



Piano Lauree Scientifiche
Laboratorio di Ottica:
L'ottica dai fondamenti
alle sue moderne applicazioni
Incontro 3 - 27/4/2011

Fabio Sciarrino



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Dipartimento di Fisica,
“Sapienza” Università di Roma



INO-CNR
ISTITUTO
NAZIONALE DI
OTTICA

Istituto Nazionale di Ottica, CNR

fabio.sciarrino@uniroma1.it
http:\\quantumoptics.phys.uniroma1.it

Attività previste

- Laboratori di Ottica (2010/2011, 2011/2012)

Obiettivo: laboratori curriculari previsti per il II anno e per il IV anno

- Corso di formazione (2010/2011, 2011/2012)

Preparazione e discussione delle esperienze del Laboratorio di Ottica

- Masterclass di ottica (2011/2012)

Supporto informatico

- Sito e-learning

<http://elearning.uniroma1.it>

- Sito PLS – Dipartimento di Fisica

<https://sites.google.com/site/pianolaureescientifiche/>

Panoramica sui Laboratori di Ottica

Il laboratorio di Ottica prevede la realizzazione di diverse esperienze didattiche volte alla comprensione di tutte le principali tematiche affrontate. In particolare ogni esperienza prevede delle prove sperimentali opportunamente descritte in ogni scheda.

Le esercitazioni previste saranno differenziate tra biennio e triennio, in base alle nozioni base acquisite dagli studenti secondo il programma scolastico.

Responsabile: Fabio Sciarrino

Assistenti: Eleonora Nagali
Chiara Vitelli

Programma del Corso di Ottica

Luce e colori

I colori

Ottica geometrica

Riflessione

Rifrazione

Il banco ottico

Lenti

Prismi

Ottica ondulatoria

Interferenza

Diffrazione

Polarizzazione

Esperienze didattiche

Biennio

Per gli studenti del biennio sono previste 3 esperienze didattiche:

Esperienza I : Luce e colori

Esperienza II : Riflessione e Rifrazione della luce

Esperienza III: Ottica geometrica

Triennio

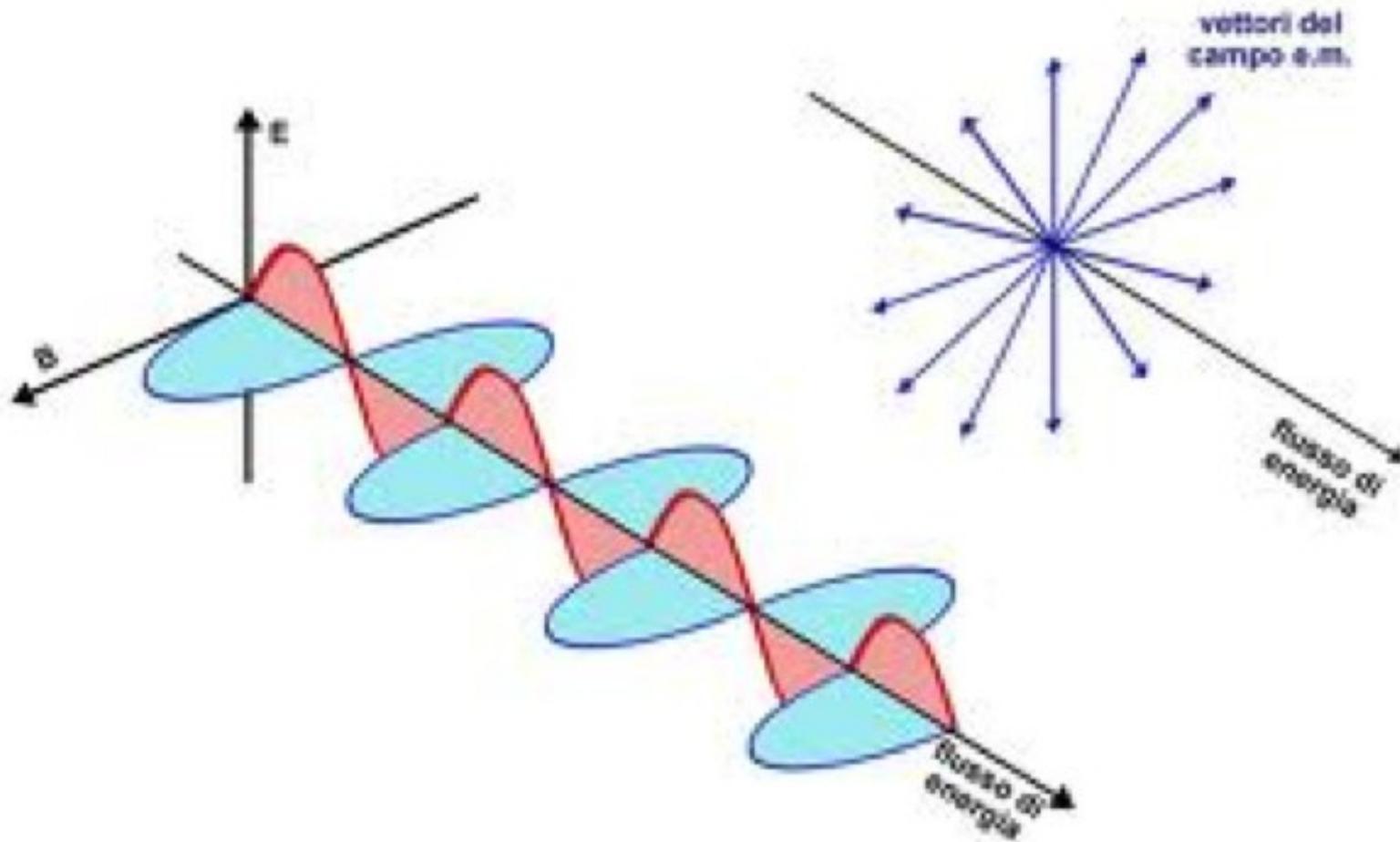
Per gli studenti del trienni sono previste 3 esperienze didattiche più un approfondimento:

Esperienza I : Diffrazione della luce

Esperienza II: Interferenza della luce

Esperienza III: Polarizzazione

POLARIZZAZIONE

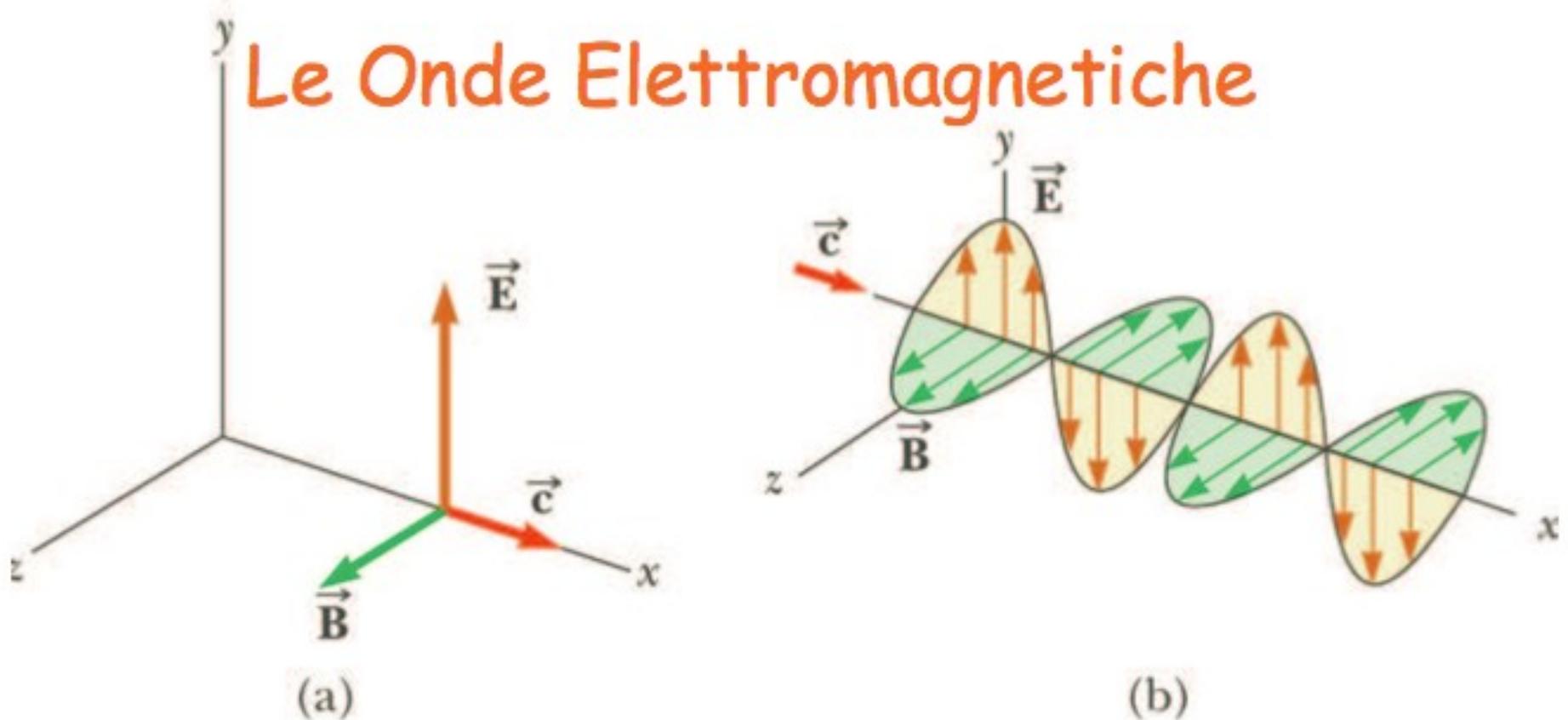


POLARIZZAZIONE

Concetti e nozioni chiave:

- **Polarizzazione rettilinea, circolare ed ellittica di un'onda;**
- **Polarizzazione per assorbimento**
- **Polarizzatori, legge di Malus**
- **Polarizzazione per riflessione, legge di Brewster**
- **Polarizzazione per rifrazione, doppia rifrazione, diffusione**
- **Potere rotatorio ottico.**

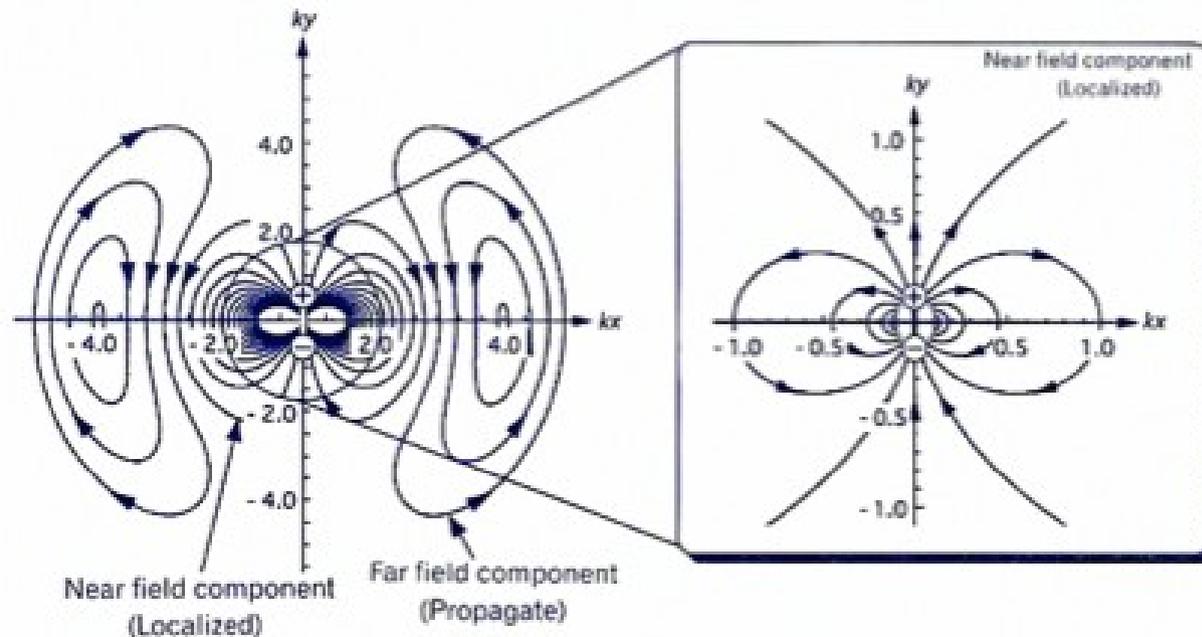
Le onde elettromagnetiche



Sono onde trasversali costituite dalle vibrazioni del vuoto quantistico. Hanno **velocità** $c=3.0 \cdot 10^8 \text{ m/s}$. In ogni istante **E** è perpendicolare a **B** e perpendicolare alla velocità.

