

Polarimetria

Teemu Pajunen, Kalle Voutilainen, Lauri Valkonen, Henri Hämäläinen, Joel Kauppo

Sisällys	1
1. Polarimetria	2
1.1 Polarisaatio yleisesti	2
1.2 Lineaarinen polarisaatio	3
1.3 Ympyräpolarisaatio	4
1.4 Stokesin parametrit	4
1.5 Polarisaation mittausmenetelmiä	5
1.6 Polarisaatiostandardit	7
2. CCD- kamerat	7
2.1 Toiminta	7
2.2 Hyötyjä	9
2.3 Kuvauksen virhelähteitä	9
3. Teleskoopit	11
3.1 NOT (Nordic Optical Telescope)	13
4. Lähteet	14

1. Polarimetria

Polarimetria on erittäin tärkeä tähtitieteellisten tutkimusten osa-alue. Käytännössä polarimetrialla tarkoitetaan polarisaation mittaamista. Siinä tutkitaan muun muassa planeettojen ilmakehiä, radiogalakseja, tähtienvälisiä pölyjä ja kvasaareja. Esimerkiksi kvasaarien energiantuottomekanismeista saadaan polarisaation avulla uutta tietoa.

Polarimetrian avulla voidaan tutkia fysikaalisia ominaisuuksia, joita spektrometrialla tai fotometrialla ei pystytä tutkimaan. Tämä johtuu siitä, että polarimetristen ilmiöiden signaali on muita heikempi, ja ilmiöitä on näin vaikeampi havaita. Muun muassa tähtitieteellisten kohteiden magneettikentän voimakkuuden mittaamisessa käytetään pääosin polarisaatiota.



Kvasaari (<http://www.astro.utu.fi/TAS/TuorlaObs/astro/Quasar.jpg>)

1.1 Polarisaatio yleisesti

Valoa (samoin kuten kaikkea sähkömagneettista säteilyä) voidaan kuvata poikittaisena aaltoliikkeenä, joka värähtelee etenemissuuntaa vastaan kohtisuorassa suunnassa. Normaalissa valossa värähtelyä tapahtuu kaikkiin suuntiin. Täysin polarisoituneessa valossa värähtely tapahtuu vain yhteen suuntaan. Käytännössä valo on yleensä osittain polarisoitunutta, jolloin värähtelyn suuruus eri suunnissa on erilaista. Polarisaatiota

käytetään käytännön elämässä hyväksi esimerkiksi aurinkolaseissa. Polarisoivien aurinkolasien molekyyliverkosto päästää lävitseen vain tietyn suuntaista valoa. Näin esimerkiksi vedenpinnasta heijastuva vaakapolarisoitunut valo saadaan kumottua pystypolarisoivien linssien avulla.

Täysin polarisoitunutta valoa syntyy, kun

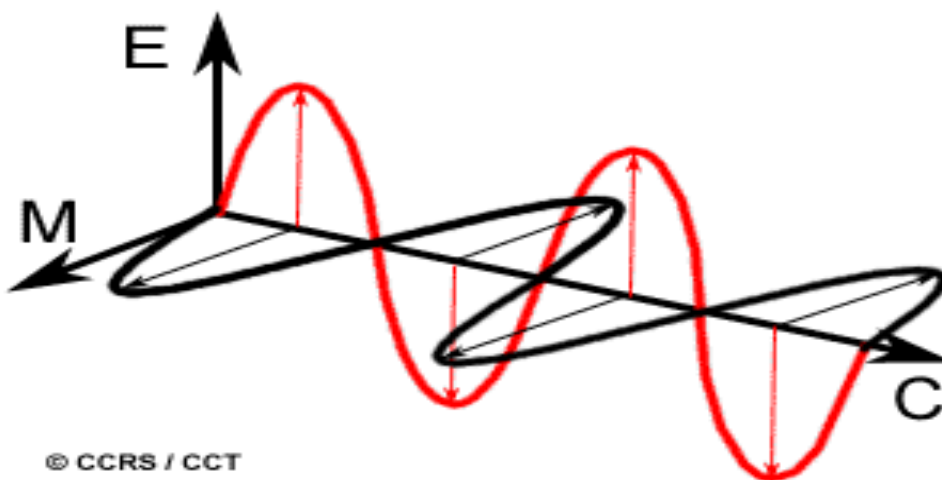
- 1) valo kulkee polarisaatiolevyn läpi tai
- 2) valo heijastuu eristeestä siten, että heijastuneen ja taittuneen säteen välinen kulma on suora.

