



HAVAITSEVAN TÄHTITIETEEN PK I

POLARIMETRIA

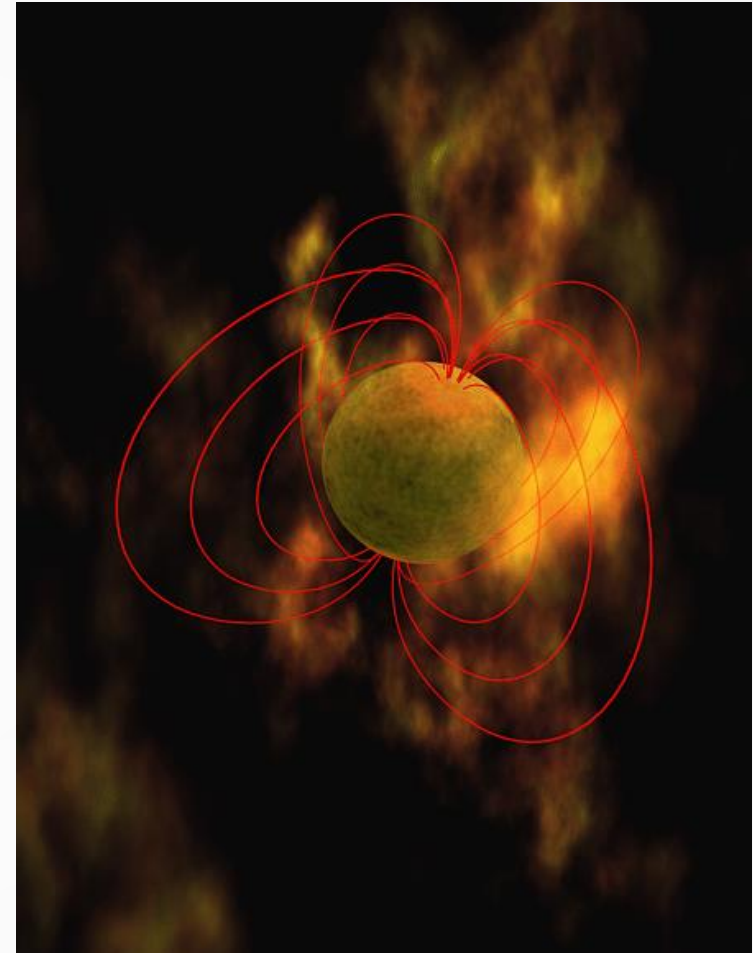
Syksy 2024

Thomas Hackman



9. POLARIMETRIA

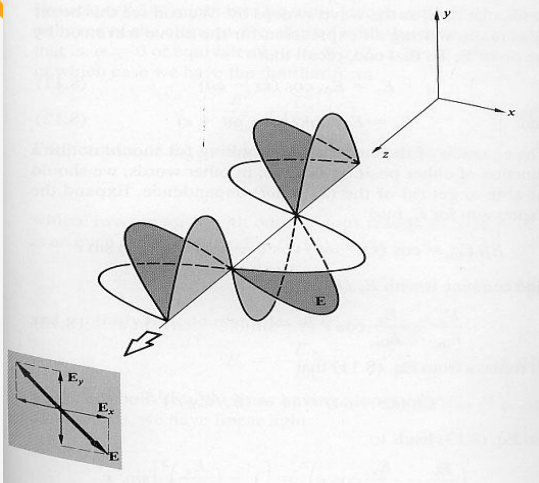
1. Stokesin parametrit
2. Polarisaatio tähtitieteessä
3. Polarisaattorit
4. CCD polarimetria
5. Polarisaatiostandardit
6. Lineaaripolarimetria
7. Ympyräpolarimetria



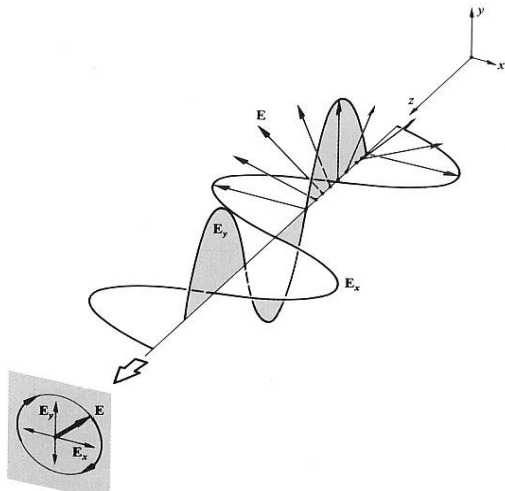
Magnetar (R. Mallozzi, University of Alabama)



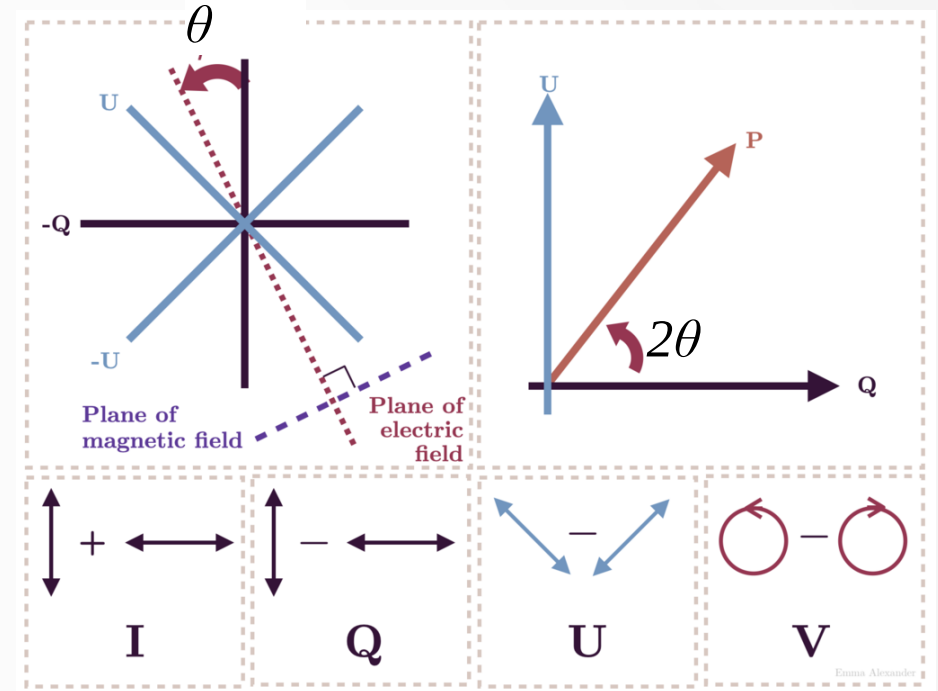
9.1 STOKESIN PARAMETRIT



Lineaaripolarisaatio



Elliptinen (tai ympyrä-) polarisaatio



Stokesin parametrit



9.1 STOKESIN PARAMETRIT

- Stokesin parametrit kuvaavat muuten täydellisesti sähkömagneettista säteilyä, mutta eivät huomioi vaihetta
- Formalismi sopii tilanteisiin, joissa säteily ei ole koherenttia.
- Säteen kohdatessa optisen elementin muuttuu Stokesin vektori. Muutosta voidaan kuvata *Müllerin matriisilla*.