Generazione di onde elettromagnetiche

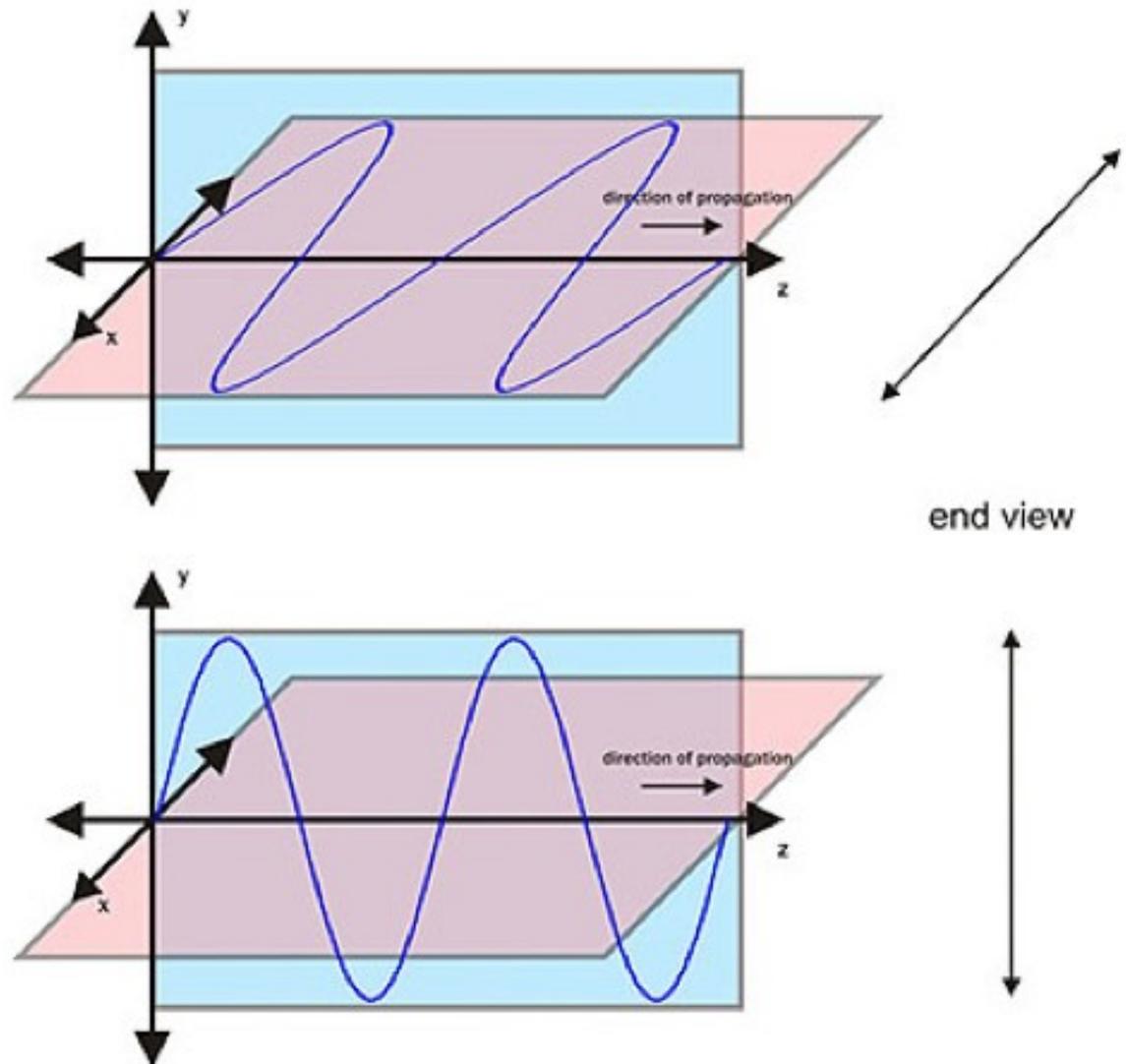
Onde EM vengono irradiate quando
una carica elettrica è accelerata.



campo elettrico di un dipolo elettrico oscillante

Le onde elettromagnetiche

Convenzionalmente, si definisce piano di **polarizzazione** quello in cui oscilla il vettore campo elettrico, e piano di **vibrazione** quello a esso perpendicolare, che è poi quello in cui oscilla il vettore campo magnetico.

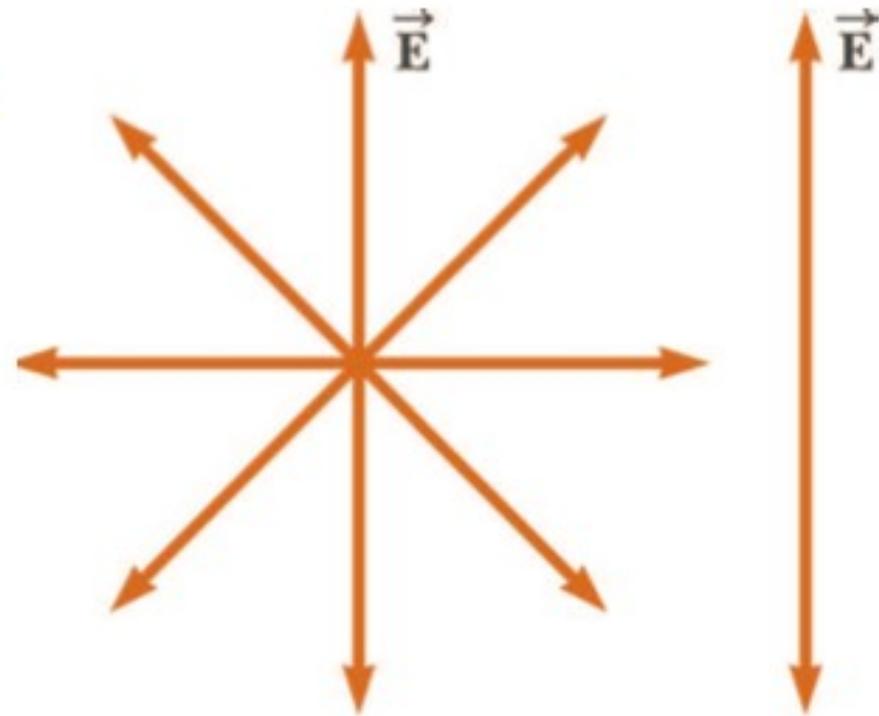


La polarizzazione

La **direzione di polarizzazione** di un fascio di luce è la direzione del campo elettrico

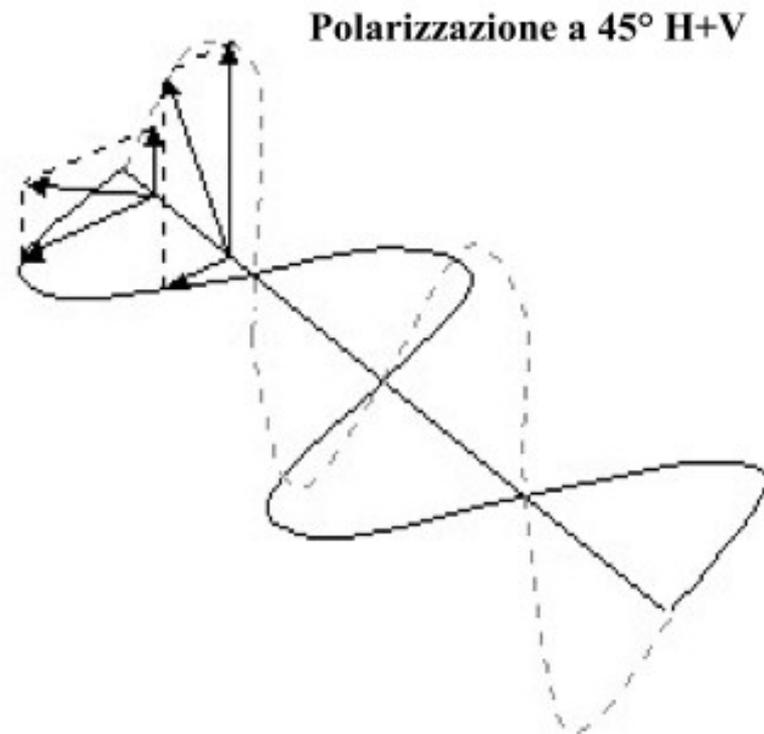
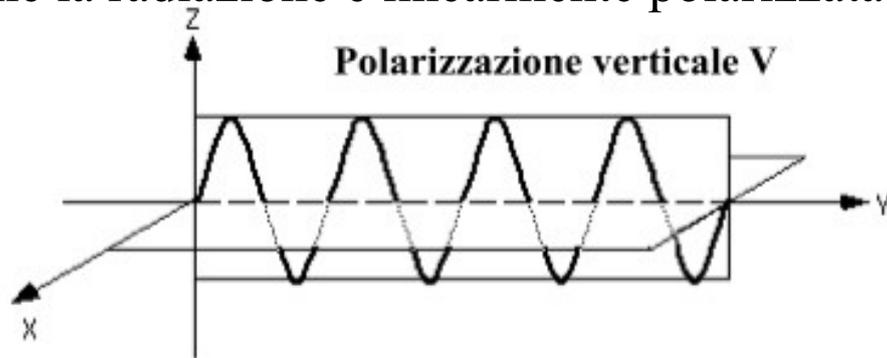
Normalmente la luce (del Sole, di una lampadina) **non è polarizzata** cioè è la sovrapposizione di onde di polarizzazione diversa, mediamente nulla.