Valo polarisoituu myös kulkiessaan tietyistä aineista koostuvien kiteiden läpi, ja tällaisista aineista voidaankin valmistaa polarisaattori.

1.2 Lineaarinen polarisaatio

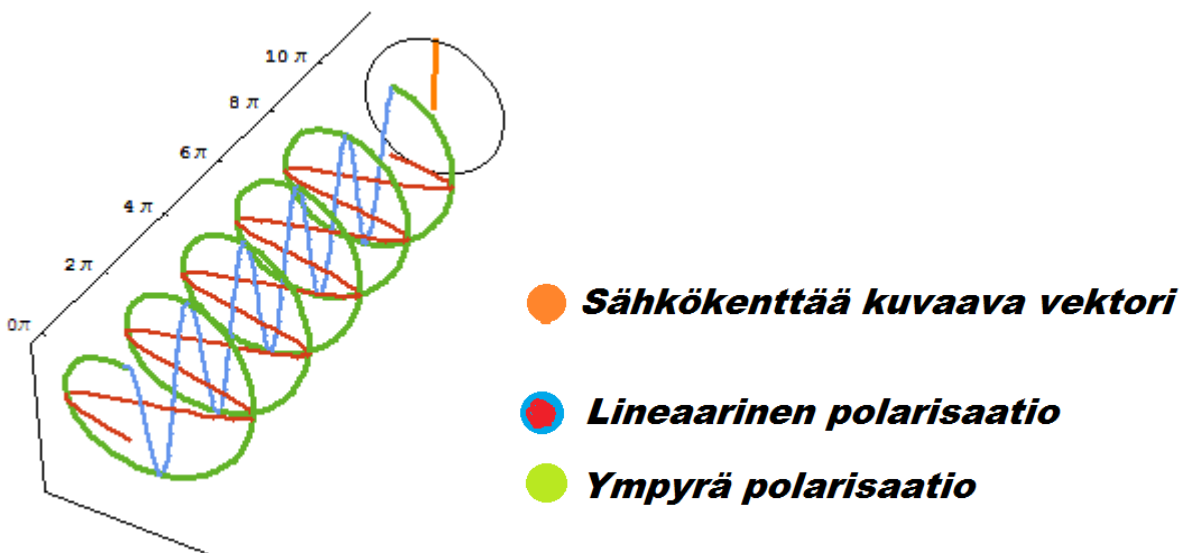
- Täysin polarisoitunutta sähkömagneettista säteilyä, jossa polarisaation ellipsi vähentää laskee suoran linjan

- Sähkömagneettista säteilyä, jonka sähkökenttää kuvaavat kaksi kompleksista vektorikomponenttia ovat samenvaiheisia tai vastakkaisvaiheisia. Jos komponentit ovat saman amplitudisia, mutta niiden vaiheet poikkeavat + tai - 90 astetta, tulee polarisaatiosta pyörivä (vasenkätisesti pyörivä tai oikeakätisesti pyörivä polarisaatio).



1.3 Ympyräpolarisaatio

Ympyräpolarisaatio on polarisaation muoto, jossa sähkökenttää kuvaavan vektorin kärki muodostaa ympyrän ajan edetessä. Ympyräpolarisaatio on rajoittunut tapaus yleisemmästä elliptisestä polarisaatiosta. Elliptinen polarisaatio on muuten sama kuin ympyräpolarisaatio mutta vektori liikkuu ellipsin radalla. Muut erikoistapaukset ovat helpommin selitettävissä lineaarisella polarisaatiolla.



