

# Polarizzazione della luce e lamine di ritardo

Filippo Audisio, Cataldo Insalaco, Telemaco Pezzoni

14 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  $V_0 = 162.4$ . 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 di uno degli assi principali dell'ellisse di polarizzazione, si può ricavare  $\theta_2 = \theta_1 + 90^\circ$ .

$\theta_{\lambda/4}$ [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.

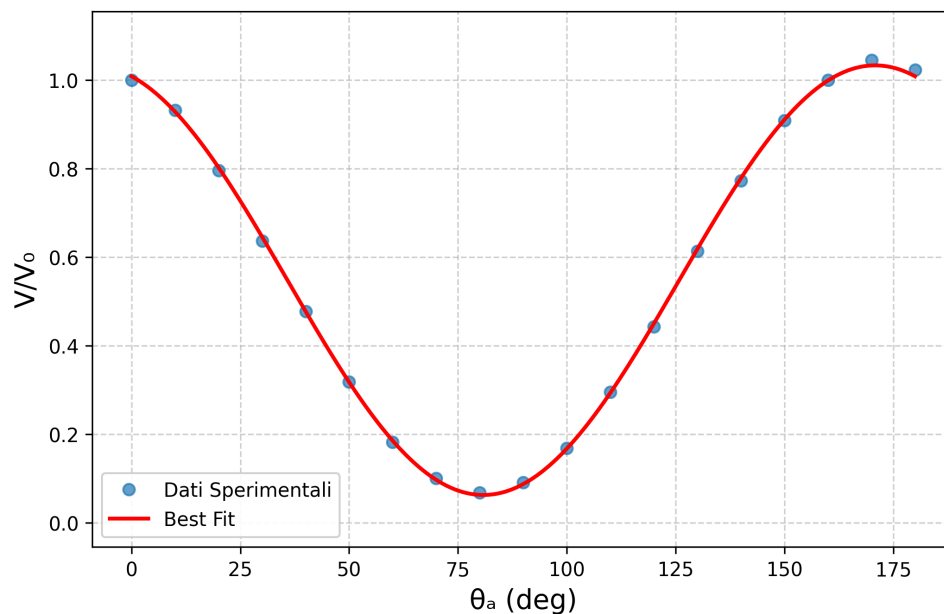
### 3.1.5 Parametri di Stokes

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.

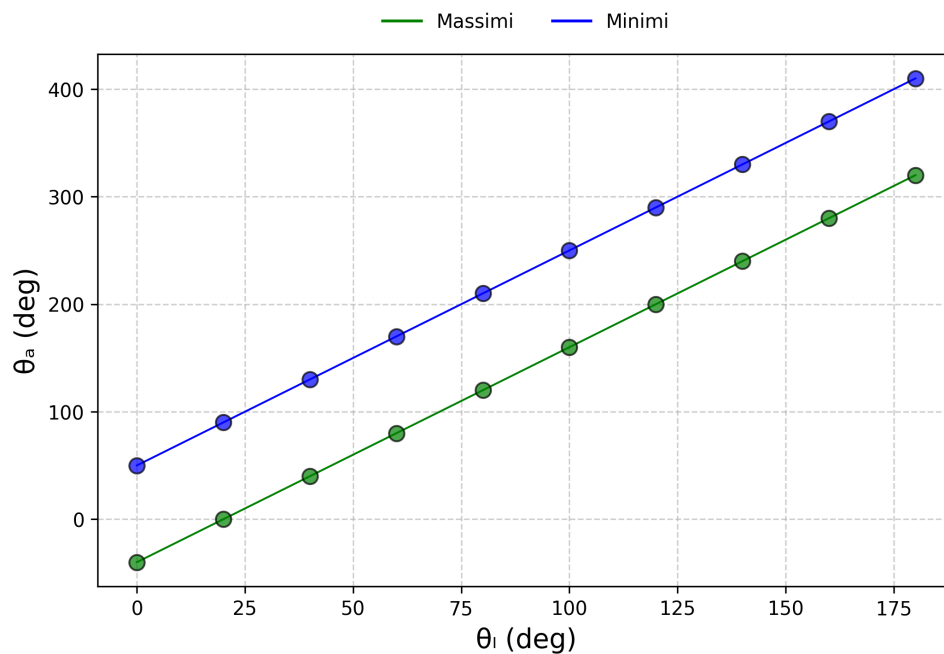
## 3.2 Grafici sperimentali e curve di regressione

### 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 $\lambda/4$

### 3.2.4 Polarizzazione della luce del LED