



**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI FERRARA**

**FACOLTA' DI SCIENZE MATEMATICHE FISICHE E  
NATURALI**

Corso di Laurea in Tecnologia Fisiche Innovative

**Sviluppo di un polarimetro con sensore fotovoltaico per la  
misura del grado di polarizzazione della luce solare diffusa  
emisferica, finalizzato alla stima di un indice di nuvolosità.**

Relatore:

Prof. Antonio Parretta

Laureando:

Francesco Bittau

Anno Accademico 2009 – 2010

# Sommario

<b>INTRODUZIONE</b> .....	2
<b>CAPITOLO 1- GENERALITÀ SULLA LUCE SOLARE DIFFUSA</b> .....	3
1.1-L'INTENSITÀ DELLA LUCE DIFFUSA DALL'ATMOSFERA.....	3
1.2 – POLARIZZAZIONE DELLA LUCE SOLARE DIFFUSA DALL'ATMOSFERA .....	7
1.3 – LUCE DIFFUSA TOTALE INCIDENTE SU UNA SUPERFICIE ORIZZONTALE .....	10
<b>CAPITOLO 2- POLARIZZAZIONE DELLA LUCE</b> .....	13
2.1 - RAPPRESENTAZIONE MATEMATICA DELLA POLARIZZAZIONE DELLA LUCE .....	16
<b>CAPITOLO 3 - MISURA DI LUCE POLARIZZATA</b> .....	19
<b>CAPITOLO 4 - MATERIALI ANISOTROPI: BIRIFRANGENZA E DICROIDISMO</b> .....	23
4.1- POLARIZZAZIONE PER DICROIDISMO E BIRIFRANGENZA .....	24
<b>CAPITOLO 5 - DESCRIZIONE DEGLI STRUMENTI</b> .....	27
5.1 - POLARIMETRO “Skypol 1” .....	28
5.2 – Realizzazione del polarimetro “Skypol 2” .....	29
5.2.1- DEFINIZIONE DELLA DIREZIONE DELL'ASSE DI POLARIZZAZIONE DEL POLAROID .....	33
<b>CAPITOLO 6 - IL MOTO APPARENTE DEL SOLE</b> .....	39
<b>CAPITOLO 7 - PRESENTAZIONE E RIELABORAZIONE DATI</b> .....	42
7.1 – PREMESSA .....	42
7.2 – LE MISURE.....	43
7.2.1 – CONFRONTO TRA POLARIMETRO “SKYPOL 1” E “SKYPOL 2” .....	44
7.2.2 - IMMAGINI TOTAL SKY.....	45
7.2.3 – ELABORAZIONE DEI DATI DI POLARIZZAZIONE.....	49
<b>CAPITOLO 8 - NUOVI MODELLI DI POLARIMETRO SKYPOL</b> .....	54
8.1 – PREMESSA.....	54
8.2 – POLARIMETRO “METEO” .....	55
8.3 – POLARIMETRO “CPV” .....	56
8.4 - VARIANTE POLARIMETRO “CPV” :IL “CPV b” .....	58
<b>CONCLUSIONI</b> .....	67
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	69

# ***INTRODUZIONE***

Negli ultimi decenni, a causa dell'inquinamento e del diminuire delle risorse convenzionali per la produzione energetica, è avvenuto un importante sviluppo di tecnologie per la produzione dell'energia elettrica e termica da fonti rinnovabili e innovative come l'idrogeno, la luce solare e le biomasse.

Attualmente all'atto pratico è la luce solare quella che viene maggiormente sfruttata poiché legata all'uso dei semiconduttori che per le politiche industriali sono più vantaggiosi da produrre, anche se la resa energetica non è molto alta (generalmente si hanno rendimenti del 10/20%).

E' quindi molto importante lo studio rivolto all'ottimizzazione, miglioramento ed innovazione di tecnologie che sfruttano i fenomeni che avvengono quando un'onda elettromagnetica quale la luce interagisce con la materia come l'assorbimento, la trasmissione, la polarizzazione, la rifrazione e la diffrazione. In particolare in questo lavoro l'interesse si è focalizzato sulla polarizzazione.

La radiazione solare diffusa emisferica misurata al suolo presenta un grado di polarizzazione che dipende da diversi fattori, tra i quali principalmente l'altezza del sole e lo stato chimico-fisico dell'atmosfera. La principale sorgente di luce diffusa polarizzata è l'atmosfera nella porzione della volta celeste sgombra da nubi, di conseguenza è previsto un alto grado di polarizzazione in condizioni di cielo completamente sereno, mentre al contrario è prevista assenza di polarizzazione in condizioni di cielo completamente coperto.

In generale, quindi, il grado di polarizzazione della luce diffusa misurata al suolo sarà intermedio tra i due estremi suddetti e sarà sensibilmente condizionato dal grado di copertura della volta celeste, pur dipendendo da altri fattori secondari.

La misura del grado di polarizzazione della luce solare diffusa al suolo è utile al fine di estrarre informazioni sullo stato dell'atmosfera, in particolare il grado di copertura della volta celeste e la sua evoluzione nel tempo.

Il settore della meteorologia innanzitutto beneficerebbe della disponibilità di uno strumento nuovo per l'indagine della radiazione diffusa e dello stato dell'atmosfera.

La conversione fotovoltaica o termica a concentrazione dell'energia solare è l'altro settore di interesse.

Essi operano infatti esclusivamente in presenza della componente solare diretta, e quest'ultima è prevalente in condizioni di cielo sereno.

La stima della copertura media del cielo nel lungo periodo risulterebbe utile per valutare l'adeguatezza di un particolare sito all'installazione di impianti solari a concentrazione, a fianco di altre grandezze quale il rapporto di luce diretta su globale (DNI/GNI).

# ***CAPITOLO 1- GENERALITÀ SULLA LUCE SOLARE DIFFUSA***

La polarizzazione della luce solare diffusa dal cielo è un fenomeno che è stato messo in evidenza per la prima volta da J.F.D. Arago nel 1809.

La teoria che ne è alla base è quella dello “scattering” di Rayleigh.

## **1.1-L'INTENSITÀ DELLA LUCE DIFFUSA DALL'ATMOSFERA**

La teoria di Rayleigh si applica a centri di scattering di dimensioni molto inferiori alla lunghezza d'onda della luce:

$$\sqrt{\langle s^2 \rangle} < \lambda/20 \quad (1.1.1)$$

Dove  $\langle s^2 \rangle$  è il raggio quadratico medio di girazione del centro di scattering.

Per le lunghezze d'onda del visibile (400nm-800nm) l'equazione si può riscrivere come:

$$\sqrt{\langle s^2 \rangle} < 20 - 40 \text{ nm} \quad (1.1.2)$$

e quindi in linea di principio si applica sia alle molecole di gas dell'atmosfera che ad altre particelle di piccole dimensioni.

La teoria di light scattering di Rayleigh estesa al caso di particelle otticamente non piccole e a soluzioni non ideali è nota come teoria di Rayleigh - Gans.

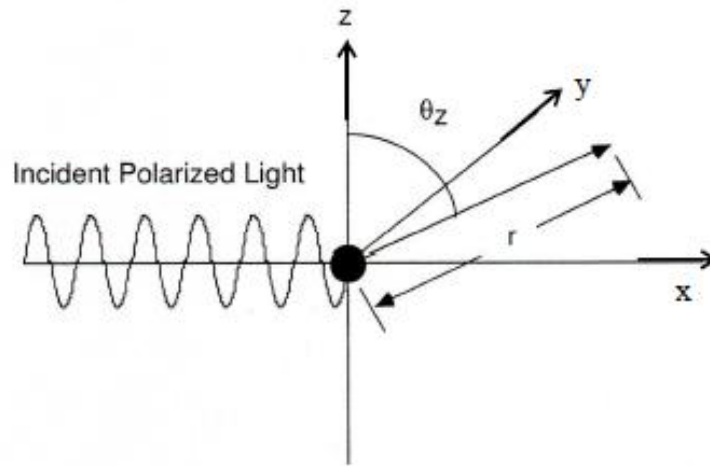
Secondo la teoria di Rayleigh, un campo elettrico oscillante lungo la direzione z:

$$E_z = E_o \cdot \cos\left(\frac{2\pi ct}{\lambda}\right) \quad (1.1.3)$$

con c velocità della luce, che incide su una particella di polarizzabilità  $\alpha_p$ , induce su di essa un *momento di dipolo* p proporzionale al campo elettrico, con  $\alpha_p$  costante di proporzionalità:

$$p = \alpha_p \cdot E_o \cdot \cos\left(\frac{2\pi ct}{\lambda}\right) \quad (1.1.4)$$

Il momento di dipolo indotto irradierà la luce in tutte le direzioni.



**FIGURA 1.1.1** – Irradiazione del momento di dipolo e angolo  $\theta_z$

Consideriamo ora la luce diffusa a distanza  $r$  dall'origine lungo la direzione che forma un angolo  $\theta_z$  con l'asse  $z$ .

Il campo elettrico della luce diffusa sarà proporzionale alla derivata seconda rispetto al tempo del momento di dipolo, inversamente proporzionale alla distanza e proporzionale a  $\sin \theta_z$ :

$$E_s = \frac{1}{c^2} \frac{d^2 p}{dt^2} \cdot \frac{1}{r} \cdot \sin \theta_z = -\frac{1}{c^2} \alpha_p E_0 \frac{4\pi^2 c^2}{r \lambda^2} \cdot \sin \theta_z \cdot \cos\left(\frac{2\pi ct}{\lambda}\right) \quad (1.1.5)$$

L'intensità del campo elettrico è data dal quadrato della sua ampiezza:

$$I_s = \alpha_p^2 I_{oz} \frac{16\pi^4}{r^2 \lambda^4} \cdot \sin^2 \theta_z \quad (1.1.6)$$

Con  $I_{oz} = E_0^2$  intensità della luce polarizzata lungo  $z$ .

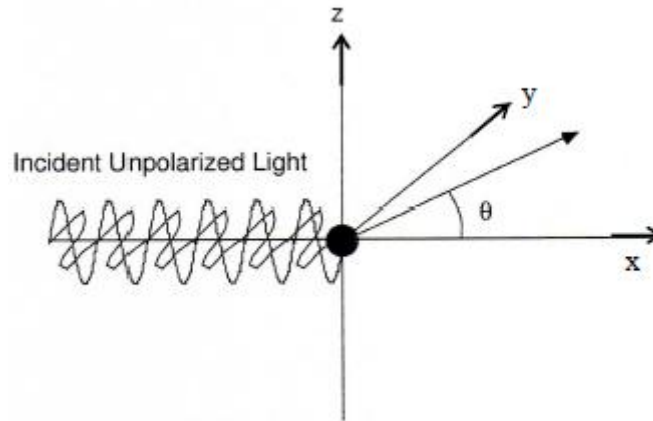
Per luce non polarizzata, l'intensità incidente  $I_0$  si può considerare divisa equamente tra gli assi  $z$  e  $y$ :

$$I_0 = \frac{1}{2} I_{oz} + \frac{1}{2} I_{oy} \quad (1.1.7)$$

E l'intensità della luce diffusa diventa:

$$I_s = \frac{1}{2} I_{sz} + \frac{1}{2} I_{sy} = I_0 \frac{8\pi^4 \alpha_p^2}{r^2 \lambda^4} (\sin^2 \theta_z + \sin^2 \theta_y) \quad (1.1.8)$$

Dove  $\theta_y$  è l'angolo che la direzione di osservazione forma con l'asse  $y$ .



**Figura 1.1.2 – Irradiazione di dipolo e angolo  $\theta$**

Indicando con  $\theta = \theta_x$ , l'angolo che la direzione generica forma con l'asse x, ed essendo:

$$\cos^2\theta_x + \cos^2\theta_y + \cos^2\theta_z = 1 \quad (1.1.9)$$

abbiamo:

$$\sin^2\theta_y + \sin^2\theta_z = 1 + \cos^2\theta \quad (1.1.10)$$

e l'equazione per l'intensità della luce diffusa da una sola particella diventa:

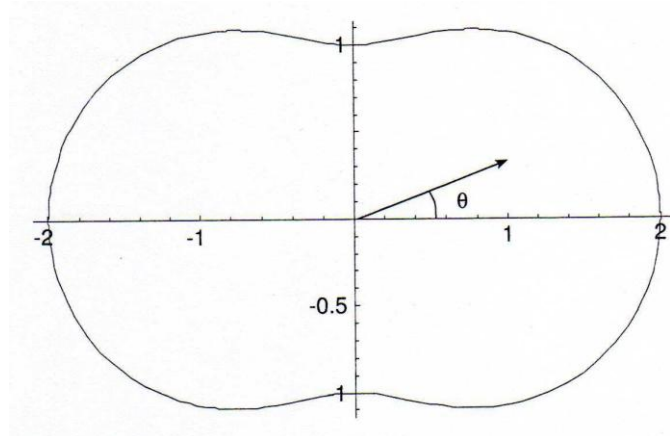
$$I_s = I_0 \frac{8\pi^4 \alpha_p^2}{r^2 \lambda^4} (1 + \cos^2\theta) \quad (1.1.11)$$

Per un numero  $n \cdot N_A$  di particelle, con n numero di moli e  $N_A$  numero di Avogadro, in una soluzione diluita di volume V, l'intensità di diffusione per unità di volume all'angolo  $\theta$  diventa:

$$I_\theta^0 = \frac{I_0 n N_A}{V} \cdot \frac{8\pi^4 \alpha_p^2}{r^2 \lambda^4} (1 + \cos^2\theta) \quad (1.1.12)$$

Dove l'apice 0 indica che si tratta di diffusione di particelle(molecole) piccole.

Il diagramma che mostra la dipendenza spaziale dell'intensità della funzione  $1 + \cos^2\theta$  è mostrato in figura.



**Figura 1.1.3** – Grafico funzione  $1 + \cos^2\theta$

L'intensità massima si ottiene per  $\vartheta = 0^\circ$  (forward scattering) e  $\vartheta = 180^\circ$  (backward scattering), quella minima per  $\vartheta = 90^\circ$  e  $\vartheta = 270^\circ$ .

Per quanto riguarda invece la dipendenza dalla lunghezza d'onda, l'intensità è proporzionale a  $1/\lambda^4$ . La conseguenza è che la diffusione delle lunghezze d'onda più corte è più intensa, e questo spiega il colore azzurro-blu del cielo che si osserva di giorno per valori di  $\vartheta$  diversi da 0.

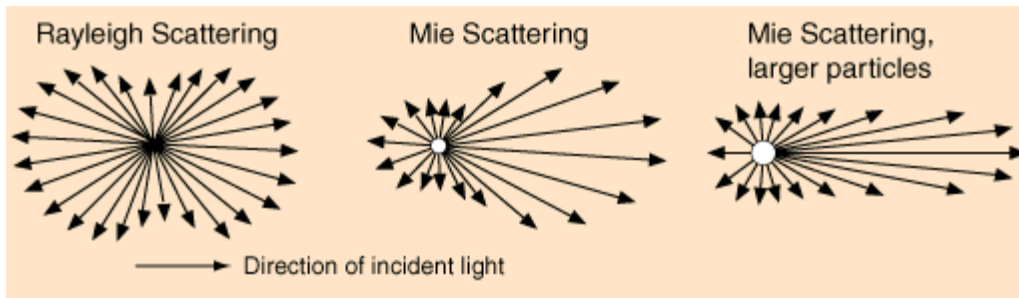
A rigor di logica si dovrebbe vedere il cielo viola perché questo è il colore maggiormente diffuso, ma il motivo per cui l'effettivo colore percepito è da ricercare in componenti biologiche: l'occhio umano infatti, è molto più sensibile ai colori rosso, verde e blu

La colorazione tipica delle albe e dei tramonti è dovuta alla differenza di spessore di atmosfera attraversato dal raggio luminoso che, per successive diffusioni, viene progressivamente privato delle componenti blu, azzurre e viola.

Per quanto riguarda invece la diffusione della luce da parte delle nubi, possiamo dire che essendo queste formate da particelle d'acqua molto più grandi delle molecole d'aria la cui dimensione supera la  $\lambda$  della luce incidente, la diffusione da parte di esse è praticamente indipendente dalla lunghezza d'onda nel range del visibile e questo spiega il loro tipico colore bianco.

Quando non è rispettata la condizione di piccole particelle, la teoria di Rayleigh non è più valida e, per dimensioni maggiori di  $\lambda/20$  si applica la teoria di Mie.

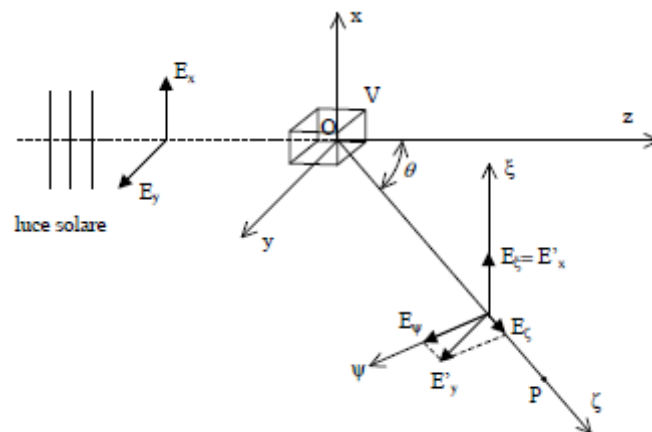
L'emissione non è più simmetrica ma presenta il lobo anteriore più intenso.



**Figura 1.1.4** – Confronto tra l'intensità direzionale dello scattering di Rayleigh e di Mie

## 1.2 – POLARIZZAZIONE DELLA LUCE SOLARE DIFFUSA DALL'ATMOSFERA

Discutiamo ora della polarizzazione della luce diffusa, la cui intensità è stata descritta precedentemente.



**Figura 1.2.1** – Centro diffusore colpito da radiazione solare

Un volumetto  $V$  di aria contenente un certo numero di centri diffusori è investito dall'onda piana della luce diretta del Sole.

Ne risulta una luce diffusa nella direzione dell'osservatore, individuata dall'angolo  $\theta$  di diffusione.

Sia  $x, y, z$  il sistema di riferimento solidale con  $V$ , con l'asse  $z$  nella direzione opposta al Sole.



Essendo l'onda piana non polarizzata, le componenti del campo elettrico lungo le direzioni x e y saranno uguali:  $E_x=E_y=E_0$ .

Sia P il punto in cui è posizionato un osservatore e OP la direzione di visuale di V.

La direzione OP e l'asse z individuano un piano detto piano di diffusione e l'angolo  $\vartheta$  formato dalla direzione OP e dall'asse z è l'angolo di diffusione.

Sia poi  $\xi, \psi, \zeta$  il sistema di riferimento solidale con l'osservatore, con l'asse  $\zeta$  nella direzione di visuale di V.

Siano poi  $E'_x, E'_y$  le componenti lungo x e y del campo elettrico della luce diffusa da V, proporzionali secondo la costante ai rispettivi campi elettrici dell'onda incidente.

Le componenti del campo elettrico  $E_\xi, E_\psi, E_\zeta$ , della luce diffusa lungo gli assi  $\xi, \psi, \zeta$  del sistema di riferimento dell'osservatore saranno dati allora da:

$$E_\xi = E'_x = a \cdot E_x = a \cdot E_0 \quad (1.2.1)$$

$$E_\psi = E'_y \cdot \cos \vartheta = a \cdot E_y \cdot \cos \vartheta = a \cdot E_0 \cdot \cos \vartheta \quad (1.2.2)$$

$$E_\zeta = E'_y \cdot \sin \vartheta = a \cdot E_y \cdot \sin \vartheta = a \cdot E_0 \cdot \sin \vartheta \quad (1.2.3)$$

La componente  $E_\zeta$ , parallela alla direzione di osservazione, a causa della natura trasversale della luce, non si propagerà lungo la direzione  $\zeta$ , ovvero contribuirà alla luce misurata da P con un'intensità nulla.

Ne deduciamo che alla luce diffusa che giunge in P è associato un campo elettrico avente le componenti date dalla 1.1.13 e 1.1.15.

La luce diffusa in P è allora composta da due onde polarizzate aventi intensità diverse e precisamente:

$$I_\xi = k \cdot E_\xi^2 = k \cdot a^2 \cdot E_0^2 = A \cdot E_0^2 \quad (1.2.4)$$

$$I_\psi = k \cdot E_\psi^2 = k \cdot a^2 \cdot E_0^2 \cdot \cos^2 \vartheta = A \cdot E_0^2 \cdot \cos^2 \vartheta \quad (1.1.5)$$

Quando l'angolo di diffusione  $\vartheta$  è nullo oppure è un multiplo di  $\pi$  le due intensità  $I_\xi$  e  $I_\psi$  saranno uguali e si avrà luce naturale, non polarizzata.

Quando l'angolo di diffusione  $\vartheta$  è pari ad un numero dispari di  $\pi/2$  l'intensità  $I_\psi$  sarà nulla e si avrà una luce totalmente polarizzata lungo la direzione  $\xi$ .

In tutti gli altri casi si avrà luce polarizzata parzialmente.

Si definisce "grado di polarizzazione"  $\Omega$  il rapporto tra l'intensità  $I^*$  di luce polarizzata e l'intensità totale:

$$\Omega = \frac{I^*}{I_{tot}} = \frac{I_{\xi} - I_{\psi}}{I_{\xi} + I_{\psi}} = \frac{\sin^2 \vartheta}{1 + \cos^2 \vartheta} \quad (1.2.6)$$

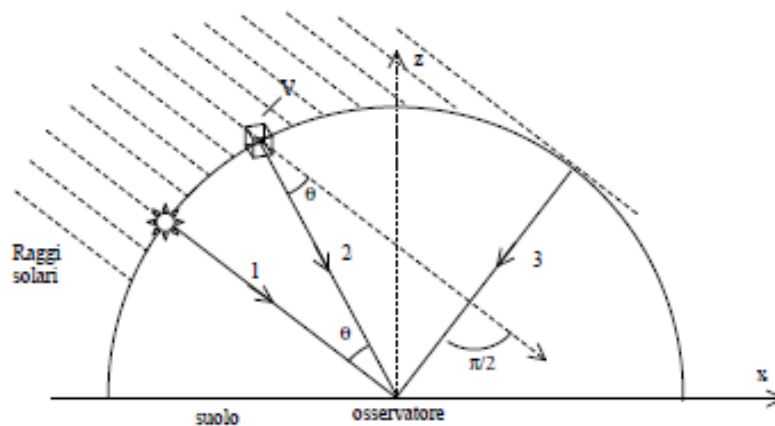
La direzione di polarizzazione della luce polarizzata è individuata dalla direzione del vettore intensità più intenso, in questo caso il vettore  $I_{\xi}$ .

Schematizziamo allora l'atmosfera come una volta sferica diffondente e indichiamo con  $\vartheta$  l'angolo di diffusione, formato dalla direzione dei raggi solari con la direzione di osservazione.

Esaminiamo per semplicità il piano di diffusione verticale passante per l'osservatore.

Per l'ultima equazione dovremmo vedere sempre luce parzialmente polarizzata ( $\Omega < 1$ ) tranne che per  $\vartheta = \pi/2$  dove è totalmente polarizzata ( $\Omega = 1$ ).

La direzione di polarizzazione della luce è sempre perpendicolare al piano passante per il sole, il volumetto  $V$  e l'osservatore.



**Figura 1.2.2** - Atmosfera schematizzata come una volta sferica diffondente. Luce diretta 1: non polarizzata (NP); luce diffusa 2: parzialmente polarizzata (PP); luce diffusa 3: totalmente polarizzata (TP).

Nel caso in figura la direzione di polarizzazione coincide con l'asse  $y$  ortogonale al piano del foglio. Nella realtà, un esame accurato della polarizzazione della luce del cielo mostra che la condizione  $\Omega = 1$  non si verifica mai;  $\Omega$  differisce da 1 di una quantità detta "difetto di polarizzazione".

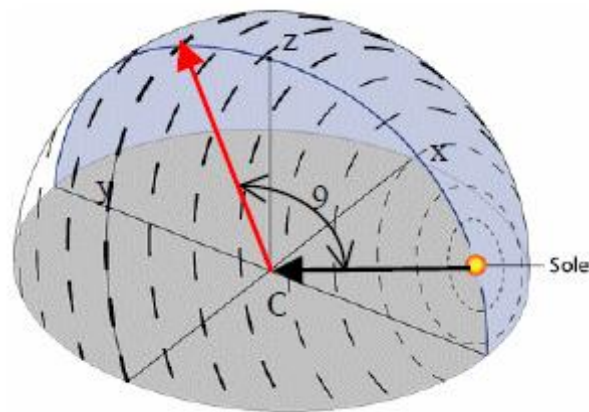
Le cause di questa discrepanza sono molteplici e tutte tendono a diminuire il grado di polarizzazione: polarizzabilità anisotropa delle molecole, scattering multiplo della luce tra le molecole d'aria, scattering da particelle di aerosol e da polveri, luce riflessa dalle nubi e dal terreno.

