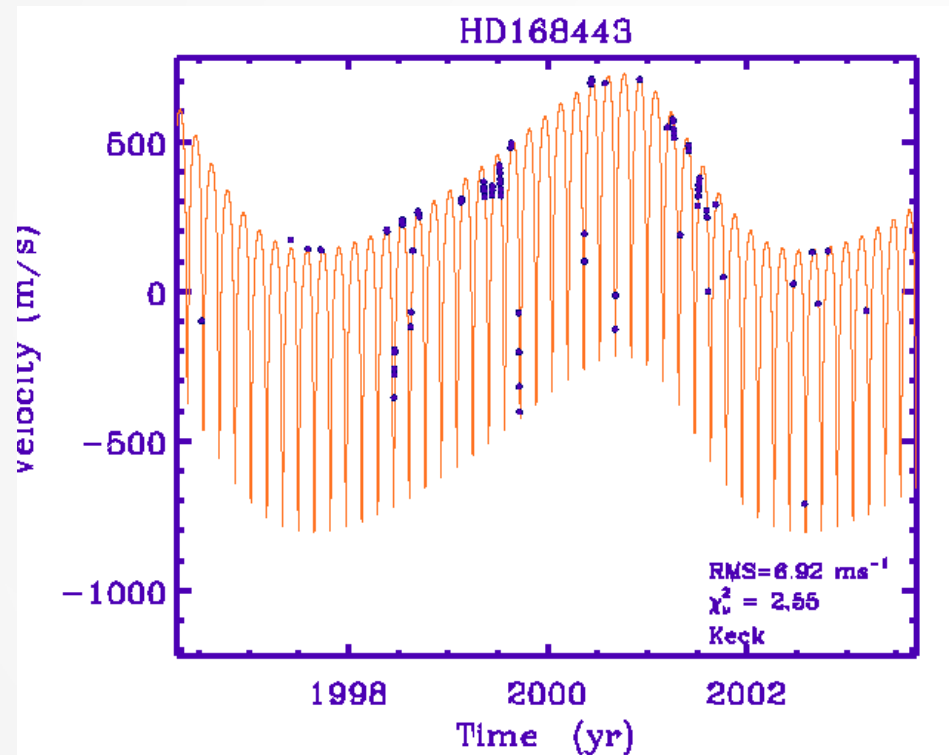
EKSOPLANEETAT: TEHTÄVÄ

- Mitä johtopäätöksiä tähti-planeetta-järjestelmästä voidaan tehdä tämän säteisnopeuskäyrän perusteella?





HD 168443:N JÄRJESTELMÄ

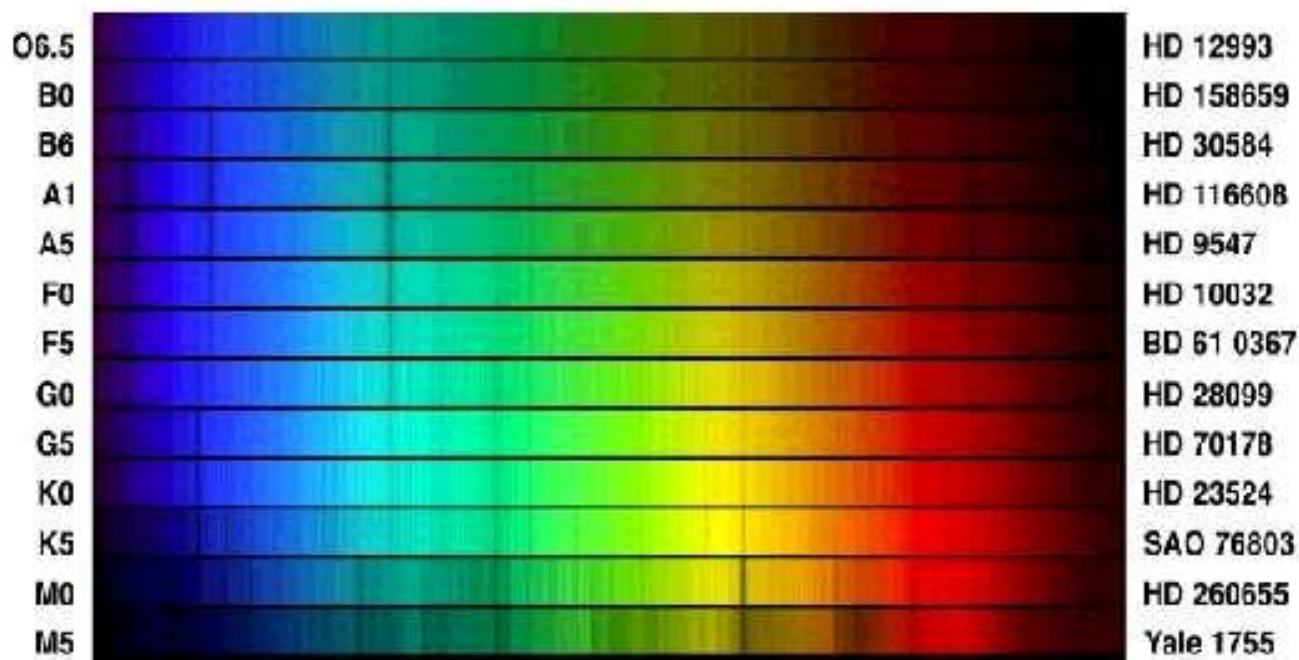


California and Carnegie Planet search



10.5 TÄHTIEN SPEKTRILUOKITUS

- Harvardin spektriluokittelu: O,B,A,F,G,K,M (pinta T_{eff})
 - Ruskeat kääpiöt: L, T, Y
- Yerkesin spektriluokittelu: Ia, Ib,II,III,IV,V,VI,VII (luminositeetti)
- Spektriluokitus perustuu matalaan resoluutioon



