

# Polarizzazione della luce e lamine di ritardo

Filippo Audisio, Cataldo Insalaco, Telemaco Pezzoni

15 gennaio 2026

## 1 Obiettivo dell'esperienza

L'obiettivo dell'esperienza è studiare il comportamento della luce polarizzata e delle lamine di ritardo, in particolare:

- Verificare la legge di Malus  $I(\theta) = I_0 \cos^2(\theta)$ .
- Studiare l'utilizzo della lamina  $\lambda/2$ .
- Studiare l'utilizzo della lamina  $\lambda/4$ .
- Mostrare che la luce del LED non è polarizzata.
- Calcolare i parametri di Stokes per diversi stati di polarizzazione.

## 2 Materiali e Metodi

### 2.1 Dotazione sperimentale

- LED e fotodiodo + scatola di polarizzazione.
- 2 lenti per la focalizzazione.
- 2 polarizzatori lineari.
- Lamine di ritardo  $\lambda/2$  e  $\lambda/4$ .
- Supporti con ghiera rotante graduata.
- Barra di supporto.
- Generatore di tensione alternata.
- Oscilloscopio.
- Cavi coassiali e sdoppiatore.

### 2.2 Procedura sperimentale

Come configurazione iniziale sono stati posizionati il LED ed il fotodiodo alle estremità della barra di supporto. Dal generatore di tensione alternata è stata sdoppiato il segnale di un'onda quadra a  $\sim 6V$  e  $\sim 1kHz$ , il quale è stato mandato al LED per alimentarlo e ad un canale dell'oscilloscopio come trigger. Il fotodiodo è stato polarizzato inversamente,

grazie alla scatola di polarizzazione, e collegato all'altro canale dell'oscilloscopio così da poter misurare i valori di intensità trasmessa. Sia al LED che al fotodiodo sono state applicate delle lenti per focalizzare il fascio luminoso, successivamente è stato montato un primo polarizzatore lineare sul LED ed un secondo sul supporto graduato posizionato fra LED e fotodiodo. Infine usando il secondo polarizzatore come analizzatore si è trovato l'angolo di massima trasmissione così da misurare l'eventuale offset dovuto allo sfasamento tra i due polarizzatori.

### 2.2.1 Verifica della legge di Malus

Dopo aver misurato il valore massimo di intensità trasmessa  $V_0$ , si è ruotato gradualmente l'analizzatore così da misurare  $V$  in funzione di  $\theta_a$ .

### 2.2.2 Studio della lamina $\lambda/2$

Dopo aver inserito la lamina  $\lambda/2$  fra i due polarizzatori e aver allineato il sistema così da misurare il massimo dell'intensità, ruotando la lamina di un angolo  $\theta_{\lambda/2}$  sono stati misurati con l'analizzatore gli angoli  $\theta_a^{max}$  e  $\theta_a^{min}$  corrispondenti al massimo ed al minimo di trasmissione.

### 2.2.3 Studio della lamina $\lambda/4$

Dopo aver inserito la lamina  $\lambda/4$  fra i due polarizzatori e rimosso momentaneamente l'analizzatore, si è innanzitutto verificato che ruotando la lamina l'intensità misurata dal fotodiodo non variasse. Successivamente è stato rimontato l'analizzatore e si è misurata l'intensità uscente in funzione dell'angolo di rotazione dell'analizzatore  $\theta_a$  con lamina posizionata a  $\theta_{\lambda/4} = 0^\circ, 90^\circ, 45^\circ, 70^\circ, 120^\circ$ .

### 2.2.4 Polarizzazione della luce del LED

Togliendo tutti gli elementi ottici fra LED e fotodiodo (escluse le lenti di focalizzazione) si è misurata l'intensità rilevata dal fotodiodo  $V_{LED}$ , dopodiché è stato montato l'analizzatore e si è misurata l'intensità in funzione dell'angolo. Dopodiché si è rimontata la lamina  $\lambda/4$  tra LED e analizzatore e si è misurata l'intensità trasmessa con l'analizzatore posizionato a  $45^\circ$  rispetto alla lamina; si è infine verificato che il risultato non cambiasse ruotando la lamina o l'analizzatore.