### 1.3 – LUCE DIFFUSA TOTALE INCIDENTE SU UNA SUPERFICIE ORIZZONTALE

Finora ci siamo occupati della polarizzazione della luce diffusa misurata ad una particolare direzione del cielo.

Qual'ora si volesse misurare la luce diffusa totale incidente su una superficie orizzontale, questa sarà data dall'integrale delle proiezioni sul piano orizzontale delle intensità associate alle diverse componenti della luce diffusa.

Per valutare questo integrale, cominciamo a considerare il caso semplice di cielo completamente sereno.



**Figura 1.3.1** – “Mappa della polarizzazione della luce”

Partiamo dalla “mappa” della polarizzazione della luce, rappresentata in figura 1.3.1, così come è vista da un osservatore O posto nell'origine degli assi di una terna cartesiana.

La mappa è costruita simmetricamente rispetto alla direzione dei raggi solari, che nella figura è individuata dalla direzione Sole-O.

Consideriamo proprio la direzione Sole – O e tanti piani ortogonali a essa, traslati lungo l'asse y avanti e indietro l'origine O.

Questi piani intersecano la superficie della calotta in corrispondenza di cerchi che sono i luoghi dei punti che presentano lo stesso grado di polarizzazione.

I punti appartenenti allo stesso cerchio, infatti, sono tutti caratterizzati dallo stesso angolo di diffusione  $\vartheta$ .

Questo significa che, se si punta un polarizzatore verso i punti dello stesso cerchio, si misurerà lo stesso grado di polarizzazione.

La direzione della polarizzazione è sempre tangente al cerchio corrispondente in quanto, come abbiamo già discusso in precedenza, questa direzione è sempre perpendicolare al piano di polarizzazione individuato dai punti: Sole - diffusore-osservatore.

Il massimo grado di polarizzazione si trova sul piano che passa per l'origine degli assi ovvero per l'osservatore.

Il cerchio corrispondente è il cerchio massimo della sfera che contiene la calotta.

Nella “mappa” della polarizzazione della luce su questo cerchio i vettori sono rappresentati più spessi degli altri.

Immaginiamo ora che un osservatore si ponga nel punto O e che guardi la volta celeste lungo il piano y/z, a partire dalla direzione -y fino ad arrivare alla direzione y.

Esso registrerà sempre una luce polarizzata lungo l’asse , ovvero il semiasse maggiore dell’ellisse di polarizzazione sarà sempre orientato lungo l’asse x.

Se guardiamo la volta celeste lungo il piano y/z, a partire dalla direzione Sole-O fino ad arrivare alla direzione y, registriamo un grado di polarizzazione via via crescente fino ad un massimo dalla parte del semipiano z/y in corrispondenza della direzione che forma un angolo di 90° con quello dei raggi solari, dopodiché il grado di polarizzazione torna nuovamente a diminuire.

Per l’angolo di diffusione di 90°, il grado di polarizzazione è 1.

Se ora consideriamo le singole componenti di luce diffusa, provenienti da tutte le possibili direzioni, troviamo che la proiezione sul piano x/y del corrispondente ellisse di polarizzazione non è sempre orientata lungo l’asse x.

In condizioni di simmetria del cielo, però, come ad esempio è il caso di cielo completamente sereno, avremo che ad una componente ruotata rispetto all’asse x di un certo angolo, corrisponde una componente immagine, ruotata dell’angolo opposto, col risultato che la media delle due componenti è ancora orientata lungo l’asse x.

Quindi, in condizione di cielo simmetrico, ovvero uniforme o coperto in maniera simmetrica rispetto al piano d’incidenza y/z, il polarizzatore adagiato sul piano x/y misura una luce diffusa risultante polarizzata, con un grado di polarizzazione medio dipendente dalla percentuale di cielo sereno, e con la direzione di polarizzazione coincidente con la direzione dell’asse x.

In condizioni di cielo coperto qualsiasi, ci aspettiamo che il grado di polarizzazione sia una funzione statisticamente crescente della porzione di cielo sereno e che la direzione di polarizzazione sia statisticamente allineata con l’asse x.

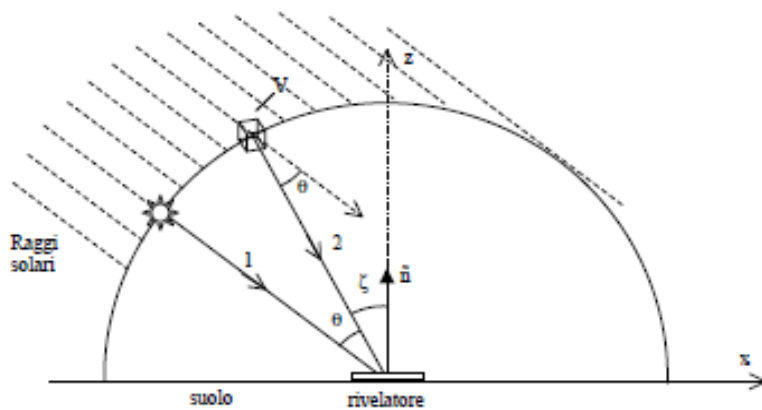
Con questo si intende che il grado di polarizzazione potrà avere fluttuazioni statistiche al variare della posizione della porzione di cielo sereno all’interno della semisfera, ma ci aspettiamo che, in media, esso sia una funzione crescente della percentuale di cielo sereno.

Come già accennato, le misure di polarizzazione sono affette, oltre che al grado di copertura del cielo, anche dall’altezza del Sole.

L’altezza del sole, ovvero l’angolo h che il Sole forma con l’orizzonte, è anche rappresentata dall’AM(Air Mass):

$$AM = \frac{1}{\sin h} \quad (1.3.1)$$

Se effettuassimo misure fissando lo stato dell'atmosfera ma con un diverso valore di AM, misureremmo sul piano orizzontale una media diversa, ovvero crescente al crescere di AM. Questo perché, per un rivelatore orizzontale, il cerchio sulla calotta corrispondente alla massima polarizzazione ha un'efficacia sul rivelatore sempre crescente quanto più si avvicina alla posizione verticale, corrispondente al massimo valore di AM, cioè con il sole all'alba o al tramonto.



**Figura 1.3.2** – Mappa della polarizzazione vista lungo l'asse y

La luce diffusa dal volumetto V è vista dal rivelatore come un'onda piana incidente con angolo  $\zeta$  rispetto alla normale al rivelatore, quindi il flusso è proporzionale a  $\cos(\zeta)$ .

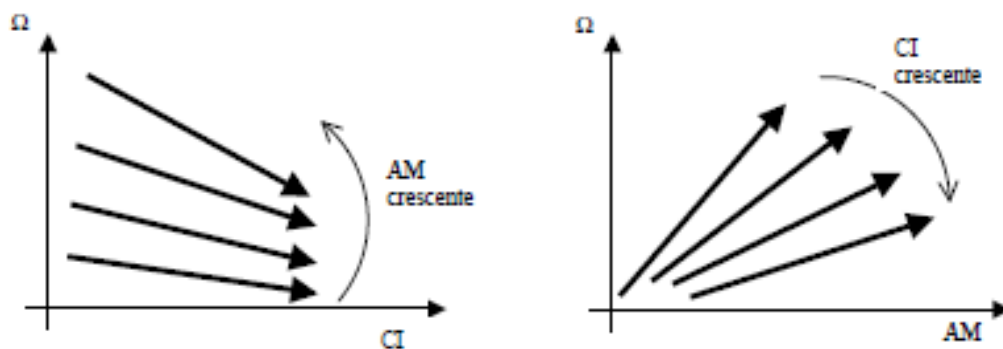
A parità d'intensità diffusa, la misura è massima quando  $\zeta = 0$  (zenit).

Ci interessa al momento considerare il grado di polarizzazione in funzione del grado di copertura del cielo CI (Cloudiness Index) e in funzione dell'AM.

Ci limitiamo a fare delle previsioni sulla tendenza dei risultati in funzione di queste due variabili.

Tenendo conto che la componente di luce polarizzata derivi prevalentemente da quella porzione di cielo sgombra da nubi, ci aspettiamo che il grado di polarizzazione si riduca, a parità di altre condizioni, al crescere della porzione del cielo coperto.

Da quanto già detto sull'effetto dell'AM, ci aspettiamo allora che il grado di polarizzazione aumenti, a parità di altre condizioni, all'aumentare dell'AM.



**Figura 1.3.3** – Andamento della polarizzazione vs. CI e vs. AM.

# CAPITOLO 2- POLARIZZAZIONE DELLA LUCE

Lo stato di polarizzazione è una caratteristica delle onde elettromagnetiche.

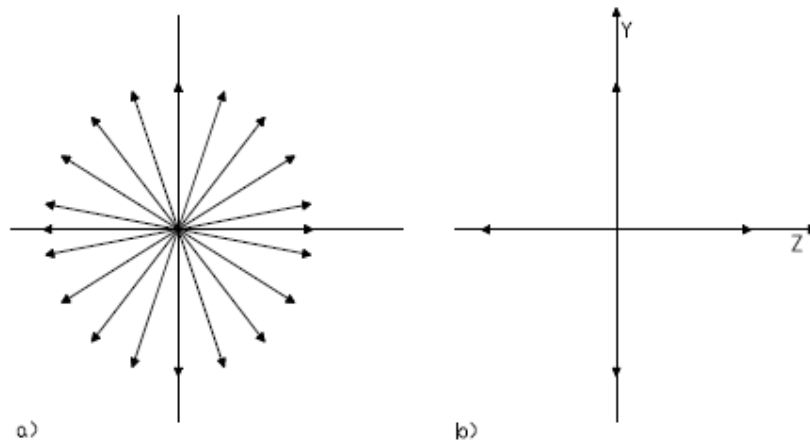
Per descrivere lo stato di polarizzazione si fa riferimento, per convenzione, al solo vettore campo elettrico  $\vec{E}$ .

Le onde di luce comune come quelle provenienti dal sole o da una lampada fluorescente, sono polarizzate casualmente, ovvero non polarizzate.

Detto in altro modo, il campo elettrico  $\vec{E}$  che è sempre perpendicolare alla direzione di propagazione dell'onda, cambia direzione in maniera casuale.

In linea di principio, ciascun campo elettrico può essere scomposto nelle componenti y e z.

Figura 2.1



Al propagarsi dell'onda queste 2 componenti oscillano parallelamente ai propri assi come in figura. La doppia freccia lungo l'asse y rappresenta le oscillazioni della componente y del campo elettrico, mentre la doppia freccia lungo l'asse z rappresenta le oscillazioni della componente z.

Così facendo, di fatto trasformiamo la luce non polarizzata nella combinazione lineare di due onde polarizzate i cui piani di oscillazione sono perpendicolari tra di loro, uno parallelo all'asse y, l'altro parallelo all'asse z.

Analogamente possiamo ricorrere ad una rappresentazione di questo tipo nel caso di luce parzialmente polarizzata.

Le sue oscillazioni sono ancora casuali per quanto riguarda la direzione del piano di oscillazione del campo elettrico, però l'intensità del campo elettrico è diversa per diverse direzioni.

In particolare le oscillazioni lungo uno dei due assi saranno più intense rispetto all'altro asse.

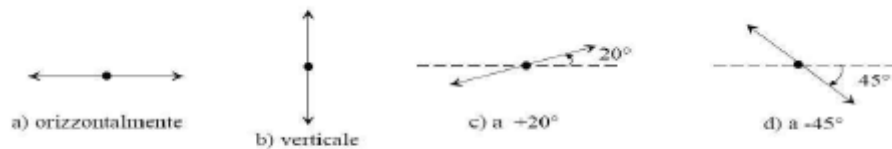
Quando il campo elettrico  $\vec{E}$  cambia direzione in maniera non casuale, si dice che l'onda è polarizzata.

I diversi stati di polarizzazione della luce sono di 3 tipi:

(N.B.: negli esempi la luce si propaga in direzione perpendicolare al foglio in verso uscente)

- **Rettilineo o lineare:** la direzione del vettore  $\vec{E}$  è costante nel tempo e il suo estremo, in un dato punto dello spazio, descrive nel tempo un segmento. Convenzionalmente viene rappresentata con un segmento a doppia freccia

**Figura 2.2**



**Stato di polarizzazione rettilineo**

- **Circolare:** l'estremo del vettore  $\vec{E}$ , in un dato punto, descrive nel tempo una circonferenza. Si distingue tra polarizzazione circolare destrorsa o sinistrorsa a seconda che l'estremo del vettore  $\vec{E}$ , visto da un osservatore nel verso in cui si propaga l'onda, descriva nel tempo una circonferenza in senso orario o antiorario.

**Figura 2.3**



**Stato di polarizzazione circolare**

- **Ellittico:** si presenta quando l'estremo del vettore  $\vec{E}$ , in un dato punto, descrive nel tempo un'ellisse; anche in questo caso si distingue tra polarizzazione destrorsa o sinistrorsa a seconda se l'estremo di  $\vec{E}$  descriva nel tempo un'ellisse in senso orario o antiorario.

**Figura 2.4**



Stato di polarizzazione ellittico

Il caso di polarizzazione ellittica è il caso più generale quello rettilineo e circolare sono casi particolari, tra poco vedremo il perché.

Un'onda polarizzata nello stato più generale nello stato di polarizzazione più generale ellittico. Può essere rappresentata come la sovrapposizione coerente, cioè con una relazione di fase fissa di due onde, della stessa frequenza, polarizzate linearmente secondo due direzioni a loro ortogonali.

Le caratteristiche di uno stato di polarizzazione (eccentricità, direzione dell'asse maggiore, verso di percorrenza) dipendono dalle ampiezze delle due onde componenti e della loro relazione di fase, costante nel tempo.

Lo stato di polarizzazione ellittico è caratterizzato dai seguenti parametri:

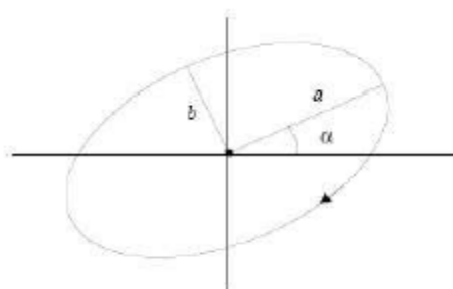
- L'angolo  $\alpha$  (azimut), angolo formato tra semiassa maggiore e l'asse x;  $-90^\circ \leq \alpha \leq +90^\circ$
- ELLITTICITÀ: è il rapporto  $b/a$  tra i due semiassi ;
- ELICITÀ: specifica il verso dell'estremo del vettore  $\vec{E}$ ; si può avere elicità destrorsa o sinistrorsa.

Lo stato di polarizzazione lineare è un caso particolare corrispondente ad elicità 0 mentre lo stato di polarizzazione circolare è un caso particolare corrispondente ad elicità 1.

Si può osservare che:

- La polarizzazione circolare comprende un due forme differenti per elicità;
- La polarizzazione ellittica comprende infinite forme che differiscono per azimut, ellitticità ed elicità.

Figura 2.4



Caratteristiche dello stato di polarizzazione ellittico



## 2.1 - RAPPRESENTAZIONE MATEMATICA DELLA POLARIZZAZIONE DELLA LUCE

Esaminiamo la rappresentazione matematica dei vari stati di polarizzazione partendo dal caso più generale che è quello di un'onda piana polarizzata ellitticamente.

Ricordiamo l'espressione dell'onda armonica che si propaga nel vuoto:

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{A}(\vec{r})e^{-i(\omega t - \vec{k}\vec{r} + \delta)} \quad (2.1.1)$$

o separando la parte spaziale da quella temporale

$$\vec{E}(\vec{r}) = \vec{A}(\vec{r})e^{-ig(\vec{r})}e^{-i\omega t} \quad (2.1.2)$$

La funzione scalare della posizione è data dalla  $g(\vec{r}) = \vec{k}\vec{r} - \delta$ ; le superfici  $g(\vec{r}) = \text{cost}$  sono le superfici su cui l'onda ha fase costante.

Fissiamo un sistema di riferimento nel quale la direzione e verso dell'asse z coincide con la direzione e verso del vettore d'onda  $\vec{k}$ .

In un tale sistema di riferimento il vettore campo elettrico  $\vec{E}$  associato all'onda ha solo componenti x e y.

In particolare per il vettore ampiezza  $\vec{A}(\vec{r})$ , possiamo scrivere:

$$\vec{A}(\vec{r}) = A_x e^{i\delta_x} \vec{i} + A_y e^{i\delta_y} \vec{j} \quad (2.1.3)$$

Con  $A_x$  e  $A_y$  sono costanti reali positive;  $\delta_x$  e  $\delta_y$  fasi iniziali che dipendono dalla scelta dei tempi.

Nel sistema di riferimento fissato le componenti x e y del vettore campo elettrico  $\vec{E}$  associato all'onda, possono essere scritte nella forma:

$$E_x(z, t) = A_x \cos(\omega t - kz + \delta_x) \quad (2.1.4) \quad E_y(z, t) = A_y \cos(\omega t - kz + \delta_y) \quad (2.1.5)$$

Indicando con  $\tau$  la parte variabile del fattore di fase, cioè  $\tau = (\omega t - kz)$ , possiamo scrivere che il luogo geometrico dei punti in un piano (x,y) ad un determinato z, dove le componenti del vettore  $\vec{E}$  sono date da:

$$\begin{cases} E_x = A_x \cos(\tau + \delta_x) \\ E_y = A_y \cos(\tau + \delta_y) \\ E_z = 0 \end{cases} \quad (2.1.6)$$

che rappresenta l'equazione parametrica della curva descritta nel tempo dall'estremo del vettore campo elettrico  $\vec{E}$  associato all'onda, in un determinato punto nello spazio.

Indicando con  $\delta = \delta_y - \delta_x$  la differenza di fase tra le componenti del vettore  $\vec{E}$ , eliminando  $\tau$  dalle equazioni scritte nel sistema otteniamo:

$$\left(\frac{E_x}{A_x}\right)^2 + \left(\frac{E_y}{A_y}\right)^2 - 2\frac{E_x E_y}{A_x A_y} \cos \delta = \sin^2 \delta \quad (2.1.7)$$

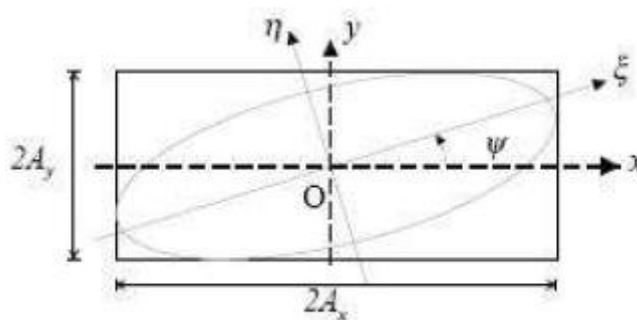
che è l'equazione di un'ellisse.

Possiamo quindi dire che l'estremo del vettore del campo elettrico  $\vec{E}$  associato all'onda descrive nel tempo un'ellisse che giace nel piano dell'onda.

Una tale ellisse può essere interpretata come la composizione di due vibrazioni della stessa frequenza con differente ampiezza e fase, tra le componenti  $E_x(t)$  ed  $E_y(t)$ .

In generale gli assi dell'ellisse non coincidono con gli assi del sistema di riferimento a causa del termine incrociato dell'ultima equazione ricavata.

Si può vedere che l'ellisse è inscritta in un rettangolo di lati  $2A_x, 2A_y$ .



Ellisse inscritta in un rettangolo

Figura 2.1.1

L'elicità sull'ellisse può essere determinata esaminando l'equazione parametrica in un fissato piano, per esempio nel piano  $z=0$ .

In questo piano l'equazione diventa:

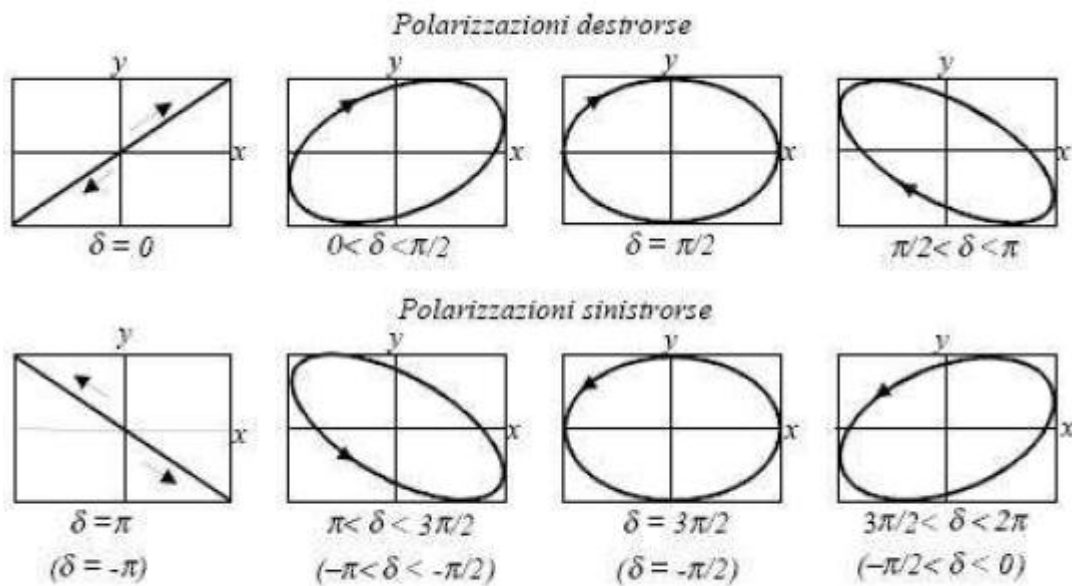
$$\begin{cases} E_x = A_x \cos(\omega t) \\ E_y = A_y \cos(\omega t + \delta) \\ E_z = 0 \end{cases} \quad (2.1.8)$$

con  $\delta = \delta_y + \delta_x$  ( $-\pi \leq \delta \leq \pi$ )

e dipende dalla fase  $\delta$ .

La componente con la fase più grande si dice *in anticipo*, quella con la fase più piccola *in ritardo*. Ricordiamo che per convenzione una polarizzazione è destrorsa o sinistrorsa a seconda che l'estremo del vettore  $\vec{E}$ , visto da un osservatore dal verso in cui si propaga l'onda, descriva nel tempo una circonferenza in senso orario o antiorario: quindi per  $0 < \delta < \pi$  si ha polarizzazione destrorsa mentre, per  $-\pi < \delta < 0$  si ha polarizzazione sinistrorsa.

In figura sono mostrati vari stati di polarizzazione ellittica, con la luce che si propaga in verso uscente dal foglio.



Vari stati di polarizzazione ellittica

Figura

**2.1.2**

Dall'equazione parametrica in  $z=0$ , si può osservare come sia possibile ricavare gli stati di polarizzazione lineare e circolare come casi particolari di quello ellittico.

L'ellisse si riduce ad un segmento quando:

$$\delta = m\pi \quad (m=0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad \text{e} \quad \frac{E_x}{E_y} = (-1)^m \frac{A_y}{A_x}$$

E si dice che la luce è polarizzata linearmente.

L'ellisse diventa una circonferenza quando

$$\delta = \frac{m\pi}{2} \quad (m = \pm 1, \pm 3, \pm 5, \dots) \quad \text{e} \quad E_x = E_y$$

e si dice che la luce è polarizzata circolarmente.

# CAPITOLO 3 - MISURA DI LUCE POLARIZZATA

La misura del grado di polarizzazione  $\Omega$  di un'onda luminosa si effettua utilizzando un polarizzatore, tipicamente una lamina POLAROID.

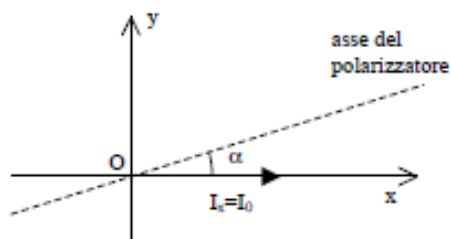
L'azione di un polarizzatore su un'onda incidente linearmente polarizzata è regolata dalla **legge di Malus**.

