

Bloco 9

Polarimetria

Atualizado: 2014

AST203 – CVR

9-1

Bibliografia

- Kitchin – Seção 5.2

AST203 – CVR

9-3

Polarização

- A polarização relaciona-se à distribuição dos vetores do campo elétrico (e portanto também do magnético) de um feixe de radiação eletromagnética (RE)
- Se um feixe é completamente polarizado, o extremo do vetor que representa a amplitude do campo elétrico descreve uma **elipse** no plano perpendicular ao de propagação
 - ↳ o círculo e a reta são casos especiais de elipse

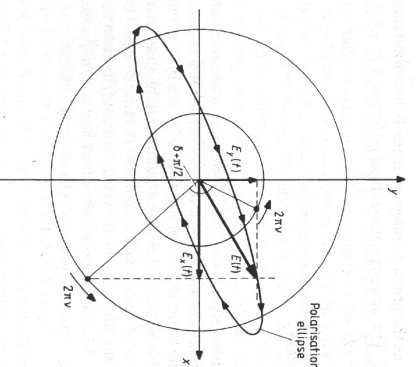


Figure 5.2.1. The x and y components of the elliptically polarized component of partially elliptically polarized light.

AST203 – CVR

9-4

- Em um feixe totalmente não polarizado os vetores elétricos distribuem-se de forma aleatória
- Um feixe *parcialmente* polarizado pode ser decomposto em duas componentes
 - ↳ uma completamente polarizada
 - ↳ outra completamente não-polarizada
- A fração da intensidade da componente completamente polarizada com relação a intensidade total é o **grau de polarização**

AST203 – CVR

9-5

Animações de András Szilágyi

<http://www.enzim.hu/~szia/cddemo/edemo0.htm>

Veja a Parte I, por enquanto...

Todas as animações desta aula são da fonte acima!

Durante a aula, acessar as animações no disco.

Representação matemática

- Se consideramos um sistema cartesiano, XYZ, no qual uma onda eletromagnética completamente polarizada propaga-se ao longo do eixo z, podemos representar os campos elétricos nas direções x e y por:

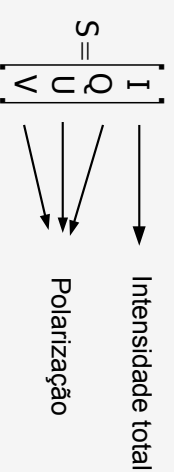
$$E_x(t) = e_1 \cos(2\pi \nu t)$$

$$E_y(t) = e_2 \cos(2\pi \nu t + \delta)$$

- ↪ e_1 , e_2 : amplitudes das componentes nas direções x e y, respectivamente
- ↪ ν : frequência da radiação
- ↪ δ : diferença de fase entre componentes

- Os parâmetros da elipse de polarização,
 - ↪ a: semi-eixo maior
 - ↪ b: semi-eixo menor
 - ↪ ϕ : ângulo entre eixo x e semi-eixo maiorcomo função dos parâmetros de E_x e E_y podem ser encontrados no Kitchin

- Um feixe de RE pode também ser descrito por seu **vetor de Stokes**, S:



- Os parâmetros de Stokes (componentes do vetor) são definidos, a partir dos parâmetros que descrevem o campo elétrico, como:
 - ↪ $Q = e_1^2 - e_2^2$
 - ↪ $U = 2 e_1 e_2 \cos \delta$
 - ↪ $V = 2 e_1 e_2 \sin \delta$

- A intensidade da componente polarizada, I_p , é dada por:
 - ↪ $I_p = (Q^2 + U^2 + V^2)^{1/2}$

- O grau de polarização total, p , é, então, dado por:
 - ↪ $p = I_p/I$

- Definições bastante usadas são:

↪ o grau de polarização linear, π_L (é comum usar P)

$$\rightarrow \pi_L = (Q^2 + U^2)^{1/2}/I$$

* Onde a direção da polarização linear é dada por:

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{U}{Q} \right)$$

↪ o grau de polarização circular, π_C

$$\rightarrow \pi_C = V/I$$

Propriedade importante do vetor de Stokes

Considere vários feixes incoerentes de RE sendo cada um representado por um vetor de Stokes.