$$(S_0 \ S_1 \ S_2 \ S_3)^T = (I \ Q \ U \ V)^T$$

$$\begin{pmatrix} S'_0 \\ S'_1 \\ S'_2 \\ S'_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{00} & m_{01} & m_{02} & m_{03} \\ m_{10} & m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{20} & m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{30} & m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix}.$$

Müllerin matriisi



9.1 STOKESIN PARAMETRIT

- $\tan \beta = b/a$ (jossa a ja b ovat polarisaatio-ellipsin akselit).
- $IP_E = (Q^2 + U^2 + V^2)^{1/2}$
- Jos $I_x = I_y$ eli $Q = U = V = 0$ niin säteilyn sanotaan olevan polarisoitumatonta.
- Polarisaatioaste on P_E .



9.1 STOKESIN PARAMETRIT

- Positiokulma on: $\theta = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{U}{Q} \right)$
- Usein käytetään ns. normeerattuja Stokesin parametreja $Q/I=P_Q$ ja $U/I=P_U$ joista saadaan lineaarinen polarisaatioaste:

$$P = \sqrt{P_Q^2 + P_U^2}$$

- Polarisaatioaste ja positiokulma voidaan mitata havainnoista.



9.2 POLARISAATIO TÄHTITIETEESSÄ

- Polarisaatiolla voidaan mitata aineen ominaisuuksia, joihin spektreillä ja/tai fotometrialla ei päästä.
 - esim. pintarakenne, magneettikenttä
- Polarisaatiosignaali on heikompi ⇔ vaikeampi mitata.
- Aina, kun valo kohtaa jotenkin orientoitunutta ainetta, se polarisoituu (esim. pöly magneettikentässä).
- Myös monet fysikaaliset ilmiöt tuottavat polarisoitunutta valoa:
 - Sirona
 - Zeemanin ilmiö
 - Synkrotronisäteily



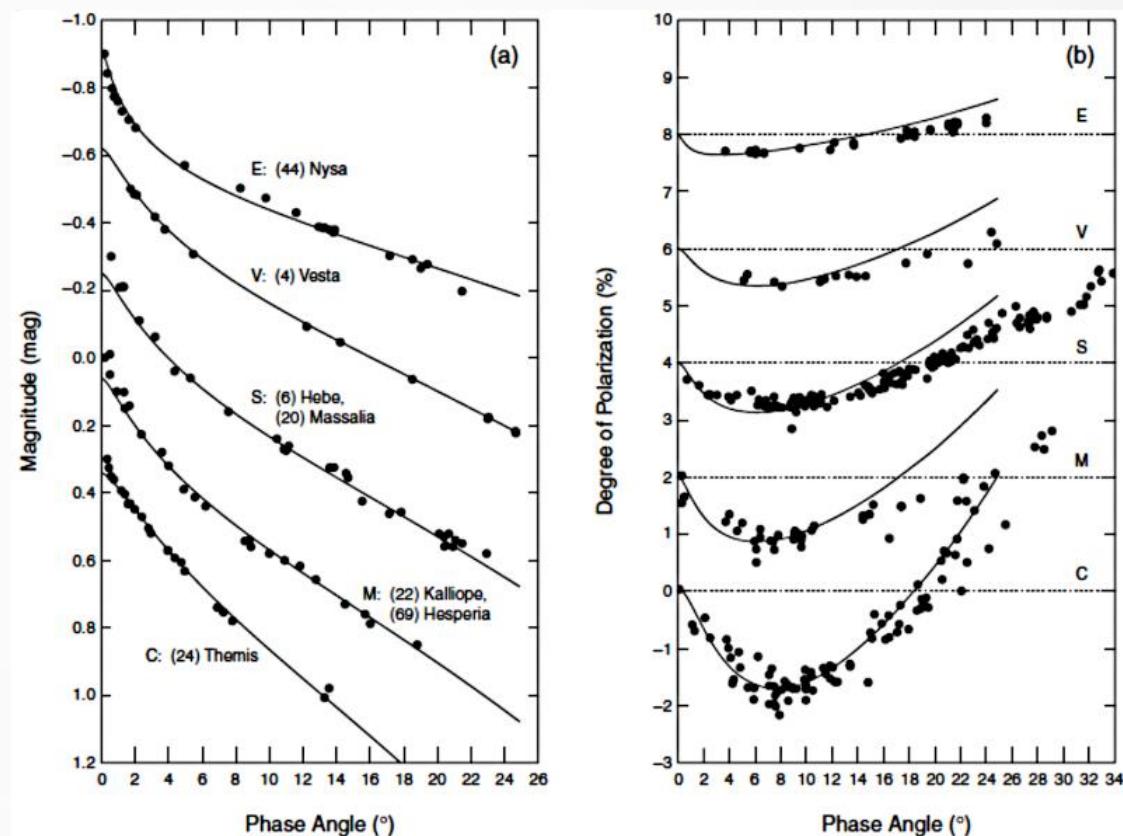
Munasumu (CRL 2688) värikoodattuna valon polarisaatiosuunnan mukaan.



9.2.1 NEGATIIVINEN POLARISAATIO

- Negatiivista lineaaripolarisaatiota havaitaan mm. aurinkokuntien ilmakehättömien kappaleiden pinnalla.