Secondo tale legge, se  $\alpha$  è l'angolo compreso tra l'asse di polarizzazione del polarizzatore e il vettore intensità  $I_0$  dell'onda, l'intensità dell'onda trasmessa dal polarizzatore è data da:

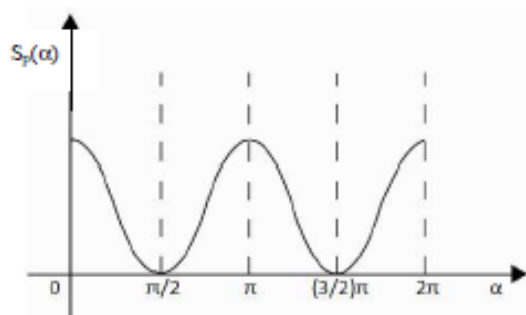
$$I_p(\alpha) = a I_0 \cos^2 \alpha \quad (3.1)$$

con a costante di proporzionalità.

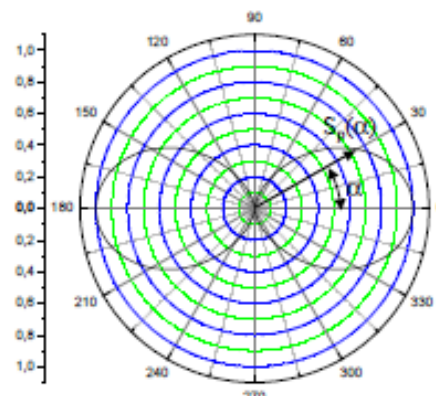
Figura 3.1



Polarizzatore orientato all'angolo  $\alpha$  rispetto al vettore intensità dell'onda LP.



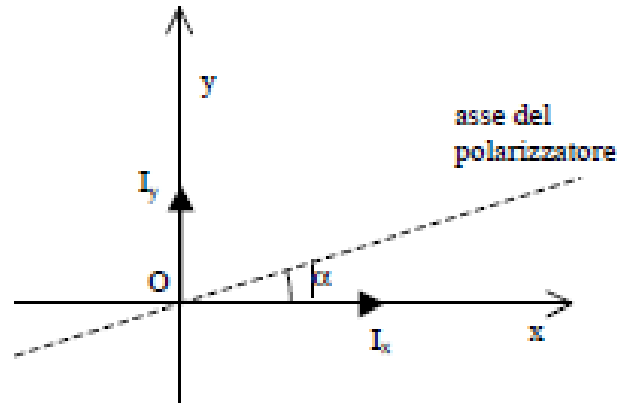
a)



b)

Rappresentazione cartesiana (a) e polare (b) dell'intensità trasmessa dal polarizzatore illuminato con luce linearmente polarizzata.

Consideriamo ora un'onda parzialmente polarizzata schematizzata da due vettori intensità,  $I_x$  e  $I_y$  diversi:



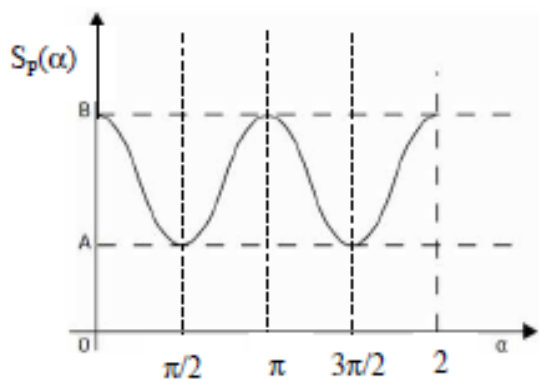
**Figura 3.2** – *Inclinazione asse del polarizzatore rispetto ai vettori intensità  $I_x$  e  $I_y$*

Applicando la legge di Malus ai singoli vettori intensità, abbiamo il segnale  $I_p(\alpha)$  del polarizzatore:

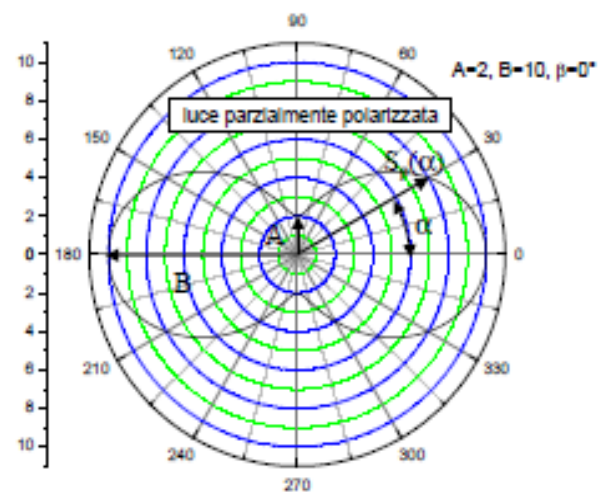
$$I_p(\alpha) = a \cdot I_x \cdot (\cos \alpha)^2 + a \cdot I_y \cdot \cos^2\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)^2 = a \cdot (I_x \cdot \cos^2 \alpha + I_y \cdot \sin^2 \alpha) \quad (3.2)$$

L'equazione si può esprimere anche così:

$$\begin{aligned} I_p(\alpha) &= a \cdot (I_x \cdot \cos^2 \alpha + I_y \cdot \sin^2 \alpha + I_y \cdot \cos^2 \alpha - I_y \cdot \cos^2 \alpha) = a(I_x \cdot \cos^2 \alpha + I_y - I_y \cdot \cos^2 \alpha) = \\ &= a \cdot [I_y + (I_x - I_y) \cdot \cos^2 \alpha] \quad (3.3) \end{aligned}$$



a)



b)

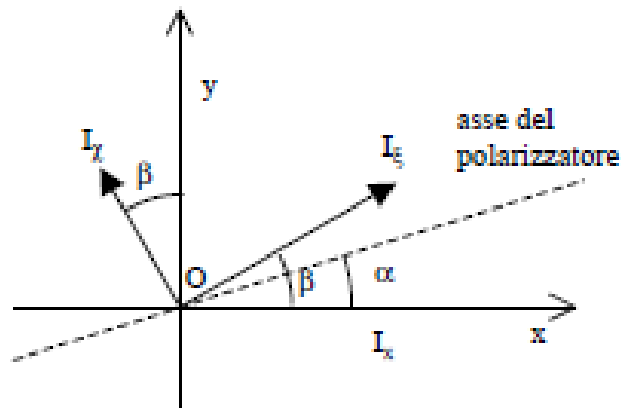
**Figura 3.3**

Rappresentazione cartesiana (a) e polare (b) dell'intensità trasmessa dal polarizzatore illuminato con luce parzialmente polarizzata.

Ponendo  $A = a \cdot I_y$  e  $B = a \cdot I_x$ , possiamo scrivere:

$$I_p(\alpha) = A + (B - A) \cdot \cos^2\alpha = A + C \cdot \cos^2\alpha \quad (3.4)$$

In generale i vettori  $I_\xi$  e  $I_\chi$ , ortogonali tra loro, non saranno allineati ilungo gli assi cartesiani x,y di riferimento.



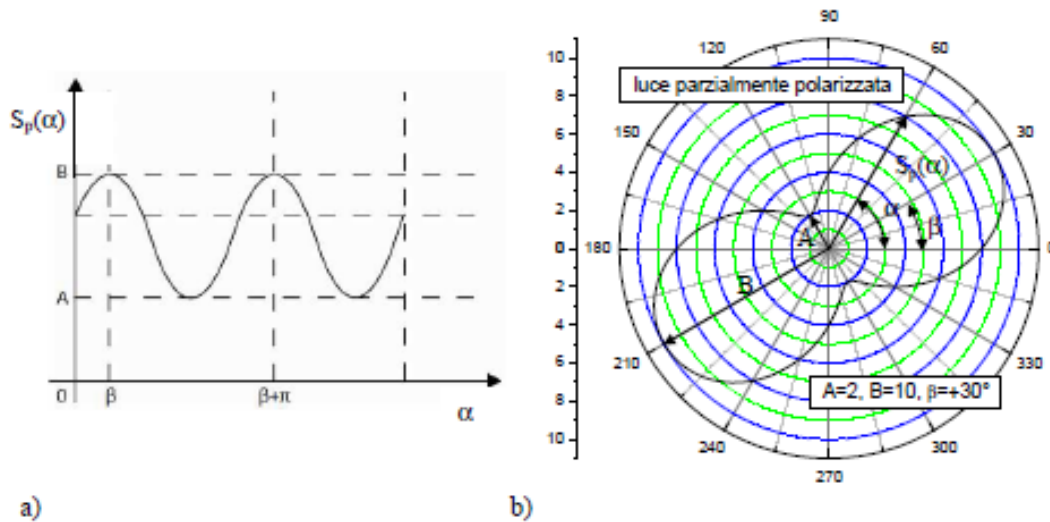
**Figura 3.4**

L'asse del polarizzatore, come in precedenza, è orientato in modo da formare un angolo  $\alpha$  variabile, misurato a partire dall'asse x e in senso antiorario.

Applicando nuovamente la legge di Malus ai vettori intensità  $I_\xi$  e  $I_\chi$  e ponendo per i vettori intensità trasmessi dal polarizzatore:  $A = a \cdot I_\xi$  e  $B = a \cdot I_\chi$ , possiamo scrivere per l'intensità trasmessa totale:

$$I_p(\alpha) = A \cdot \sin^2(\alpha - \beta) + B \cdot \cos^2(\alpha - \beta) = A + (B - A) \cdot \cos^2(\alpha - \beta) \quad (3.5)$$

Figura 3.5



a) b)  
Rappresentazione cartesiana (a) e polare (b) dell'intensità trasmessa dal polarizzatore illuminato con luce parzialmente polarizzata generica.

Conoscendo così i valori di  $A$  e  $B$  possiamo calcolare il grado di polarizzazione  $\Omega$  della luce con la formula:

$$\Omega = \frac{B - A}{B + A} \quad (3.6)$$

# CAPITOLO 4 - MATERIALI ANISOTROPI: BIRIFRANGENZA E DICROIDISMO

In natura esistono materiali definiti *anisotropi*, che non hanno le stesse caratteristiche in tutte le direzioni.

Esiste anche un' *anisotropia ottica* ed è caratterizzata dal fatto che il mezzo reagisce in maniera differente a seconda della direzione di polarizzazione della luce incidente.

Intuitivamente questo è spiegato tramite un modello meccanico: supponiamo che gli elettroni, presenti nel reticolo cristallino di una certa sostanza, se spostati dalla loro posizione di equilibrio, risentano di forze di richiamo la cui intensità dipende dalla direzione in cui sono stati spostati.

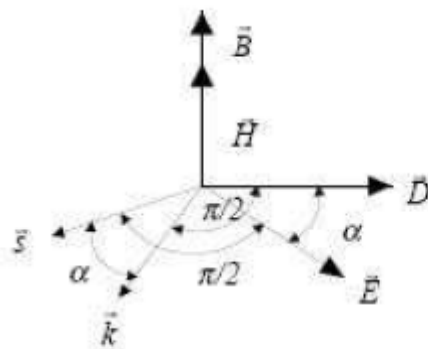
Allora, essendo la costante elastica di richiamo funzione della direzione in cui è avvenuto lo spostamento, la polarizzazione indotta nel mezzo dal campo elettrico dell'onda che si propaga, dipende dalla direzione di propagazione e dalla direzione in cui l'onda è polarizzata.

In altre parole la costante dielettrica del mezzo, e quindi l'indice di rifrazione, può essere diverso e dipende dalla direzione del campo elettrico  $\vec{E}$  e di conseguenza la velocità di propagazione dell'onda dipenderà dalla direzione di propagazione nel mezzo.

Secondo le leggi dell'elettromagnetismo in un mezzo non conduttore, sappiamo che al vettore campo elettrico  $\vec{E}$  si può associare un altro vettore  $\vec{D}$ , detto *spostamento elettrico* e proporzionale ad  $\vec{E}$ :

Nei mezzi isotropi  $\vec{E}$  e  $\vec{D}$  risultano essere paralleli e legati dalla relazione  $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$  ( $\epsilon$  costante dielettrica del mezzo).

Nei mezzi anisotropi questa relazione è di tipo tensoriale e in generale i due vettori non sono paralleli.



## - Direzioni dei vettori quando la luce investe un materiale anisotropo

Si può dimostrare che nei mezzi anisotropi il vettore d'onda  $\vec{K}$  risulta ortogonale a  $\vec{D}$ , mentre la direzione del vettore di Poynting ( $\vec{s}$ ) risulta ortogonale ad  $\vec{E}$ .

Una conseguenza di ciò è che se l'onda piana si propaga in un materiale anisotropo, la velocità di fase  $v_p$  cioè la velocità con cui si propagano fronti d'onda a fase costante, parallela al vettore d'onda  $\vec{K}$ , non



coincide necessariamente con la velocità  $v_s$ , con cui viene trasmessa l'energia, che avviene nella direzione  $\vec{s}$ .

Si può anche dimostrare che nei mezzi non isotropi è possibile fissare un sistema di riferimento cartesiano che individua tre direzioni particolari, che vengono chiamate assi principali del cristallo e a cui corrispondono tre costanti dielettriche dette costanti dielettriche principali (gli auto valori del tensore elettrico).

Se nel mezzo  $\vec{E}$  vibra secondo una di queste direzioni allora  $\vec{D}$  risulta ancora parallelo ad  $\vec{E}$ .

Dalla teoria di propagazione di un'onda in un mezzo anisotropo si può dimostrare che in questi cristalli, in corrispondenza di ogni fissa direzione di propagazione  $\vec{K}$  è possibile la propagazione di due onde piane monocromatiche, in stati di propagazione tra loro ortogonali aventi differenti velocità di propagazione.

Questo porta a quello che viene chiamato fenomeno della *birifrangenza*.

I cristalli trasparenti, per quanto riguarda le proprietà ottiche, possono essere suddivisi in tre gruppi.

Al primo gruppo appartengono i cristalli del sistema cubico e sono cristalli isotropi.

Al secondo gruppo appartengono i cristalli che crescono nei sistemi trigonale, tetragonale ed esagonale.

In tali cristalli esiste una direzione privilegiata attorno alla quale atomi si dispongono simmetricamente; questa direzione individua quello che viene definito *asse ottico* e i cristalli sono detti uniassici.

La luce che si propaga nella direzione dell'asse ottico non subisce birifrangenza.

Al terzo gruppo appartengono i cristalli del sistema orto rombico e triclinico e sono detti cristalli biassici.

Questi cristalli presentano due assi ottici e una complessa propagazione dell'onda.

Un'altra proprietà di certi materiali anisotropi è il *dicroidismo*, cioè la capacità di assorbire in maniera selettiva una delle due componenti, tra loro ortogonali, in cui può sempre essere scomposto il vettore campo elettrico associato all'onda.

Generalmente il dicroidismo è un fenomeno che dipende fortemente dalla lunghezza d'onda della luce incidente.

#### **4.1- POLARIZZAZIONE PER DICROIDISMO E BIRIFRANGENZA**

È possibile ottenere luce polarizzata da una radiazione non polarizzata facendola attraversare mezzi otticamente anisotropi oppure, mediante dispositivi opportunamente assemblati.

Analogamente è possibile modificare lo stato di polarizzazione di un'onda in uno stato di polarizzazione dello stesso tipo (per esempio lineare – lineare), oppure da un tipo ad un altro (per esempio lineare – ellittico).

Il polarizzatore più comune è la lamina polaroid.

È una lamina di materiale otticamente anisotropo e dielettrico costituito da strati di un idrocarburo, l'alcool polivinilico, meccanicamente stirate in una direzione.

I fogli così ottenuti vengono immersi in soluzioni colorate ricche di iodio che impregna la plastica e si attacca alle molecole in modo che gli elettroni di conduzione delle molecole di iodio possano muoversi lungo le catene come se fossero dei conduttori.

La componente del campo elettrico della luce incidente parallela alla catena esercita una forza su questi elettroni producendo una corrente.

Il lavoro fatto ha come conseguenza l'assorbimento di questa componente del campo elettrico.

La luce emergente da un foglio polaroid risulta quindi polarizzata linearmente in direzione perpendicolare alla catena di molecole.

Un polaroid reale lascia passare una  $K_a$  % della componente del campo elettrico parallelo al suo asse di trasmissione e assorbe quasi totalmente la componente del campo elettrico perpendicolare all'asse di trasmissione.

I polarizzatori tipo polaroid vengono contraddistinti dalla sigla "NH X", dove X rappresenta la percentuale dell'intensità incidente che viene trasmessa, quando incide luce non polarizzata.

Un polarizzatore ideale, cioè che lascia passare completamente la componente del campo elettrico parallela all'asse di trasmissione e assorbe completamente quella perpendicolare, avrebbe sigla NH 50.

I polaroid più comuni sono del tipo NH 32: per tali polaroid  $K_a = 80\%$ .

L'intensità della luce trasmessa è il 32% di quella incidente, questo perché una percentuale (fino al 4%) della luce incidente viene riflessa da ciascuna delle due facce della lamina.

La luce trasmessa, polarizzata quasi completamente in direzione dell'asse ottico può raggiungere al massimo il 40% dell'intensità della luce incidente non polarizzata.

I polaroid sono ottimi polarizzatori su tutto lo spettro del visibile, anche se non hanno un assorbimento del 100% nella regione del blu.

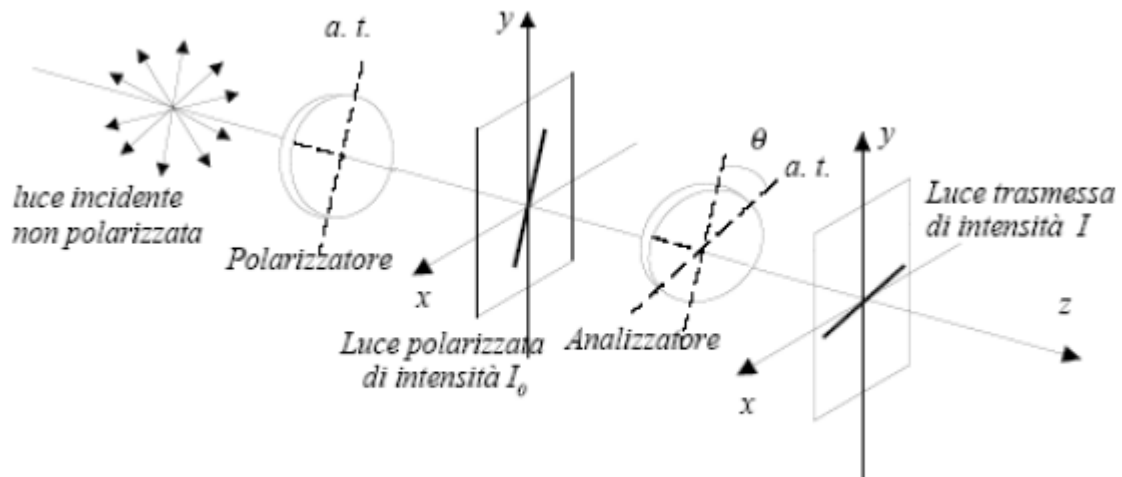
Un polaroid può essere utilizzato come polarizzatore oppure come analizzatore della luce.

Supponiamo per semplicità formale che i polarizzatori siano ideali.

Consideriamo un dispositivo come mostrato nella figura seguente.

Un fascio di luce non polarizzata incide su una polaroid (ideale) con asse di trasmissione a.t. come in figura.

La luce emergente, polarizzata linearmente secondo l'asse di trasmissione a.t. e di intensità  $I_0$  può essere analizzata con un secondo polaroid (analizzatore).



### Sistema per l'analisi della luce polarizzata

Ruotando l'analizzatore in un piano perpendicolare alla direzione del fascio, l'intensità della luce emergente subirà delle variazioni.

Se  $\theta$  è l'angolo formato dalle direzioni degli assi di trasmissione a.t. del polarizzatore dell'analizzatore, l'intensità  $I$  della luce emergente sarà data dalla relazione:

$$I = I_0 \cos^2 \theta \quad (\text{Legge di Malus})$$

Che rappresenta la legge del coseno quadro.

Quando l'intensità della luce trasmessa dall'analizzatore è minima ( $\theta = \pi/2$ ) i due polaroid si dicono incrociati (per polarizzatori ideali  $I_{\min} = 0$ ).

# CAPITOLO 5 - DESCRIZIONE DEGLI STRUMENTI

Lo strumento che si va a descrivere è denominato **polarimetro per luce solare diffusa**.

Il dispositivo è in grado di misurare istantaneamente una grandezza radiometrica correlata con l'intensità della luce diffusa (polarizzata) prodotta dal cielo sereno.

Lo strumento deve essere composto di base da:

- Un  **sensore** in grado di rilevare l'intensità della luce diffusa dall'atmosfera;
- Un **polarizzatore**, utile al fine di analizzare la polarizzazione della luce.

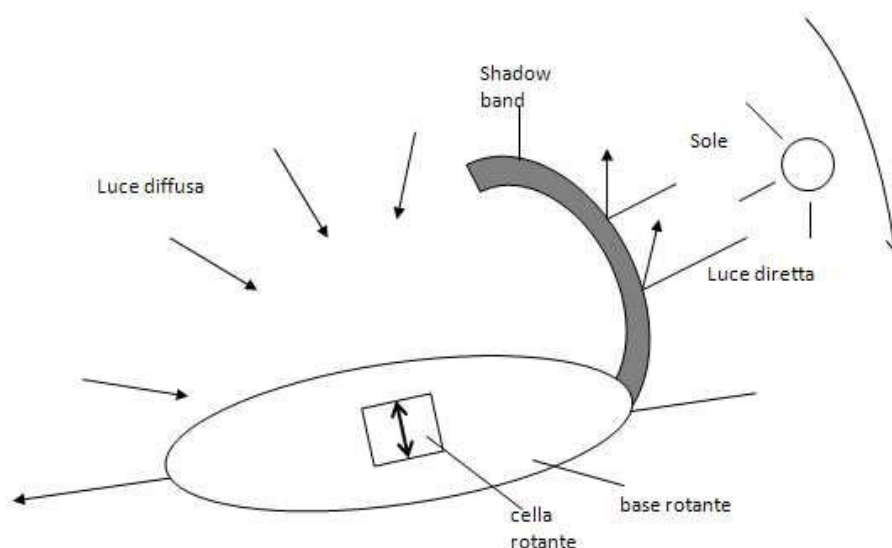
Questi due elementi, uniti ad un sistema meccanico in grado di far ruotare il modulo sensore/polarizzatore in maniera azimutale, sono in grado di rilevare dati per vari angoli per un'analisi ellissometrica.

La radiazione diretta non essendo polarizzata non deve essere acquisita dal sensore, per cui il modulo deve essere coperto da essa al momento dell'acquisizione di dati; a tale scopo si utilizza una Shadow-Band: una banda metallica di diverse possibili forme (forma ad arco, forma piana) che nasconda il modulo dal disco solare durante la sua escursione "verticale" e azimutale giornaliera rispetto all'orizzonte.

L'escursione verticale si controlla attraverso l'altezza e la distanza della shadow – band rispetto al modulo.

Il movimento azimutale invece può essere coperto con un medesimo movimento della shadow- band, che necessita così di essere svincolata dal modulo sensore/polarizzatore che necessita di una rotazione indipendente.

Le caratteristiche principali dello strumento sono state riassunte nella seguente figura:



## 5.1 - POLARIMETRO “Skypol 1”

Un primo dispositivo, molto semplice, è stato creato con un **luxmetro** nella parte del sensore di luce diffusa emisferica.

Il luxmetro è lo strumento che misura l’illuminamento, la grandezza fotometrica che definisce la densità di flusso luminoso ( $E_v = d\phi/dA$ ) e che ha come unità di misura il LUX.

Al luxmetro è stato sovrapposto una lamina polaroid, il polarizzatore.

Il modulo luxmetro/polaroid è stato posizionato sopra un cavalletto in grado di ruotare liberamente in maniera azimutale per un o più angoli giri.

La Shadow- Band, un banda di cartoncino, è stata posta su un altro cavalletto a parte.

Vediamo alcune foto della strumentazione foto dello strumento:



*Polarimetro “Skypol 1”*



*“Skypol 1” su cavalletto*



*“Skypol 1” coperto dalla shadow-band*

Il grado di polarizzazione della luce solare diffusa emisferica è stato ricavato dai lux segnalati dal sensore.

