

Ottica e Laboratorio - canale M-Z

Studio dei parametri di Stokes attraverso un polarimetro

L. Pietropaoli, A. Raschillà, S. Scacco – 31 maggio 2022

Abstract: Obiettivo dell'esperienza è la calibrazione di lamine $\lambda/4$ e $\lambda/2$, con l'individuazione dei loro rispettivi assi ottici, seguita dall'analisi dello stato di polarizzazione della luce di un laser Elio-Neon attraverso diversi tipi di cristalli, mediante la determinazione dei parametri di Stokes attraverso un polarimetro, realizzato con tali lamine di ritardo e PBS.

1 Modello teorico

L'intensità luminosa prodotta da una sorgente che viene fatta passare attraverso una **lamina di ritardo** è una funzione della posizione dell'asse ottico della lamina (che è un materiale birifrangente uniassico). Se questa viene espressa in termini di angolo θ ,

$$\mathcal{I} = V_0 \cos^2(A\theta + B) + V_{\text{off}}$$

ove per una lamina $\lambda/2$ ci si aspetta $V_{\text{off}} = 0$, mentre per una $\lambda/4$ è atteso $V_{\text{off}} = V_0/2$.

Dalle intensità misurate della luce trasmessa attraverso un polarimetro, composto da lamine di ritardo $\lambda/2$ e $\lambda/4$, in opportune configurazioni, è possibile ricavare i parametri di Stokes S_1, S_2, S_3 :

$$S_i = \frac{I_i - I'_i}{I_i + I'_i} \quad i = 1, 2, 3$$

dove I_i e I'_i sono le intensità associate alle componenti della luce decomposte secondo una base di autostati di polarizzazione (lineare $0-90^\circ$, lineare 45° , circolare). Da questi parametri si ricava il grado di polarizzazione della luce, $V_p = \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}$, che rappresenta la distanza dall'origine di un punto nella sfera di Poincaré.

2 Apparato sperimentale

L'apparato sperimentale consta di:

- **1.** laser He-Ne THORLABS HNL050L con attenuatore di intensità luminosa;
- **2.** specchi e slitte orientabili (per dirigere e allineare il fascio laser);
- **3.** lamine di ritardo ($\lambda/2$ e $\lambda/4$), beam splitters, polarizzatore;
- **4.** oscuratore per il fascio laser (i.e. un cartoncino);
- **5.** fotodiodo su slitta a vite micrometrica (fondoscala del fotodiodo: $\simeq 12\text{ V}$);
- **6.** multimetro METEX M-4650.

2.1 Procedura di calibrazione

Calibrare correttamente le due lamine significa determinare i loro assi ottici. Per farlo, si sono utilizzati i set-up sperimentali in [Figura 1](#). In questa relazione, chiameremo

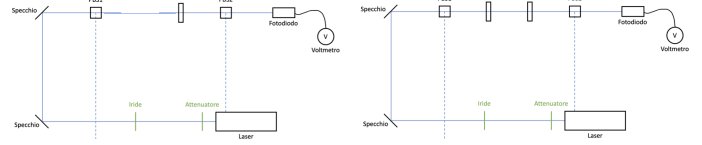


Figura 1: **A sinistra**, apparato sperimentale adibito alla calibrazione della lamina $\lambda/2$, **a destra**, apparato sperimentale usato per calibrare la $\lambda/4$, avendo orientato la $\lambda/2$ sul suo asse ottico di trasparenza.

θ l'angolo riferito all'orientazione della lamina $\lambda/2$ rispetto alla scala graduata, e ζ l'angolo riferito all'orientazione della lamina $\lambda/4$.

La presenza del primo *polarizing beam splitter* permette di selezionare la luce polarizzata linearmente, facilitando la calibrazione dato l'effetto noto delle lamine di ritardo su luce del tipo $|H\rangle$ o $|V\rangle$.

La procedura sperimentale ha previsto l'acquisizione di valori di potenziale variando prima θ e poi ζ a θ_0 fissato, ad intervalli discreti di 20° , fino a coprire tutto l'angolo giro. Risultati visibili in [sezione 7](#).

2.2 Assegnazione delle incertezze

In questa esperienza si sono utilizzate le seguenti incertezze sulle misure dirette:

- **Angoli:** La misura diretta degli angoli θ e ζ è stata effettuata con la ghiera graduata sulle lamine. La risoluzione riporta tacche ogni 2° , ma essendo strumenti analogici, grazie all'interpolazione delle tacche alle misure angolari decidiamo di assegnare incertezza di 1° . In ogni caso, si tratta di errori relativi molto minori delle misure di potenziale (circa $1/200$ contro $1/50$ circa), pertanto sono stati trascurati nei fit di calibrazione.