1.4 Stokesin parametrit

Polarisoitunutta valoa voidaan kuvata Stokesin parametreilla, jotka kuuluvat seuraavasti:

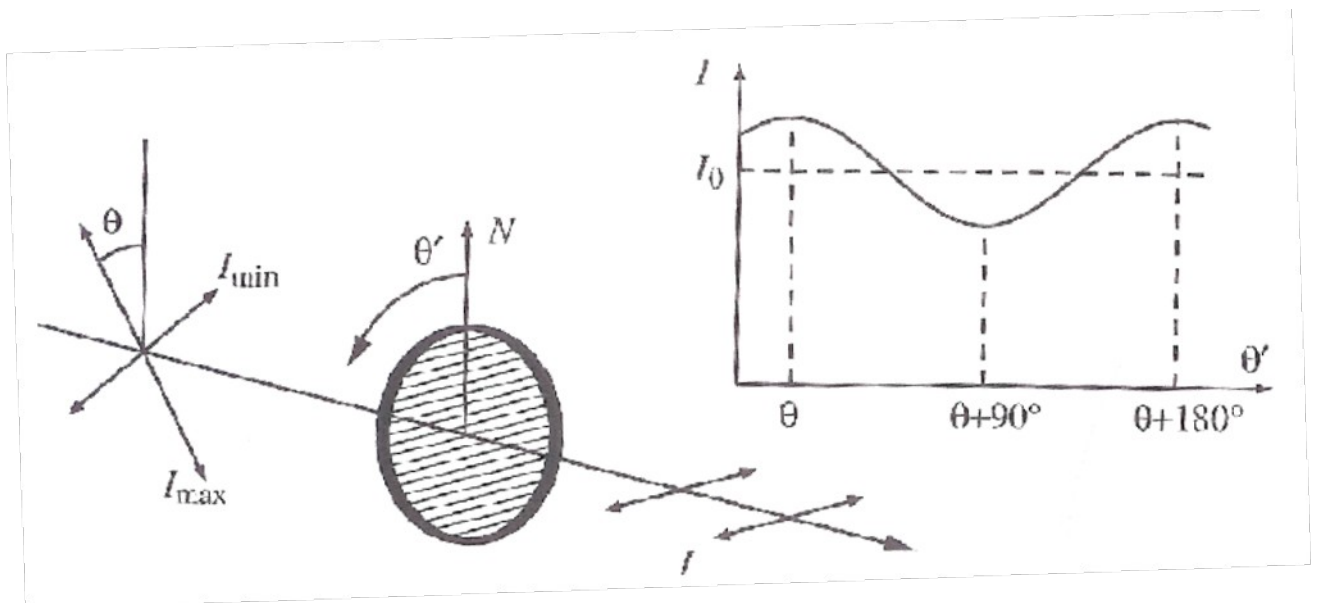
$$\begin{aligned}
 I &= \text{intensiteetti} \\
 Q &= I P_E \cos 2\beta \cos 2\theta = I P \cos 2\theta \\
 U &= I P_E \cos 2\beta \sin 2\theta = I P \sin 2\theta \\
 V &= I P_E \sin 2\beta = I P_V
 \end{aligned}$$

missä $P = P_E \cos 2\beta$ on lineaarinen polarisaatioaste ja $P_V = P_E \sin 2\beta$

ympyräpolarisaatioaste ja $I =$ intensiteetti. Yleensä astrofysiikassa $P_V = 0$ ja polarisaatiolla tarkoitetaan lineaarista polarisaatiota. Polarisoituneen valon sähkövektori piirtää taivaalla ellipsiä, jonka positiokulma θ määritellään ellipsin isoakselin ja pohjoisen väliseksi kulmaksi. Q ja U liittyvät lineaaripolarisaation kontribuutioon ja V määrittää ympyräpolarisaation kontribuution.

1.5 Polarisaation mittausmenetelmiä

Polarisaation mittaus tapahtuu fotometrian mittauksen tapaan, mutta suotimen tilalla tai sen lisäksi käytetään polarisoivaa suodinta eli polarisaattoria. Tällöin myös mittauslaite saa oman nimen, polarimetri. Polarisaattorin läpi päässeän säteilyn voimakkuutta mitataan polarisaattorin eri asennoilla. Näillä tiedoilla voidaan laskea valon polarisaation määrä ja polarisaatiosuunta. Onnistuneen mittauksen tuloksena pitäisi syntyä sinimuotoinen käyrä, josta voidaan laskea positiokulma ja polarisaatioaste. Polarisaation mittauksessa riittää yleensä, että mittaukset suoritetaan polarisaattorin kulmilla 0° , 45° , 90° ja 135° .



