

Buona relazione.

Ultima parte descritta in maniera un po' approssimativa.

29-31

Laboratorio di ottica

- Canale M-Z -

Studio della polarizzazione del laser mediante lamine di ritardo

Lorenzo Perot 1908873 - Francesco Saverio Rotondi 1897677 - Mattia Ragaglia 1920104

6 giugno 2022

1 Scopo dell'esperienza

Il principale scopo dell'esperienza è quello di calcolare i parametri di Stokes della luce incidente e da questi ricavare lo stato di polarizzazione del fascio laser. Per fare ciò sono stati eseguiti dei test del filtraggio delle polarizzazioni da parte dell'apparato al variare dell'angolo di rotazione utilizzando wave plates di tipo $\lambda/2$ e $\lambda/4$ tarate precedentemente.

2 Apparato e misure preliminari

L'apparato sperimentale è riportato in **Figura 5** e consiste in:

- Sorgente laser ad He-Ne ($\lambda_{true} \sim 633 \text{ nm}$)
- Specchi mobili e regolabili tramite viti di brandeggio, per cambiare la direzione del fascio
- Fotodiodo ($V_{sat} \approx 12V$), regolabile attraverso una vite micrometrica (sensibilità $10\mu m$), posto su una slitta (range $\approx 15mm$)
- Filtro attenuatore posto all'uscita del laser
- Due Polarizing Beam Splitter (PBS)
- Due Wave Plate (WP) di tipo $\lambda/4$ e $\lambda/2$, ossia lamine di ritardo che introducono uno sfasamento ottico pari a λ/i ($i=2,4$), fra la componente del campo elettromagnetico parallela all'asse ottico e quella ad esso ortogonale
- Metro a nastro (sensibilità $1mm$)
- Multimetro utilizzato in funzione di Voltmetro
- Filtro polaroid e ulteriore WP di tipo $\lambda/2$ (utilizzati nell'ultima parte dell'esperienza)

Sia le wave plates che i PBS sono sistemati su un'apposita bassetta che ha reso possibile eseguire l'allineamento tramite viti di brandeggio. Inoltre entrambe le WPs sono state allocate all'interno di una ghiera rotante e graduata con valori angolari in gradi di sensibilità 2° , mentre i PBS sono stati orientati in modo tale da permettere solo alla luce polarizzata orizzontalmente di attraversarli direttamente, deviando quella polarizzata verticalmente con un angolo retto rispetto al raggio incidente. Tutte le misure dell'intensità sono state eseguite tramite un voltmetro collegato direttamente al fotodiodo. Per confermare il corretto allineamento della strumentazione si è misurata l'altezza della componente in polarizzazione riflessa lateralmente, verificando che questa si mantenesse $\approx 14cm$. Si è tentato di stimare l'incertezza sulle misure di tensione effettuate con il multimetro misurando un determinato valore sul fotodiodo e tenendo conto delle fluttuazioni di quest'ultimo: sono stati trascritti 5 valori segnati dal voltmetro per lo stesso segnale (vedi **Tabella 1**) e si è calcolata la deviazione standard $\sigma = 0.089V \approx 0.09V$. tale valore è stato in seguito utilizzato come incertezza su tutte le misure di tensione.

3 Taratura delle lamine e misura di I per determinati angoli (ϕ, θ)

3.1 Lamina $\lambda/2$

Per la taratura è stata posizionata la lamina $\lambda/2$ lungo la traiettoria del fascio laser tra i due PBS, così da avere polarizzazione orizzontale sia in entrata alla WP che al fotodiodo. Per una questione di semplicità si è iniziato sistemando la ghiera al valore zero indicato sulla scala graduata e si è proceduto a raccogliere le misurazioni del voltaggio segnalate dal voltmetro ruotando ad ogni step di 10° spaziando in un range totale di rotazione compreso tra -90° e 90° (dati in **Tabella 2**). Se si sviluppa la teoria delle matrici di Jones è possibile stimare l'andamento teorico dell'intensità luminosa percepita dal fotodiodo la quale risulta essere:

$$I(\theta) = I_0 \cos^2(A\theta + B) \quad (1)$$

Dove I_0 è l'intensità misurata dal voltmetro in corrispondenza del massimo, θ è l'angolo di rotazione della ghiera e B è uno sfasamento. Se si esegue il calcolo a livello teorico risulta che $A_{teo}^{(1)} = 2$. Una volta raccolti i dati è stato possibile effettuare un fit lineare utilizzando l'**Equazione 1** con lo scopo di ottenere le migliori stime di I_0 , A e B e da qui $\theta_0 = -\frac{B}{A}$, ovvero l'orientamento, rispetto allo zero della ghiera, dell'asse ottico della lamina. I dati sperimentali e la curva di fit sono riportati in **Figura 1**:

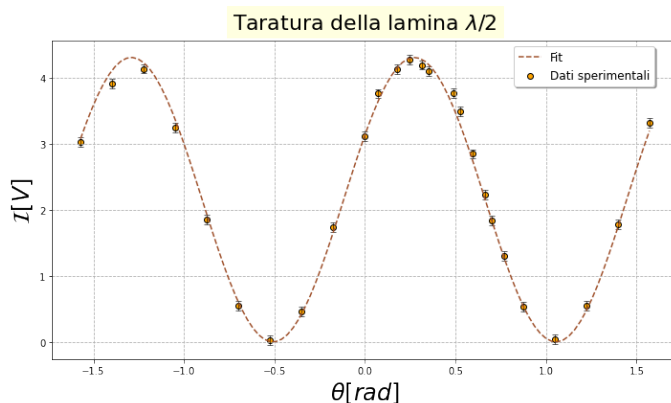


Figura 1: Fit per la taratura di $\lambda/2$, le incertezze sui punti sperimentali sono piccole, dell'ordine della dimensione del marker dei punti

I valori ottenuti dal fit sono:

$$\begin{cases} I_0 = (4.31 \pm 0.03)V \\ A = 2.010 \pm 0.008 \\ B = -31.4 \pm 0.4 \\ \theta_0 = (16 \pm 3)^\circ \end{cases}$$

E' ora possibile confrontare i valori ottenuti in questo modo con i rispettivi valori teorici per le grandezze A e I_0 . Effettuando il confronto numerico mediante test di Gauss, A risulta distante 1.13σ

da quello sperimentale, e quindi i due valori risultano compatibili entro il 95% di confidence level. Invece per l'intensità in assenza di WP, il riferimento teorico è stato semplicemente misurato prima di posizionare la $\lambda/2$ registrando $I_0^{mis} = 4.41 \pm 0.09V$, ossia distante 1.2σ dal valore ricavato dal fit e per questo compatibile entro il 95% di confidence level. Per testare la bontà del modello si esegue quindi il calcolo del χ^2 tra i dati sperimentali e il fit ottenendo uno score di $\chi^2 = 29.6$ con $\nu = 23$ che corrisponde ad un $p - value = 0.15$ che quindi non è significativo entro il 95% di confidence level. Si è quindi trovato che l'asse ottico della lamina $\lambda/2$ è orientato verticalmente quando $\theta = \theta_0$.

3.2 Taratura della lamina $\lambda/4$

Successivamente si è proceduto a tarare la lamina $\lambda/4$ seguendo lo stesso procedimento del punto precedente, ovvero raccogliendo le misure del voltaggio registrato dal voltmetro per differenti angoli di rotazione della Wave plate. Vista la necessità di dover conoscere la polarizzazione in entrata, la WP $\lambda/2$ è stata orientata lungo il suo asse ottico, così da variare il meno possibile la polarizzazione orizzontale imposta dal primo PBS. Anche in questo caso l'andamento atteso al variare dell'angolo ϕ è ottenibile a partire dall'algebra delle matrici di Jones e vale:

$$I(\phi) = \frac{I_0}{2}[1 + \cos^2(A\phi + B)]$$

Con $A_{teo}^{(2)} = 2$ anche in questo caso. I dati raccolti (**Tabella 3**) sono quindi stati fittati sull'**Equazione 2** così da stimare le quantità A , B , I_0 e $\phi_0 = -\frac{B}{A}$, dove I_0 e ϕ_0 sono rispettivamente l'intensità registrata senza la wave plate e l'angolo rispetto alla scala graduata dell'asse ottico.

I dati sperimentali insieme alla curva di fit sono riportati in **Figura 2**:

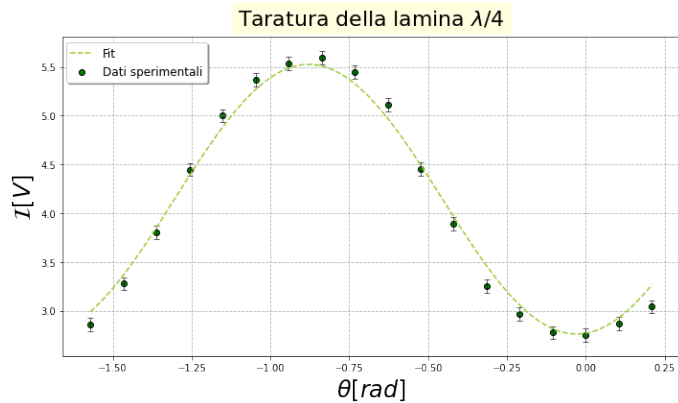


Figura 2: Fit per la taratura di $\lambda/4$, le incertezze sui punti sperimentali sono piccole, dell'ordine della dimensione del marker dei punti