- **Potenziali:** L'indicazione fornita dal costruttore per l'incertezza da assegnare alla lettura del multimetro è pari a $\sigma_l = 0.05\% \text{ of rdg} + 3 \text{ dgt}$, quindi dipende dalla scala (acquisita ad ogni misura). Tuttavia, si è registrata una enorme oscillazione del valore di potenziale letto ad ogni presa dati, che introduce una componente di errore dominante alla misura σ_o . Ogni presa dati al multimetro ha richiesto circa 30s per avere una stima dell'entità di tale oscillazione (dovuta a meccanismi interni del laser). Se questo errore viene interpretato come casuale, il risultato finale sull'incertezza è: $\sigma^2 = \sigma_l^2 + \sigma_o^2 \simeq \sigma_o^2$.

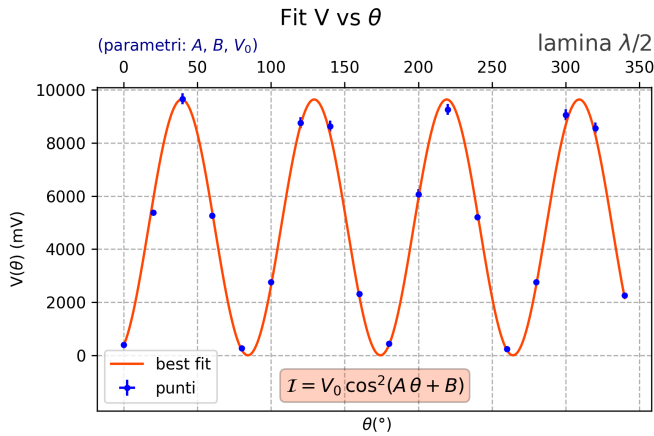
- **Rumore:** oltre a ciò, alle misure di potenziale è stato sottratto il rumore dovuto all'illuminazione della stanza. Stando il nostro tavolo vicino all'unica finestra aperta nel laboratorio, il rumore osservato, apparentemente bianco e di distribuzione gaussiana, è stato stimato più volte nel corso dell'esperienza, e la sua oscillazione sottratta di volta in volta ai valori letti di potenziale, propagandone le incertez-

ze in quadratura (i vari rumori misurati sono stati riportati in [sezione 7](#)).

3 Calibrazione lamina $\lambda/2$

Si nota come il valore di ampiezza inferito presenti un'incertezza relativa pari a $\approx 20\%$, il che è sintomatico - probabilmente - di una carenza di punti sperimentali su cui effettuare il fit. Si sarebbero voluti prendere più punti, per seguire meglio l'andamento della tensione. Tuttavia la procedura di acquisizione è piuttosto lunga per ogni punto, dovendo stimare l'oscillazione del valore di potenziale attendendo 30 s per punto.

Forse, sarebbe stato più efficiente ridurre l'intervallo angolare di acquisizione, lasciando lo stesso numero di punti, ma in tal caso non avremmo visto effetti di periodo superiore a π . Risultati in [Figura 2](#):



(a) Plot dei punti sperimentali.

| par. | val. ($\mu \pm \sigma$) | unit | inc. rel. (σ/μ) |
|------------|---------------------------|---------|----------------------------|
| A | 2.0010 ± 0.0010 | [adim.] | 0.05% |
| B | 1.7672 ± 0.0009 | rad | 0.06% |
| V_0 | 9.6 ± 1.9 | V | 19.7% |
| θ_0 | 39.344 ± 0.002 | ° | 0.01% |

(b) Parametri inferiti dal *curve-fit*. La posizione angolare dell'asse ottico θ_0 è stata trovata imponendo che il cos fosse per la prima volta uguale a 1, da cui si è ottenuto $\theta_0 = (\pi - B_1)/A$.