### 2.2.5 Calcolo dei parametri di Stokes

Per avere luce polarizzata linearmente si è rimontato il sistema nella configurazione iniziale con solamente polarizzatore lineare sul LED ed analizzatore, per luce polarizzata circolarmente si è aggiunto tra i due elementi una lamina  $\lambda/4$  a  $45^\circ$  rispetto al primo polarizzatore, mentre per luce polarizzata ellitticamente si è orientata la lamina  $\lambda/4$  a  $70^\circ$  e poi  $120^\circ$ . Per ciascuna di queste configurazioni si è misurata l'intensità trasmessa con analizzatore posizionato a  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ , dopodiché si è inserita una seconda lamina  $\lambda/4$  a  $90^\circ$  e si è misurata l'intensità con analizzatore a  $45^\circ$ .

## 3 Analisi dei dati e grafici

### 3.1 Tabelle risultati

In ogni sezione i valori di intensità  $I$  sono stati ottenuti normalizzando i valori misurati dal fotodiodo rispetto al valore massimo misurato  $V_0$ . Tutti gli errori riportati corrispondono a deviazioni standard  $\sigma$ .

#### 3.1.1 Verifica della legge di Malus

I parametri sono stati ricavati da un fit della legge di Malus:  $I(\theta_a) = A \cdot \cos^2(\theta_a - \theta_{off}) + I^{fondo}$ .

Grandezza	Valore Teorico	Valore Ricavato	Errore Relativo [%]
$A$	1	$0.97 \pm 0.02$	1.96
$\theta_{off}$ [deg]	$-10 \pm 2$	$-9.2 \pm 0.6$	6.39
$I^{fondo}$ [mV]	0	$0.06 \pm 0.01$	19.44

**Tabella 1:** Parametri della luce polarizzata linearmente.

#### 3.1.2 Studio della lamina $\lambda/2$

I parametri sono stati ottenuti da un fit della relazione:  $\theta_a = m \cdot (\theta_{\lambda/2} - \theta'_{off}) + K$ , ripetuta per  $\theta_a$  corrispondenti a massimi e minimi.

Misura	$m$	$\theta'_{off}$ [deg]	$K$ [deg]
Massimi	2	20	0
Minimi	2	20	90

**Tabella 2:** Relazione lineare tra angolo di rotazione della lamina e angolo dell'analizzatore.

#### 3.1.3 Studio della lamina $\lambda/4$

Per la luce polarizzata linearmente i dati sono stati analizzati con la legge di Malus.

$\theta_{\lambda/4}$ [deg]	$A$	$V_{norm}^{fondo}$ [mV]
0	$0.93 \pm 0.05$	$0.08 \pm 0.04$
90	$0.94 \pm 0.01$	$0.07 \pm 0.01$

**Tabella 3:** Parametri della luce polarizzata linearmente ottenuti dal fit della legge di Malus.

Invece per i restanti casi è stata usata la funzione più generale:  $I(\theta_a) = I_x \cdot \cos^2(\theta_a - \theta_1) + I_y \cdot \sin^2(\theta_a - \theta_1)$ .  $\theta_1$  corrisponde all'orientazione dell'asse minore dell'ellisse di polarizzazione, si può ricavare l'asse maggiore  $\theta_2 = \theta_1 + 90^\circ$ .

$\theta_{\lambda/4}$ [deg]	$I_x$ [mV]	$I_y$ [mV]	$\theta_1$ [deg]	$\theta_2$ [deg]
45	$1.01 \pm 0.01$	$0.92 \pm 0.01$	$-8 \pm 6$	$82 \pm 6$
70	$1.01 \pm 0.02$	$0.10 \pm 0.01$	$-18 \pm 1$	$72 \pm 1$
120	$1.04 \pm 0.02$	$0.81 \pm 0.02$	$23 \pm 3$	$113 \pm 3$

**Tabella 4:** Parametri ottenuti dal fit generale in funzione dell'angolo di rotazione dell'analizzatore.

### 3.1.4 Polarizzazione della luce del LED

Si è verificato che tali valori non variano né con  $\theta_{\lambda/4} = 45^\circ$ ,  $\theta_a = 0^\circ$ , né ruotando la lamina o l'analizzatore.