Per ogni misura si ruota il sensore in maniera azimutale di 360° andando a rilevare i 2 massimi e i 2 minimi di intensità di Lux, corrispondenti ai massimi e minimi di intensità del vettore campo elettrico e ricavando il grado di polarizzazione dalla formula:

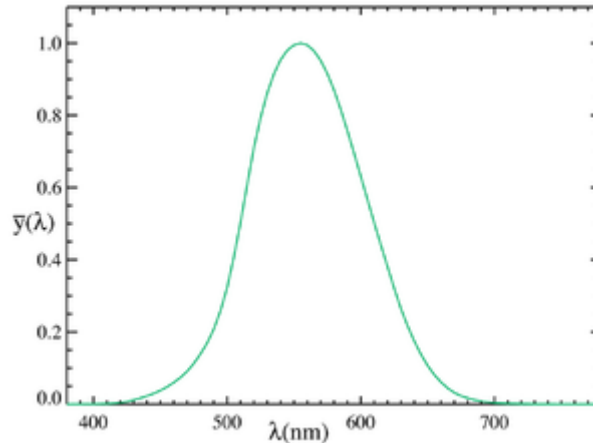
$$\Omega = \frac{\max - \min}{\max + \min}$$

dove max corrisponde alla media aritmetica dei due massimi registrati e min alla media aritmetica dei due minimi.

Per ogni misura si è indicato la data e l’ora di rilevamento per poter calcolare successivamente l’altezza del sole.

## 5.2 – Realizzazione del polarimetro “Skypol 2”

La sensibilità di un luxmetro  $\overline{y}(\lambda)$  è una funzione della lunghezza simile a quella che caratterizza l'occhio umano.

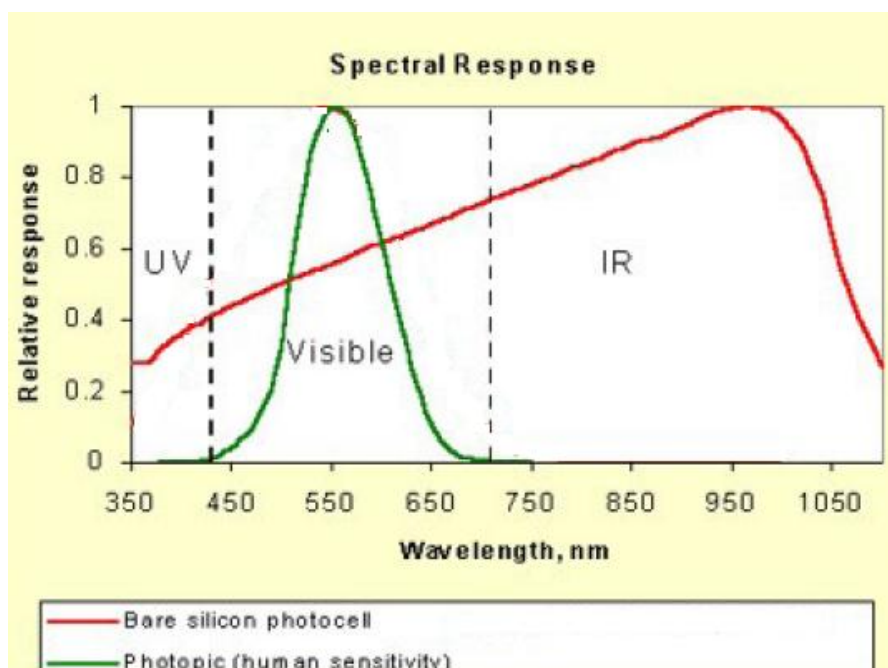


**Figura 5.2.1** – Sensibilità del luxmetro alle varie lunghezze d'onda  $\overline{y}(\lambda)$ .

La  $\overline{y}(\lambda)$ , rappresentata nel grafico, ha un picco per i 555,62 nm che coincide con la lunghezza d'onda del verde, mentre per le lunghezze d'onda minori e maggiori la sensibilità dello strumento degrada rapidamente.

Si è deciso quindi di sostituire il luxmetro con una cella fotovoltaica, meno discriminante verso le lunghezze d'onda diverse da quella del verde.

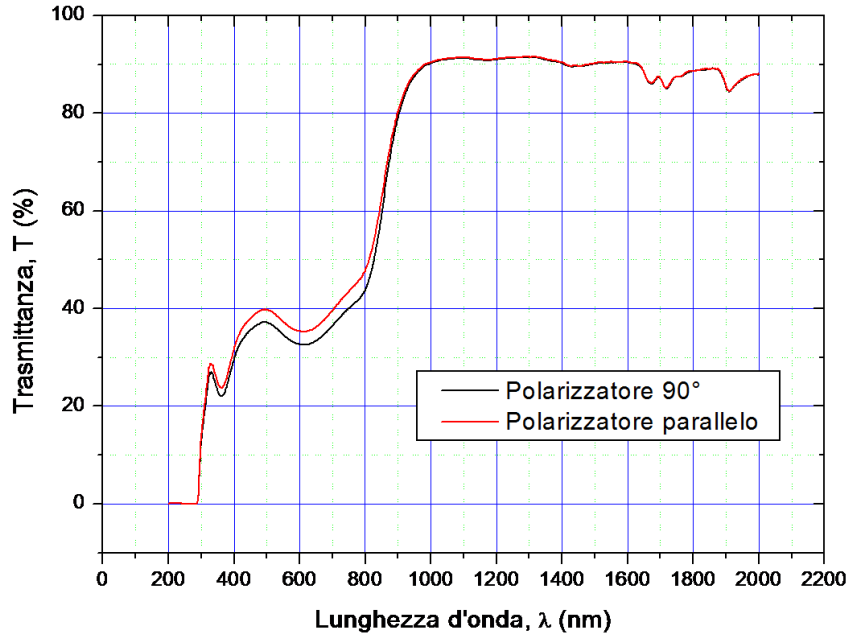
La cella solare utilizzata è di tipo Si- monocristallino di colore blu e di dimensioni planari di 9 cm x 10 cm e risponde più omogeneamente alle lunghezze d'onda nel visibile tra i 0nm e i 1000nm.



**Figura 5.2.2** – Confronto tra la sensibilità di un luxmetro con quella della cella al silicio

Una lamina polaroid è stata utilizzata come polarizzatore.

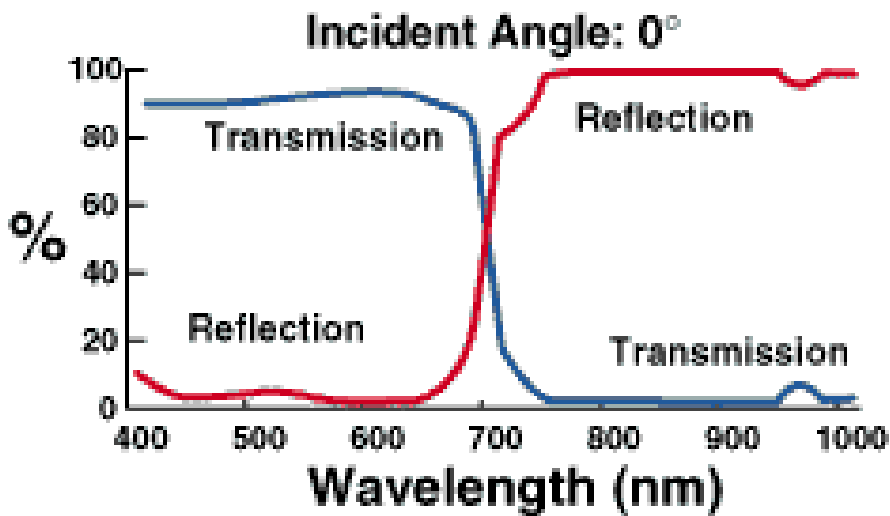
Anch'essa lavora in maniera differente a seconda della lunghezza d'onda della radiazione incidente.



**Figura 5.2.3** – Trasmittanza della lamina polaroid in funzione della lunghezza d'onda

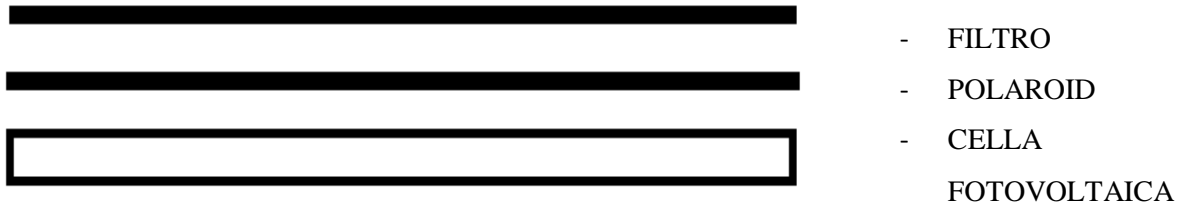
Si può notare come il Polaroid superati i 750-800 nm trasmetta tutta la radiazione incidente senza filtrare le intensità discordi dall'asse del Polaroid stesso.

È stato quindi necessario sovrapporgli un filtro che riflette le lunghezze d'onda superiori a quelle del visibile mentre trasmette quelle inferiori fino a 700nm.



**Figura 5.2.4** – Trasmittanza filtro

Il sensore è stato così costituito accoppiando otticamente la cella fotovoltaica, il polaroid ed il filtro. I 3 componenti sono stati sovrapposti e isolati tramite scotch isolante.



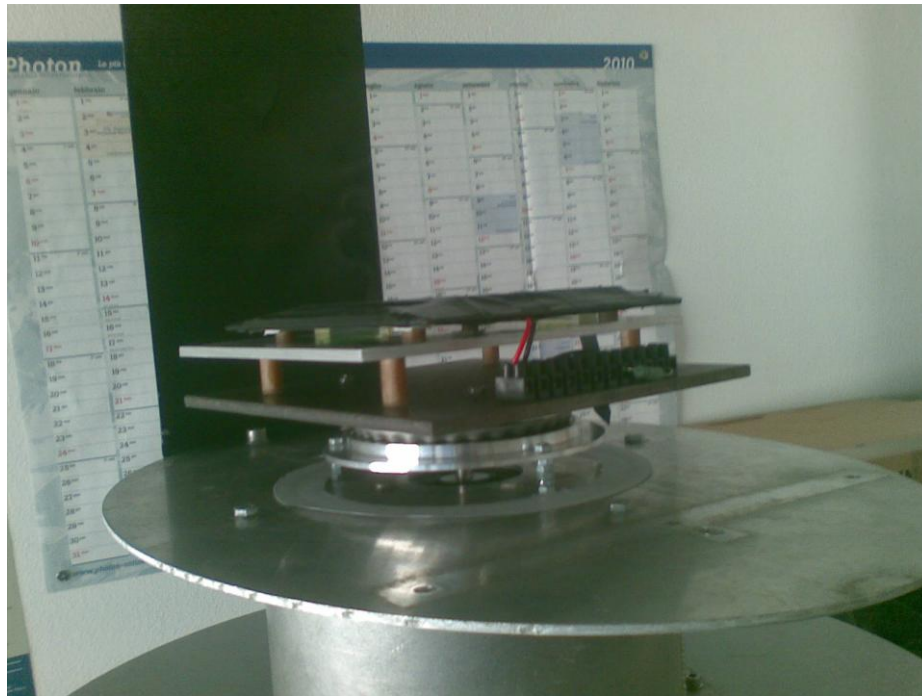
**Figura 5.2.5** – Sensore fissato sulla piastra metallica: si possono notare le due livelle per poter mantenerlo orizzontale e i terminali della cella fissati in un mammuth.

Il sensore è stato fissato ad una piastra metallica, che presenta sulla faccia inferiore un supporto per un cuscinetto di forma circolare, il cui supporto inferiore è stato posizionato su una piastrina ellittica metallica.

Questo piano ellittico ha sia la funzione di supporto del sensore che quella di ancoraggio della shadow – band.

**Figura 5.2.6** – Sensore posizionato sopra il piano di sostegno.





Il sistema descritto fino a questo punto può essere collocato su di un cavalletto utile a rialzare lo strumento rispetto ad eventuali ostacoli circostanti al punto di osservazione che possano coprire porzioni di cielo (l'operatore stesso per esempio non deve influire sulle misure)



**Figura 5.2.6** – *Strumentazione posta sopra il cavalletto*

## 5.2.1- DEFINIZIONE DELLA DIREZIONE DELL'ASSE DI POLARIZZAZIONE DEL POLAROID

Non conoscendo esattamente l'asse del polaroid accoppiato alla cella fotovoltaica, si è reso necessario definirlo con precisione.

A questo scopo è stata allestita un'esperienza di laboratorio che sfrutta il fenomeno ottico dell'angolo di Brewster.

Conosciuto anche come angolo di polarizzazione, l'angolo di Brewster ( $\theta_B$ ) è un particolare angolo per cui se un'onda incide su una superficie proprio a  $\theta_B$ , l'onda riflessa viene polarizzata linearmente in direzione perpendicolare al piano d'incidenza.

### 5.2.1.1 - DIMOSTRAZIONE MATEMATICA

Un raggio luminoso che incide sulla superficie di separazione tra due mezzi si scompone in due raggi, uno riflesso e uno trasmesso.

Le componenti dell'onda incidente vengono riflesse o trasmesse in misura differente a seconda del loro stato di polarizzazione.

Più precisamente, l'onda incidente può essere scomposta in due componenti, una che oscilla nel piano individuato dalla direzione di propagazione e dalla normale alla superficie d'incidenza (piano d'incidenza), ed una che oscilla perpendicolarmente a tale piano.

Per quanto riguarda la direzione di propagazione, queste componenti seguono l'usuale legge di Snell. L'energia trasportata dall'onda incidente viene suddivisa tra la componente riflessa e quella trasmessa in maniera diversa a seconda dell'angolo d'incidenza e della componente considerata, in accordo con le leggi di Fresnel.

Definendo il coefficiente di riflessione come il rapporto tra il campo elettrico dell'onda incidente e di quella riflessa, per polarizzazione parallela al piano d'incidenza vale la seguente relazione:

$$r_{\parallel} = \frac{n_T \cos(\theta_I) - n_I \cos(\theta_T)}{n_T \cos(\theta_I) + n_I \cos(\theta_T)} \quad (5.2.1.1.1)$$

Dove  $n_I$  e  $n_T$  sono rispettivamente l'indice di rifrazione del mezzo iniziale e di quello su cui incide l'onda, mentre  $\theta_I$  e  $\theta_T$  sono gli angoli d'incidenza e di trasmissione dell'onda.

Per il coefficiente  $r$  relativo a polarizzazione ortogonale al piano d'incidenza vale questa relazione:

$$r_{\perp} = \frac{n_I \cos(\theta_I) - n_T \cos(\theta_T)}{n_I \cos(\theta_I) + n_T \cos(\theta_T)} \quad (5.2.1.1.2)$$

Si nota osservando la prima relazione che il numeratore non si annullerà mai in quanto se  $n_T > n_I$ , allora  $\theta_T < \theta_I$  e il coseno è inversamente proporzionale all'ampiezza di un angolo.

Esiste invece un angolo d'incidenza, detto appunto angolo di Brewster, per la quale la componente parallela al piano d'incidenza del raggio riflesso si estingue completamente.

Questo angolo dipende dagli indici di rifrazione  $n_I$  e  $n_T$  e il suo valore si ricava dalla seguente relazione:

$$\theta_I = \theta_B = \tan^{-1} \left( \frac{n_T}{n_I} \right) \quad (5.2.1.1.3)$$

### 5.2.1.2 - L'ESPERIENZA

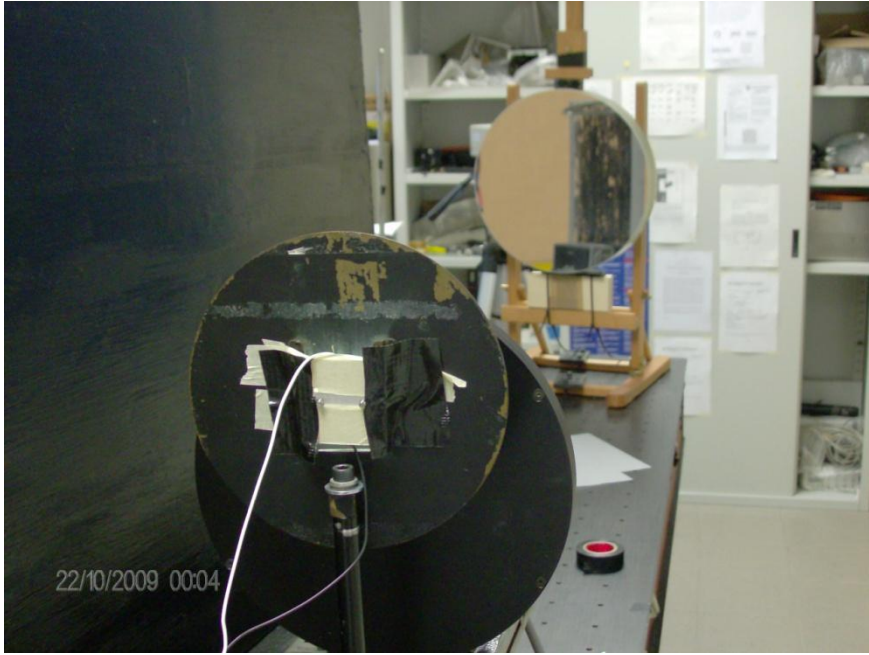
L'esperienza di laboratorio è stata organizzata in questo modo:

Un led bianco è stato utilizzato come sorgente luminosa puntiforme e quasi lambertiana.



**Figura 5.2.1.2.1 – Led bianco**

A distanza focale dalla sorgente luminosa è stato posto uno specchio parabolico, inclinato rispetto alla direzione di incidenza dei raggi provenienti dal led, in modo che questi siano riflessi verso una tavoletta di plexiglass, che fungerà nel nostro caso da materiale polarizzante.



**Figura 5.2.1.2.2** - Specchio che riflette i raggi del led verso la tavoletta di plexiglass.

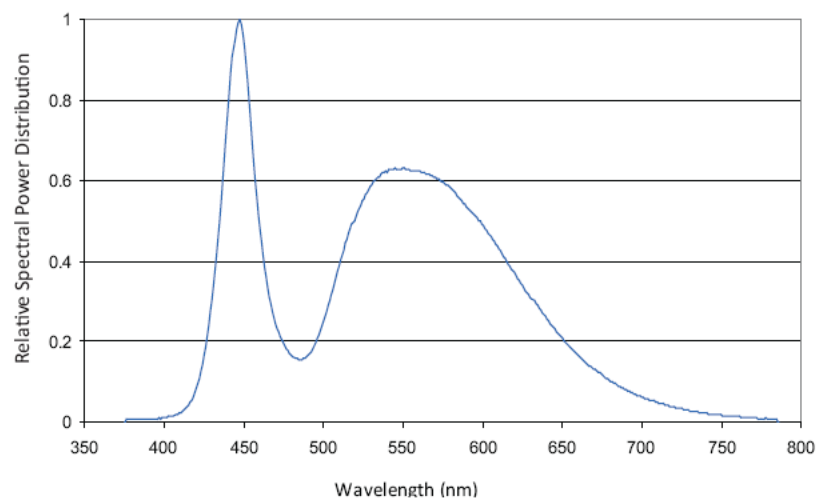
La tavoletta deve essere inclinata rispetto ai raggi incidenti proprio di  $\theta_B$ , è necessario quindi calcolarne l'ampiezza con  $\theta_B = \tan^{-1}\left(\frac{n_T}{n_I}\right)$ ; essendo  $n_I=1$  l'indice di rifrazione dell'aria possiamo riscrivere l'equazione come:

$$\theta_B = \tan^{-1}(n_T)$$

con  $n_T$  indice di rifrazione del plexiglass che dipende dalla lunghezza d'onda della radiazione incidente.

Vediamo allora lo spettro di emissione del led:

**LXML-PW3I (5000K), LXML-PW2I (5700K)**  
**at Test Current, Thermal Pad Temperature = 25°C**



### Figura 5.2.1.2.3 – Spettro di emissione del led

I due diversi indici di rifrazione risultano:  $n(450nm)_T = 1.50019$  e  $n(550nm)_T = 1.49363$ , sono stati utilizzati per andare a calcolare entrambi i valori di  $\theta_B$ :

$$\theta_B(450nm) = \tan^{-1}(1.50019) = 56,3^\circ$$

$$\theta_B(550nm) = \tan^{-1}(1.49363) = 56,2^\circ$$

Gli angoli differiscono di:

$$\theta_B(450nm) - \theta_B(550nm) = 56,3^\circ - 56,2^\circ = 0,1^\circ$$

La differenza angolare tra i  $\theta_B$  calcolati alle due diverse lunghezze d'onda è minima, difficilmente distinguibile con i mezzi da noi utilizzati per l'esperienza, quindi si è tenuto buono il valore corrispondente a 550nm che coincide con il picco più ampio rispetto ai 2.

Attraverso un sistema di puntamento a laser si è selezionata la giusta inclinazione della tavoletta di plexiglass.

La luce riflessa dal plexiglass è polarizzata linearmente in direzione perpendicolare al piano d'incidenza va a colpire il polarimetro che è stato posto su un supporto rotante.

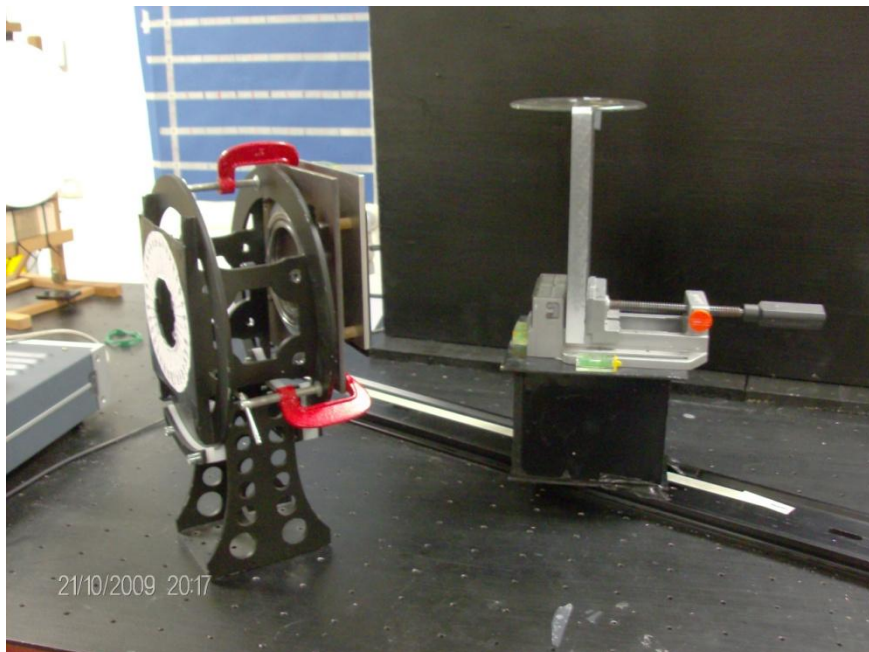
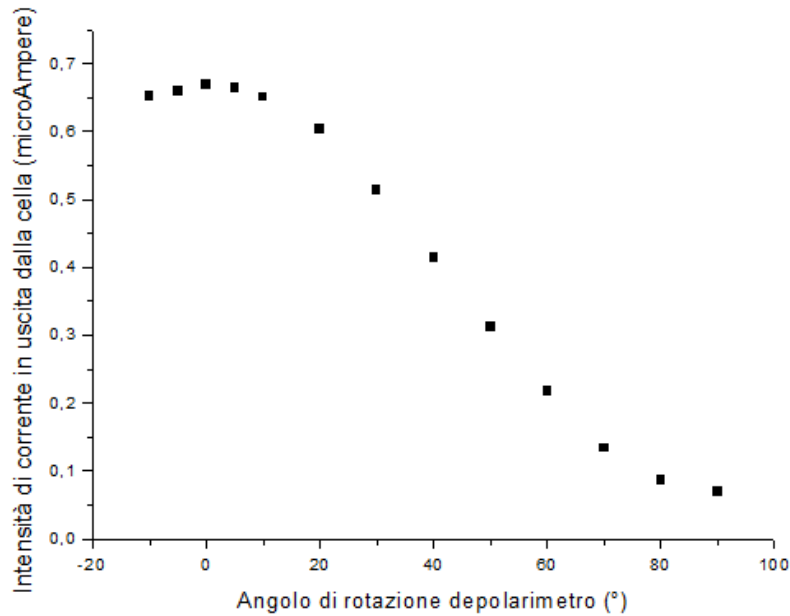


Figura 5.2.1.2.4 – Sulla destra la tavoletta di plexiglass, sulla sinistra il sensore posto su una base rotante.

Si è andati quindi ad analizzare il segnale in corrente in uscita dai terminali della cella, ruotando quest'ultima e di conseguenza cambiando l'inclinazione dell'asse del polaroid rispetto la direzione di polarizzazione dei raggi riflessi dal plexiglass.

