

Havaitsevan tähtitieteen peruskurssi I, syksy 2023
Mallit 5

1. Selitä lyhyesti seuraavat käsitteet:

(a) **Zeemanin ilmiö**

Voimakkaassa magneettikentässä monet spektriviivat jakautuvat useaan komponenttiin, jotka ovat eri suuntiin lineaari- ja pyöröpolarisoituneita. Näistä viivakomponenteista voidaan mitata magneettikentän suuntaa ja voimakkuutta.

(b) **PSF-fotometria**

PSF-fotometriassa kohteen kirkkaus mitataan sovittamalla sen kirkkausprofiiliin PSF eli laitefunktio. PSF:n muoto määritetään tyypillisesti kuvakentän yksinäisistä tähdistä, mikäli sellaisia on tarjolla. Menetelmällä voidaan mitata lähekkäisten sekä himmeiden kohteiden kirkkauksia tarkemmin kuin apertuurifotometrialla.

(c) **Apertuurifotometria**

Apertuurifotometriassa määritetään kohteen kirkkaus mittaamalla kuvasta kohteen kattavalle alueelle (apertuuriin) kertyneen signaalin voimakkuus. Tästä vähennetään taustataivaan kirkkaus mittaamalla sen signaali tyypillisesti kohdetta ympäröivältä rengasmaiselta alueelta.

(d) **Echelle-hila**

Heijastushila, jonka uurteet ovat verrattain harvat (~ 50 /mm) mutta blaze-kulma suuri ($\sim 60^\circ$) ja jolla havaitaan korkeita kertalukuja. Näin saadaan hyvin suuri spektriresoluutio. Nimi "echelle" tulee hilan rappumaisesta rakenteesta.

(e) **Grism**

Prisma, jonka yksi sivu on uurrettu. Spektrometriassa käytettävä dispersiivinen elementti, jolla kompaktissa koossa saadaan melko hyvä spektriresoluutio.

(f) **Instrumenttipolarisaatio**

Teleskoopin ja mittalaitteen optisten elementtien itsensä aiheuttama polarisaatio, joka on korjattava lopullisista havainnoista. Instrumenttipolarisaatio saadaan mitattua havaitsemalla nollapolarisaatiotähteä.

2. **Erittele absoluuttisen ja differentiaalifotometrian etuja ja haittoja fotometrisen datan keräämisessä. Kumman menetelmän valitsisit, kun tarkoituksena on seurata kaukaisen galaksin supernovan valokäyrää havaitsemalla sitä kerran yössä pitkän havaintojakson ajan? Perustele vastaustasi.**

Absoluuttisessa fotometriassa mitataan kohteen tarkka näennäinen magnitudi. Näin tehty mittaus mahdollistaa havainnon helpon yhdistämisen toisiin absoluuttisesti määritettyihin magnitudiarvoihin. Absoluuttisella fotometrialla saadusta magnitudiarvosta on myös helppo laskea fysikaalisia suureita kuten havaittu absoluuttinen vuo tai tähden absoluuttinen magnitudi. Absoluuttinen fotometria on kuitenkin hyvin työlästä, sillä se edellyttää niin ilmakehän kuin teleskoopin absorptio-ominaisuuksien määrittämistä. Varsinkin ilmakehän ominaisuudet voivat muuttua jopa saman yön aikana, jolloin absoluuttista fotometriaa ei käytännössä voida tehdä.

Differentiaalifotometriassa kierretään absoluuttisen fotometrian vaikeudet vertaamalla havaintokohteen kirkkautta samassa kentässä olevaan vakiokirkkauksiseen tähteen (CCD-fotometriassa). Näin saadaan joka valotuksella automaattisesti ilmakehän ja

teleskoopin kalibrointi ja voidaan havaita hyvin vaivattomasti nopeaa aikasarjafotometriaa yhdestä kohteesta. Hintana tällä havaintomenettelyllä on, että sillä saadaan määritettyä ainoastaan havaintokohteen ja vertailutähden magnitudien erotus. Tätä ei voida siirtää absoluuttiseen magnitudijärjestelmään ja näin yhdistää muiden havaintojen kanssa ellei vertailutähdestä ole tehty absoluuttista fotometriaa. Lisäksi on usein vaikeata löytää sopivaa vertailutähteä samassa kuvakentässä. Tämän takia usein käytetään montaa vertailukohdetta.

Kun on tarkoituksena seurata yhden pistelähteen kirkkauden kehitystä yöstä yöhön, on järkevää käyttää differentiaalifotometriaa. Absoluuttisen fotometrian tarvitsemat kalibrointihavainnot ovat aikaavieviä eikä niitä voida tehdä kaikissa olosuhteissa. Sen sijaan havaintojen yhdistämisen kannalta voi olla järkevää mitata muutaman valitun vertailutähden magnitudit absoluuttisella fotometrialla, jolloin kohteesta saatu differentiaalifotometriakin voidaan siirtää absoluuttiseen magnitudijärjestelmään.

