

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 θ_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 θ_a^{max} e θ_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 θ_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° 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° rispetto al primo polarizzatore, mentre per luce polarizzata ellitticamente si è orientata la lamina $\lambda/4$ a 70° e poi 120° . 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° e si è misurata l'intensità con analizzatore a 45° .

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 σ .

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 ± 0.02	1.96
θ_{off} [deg]	-10 ± 2	-9.2 ± 0.6	6.39
I^{fondo} [mV]	0	0.06 ± 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 θ_a corrispondenti a massimi e minimi.

Misura	m	θ'_{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 ± 0.05	0.08 ± 0.04
90	0.94 ± 0.01	0.07 ± 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: $I(\theta_a) = I_x \cdot \cos^2(\theta_a - \theta_1) + I_y \cdot \sin^2(\theta_a - \theta_1)$. θ_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]	θ_1 [deg]	θ_2 [deg]
45	1.01 ± 0.01	0.92 ± 0.01	-8 ± 6	82 ± 6
70	1.01 ± 0.02	0.10 ± 0.01	-18 ± 1	72 ± 1
120	1.04 ± 0.02	0.81 ± 0.02	23 ± 3	113 ± 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 ± 0.01
$\lambda/4 + \text{Analizzatore}$	0.32 ± 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	θ_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°	1.19	0.81	-0.56	-0.36	-18	1.09	0.11	0.88
Ellittica 120°	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

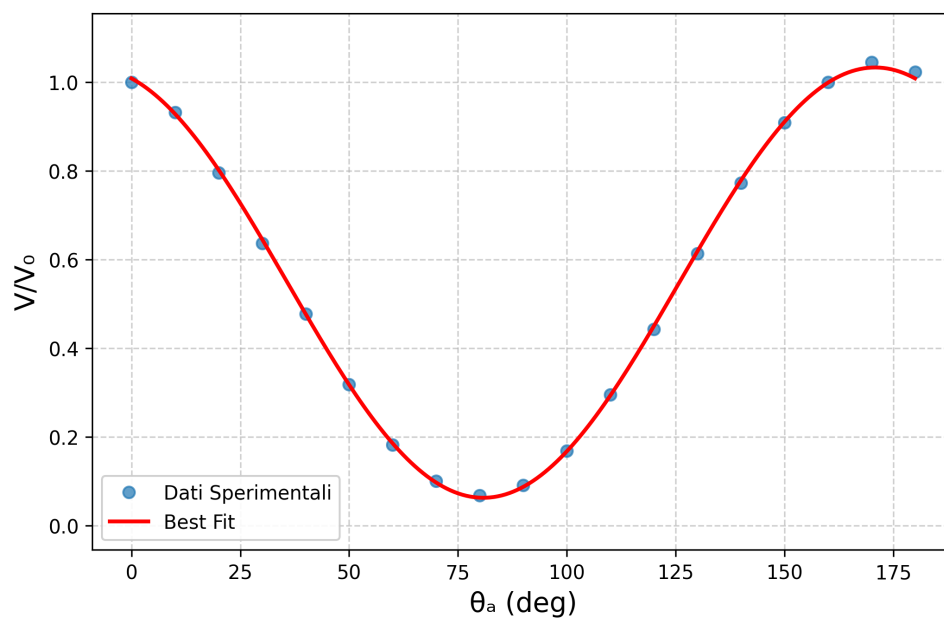


Figura 1: Intensità trasmessa in funzione dell'angolo di rotazione dell'analizzatore