I dati rilevati sono presentati in questo grafico:

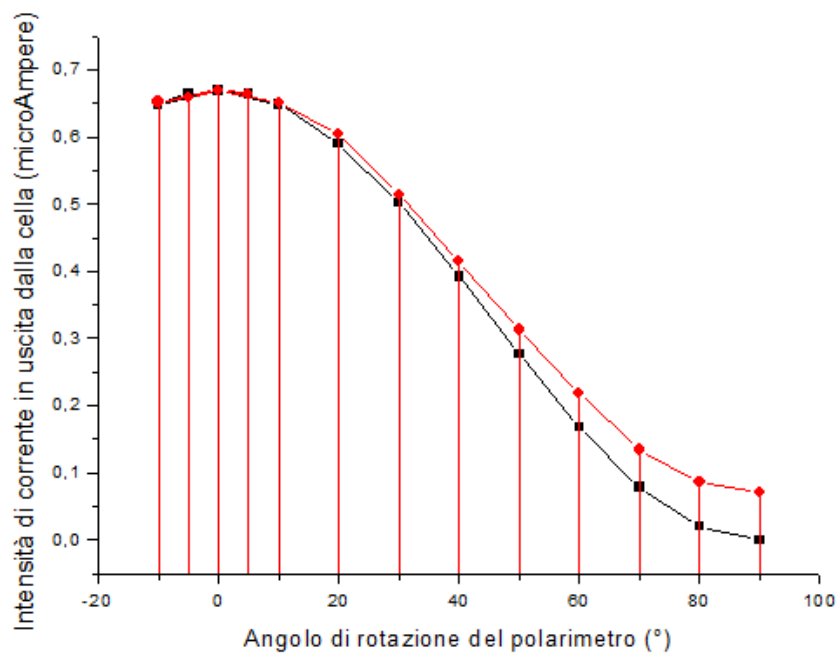
**Figura 5.2.1.2.5**



Si può notare come il massimo di corrente registrata corrisponda ad un'inclinazione nulla (di 0°) del polarimetro rispetto alla sua posizione iniziale.

I dati sono discreti poiché sono stati rilevati con rotazioni del polarimetro di 10° alla volta, e di 5° quando ci si è ritrovati vicino al minimo.

Li si è paragonati con il grafico del  $\cos^2\theta$  previsto dalla legge di Malus:



**Figura 5.2.1.2.6**

Confrontando le due curve è stato possibile confermare che la direzione di massima corrente coincide quasi perfettamente con l'inclinazione nulla del polarimetro.

Le due curve intorno a  $0^\circ$  di inclinazione coincidono, mentre aumentando l'inclinazione si crea un gap crescente di segnale che presumibilmente è dovuto alla non perfetta polarizzazione lineare della luce complessiva in arrivo sul sensore.

Conoscendo la direzione di polarizzazione dei raggi riflessi dal plexiglass è stato facile ricavare l'asse del polaroid.

# CAPITOLO 6 - IL MOTO APPARENTE DEL SOLE

La radiazione luminosa e le sue caratteristiche variano, oltre che in base a fattori atmosferici, in funzione della posizione della terra rispetto al sole e dell'osservatore rispetto alla terra, quindi risulta di notevole importanza lo studio del moto della terra attorno al sole e quello apparente del sole rispetto alla terra.

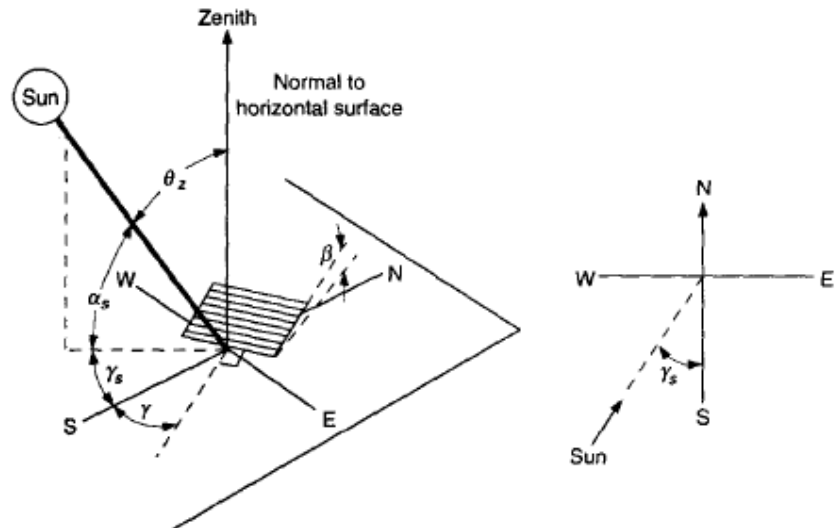
Per intraprendere questo studio è necessario introdurre alcune definizioni:

- Latitudine ( $\varphi$ ): la posizione angolare nord (positiva) o sud (negativa) rispetto all'equatore, compresa tra  $-90^\circ$  e  $+90^\circ$ .
- Declinazione ( $\delta$ ): la posizione angolare del sole al mezzogiorno solare in una data località rispetto al piano dell'equatore, nord positivo e il valore è compreso tra  $-23,45^\circ$  e  $+23,45^\circ$ .
- Pendenza ( $\beta$ ): l'angolo tra il piano della superficie in questione e l'orizzontale, compresa tra  $0^\circ$  e  $180^\circ$ .
- Angolo azimut di superficie ( $\gamma$ ): la deviazione della proiezione su un piano orizzontale della normale alla superficie per il meridiano locale, con  $0^\circ$  al sud, est negativo e ovest positivo, compreso tra  $-180^\circ$  e  $+180^\circ$ .
- Angolo ora ( $\omega$ ): la posizione angolare solare (est/ovest) per il meridiano locale, dovuta alla rotazione della terra attorno al suo asse a  $15^\circ$  ora, mattina negativa e sera positiva.
- Angolo di incidenza ( $\theta$ ): l'angolo tra il raggio di radiazione su una superficie e la normale a questa superficie.

Angoli addizionali sono definiti per descrivere la posizione del sole nel cielo:

- Angolo zenit ( $\theta_z$ ): l'angolo tra la perpendicolare al piano dell'osservatore e la posizione del sole rispetto a quest'ultimo.
- Angolo di altitudine solare ( $\alpha_s$ ): l'angolo tra l'orizzonte e la posizione del sole rispetto all'osservatore. È il complemento di  $\theta_z$ .
- Angolo azimutale solare ( $\gamma_s$ ): la posizione angolare da sud della proiezione del raggio solare su un piano orizzontale, come mostrato in figura. Le posizioni da est a sud sono negative e da ovest a sud sono positive.





**Figura 6.1-** Schema rappresentante i vari angoli in funzione della direzione della radiazione incidente su una superficie.

Sapendo che la misura della polarizzazione totale emisferica dipende fortemente dall'angolo di altitudine solare ( $\alpha_s$ ) come dal suo complemento  $\theta_z$ , angolo zenit, è stato necessario quindi poter calcolare l'ampiezza di questi angoli per poter associare ad ogni misura di polarizzazione la rispettiva altezza del sole.

L'equazione che relaziona l'angolo d'incidenza dei raggi solari su una superficie ( $\theta$ ) e gli altri angoli è:

$$\cos\theta = \sin\delta\sin\Phi\cos\beta - \sin\delta\cos\Phi\sin\beta\cos\gamma + \cos\delta\cos\Phi\cos\beta\cos\omega + \cos\delta\sin\Phi\sin\beta\cos\gamma\cos\omega + \cos\delta\sin\beta\sin\gamma\sin\omega$$

e

$$\cos\theta = \cos\theta_z\cos\beta + \sin\theta_z\sin\beta\cos(\gamma_s - \gamma)$$

Per una superficie orizzontale, l'angolo d'incidenza è l'angolo zenit del sole  $\theta_z$ .

Esso è compreso tra  $0^\circ$  e  $90^\circ$  quando il sole si trova sopra l'orizzonte.

In questa situazione  $\beta=0$  e l'equazione diviene:

$$\cos\theta_z = \cos\Phi\cos\delta\cos\omega + \sin\Phi\sin\delta$$

e poiché  $\alpha_s$  è l'angolo complementare a  $\theta_z$  possiamo riscrivere la precedente relazione:

$$\sin \alpha_s = \cos \Phi \cos \delta \cos \omega + \sin \Phi \sin \delta$$

Nel nostro caso l'altezza dovrà essere calcolata in questo modo:

- La latitudine  $\Phi$  è quella del luogo in cui si effettuano le misure: la latitudine di Ferrara è pari a  $44^\circ 50'$ .
- La declinazione  $\delta$  dell'asse terrestre rispetto all'ellittica è calcolabile attraverso **l'equazione di Cooper:**

$$\delta = 23,45 \sin \left( 360 \frac{284 + n}{365} \right)$$

Il giorno  $n$  dell'anno da inserire nell'equazione di Cooper è il giorno Giuliano, il giorno dell'anno che non conta la suddivisione mensile usuale ( quindi ad esempio il 1° febbraio sarà il 32° giorno giuliano,  $31 + 1$ ).

- Infine **l'angolo orario**  $\omega$  del sole rispetto alla sua posizione di zenit; anche questo calcolo è relativo alla località, infatti il mezzogiorno di Ferrara differisce da quello "nazionale" di 9 minuti e 30 secondi, per cui il sole occuperà la posizione zenitale alle ore 12.09.30.

Conoscendo il mezzogiorno effettivo della località di Ferrara possiamo impostare la formula:

$$\omega = 15 * (\tau - 12.1583)$$

Con  $\tau$  frazione oraria locale segnata dall'orologio nel momento in cui si vuole calcolare l'angolo orario e 12.1583 l che indica la frazione oraria che corrisponde a 12.09.30.

L'ora reale del mezzogiorno del luogo è stata ricavata ponendo un'asta in posizione verticale e segnando su di un piano orizzontale opposto alla posizione del sole rispetto all'asta stessa i punti estremi dell'ombra dell'asta in varie ore della giornata associando ad ognuno di questi l'ora convenzionale locale in cui sono stati presi.

L'ombra data dall'asta quando il sole sta allo zenit rispetto a questa rappresenta il mezzogiorno reale locale, e sarà l'ombra più corta che l'asta proietta sul piano durante la giornata.

Facendo la differenza angolare tra l'ombra data al mezzogiorno convenzionale e quella del mezzogiorno reale, con le opportune conversioni, si ottiene lo scarto in minuti/secondi che vi è tra questi due, ottenendo così l'ora reale in cui il sole occupa la posizione zenitale in una data località.

# CAPITOLO 7 - PRESENTAZIONE E RIELABORAZIONE DATI

## 7.1 – PREMESSA

Lo scopo principale della misura della polarizzazione emisferica della luce solare diffusa è di estrarre da essa informazioni sulla copertura nuvolosa del cielo e più in generale ad aumentare la conoscenza dello stato dell'atmosfera.

Praticamente si tratta di sfruttare lo scattering di Rayleigh per distinguere una porzione di atmosfera libera rispetto ad una porzione occupata da formazione nuvolose.

Lo scattering di Rayleigh infatti è caratteristico dell'interazione tra luce solare e molecole piccole rispetto alla lunghezza d'onda.

Nelle regioni occupate dalle nuvole sono presenti concentrazioni di goccioline di acqua di dimensioni superiori alla lunghezza d'onda della luce, sulle quali avvengono fenomeni di riflessione o rifrazione che sovrastano lo scattering di Rayleigh da parte delle molecole di gas anch'esse presenti all'interno della regione caratterizzata dalla nuvolosità.

Una campagna di misure è stata portata avanti nel periodo compreso tra il 29-10-2010 e il 29-11-2010 e va a sommarsi ad altri rilevamenti avvenuti tra luglio e settembre 2009.

Le misure sono state effettuate sia il polarimetro “Skypol1” che “Skypol 2”.

In questo modo è stato possibile iniziare a raccogliere dati relativi al nuovo modello, incrementare i dati raccolti nel 2009 e confrontare il funzionamento delle due diverse tipologie di sensore.

Le misure sono state effettuate sul tetto del Blocco di Fisica di via Saragat.

Si è cercata una posizione il più libera possibile di ostacoli che potessero disturbare le misure, qualsiasi oggetto, costruzione, nelle vicinanze dello strumento che superi l'altezza cui è stato posto il polarimetro.

La strumentazione è stata fermata su di un cavalletto che aiuta il polarimetro a superare in altezza proprio questi ostacoli laterali e l'operatore stesso.

Prima di incominciare le misure è necessario sistemare alcuni parametri della strumentazione:

- I polarimetri devono essere posizionati parallelamente al suolo, ovvero la normale alla superficie del polarimetro deve puntare lo zenit.
- Prima di ogni misura è necessario aggiornare la posizione della shadow - band in modo che copra il polarimetro dall'anello solare.

Ogni misura consiste nella rotazione azimutale del polarimetro di  $360^\circ$ , durante la quale vanno fissati i 2 massimi e i 2 minimi di corrente in uscita dai terminali della cella solare, corrispondenti ai massimi e minimi di intensità del vettore campo elettrico.

Il grado di polarizzazione della luce diffusa emisferica è ricavato dalla formula:

$$\Omega = \frac{\max - \min}{\max + \min}$$

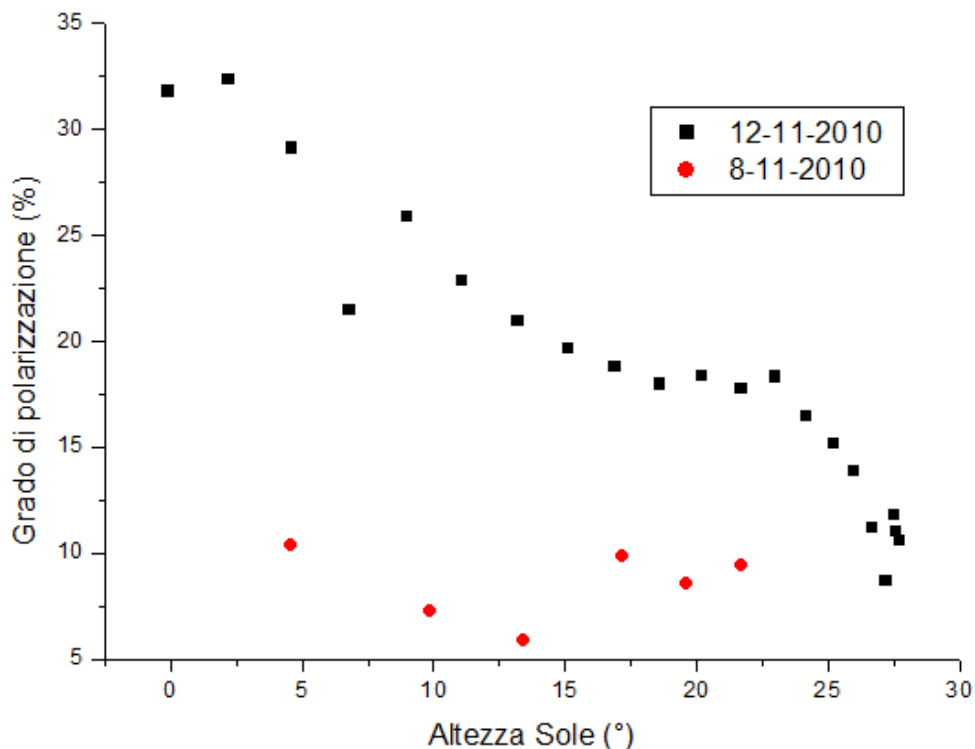
Dove max corrisponde alla media aritmetica dei due massimi registrati e min alla media aritmetica dei due minimi.

## 7.2 - LE MISURE

Il grado di polarizzazione della luce solare diffusa emisferica misurato, in accordo con la teoria dello scattering di Rayleigh, dipende dall'altezza del sole.

Se andiamo ad esaminare l'andamento di P in funzione dell'altezza angolare del sole rispetto l'orizzonte, in assenza di copertura nuvolosa, troviamo che questa aumenta all'avvicinarsi del disco solare all'orizzonte.

La misura è influenzata dalla tipologia di strumento che si sta impiegando, in quanto il sensore in utilizzo posto in posizione orizzontale è più sensibile alla radiazione zenitale, maggiormente polarizzata nelle ore crepuscolari, mentre degrada tale sensibilità con una funzione coseno man mano che ci si avvicina all'orizzonte.



**Figura 7.2.1** – Misure di polarizzazioni con polarimetro “skypol 2” nelle giornate 12(sereno)/8(nuvoloso) novembre 2010.

Sempre in accordo con le ipotesi descritte nel paragrafo “GENERALITÀ SULLA LUCE SOLARE DIFFUSA”, misure compiute in presenza di un cielo più o meno coperto portano ad un grado di polarizzazione inferiore a quello misurato in assenza di nubi, fino al caso limite di copertura totale quando la polarizzazione misurata risulta nulla.

Mettendo a confronto i dati raccolti nella giornata del 12-11-2010, giornata serena in cui la polarizzazione non subisce l’influenza delle nubi e i dati dell’8-11-2010, giornata mediamente nuvolosa, per visualizzare meglio ciò che si è appena detto.

### 7.2.1 - CONFRONTO TRA POLARIMETRO “SKYPOL 1” E “SKYPOL 2”

Uno degli obiettivi che ci si è posti è stato quello di confrontare come lavorano i due diversi polarimetri utilizzati per le misure.

Si è subito notato che i dati di polarizzazione effettuati con l’uno o con l’altro polarimetro non coincidono.

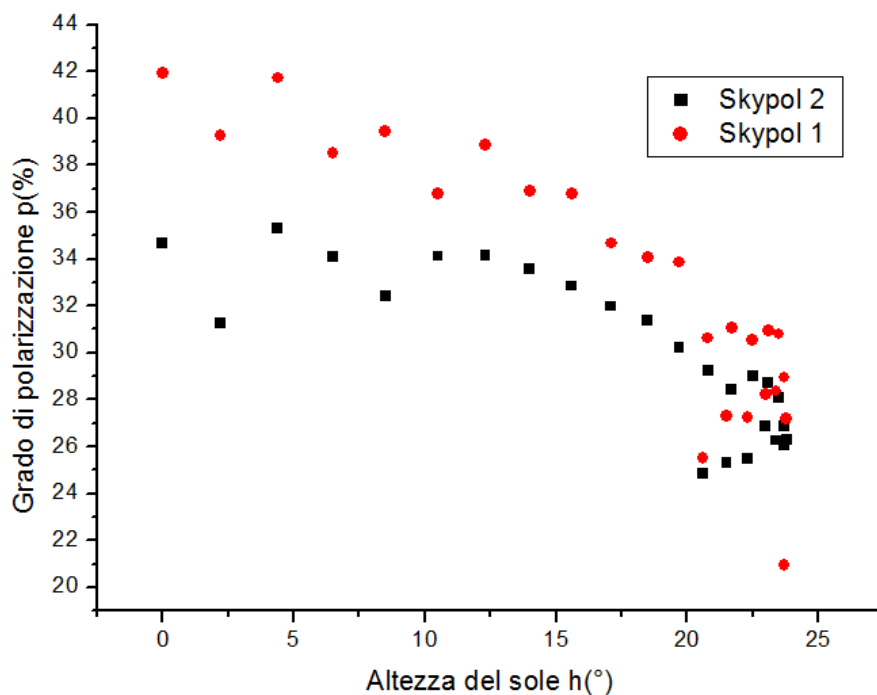
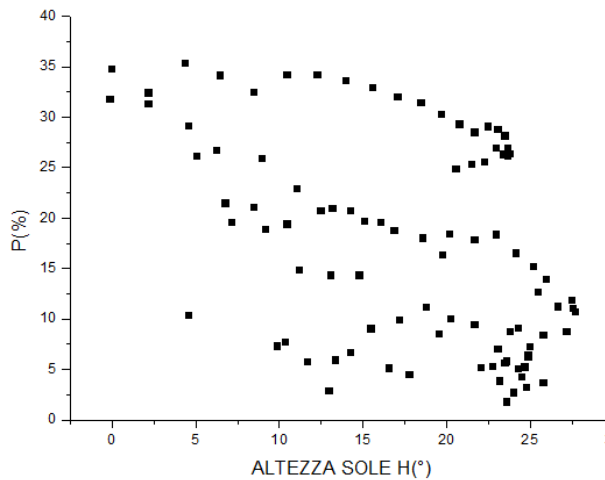
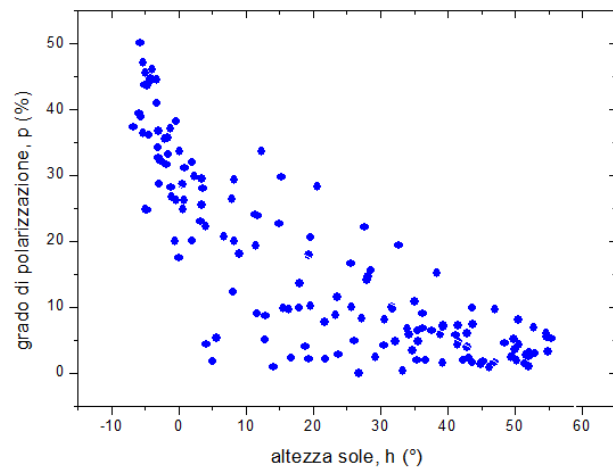


Figura 7.2.1.1 – Confronto tra valori di polarizzazione dei due polarimetri nella giornata del 29-11-2010.

In particolare il polarimetro “Skypol 1” dimostra di avere una maggiore sensibilità alla polarizzazione emisferica.



**Figura 7.2.1.2** – Grafico dei dati complessivi misurati con il “Skypol 2”



**Figura 7.2.1.3** – Grafico dei dati complessivi misurati con il polarimetro “Skypol 1”

Anche confrontando i dati complessivi misurati con entrambi gli strumenti, si nota come il grado di polarizzazione massimo misurato con il più recente sensore è di circa il 35 % mentre con il primo del 50%.

Probabilmente questa differenza è dovuta, anche se solo in parte, alla differente stagione in cui questi dati sono stati presi: buona parte in estate per il vecchio polarimetro, tutti in novembre con quello nuovo, la differenza di limpidezza del volta celeste tra un periodo e l’altro nella località di Ferrara può averle influenzate.

Rimane comunque un gap di polarizzazione, la cui esistenza è spiegabile almeno, almeno in parte, dal fatto che il luxmetro ha il “picco” di risposta spettrale corrispondente alle lunghezze d’onda entro cui il polaroid ha il rendimento maggiore.

È necessario avere a disposizione di un maggior numero di dati sperimentali per concludere eventualmente quale tra i due polarimetri sia conveniente utilizzare.

## 7.2.2 - IMMAGINI TOTAL SKY

Le nostre misurazioni del grado di polarizzazione della luce diffusa dal cielo presa in sezione emisferica vanno confrontate con lo stato di copertura (nubi e stato di velatura da nebbie) per confrontare la correlazione tra le due grandezza e “calibrare” eventualmente gli strumenti.

A questo scopo, nel medesimo momento di ciascun rilevamento, è stata registrata l’immagine del cielo riflessa da uno specchio di forma parabolica, attraverso una semplice fotografia.



**Figura 7.2.2.1-** *Specchio per immagini total sky.*

L'immagine TSI (Total Sky Image) derivata dallo specchio parabolico è soggetta a una variazione della superficie reale degli oggetti dovuta alla curvatura (per uno specchio emisferico tale variazione è, più semplicemente, proporzionale all'angolo di diffusione) dello specchio stesso.

Questa discordanza tra l'immagine che noi vediamo a occhio nudo (visione di tipo direzionale/puntato) e quella della foto TSI, fa sì che gli oggetti, man mano che si avvicinano all'orizzonte, vengano "schiacciati", oltre che a dare una deformazione angolare.

Questo tipo di distorsione dell'immagine però non è stata corretta poiché anche i polarimetri da noi utilizzati discriminano la radiazione diffusa dal cielo favorendo quella proveniente dallo zenit a discapito di quella proveniente dall'orizzonte.