Dal fit sono stati ottenuti i seguenti valori:

$$\begin{cases} I_0 = (5.53 \pm 0.04)V \\ A = 1.85 \pm 0.08 \\ B = 87 \pm 2 \\ \phi_0 = (-47 \pm 1)^\circ \end{cases}$$

Anche in questo caso è possibile attuare un confronto con i valori attesi per $A_{teo}^{(2)} = 2$ e $I_0^{mis} = (5.63 \pm 0.09)V$ misurato direttamente. Eseguendo un test di Gauss si nota che A e il suo valore teorico distano 1.86σ , mentre per I_0 sono 1.03σ (e sono quindi entrambi compatibili entro il 95% di confidence level). Anche in questo caso si può verificare la bontà del modello attraverso un test del χ^2 , ottenendo uno score di $\chi^2 = 22.42$, che, con un numero di gradi di libertà $\nu = 15$, corrisponde ad un $p - value = 0.11$ che non è

significante al 95% di confidence level, quindi il modello approssima bene i dati sperimentali. Si è quindi trovato che l'asse ottico della lamina $\lambda/4$ è orientato verticalmente quando $\phi = \phi_0$.

3.3 Osservazioni e misura dell'intensità con $\phi = \phi_0 + 45^\circ$

Una volta tarate le lamine è valutato l'orientamento del relativo asse ottico è possibile effettuare delle osservazioni:

- Direttamente dalla formula teorica dell'**Equazione 1** si può notare come essendoci una dipendenza da 2θ confermata poi sperimentalmente, la funzione abbia un periodo di π e per questo esistono 2 angoli θ_0 distanti 180° tra loro.

- In una configurazione in cui vi sono soltanto i due PBS e la lamina $\lambda/2$ ruotata di 45° rispetto a θ_0 l'intensità della luce registrata dal fotodiodo risulta praticamente nulla. Infatti dato che entrambi i PBS polarizzano orizzontalmente e ricordando che dall'uso delle matrici di Jones si ottiene un contributo sulla polarizzazione orizzontale pari a $\cos(2\theta)$ e uno su quella verticale di $\sin(2\theta)$ all'uscita della $\lambda/2$, con un angolo $\theta = 45^\circ$ viene completamente annullata la componente orizzontale $|H\rangle$ mentre raggiunge il suo massimo quella verticale $|V\rangle$. Questa luce polarizzata verticalmente passando poi nel PBS riflette la parte $|V\rangle$ fuori dalla traiettoria del fotodiodo trasmettendo solamente l'orizzontale, la quale è praticamente nulla. Il tutto si è verificato sperimentalmente riscontrando un valore pressoché costante di $I = (0.01 \pm 0.09)V$ e quindi compatibile con $0V$.

- Nella situazione della $\lambda/2$ allineata lungo l'asse ottico e della $\lambda/4$ ruotata di 45° rispetto a ϕ_0 , il risultato atteso è quello di un'intensità dimezzata rispetto al caso non ruotato (si può ottenere facilmente utilizzando le matrici di Jones). Andando ad analizzare il tutto sperimentalmente si è registrato $I = (2.35 \pm 0.09)V$ rispetto ad massimo di $I_0 = (5.63 \pm 0.09)V$. Confrontando poi I con $I_0/2$ con test di Gauss i due valori risultano distanti 5.16σ e per ciò non compatibili. Questo è dovuto probabilmente ad un insieme di fattori di imperfezione dell'apparato sperimentale come disallineamento, imperfezioni delle WP e nei PBS o un'imprecisa stima degli angoli θ_0 e ϕ_0 .

Proprio a partire da quest'ultima configurazione, ossia con l'angolo $\phi = \phi_0 + 45^\circ$ fisso per la lamina $\lambda/4$, si effettuano una serie di misure dell'intensità al variare della posizione angolare θ della lamina $\lambda/2$. Questo perchè, effettuando un veloce calcolo teorico utilizzando le matrici di Jones si può notare come inviando in entrata luce polarizzata orizzontalmente $|H\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ alla lamina $\lambda/4$, con il valore di ϕ citato, si ottiene luce polarizzata come $\frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1+i \\ 1-i \end{pmatrix}$.

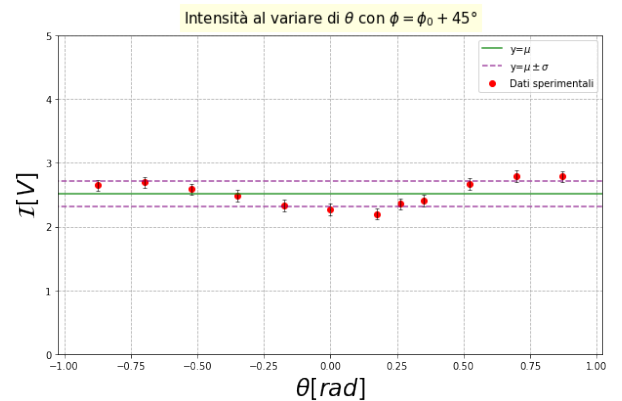


Figura 3: Intensità al variare di θ per $\phi = -2^\circ$, le incertezze sui punti sperimentali sono piccole, dell'ordine della dimensione del marker dei punti