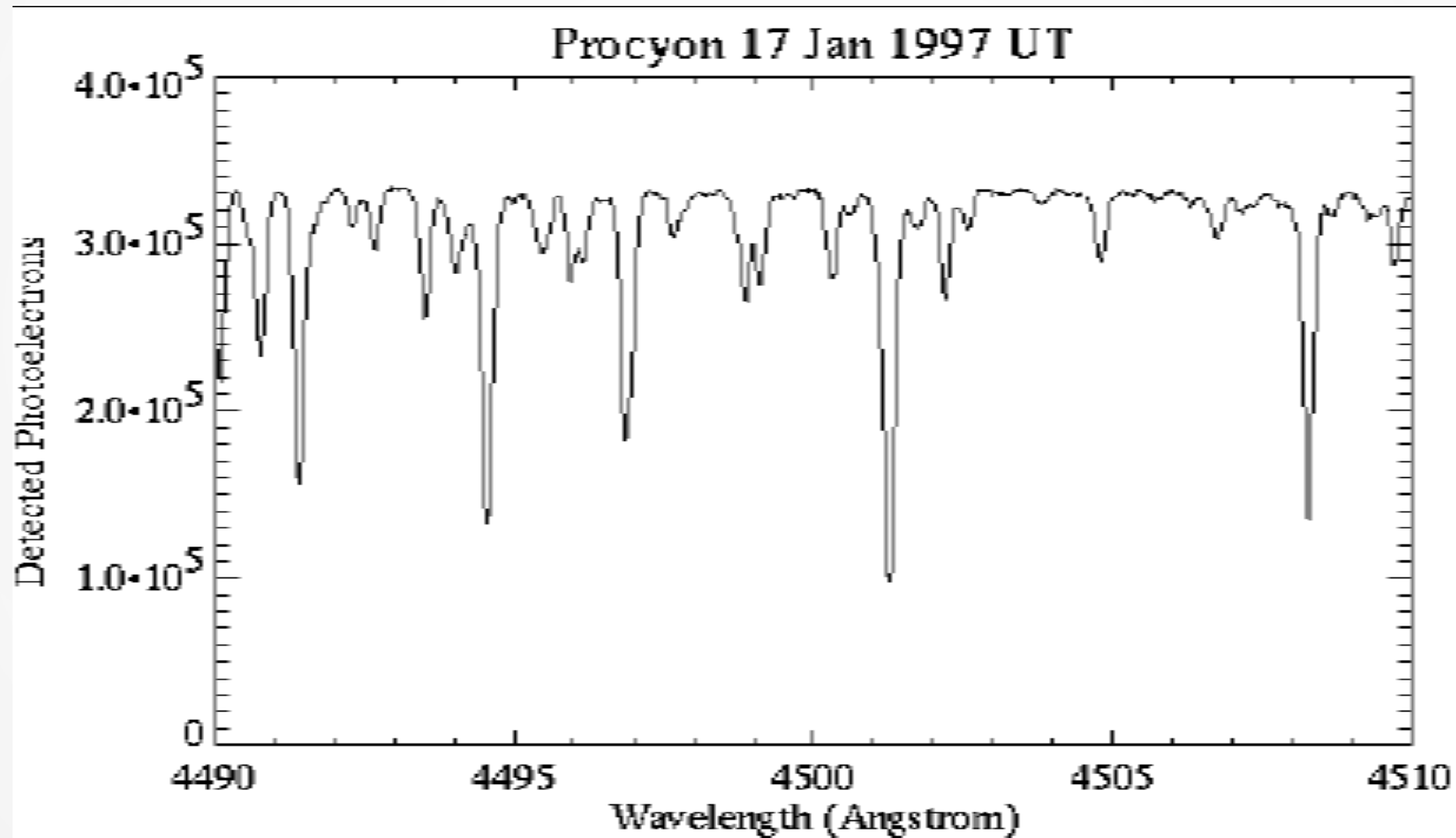


10.6 TÄHTIEN FOTOSFÄÄRIT

- Tähden optisen alueen absorptioviivat syntyvät fotosfäärissä
- Optisen spektroskopian avulla pystytään selvittämään tähden fotosfäärin
 - **Lämpötila** (T_{eff})
 - **Paine** $\Leftrightarrow$ pintagravitaation $\log g$
 - **Magneettikenttä $\mathbf{B}$**
 - **Alkuaine- ja molekyyliipitoisuudet**
 - **Kaasun liikkeet, esim. pyöriminen, turbulenssi ja värähtelyt**