3.2.2 Studio della lamina $\lambda/2$

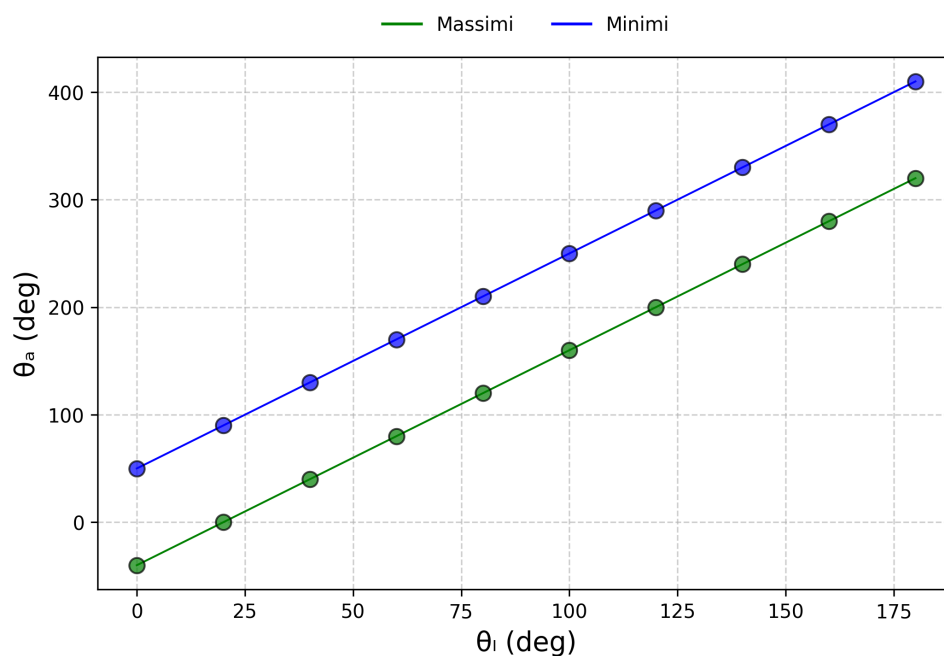
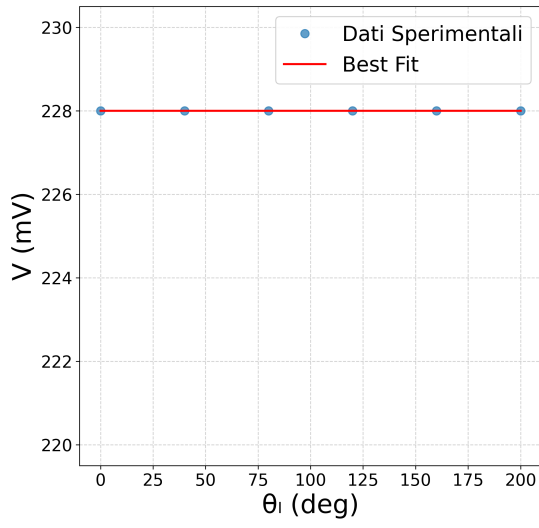
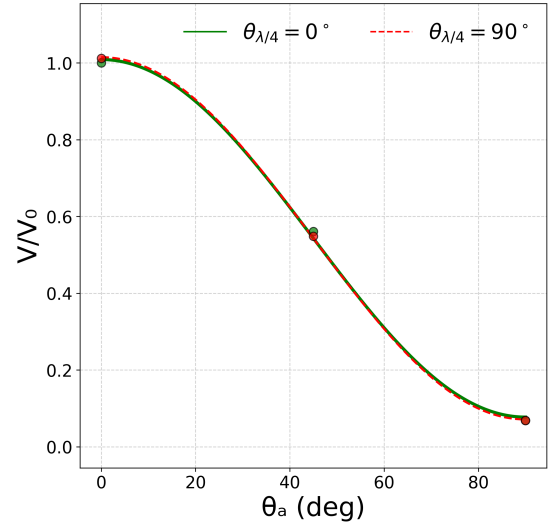


Figura 2: Angolo di rotazione dell'analizzatore in funzione dell'angolo di rotazione della lamina $\lambda/2$ per massimi e minimi di trasmissione.

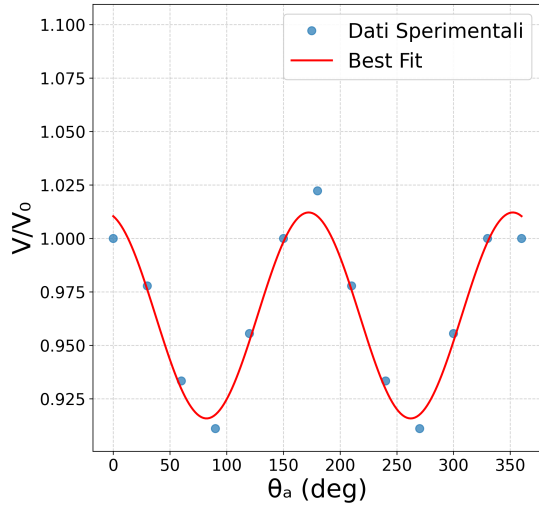
3.2.3 Studio della lamina $\lambda/4$



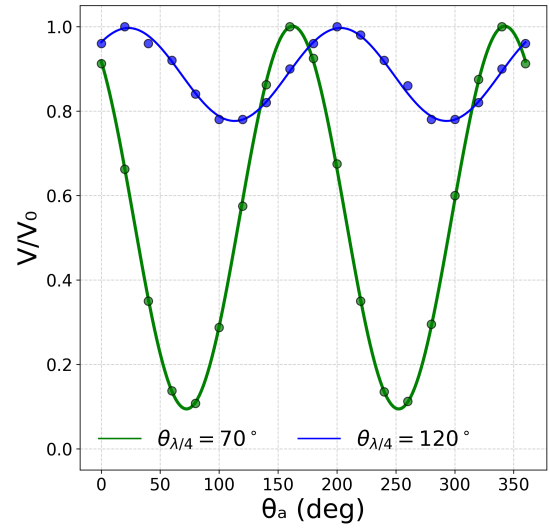
(a) Senza analizzatore.



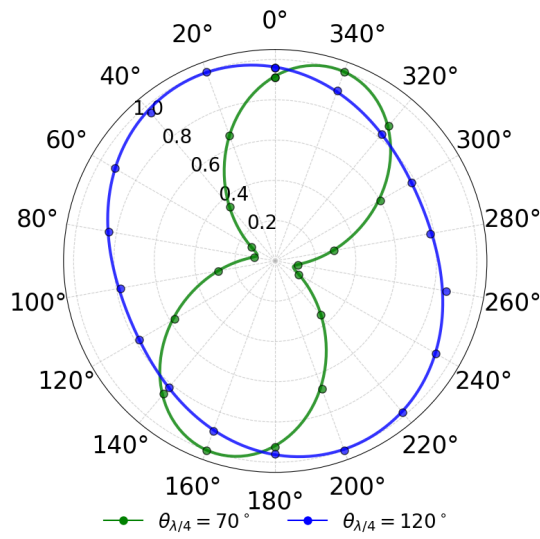
(b) $\theta_{\lambda/4} = 0^\circ$ e 90° .



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



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



(e) Rappresentazione polare