Figura 2: Fit dei punti sperimentali per il caso di calibrazione lamina $\lambda/2$.

$$V_{max}^{mis.} = 9.67 \pm 0.21 \text{ V} \quad V_0 = 9.6 \pm 1.9 \text{ V}$$

Il periodo di oscillazione della lamina $\lambda/2$ è compatibile entro 1σ , come atteso osservando la forma della matrice di Jones per una lamina $\lambda/2$.

$$T_{teo.} = \frac{\pi}{2} \quad A = 2.0010 \pm 0.0010$$

Esaminando infine il valore di **chi quadro** ottenuto per il modello fittato:

$$\chi^2 = 185 \quad \text{d.o.f.} = 15 \quad \chi_{rid}^2 = 12.4$$

Si ottiene un p-value $< 10^{-5}$, perciò sembrerebbe che l'accordo tra modello teorico e esperimento non sia buono. Concludere ciò, tuttavia, sarebbe sbagliato: qualitativamente, i punti sperimentali seguono con certezza l'andamento cosinusoidale come ci si aspetta, e i parametri del fit

tornano compatibili con quelli attesi. Le oscillazioni del potenziale potrebbero essere state sottostimate. Inoltre, eventuali problemi di non ortogonalità della lamina avrebbero effetti sistematici di periodo π , ma essi sono assenti dai dati sperimentali. Concludiamo che la lamina $\lambda/2$ è pertanto ben orientata.

Poiché però abbiamo un punto, a 220° , che è al di sotto di quanto ci aspetteremmo (e con incertezza di oscillazione anche grande), se la luce non incidesse centralmente, la presenza di una macchiolina o di una imperfezione nella lamina lungo il percorso di rotazione, può essere responsabile del piccolo calo di potenziale.

4 Calibrazione lamina $\lambda/4$

Similmente a quanto fatto per la $\lambda/2$, si sono acquisiti 18 punti ruotando la ghiera ad intervalli di 20° , da 0° a 360° . Come anticipato in [sezione 1](#), l'andamento atteso è lo stesso con l'aggiunta di un offset pari alla metà dell'intensità massima. In corrispondenza del primo massimo, inoltre si trova la posizione angolare ζ_0 dell'asse ottico.

Tuttavia, come è visibile in [Figura 3](#), i punti sperimentali non seguono un andamento puramente sinusoidale quadro: sembra esserci qualche effetto esterno che periodicamente causa un abbassamento nell'intensità misurata.

A parità di tutti i componenti dell'apparato sperimentale, avendo riallineato più volte l'apparato stesso dopo l'inserimento della lamina $\lambda/4$ abbiamo notato con sollievo come questi sbalzi di ampiezza non influenzassero la periodicità, pertanto si è proseguito con la presa dati.

Le figure riportano i punti sperimentali, in blu, sovrapposti a due andamenti: *in verde* quello che ci si aspetta dal modello teorico, *in rosso* un andamento proporzionale a una sorta di modulazione dell'aspettativa teorica - $\propto \cos^2(A_1 \theta)$ - con un contributo sinusoidale - $\propto \cos(A_2 \theta)$.

Una breve analisi qualitativa permette di concludere immediatamente che il modello - per così dire è, se non quello ottimale, una scelta più sensibile rispetto alla semplice oscillazione sinusoidale. I parametri che regolano l'oscillazione principale sono confrontati con quelli attesi:

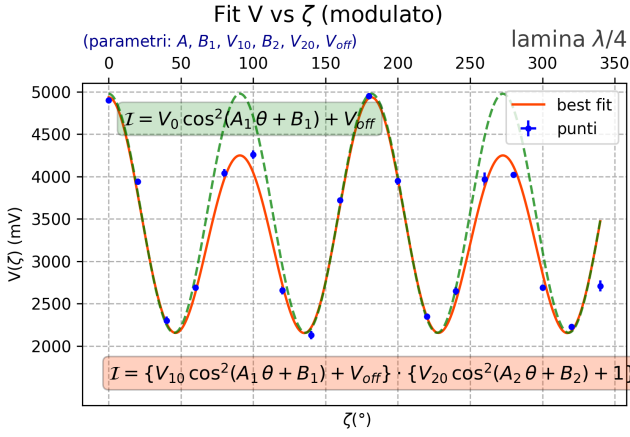
$$V_{max}^{mis.} = 4950 \pm 35 \text{ mV} \quad V_0 = 4593 \pm 1319 \text{ mV}$$

$$T_{teo.} = \frac{\pi}{2} \quad A_1 = 1.979 \pm 0.012$$

Ci dà A_1 compatibile entro 2σ entro il valore atteso di 2 (come si osserva dalla matrice di Jones della $\lambda/4$), e con incertezza maggiore (a causa della modulazione della seconda oscillazione, i parametri sono più imprecisi).