Polarizzazione lineare è polarizzazione costante (definisce un **piano di polarizzazione**)



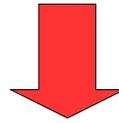
Le polarizzazione

Nelle sorgenti di luce ordinaria (lampade a incandescenza e a fluorescenza) l'onda elettromagnetica prodotta da ciascun atomo non ha alcun legame con quella emessa dagli altri atomi e quindi il processo di emissione è del tutto casuale. Poiché tutte le direzioni di vibrazione sono possibili, se tra di esse non vi è una relazione di fase coerente l'onda elettromagnetica risultante è una sovrapposizione caotica delle onde prodotte dalle singole sorgenti atomiche. Il risultato è quello che viene definito un'onda non polarizzata. Vi sono però alcune sorgenti, come i laser, in cui gli atomi emettono radiazione i cui piani di oscillazione del campo elettrico, e quindi i piani di polarizzazione relativi, sono tutti paralleli. In tal caso si dice che la radiazione è linearmente polarizzata.



Le polarizzazione

La Polarizzazione non è solo una descrizione geometrica di un fenomeno fisico



Il campo elettrico descrive la capacità dell'onda di spostare cariche elettriche (per es. gli elettroni in un materiale conduttivo), dunque la **polarizzazione** esprime la direzione nella quale queste cariche verranno spostate.



Applicazioni

ANTENNA TELEVISIVA: sarà in grado di captare un'onda elettromagnetica (un'onda radio) solo se orientata sul suo piano di polarizzazione, perchè solo in tal caso gli elettroni del metallo potranno spostarsi lungo la struttura, inducendo un segnale nel cavo collegato all'antenna. Questo permette per esempio di trasmettere due segnali radio alla stessa frequenza senza che interferiscano tra loro, semplicemente trasmettendoli con piani di polarizzazione ortogonali, in quanto sarà sufficiente orientare diversamente l'antenna per captare l'uno o l'altro.

Le direzioni di polarizzazione

La polarizzazione è determinata dall'andamento nel tempo della direzione del vettore campo elettrico $E(\mathbf{r}, t)$

Luce monocromatica: le tre componenti di $E(\mathbf{r}, t)$ variano sinusoidalmente con il tempo con ampiezze e fasi che sono generalmente diverse in modo che in corrispondenza di ciascuna posizione \mathbf{r} l'estremo del vettore si muova in un piano e tracci un'ellisse. L'orientazione e l'ellitticità dell'ellisse determina lo stato di polarizzazione dell'onda, mentre la dimensione dell'ellisse è determinata dall'intensità.

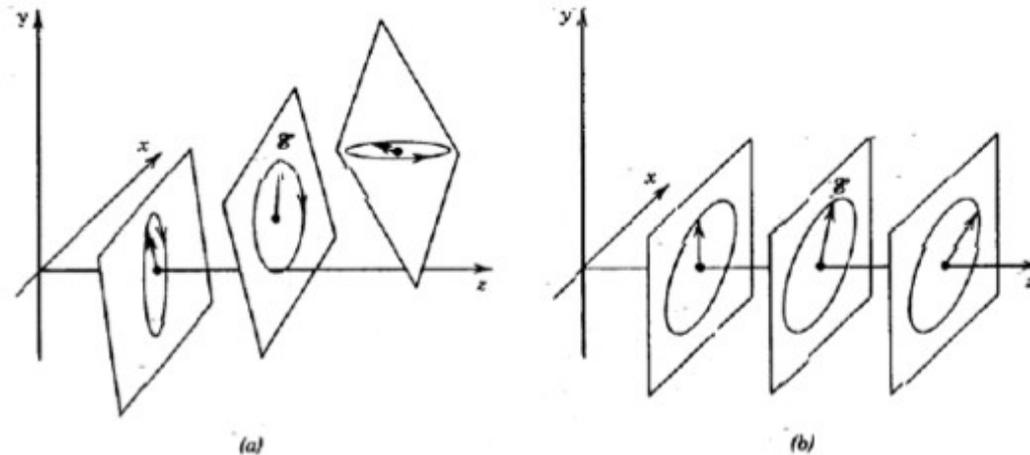


Figure 3: Vettore campo elettrico in diverse posizioni: (a) onda arbitraria; b) onda piana che viaggia in direzione z.

Le direzioni di polarizzazione

Quando l'ellisse degenera in una retta o diventa un cerchio, l'onda si dice, rispettivamente, polarizzata linearmente o circolarmente

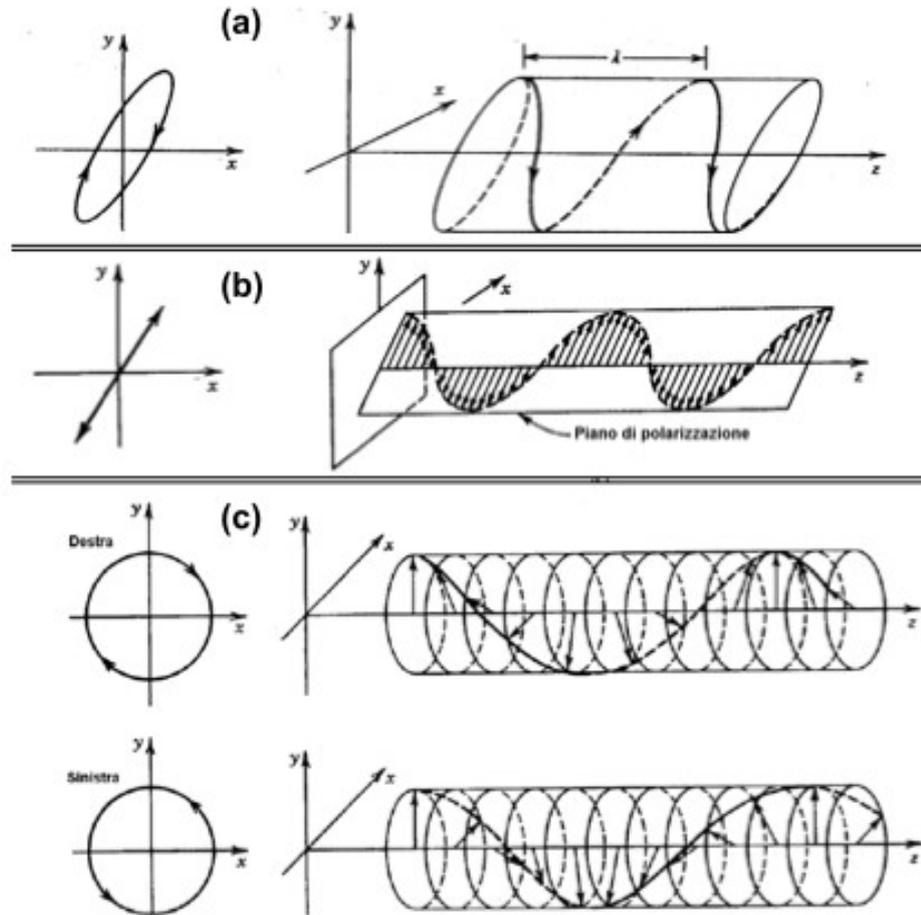


Figure 4: **Sinistra:** Rotazione dell'estremità del vettore campo elettrico in un piano $x - y$ in corrispondenza di una posizione z e **destra:** traiettoria dell'estremità del vettore campo elettrico ad un dato istante di tempo t , nei tre casi di polarizzazione: ellittica (a), lineare (b), circolare (c).

Metodi di polarizzazione

La polarizzazione gioca un ruolo importante nell'interazione della luce con la materia come dimostrano i seguenti esempi:

- La quantità di luce riflessa all'interfaccia tra due materiali dipende dalla polarizzazione dell'onda incidente.
- La quantità di luce assorbita da certi materiali è dipendente dalla polarizzazione.
- Lo scattering (o diffusione) di luce del materiale è, generalmente, sensibile alla polarizzazione.
- L'indice di rifrazione dei materiali anisotropi dipende dalla polarizzazione. Le onde con diversa polarizzazione perciò viaggiano con diverse velocità e subiscono diverse variazioni di fase, in modo che l'ellisse di polarizzazione sia modificata quando l'onda avanza (ad esempio, la luce polarizzata linearmente può essere trasformata in luce polarizzata circolarmente).
- I materiali ottici attivi hanno la capacità di ruotare il piano di polarizzazione della luce polarizzata linearmente. In presenza di un campo magnetico, la maggior parte dei materiali ruota la polarizzazione.

Metodi di polarizzazione

Da quanto detto finora si deduce che ci sono diversi metodi per polarizzare la luce, legati all'interazione della luce stessa con la materia. Schematicamente, sono quattro i fenomeni che producono luce polarizzata partendo da luce non polarizzata, ovvero:

1. assorbimento
2. riflessione
3. diffusione (scattering)
4. birifrangenza (o doppia rifrazione)

Polarizzazione per assorbimento: Polaroid

Un metodo comune per polarizzare la luce è l'assorbimento della luce in una lamina polaroid. Tale materiale contiene molecole di idrocarburi a lunga catena che vengono allineate se durante il processo di fabbricazione la lamina viene stirata in una direzione. Queste catene diventano conduttrici a frequenze ottiche se la lamina viene immersa in una soluzione contenente iodio.