Se a questa viene poi applicata la matrice relativa alla lamina $\lambda/2$ con θ variabile si ottiene che a prescindere dall'angolo θ l'intensità

del segnale filtrato deve assumere il valore costante di $I_0/2$. Quindi ciò che ci si aspetta sperimentalmente è di vedere una tensione costante misurata dal fotodiodo al variare dell'orientazione della seconda lamina. I dati sperimentali raccolti sono riportati in **Tabella 4** ed in **Figura 3**. Si può notare dal grafico come sia ancora presente un andamento oscillatorio dei dati sperimentali nonostante quanto trovato a livello teorico. Ciò, come detto, potrebbe essere causato da difetti dell'apparato sperimentale (allineamento non perfetto, usura della strumentazione, etc) o dal fatto che il valore dell'angolo $\phi = \phi_0 + 45^\circ = -2^\circ$ sia stato inferito dai dati sperimentali e quindi possieda un'incertezza, e di conseguenza la configurazione scelta potrebbe non essere esattamente coincidente con quella cercata. Tuttavia, anche se non coincidente, questa sarà molto vicina; infatti l'ampiezza dell'oscillazione risulta sensibilmente diminuita rispetto ai dati in **Figura 1** e in **Figura 2**. Ciò può essere verificato a livello quantitativo analizzando la deviazione standard σ con la quale i dati si distribuiscono intorno al valor medio sulle ordinate ottenendo $\mu = 2.52V$ e $\sigma = 0.20V$. Tale valore risulta di molto inferiore rispetto alle deviazioni standard $\sigma_{\lambda/2} = 1.48$ e $\sigma_{\lambda/4} = 0.96$ con le quali i dati in **Figura 1** e in **Figura 2** si distribuiscono intorno ai rispettivi valori medi. Inoltre se si considera il valore $\hat{I} = (2.52 \pm 0.20)$ e si confronta con il valore trovato sperimentalmente per $I_0/2 = (2.82 \pm 0.05)V$ con un test di Gauss si ottiene che questi distano 1.46σ , e quindi i due valori risultano compatibili entro il 95% di confidence level. Quindi, sebbene non si ottenga un andamento completamente costante, la tendenza all'appiattimento dell'oscillazione intorno al valore $I_0/2$ è ben visibile.

4 Stima dei parametri di Stokes

In seguito si è cercato di caratterizzare lo stato di polarizzazione del laser a HeNe utilizzato durante l'esperienza utilizzando i parametri di Stokes S_0, S_1, S_2, S_3 , derivabili direttamente dalle misure dell'intensità registrate dal voltmetro in base alla combinazione delle rotazioni impresse alle WPs. Le formule per i singoli parametri normalizzati sono:

$$\begin{cases} S_0 = 1 \\ S_1 = \frac{2I_1 - I_0}{I_0} = \frac{I_1 - I'_1}{I_1 + I'_1} \\ S_2 = \frac{2I_2 - I_0}{I_0} = \frac{I_2 - I'_2}{I_2 + I'_2} \\ S_3 = \frac{2I_3 - I_0}{I_0} = \frac{I_3 - I'_3}{I_3 + I'_3} \end{cases} \quad (2)$$

Dove I_0 è l'intensità registrata con i soli PBS, le intensità I_1 e I'_1 sono rispettivamente della componente polarizzata verticalmente e orizzontalmente, I_2 e I'_2 di quella polarizzata linearmente a + e - 45° , mentre I_3 e I'_3 rappresentano le componenti con polarizzazione circolare Right e Left. Ricordando che θ è l'angolo di rotazione della lamina $\lambda/2$ e ϕ della lamina $\lambda/4$, le combinazioni per le varie intensità sono ottenibili dall'algebra di Jones:

$$\begin{cases} I_1 : \phi = 0^\circ, \theta = 45^\circ \\ I'_1 : \phi = 0^\circ, \theta = 0^\circ \\ I_2 : \phi = 45^\circ, \theta = 22.5^\circ \\ I'_2 : \phi = 45^\circ, \theta = -22.5^\circ \\ I_3 : \phi = 0^\circ, \theta = 22.5^\circ \\ I'_3 : \phi = 90^\circ, \theta = 22.5^\circ \end{cases} \quad (3)$$

queste rotazioni vanno intese come se fossero effettuate rispetto agli angoli θ_0 e ϕ_0 misurati in precedenza. Le misurazioni sono quindi state eseguite in due casi diversi. La prima misura prevedeva il posizionamento del PBS_1 in entrata (ossia come nelle sezioni precedenti), di modo che il fascio incidente sulla prima lamina fosse già polarizzato orizzontalmente. In questo caso lo scopo è verificare la coerenza del risultato ottenuto tramite i parametri di Stokes con il risultato atteso. La seconda misura invece prevedeva

il posizionamento del PBS_1 in uscita, ossia dopo il PBS_2 in modo da migliorare ulteriormente la polarizzazione prima che il fascio raggiungesse al fotodiodo. In questo caso la polarizzazione che si ottiene dai parametri di Stokes è quella originale del laser, poiché non c'è più il filtro polarizzatore in entrata.