A causa della seconda oscillazione che modula la prima, i parametri di ampiezza vengono estremamente imprecisi, e le incertezze in generale sono molto maggiori. Non ci deve stupire: gli effetti sistematici sono evidentemente più rilevanti.

L'oscillazione $\propto \cos^2(A_2 \theta + B_2)$ ha periodo compatibile con π , pertanto scartiamo la presenza di graffi o imprecisioni sulla superficie della lamina. Un probabile effetto che ha periodo π è la non ortogonalità della lamina rispetto alla luce. Il versore normale, durante la rotazione, precece con periodo 2π , tuttavia configurazioni di precessione che distano 180° tra loro reagiscono alla luce incidente allo stesso modo, poiché essa, attraverso la PBS, è linearmente polarizzata (e quindi la sua oscillazione presenta "simmetria per riflessione"). Probabilmente, dunque, l'effetto



(a) Plot dei punti sperimentali e dei due andamenti ipotizzati, in verde quello teorico atteso (per cui il parametro V_0 è stato preso pari a $V_{max} - V_{min}$ misurati, mentre gli altri parametri sono per costruzione gli stessi dell'altro modello teorizzato) e in rosso quello fittato in accordo all'ipotesi di modulazione.

| par. | val. ($\mu \pm \sigma$) | unit | inc. rel. (σ/μ) |
|-----------|---------------------------|---------|----------------------------|
| A_1 | 1.979 ± 0.012 | [adim.] | 0.6% |
| B_1 | 5.4 ± 1.1 | mrad | 20% |
| A_2 | 1.012 ± 0.005 | [adim.] | 0.4% |
| B_2 | 0.16 ± 0.01 | mrad | 8.3% |
| V_{10} | 2.4 ± 1.3 | V | 54% |
| V_{off} | 2.2 ± 0.5 | V | 21% |
| V_{20} | 0.0747 ± 0.0008 | [adim.] | 0.37% |
| ζ_0 | -0.15 ± 0.07 | ° | 43% |

(b) Parametri inferiti dal *curve-fit*. L'ultimo parametro, la posizione angolare dell'asse ottico ζ_0 , è stato trovato imponendo che il \cos^2 e il \cos fossero per la prima volta uguali a 1, da cui si è ottenuto $\zeta_0 = (0 - B_1)/A_1$.

Figura 3: Fit dei punti sperimentali per il caso di lamina $\lambda/4$ + lamina $\lambda/2$.

dominante responsabile per la modulazione vista è la deviazione angolare accidentale della lamina dalla condizione di ortogonalità alla luce.

Esaminando infine, anche in questo caso, il valore di **chi quadro** ottenuto:

$$\chi^2 = 235 \quad \text{d.o.f.} = 12 \quad \chi^2_{rid} = 19.7$$

Si ottiene un p-value $< 10^{-5}$. Probabilmente, questa volta è il modello a essere significativamente incorretto, a causa della seconda modulazione delle oscillazioni, ed effetti sistematici rilevanti che abbiamo solo ipotizzato.

4.1 Analisi comportamento a $\zeta_0 + \pi/4$

A questo punto, è stata scelta la seguente orientazione per $\lambda/4$: a $\zeta - \zeta_0 = 45^\circ$. Ci aspettiamo il seguente comportamento. Le matrici di Jones per la lamina $\lambda/4$, con orientazione ruotata di 45 gradi in senso antiorario, è:

$$T_{\lambda/4}(45^\circ) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} e^{i\pi/4} & -e^{-i\pi/4} \\ -e^{-i\pi/4} & e^{i\pi/4} \end{bmatrix}$$

Moltiplicandola per la matrice generica $\lambda/2$, a qualsiasi angolo $\Delta\theta = \theta - \theta_0$ in senso antiorario, ci aspettiamo una

certa matrice T di trasmissione:

$$T = T_{\lambda/2}(\Delta\theta) T_{\lambda/4}(45^\circ) = \frac{e^{i\pi/4}}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} e^{-i2\Delta\theta} & ie^{i2\Delta\theta} \\ -ie^{-i2\Delta\theta} & -e^{i2\Delta\theta} \end{bmatrix}$$

Ora, i PBS selezionano una delle due componenti di polarizzazione sia in entrata che in uscita, pertanto per ognuna delle quattro combinazioni possibili basta fare il modulo quadro di una delle quattro componenti T_{ij} . È evidente che $|T_{ij}|^2 = 1/2$, per tutti i casi, pertanto ci aspettiamo un potenziale costante e pari a $V_0/2$, qualsiasi sia la selezione dei due PBS.