Eri tyyppisten asteroidien
oppositioefekti ja
negatiivinen polarisaatio
(Muinonen et al. 2002)

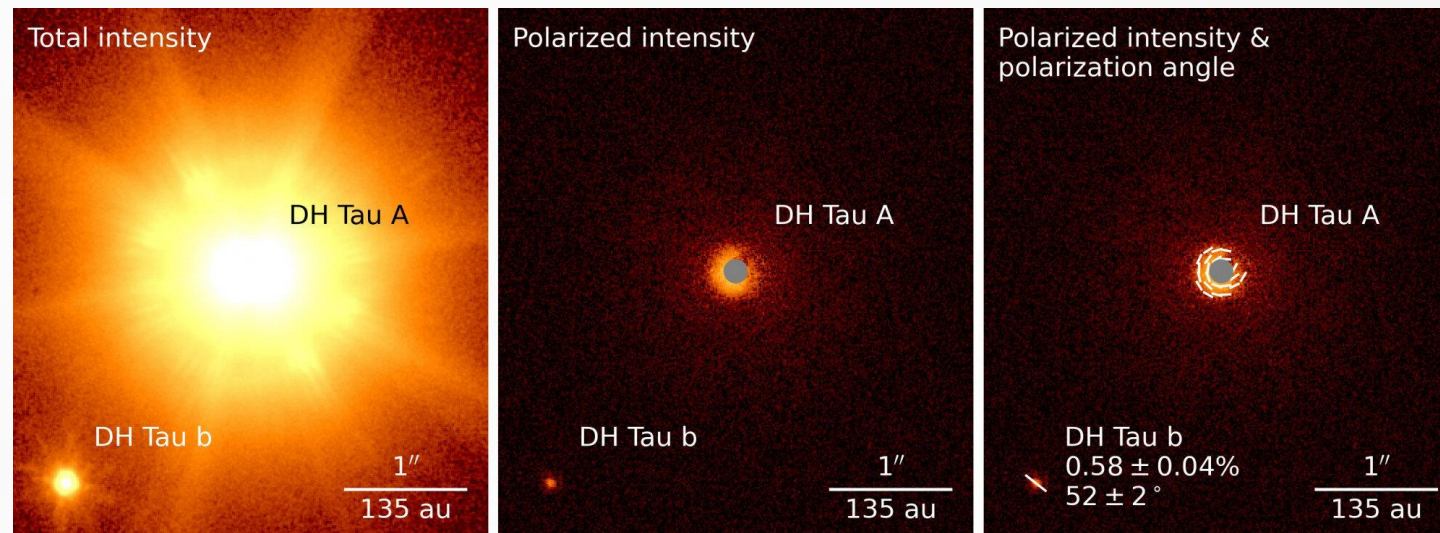
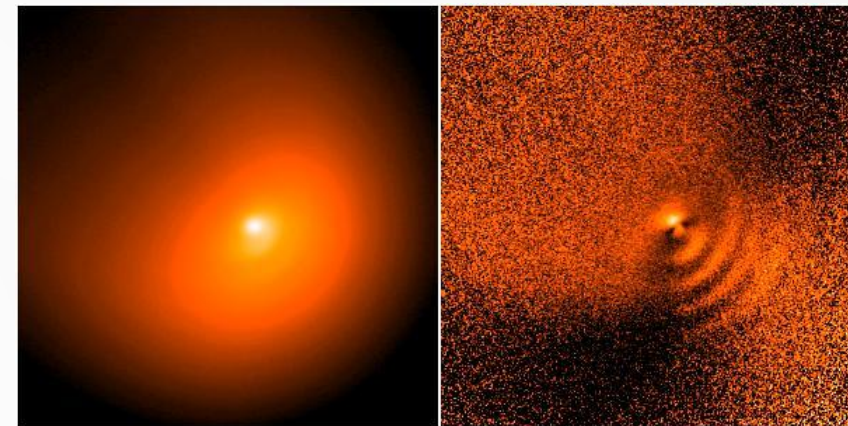




9.2.2 HEIJASTUKSEN JA SIIRONNAN POLARISAATIO

- Komeetta Hale-Bopp normaalissa valossa ja polarisaatiomittaus
- Nuori tähti DH Tau A ja sen planeetta DH Tau b

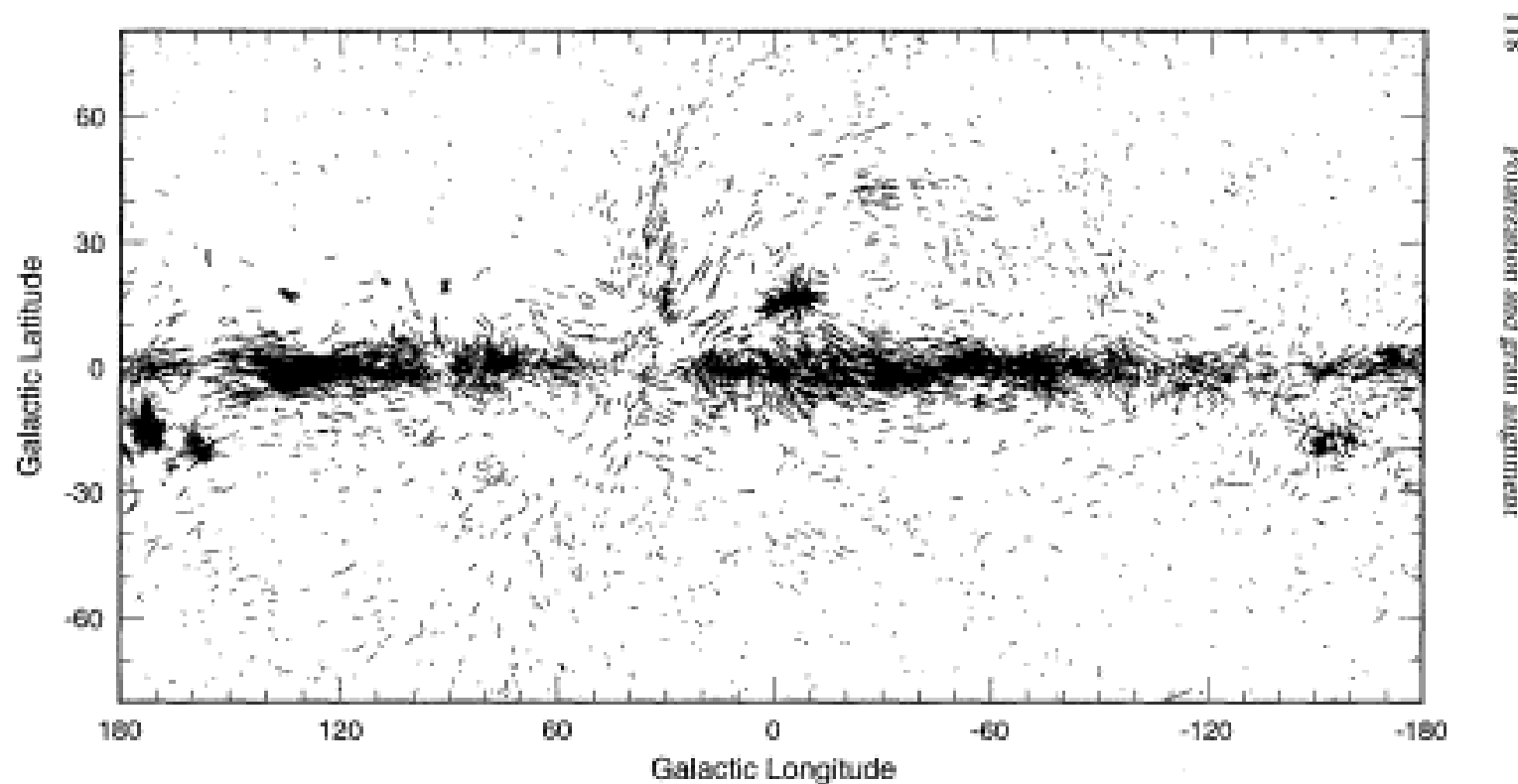
Hale-Bopp 4/1997 (D. McDavid)