3. Etsi Internetistä kaksi tieteellistä julkaisua, joista

(a) ensimmäinen liittyy polarimetriaan tai joissa on tehty polarimetrisia havaintoja (Eng: polarimetry/polarimetric observations)

Paperi joka liittyy polarimetriaan on Seshadri, M. et al., *First detection of X-ray polarization in thermal state of LMC X-3: spectro-polarimetric study with IXPE* [1].

- **Mitä (kohteita) on tutkittu?**

Paperi tutki musta aukko-tähti-systeemiä LMC:ssä; LMC X-3.

- **Millä teleskoop(e)illa tai instrument(e)illa?**

Paperissa käytettiin dataa useammalta röntgen-teleskoopilta:

- Imaging X-ray Polarimetry Explorer (IXPE)
- Neutron Star Interior Composition ExploreR (NICER)
- Nuclear Spectroscopic Telescope Array (NuSTAR)

Näistä IXPE on röntgen-polarimetri joka toimii 2-8 keV:n alueella (0.62-0.155 nm). Havaintoja tehtiin noin 562 ks (kilosekuntia, eli 562 000 s).

- **Millaisiin tuloksiin tutkijat ovat päätyneet?**

Tutkijat löysivät merkittävää polarisaatio-signaalia kohteesta ($P_D \approx 3.04 \pm 0.40\%$), ja että PD (polarization degree; polarisaatioaste) kasvaa säteilyn energian kasvaessa. Kohde LMC X-3 on mahdollisesti ensimmäinen havaittu polarisoitunut BH-XRB (black hole X-ray binary).

- **Miten polarimetria liittyy ko. tutkimukseen?**

Polarimetria voi auttaa ymmärtämään mustien aukkojen ympäristöjen emissioprosesseja sekä niiden geometriaa.

(b) ja toisessa liittyy apertuuri- tai PSF-fotometriaan tai jossa on tehty apertuuri-/PSF fotometriaa (Eng: PSF photometry / aperture photometry).

Yksi esimerkki paperista missä käytetään PSF-fotometriaa on Sarajedini, A. *The properties of RR Lyrae variable stars in the isolated Local Group dwarf galaxy WLM* [2]

- **Mitä (kohteita) on tutkittu?**

Paperi on tutkinut yhtä paikallisen galaksiryhmän (Local Group) yksinäistä kääpiögalaksia (isolated dwarf galaxy) Wolf?Lundmark?Melotte (WLM). Optisen alueen kuvista näkyy galaksin tähdet. Tarkemmin, paperissa tutkitaan RR Lyrae-tähtiä.

- **Millä teleskoop(e)illa tai instrument(e)illa?**

Paperissa käytettiin Hubble-avaruusteleskoopin "Advanced camera for surveys- instrumenttia B- ja I- kaistoissa (filtterien nimet F475W ja F814W). Paperin datat ovat n-s- "archival data," eli data on ladattu Hubble-teleskoopin data-archivesta.

- **Millaisiin tuloksiin tutkijat ovat päätyneet?**

Paperi karakterisoi RR Lyr tähtiä, ja löytävät 76 ab-tyyppisiä ja 14 c-tyyppisiä tähtiä. He myös taulukoivat tähtien keskimagnitudit, värit, periodit, ja amplitudit. Paperissa on myös löydetty 79 Cepheid-tyyppistä muuttujaa, mutta niiden periodia ei pysty määrittelemään. Paperissa myös selvitetään että WLM-galaksi on metalliköyhä; tämä tarkoittaa, että galaksissa ei ole ollut jatkuvaa tähtien syntyä joka olisi tuottanut metalleja¹ tähtien väliseen aineeseen. Vertaamalla tuloksia muihin paikallisen galaksiryhmän yksinäisiin kääpiögalakseihin, tutkijat toteavat että WLM:ssa on ollut vain yksi vaihe tähtien syntyä.

- **Miten fotometria liittyy ko. tutkimukseen?**

Fotometriaa käytetään määrittelemään tähtien kirkkaudet, ja täten tulokset eivät olisi mahdollisia ilman fotometriaa.

4. Apertuurifotometriassa mitataan ympyrän muotoisen apertuurin sisältä sekä tätä ympäröivän rengasmaisen alueen sisältä säteily, joista saadaan selville sekä kohteen että taustan kirkkaudet. Käytössä on apertuuri, jonka säde on 10 pikseliä sekä sitä ympäröivän renkaan sisä- ja ulkosäteet 16 ja 20 pikseliä. Mitataan tällä asetuksella kahta tähteä ja lasketaan apertuurin sisälle jääviksi signaaleiksi 50 000 ja 34 000 ADU:a sekä renkaan sisälle jääväksi 400 ADU:a. CCD-kuvista on poistettu bias:n, pimeänvirran ja flat-field:n vaikutukset. Kirkkaamman tähden magnitudiksi tiedetään 9.0. Mikä on himmeämmän tähden magnitudi?