Polarisaattorin läpi menneen valon vuo saadaan yhtälöstä

$$I = I_0 \pm P I_0 \cos 2(\theta' - \theta),$$

missä

$$I_0 = \frac{1}{2} (I_{\max} + I_{\min})$$

Kun säteilyvuo on mitattu eri kulmilla, voidaan määrittää polarisaatioaste ja positiokulma.

$$P_x = \frac{I_0 - I_{90}}{I_0 + I_{90}}$$

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

Polarisaatio ja positiokulma ovat nyt

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

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

Polarisaation mittauksia voidaan tehdä myös esimerkiksi kalsiittikiteen avulla.

Kalsiittikidemenetelmässä kiteeseen heijastetaan optisen akselin suuntainen valonsäde, joka kiteessä hajoaa kahdeksi säteeksi (ordinaari- ja extraordinarisäteeksi). Näiden säteiden polarisaatiosuunnat poikkeavat toisistaan 90 astetta. Näistä mittaustuloksista lasketaan polarisaattorimittauksen tapaan positiokulma ja polarisaatioaste. Kalsiittikiteen etu polarisaattoriin nähden on se, että siinä taustataivaan polarisaation vaikutus poistuu. Tämä johtuu siitä, että kalsiittikiteeseen osunut taustataivaan valo on samaa valoa molemmilla jakautuneilla säteillä, eikä sen polarisaatiota tarvitse mitata polarisaattorin tapaan joka kulmalla erikseen.

Polarisaatiota on mahdollista mitata myös spektrometrin avulla. Spektrometrin hilan avulla polarisaatio saadaan koko spektrometrin aallonpituusalueelta. Tässä menetelmässä havaittavien kohteiden tulisi kuitenkin olla melko kirkkaita ja havaintojen kalibrointi tuottaa ongelmia.

1.6 Polarisaatiostandardit

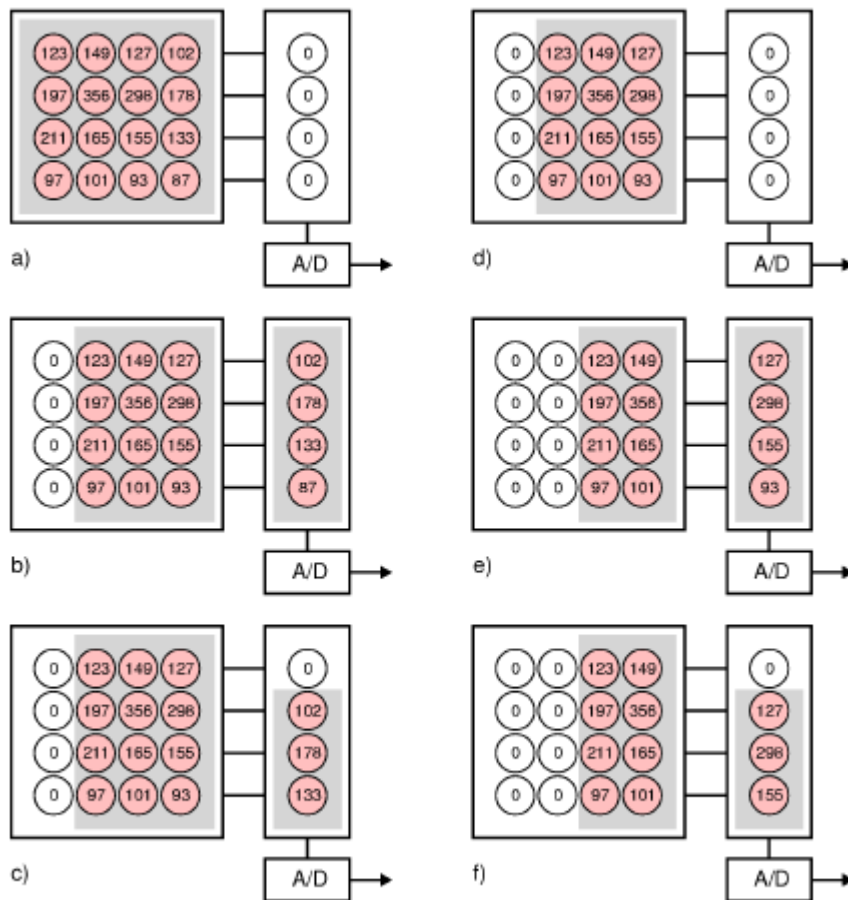
Polarisaatiomittausten yhteydessä on havaittava polarisaatiostandarditähtiä, joita on kahta tyyppiä: nollapolarisaatiotähtiä ja korkeapolarisaatiotähtiä. Nollapolarisaatiotähdet ovat tähtiä, joiden valon tiedetään olevan polarisoitumatonta. Niitä tarvitaan mittausinstrumenttien aiheuttaman polarisaation havaitsemiseen. Korkeapolarisaatiotähtiä taas tarvitaan määrittämään positiokulman nollakohta.