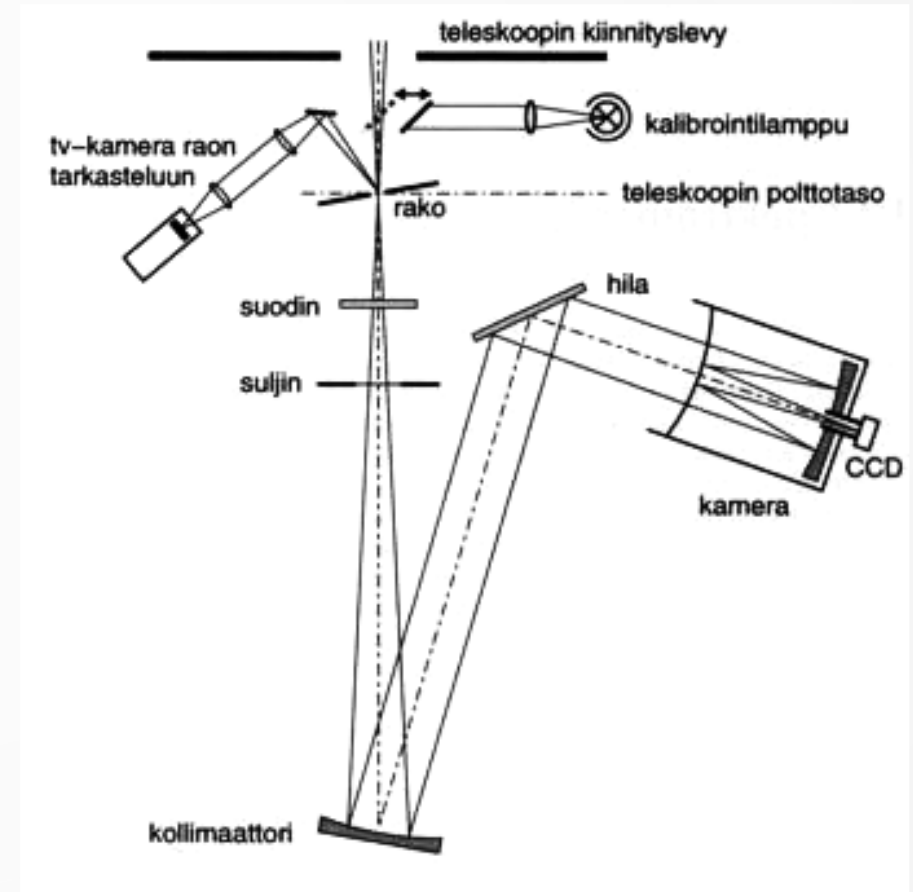
10.6 PROCYONIN SPEKTRI





10.7 SPEKTROMETRIN RAKENNE

- Rako
- Kollimaattori
- Dispersioelementti:
 - *Hila*
 - *Prisma*
 - *Grism*, ym.
- Kamera





10.7.1 SPEKTROMETRIN RAKO

- Kohteen kuva fokusoidaan rakoon
- Rako rajaa kuvakentästä tutkittavan kohteen:
 - *Long slit* => spektri leveältä suikaleelta kuvakenttää, esim. kohde + tausta tai läpileikkaus pintakohteesta
- Raon leveys:
 - Havaittu spektri on ”kuva” raosta eri aallonpituuksilla
 - Kapeampi rako => parempi resoluutio
 - Liian kapea rako => suuri osa kohteen valosta rajataan pois
 - Eli: Rako optimoidaan olosuhteisiin ja haluttuun resoluutioon
- Valokuidun pää voi toimia rakona
- *Raoton spektrografi*: Jokaisesta kuvakentän kohteesta spektri



10.7.2 KOLLIMAATTORI

- Tuottaa yhdensuuntaisen valosädekimpun dispersiivistä elementtiä varten
- Peili tai linssi
 - Yleensä peili, sillä linssit absorboivat säteilyä (erit. UV)

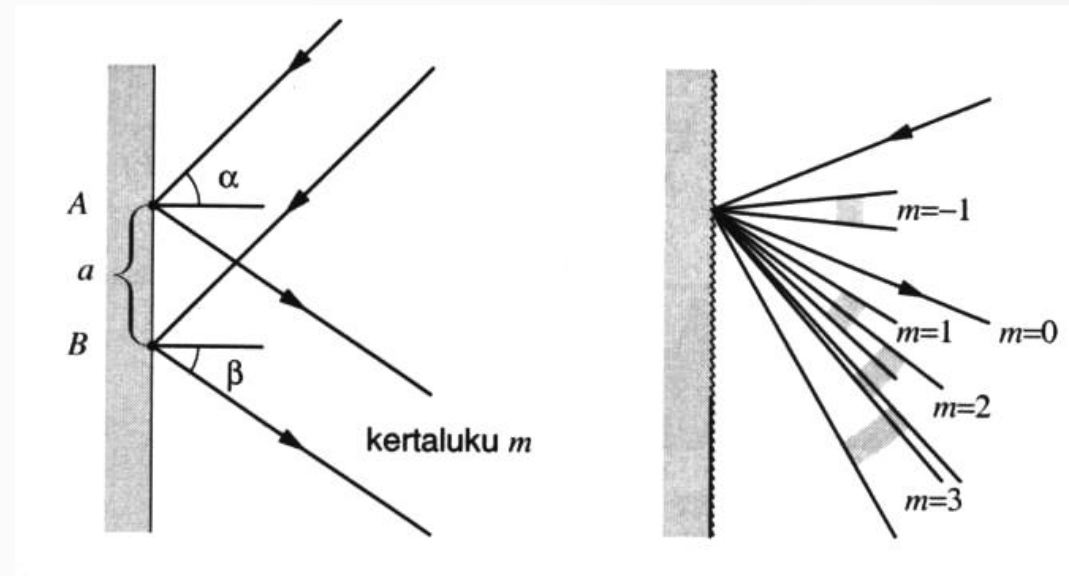


HARPS*-spektrometrin kollimaattori (ESO)



10.7.3 HILA

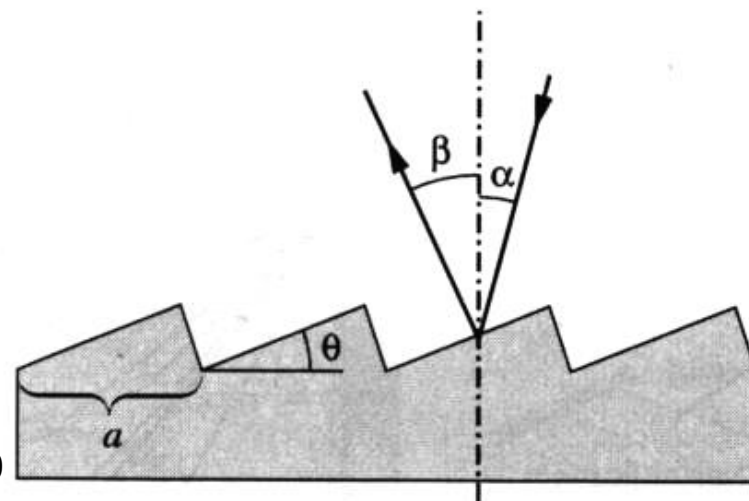
- *Läpäisyhila* (käytetään harvemmin)
- *Heijastushila*:
 - Uurrettu heijastava pinta
 - Uurteiden tiheys $\sim 50 - 1000$ /mm
- Diffraktoituneen valon tulo- ja lähtökulmien välinen yhteys: $a(\sin \alpha - \sin \beta) = m\lambda$, $m = \dots, -1, 0, 1, \dots$
 m on *kertaluku*