4.1 Misura con filtro polarizzatore PBS_1 inserito

Una volta eseguite le misurazioni in corrispondenza degli angoli indicati nell'**Equazione 4** sono quindi state stimate le intensità e i parametri di Stokes corrispondenti usando l'**Equazione 2**.

I risultati ottenuti sono:

$$\begin{cases} I_0 = (6.26 \pm 0.09)V \\ I_1 : (0.03 \pm 0.09)V \\ I'_1 : (5.45 \pm 0.09)V \\ I_2 : (2.84 \pm 0.09)V \\ I'_2 : (2.55 \pm 0.09)V \\ I_3 : (3.10 \pm 0.09)V \\ I'_3 : (2.47 \pm 0.09)V \end{cases} \quad \begin{cases} S_0 = 1 \\ S_1 = -(0.99 \pm 0.02) \\ S_2 = -(0.09 \pm 0.03) \\ S_3 = (0.01 \pm 0.02) \end{cases}$$

Dai parametri di Stokes è possibile quindi confermare come il fascio laser in questo caso sia polarizzato quasi completamente lungo l'orizzontale. Ciò è chiaro se si osserva che il parametro $S_1 \approx -1$, e quindi che $|I'_1| \gg |I_1|$. I valori di S_2 e S_3 , entrambi compatibili con 0 entro il 99% di confidence level, mostrano come il fascio non possa essere polarizzato circolarmente né possa essere combinazione di $|H\rangle$ e $|V\rangle$. Un'ulteriore conferma di quanto aspettato si ha se si considera il grado di polarizzazione V che indica quanto il fascio sia polarizzato ($V \approx 1$ per fasci completamente polarizzati, $V < 1$ per fasci parzialmente polarizzati). In questo caso si ottiene:

$$V = \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2} = 0.99 \pm 0.02$$

Il valore trovato, compatibile con l'unità entro il 68% di confidence level, conferma che il fascio è polarizzato orizzontalmente, e che i suoi parametri di Stokes fanno sì che questo si trovi sulla superficie della sfera di Poincaré

4.2 Misura con filtro polarizzatore PBS_1 rimosso

Allo stesso modo si esegue la misura rimuovendo il PBS_1 e si ottengono i seguenti valori per le intensità e per i parametri di Stokes:

$$\begin{cases} I_0 = (6.26 \pm 0.09)V \\ I_1 : (1.78 \pm 0.09)V \\ I'_1 : (5.44 \pm 0.09)V \\ I_2 : (0.45 \pm 0.09)V \\ I'_2 : (5.81 \pm 0.09)V \\ I_3 : (3.65 \pm 0.09)V \\ I'_3 : (3.36 \pm 0.09)V \end{cases} \quad \begin{cases} S_0 = 1 \\ S_1 = -(0.51 \pm 0.02) \\ S_2 = -(0.86 \pm 0.03) \\ S_3 = (0.04 \pm 0.02) \end{cases}$$

Anche in questo caso è possibile dedurre dai parametri di Stokes la polarizzazione, di tipo lineare, che possiede il laser anche in assenza del PBS_1 . Infatti si hanno valori non nulli sia per S_1 che per S_2 , mentre il parametro S_3 che rappresenta la componente di polarizzazione circolare risulta compatibile con 0 entro il 68% di confidence level.

Il fatto che il vettore possieda però componenti non nulle sia per la polarizzazione lineare orizzontale che per quella lineare a -45° , dimostra come la polarizzazione questa volta debba essere lineare ma inclinata di un angolo non nullo rispetto agli assi orizzontale

e verticale. Infatti l'angolo di inclinazione rispetto alla verticale risulta essere $(-75.7 \pm 0.7)^\circ$, valore ottenuto calcolando l'arcotangente del rapporto tra le componenti I_1 e I'_1 che indicano le componenti di polarizzazione verticale e orizzontale rispettivamente.

Anche in questo caso si può calcolare il grado di polarizzazione del fascio, ottenendo:

$$V = \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2} = 1.00 \pm 0.02$$

In questo caso il valore di V sperimentale coincide uno, il che significa che il fascio è, in pratica, completamente polarizzato e si trova quindi sulla superficie della sfera di Poincaré.