Sperimentalmente, si è deciso di prendere valori di potenziale ogni $\Delta\theta = 20^\circ$. Il risultato non è costante, come visibile in Figura 4: Si osserva come i punti sembrano oscil-

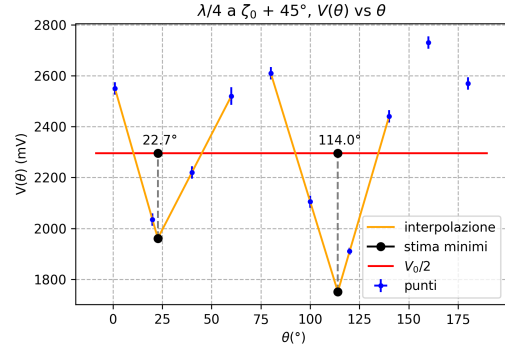


Figura 4: Comportamento del potenziale in funzione di $\Delta\theta = \theta - \theta_0$, avendo fissato $\zeta - \zeta_0 = 45^\circ$. Per stimare il periodo dell'oscillazione, abbiamo interpolato alla ricerca di due minimi adiacenti.

lare periodicamente nei pressi della metà del valore di I_0 , che calibrazione possiamo stimare come $V_0 = V_{10} + V_{off} = 2296$ mV. L'andamento non è tuttavia quello di una semplice sinusoide, e probabilmente è ben descritto da un modello simile a quello impiegato nella calibrazione di $\lambda/4$. In questo caso, però, ci basta stimarne il periodo di oscillazione, misurando la posizione di due minimi adiacenti di oscillazione (quindi di un periodo), intersecando le due rette che al primo ordine stimano gli andamenti discendenti e ascendenti in prossimità del minimo (abbiamo usato 4 punti per ciascuna). La distanza risultante è $\Theta = (91.3 \pm 4.1)^\circ$, che ci fa sospettare che il periodo sia $\pi/2$.

Questo si può spiegare se la luce attraverso il primo PBS non abbia grado di polarizzazione $V_p = 1$ ma leggermente inferiore. Le altre componenti permettono allora ai termini di interferenza di agire, che dalla matrice di Jones di T producono oscillazioni di periodo $\pi/2$.

5 Misura parametri di Stokes

A questo punto, avendo determinato gli assi ottici, il polarimetro è pronto per la misurazione dei parametri di Stokes della luce laser in alcune diverse configurazioni. Il polarimetro completo utilizzato è visibile in Figura 5: Le configurazioni date nelle tabelle in sezione 7 permettono di decomporre la luce nelle componenti proiettive secondo tre basi distinte: $\{|H\rangle, |V\rangle\}$ (luce linearmente polarizzata 0-90°), $\{|L_{45}\rangle, |L_{-45}\rangle\}$ (luce linearmente polarizzata a 45°), $\{|LH\rangle, |RH\rangle\}$ (luce circolarmente polarizzata). Non si è determinato a quale componente, tra le due possibili con

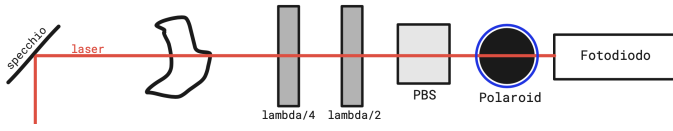


Figura 5: Schema del polarimetro utilizzato. L'aggiunta della lente Polaroid ha permesso un migliore filtraggio della prima componente luminosa. Vogliamo studiare la polarizzazione della luce, al variare dell'oggetto che essa attraversa prima di giungere al polarimetro (un PBS, un cristallo Z-cut, o niente).

apice o senza apice, ciascuno stato si riferisca (perché dipende anche dalla posizione fronte-retro della lamina, che non si è avuto tempo di studiare), tuttavia non è importante: si tratta di una mera questione di orientazione, mentre la caratteristica di linearità o circolarità della polarizzazione sono proprietà più generali, determinate dal "numero" i .

Della lente polaroid, l'asse di trasmissione è stato misurato essere a $\alpha = 37^\circ$, senza una vera e propria calibrazione (per mancanza di tempo), ma verificando col multimetro il raggiungimento del massimo potenziale di trasmissione. La sua presenza ha permesso di magnificare l'effetto del *beam splitter*, così da filtrare meglio la prima componente della luce in uscita dal polarimetro.