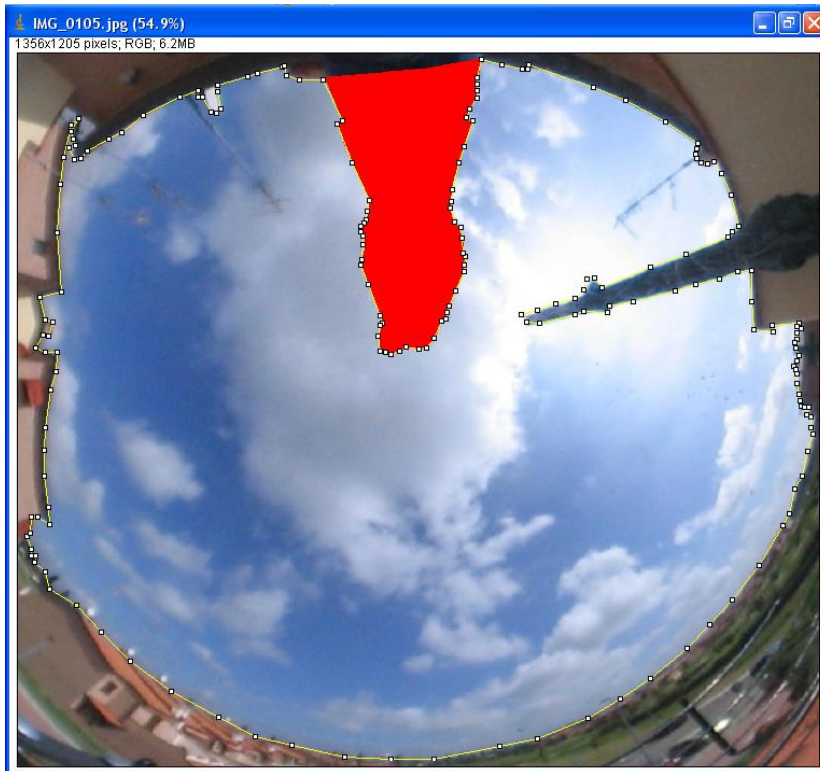
È necessario infatti correlare il più possibile le misure di polarizzazione e il Cloudiness Index ricavato dalle immagini al fine di poter relazionare le due grandezze.

Il processo di elaborazione dell'immagine è avvenuto tramite l'utilizzo dei software Paint ed ImageJ. Con il primo si riducono le immagini e si definiscono le zone occupate dalla macchina fotografica e relativo sostegno differenziandoli dal resto dell'immagine con un colore ben distinguibile, il rosso.

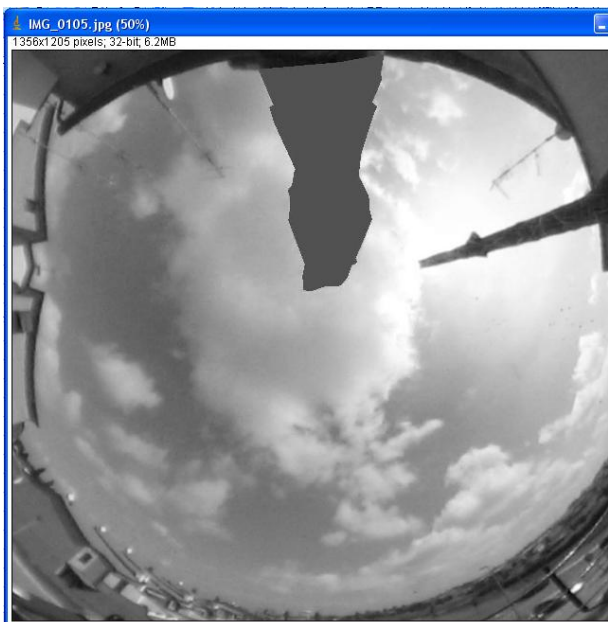
Successivamente si processa l'immagine già modificata tramite ImageJ.

Si procede in primo luogo nel circoscrivere il confine tra cielo e orizzonte.

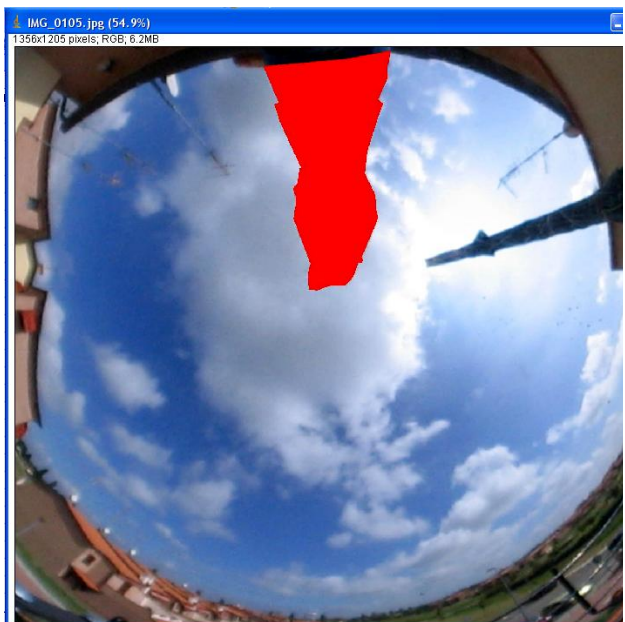
**Figura 7.2.2.3**



Una volta concluso questo processo è possibile calcolare l'area totale della sezione di cielo sotto forma di numero di pixel che la compongono. È possibile a questo punto fare delle osservazioni generali aumentando e diminuendo il contrasto della foto al fine di definire al meglio i contorni tra zone più o meno nuvolose e zone serene, nonché la conversione dell'immagine a 8 e 32 bit su scala di grigi in modo da ottenere una maggior precisione nella definizione tra velati e coperti.



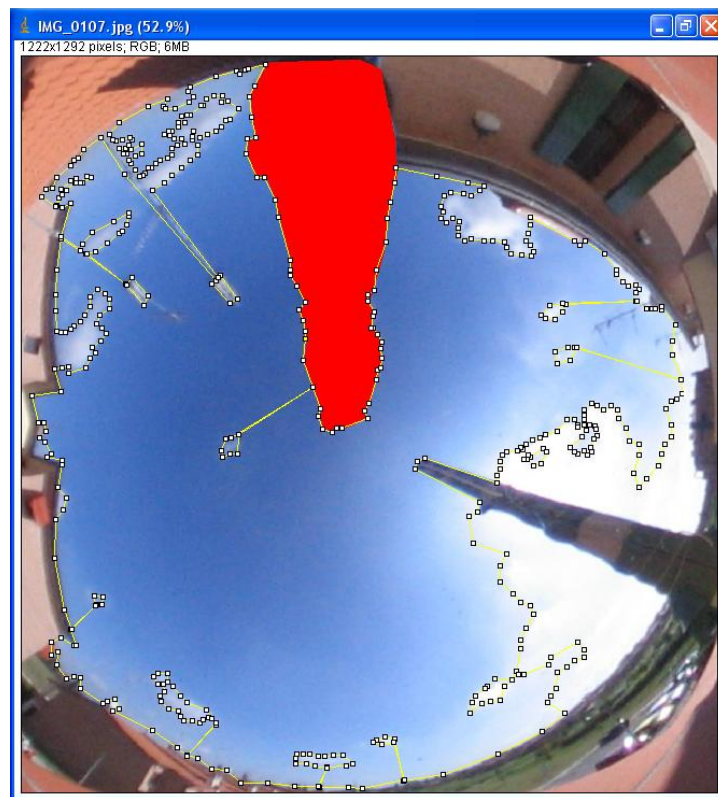
**Figura7.2.2.4** – Conversione in scala di grigi, 32 bit.



**Figura 7.2.2.5** – Aumento del contrasto dell'immagine.



Si procede in seguito nel circoscrivere le zone di cielo sereno, memori del precedente processo di studio, al fine di definire l'area, quindi i pixel, del cielo sereno.



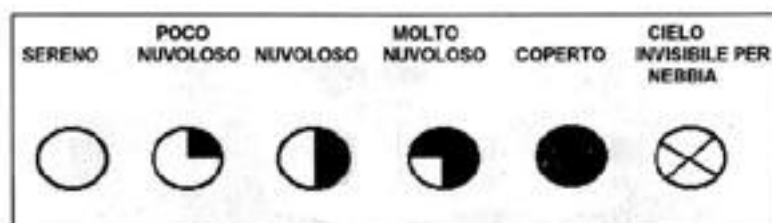
**Figura 7.2.2.6**

Nota l'area totale del cielo e l'area serena è possibile ricavare sottrattivamente l'area coperta e tramite essa, attraverso il rapporto con l'area totale, ricavare un numero tra 0 e 1, il Cloudiness Index, esprimibile anche in percentuale.

$$CI = (\text{pixel totali} - \text{pixel sereno}) / \text{pixel totali}$$

Per classificare la copertura nuvolosa si è preso spunto dai canoni della meteorologia internazionale e le modalità operative presso le stazioni di rilevamento: la nuvolosità viene misurata in ottavi di cielo coperto, mediante osservazioni visive dirette in certe precise ore della giornata:

**Figura 7.2.2.7**



Simbologia sinottica relativa alla copertura del cielo

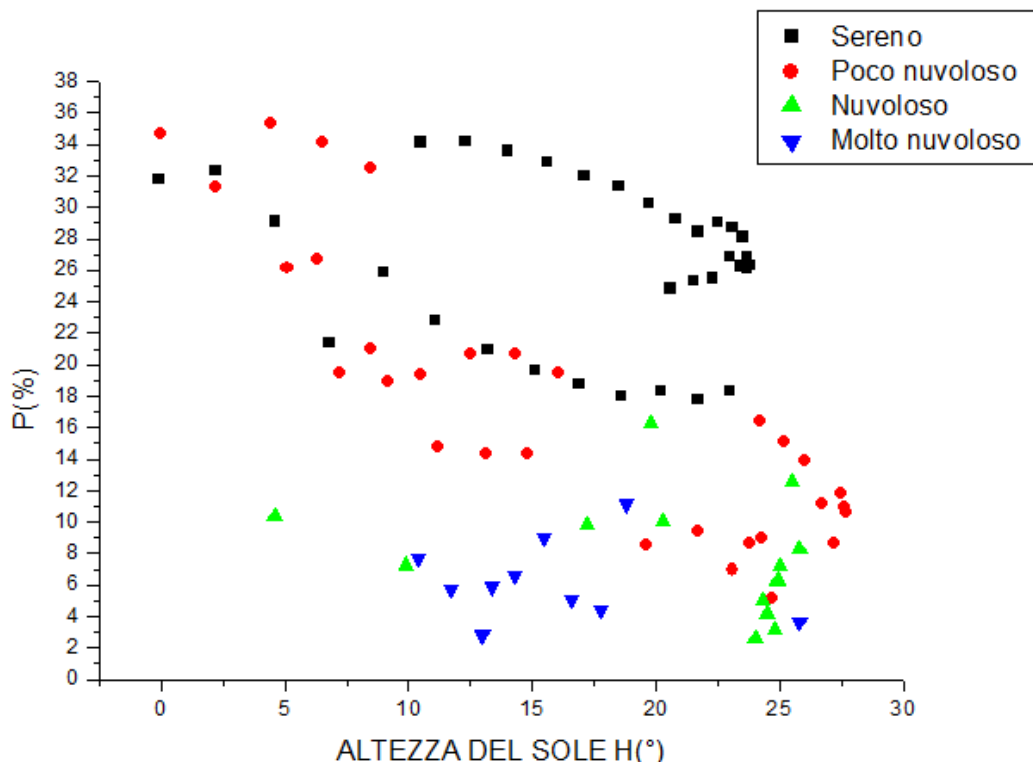
- **SERENO:** copertura nuvolosa del cielo di 0 ottavi. Ovvero cielo totalmente o quasi sgombro da nubi.
- **POCO NUVOLOSO:** copertura nuvolosa del cielo di 1 o 2 ottavi. Ovvero cielo quasi interamente sgombro di nubi.
- **NUVOLOSO:** copertura nuvolosa di 3, 4 o 5 ottavi. Ovvero cielo coperto da nuvolosità per circa metà superficie.
- **MOLTO NUVOLOSO:** copertura nuvolosa del cielo pari a 6 o 7 ottavi. Ovvero cielo quasi totalmente coperto da nubi. Tuttavia esistono limitati spazi di sereno.
- **COPERTO:** copertura nuvolosa del cielo pari a 8 ottavi. Ovvero cielo totalmente coperto senza alcuna zona di sereno

### 7.2.3 – ELABORAZIONE DEI DATI DI POLARIZZAZIONE

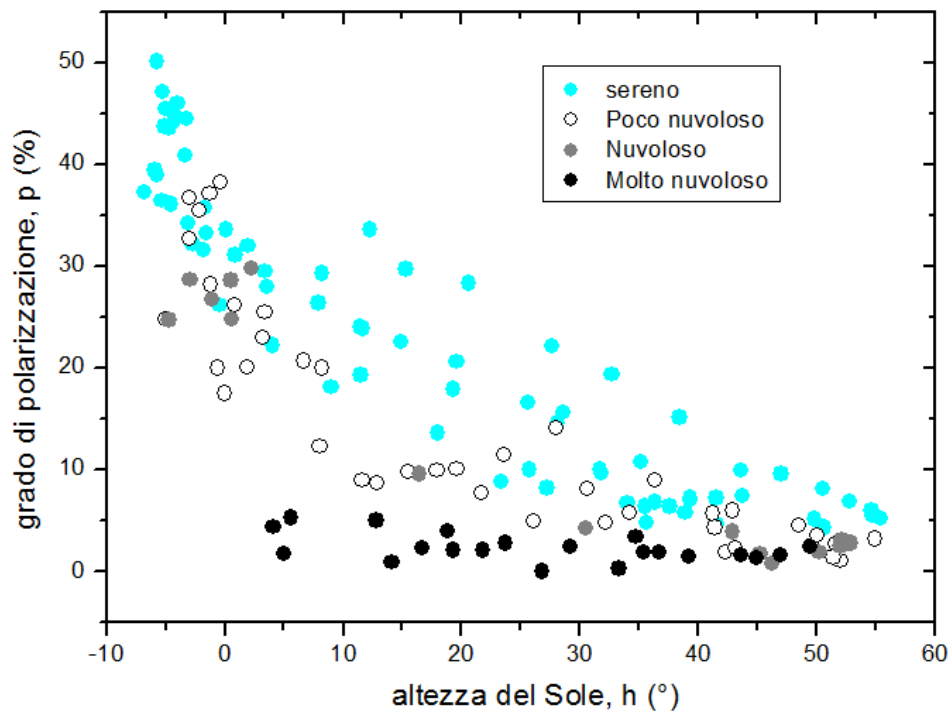
La totalità dei dati, suddivisa in base al polarimetro di provenienza, è stata unita e rappresentata in un unico grafico (per polarimetro) per poter essere analizzata.

Inoltre, grazie al cloudiness index ricavato dalle immagini colte al momento delle misure, è stato possibile diversificare le misure in base alla copertura nuvolosa presente (figura 7.2.3.1 e 7.2.3.2).

Figura 7.2.3.1 – Dati complessivi “Skypol 2”



**Figura 7.2.3.2 – Dati complessivi “skypol 1”**



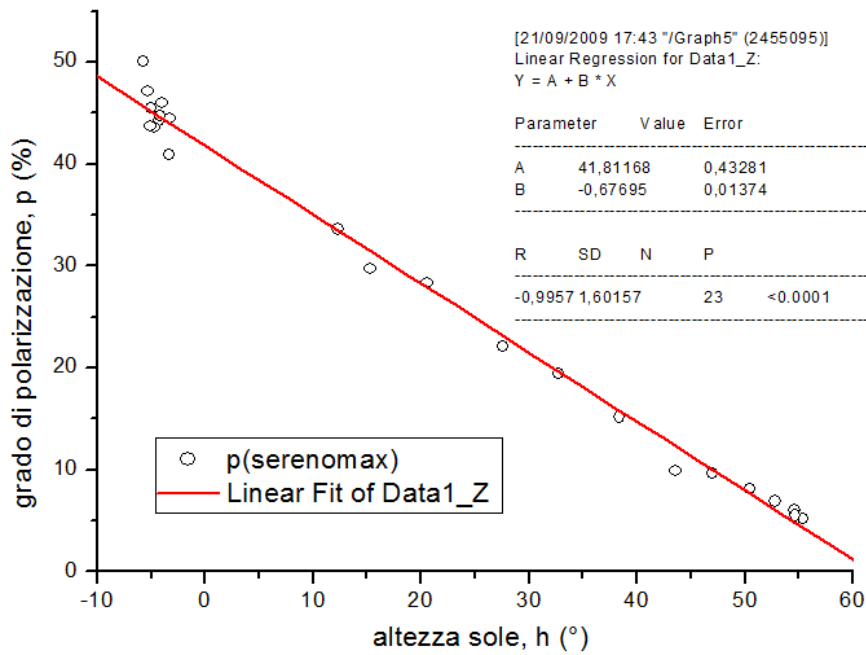
Si osserva, sia nel grafico 7.2.3.1 che 7.2.3.2, come mediamente ad una copertura nuvolosa corrisponde una  $p$  minore, non mancano però eccezioni di dati corrispondenti a diversi CI con un simile grado di polarizzazione.

Esaminando i più completi dati di “Skypol 1” (figura 7.2.3.2) è parso che in condizioni di cielo sereno, ad esempio, il grado di polarizzazione emisferica diminuisca all’aumentare dell’altezza del Sole, con un andamento che, stando alle misure effettuate fino ad oggi, sembra ben approssimato con quello lineare.

Si è trovato che i valori massimi di  $p$  ai diversi  $h$  sono ben rappresentati dalla retta:

$$p_{max}(h) = 41.8 - 0,677 * h \quad (7.2.3.1)$$

**Figura 7.2.3.3 – Andamento valori massimi di  $p$**



Naturalmente, a seconda del livello di nuvolosità, si trova che  $p(h) \leq p_{max}(h)$ .

Possiamo svincolarci dalla variabile  $h$  definendo una nuova variabile, la polarizzazione emisferica relativa:

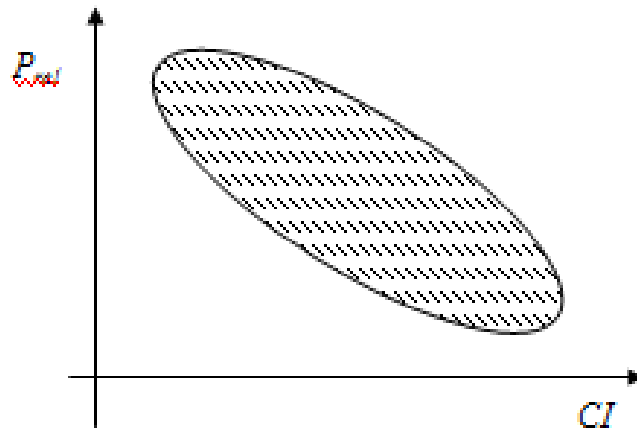
$$p_{rel} = p(h)/p_{max}(h) \quad (7.2.3.2)$$

la quale “dovrebbe” risultare indipendente da  $h$  e dipendete soltanto dal livello di nuvolosità.

Sono state usate le virgolette perché in realtà quest’ultima uguaglianza non è mai stata verificata, ma risulta al momento un ipotesi ragionevole che semplifica moltissimo il processo di trattamento dei dati di polarizzazione emisferica.

Se quindi la (7.2.3.2) è valida, “tutti” i dati di polarizzazione possono essere messi in relazione con il grado di nuvolosità misurato, che al momento indichiamo con  $CI$ .

Ci aspettiamo allora di trovare un andamento del tipo:



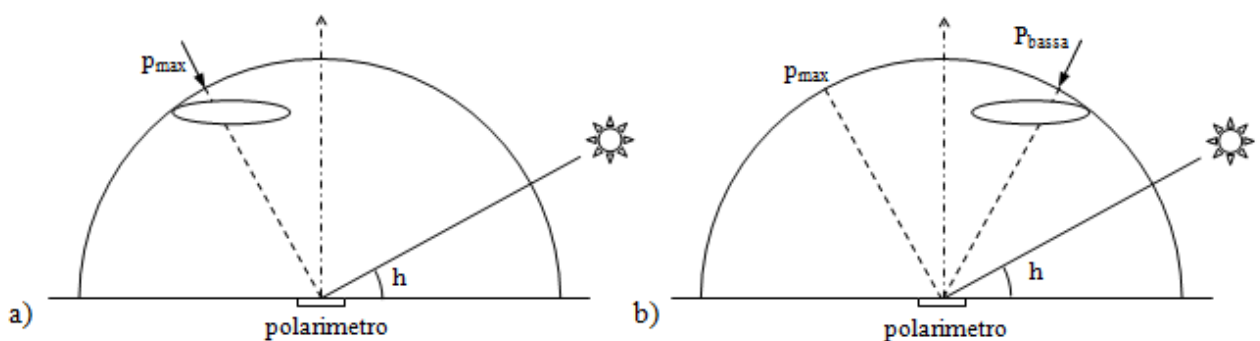
**Figura 7.2.3.4** – Andamento semplificato previsto per la dipendenza di  $p_{rel}$  da  $CI$ .

La dipendenza di  $p_{rel}$  da  $CI$  non può essere biunivoca in quanto, fissato un certo valore di  $CI$ , il valore di  $p_{rel}$  dipende dalla distribuzione delle nubi nella volta celeste. Qualsiasi sia il valore di  $h$ , infatti, le diverse regioni del cielo, ovvero le diverse direzioni, saranno caratterizzate, in condizioni di cielo sereno, da diversi valori di polarizzazione.

Tali regioni, se occupate dalle nubi, verranno a sottrarre un contributo alla polarizzazione emisferica che dipenderà naturalmente dalla distribuzione spaziale delle nubi stesse. In sostanza le stesse nubi nel cielo determinano l' "oscuramento" di sorgenti di luce polarizzata diverse a seconda di dove le nubi si troveranno distribuite.

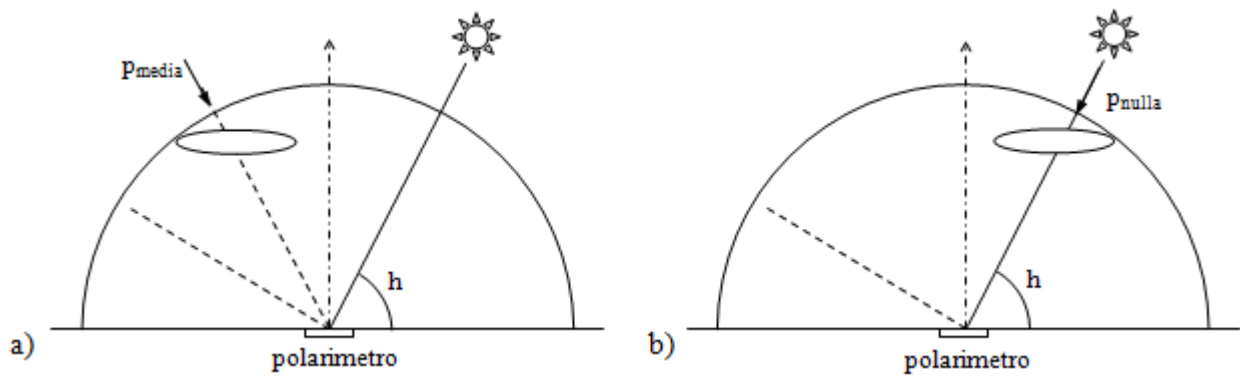
Tenendo conto inoltre che la misura di polarizzazione è effettuata sul piano orizzontale, con la normale del sensore diretta allo zenit, è chiaro che il polarimetro sarà maggiormente sensibile alla condizione dell'atmosfera della regione zenitale, degradando tale sensibilità con una funzione coseno man mano che ci si sposta verso l'orizzonte.

Possiamo schematizzare quanto detto attraverso dei grafici.



**Figura 7.2.3.5** - In a) la nube copre una regione ad alta polarizzazione. In b), a parità di altezza del Sole, la stessa nube copre una regione a bassa polarizzazione. L'effetto sarà che in b) verrà misurato un valore più alto di polarizzazione, sia assoluta che relativa.

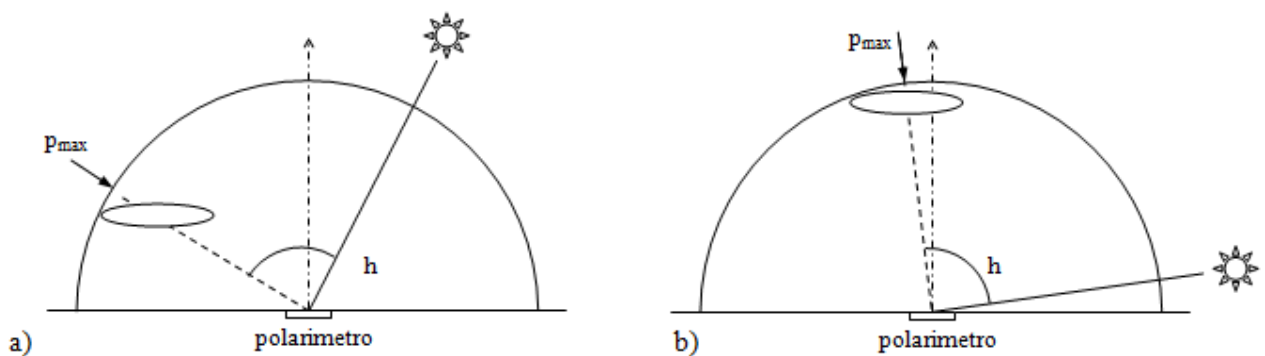
Se cambia il valore di  $h$ , con la stessa distribuzione nuvolosa, avremo quanto illustrato in Fig. 3.