O feixe resultante da combinação dos feixes acima possui um vetor de Stokes que é a soma dos vetores de Stokes de cada feixe individual.

Índice de refração

- Podemos definir o índice de refração como uma quantidade imaginária, m:
 - ↪ $m = n + i k$,
 - n: difração, espalhamento
 - k: absorção

Dicroísmo

- Um material é dito dicroico se a absorção (parte imaginária do índice de refração) depende da polarização do feixe incidente
 - ↪ Exemplo de meio dicroico: meio interestelar

Animações de novo!

Birefringência

- Um material é dito birefringente se o seu comportamento óptico depende da polarização da radiação incidente
 - ↪ o índice de refração (=velocidade de propagação) depende da polarização incidente
- Nesse caso, um feixe de luz não-polarizada é decomposto em dois feixes chamados ordinário e extraordinário, de polarização ortogonais, ao atravessar um meio birefringente



Exemplo da separação de feixes por um material birefringente, no caso, um cristal de calcita (CaCO_3)

Wikipedia

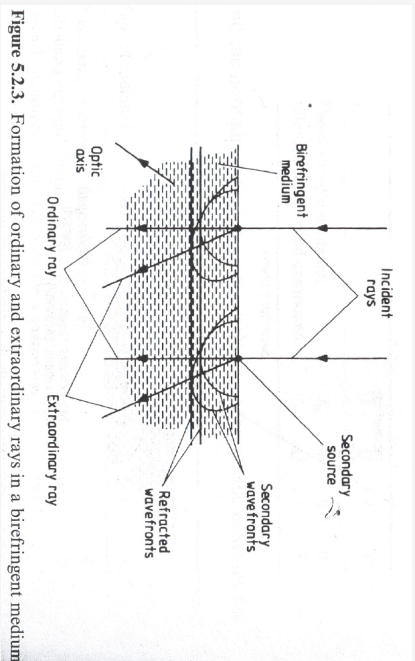


Figure 5.2.3. Formation of ordinary and extraordinary rays in a birefringent medium.

Kitchin

Elementos ópticos para polarimetria

- A medida da polarização é comumente realizada por elementos ópticos que podem ser classificados em:
 - ↳ polarizadores ou analisadores
 - permitem a separação de um feixe em suas componentes de polarizações ortogonais ou a eliminação de uma dessas componentes
 - ↳ retardadores (ou conversores ou lâminas de fase)
 - mudam a diferença de fase entre as componentes de um feixe

Cálculo de Mueller

transformação do vetor de Stokes representada por matriz

- Um material birefringente tem necessariamente uma estrutura anisotrópica. Desse modo, os cristais são via de regra birefringentes

- Se um material possui um único eixo de anisotropia (isto é, ele é uniaxial), podemos considerar dois índices de refração para descrever a refração no material. E, nesse caso, o grau de birefringência, Δn , é definido como a diferença entre esses índices (aqui só consideramos a parte real)

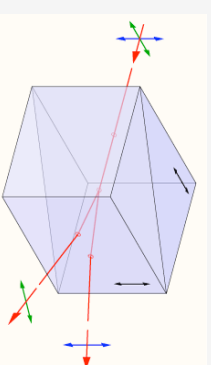
$$\Delta n = n_e - n_o$$

- n_e : índice de refração para um feixe de polarização paralelo ao eixo de anisotropia (feixe extraordinário)
- n_o : índice de refração para um feixe de polarização perpendicular ao eixo de anisotropia (feixe ordinário)

* Calcita: $n_o=1.658$; $n_e=1.486$; $\Delta n=-0.172$

Polarizadores

- Duas classes de polarizadores
 - ↳ separadores de feixe
 - separa o feixe incidente em duas componentes com polarizações ortogonais sendo uma delas paralela ao eixo óptico
 - Exemplo: calcita