5 Rotazione sulla sfera di Poincaré

Per l'ultima parte dell'esperienza sono stati aggiunti due elementi all'apparato sperimentale, un polaroid, con lo scopo di linearizzare la polarizzazione in entrata, e una lamina $\lambda/2$, così da poter ruotare la polarizzazione lineare indotta dal polaroid. Per primo è stato analizzato il filtro polaroid identificando l'angolo sulla ghiera rotante per cui l'intensità in uscita fosse minima e si è trovato che $I_{min} = (0.11 \pm 0.09)V$ se si pone $\alpha_0 = (248 \pm 1)^\circ$. Si ricorda che il laser possiede una polarizzazione lineare e per questo il fatto che abbia un minimo di intensità significa che il polaroid è stato orientato a $\frac{\pi}{2}$ rispetto al suo asse di polarizzazione. È stato quindi poi ruotato il polaroid in modo da ottenere il massimo di intensità ($\alpha_0 + 90^\circ = 338^\circ \pm 1^\circ$) e si è proceduto a tarare in maniera rapida la $\lambda/2$ con la stessa metodologia della sezione 3.1 (**Figura 6**), ottenendo $\beta_0 = (-36 \pm 7)^\circ$. Una volta completata la preparazione dell'apparato si è proseguito a misurare i parametri di Stokes per 6 configurazioni differenti ottenute ruotando la lamina $\lambda/2$ appena tarata di $\Delta\beta = 15^\circ$, partendo dallo zero sulla ghiera fino ad arrivare a 90° . Eseguendo il calcolo a livello teorico, sfruttando le matrici di Jones, si ottiene che questa operazione dovrebbe comportare una rotazione completa del vettore di polarizzazione sulla sfera di Poincaré sul piano della polarizzazione lineare a step di 60° (ogni step corrisponde ad una rotazione di $2\Delta\beta = 30^\circ$ della polarizzazione). Il grado di polarizzazione, in tutti i casi esaminati, deve mantenersi ≈ 1 in quanto, anche se ruotata dalla $\lambda/2$, il fascio dovrebbe rimanere completamente polarizzato. Ciò si traduce nella norma del vettore che deve rimanere costante e di valore circa 1.

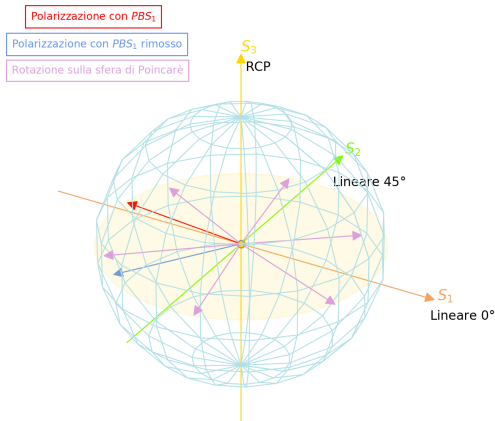


Figura 4: Sfera di Poincaré

I dati raccolti sono riportati in **Tabella 5** con le relative incertezze sperimentali. I vettori di polarizzazione corrispondenti alle 6

misure sono stati graficati sulla sfera di Poincaré in **Figura 4** (in viola), assieme ai due vettori di polarizzazione relativi alla sezione precedente, ossia quelli che rappresentano la polarizzazione del fascio con il PBS_1 inserito (in rosso) e con il PBS_1 rimosso (in blu).

Dall'immagine si può notare come i dati sperimentali seguano l'andamento atteso essendo tutti contenuti nel piano equatoriale della sfera di Poincaré ($S_3 \approx 0$ non ci sono componenti di polarizzazione circolare), e risultano all'incirca equispaziati, con $\Delta\Omega$ che risulta compatibile con il valore teorico di 60° in ciascuna delle misure entro il 99% di confidence level, ossia è compatibile entro 3σ sperimentali se si effettua un test di Gauss (vedi **Tabella 5**). Lo stesso si può affermare per il valore del grado di polarizzazione che in ciascuna delle misure risulta compatibile con il valore atteso 1 entro 3σ .

6 Conclusioni

- Sono state tarate le lamine $\lambda/2$ e $\lambda/4$ mediante fit sulle funzioni riportate in **Equazione 1** e **Equazione 2**, ricavando rispettivamente $\theta_0 = (16 \pm 3)^\circ$ e $\phi_0 = (-47 \pm 1)^\circ$.

- Esistono 2 angoli θ_0 distanti 180° .

- Nella configurazione di $\theta = 45^\circ$ rispetto a θ_0 l'intensità registrata è nulla entro le incertezze, $I = (0.01 \pm 0.09)V$, proprio come atteso.