10.7.3 HILA (JATK.)

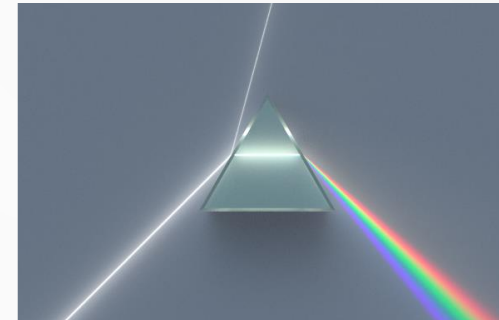
- *Blazed grating:*
 - Vältetään, että suurin osa säteilystä osuu kertalukuun $m=0$
 - Geometrinen heijastus tiettyyn kertalukuun m_0
 - Maksimitehokkuus ~60-70% kun kertaluku on m_0 ja aallonpituus λ_0 *blaze wavelength*
- Hilaspektrometrin *erotuskyky* on $R = Nm$
- Eri kertaluvut osuvat päällekkäin, siksi käytetään
 - aallonpituussuodin tai
 - *ristidispersioelementti*, yleensä prisma tai grism



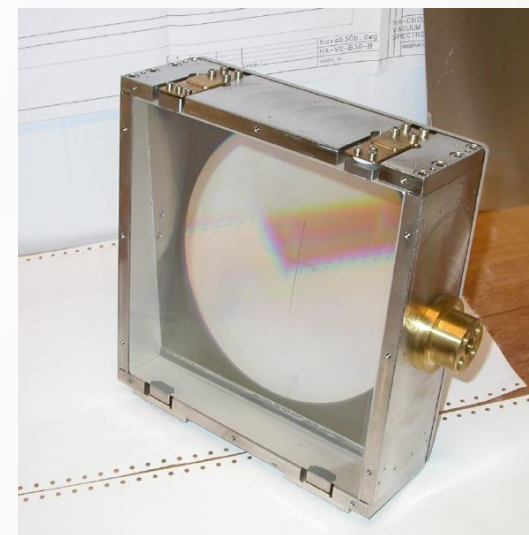


10.7.4 MUUT DISPERSIOELEMENTIT

- Prisma
 - Pienempi resoluutio kuin hilalla
 - Vähemmän käytetty
 - Objektiiviprisma: Ei rakoa → Kaikista kuvakentän kohteista spektri
- Grism: Uurrettu prisma
- Muita spektrometreja:
 - Fourier-muunnosspektrometri



Prisma (Wikipedia)



Grism (HARPS, ESO)



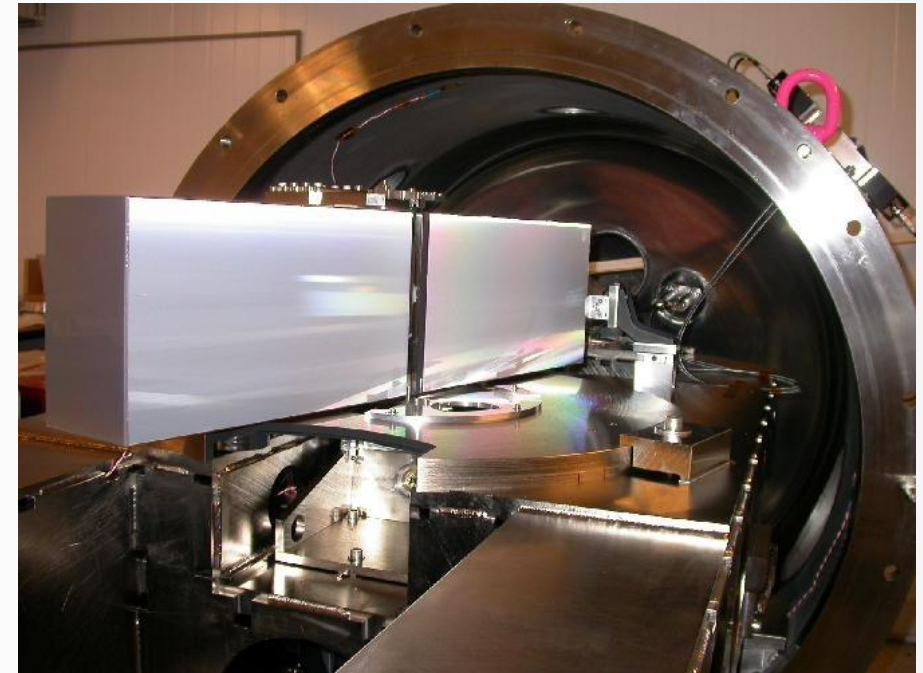
10.7.5 KAMERA

- Kamera kuvaa dispersioelementin tuottamaa spektriä
- Fokusoidaan rakoon
- Nykyään poikkeuksetta CCD-kamera
- Kameran pikselimäärä huomioitava
- Optiikka optimoidaan: Pikselin koko vastaa haluttua resoluutiota, esim. $\Delta\lambda$ vastaa ainakin 2 pikseliä



10.8 ÉCHELLE-SPEKTROMETRI

- Hila "harva" ~ 50 viivaa/mm
- Blaze-kulma suuri $\sim 60^\circ$
- Havaitaan korkeita kertalukuja $m \sim 20 - 60$
- $\Rightarrow$ suuri dispersio ja resoluutio $R \sim 10\,000 - 100\,000$
- Eri kertaluvut erotetaan ristidispersioelementillä: Esim. prisma, grism



HARPS-spektrometrin échelle-hila (ESO)