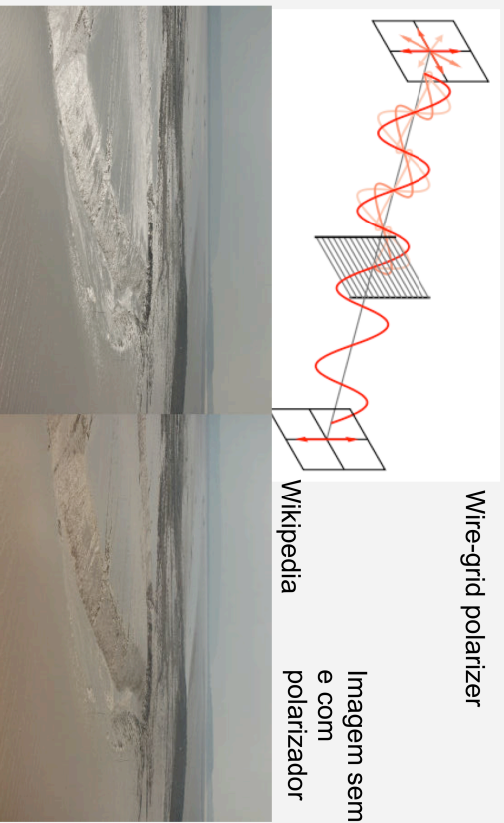
Prisma de Wollaston
dois prismas de calcita triangulares cimentados juntos de modo que seus eixos sejam perpendiculares

Wikipedia

↪ polarizadores por absorção (dicroísmo)

→ suprime uma das componentes do feixe

→ Exemplo: polaróide (óculos de sol)



Wire-grid polarizer

Wikipedia

Imagem sem e com polarizador

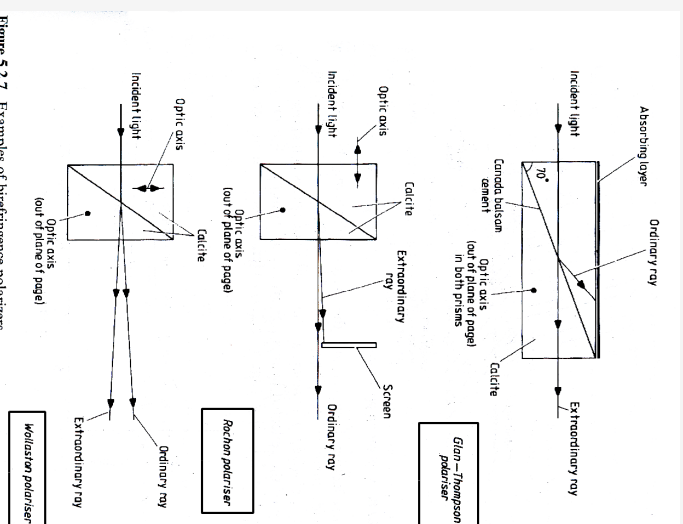


Figure 5.2.7. Examples of birefringence polarizers.

- Um feixe com vetor de Stokes S é transformado em S' ao atravessar um polarizador perfeito que só permite a passagem da componente polarizada linear com ângulo q pela seguinte expressão:

$$\begin{bmatrix} I' \\ Q' \\ U' \\ V' \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\theta & \sin 2\theta & 0 \\ \cos 2\theta & \cos^2 2\theta & \sin^2 2\theta & 0 \\ \sin 2\theta & \sin^2 2\theta & \cos^2 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix}$$

Retardadores

- Em primeira aproximação, um material birefringente introduz uma diferença de fase entre as componentes ordinária e extraordinária dada por:

$$\delta = \frac{2\pi d}{\lambda} \Delta n$$

- Um retardador pode, assim, transformar o estado de polarização de um feixe

↪ Se $\delta = 90^\circ$, temos uma lâmina de quarto-de-onda que converte a polarização em circular em linear ou vice-versa