Prima della prima lamina, è stato frapposto rispettivamente:

- Un PBS, così da poter misurare il grado di efficienza del *polarizing beam splitter*, che ha come autostati luce linearmente polarizzata $|H\rangle$ e $|V\rangle$.
- Nulla, così da misurare i parametri di Stokes relativi alla stessa luce del laser.
- Un cristallo Z-cut, che ha come autostati luce circolarmente polarizzata $|LH\rangle$ e $|RH\rangle$.

Dati visibili in [sezione 7](#).

- **Beam splitter:** frapponendo un *polarizing beam splitter* al polarimetro, vogliamo misurare la capacità di produrre la luce polarizzata linearmente determinando i parametri di Stokes. Utilizzando i dati in [Tabella 3](#), otteniamo i parametri in [Tabella 1](#). Il risultato è che la luce è quasi completamente polarizzata linearmente (non abbiamo distinto $|H\rangle$ da $|V\rangle$), come ci aspetteremmo da un beam splitter correttamente funzionante.

- **Laser He-Ne:** togliendo il beam splitter, possiamo misurare direttamente la polarizzazione del laser Elio-Neon. Si ottiene ([Tabella 1](#)) che la luce del laser risulta completamente polarizzata, secondo però uno stato che non è autostato di nessuna delle sei configurazioni del polarimetro che usiamo per valutare le intensità.

In entrambi i casi, inoltre, le incertezze permettono al grado di polarizzazione di essere compatibile con 1 e al di sopra di 1 stesso. Ovviamente ciò non è possibile a livello fisico, dato che $V \leq 1$, pertanto il risultato va inteso nello spirito di una stima conservativa del grado di polarizzazione, di molto influenzata dall'oscillazione dei valori di potenziale rilevati al multimetro.

- **Cristallo Z-cut:** si tratta di un particolare cristallo che fa passare autostati polarizzati circolarmente, e miscela tra loro stati di polarizzazione lineare. Ci aspettiamo pertanto che la sua azione sia quella di mescolare i parametri

di Stokes S_1 e S_2 del laser, lasciando però pressoché invariato il grado di polarizzazione circolare S_3 . E infatti, da [Tabella 1](#), osserviamo che, esattamente come atteso, il grado di polarizzazione circolare è rimasto invariato, e invece gli stati di polarizzazione lineare si sono mischiati ad un valore di polarizzazione intermedio rispetto ai $0.48 - 0.04$ in assenza di cristallo. Il complessivo grado di polarizzazione è leggermente ridotto, probabilmente a causa del fatto che il cristallo presentava alcune imperfezioni (abbiamo osservato ad occhio nudo una leggera macchia su una delle lenti), che riducevano il grado di purezza della luce trasmessa. In ogni caso, reputiamo che l'effetto complessivo di conservazione del grado di polarizzazione circolare sia stato mantenuto.

| Stokes | PBS | Laser He-Ne | Z-cut |
|--------|-----------------|-----------------|-----------------|
| S_1 | 0.99 ± 0.01 | 0.47 ± 0.01 | 0.34 ± 0.01 |
| S_2 | 0.02 ± 0.01 | 0.04 ± 0.01 | 0.30 ± 0.01 |
| S_3 | 0.04 ± 0.01 | 0.89 ± 0.01 | 0.88 ± 0.02 |
| V_p | 0.99 ± 0.01 | 1.01 ± 0.01 | 0.94 ± 0.02 |

Tabella 1: Tabella dei parametri di Stokes calcolati per un PBS, senza PBS (direttamente laser He-Ne, e con un cristallo Z-cut).

Infine, riportiamo una rappresentazione astratta dei gradi di polarizzazione nei tre esempi sulla sfera di Poincaré:

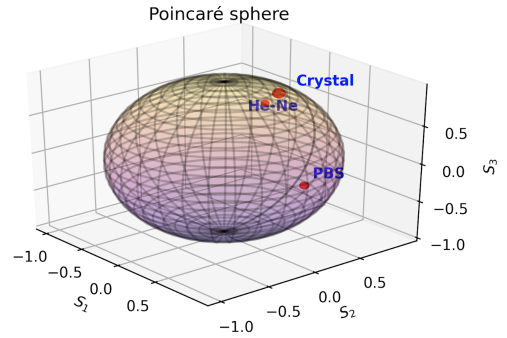


Figura 6: Schema geometrico dei gradi di polarizzazione misurati negli esperimenti fatti, riportati sulla sfera di Poincaré. Si osservi come PBS giaccia solo sulla retta $S_2 = S_3 = 0$.