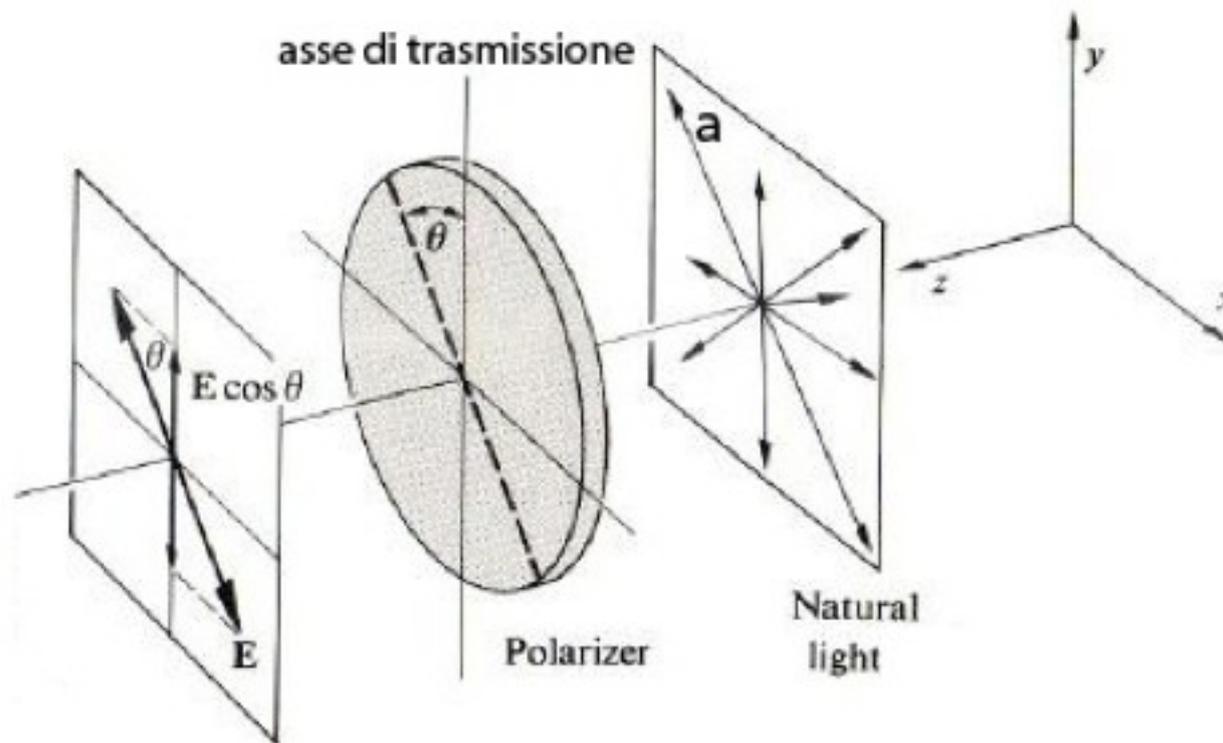
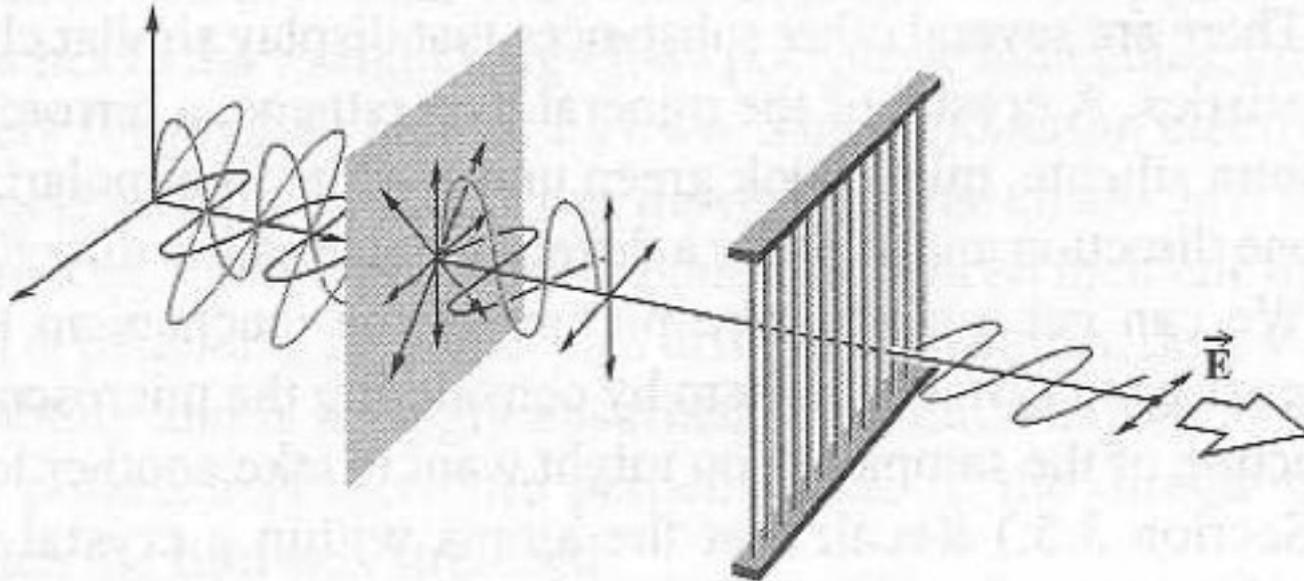


Figure 5: Selezione e analisi della polarizzazione della luce mediante due polaroid.

Catene di idrocarburi e iodio (Edwin Land 1938)



La griglia **elimina la componente di E parallela ai fili** perché permette agli elettroni di oscillare lungo quella direzione e così (1) la riflette, (2) la dissipa, (3) la cancella per interferenza

Polaroid

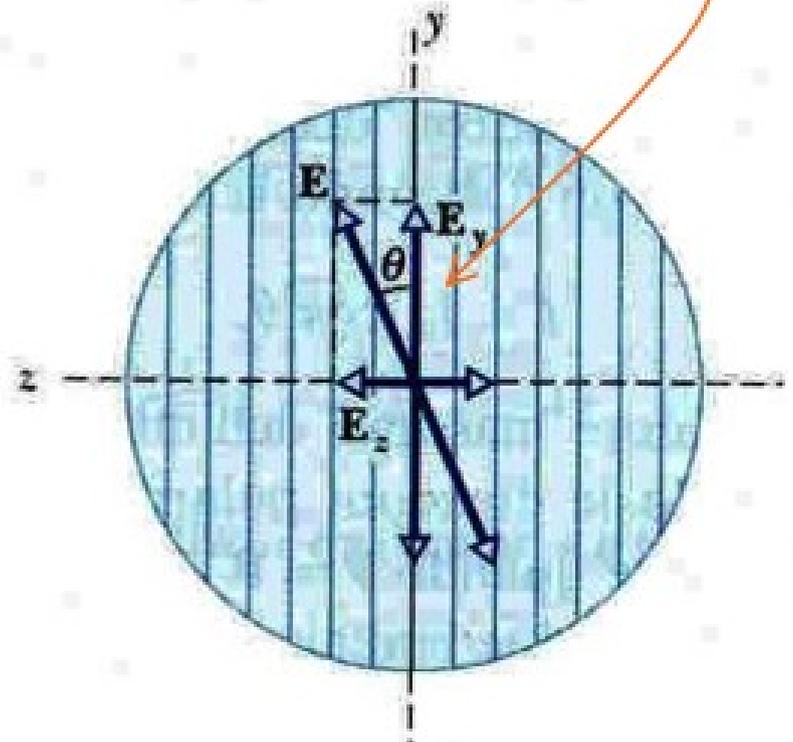
Come si usano i polaroid ?

attraversando il *polaroid*, il campo E viene scomposto

- nella componente E_y parallela alla direzione del filtro
- nella componente E_z perpendicolare alla direzione del filtro:

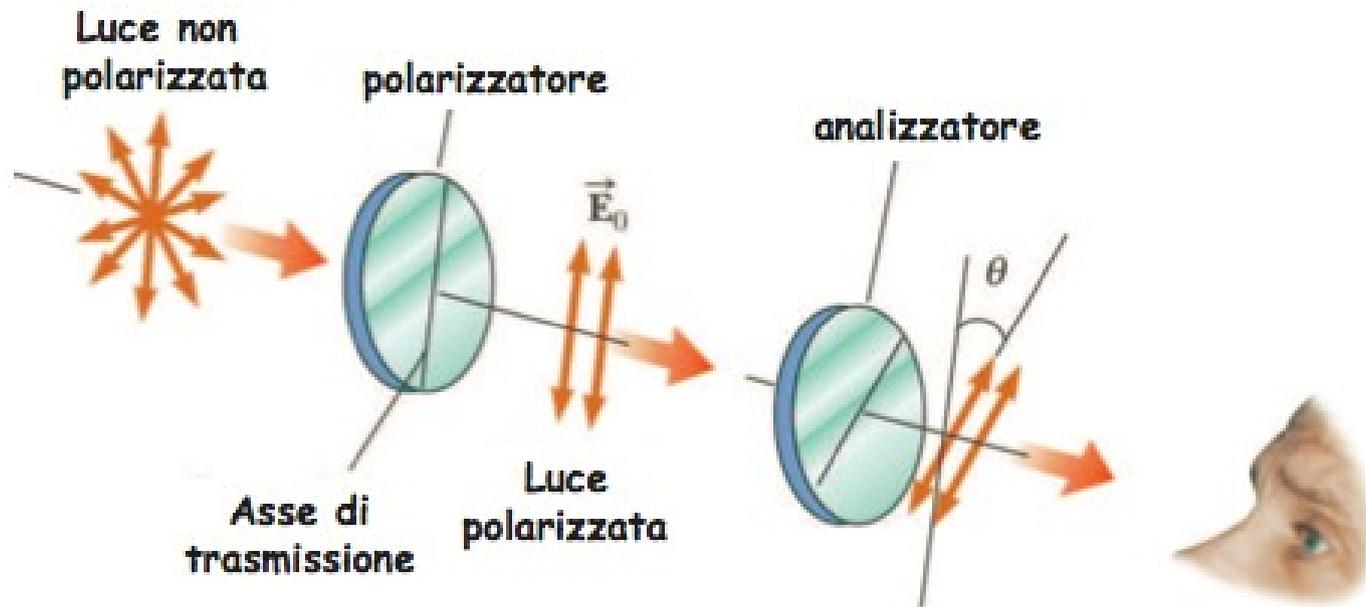
solo la componente E_y passa, la componente E_z viene assorbita.

Direzione permessa
(la griglia le è
perpendicolare)



Polaroid

Certi materiali **trasmettono solo la componente del campo elettrico lungo una certa direzione** (polarizzatori)



Se l'onda polarizzata ha intensità I_0 ,
all'uscita dell'analizzatore $I = I_0 \cos^2 \theta$ (Legge di Malus)

Legge di Malus

l'intensità del campo che attraversa il filtro vale quindi:

$$E_y = E \cos \vartheta$$

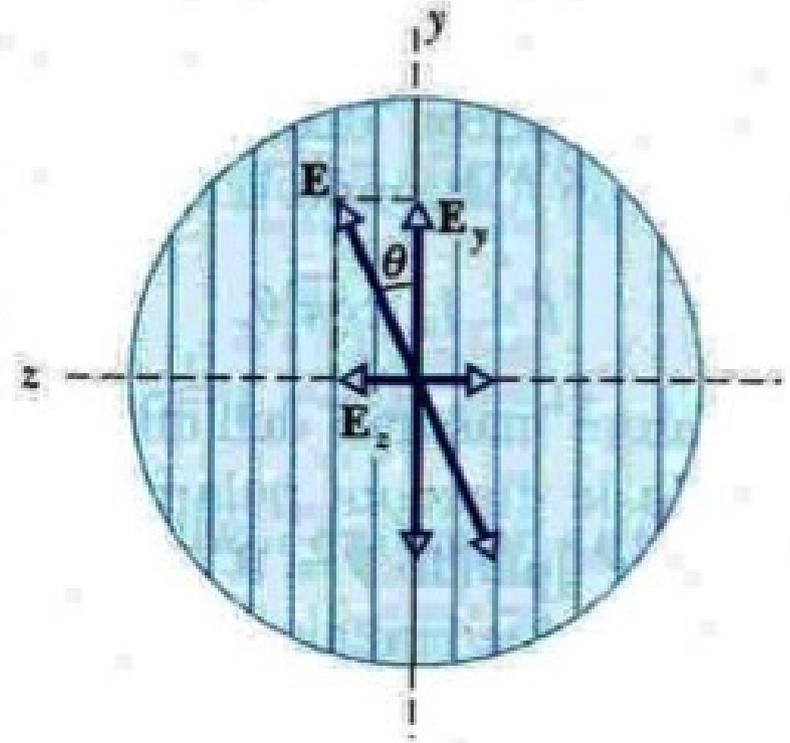
l'intensità del flusso luminoso è proporzionale al quadrato del campo, quindi quella che attraversa il filtro vale:

$$I = I_0 \cos^2 \vartheta$$

legge di Malus

Se il fascio incidente non è polarizzato, occorre mediare su tutte le direzioni del vettore \mathbf{E} , quindi:

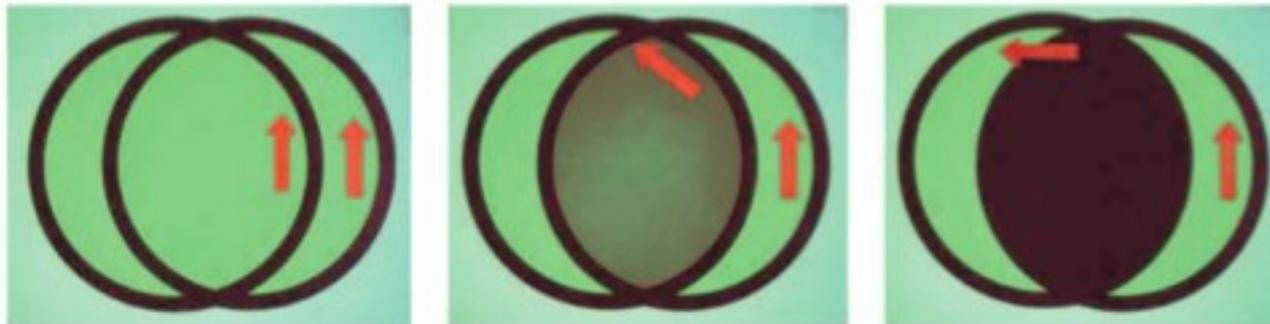
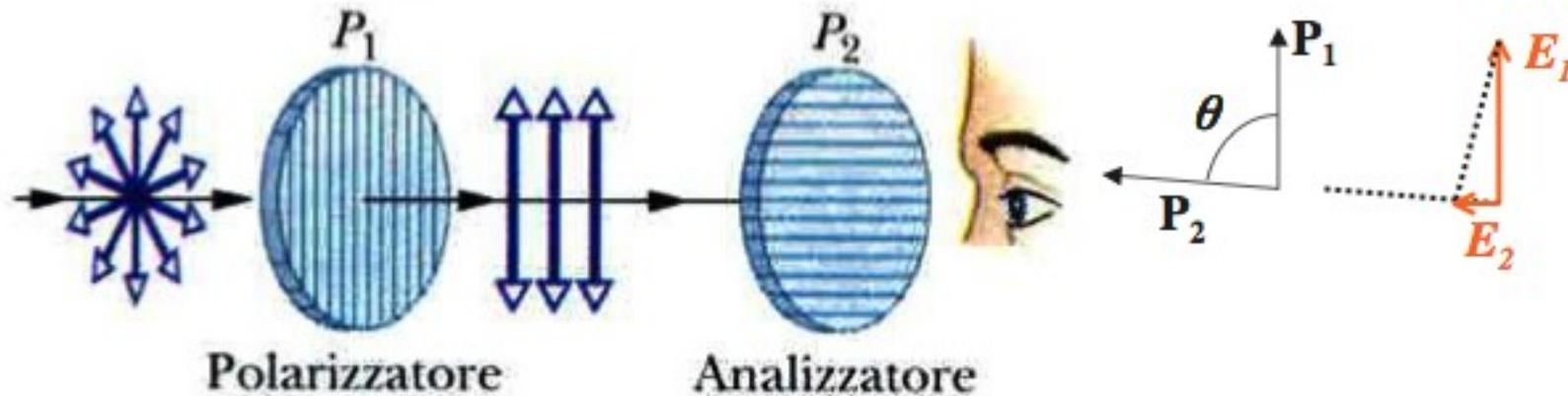
$$I = I_0 \langle \cos^2 \vartheta \rangle = \frac{1}{2} I_0$$



Luce attraverso due polarizzatori orientati in modi diversi

dopo avere attraversato la lamina *polarizzante* P_1 , il campo E_1 è diretto nella direzione di polarizzazione del filtro 1; dopo l'*analizzatore* P_2 emerge solo la componente $E_2 = E_1 \cos \theta$ e quindi l'intensità vale:

$$I_2 = I_1 \cos^2 \theta$$



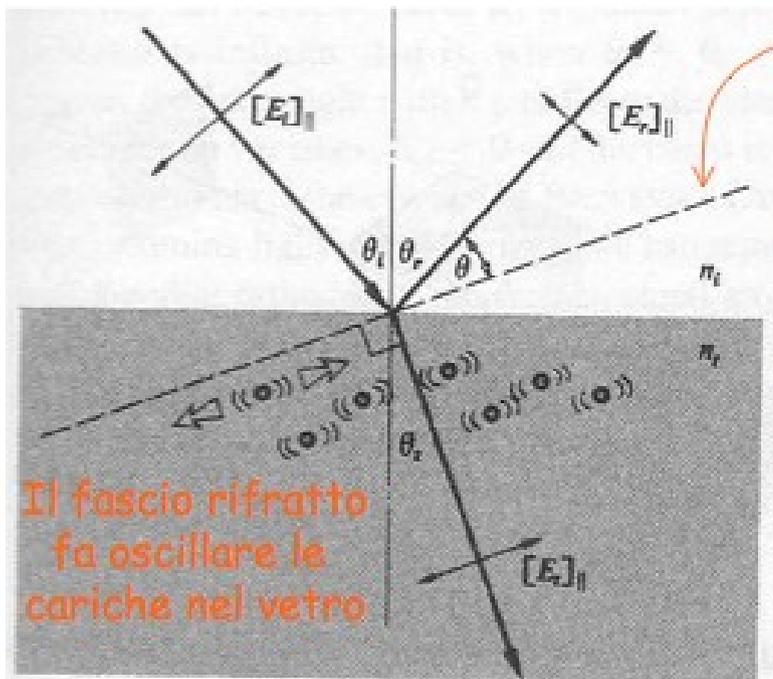
Polarizzazione per riflessione

La luce può essere polarizzata anche in conseguenza di un fenomeno di riflessione. Se infatti guardate attraverso un filtro polarizzatore, come lo sono gli occhiali da Sole Polaroid, la luce riflessa da una lastra di vetro o dalla superficie dell'acqua e fate ruotare il filtro, potete notare che la luce diventa alternativamente più forte e più debole. Ciò dimostra appunto che, nel processo di riflessione, la luce incidente non polarizzata ha subito una polarizzazione parziale. La luce viene polarizzata anche quando subisce la diffusione (cioè viene riflessa in tutte le direzioni) ad opera delle molecole di ossigeno e azoto dell'aria o delle molecole di grasso nell'acqua.



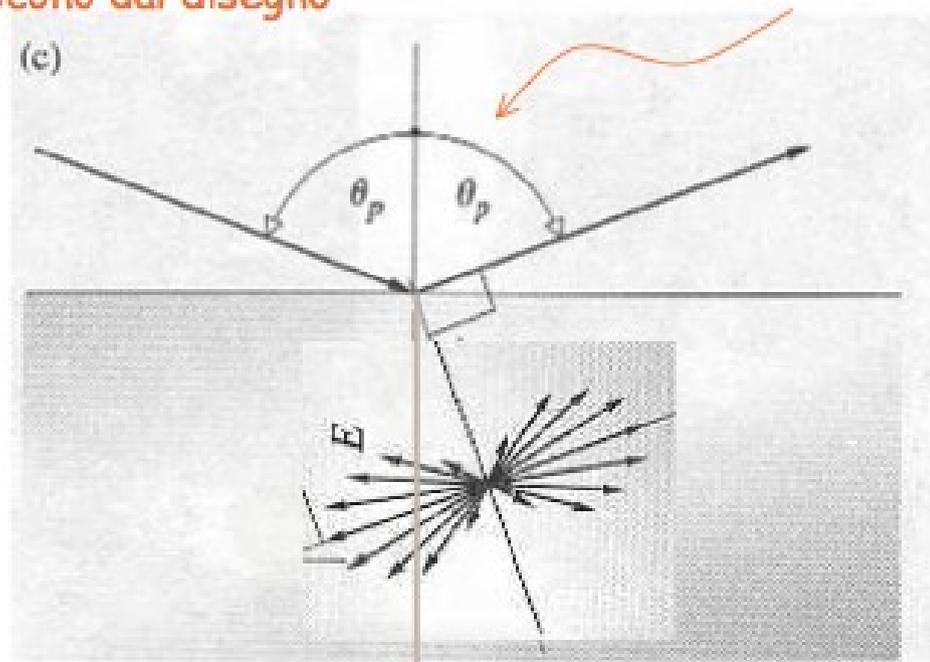
Figure 6: Rappresentazione schematica del fenomeno della riflessione e della diffusione da parte di un oggetto ruvido.

Polarizzazione per riflessione

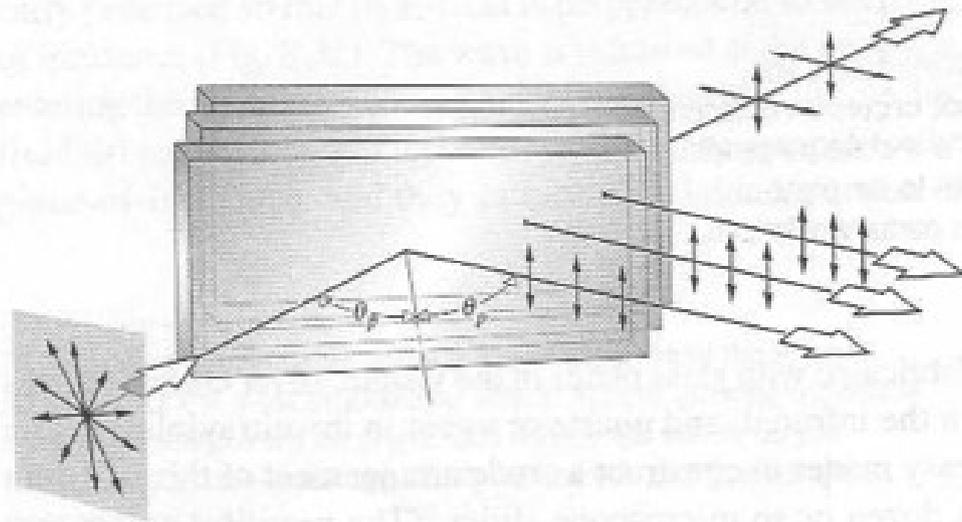


Piano delle oscillazioni:
in questa direzione
si vede solo la luce
dovuta ad
oscillazioni che
escono dal disegno

Angolo di Brewster
campo rifratto e riflesso
perpendicolari:
la luce riflessa
è nel piano delle oscillazioni



Polarizzazione per riflessione



Angolo di Brewster:

Angolo di incidenza +

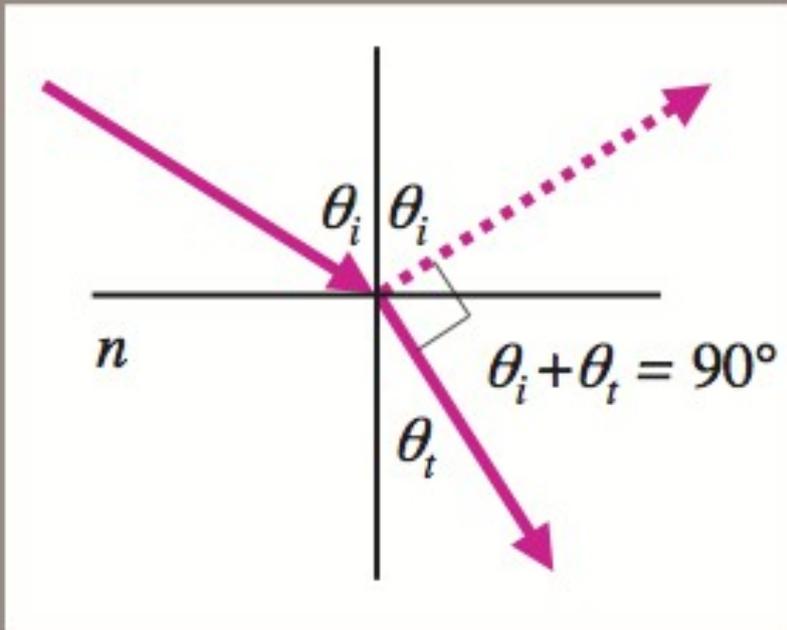
angolo di rifrazione = 90°

per questo particolare valore dell'angolo di incidenza

- la luce riflessa è totalmente polarizzata perpendicolarmente al piano di incidenza