Configurazione	$V/V_{LED}$
$\lambda/4$	$0.37 \pm 0.01$
$\lambda/4 + \text{Analizzatore}$	$0.32 \pm 0.01$

**Tabella 5:** Intensità misurata dal fotodiodo con e senza analizzatore.

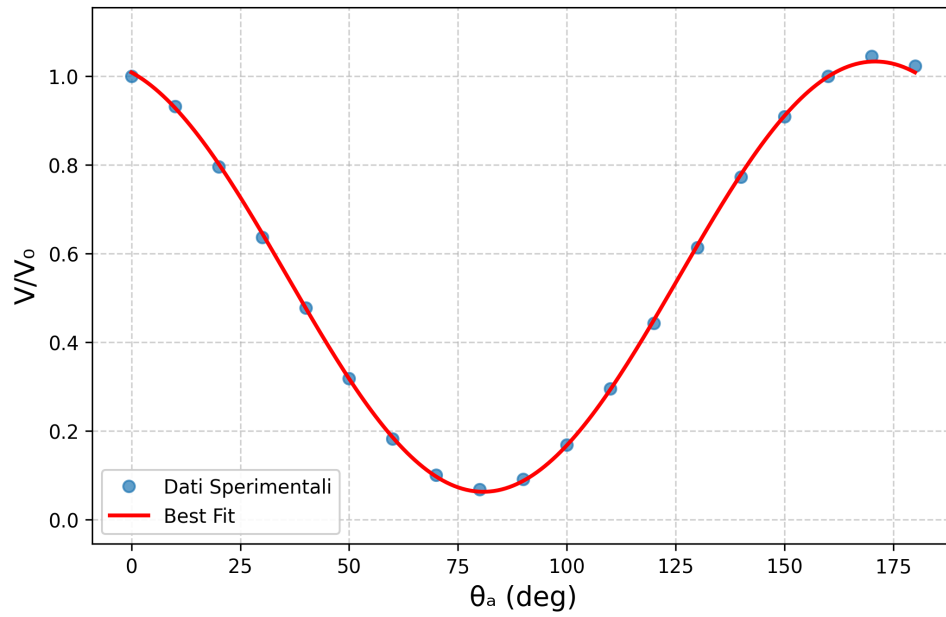
### 3.1.5 Parametri di Stokes

Polarizzazione	$S_0$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$\theta_0$ [deg]	$I_x$	$I_y$	DoP
Lineare	1.09	0.91	-0.25	0.02	-8	1.02	0.07	0.87
Circolare	1.95	0.05	0	-1.70	NaN	1	0.95	0.88
Ellittica $70^\circ$	1.19	0.81	-0.56	-0.36	-18	1.09	0.11	0.88
Ellittica $120^\circ$	1.87	0.13	0.18	1.30	27	1.05	0.83	0.71

**Tabella 6:** Parametri di Stokes per la luce polarizzata in vari stati.

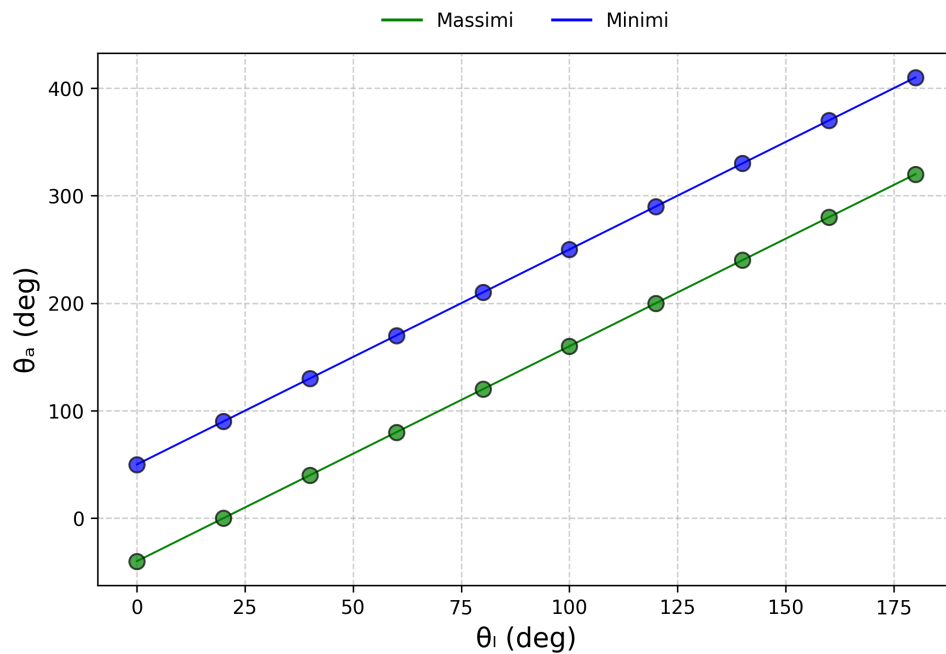
## 3.2 Grafici sperimentali e curve di regressione