Tehtävänannosta tiedämme seuraavat arvot:

$$R_1 = 10 \text{ pix}$$

$$R_2 = 16 \text{ pix}$$

$$R_3 = 20 \text{ pix}$$

$$I_{BG} = 400 \text{ ADU}$$

$$I_1 = 50000 \text{ ADU}$$

$$I_2 = 34000 \text{ ADU}$$

¹muista että universumissa on vain 3 elementtiä: Vety, Helium, ja Metallit.

Sisemmän apertuurin ja ulomman renkaan pinta-alat ovat:

$$A_1 = R_1^2 \pi = 10^2 \pi = 100\pi$$

$$A_2 = (R_3^2 - R_2^2) \pi = (20^2 - 16^2) \pi = 144\pi$$

neliöpikseliä.

Taustan tasoksi saadaan $n_{\text{sky}} = I_{\text{BG}}/A_2 = 400/A_2 = \frac{400}{144\pi} = \frac{25}{9\pi}$ neliöpikseliä kohden.

Tähdistä saaduiksi signaaleiksi saadaan:

$$N_1 = I_1 - A_1(n_{\text{sky}})$$

$$= 50000 - 100\pi \frac{25}{9\pi} \approx 49722$$

$$N_2 = I_2 - A_2(n_{\text{sky}})$$

$$= 34000 - 144\pi \frac{25}{9\pi} \approx 33722$$

Koska CCD:n keräämät signaalit N_1 ja N_2 ovat lineaarisia, ovat ne suoraan verrannollisia vuontiheyksiin F_1 ja F_2 . Himmeämmän tähden magnitudi m voidaan laskea magnitudien laskukaavalla

$$m = 9.0 + \Delta m$$

$$= 9.0 + 2.5 \lg \frac{49722}{33722} \approx 9.4$$

Muunnosta ADU:sta elektroneiksi ei tarvittu, koska gain G supistuu pois jakolaskussa $N_1/N_2 \equiv F_1/F_2$.

5. **Kohteen lineaarinen polarisaatioaste laskettiin mittaamalla sen vuontiheys neljällä eri polarisaattorin kulmalla, $\theta' = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ ja 135° . Tulokseksi saatiin vuontiheydet $F_0 = 403.4$, $F_{45} = 351.7$, $F_{90} = 378.3$ ja $F_{135} = 405.2$. Arvioi kohteen polarisaatioaste ja polarisaation positiokulma. Mitä hyötyä on, jos vuontiheydet mitataan lisäksi kulmilla $\theta' = 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ$ ja 315° ?**

Oppikirjan kaavojen 9.2 ja 9.3 mukaan

$$P_x = \frac{F_0 - F_{90}}{F_0 + F_{90}}$$

$$P_y = \frac{F_{45} - F_{135}}{F_{45} + F_{135}}$$

$$P = \sqrt{P_x^2 + P_y^2}$$

$$\theta_P = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{P_y}{P_x} \right).$$

Syöttämällä kaavoihin havaitut vuontiheydet saadaan $P_x \approx 0.0321$ ja $P_y \approx -0.0707$ ja edelleen

$$P \approx 0.0776$$
$$\theta_P = -32.6^\circ = 327.2^\circ.$$

Mittaukset polarisaattorin kulmilla väliltä $[180^\circ, 360^\circ]$ toimivat täsmälleen analogisesti tämän tehtävän ratkaisussa käytettyjen kulmien kanssa. Kulmia θ ja $\theta + 180^\circ$ vastaavat siis samat vuontiheydet, $F(\theta) = F(\theta + 180^\circ)$. Tällaisten lisähavaintojen hyöty on, että ne tarjoavat lisäinformaatiota tarkempien arvojen ja näiden virhearvioiden määrittämiseen sovittamalla kaikkiin polarisaatiomittauksiin trigonometrinen malli

$$F(\theta) = F_m[1 + P \cos(2(\theta - \theta_P))],$$

missä F_m on tähden magnitudia vastaava vuontiheys.

Viitteet

- [1] Seshadri Majumder, Ankur Kushwaha, Santabrata Das, and Anuj Nandi. First detection of X-ray polarization in thermal state of LMC X-3: spectro-polarimetric study with IXPE. *MNRAS*, 527(1):L76–L81, January 2024.
- [2] Ata Sarajedini. The properties of RR Lyrae variable stars in the isolated Local Group dwarf galaxy WLM. *MNRAS*, 521(3):3847–3860, May 2023.