- la luce rifratta ha entrambe le componenti, ma è meno ricca della componente perpendicolare

L'angolo di Brewster



Onda riflessa e rifratta soddisfano la legge di Snell:

$$\frac{\sin(\theta_{\text{incidente}})}{\sin(\theta_{\text{trasmesso}})} = n$$

Essendo però $\theta_i + \theta_t = 90^\circ$:

$$\begin{aligned} \frac{\sin(\theta_{\text{incidente}})}{\sin(\theta_{\text{trasmesso}})} &= \frac{\sin \theta_i}{\sin(90^\circ - \theta_i)} = \\ &= \frac{\sin \theta_i}{\cos \theta_i} = \tan \theta_i \end{aligned}$$

$$\tan \theta_i = n$$

$$\theta_{\text{acqua}} \approx 53^\circ$$

$$\theta_{\text{vetro}} \approx 56^\circ$$

Riflessione della luce e polarizzazione

Ad esempio il riflesso da terra è polarizzato orizzontalmente

Riflesso in una pozzanghera visto attraverso un polarizzatore che trasmette solo luce polarizzata **orizzontalmente**



Riflesso in una pozzanghera visto attraverso un polarizzatore che trasmette solo luce polarizzata **verticalmente**

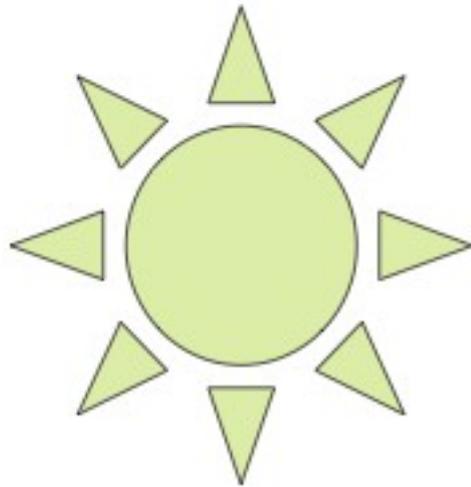


La luce riflessa che giunge ai nostri occhi dalla pozzanghera viene riflessa circa all'angolo di Brewster. In questo modo la polarizzazione verticale non viene riflessa del tutto

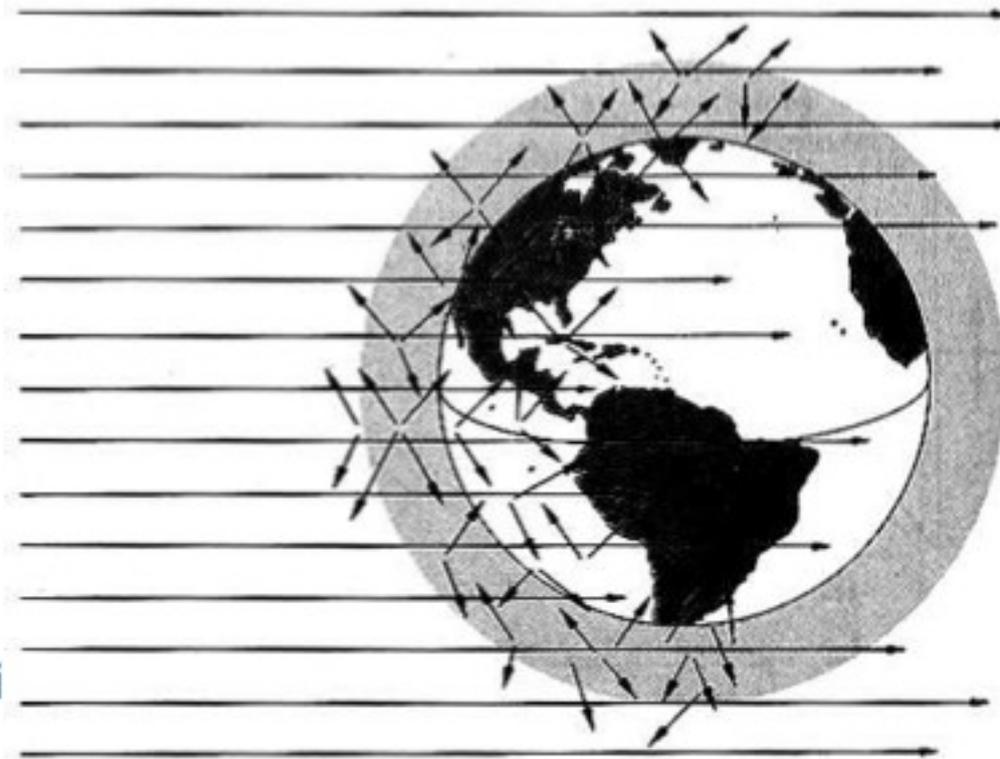
Gli occhiali polaroid trasmettono solo la polarizzazione verticale.

La diffusione della luce e la polarizzazione

La luce solare giunge a noi grazie alla **diffusione** da parte dell'atmosfera, e questo le conferisce tanto il colore celeste quanto un certo grado di polarizzazione



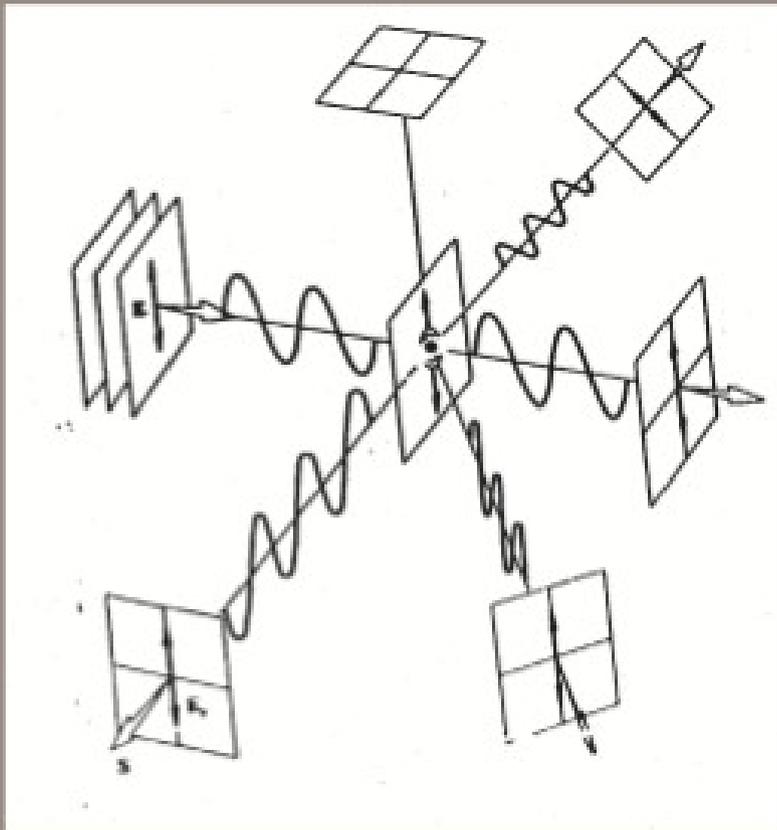
Raggi solari



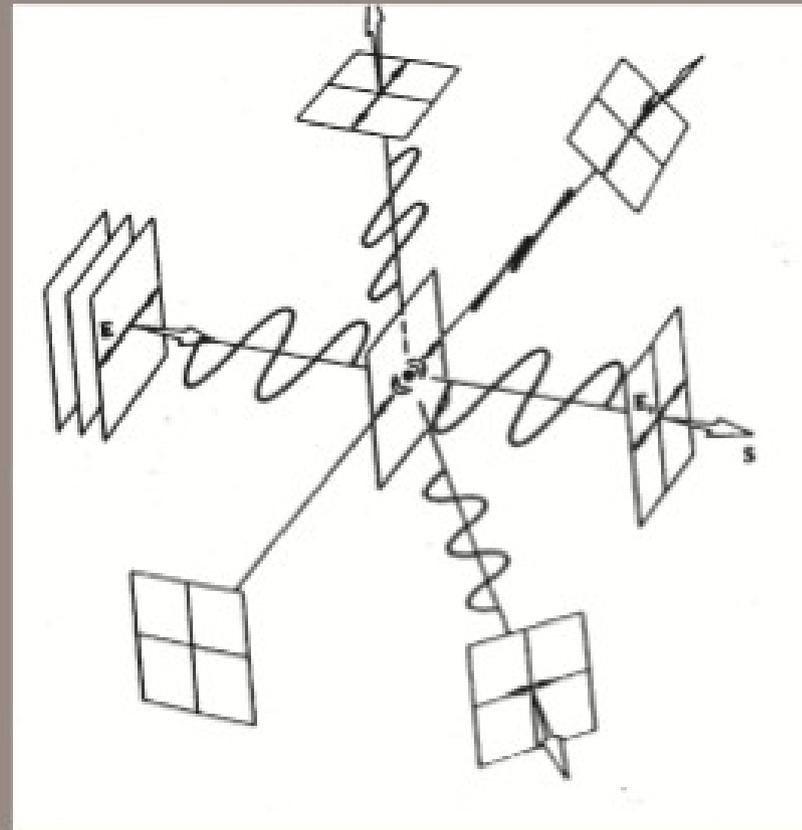
Diffusione di luce polarizzata

Non c'è emissione di luce lungo la direzione delle oscillazioni, cioè lungo il campo elettrico