**Figura 7.2.3.6** - In a) la nube copre una regione a media polarizzazione. In b) la stessa nube copre una regione a polarizzazione nulla. L'effetto sarà che in b) verrà misurato un valore più alto di polarizzazione assoluta e relativa.

Le figure 2 e 3 mostrano la stessa copertura nuvolosa distribuita in maniera diversa, che copre regioni con polarizzazione direzionale diversa. In tutti i casi illustrati si avrà un diverso valore della polarizzazione emisferica, sia assoluta che relativa.

L'effetto della distanza angolare della nube dallo zenit, regione nella quale si ha il massimo accoppiamento tra nuvola e polarimetro, è illustrata nelle figure seguenti.



**Figura 7.2.3.7** - In a) la nube copre una regione a polarizzazione massima, che però è molto inclinata rispetto all'orizzonte. In b) la stessa nube copre una eguale regione a polarizzazione massima, che è però situata vicino allo zenit e quindi è accoppiata otticamente molto bene con il polarimetro. L'effetto sarà che in a) verrà misurato un valore più alto di polarizzazione, in quanto l'oscuramento della regione ad alta polarizzazione è più efficace in b) che in a). In sostanza, dato che la regione zenitale produce maggiore intensità luminosa sul polarimetro, a parità di angolo solido, la copertura nuvolosa di maggiore effetto è quella nella regione zenitale, e quindi in a), dove la regione zenitale è più libera, si avrà maggiore polarizzazione, mentre in b), dove la regione zenitale è in parte oscurata si avrà minore polarizzazione.

# CAPITOLO 8 - NUOVI MODELLI DI POLARIMETRO SKYPOL

## 8.1 - PREMESSA

Alla luce delle osservazioni nate esaminando i dati ottenuti, si può affermare che la polarizzazione emisferica, vista dai polarizzatori “Skypol1” e “Skypol 2”, non sia abbastanza correlata, per le nostre esigenze, con il grado di copertura nuvolosa.

La causa di questa mancanza di correlazione, come spiegato nel capitolo precedente, risiede nella morfologia dello strumento stesso il quale, analizzando l'intera calotta celeste, subisce diversi fattori come: l'altezza del sole, discriminazione dei raggi non azimutali ed in particolare le diverse distribuzioni delle nubi che vanno a oscurare in maniera le sorgenti di luce polarizzata.

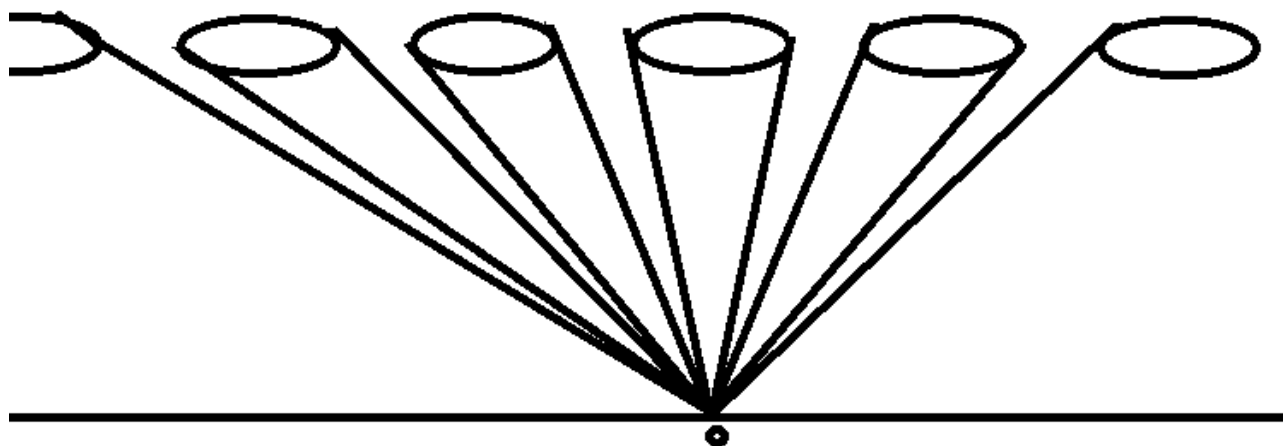
Si è pensato quindi a nuovi modelli di polarimetro che elimino, almeno in parte, l'influenza di questi fattori.

L'idea più immediata finalizzata all'aumento della correlazione tra  $p$  e  $CI$  è stata quella di ridurre la porzione di cielo ispezionata.

È necessario tenere conto però di come la riduzione della regione di cielo esaminata comporterà una variazione della funzione di correlazione tra le 2 grandezze.

In particolare ci aspettiamo che statisticamente il *Cloudiness Index* aumenti man mano che l'analisi si sposti verso regioni di cielo vicine all'orizzonte.

Il perché di questa supposizione è ben esemplificato dalla seguente immagine



Le nubi(in figura in forma ellittica), poste per scelta equidistanti l'una dall'altra, allontanandosi da un osservatore centrato in O, si addensano otticamente.

L'angolo solido di cielo sgombro tra una nube e l'altra va via via rimpicciolendo allontanando lo sguardo dallo zenit.

È presumibile che il polarimetro subisca lo stesso effetto a cui è sottoposto O.

Si prevede anche che i valori di polarizzazione massimi aumentino a causa della maggiore direzionalità della misura.

## 8.2 – POLARIMETRO “METEO”

Un criterio interessante porta ad ispezionare l'angolo solido di cielo che non viene mai percorso dal disco solare:

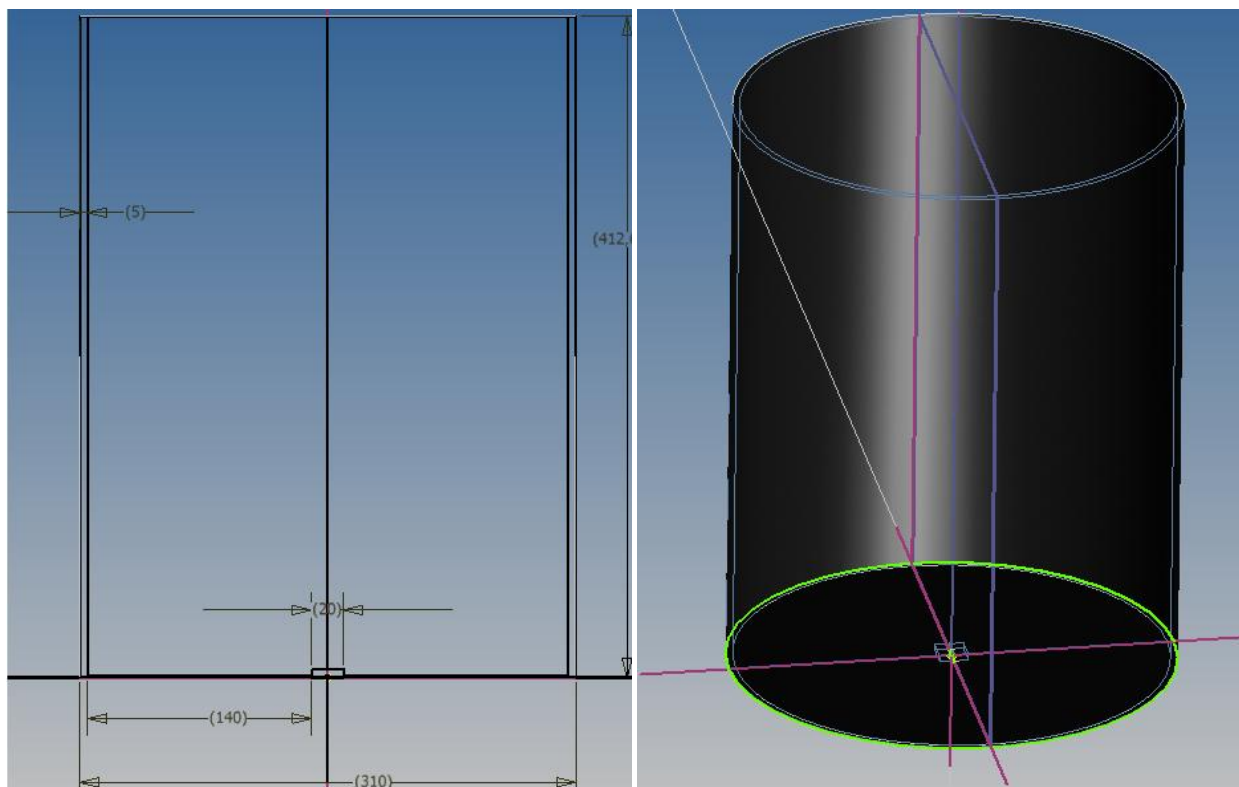
Ad esempio a Ferrara il sole non supera mai un'altezza  $h_{max} = L - \delta_{max}$ , con  $L$  = latitudine e  $\delta_{max}$  = *declinazione massima*, restringendo il campo visivo  $h_{max} \leq h \leq 90^\circ$  dallo zenit, l'utilizzo della Shadow band diventa superfluo.

Nel caso di Ferrara:

- $L = 45^\circ$
- $\delta_{max} = 23,5^\circ$

$$h_{max} = 90^\circ - 45^\circ + 23,5^\circ = 68,5^\circ$$

Uno strumento di questo tipo potrà avere questo aspetto:



**Figura 8.2.1** – Descrizione grafica del polarimetro METEO.

Le quote nell'immagine 8.2.1 sono date in millimetri.

In questo caso si è ipotizzato l'utilizzo di un sensore della tipologia con cella di dimensioni 2cm x 2cm che ci permette di diminuire le dimensioni della strumentazione.



Nel caso nascessero problemi di sensibilità del sensore stessi potrebbe pensare l'utilizzo di un amplificatore operazionale.

Il sensore viene posto, centrato, sulla base circolare inferiore di un cilindro, base di raggio di 15cm.

La base superiore è invece lasciata libera per il passaggio della radiazione diffusa.

L'altezza del cilindro è vincolata alla dimensioni del sensore e al raggio di base, le pareti infatti dovranno coprire il sensore dalla radiazione diretta solare fino ad un'altezza angolare approssimata per eccesso a  $70^\circ$ .

Di conseguenza, l'altezza del sensore dovrà essere pari a:

$$h = 16 * \tan(70^\circ) = 43,6 \text{ cm}$$

dove 16 sono i centimetri orizzontali che la parete deve coprire: 15 cm di raggio più 1 cm per raggiungere il bordo opposto del sensore.

Il polarimetro è stato nominato "METEO" poiché è stato appositamente pensato per una maggiore correlazione tra le misure di polarizzazione e il CI.

Nonostante lo strumento indaghi solo una piccola porzione di cielo, si suppone la copertura nuvolosa su di essa sia mediamente nel tempo pari a quella delle zone circostanti.

Si crede quindi nella possibilità di poter risalire da un grado di polarizzazione di una ristretta zona di cielo ad indice di nuvolosità che sia indicativo per le zone in cui si compiono le misure.

### **8.3 - POLARIMETRO "CPV"**

Un secondo criterio è quello di far lavorare il polarimetro sulla porzione angolare più bassa di cielo, complementare alla fascia  $h_{max} \leq h \leq 90^\circ$ , con la precisa intenzione di ispezionare la fascia di cielo percorsa dal sole.

Uno studio di questo tipo può fornire un indice importante per lo studio dell'applicabilità di un sistema fotovoltaico a concentrazione solare ad inseguimento(CPV).

I sistemi CPV lavorano con la componente diretta del sole quindi in una fascia limitata tra  $0^\circ \leq h \leq h_{max}$  dove  $h_{max} = 68,5^\circ$  è la stessa calcolata in precedenza.

Naturalmente anche questa condizione va modulata a seconda della latitudine del luogo.

Si potrebbe osservare, visto che questa rivisitazione del polarimetro è stata pensata per esplorare solo la regione percorsa dal sole, che sarebbe possibile limitare anche in azimut la regione osservata, ovvero oscurare con una parete S.B. tutta la regione nord che per l'emisfero boreale non è mai percorsa dal sole.

Questa soluzione è stata tralasciata per due principali motivi:

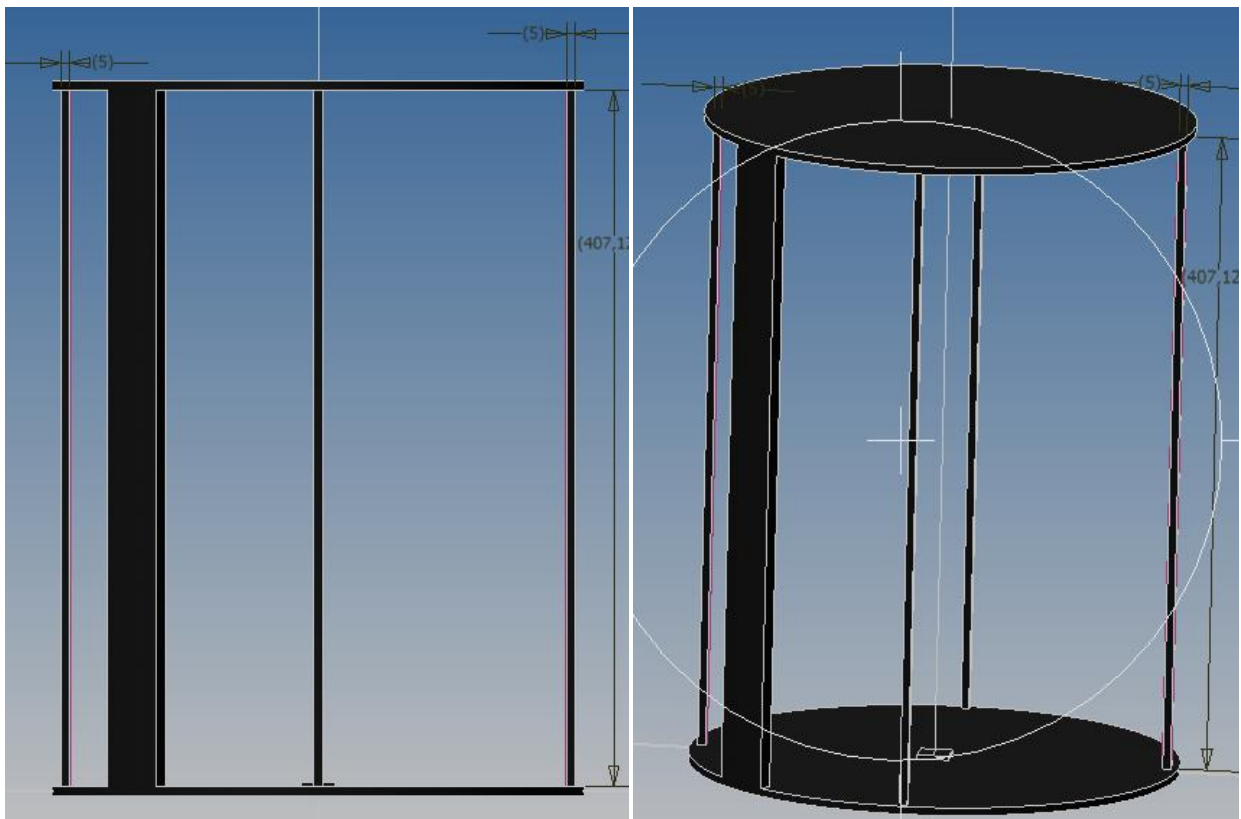
- La regione emisferica sud è quella che fornisce radiazione a minor polarizzazione perché caratterizzata da un angolo di diffusione mediamente basso.
- Non abbiamo una particolare ragione per pensare che l'emisfero nord abbia una copertura statisticamente diversa da quello sud, se non nel caso si presenti importanti asimmetrie e disomogeneità nella morfologia del territorio (Es. una zona costiera in cui abbiamo il mare da una parte e la terraferma dall'altra).

Per cui, alla luce di queste osservazioni, si progetterà la misura di tutta la fascia azimutale.

Qual'ora ci si trovasse in un territorio evidentemente asimmetrico potrebbe essere utile oscurare anche tutta la zona nord.

Anche in questo caso si pensa ad un sensore rimpicciolito di dimensione 2 cm x 2 cm, in modo da ridurre le dimensioni della strumentazione e della shadow band.

Qualora si presentassero problemi di sensibilità del polarimetro, in particolare nelle ore crepuscolari quando l'intensità luminosa si abbassa, questi sono risolvibili con l'utilizzo di un amplificatore operativo.



**Figura 8.3.1** – Descrizione grafica del polarimetro CPV.

Il sensore è posizionato all'interno di un cilindro di ugual base a quello utilizzato per il polarimetro precedente, centrato sulla base inferiore.

In questo caso le pareti del cilindro sono state eliminate e i due piatti, quello inferiore e quello superiore, sono vincolati da 4 piccole colonne che le collegano.

Una shadow-band, corrispondente ad una sezione della parete del cilindro, collega le 2 basi ma ne rimane svincolata, dovendo mantenere un movimento azimutale ad inseguimento del disco solare.

#### **8.4 - VARIANTE POLARIMETRO "CPV" :IL "CPV b"**

I sistemi fotovoltaici a concentrazione solare ed inseguimento(CPV) lavorano solo con luce solare diretta.

Per valutare l'adeguatezza di un sito all'applicazione di un sistema a concentrazione di questo tipo, è necessario comprendere quale sia la probabilità, mediata nel tempo, che il disco solare sia coperto da nubi.

Si può affermare che all'interno della fascia angolare di cielo coperta dal sole, ogni nube crea una potenziale minaccia di oscuramento di luce solare diretta, e che quindi, al contrario di come lavorano i polarimetri fin'ora progettati, qualsiasi posizione questa nube occupi lungo la calotta celeste debba mantenere la stessa importanza.

Detto in poche parole, si intende creare un polarimetro che discrimini il meno possibile la radiazione, anche se incidente con diverse inclinazioni.

Una soluzione a questa esigenza può essere trovata variando il polarimetro "CPV", modificandone la struttura, sempre lasciando invariata la fascia di cielo esplorata.

Si tratta di spostare il sensore sulla parete orizzontale superiore della struttura, rivolto verso il basso.

Il sensore riceverà la radiazione solare diffusa per riflessione da uno specchio parabolico convesso posto sul piano orizzontale inferiore opposto, mentre con un telescopio limiterà il campo visivo del sensore eliminando la luce proveniente dall'orizzonte.

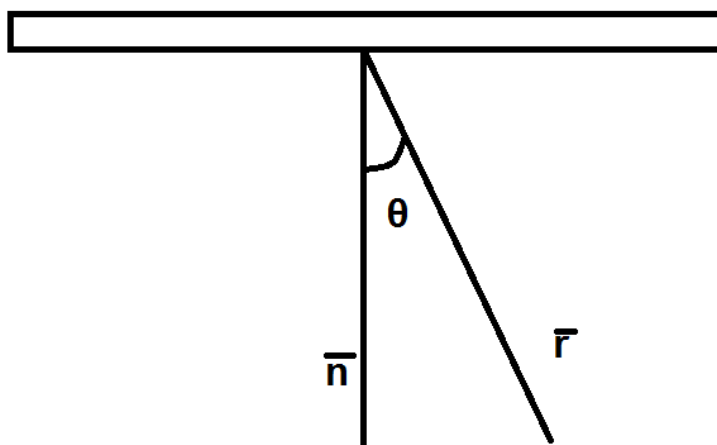
L'immagine total sky potrà essere fermata puntando il medesimo specchio con una CCD e servirà per calibrare la correlazione tra grado di polarizzazione e CI.

Analizziamo i motivi di questa scelta: si tratta di tradurre i concetti introdotti in questo paragrafo.

In che modo un sensore che lavora su un piano orizzontale distingue raggi della radiazione incidente??

Nel caso la radiazione incida con inclinazioni diverse rispetto alla normale al sensore, nonché con diversi angoli  $\theta$  tra  $\vec{n}$ (la normale) e  $\vec{r}$ (raggio incidente).

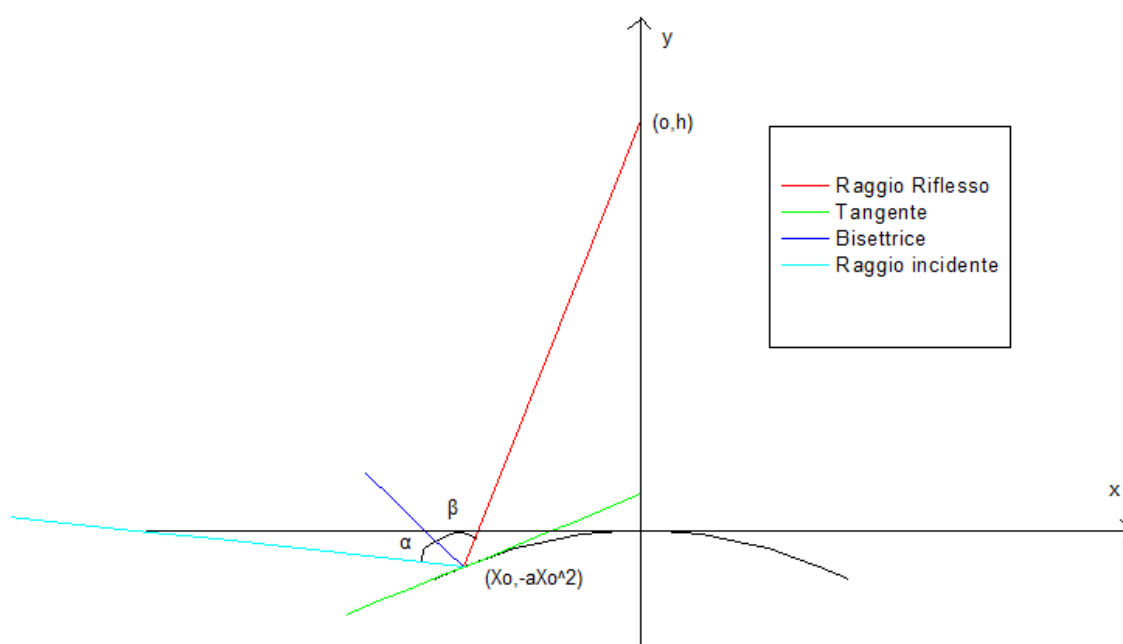
**Figura 8.4.1** - Il sensore rivela l'intensità originale della radiazione incidente smorzata di un fattore moltiplicativo  $\cos \theta$ .



Allo stesso modo anche l'immagine del cielo presa al momento della misura deve essere correlata al meglio con il grado di polarizzazione misurato.

Quando l'immagine riflessa da uno specchio, di qualsiasi forma esso sia, e registrata da una CCD, non distorce le proporzioni degli oggetti che riflette, qualsiasi posizione essi abbiano nella calotta celeste?? Si è cercato di rispondere a questa domanda studiando il sistema: radiazione incidente, specchio, radiazione riflessa, CCD.

In primo luogo si è andati a studiare come uno specchio di forma parabolica rifletta la luce incidente: Si considera una parabola di equazione  $y = -ax^2$ , di convessità generica  $a$ , centrata nell'origine degli assi ed una CCD posta ad altezza  $h$  rispetto il suo vertice.



**Figura 8.4.2**

Un raggio incide su questa parabola nel punto  $(x_0, ax_0^2)$ , imponiamo che il raggio riflesso centri la CCD.

Per far sì che si tratti di una riflessione dobbiamo imporre che gli angoli  $\alpha$  e  $\beta$ , rispettivamente angolo tra raggio incidente e normale alla superficie della parabola e tra normale e raggio riflesso, siano uguali.

Per calcolare l'angolo  $\varphi$  tra 2 rette di coefficiente  $m$  e  $m'$  si utilizza la formula:

$$\tan \varphi = \frac{m-m'}{1+mm'} \quad (8.4.1)$$

Si vanno a calcolare i coefficienti angolari di raggio incidente, normale e raggio riflesso:

**Coefficiente angolare del raggio incidente:**  $m = -\tan \theta$  (8.4.2)

con  $\theta$  angolo tra raggio incidente e semiasse positivo dell'asse x nel caso questo provenga da verso negativo dell'asse x.