### 3.2.1 Verifica della legge di Malus



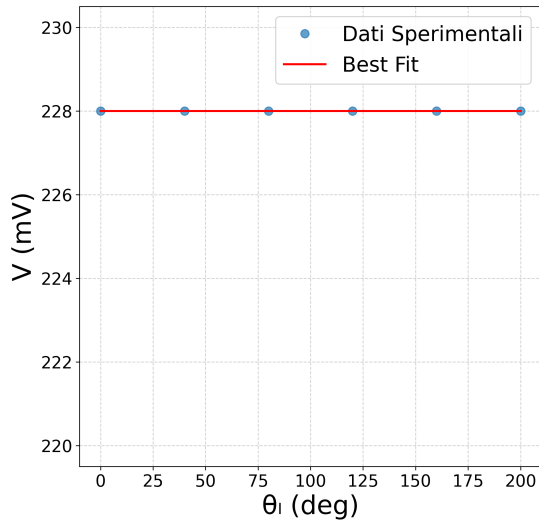
**Figura 1:** Intensità trasmessa in funzione dell'angolo di rotazione dell'analizzatore

### 3.2.2 Studio della lamina $\lambda/2$

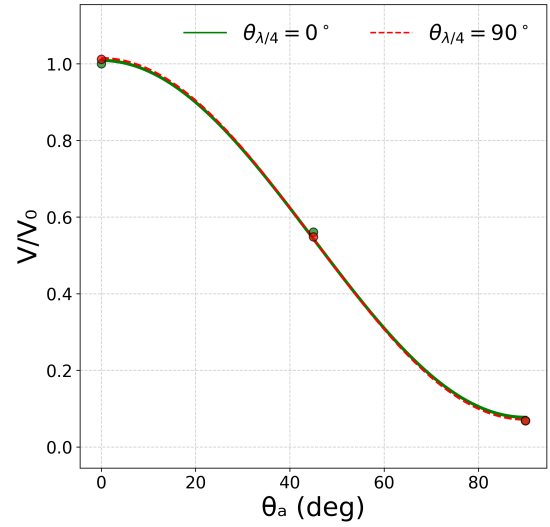


**Figura 2:** Angolo di rotazione dell'analizzatore in funzione dell'angolo di rotazione della lamina  $\lambda/2$  per massimi e minimi di trasmissione.

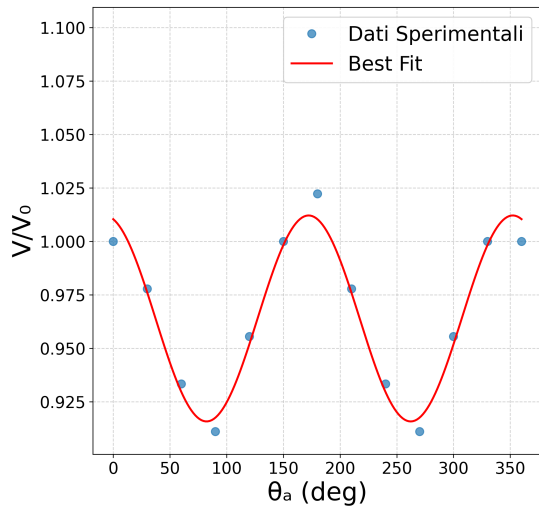
### 3.2.3 Studio della lamina $\lambda/4$



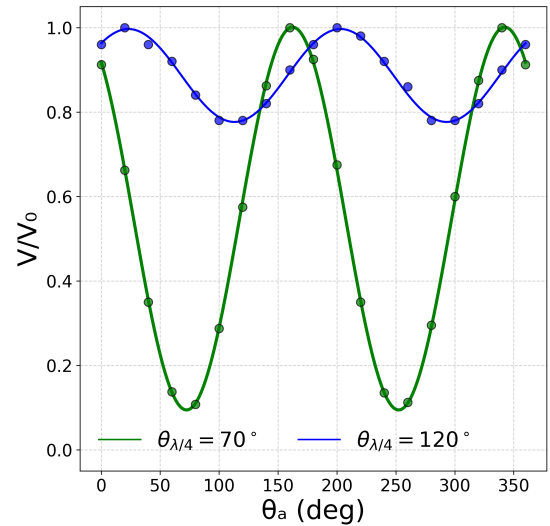
(a) Senza analizzatore.