Luce entrante polarizzata verticalmente

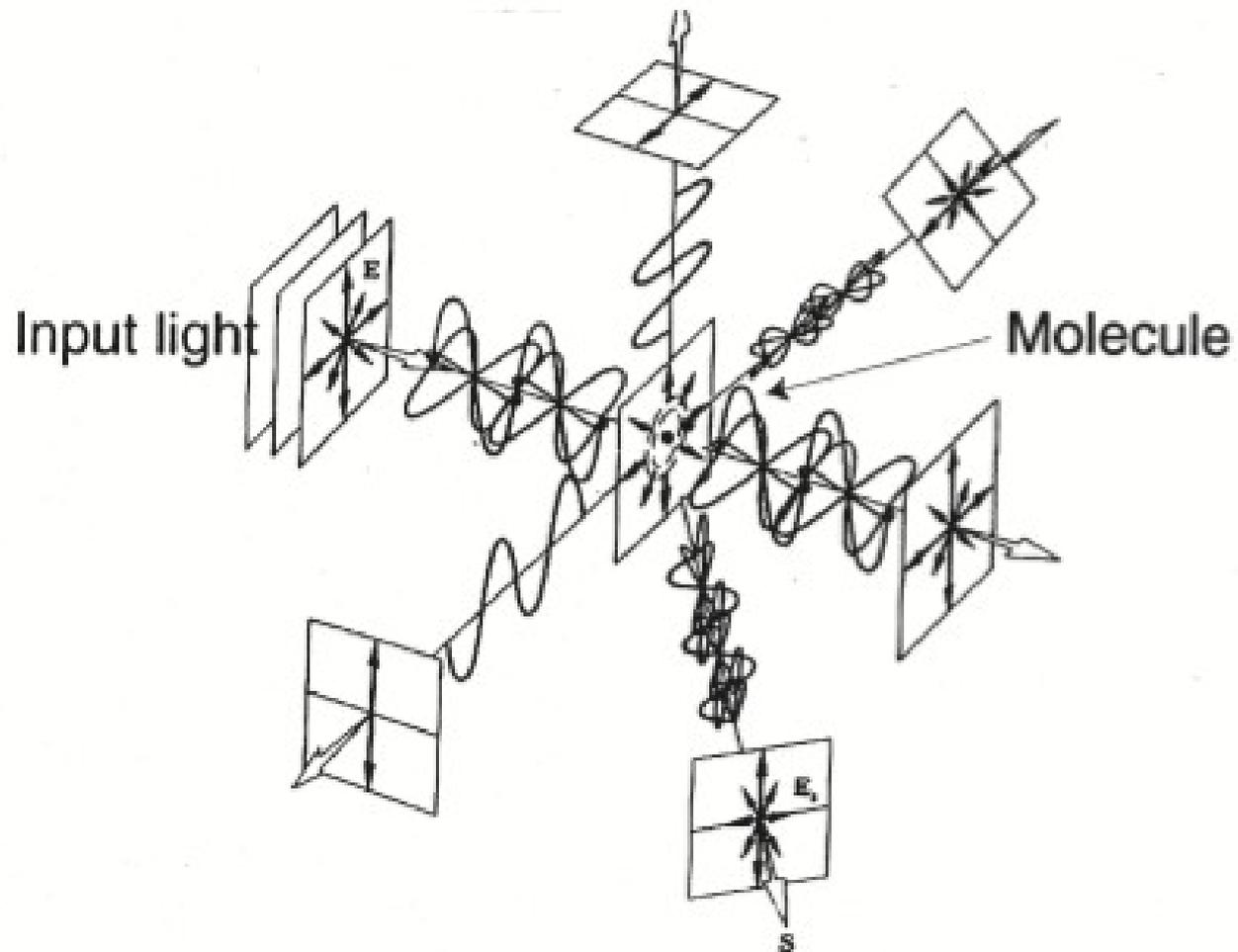


Luce entrante polarizzata orizzontalmente



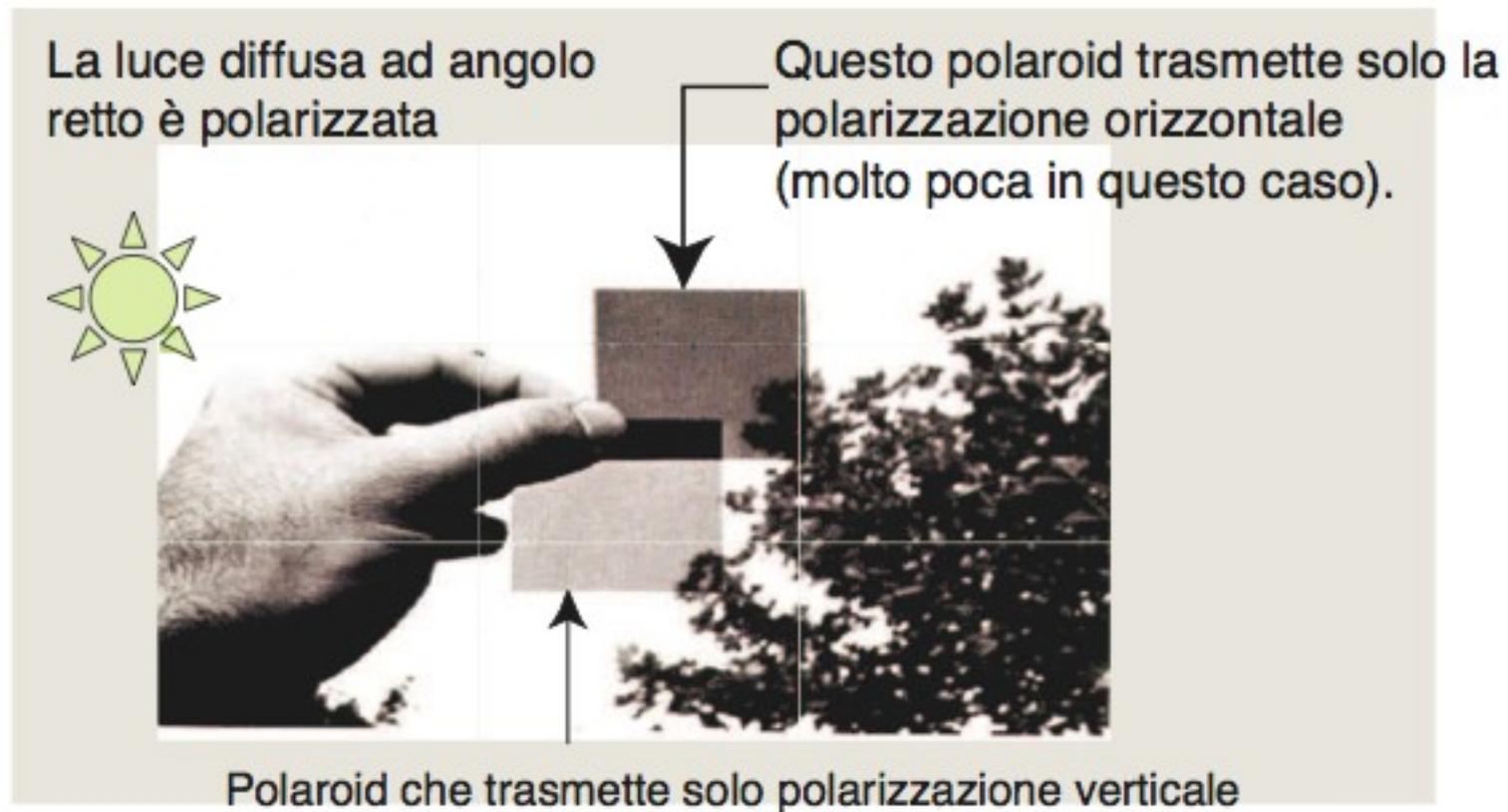
Diffusione di luce non polarizzata

Anche in questo caso la luce è diffusa
perpendicolarmente campo elettrico entrante



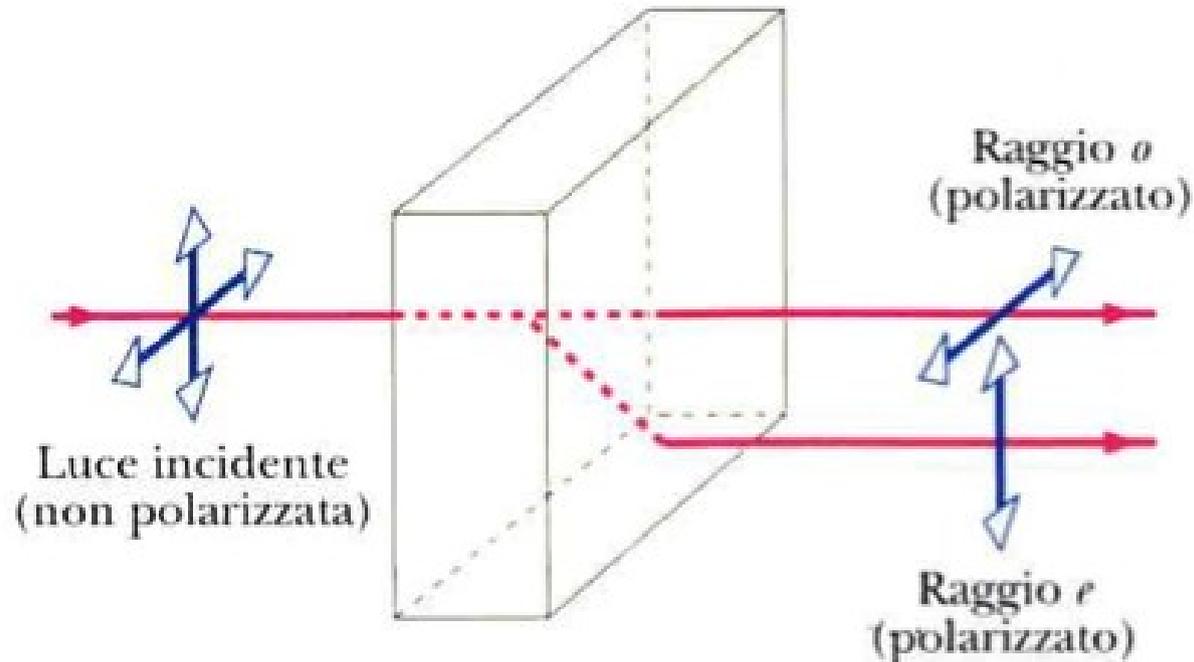
Diffusione di luce non polarizzata

La luce del cielo è polarizzata se avete il sole da un lato e guardate a 90° da esso



Diffusioni multiple producono un po' di luce polarizzata in altri modi
La diffusione multipla avviene nelle nuvole e la luce che diffondono non è polarizzata

La birifrangenza



In un cristallo birifrangente viaggiano due raggi:

- il raggio *ordinario* che segue la legge di Snell ed è sempre polarizzato nella direzione perpendicolare al piano che contiene il raggio incidente e l'*asse ottico*
- il raggio *straordinario* che non segue la legge di Snell, è polarizzato in direzione perpendicolare al raggio ordinario ed ha indice di rifrazione n_s variabile a seconda della direzione; le variazioni di n_s vanno dal valore dell'indice n_o del raggio ordinario a un valore estremo n_e

Birifrangenza

Un corpo capace di alterare lo stato di polarizzazione di un fascio di radiazione (polarizzato o non) che lo attraversi si dice birifrangente. La birifrangenza è la scomposizione di un raggio di luce in due raggi che avviene quando esso attraversa particolari mezzi anisotropi, cioè non simmetrici sfericamente, a seconda della polarizzazione della luce. Il materiale, ad esempio la calcite, a causa della sua struttura cristallina, presenta indici di rifrazione differenti nelle diverse direzioni di propagazione dei raggi luminosi e della direzione di vibrazione del campo elettrico. Ne risulta che i raggi con polarizzazioni ortogonali si separano all'interno del materiale perchè vengono rifratti secondo angoli diversi e, percorrendo cammini ottici distinti, escono dal cristallo ad una certa distanza tra loro formando due immagini separate. E' questa la ragione per cui se si guarda un'immagine attraverso un cristallo di calcite (detto anche spato d'Islanda), si osserva uno sdoppiamento dell'immagine stessa.