6 Conclusioni

In conclusione, le criticità che abbiamo notato riguardano il numero ridotto di punti in presa dati di calibrazione, che si sono ripercossi sulla inaccurata stima delle ampiezze di oscillazione. Inoltre, gli effetti sistematici di non ortogonalità della lamina sono dovuti ad una probabile superficialità in fase sperimentale: ci siamo concentrati troppo sulla centralità del fascio e abbiamo trascurato l'ortogonalità, che invece ha determinato (probabilmente) la seconda modulazione dell'intensità luminosa. Infine, sentiamo che l'assegnazione delle incertezze dovute alle oscillazioni sia stata stimata troppo grossolanamente, e ci riproporremmo di eseguire uno studio più preciso utilizzando l'oscilloscopio in luogo del multimetro (così da poter analizzare l'oscillazione nel tempo).

A parte queste osservazioni, ci riteniamo soddisfatti dei risultati trovati.

7 Dati sperimentali

altri dati utili:

- > Controllo distanza laser e piano di lavoro: 139 mm
- > Rumore e oscillazione: 135 ± 5 mV - usato per calibrazione $\lambda/2$
 150 ± 10 mV - rilevato durante calibrazione $\lambda/4$
 85 ± 3 mV - rilevato durante misura dei parametri di Stokes

7.1 Calibrazione $\lambda/2$ e $\lambda/4$

| Punti sperimentali - $\lambda/2$ | | |
|----------------------------------|-----------------|-----------|
| Pos. ang. ($^\circ$) | Int. lum. (V) | Scala (V) |
| 0 ± 1 | 0.40 ± 0.05 | 2.000 |
| 20 ± 1 | 5.39 ± 0.06 | 20.00 |
| 40 ± 1 | 9.67 ± 0.21 | 20.00 |
| 60 ± 1 | 5.27 ± 0.05 | 20.00 |
| 80 ± 1 | 0.27 ± 0.01 | 2.000 |
| 100 ± 1 | 2.77 ± 0.02 | 20.00 |
| 120 ± 1 | 8.77 ± 0.21 | 20.00 |
| 140 ± 1 | 8.64 ± 0.21 | 20.00 |
| 160 ± 1 | 2.32 ± 0.03 | 20.00 |
| 180 ± 1 | 0.44 ± 0.02 | 2.000 |
| 200 ± 1 | 6.07 ± 0.21 | 20.00 |
| 220 ± 1 | 9.27 ± 0.21 | 20.00 |
| 240 ± 1 | 5.22 ± 0.11 | 20.00 |
| 260 ± 1 | 0.24 ± 0.02 | 2.000 |
| 280 ± 1 | 2.77 ± 0.04 | 20.00 |
| 300 ± 1 | 9.07 ± 0.21 | 20.00 |
| 320 ± 1 | 8.57 ± 0.21 | 20.00 |
| 340 ± 1 | 2.26 ± 0.03 | 20.00 |

| Punti sperimentali - $\lambda/4$ | | |
|----------------------------------|-----------------|-----------|
| Pos. ang. ($^\circ$) | Int. lum. (V) | Scala (V) |
| 0 ± 1 | 4.90 ± 0.04 | 20.00 |
| 20 ± 1 | 3.94 ± 0.04 | 20.00 |
| 40 ± 1 | 2.30 ± 0.05 | 20.00 |
| 60 ± 1 | 2.69 ± 0.03 | 20.00 |
| 80 ± 1 | 4.04 ± 0.05 | 20.00 |
| 100 ± 1 | 4.26 ± 0.05 | 20.00 |
| 120 ± 1 | 2.66 ± 0.05 | 20.00 |
| 140 ± 1 | 2.13 ± 0.05 | 20.00 |
| 160 ± 1 | 3.72 ± 0.04 | 20.00 |
| 180 ± 1 | 4.95 ± 0.04 | 20.00 |
| 200 ± 1 | 3.95 ± 0.05 | 20.00 |
| 220 ± 1 | 2.35 ± 0.03 | 20.00 |
| 240 ± 1 | 2.65 ± 0.05 | 20.00 |
| 260 ± 1 | 3.97 ± 0.08 | 20.00 |
| 280 ± 1 | 4.02 ± 0.04 | 20.00 |
| 300 ± 1 | 2.69 ± 0.03 | 20.00 |
| 320 ± 1 | 2.23 ± 0.03 | 20.00 |
| 340 ± 1 | 2.71 ± 0.06 | 20.00 |

Sopra, le tabelle si riferiscono ai dati sulla calibrazione delle lamine di ritardo $\lambda/2$ e $\lambda/4$.