9.2.3 MAGNEETTIKENTÄN AIHEUTTAMA POLARISAATIO

- Valon polarisaatio Linnunradassa





9.2.4 ZEEMANIN ILMIO

- Zeemanin ilmiö johtuu atomin magneettimomentin vuorovaikutuksesta ympäröivän magneettikentän kanssa.
- => Emissioviivan “hajoaminen” useampaan osaan
- Hajontaväli riippuu atomin *Landé g* kertoimesta ja magneettikentän voimakkuudesta.
- Viivojen komponenttien säteily on polarisoitunutta:
 - Näkösäteen suuntainen kenttä => ympyräpolarisaatio
 - Kohtisuora kenttä => lineaarinen polarisaatio

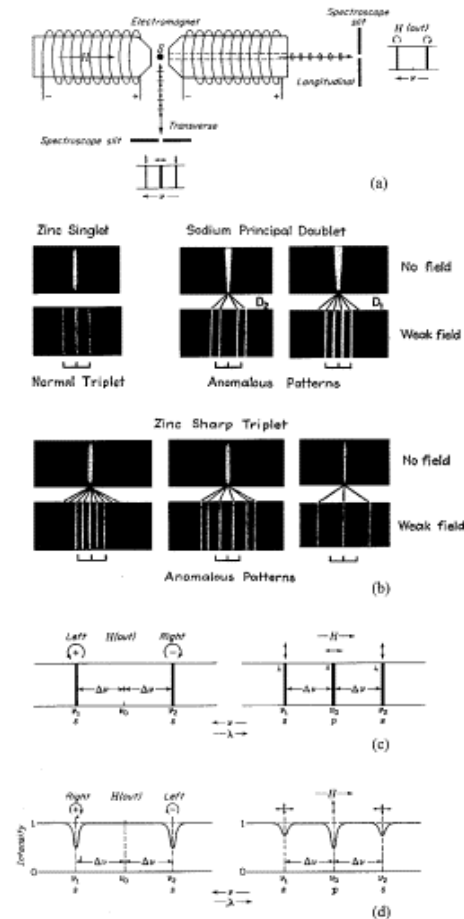
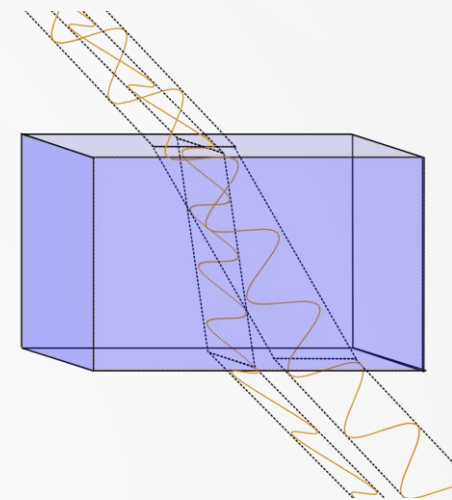


Fig. 3.1 The Zeeman effect, adapted from Jenkins and White (1950); reproduced with permission of McGraw-Hill Inc., New York. (a) Laboratory experiment to demonstrate the effect. (b) Zeeman-split spectral lines. (c) Zeeman patterns for a normal triplet, with polarization indicated. (d) A normal triplet in absorption.

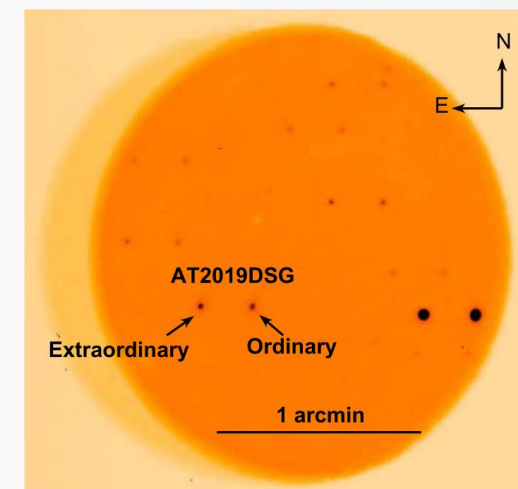


9.3 POLARISAATTORIT

- Optinen komponentti, joilla polarisaatio voidaan mitata.
- Valtaosa perustuu **kahtaistaittaviin** (**birefringent**) kiteisiin (esim. kalsiitti).
- Tällaisilla materiaaleilla on kaksi eri taitekerrointa riippuen polarisaatiosuunnasta.
- Kaksinaistaittavista materiaaleista voidaan rakentaa optisia komponentteja, jotka jakavat saapuvan valon kahdeksi säteeksi, joiden polarisaatio on toistensa suhteen 90° kääntynyt: **O- (ordinary)** ja **e- (extraordinary)** säteiksi .
- Myös polaroidilevyjä käytetään.