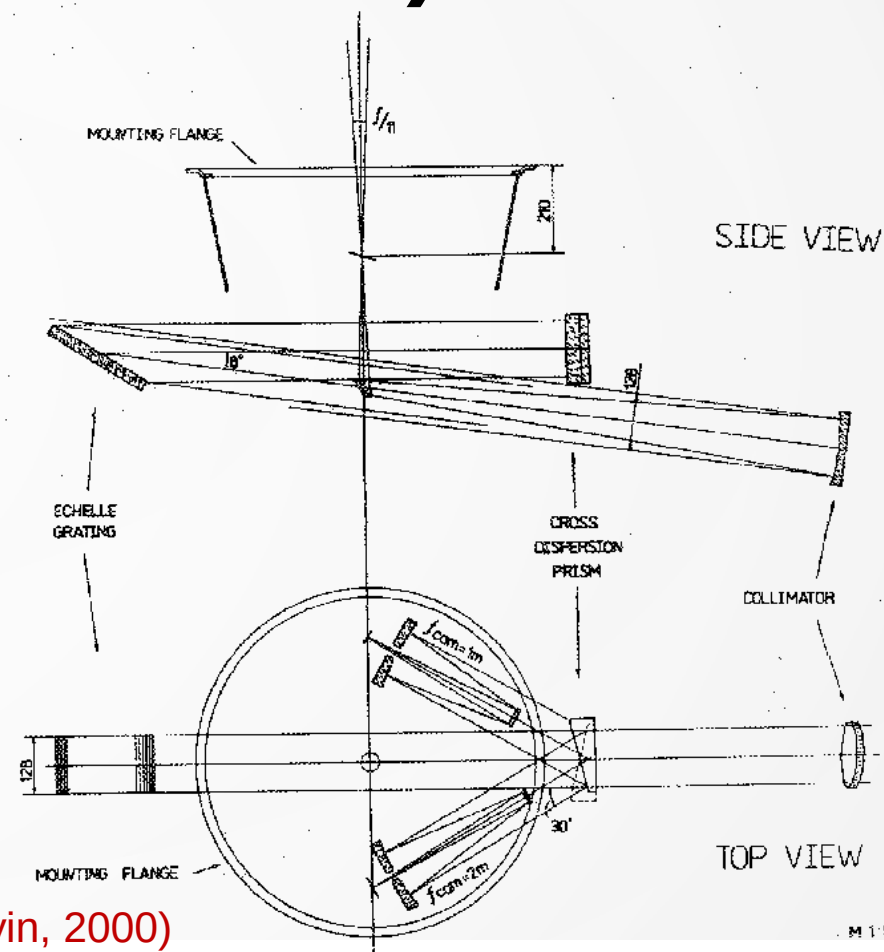


10.8 ÉCHELLE-SPEKTROMETRI SOFIN (NORDIC OPTICAL TELESCOPE)

- SOFIN = "Soviet-Finnish"
- Resoluutio 30000-170000
- Cassegrain-fokuksessa



SOFIN (R. Rekola, NOT)



SOFIN layout (I. Ilyin, 2000)



10.9 CCD-ÉCHELLESPEKTRIEN HAVAITSEMINEN JA REDUSOINTI

- Asetukset
- Tarvittavat kalibroinnit
- Havaintojen redusointi
- Spektrometrialle tyypilliset ongelmat



10.9.1 SPEKTROMETRIAN ASETUKSET

- Aallonpituusalueen valinta
- Resoluution valinta:
 - kohteen fotonikohina $>$ lukukohina
 - suurempi resoluutio $\Rightarrow$ pitempi valotusaika
- Valotusaika $\Leftrightarrow$ tarvittava S/N
- Optimaalinen rako:
 - Resoluutio
 - Seeing suhteessa raon kokoon
 - Raon asento taivaan suhteen



10.9.2 SPEKTROMETRIAN CCD-KALIBROINTI-KUVAT

- Bias-, dark-kuvat kuten yleensä CCD:llä
- Flat-field erityisellä flatfield-lampulla: Kontinuumivalo ilman spektriviivoja.
- Aallonpituuskalibrointi, vaihtoehdot:
 - Vertailuspektrikuva (esim. Th-Ar –lampulla)
 - Vertailuspektri suoraan kohteen spektrin päälle
 - Ilmakehän spektriviivat
- Vuokalibrointi
 - Vain matalan resoluution spektreille
 - Standardikohteella