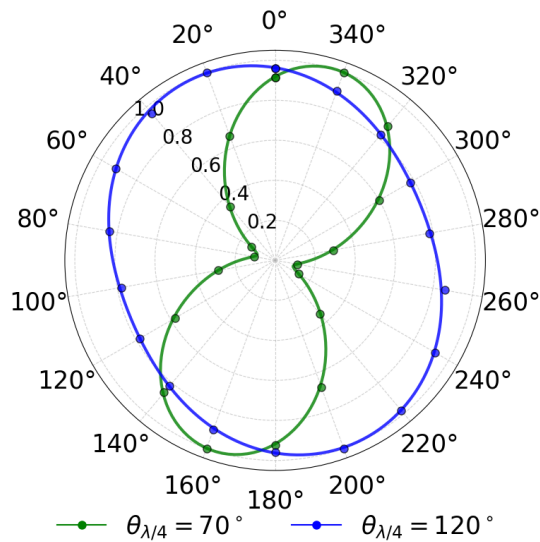
(b)  $\theta_{\lambda/4} = 0^\circ$  e  $90^\circ$ .



(c)  $\theta_{\lambda/4} = 45^\circ$ .



(d)  $\theta_{\lambda/4} = 70^\circ$  e  $120^\circ$ .



(e) Rappresentazione polare

## 4 Conclusioni

I valori dei parametri ricavati durante la verifica della legge di Malus sono compatibili con i valori attesi: il valore teorico per  $\theta_{off}$  corrisponde in realtà ad una misura dell'offset iniziale dovuto al disallineamento tra il polarizzatore, tuttavia vista la scarsa sensibilità del supporto graduato ( $\sim 2^\circ$ ) il valore ottenuto dal fit è più affidabile; nelle restanti fasi dell'esperienza se ne è tenuto debitamente conto quando necessario. L'intensità di fondo invece è dovuta ad illuminazione ambientale.

Una lamina  $\lambda/2$  colpita da luce polarizzata linearmente ne ruota il piano di polarizzazione di un angolo doppio rispetto a quello formato dall'asse ottico della lamina e la polarizzazione incidente; i risultati ottenuti riflettono perfettamente questo comportamento. L'effettivo valore di  $\theta'_{off}$  è stato successivamente confermato dal professore: infatti la lamina era ruotata rispetto allo 0 proprio dell'angolo trovato. In questa sezione non sono stati riportati gli errori poiché la semplicità del fit lineare e soprattutto la scarsa sensibilità della ghiera hanno causato un perfetto accordo con la relazione teorica.

Durante lo studio di  $\lambda_4$  si è inizialmente ottenuto un fascio polarizzato linearmente; le misure del quale, analizzate con la legge di Malus, hanno restituito parametri ragionevoli ed in accordo con la prima fase. Successivamente si sarebbe dovuto ottenere una polarizzazione circolare, tuttavia il difficile allineamento delle componenti ha provocato un piccolo errore che ha prodotto una leggera polarizzazione ellittica. Si osservi però che  $\theta_1 \simeq 0$  e  $I_x \simeq I_y$ , la luce è pertanto quasi polarizzata circolarmente. Analizzando le polarizzazioni ellittiche si osserva che l'angolo della lamina  $\theta_{\lambda/4}$  corrisponde all'orientazione della asse maggiore dell'ellisse  $\theta_2$ . tali valori si vedono chiaramente nel plot polare (Figura e), la forma ovaleggiante per  $\theta_{\lambda/4} = 120^\circ$  riflette il fatto che  $I_x \simeq I_y$  a differenza del caso a  $70^\circ$

Nell'ultima fase dell'esperienza la prima misura limita le possibilità di polarizzazione della luce dal LED a circolare e non polarizzata; tuttavia se fosse circolare durante la seconda misura si sarebbe osservato un minimo di intensità, cosa che non è avvenuta. Il fatto che  $V/V_{LED} \neq 0.5$  è probabilmente dovuto alla non perfetta trasparenza dei vari elementi ottici.

Infine il calcolo dei parametri di Stokes è stato effettuato per semplicità senza stima degli errori, nonostante ciò i valori ottenuti sono in accordo con tutti i risultati precedenti dell'esperienza: si osservi ad esempio l'accordo di  $\theta_0$  nel caso lineare con l'offset misurato all'inizio, gli angoli di orientazione delle ellissi di polarizzazione ed i valori di  $I_x$  e  $I_y$ .