- Nella configurazione $\theta = 0^\circ$ e $\phi = 45^\circ$ il valore teorico dell'intensità letta dal fotodiodo è $I_0/2$ con $I_0 = (5.63 \pm 0.09)$ che rappresenta l'intensità senza WPs. Dai dati raccolti si ottiene una stima di $I = (2.35 \pm 0.09)V$ che dista 5.16σ dal valore atteso. Questo non risulta compatibile ed è probabilmente dovuto ad errori di allineamento e a imperfezioni strutturali dell'apparato. Sempre in questa configurazione sono state raccolte ulteriori misurazioni al variare di θ così da verificare l'andamento costante dell'intensità predetto dall'algebra delle matrici di Jones. I risultati, anche se fluttuanti, confermano quando atteso visto che i valori si discostano dal valor medio di un valore trascurabile.

- Sono stati stimati i parametri di Stokes sia nel caso di PBS posto all'inizio dell'apparato sia in sua assenza. Usando la notazione $\vec{S} = (1, H, +45^\circ, R)$, nella prima configurazione si ha $\vec{S} = (1, -0.99, -0.09, 0.01)$ ovvero la polarizzazione orizzontale causata dal PBS, nella seconda invece $\vec{S} = (1, -0.51, -0.86, 0.04)$ ovvero lineare inclinata con un angolo $(-75.7 \pm 0.7)^\circ$ rispetto alla verticale. (Per le incertezze su \vec{S} guardare le sezioni 4.1 e 4.2)

- È stata eseguita una rotazione completa sul piano della polarizzazione lineare a step di 30° , che corrispondono a step di 60° sulla sfera di Poincaré. I dati sperimentali riportati in **Tabella 5** risultano compatibili con quanto atteso.

Misure per la stima della fluttuazione					
I [V]	8.058	8.277	8.175	8.149	8.304

Tabella 1

Wave Plate $\frac{\lambda}{2}$		
N °	θ [Gradi]	I [V]
1	-90 ± 1	3.04 ± 0.09
2	-80 ± 1	3.92 ± 0.09
3	-70 ± 1	4.14 ± 0.09
4	-60 ± 1	3.25 ± 0.09
5	-50 ± 1	1.86 ± 0.09
6	-40 ± 1	0.55 ± 0.09
7	-30 ± 1	0.03 ± 0.09
8	-20 ± 1	0.46 ± 0.09
9	-10 ± 1	1.74 ± 0.09
10	0 ± 1	3.12 ± 0.09
11	4 ± 1	3.76 ± 0.09
12	10 ± 1	4.13 ± 0.09
13	14 ± 1	4.28 ± 0.09
14	18 ± 1	4.20 ± 0.09
15	20 ± 1	4.10 ± 0.09
16	28 ± 1	3.77 ± 0.09
17	30 ± 1	3.49 ± 0.09
18	34 ± 1	2.85 ± 0.09
19	38 ± 1	2.23 ± 0.09
20	40 ± 1	1.84 ± 0.09
21	44 ± 1	1.30 ± 0.09
22	50 ± 1	0.54 ± 0.09
23	60 ± 1	0.03 ± 0.09
24	70 ± 1	0.55 ± 0.09
25	80 ± 1	1.78 ± 0.09
26	90 ± 1	3.32 ± 0.09

Tabella 2: Dati per la taratura della $\lambda/2$

Wave Plate $\frac{\lambda}{4}$		
N °	ϕ [Gradi]	I [V]
1	-90 ± 1	2.86 ± 0.09
2	-84 ± 1	3.28 ± 0.09
3	-78 ± 1	3.80 ± 0.09
4	-72 ± 1	4.45 ± 0.09
5	-66 ± 1	5.00 ± 0.09
6	-60 ± 1	5.37 ± 0.09
7	-54 ± 1	5.54 ± 0.09
8	-48 ± 1	5.59 ± 0.09
9	-42 ± 1	5.44 ± 0.09
10	-36 ± 1	5.11 ± 0.09
11	-30 ± 1	4.45 ± 0.09
12	-24 ± 1	3.90 ± 0.09
13	-18 ± 1	3.25 ± 0.09
14	-12 ± 1	2.97 ± 0.09
15	-6 ± 1	2.78 ± 0.09
16	0 ± 1	2.75 ± 0.09
17	6 ± 1	2.87 ± 0.09
18	12 ± 1	3.04 ± 0.09