7.2 Misura a $\zeta_0 + \pi/4$, al variare di θ

| Punti sperimentali - $\lambda/4 : \zeta - \zeta_0 = \pi/4$ | | |
|--|-----------------|-----------|
| Pos. ang. ($^\circ$) | Int. lum. (V) | Scala (V) |
| 0 ± 1 | 2.70 ± 0.02 | 20.00 |
| 20 ± 1 | 2.19 ± 0.02 | 20.00 |
| 40 ± 1 | 2.37 ± 0.02 | 20.00 |
| 60 ± 1 | 2.67 ± 0.03 | 20.00 |
| 80 ± 1 | 2.76 ± 0.02 | 20.00 |
| 100 ± 1 | 2.26 ± 0.02 | 20.00 |
| 120 ± 1 | 2.06 ± 0.02 | 20.00 |
| 140 ± 1 | 2.59 ± 0.02 | 20.00 |
| 160 ± 1 | 2.87 ± 0.02 | 20.00 |
| 180 ± 1 | 2.72 ± 0.02 | 20.00 |

Tabella 2: Valori di potenziale misurati con $\zeta - \zeta_0 = 45$ per la lamina $\lambda/2$ e al variare di θ per la lamina $\lambda/4$.

7.3 Misura Parametri di Stokes

| Polarizzazione di un beam splitter | | | | | | |
|------------------------------------|---|-----|-----------------|-----------|-------------------|-----------------|
| Grandezza | Orientazione $\theta - \theta_0$ $\zeta - \zeta_0$ | | Potenziale (mV) | Scala (V) | Oscillazione (mV) | Incertezza (mV) |
| I_1 | 0° | 0° | 4400 | 20.00 | 30 | 35 |
| I'_1 | 45° | 0° | 88 | 0.200 | 3.0 | 3.3 |
| I_2 | 22.5° | 45° | 1950 | 2.000 | 30 | 34 |
| I'_2 | -22.5° | 45° | 1890 | 2.000 | 30 | 34 |
| I_3 | 22.5° | 0° | 1940 | 2.000 | 30 | 34 |
| I'_3 | 22.5° | 90° | 1800 | 2.000 | 20 | 24 |

Tabella 3: Tabella dati relativi alla misurazione dei Parametri di Stokes per determinare il grado di polarizzazione di un PBS.

| Polarizzazione di un laser He-Ne | | | | | | |
|----------------------------------|---|-----|-----------------|-----------|-------------------|-----------------|
| Grandezza | Orientazione $\theta - \theta_0$ $\zeta - \zeta_0$ | | Potenziale (mV) | Scala (V) | Oscillazione (mV) | Incertezza (mV) |
| I_1 | 0° | 0° | 3620 | 20.00 | 20 | 25 |
| I'_1 | 45° | 0° | 1350 | 20.00 | 10 | 14 |
| I_2 | 22.5° | 45° | 2500 | 20.00 | 20 | 24 |
| I'_2 | -22.5° | 45° | 2320 | 20.00 | 20 | 24 |
| I_3 | 22.5° | 0° | 4580 | 20.00 | 30 | 35 |
| I'_3 | 22.5° | 90° | 250 | 2.000 | 10 | 10 |

Tabella 4: Tabella dati relativi alla misurazione dei Parametri di Stokes per determinare il grado di polarizzazione di un laser He-Ne.

| Polarizzazione di un cristallo Z-cut. | | | | | | |
|---------------------------------------|---|-----|-----------------|-----------|-------------------|-----------------|
| Grandezza | Orientazione $\theta - \theta_0$ $\zeta - \zeta_0$ | | Potenziale (mV) | Scala (V) | Oscillazione (mV) | Incertezza (mV) |
| I_1 | 0° | 0° | 2630 | 20.00 | 30 | 44 |
| I'_1 | 45° | 0° | 1350 | 20.00 | 20 | 24 |
| I_2 | 22.5° | 45° | 3200 | 20.00 | 20 | 25 |
| I'_2 | -22.5° | 45° | 1760 | 20.00 | 15 | 19 |
| I_3 | 22.5° | 0° | 4500 | 20.00 | 50 | 55 |
| I'_3 | 22.5° | 90° | 360 | 2.000 | 10 | 10 |

Tabella 5: Tabella dati relativi alla misurazione dei Parametri di Stokes per determinare il grado di polarizzazione di un cristallo Z-cut.