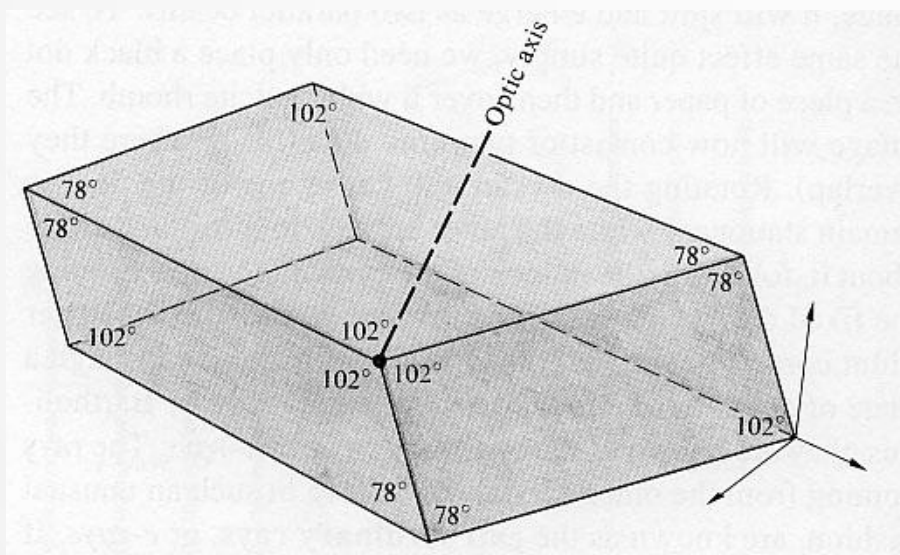
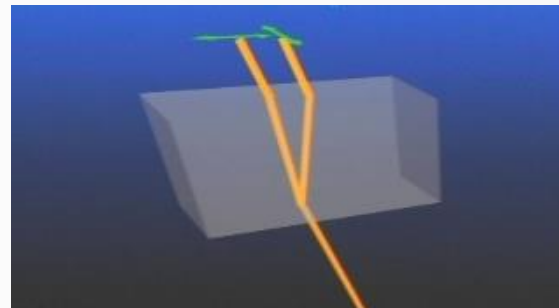
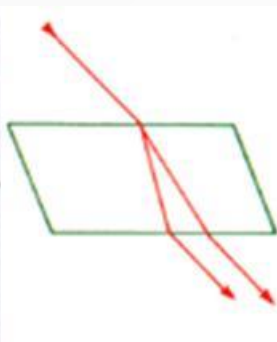
Kahtaistaittava kide



o- ja e-säteiden kuvat polarisaattorin läpi

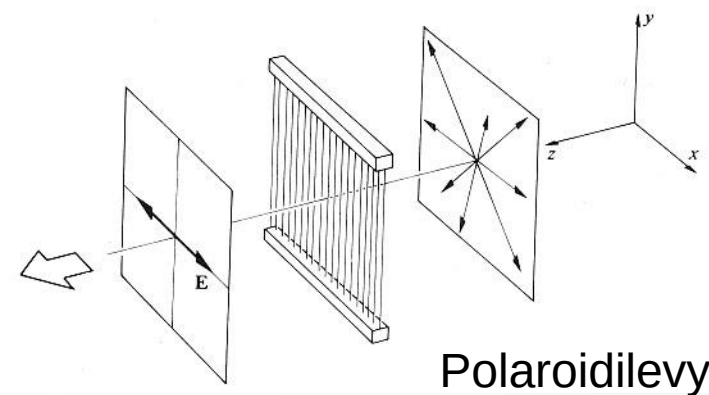
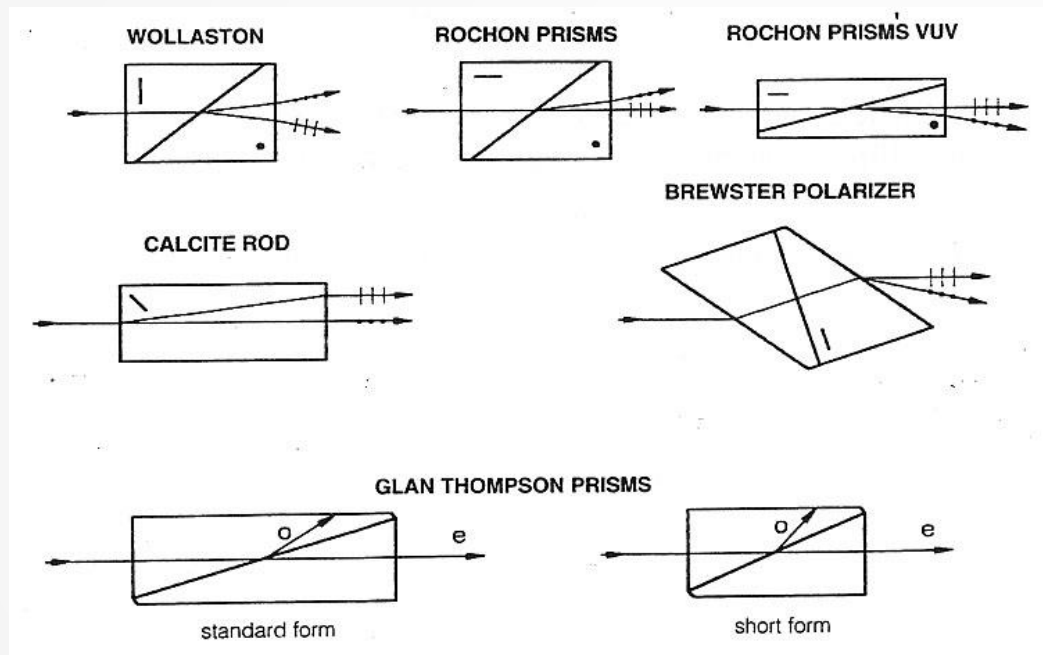