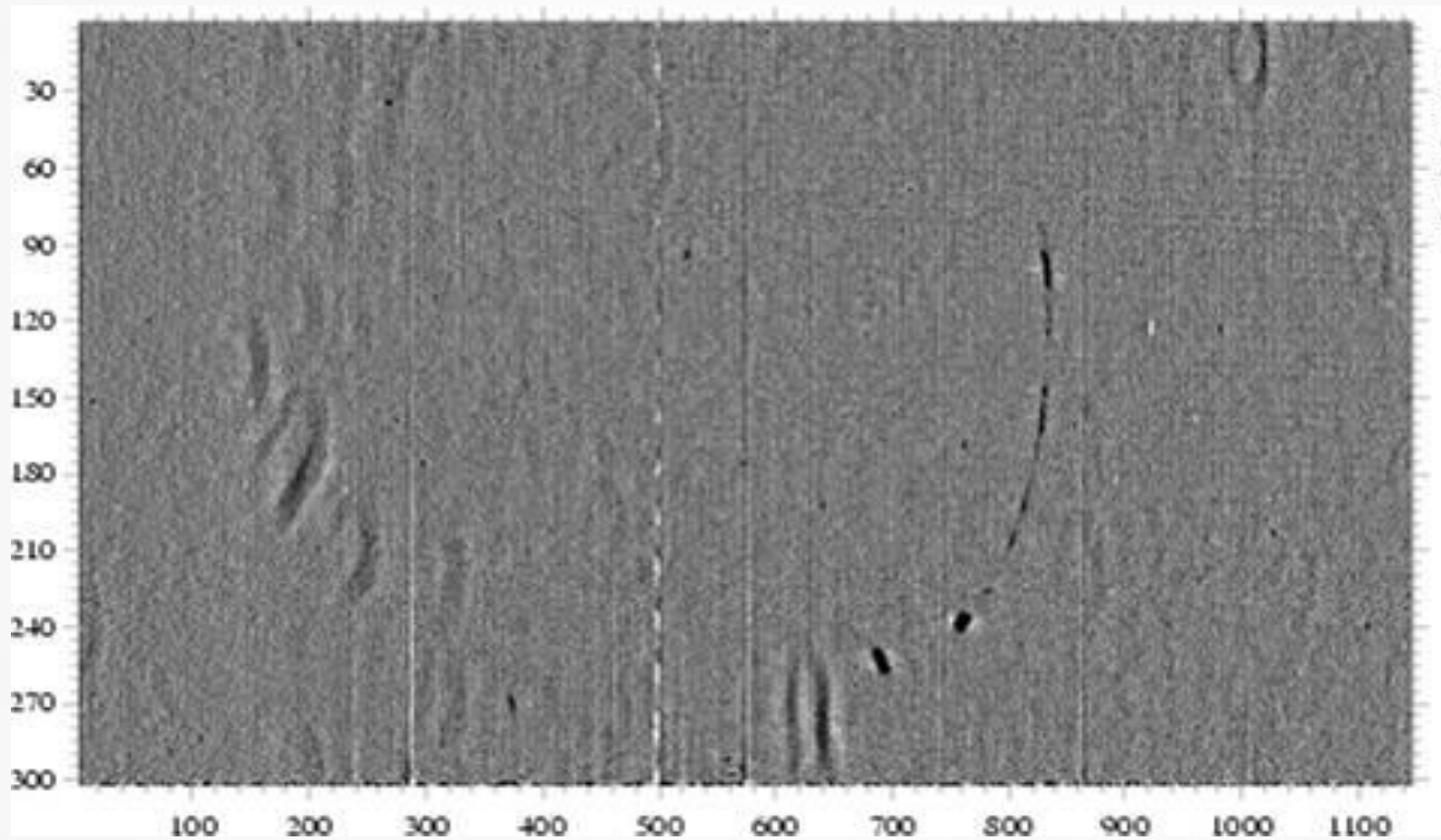


10.9.3 SPEKTROMETRIAN REDUSOINTI

- Esimerkkinä CCD-échelle havainnot:
 1. Bias ja flat-field –korjaukset
 2. Sironneen valon poisto
 3. Kosmisten säteiden poisto
 4. Kertalukujen erottaminen: 2-ulotteinen kuva => 1-ulotteiset spektrit
 5. Aallonpituuskalibrointi
 - Vertailuspektristä pikseliskaala $\mapsto$ aallonpituusasteikko
 - Atmosfääriviivojen avulla aallonpituusasteikon korjaus
 - Maapallon liikkeen poistaminen $\mapsto$ barysentriset aallonpituudet
 6. Kontinuumin normalisointi