2 CCD-kamera

CCD-kenno (Charge-Coupled Device) on valoherkkä kenno, joita käytetään mm. kameroissa, kuvanlukijoissa ja kaukoputkissa valon tai infrapunasäteilyn muuntamiseksi digitaaliseksi signaaliksi. CCD-kamera koostuu valoherkistä piidiodeista, jotka on järjestetty suorakulmaiseksi hilaksi. Ne muodostavat kohteesta säteilyn voimakkuuden perusteella harmaasävykuvan värikuvan sijaan. Värejä saadaan valoherkkien diodien päällä olevista värisuotimista, jotka ovat yleensä sininen, vihreä ja punainen. Tiedon keruuseen, talletukseen ja käsittelyyn käytetään tietokonetta. Suurimmissa kameroissa voi olla jopa 4096×4096 pikseliä, mutta useimmat ovat huomattavasti pienempiä. CCD on viime aikoina yleistynyt myös tavallisten videokameroiden ilmaisimena.

2.1 Toiminta

Osuessaan ilmaisimeen fotonin irrottaa elektronin, joka jää vangiksi syntykohtaansa. Syntyneet varaukset siirretään valotuksen jälkeen ilmaisimen potentiaalieroja muuttamalla rivi kerrallaan lukupuskuriin. Lukupuskurissa niitä siirretään edelleen pikseli kerrallaan analogia/digitaali-muuntimeen, josta digitaalinen lukuarvo lähetetään tietokoneeseen. Samalla kuvan lukeminen tyhjentää ilmaisimen. Käytettäessä lyhyitä valotuksia saattaa CCD:n lukemiseen kulua huomattava osa havaintoajasta.



- CCD-kameran kunkin pikselin kohdalla olevaan potentiaaliuoppaan kertyy valotuksen aikana joukko elektroneja. Kunkin pikselin kohdalla oleva luku esittää elektronien lukumäärää.
- Valotuksen jälkeen kutakin vaakariviä siirretään ensin yhden pikselin verran oikealle, jolloin oikeanpuoleisin pystyrivi siirtyy lukupuskuriin.
- Lukupuskuria siirretään pikselin verran alaspäin, jolloin alin varaus siirtyy A/D-muuntimeen, josta elektronien lukumäärä välittyy edelleen tietokoneeseen.
- Kun lukupuskuria siirretään riittävän monta kertaa, saadaan yksi pystyrivi luetuksi.
- Kuvaa siirretään taas pikselin verran oikealle, jolloin toinen pystyrivi joutuu lukupuskuriin.

- f) Lukupuskuria ruvetaan seuraavaksi taas siirtämään alaspäin. Näin jatketaan kunnes koko kuva on luettu.

2.2 Hyötyjä

CCD-kamera on lähes lineaarinen: elektronien määrä on suoraan verrannollinen kameraan osuvan säteilyvuon tiheyteen. Tulosten kalibrointi on siten paljon helpompaa kuin valokuvauslevyjä käytettäessä.

Kvanttihakotysuhde eli ftonia kohti syntyvien elektronien määrä on korkea, ja CCD-kamera on paljon herkempi ilmaisin kuin valokuvauslevy. Herkimmillään kamera on punaisen valon alueella noin 600-800 nm:n paikkeilla, jossa kvanttihakotysuhde voi olla jopa 80-90 %.