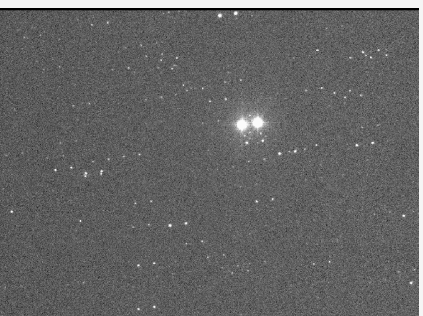
↪ Se $\delta = 180^\circ$, temos uma lâmina de meia-de-onda que gira o ângulo da polarização linear

- A transformação de um feixe por um retardador com eixo óptico a um ângulo j pode ser expressa como:

$$\begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2 2\varphi + \sin^2 2\varphi \cos \delta & \cos 2\varphi \sin 2\varphi (1 - \cos \delta) & -\sin 2\varphi \sin \delta \\ 0 & \cos 2\varphi \sin 2\varphi (1 - \cos \delta) & \sin^2 2\varphi + \cos^2 2\varphi \cos \delta & \cos 2\varphi \sin \delta \\ 0 & \sin 2\varphi \sin \delta & -\cos 2\varphi \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix}$$

Polarímetro

- Vários desenhos ópticos permitem a medida da polarização. Vamos nos ater aqui ao funcionamento da gaveta polarimétrica instalada no Observatório do Pico do Dias/LNA desenvolvida por Magalhães et al. (1996)

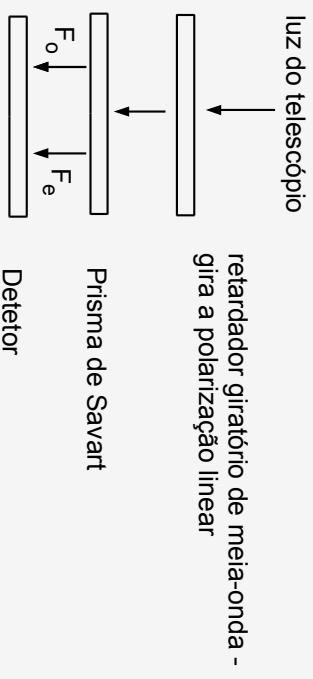


Exemplo de imagem obtida com a gaveta

Duplicação de imagens causada pelo analisador

Se um feixe representado pelo vetor de Stokes S atravessa dois elementos ópticos representados pelas matrizes A e B , e o elemento representado pela matriz A é o primeiro a ser atravessado, temos que o feixe final, representado pelo vetor S' , é dado por:

$$S' = B A S$$



Vamos simular o que é detectado no caso de um feixe de entrada completamente polarizado na direção do feixe ordinário.

Medindo a polarização

- Para se medir a polarização de uma estrela (ou outro objeto puntiforme), obtêm-se várias imagens com o retardador em diferentes posições (isto é, girado em torno de seu eixo por diferentes ângulos)

- Definimos a quantidade X como sendo:

$$X = \frac{F_o - F_e}{F_o + F_e}$$

- Essa quantidade pode ser expressa, para cada uma das posições do retardador, como uma função do vetor de Stokes incidente.
- Usa-se todas as imagens para se realizar um ajuste de χ^2 para determinar o vetor de Stokes incidente

Equações

Dissertação – Targon (2008)
lâmina de meia-onda

$$\begin{bmatrix} I_i \\ Q_i \\ U_i \\ V_i \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\varphi & \sin 2\varphi & 0 \\ \cos 2\varphi & \cos^2 2\varphi & \frac{1}{2} \sin 4\varphi & 0 \\ \sin 2\varphi & \frac{1}{2} \sin 4\varphi & \sin^2 2\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

e:

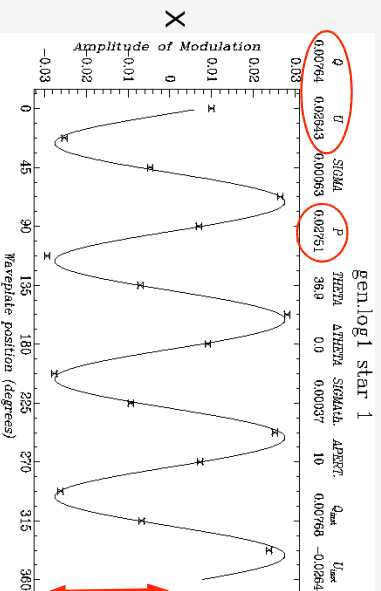
$$\begin{bmatrix} I_i \\ Q_i \\ U_i \\ V_i \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -\cos 2\varphi & -\sin 2\varphi & 0 \\ -\cos 2\varphi & \cos^2 2\varphi & \frac{1}{2} \sin 4\varphi & 0 \\ -\sin 2\varphi & \frac{1}{2} \sin 4\varphi & \sin^2 2\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix}, \quad (2.25)$$

$$I'_{\alpha,i} = I + Q \cos(2\varphi - 4\psi_i) - U \sin(2\varphi - 4\psi_i)$$

$$I'_{\epsilon,i} = I - Q \cos(2\varphi - 4\psi_i) + U \sin(2\varphi - 4\psi_i)$$

$$X_i = \frac{Q}{I} \cos(2\varphi - 4\psi_i) - \frac{U}{I} \sin(2\varphi - 4\psi_i),$$

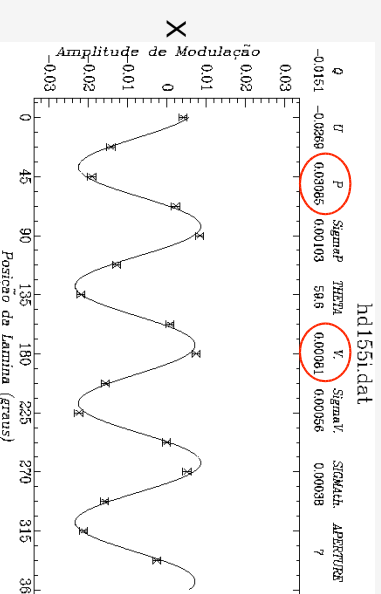
Exemplo de medida com lâmina de meia-onda



Cada ponto é obtido de uma imagem

- Usando o cálculo de Mueller, pode-se mostrar que o uso de uma lâmina de meia-onda faz com o valor de X não dependa de V - o quarto elemento do vetor de Stokes relacionado com a polarização circular

Exemplo de medida com lâmina de quarto-de-onda

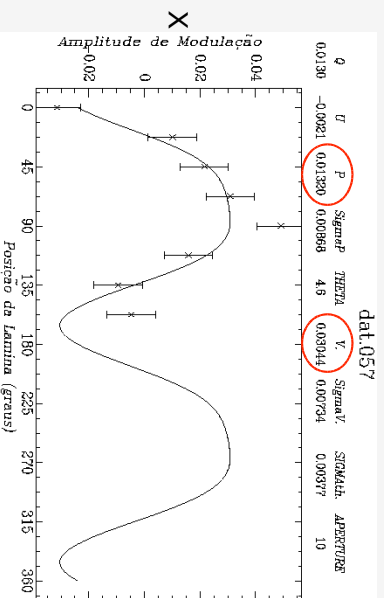


Cada ponto é obtido de uma imagem

- O uso da lâmina de quarto-de-onda faz com que X dependa de Q , U e V .

Exemplo de medida com lâmina de quarto-de-onda:

objeto com polarização circular alta



Cada ponto é obtido de uma imagem

- O uso da lâmina de quarto-de-onda faz com que X dependa de Q, U e V.

Erro da polarização

- Considerando que a estimativa do grau de polarização seja:
 - ↪ $P \pm \sigma_P$o erro do ângulo da polarização é dado por:
 - ↪ $\sigma_{\theta} = 90/\pi \sigma_P/P = 28.6479 \sigma_P/P$ (em graus)

SPARC4

- Instrumento
 - ↪ câmera
 - ↪ polarímetro
 - ↪ resolução temporal 1s
 - ↪ 4 bandas simultâneas
- Maio/2012
 - ↪ Projeto conceitual