9.3.1 KAHTAISTAITTAVAT POLARISAATTORIT





9.3.2 OPTISET POLARISAATTORI-KOMPONENTIT





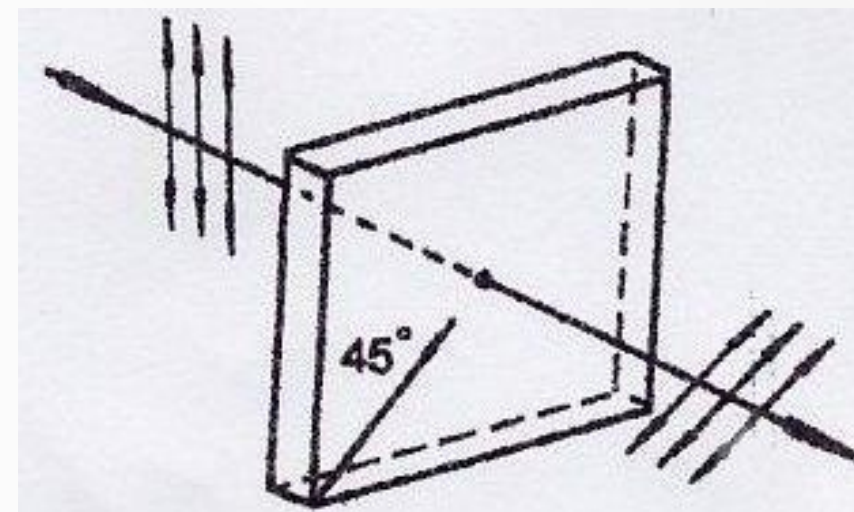
9.3.3 AALTOLEVYT

- Aaltolevyillä voidaan mm. kääntää lineaaripolarisaation tasoa tai muuttaa ympyräpolarisaatiota lineaariseksi.
- Valmistettu kahtaistaittavasta materiaalista, usein kalsiitista, myös tietyistä polymeereistä.
- $\lambda/2$ ja $\lambda/4$ aaltolevyt ovat yleisimmin käytetyt.



9.3.3 $\lambda/2$ AALTOLEVY

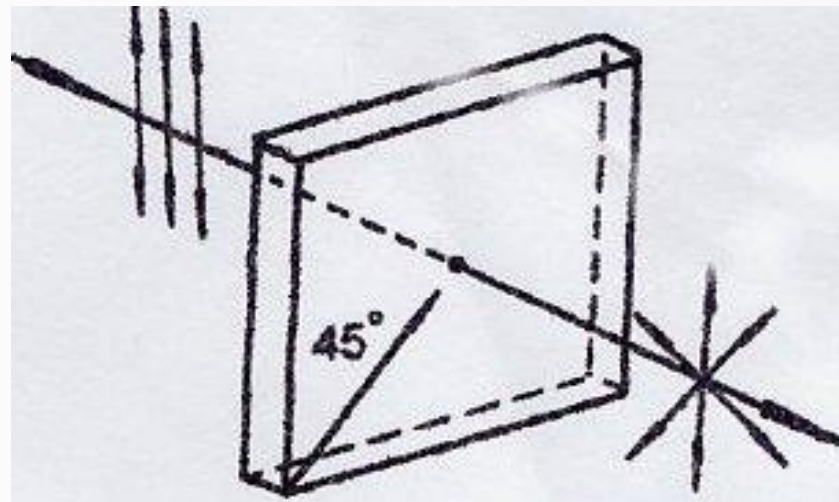
- **Puoliaaltolevyllä** saadaan käännettyä lineaarisen polarisaation suuntaa.
- Vaiheviive o- ja e-säteiden välillä on 180° .
- Kun mittausten välillä käännetään puoliaaltolevyä 0° , 22.5° , 45° ja 62.5° saadaan o- ja e-säteiden intensiteetti mitattua kulmilla 0° , 45° , 90° ja 135° .





9.3.3 $\lambda/4$ AALTOLEVY

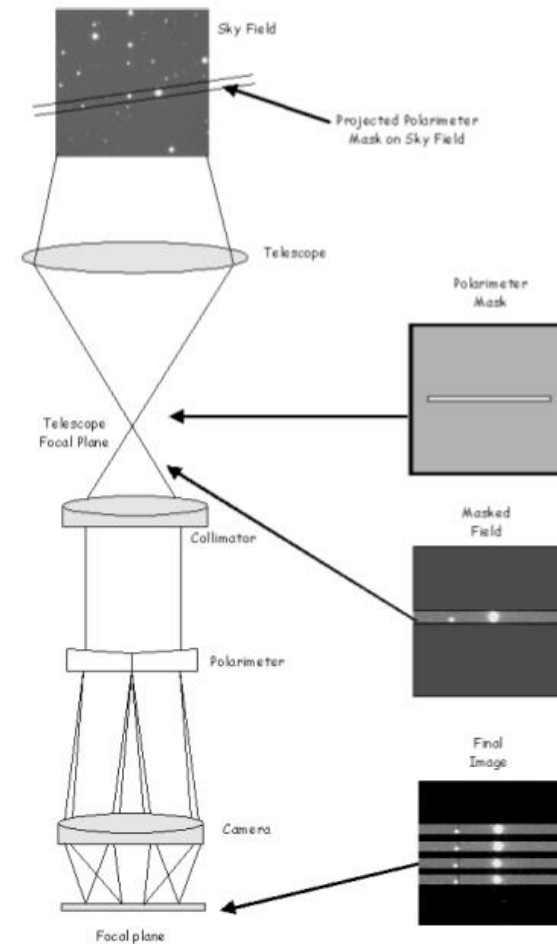
- **Neljäsosa-aaltolevyllä** muuttaa elliptisesti- tai ympyräpolarisoitunut $\Leftrightarrow$ lineaarisesti polarisoitunut
- Vaiheviive on 90° o- ja e-säteiden välillä.





9.3.4 WEDGED DOUBLE WOLLASTON (WEDOWO)

- Nykyaikainen komponentti CCD-polarimetriaan, jolla neljä polarisaatiotilaa saadaan mitattua kerralla.
- Haittapuolena on hyvin rajattu kuvakenttä.





9.4 CCD POLARIMETRIA

- CCD polarimetriassa saadaan yleensä mitattua samanaikaisesti sekä o- että e-säde käyttämällä puolialtolevyn ja kalsiittilevyn yhdistelmää.
- Näin ilmakehän polarisaatio (ja suurin osa muistakin systemaattisista häiriöistä) voidaan jättää huomiotta.
- Ongelmana on melko pieni kuvakenttä ja säteiden kulmaerotus.
- Ongelmaa ei ole jos käytetään polaroidia tms. polarisaattoria, joka päästää vain yhden polarisaatiokulma mittalaitteelle.
 - Mutta silloin menetetään yleensä $> 60\%$ fotoneista.