2.3 Kuvauksen virhelähteitä

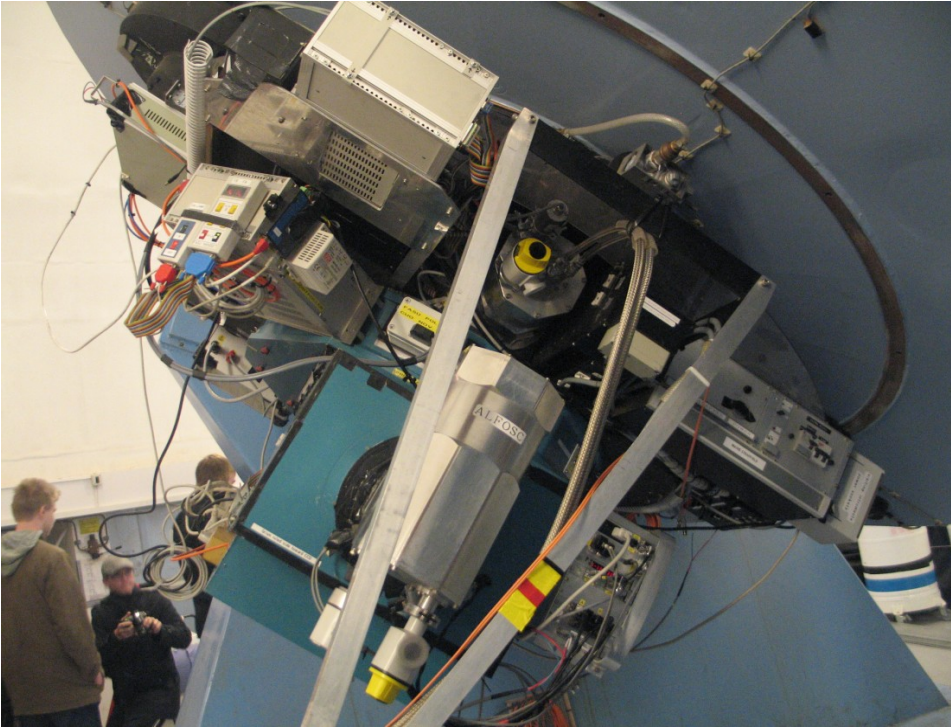
Kameran lämpökohina aiheuttaa pimeää virtaa, vaikka kameraan ei osuisi lainkaan valoa. Kohinan vähentämiseksi kamerat jäähdtytetään. Tähtitieteellisissä havainnoissa käytettävät CCD-kamerat jäähdtytetään yleensä nestemäisellä tyvellä, jolloin pimeä virta saadaan hyvin pieneksi. Toisaalta kameran herkkyys vähenee sitä jäähdtytetäessä, joten liika kylmyyskään ei ole hyväksi. Jotta havainnot olisivat vertailukelpoisia, lämpötila on tietenkin pidettävä vakiona. Kohinasta aiheutuva pimeä virta voidaan mitata helposti ottamalla kuvia suljin suljettuna. Kun se vähennetään varsinaisesta kuvasta, saadaan todellinen elektronien määrä.

Pikselien herkkyys vaihtelee hieman. Siksi esimerkiksi ennen havaintojen aloittamista kuvataan tasaisesti valaistua kohdetta, kuten hämärää taivasta, jolla tähdet eivät vielä näy. Tästä kuvasta käytetään nimitystä flat-field. Jakamalla kuvat tällä flat-fieldillä voidaan poistaa pikselien erilaisista herkkyyksistä johtuva virhe. CCD-kamera on varsin stabiili. Siksi pimeää virtaa ja flat-fieldiä esittäviä kuvia ei tarvitse ottaa erikseen jokaista havaintoa varten. Usein nämä kalibrointikuvat otetaankin vain juuri ennen havaintojaksoa ja sen jälkeen ilta- ja aamuhämärän aikana.

Kosmiset säteet ovat varattuja hiukkasia, jotka aiheuttavat CCD-kuviin ylimääräisiä kirkkaita piikkejä. Ne ovat yleensä yhden tai muutaman pikselin laajuisia. Tyypillisesti kosmisiä säteitä osuu kameraan muutama kappale minuutissa. Jos kohteesta otetaan useita valotuksia, kosmisten säteiden aiheuttamat piikit osuvat eri kuvissa eri paikkoihin, ja ne on helppo tunnistaa ja poistaa.

Vakavampi ongelma on elektroniikasta aiheutuva lukukohina (readout noise). Ensimmäisissä CCD-kameroissa kohina saattoi olla satoja elektroneja pikseliä kohti. Parhaimmissakin kameroissa se on yhä useita elektroneja. Tämä rajoittaa sitä, miten heikko signaali voidaan havaita: jos signaali on samaa luokkaa kuin lukukohina, sitä on mahdoton erottaa kohinasta.