Tabella 3: Dati per la taratura della $\lambda/4$

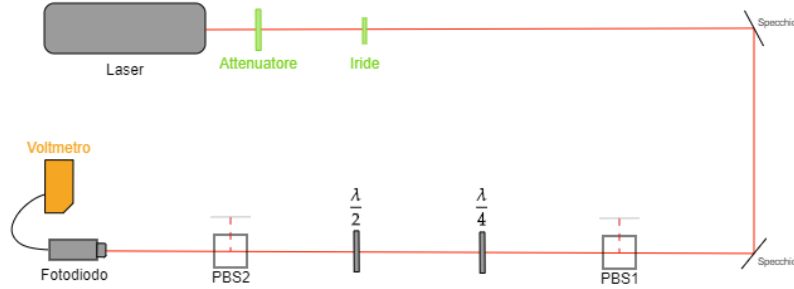


Figura 5: Schema dell'apparato sperimentale

I a $\phi = \phi_0 + 45^\circ$ al variare di θ		
N °	θ [Gradi]	I [V]
1	-50 ± 1	2.65 ± 0.09
2	-40 ± 1	2.69 ± 0.09
3	-30 ± 1	2.58 ± 0.09
4	-20 ± 1	2.49 ± 0.09
5	-10 ± 1	2.33 ± 0.09
6	0 ± 1	2.27 ± 0.09
7	10 ± 1	2.20 ± 0.09
8	15 ± 1	2.35 ± 0.09
9	20 ± 1	2.41 ± 0.09
10	30 ± 1	2.66 ± 0.09
11	40 ± 1	2.79 ± 0.09
12	50 ± 1	0.78 ± 0.09

Tabella 4: Dati raccolti al variare di θ con ϕ fissato a $\phi_0 + 45^\circ = -2^\circ$



Parametri Stokes per la rotazione sulla sfera di Poincaré							
	β [Gradi]	S_1	S_2	S_3	Ω [Gradi]	$ \Delta\Omega $ [Gradi]	V
1	0 ± 1	0.59 ± 0.05	0.69 ± 0.03	-0.10 ± 0.03	50 ± 3	66 ± 4	0.91 ± 0.04
2	15 ± 1	0.89 ± 0.07	-0.25 ± 0.03	-0.10 ± 0.03	-16 ± 2	63 ± 3	0.93 ± 0.06
3	30 ± 1	0.19 ± 0.03	-0.98 ± 0.05	-0.02 ± 0.03	-79 ± 2	54 ± 4	0.98 ± 0.05
4	45 ± 1	-0.68 ± 0.02	-0.72 ± 0.04	0.07 ± 0.03	-133 ± 3	70 ± 4	0.99 ± 0.03
5	60 ± 1	-0.79 ± 0.02	0.34 ± 0.03	0.07 ± 0.03	-203 ± 2	57 ± 3	0.87 ± 0.05
6	75 ± 1	-0.16 ± 0.03	0.99 ± 0.04	0.01 ± 0.03	-260 ± 2	50 ± 4	1.00 ± 0.04

Tabella 5: Dati raccolti al variare di θ con $\alpha = (338 \pm 1)^\circ$ fissato, Ω è l'angolo rispetto all'asse positivo S_1 sul piano della polarizzazione lineare. **Nota:** il $|\Delta\Omega|$ relativo a una misura è calcolato rispetto alla successiva.

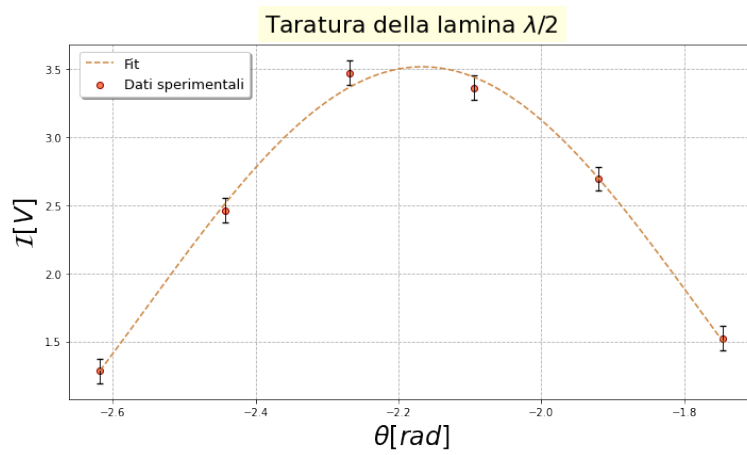


Figura 6: Taratura della $\lambda/2$ della sezione 5

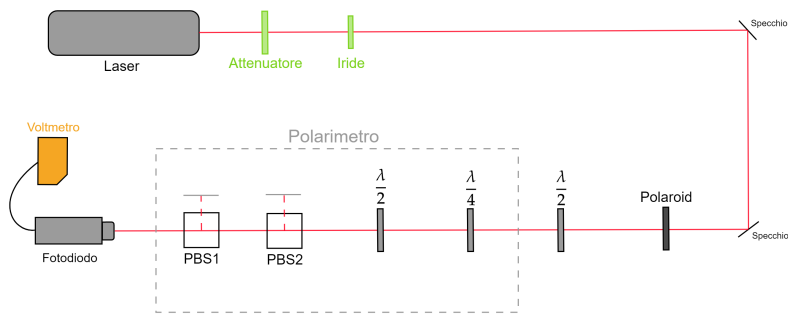


Figura 7: Schema dell'apparato sperimentale della sezione 5