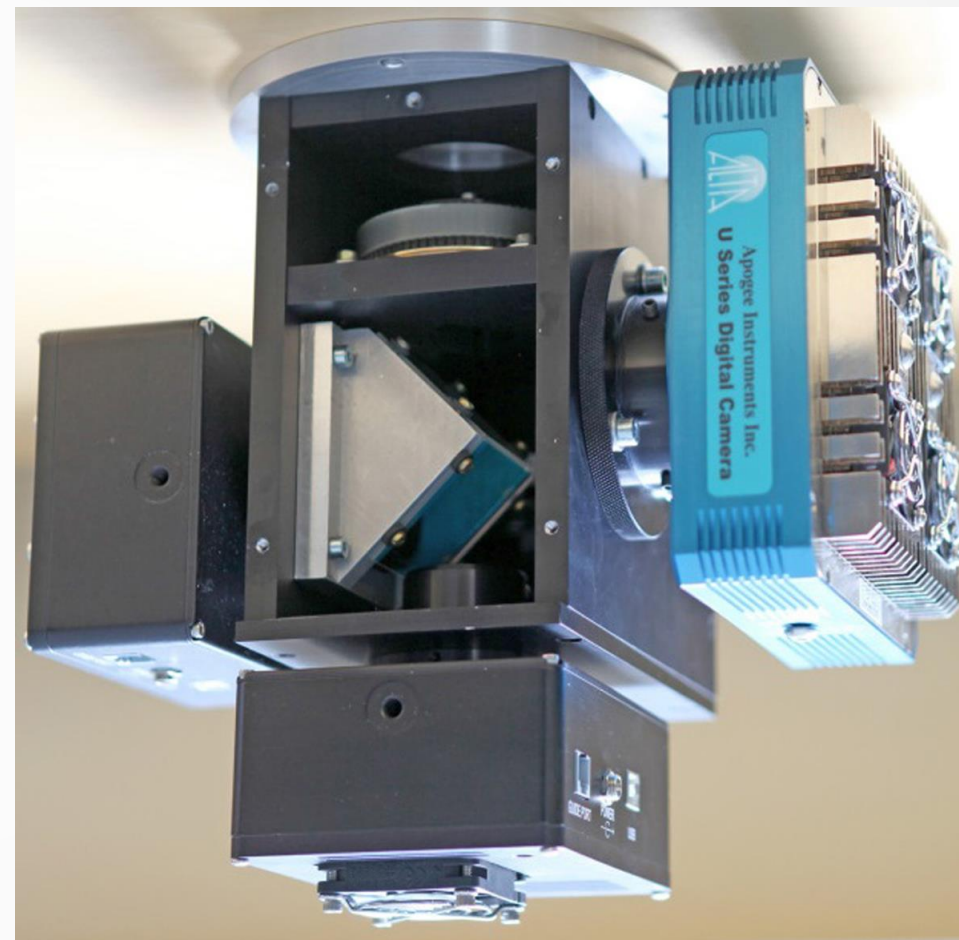
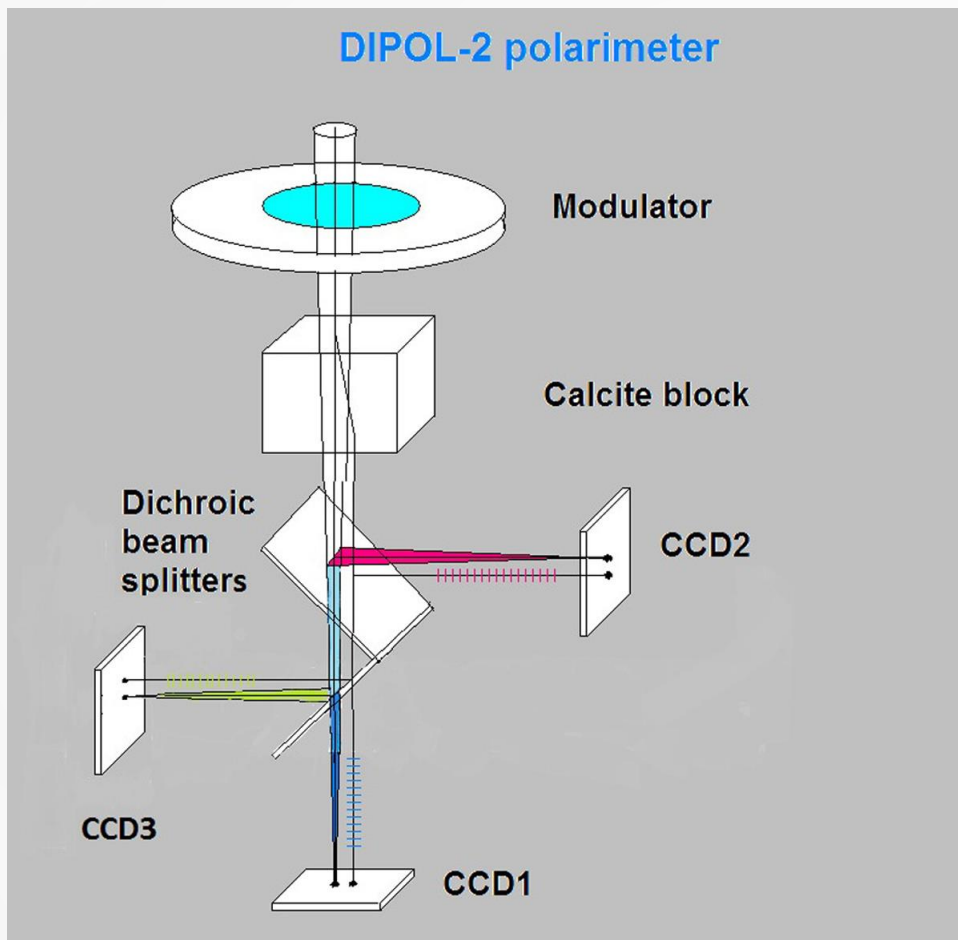


9.4 CCD POLARIMETRIA

- Mittauksissa hyvä pitää mielessä intensiteetin vaihtelu mittauksen eri vaiheissa (esim. puolialtolevyn eri kulmilla), jotta kohde ei saturoidu.
- Polarisaatiomittauksen redusointi tapahtuu pitkälti kuten fotometriassakin.
- Datapisteiden mittaus kuvasta on yleensä differentiaalifotometriaa.