Vaikka CCD-kamera onkin erittäin valoherkkä laite, runsaskaan valo ei vaurioita sitä. Valomonistimen tai kuvavahvistimen sen sijaan voi helposti rikkoa päästämällä siihen liikaa valoa. Pikseli voi kuitenkin kerätä vain tietyn määrän elektroneja, jonka jälkeen se kyllästyy eli saturoituu. Liiallinen saturoituminen voi aiheuttaa varauksen leviämisen myös naapuripikselien alueelle. Jos kamera saturoituu kovin pahasti, yksi lukukerta ei välttämättä poista kaikkia kertyneitä varauksia, vaan kuva on luettava useita kertoja.



CCD-kamera ALFOSC NOT:n teleskoopissa

3. Teleskoopit



Teleskooppeja La Palmalla. (http://apod.nasa.gov/apod/image/0208/canary_ing_big.jpg)

Kaukoputki on havaitsevan tähtitieteilijän tärkein havaintoväline. Kaukoputkia on olemassa kahta päätyyppiä, linssiputkia eli refraktoreita ja peiliputkia eli reflektoreita. Näissä kaukoputken linssi- tai peiliobjektiivi kerää valoa ja muodostaa kohteesta kuvan putken sisälle, jota voidaan tarkastella pienellä suurennuslasilla, okulaarilla. Objektiivin muodostama kuva voidaan myös valokuvata, tai valo voidaan ohjata tutkimuslaitteeseen, kuten fotometriin tai spektrografiin.

Radioteleskoopit ovat pinnaltaan metallisia, suuria lautasantenneja. Niillä mitataan taivaalta tulevan säteilyn kirkkautta tietyltä kohdalta, ja täten niiden erotuskyky ei riitä muodostamaan näkyvää kuvaa. Sen sijaan niiden avulla voidaan havaita valosäteilyä pitempiaaltoisia radioaaltoja. Antennilinjoiksi yhdistetyt radioteleskoopit pääsevät optisten kaukoputkien erotuskyvyn tasolle, ja niiden avulla saadaan otettua radiokuvia laajoilta alueilta taivasta.

Radioaaltoja lyhytaaltoisempaa infrapunasäteilyä voidaan havaita **infrapunateleskoopilla**. Maan ilmakehän tuottama lämpösäteily kuitenkin haittaa maanpinnalta tehtyjä havaintoja,

joten paremmat tulokset saadaan korkeilta vuorenhuipuilta. Infrapunasäteilyn kartoitus helpottuikin, kun vuonna 1983 lähetettiin avaruuteen Maata kiertämään ensimmäinen infrapunasatelliitti, IRAS.



(<http://www.freefunfiles.com/images/ourfreefunfiles/screensavers/outer-space-vol1.jpg>)

3.1 NOT (Nordic Optical Telescope)

NOT on pohjoismaisessa yhteistyössä valmistettu teleskooppi. Vuonna 1988 valmistunut teleskooppi sijaitsee Kanarialla La Palma-saarella. Edelleen runsaassa pohjoismaisessa

käytössä oleva teleskooppi on valmistettu havaitsemaan sekä optisen- että infra-alueen aallonpituuksien havaintoja.

La Palma on sääolosuhteiltaan parhaita havaintopaikkoja maailmassa. Ilmakehän rauhallisuus ja optiikan erinomainen laatu tekevät NOT-teleskoopista hyvin tehokkaan havaintovälineen. Teleskoopilta on vuosina 1989-98 saatu suomalaisten esittämiä tutkimusohjelmia varten runsaasti havaintoaikaa, jota on hyödynnetty erityisesti kvasaarien ja aktiivisten galaksien, nuorten tähtien ja protoplanetaaristen kiekkojen, sekä vuorovaikuttavien kaksoistähtien tutkimuksessa.



Nordic Optical Telescope.

(http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d7/Not_telescope_sunset_2001.jpg)

4. Lähteitä:

Kari Nilsson, Leo Takalo, Jukka Piironen: Havaitseva tähtitiede (2003)

Hannu Karttunen, Karl Johan Donner, Pekka Kröger, Heikki Oja: Tähtitieteen perusteet (2003)

<http://www.sarkanniemi.fi/akatemia/tahtiakatemia/avartutk/teleskoo.htm>

<http://www.astro.utu.fi/zubi/radiat/polar.htm>

<http://www02.oph.fi/etalukio/opiskelumodulit/fysiikka/kurssi3/rajapinta/polarisaatio.html>