**Coefficiente angolare della normale alla superficie:**  $m = -\frac{1}{2ax_0}$  (8.4.3)

considerandola come perpendicolare alla tangente della parabola.

**Coefficiente angolare del raggio riflesso:**  $m = -\frac{h+ax_0^2}{x_0}$  (8.4.4)

Si calcolano ora  $\alpha$  e  $\beta$ :

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{-\tan \theta + \frac{1}{2ax_0}}{1 + \frac{\tan \theta}{2ax_0}} \right) \quad (8.4.5)$$

$$\beta = \tan^{-1} \left( \frac{\frac{1}{2ax_0} + \frac{h+ax_0^2}{x_0}}{1 + \frac{h+ax_0^2}{2ax_0^2}} \right) \quad (8.4.6)$$

Uguaglio gli argomenti delle tangenti, uguagliando così anche  $\alpha$  e  $\beta$ .

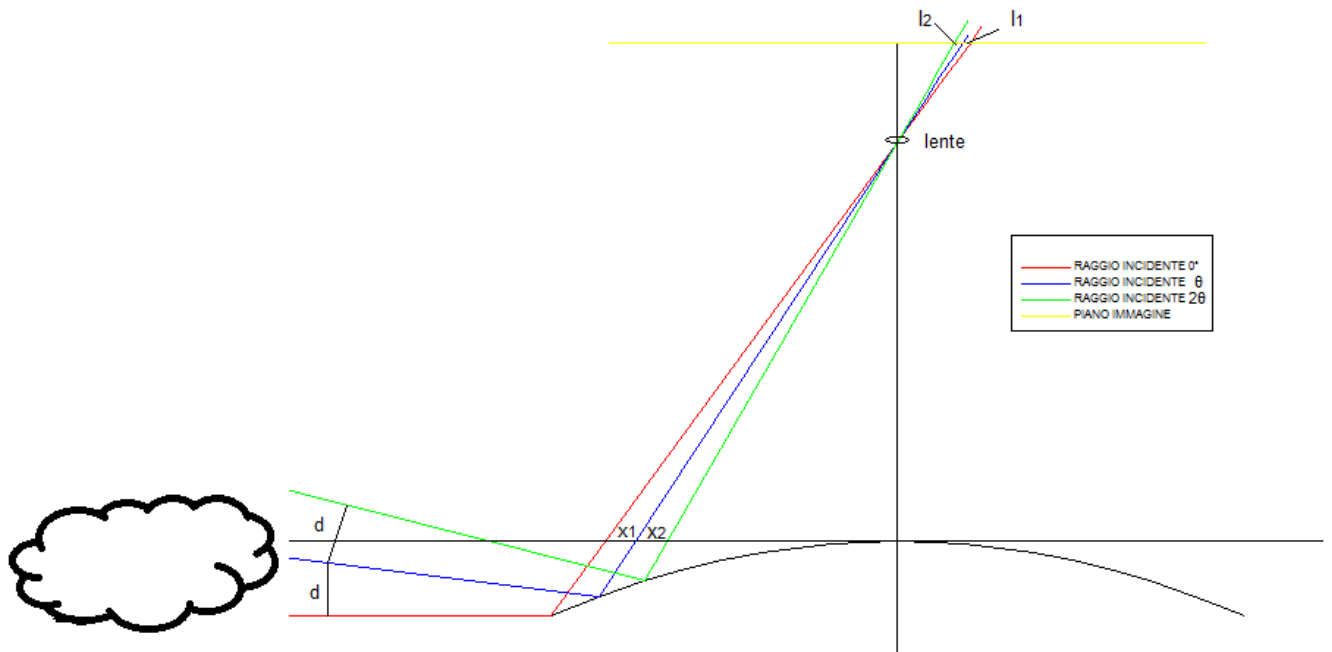
$$\frac{-\tan \theta + \frac{1}{2ax_0}}{1 + \frac{\tan \theta}{2ax_0}} = \frac{\frac{1}{2ax_0} + \frac{h+ax_0^2}{x_0}}{1 + \frac{h+ax_0^2}{2ax_0^2}} \quad (8.4.7)$$

Andando ad esplicitare l'equazione secondo  $x_0$  ottengo un'equazione di quarto grado.

$$4a^3x_0^4 + (3a + 4a^2h)x_0^2 + (4a \tan \theta h)x_0 - h = 0 \quad (8.4.8)$$

In questo modo abbiamo trovato una relazione attraverso la quale ricavare, conoscendo i parametri  $a$  e  $h$ , come la parabola riflette raggi incidenti ai diversi possibili angoli  $\theta$  sulla CCD.

A questo punto si è potuto analizzare come la CCD ricrei l'immagine riflessa dallo specchio sul piano di registrazione dell'immagine, semplificando la CCD con un sistema formato da una lente che focalizza i raggi sul piano di registrazione dell'immagine (figura 8.4.3)



**Figura 8.4.3**

Immaginiamo che un oggetto occupi una porzione angolare di cielo compresa tra  $0^\circ$  e  $2\theta$  e suddividiamo quest'angolo in due parti uguali.

Sia la porzione di oggetto posta tra  $0^\circ$  e  $\theta$  che la restante collocata tra  $\theta$  e  $2\theta$ , vengono visti sulla parabola con la medesima dimensione  $d$ .

L'obiettivo che ci si è prefissi è quello di mantenere le proporzioni degli oggetti iniziali quando la CCD va a ricrearle sul piano immagine: ne deduciamo che anche  $l_1$  ed  $l_2$ , rispettivamente le dimensioni degli oggetti compresi tra  $0^\circ$  e  $\theta$  e tra  $\theta$  e  $2\theta$  riprodotti sul piano immagine, debbano mantenere le proporzioni iniziali ovvero rimanere uguali:

$$l_1 = l_2$$

Questo avviene quando anche  $x_1$  ed  $x_2$  sono uguali poiché:

$$\frac{x_1}{x_2} = \frac{l_1}{l_2}$$

La ricerca di una forma parabolica che ricrei questa condizione è stata effettuata attraverso il software MATLAB R2010a, un ambiente per il calcolo numerico e l'analisi statistica che comprende anche un omonimo linguaggio di programmazione.

Attraverso la funzione "*fsolve*" è stato possibile, impostando i parametri di convessità  $a$ , altezza della ccd  $h$ , ed inclinazione dei raggi rispetto l'orizzonte  $\theta$  risolvere l'equazione 8.4.8 che restituisce le

coordinate del punto della parabola che il raggio incidente deve colpire affinché venga riflesso sulla CCD.

Questo calcolo è stato effettuato per raggi di inclinazione  $0 \leq \theta \leq 90^\circ$ , con uno step di  $10^\circ$ .

Ricavando la lunghezza dei segmenti  $x_n$  con  $n = 1, \dots, 9$ , calcolati come lo spazio tra le intersezioni di un raggio riflesso e quello successivo con l'asse delle ascisse è stato possibile confrontarli e, variando i parametri a e h, si è calcolata quale parabola si avvicinasse più alla condizione  $x_1 = x_2 = \dots = x_9$ .

Riportiamo qui di seguito il codice del suddetto programma:

```
clear;
clc;

global a; %Variabili usate dalla funzione "riflessione"
global h;

file_coord='C:\Users\Bittu\Documents\MATLAB\coord_par.txt';
fid1 = fopen(file_coord, 'w');
fprintf(fid1, '%s\n%s\t\t%s\n', 'Coordinate della parabola', 'X', 'Y');

a_min=0.20;
a_max=0.25;
a_step=0.01;
s=(a_max-a_min)/a_step;

D=ones(9,s); %Definisco la matrice D
l=1;
a=0.2;
for a=a_min:a_step:a_max %Impostazione parametri parabola e altezza CCD
    fprintf(fid1, '%s%0.2f\n', 'a=',a);
    h=3.45;
    n=1;
    x=2.5;

for i=0:10:90 %Calcolo le coordinate (x,y)
    Ang=fsolve(@riflessione, [i,x]);
    X(n)=Ang(2);
    Y(n)=a*(Ang(2))^2;

    f(n)=-X(n); %Salvo le coord della parabola nel III quadrante.
    g(n)=-Y(n);
    d(n)=h*(f(n)/(h-g(n)));%Calcolo l'intersezione tra raggio riflesso e asse delle ascisse

    fprintf(fid1, '%0.2f\t%0.2f\n',f(n), g(n));

    n=n+1;
    x=x-0.3;

end

for n=1:9 % Calcolo l'ampiezza degli Xn.

    k(n)=n;
    if n==9
```

```

    C(n)=d(n);
else
    C(n)=d(n)-d(n+1);
end

n=n+1;
x=x-0.3;

end

for n=9:-1:1
    D(n,l)=C(9)/C(n); %Rapporto i vari segmenti Xn con X9
    Dd(n,l)=abs(D(n,l)-1);
end

l=l+1;
end
D_dev=sum(Dd);

plot(k,D)
axis([1 9 0 1.2])
title('Rapporto tra segmenti')
xlabel('Rapporto: Segmento n°9 / Segmento n°x')
hleg1=legend('a=-0.20','a=-0.21','a=-0.22','a=-0.23','a=-0.24');
set(hleg1,'Location','Southeast')

fclose(fid1) ;

```

**La funzione “fsolve”richiama la funzione 8.4.8 che è stata scritta in un altro foglio d lavoro:**

```

function y=riflessione(z)

global a;
global h;

q=z(1);
teta=q*pi/180;
x=z(2);
m=-tan(-teta);

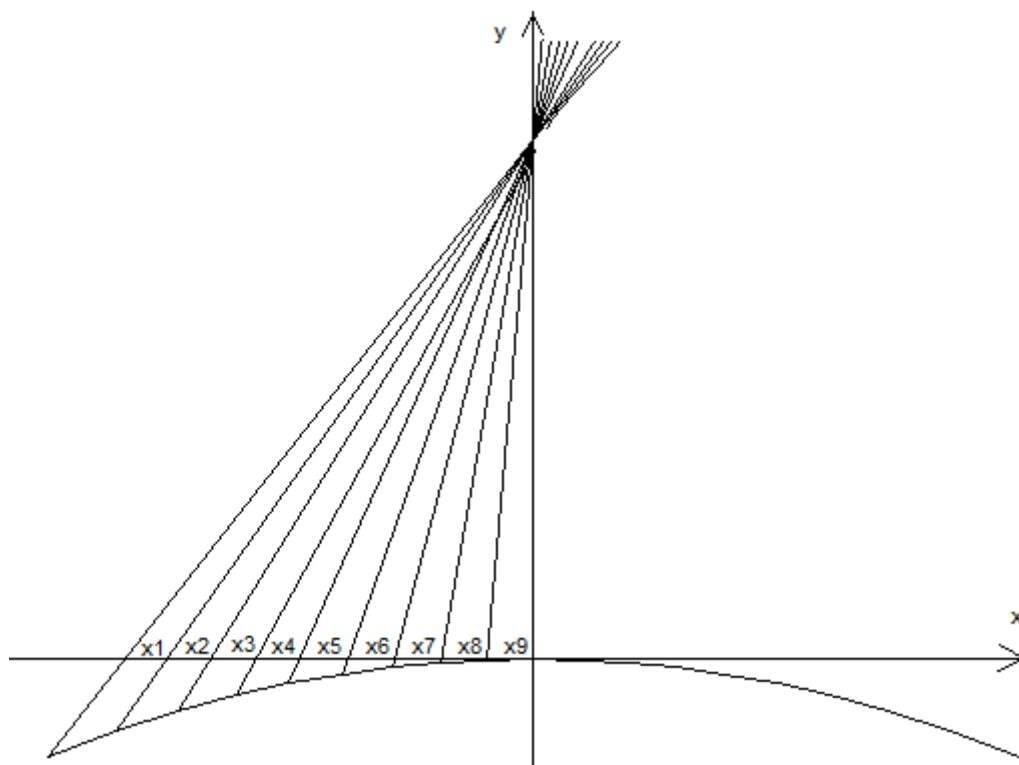
y=(m-(1/(2*a*x)))/(1+(m/(2*a*x)))-(((1/(2*a*x))+((h+a*(x^2))/x))/(1-(h+a*(x^2))/(2*a*x^2)));
%y=4*(a^3)*(x^4)+(3*a+4*(a^2)*h)*(x^2)-(4*a*h*tg(teta))*x-h;
end

```



Rapportando l'ampiezza dei vari  $x_n$  con un'ampiezza "campione" presa tra gli  $x_n$  stessi, si è in grado di fornire il criterio ricercato: si tratta di ricercare la parabola per cui questi rapporti (sono 9 nel nostro caso) risultano(o si avvicinano) a 1.

Questo criterio può essere riassunto in un unico indice calcolando la deviazione standard di questi rapporti rispetto il valore aspettato 1.



**Figura 8.4.4**

I parametri calcolati per il sistema specchio- CCD sono:

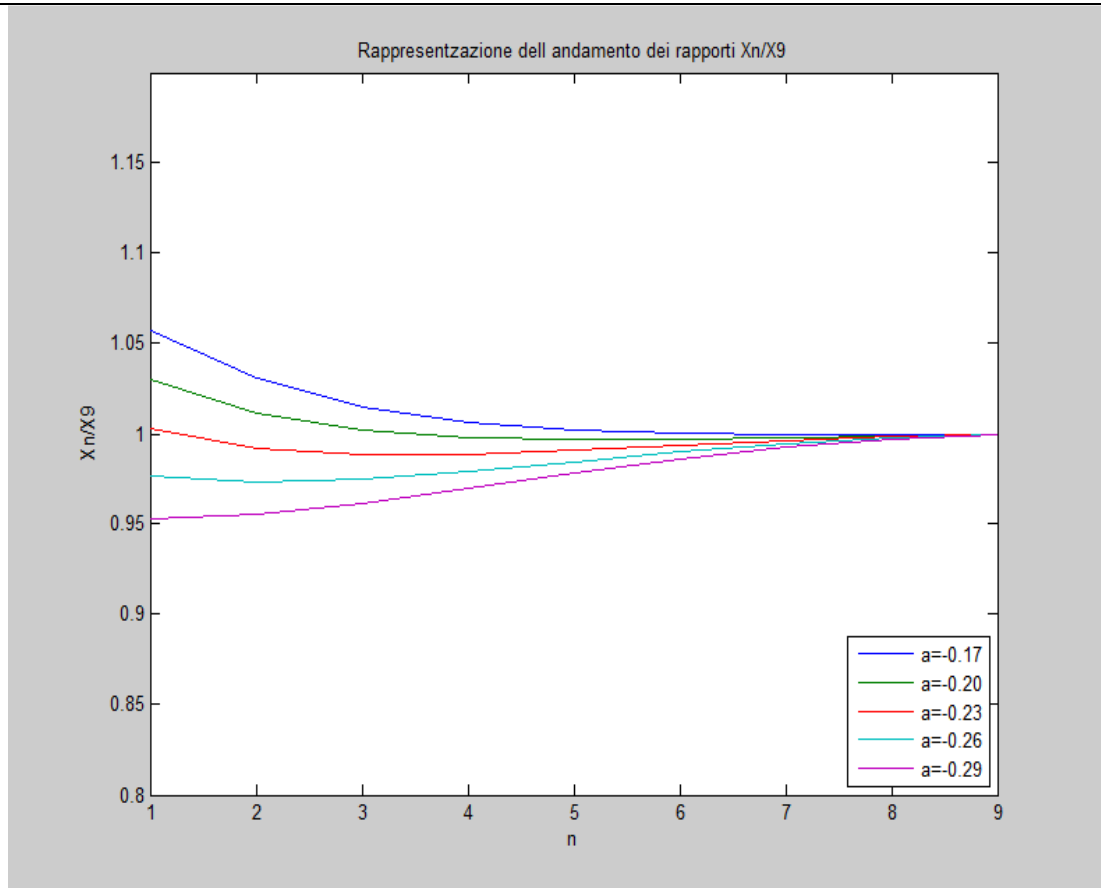
**Convessità:**  $a = -0,23$

**Raggio di base dello specchio :**  $r = 15 \text{ cm}$

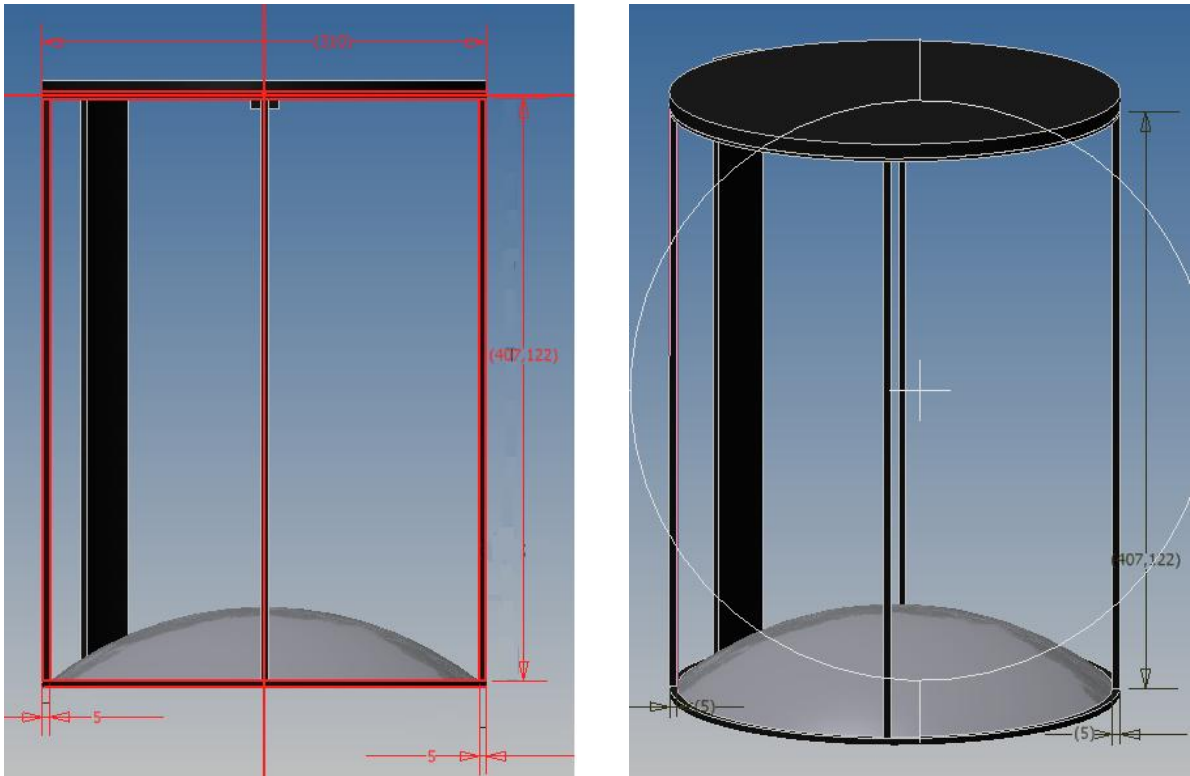
**Spessore specchio:**  $s = 5,2 \text{ cm}$

**Altezza CCD:**  $h = 34,5 \text{ cm}$

$\frac{x_1}{x_9}$   
 $= 1,002$   
 $\frac{x_2}{x_9}$   
 $= 0,992$   
 $\frac{x_3}{x_9}$   
 $= 0,988$   
 $\frac{x_4}{x_9}$   
 $= 0,989$   
 $\frac{x_5}{x_9}$   
 $= 0,991$   
 $\frac{x_6}{x_9}$   
 $= 0,994$   
 $\frac{x_7}{x_9}$   
 $= 0,996$   
 $\frac{x_8}{x_9}$   
 $= 0,998$   
 $\frac{x_9}{x_9} = 1$   
 $\sigma =$   
 $0,054$



**Figura 8.4.5** – Rappresentazione dell'andamento dei rapporti  $x_n/x_9$ : si può notare come la curva corrispondente ad  $a=-0,23$  sia quella che più si mantiene più vicina a quota 1



**Figure 8.4.6 e 8.4.7 – Rappresentazione grafica del “CPV b”**

Nel “CPV b” si può pensare di posizionare la CCD direttamente affiancata al sensore.

I raggi riflessi dalle parti più esterne dello specchio sono inclinati rispetto alla normale del sensore di un massimo di  $21^\circ$ , subiscono quindi uno smorzamento massimo che non raggiunge il 10% .

Rimane da verificare come la luce polarizzata riflessa dallo specchio venga integrata dallo specchio.

# CONCLUSIONI

La radiazione solare diffusa emisferica misurata al suolo presenta un grado di polarizzazione che dipende da diversi fattori, tra i quali principalmente l'altezza del Sole e lo stato chimico-fisico dell'atmosfera.

La principale sorgente di luce diffusa polarizzata è l'atmosfera nella porzione della volta celeste sgombra da nubi, di conseguenza è previsto un alto grado di polarizzazione in condizioni di cielo completamente sereno, mentre al contrario è prevista assenza, o quasi, di polarizzazione in condizioni di cielo completamente coperto.

In generale, quindi, il grado di polarizzazione della luce diffusa misurata al suolo sarà intermedio tra i due estremi suddetti e sarà sensibilmente condizionato dal grado di copertura della volta celeste (generalmente noto come Cloudness Index, CI), pur dipendendo da altri fattori secondari.

Il principale fine della realizzazione dei polarimetri "Skypol 1" e "Skypol 2 per la misura del grado di polarizzazione della luce solare diffusa emisferica al suolo, è quello di estrarre informazioni utili sullo stato dell'atmosfera, in particolare il grado di copertura della volta celeste e la sua evoluzione nel tempo.

In particolare l'obiettivo prefissato è quello di creare un polarimetro che misuri un grado di polarizzazione correlato con il CI.

Alla luce dei dati ottenuti dalla campagna di misura avvenuta nel novembre 2010 e da dati raccolti in precedenza, si è potuto osservare che il grado di polarizzazione totale emisferico misurato con entrambi i primi due prototipi di polarimetro, a parità di altezza del sole  $h$ , è correlato con il grado di copertura nuvolosa, ma che questa correlazione non è biunivoca poiché la polarizzazione della luce atmosferica diffusa non dipende solo dall'area di cielo coperto, ma anche dalla sua distribuzione.

La misura di  $p$  inoltre viene influenzata da altri fattori, in primis livello di umidità e concentrazione di aerosol, il cui l'effetto non è trascurabile ed è quindi da indagare.

Al fine di accrescere la correlazione tra  $p$  e  $CI$ , si è pensato di diminuire l'angolo di ispezione dei polarimetri, trovando due principali soluzioni:

- Un polarimetro "Skypol meteo" che analizza unicamente la radiazione solare diffusa proveniente dalla fascia di cielo zenitale non percorsa dal sole, e che restituisce un grado di polarizzazione molto più "direzionale" che riduce i problemi di correlazione causati dalla variabilità della distribuzione della copertura nuvolosa.
- Un polarimetro "Skypol CPV" e una sua variante "skypol CPV b" che, viceversa, lavora sulla fascia di cielo sottostante, percorsa dal sole.

Questa soluzione è stata pensata appositamente per fornire un indice utile a valutare l'installazione di impianti fotovoltaici a concentrazione ad inseguimento.

Infine, dopo aver confrontato le misure di polarizzazione effettuate con le due diverse tipologie di sensore, risulta che il dispositivo comprendente il luxmetro sia più sensibile alla polarizzazione della luce solare diffusa.

Poiché non si è riusciti a dare una spiegazione di questa differenza di funzionamento, si riservano valutazioni per il prossimo futuro.

## **BIBLIOGRAFIA**

**PARRETTA A., CAMPA M., COLOMBANI A., LEZZIERO M., MALAGÙ C., STEFANICICH M.**, “*stima del cloudiness index attraverso misure di polarizzazione della luce solare diffusa emisferica*” sottoposto al XCV Congresso Nazionale SIF, Bari 28 Settembre – 3 Ottobre 2009

**BORN M., WOLF E.**, “Principles of optics”. Pergamon 6<sup>a</sup> edizione 1986

**ANTONIO PARRETTA, MARCO STEFANICICH, CESARE MALAGÙ, MILO LEZZIERO**, brevetto di un “Polarimetro per luce solare diffusa”.

**[Coulson] K.L. Coulson**, “*Polarization and Intensity of Light in the Atmosphere*”, A. Deepak Publishing, Hampton, Virginia (USA), 1988, ISBN 0-937194-12-3.

**[Smith] G.S. Smith**, “*The polarization of skylight: An example from nature*”, Am. J. Phys. **75** (2007) 25-35.