9.4.1 CCD-POLARIMETRI DIPOL-2



Pirola et al. 2020



9.5 POLARISAATIOSTANDARDIT

- Jotta polarisaatiomittaukset saadaan muunnettua vertailukelpoisiksi, on mitattava standardeja.
- Hyviä standardeja on melko vähän ja ne voivat olla hankalia havaita.



9.5.1 NOLLAPOLARISAATION STANDARDIT

- Mittalaitteessa on usein jonkin verran polarisoivia komponentteja => *instrumentti-polarisaatio*, jonka vaikutus tulee poistaa.
- Tätä varten havaitaan kohteita, joiden polarisaatioaste on mahdollisimman pieni.
- Standardi kannattaa havaita kohteen läheltä.

Name	RA (2000)	DEC (2000)	V	B-V	Sp. Type	P _B (%)	Comment
HD 12021	01 57 56.11	-02 05 58.2	8.86	-0.10	B7	0.112 ± 0.025	
HD 14069	02 16 45.16	07 41 11.1	9.00		A0	0.111 ± 0.036	
HD 21447	03 30 00.21	55 27 07.0	5.10	+0.04	A1 IV	0.017 ± 0.030	Bright! Use 1% ND filter in Turpol!
G191B2B	05 05 30.62	52 49 54.0	11.78	-0.30	DA1	0.090 ± 0.048	Faint. More than 1 cycle a 15 min needed on Turpol.
HD 64299	07 52 25.55	-23 17 45.9	10.15	+0.09	A2 V	0.151 ± 0.032	
HD 94851	10 56 44.17	-20 39 51.6	9.10		B9	0.057 ± 0.018	
GD 319	12 50 04.49	55 06 02.5	12.32	+0.04	DA	0.045 ± 0.047	Faint. More than 1 cycle a 15 min needed on Turpol.
BD +33 2642	15 51 59.86	32 56 54.8	10.84	-0.17	B2 IV	0.145 ± 0.029	
HD 154892	17 07 41.38	15 12 37.6	8.00		F8 V	0.050 ± 0.030	
BD +32 3739	20 12 02.11	32 47 43.5	9.31	+0.20	A6 V	0.039 ± 0.021	
BD +28 4211	21 51 11.07	28 51 51.8	10.53	-0.34	Op	0.063 ± 0.023	
HD 212311	22 21 58.55	56 31 52.8	8.10	+0.08	A0 V	0.028 ± 0.025	

Nordic Optical Telescope:n standardeja.



9.5.2 KORKEAN POLARISAATION STANDARDIT

- Lineaaripolarisoituneita tähtiä, joiden positiokulma tunnetaan.
- Tarvitaan instrumentti-polarisaatiokulman kalibroimiseksi.
- Havaittava vähintään kahta tähteä, joiden polarisaatiokulmat eroavat riittävästi.

Name	RA (2000)	DEC (2000)	V	B-V	Sp. Type	P (%)	angle	N _{obs}	Ref.
BD +64 106	00 57 36.71	64 51 26.5	10.34	+0.69	B1 V	U: 5.110 ± 0.104 B: 5.506 ± 0.090 V: 5.687 ± 0.037 R: 5.150 ± 0.098 I: 4.696 ± 0.052	97.04 ± 0.58 97.15 ± 0.47 96.63 ± 0.18 96.74 ± 0.54 96.89 ± 0.32	2 2 2 2 2	1. & 4.
BD +59 389	02 02 42.06	60 15 26.5	9.07	+1.01	F0 Ib	U: 5.772 ± 0.051 B: 6.345 ± 0.035 V: 6.701 ± 0.015 R: 6.430 ± 0.022 I: 5.797 ± 0.023	98.22 ± 0.26 98.14 ± 0.16 98.09 ± 0.07 98.14 ± 0.10 98.26 ± 0.11	4 4 4 4 4	1. & 4.
HD 19820	03 14 05.35	59 33 47.7	7.11	+0.51	O9 IV	U: 4.218 ± 0.022 B: 4.699 ± 0.036 V: 4.787 ± 0.028 R: 4.562 ± 0.025 I: 4.081 ± 0.024	115.57 ± 0.15 115.70 ± 0.22 114.93 ± 0.17 114.46 ± 0.16 114.48 ± 0.17	3 3 3 3 3	1. & 4.
HD 25443	04 06 08.07	62 06 07.0	6.78	+0.29	B0 III	U: 4.930 ± 0.062 B: 5.232 ± 0.092 V: 5.127 ± 0.061 R: 4.734 ± 0.045 I: 4.249 ± 0.041	134.55 ± 0.36 134.28 ± 0.51 134.23 ± 0.34 133.65 ± 0.28 134.21 ± 0.28	1 1 1 1 1	1. & 4.
BD +25 727	04 44 24.90	25 31 42.7	9.50	+0.72	A2 III	V: 4.27 ± 0.012	33.8	1	4. NB! Variable!
HD 251204	06 05 05.67	23 23 38.9	10.28	+0.28	B0 IV	V: 4.04 ± 0.066	147	1	4. NB! Variable?
HD 160529	17 41 58.95	-33 30 16.3	6.67	1.28	A2 Ia	U: 6.31 ± 0.13 B: 6.97 ± 0.03 V: 7.31 ± 0.04 R: 7.04 ± 0.01 "I": 6.53 ± 0.03	20.3 ± 0.2 20.1 ± 0.1 20.4 ± 0.1 20.8 ± 0.1 21.3 ± 0.1	3 4 10 6 5	2.

NOT:n stadardeja



9.6 LINEAARIPOLARIMETRIA

- Mittaus esim. puolialtolevyllä.
- Polarisaatioasteen ja -kulman määrittäminen (esim.), mitataan intensiteetti kulmilla 0, 45, 90 ja 135:

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

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

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

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

- Polarisaatioasteen virhe: $E_P = \frac{\sqrt{2}}{S/N}$



9.7 YMPYRÄPOLARIMETRIA

- Käytetään puolιαaltolevyn sijasta neljäsosa-aaltolevyä → muutetaan lineaaripolarisaatioksi.
- Mitataan aaltolevyn kulmilla 0° , 90° , 45° ja 135° .
- Kohteesta tulevasta lineaaripolarisaatiosta voi päästä eroon pyörittämällä mittauksen aikana neljäsosa-aaltolevyn eteen sijoitettua puolιαaltolevyä.
- Ympyräpolarisaation mittauksiin ei ole kovin hyviä standardeja.