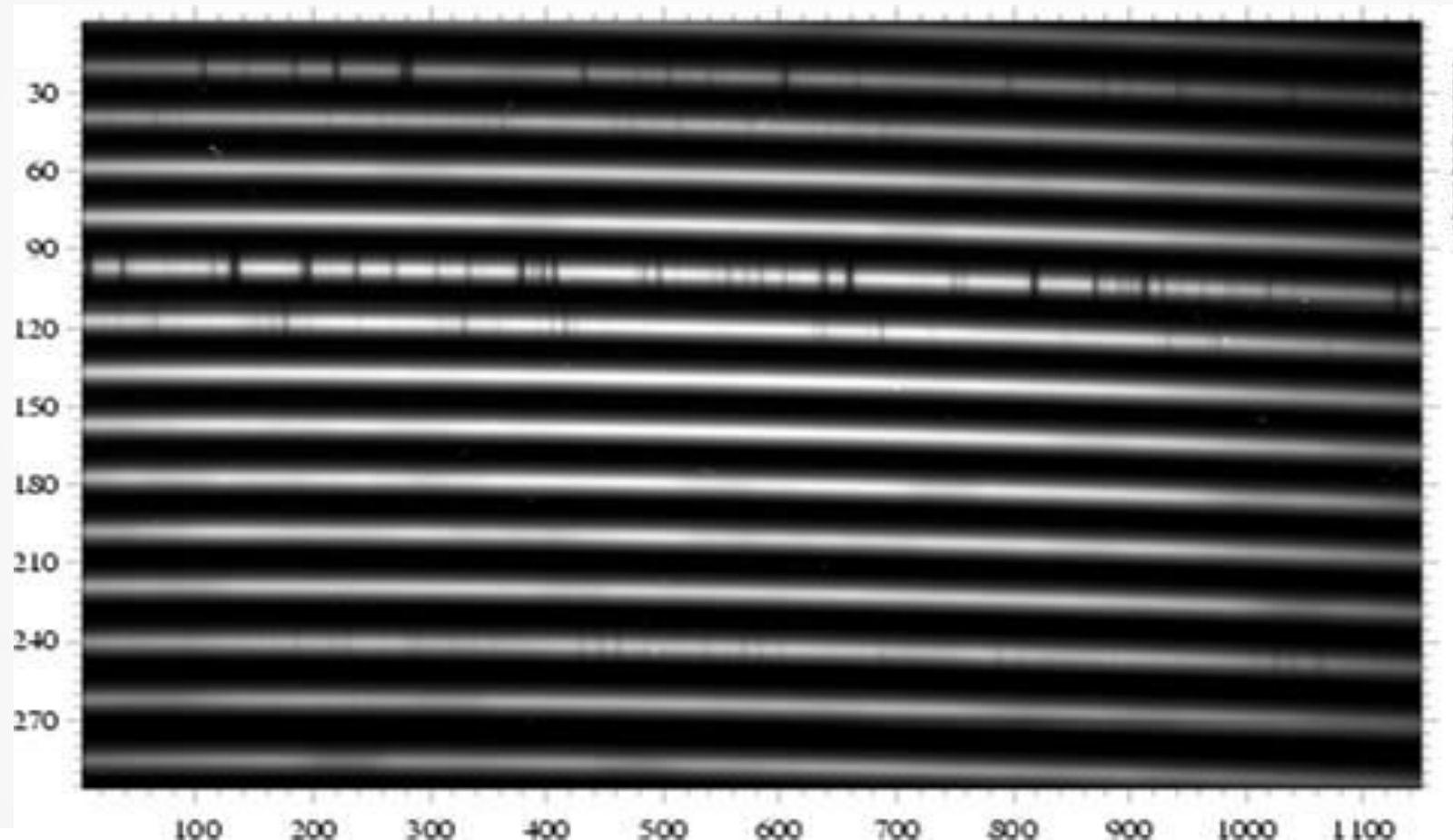


10.9.3 ÉCHELLE FLAT-FIELD



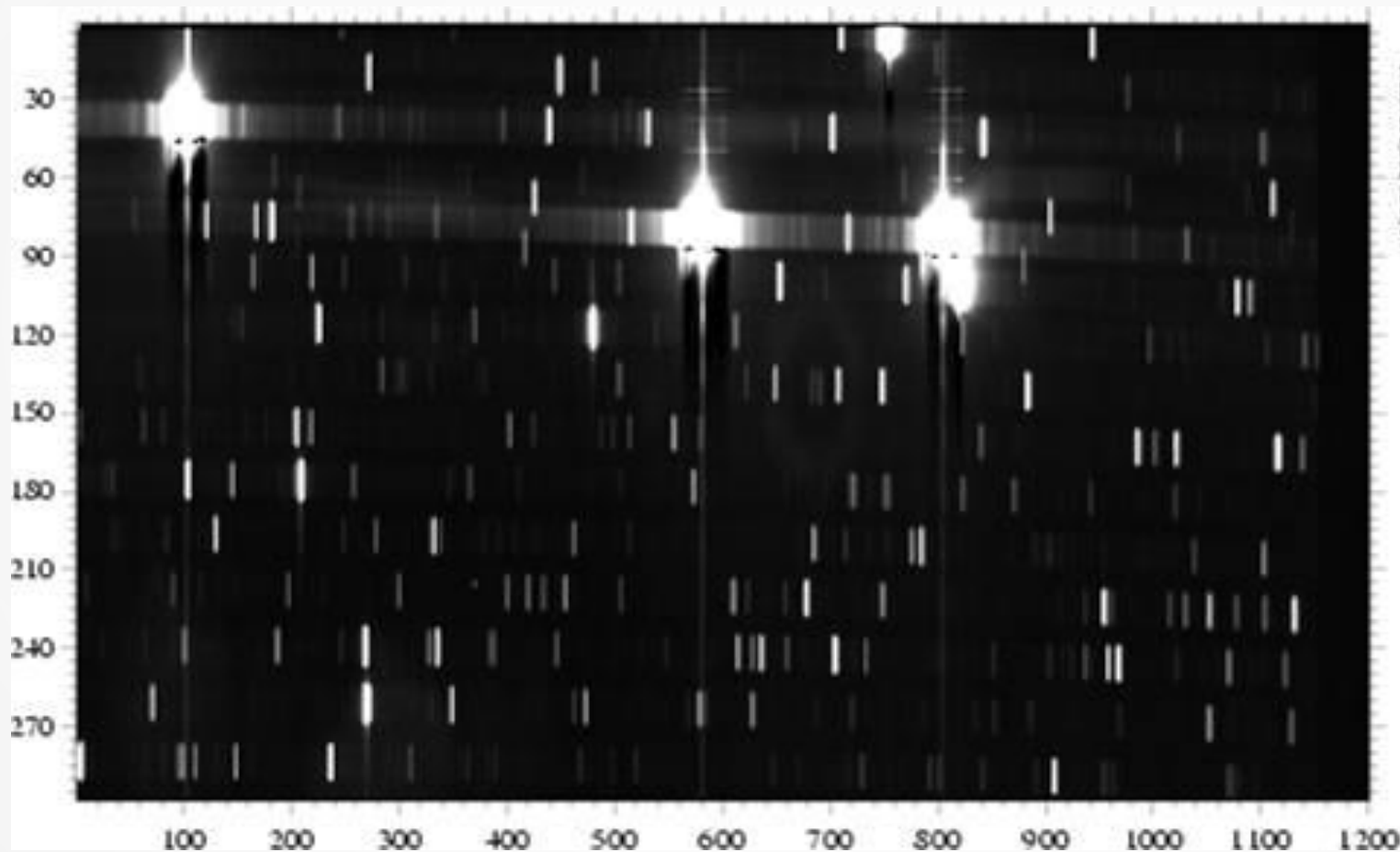


10.9.3 CCD-ÉCHELLESPEKTRI ENNEN KOSMISTEN SÄTEIDEN POISTOA





10.9.3 TH-AR –LAMPUN ÉCHELLE- VERTAILUSPEKTRI

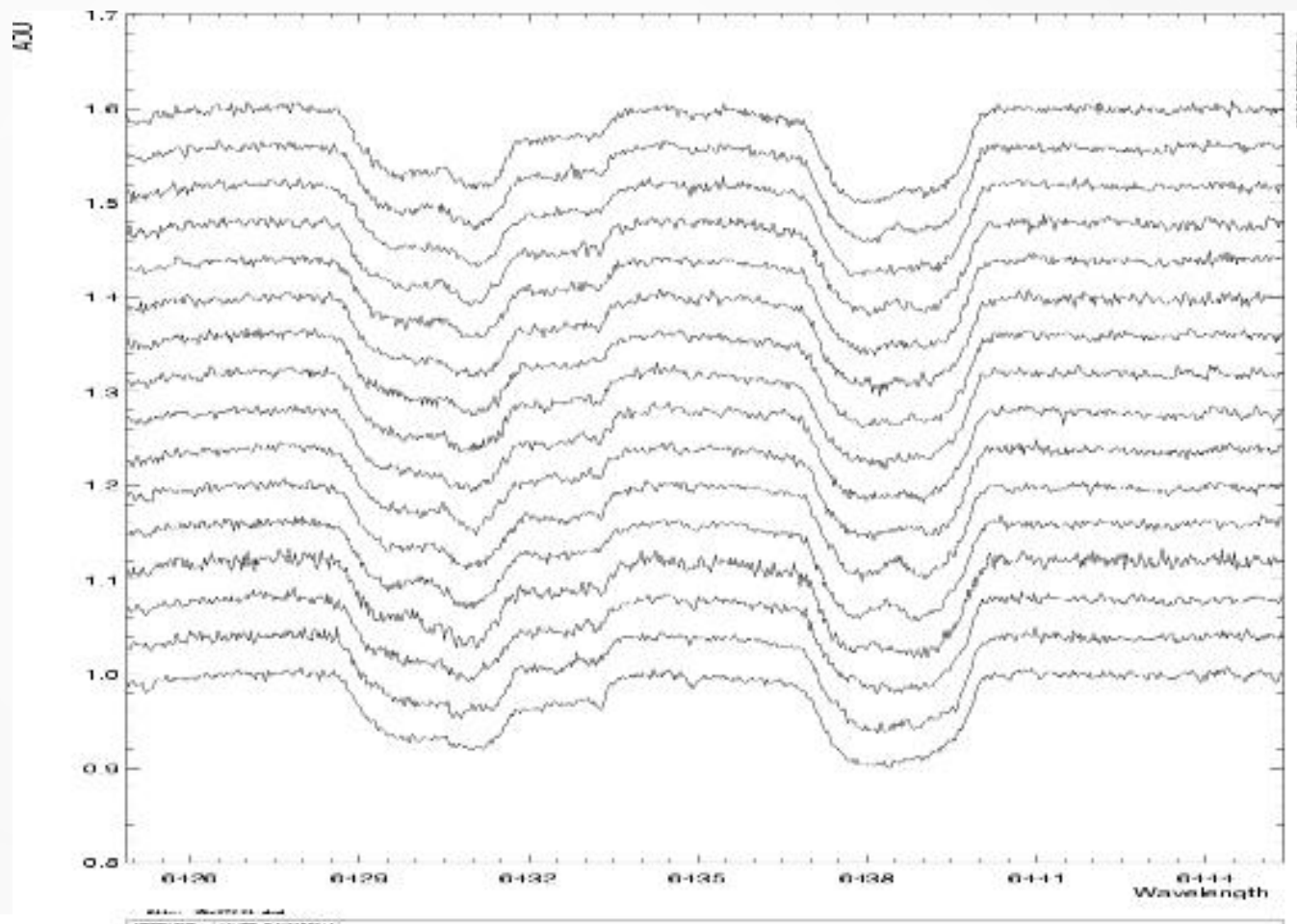


SOFIN, 2. kameran vertailuspektri



10.9.3 REDUSOIDUT SPEKTRIT

SOFIN:n redusoidut spektrit:
HD 199178





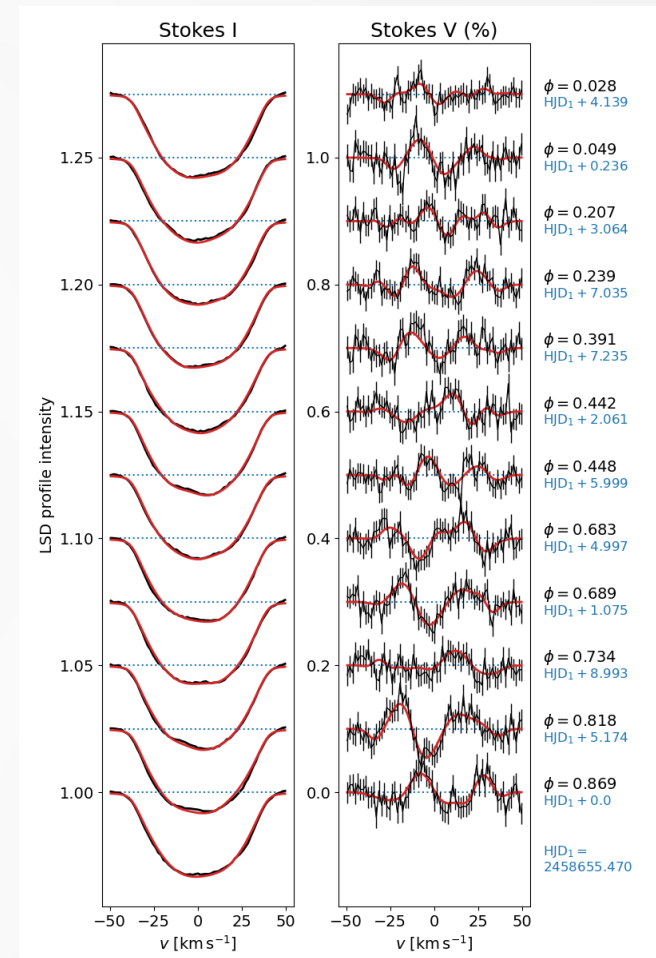
10.9.4 ERITYISONGELMIA

- Taustataivaan spektriviivat:
 - Ongelma jos kohde on himmeä tai
 - havainnot lähellä auringonlaskua tai –nousua
- Aallonpituuskalibrointi voi muuttua jopa valotuksen aikana
 - Ongelma erityisesti kun
 - resoluutio korkea
 - valotusaika pitkä ja
 - spektrometri kiinni teleskoopissa (Cassegrain-fokuksessa)
- Interferenssikuviot CCD-kuvassa



10.10 SPEKTROPOLARIMETRIA

- Spektrometria + polarimetria = spektropolarimetria
- Yleensä havaitaan 2-4 Stokesin parametrin aallonpituusriippuvuus
- Stokesin parametrien I , Q , U , V avulla saadaan tietoa kohteen magneettikentästä



V889 Her:n Stokes IV viivaprofiileja
magneettikentän kartoitukseen



10.11 SPEKTROPOLARIMETRIAN HAVAINNOT

- Polarissaattori ennen rakoa, koska spektrometrin optiikka muuttaa polarisaatiota
- Lineaarinen polarisaatio: Yleensä $\lambda/2$ –levy
- Ympyräpolarisaatio: Yleensä $\lambda/4$ –levy
- Käyttämällä pidempää rakoa voidaan kaksi polarisaatiokomponenttia saada samaan CCD-kuvaan



TEHTÄVÄ

- Minkälaista spektrometria (resoluutio, rakenne) kannattaa käyttää seuraavissa tilanteissa:
 1. Spektriluokitus avoimen tähtijoukon tähdille.
 2. Tähtien alkuainepitoisuuksien mittaaminen.
 3. Neptunuksen kokoisen eksoplaneetan vahvistus radiaalinopeusmittauksella.
 4. Galaksijoukon punasiirtymän vahvistaminen.