Birifrangenza: la Calcite (CaCO_3)



as within any given crystal. The dichroic
the previous section are special
show here that the crystal lattice at
t completely isotropic, the bir
the electric field. We w
we use of the model fr
g the electrical properties.
Fig. 3.14(b) we represent isotropic
ing the simple mechanical of a spheri

Fotoelasticità

Fotoelasticità

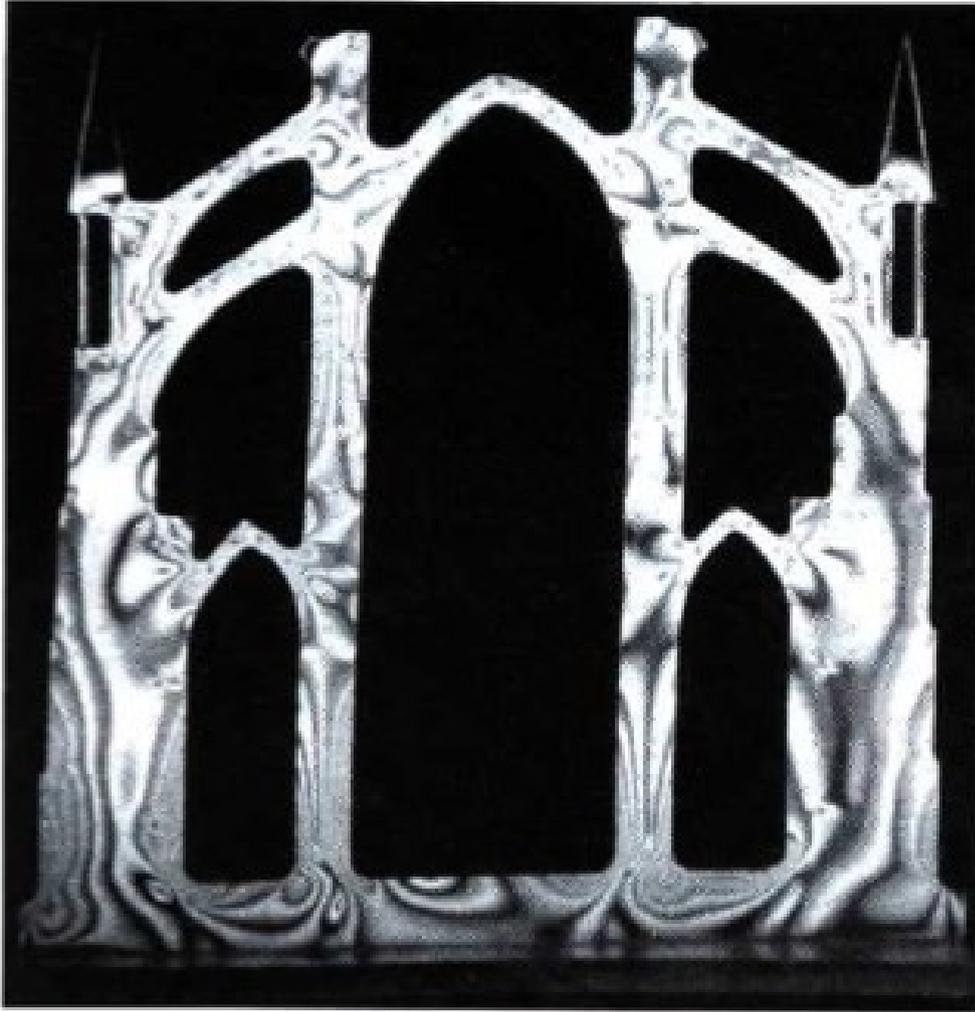
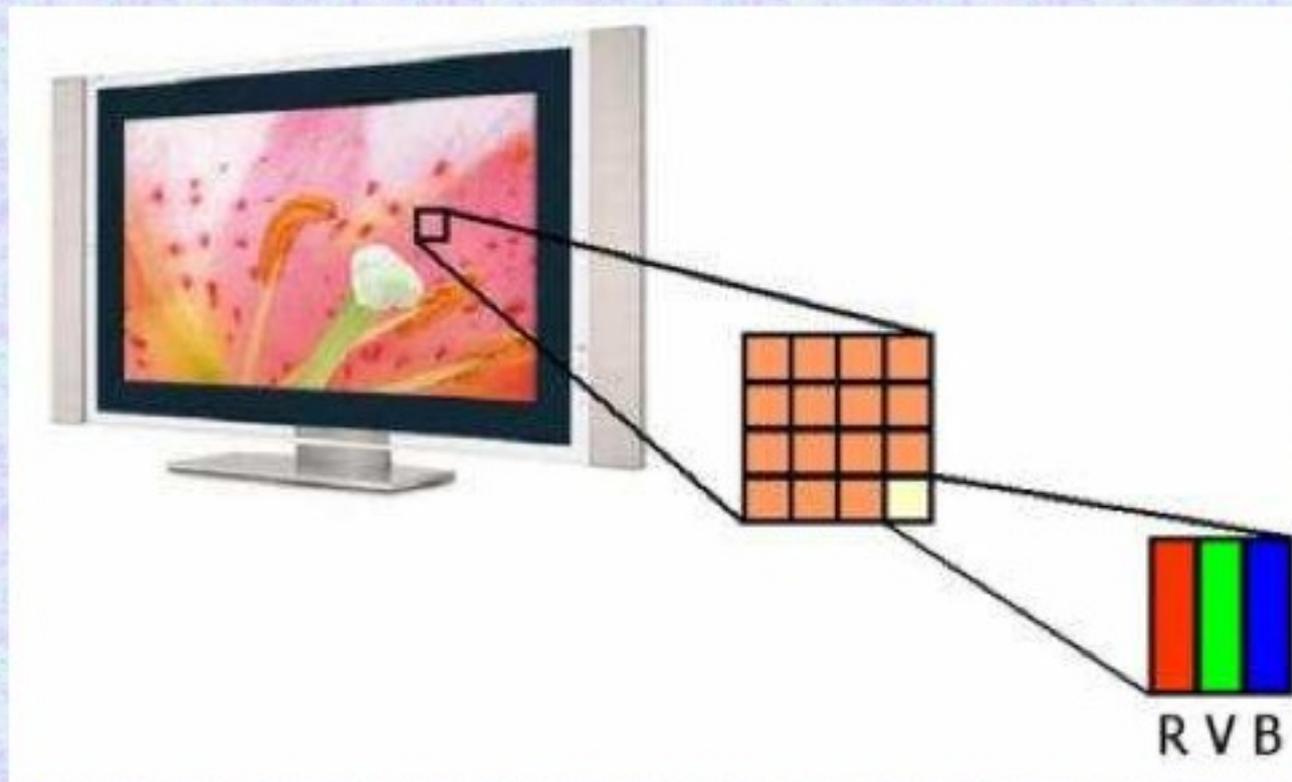


Figura 8 Un pezzo di plastica visto attraverso polarizzatori incrociati. Le figure chiare e scure indicano le regioni della struttura in cui avvengono tensioni interne.

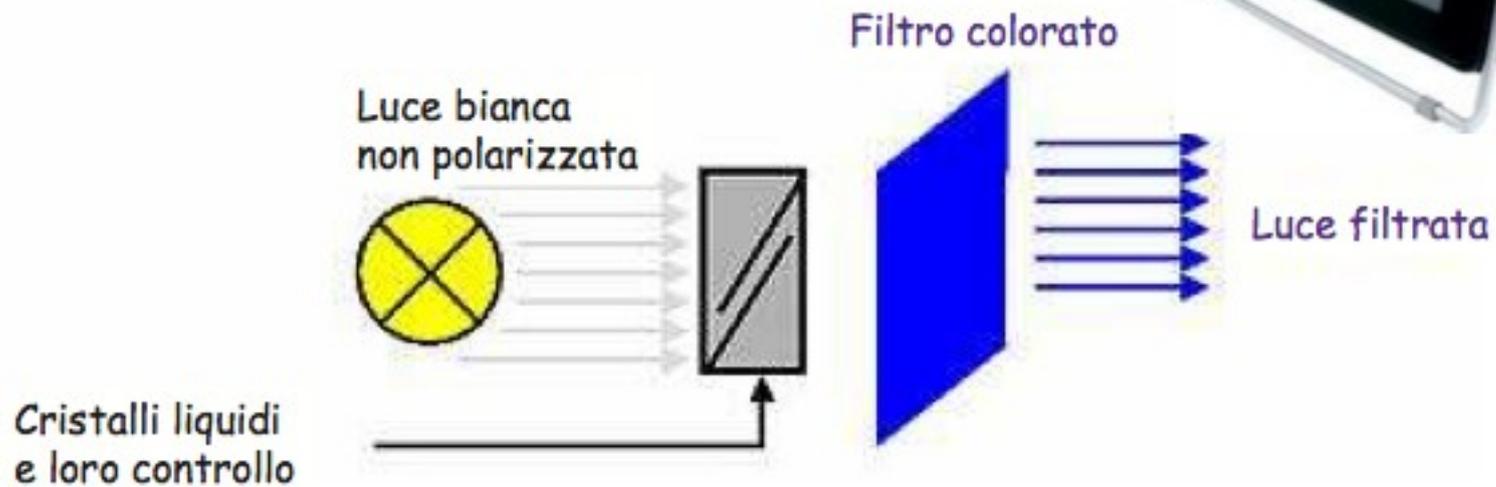
Lo schermo LCD

Lo schermo LCD (Liquid Crystal Display)

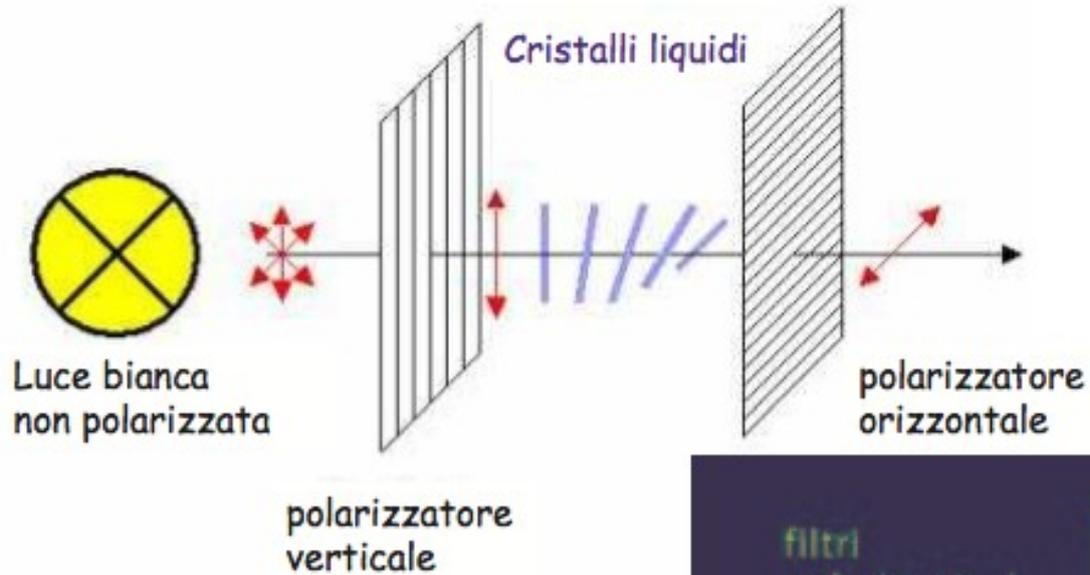


Schermo LCD

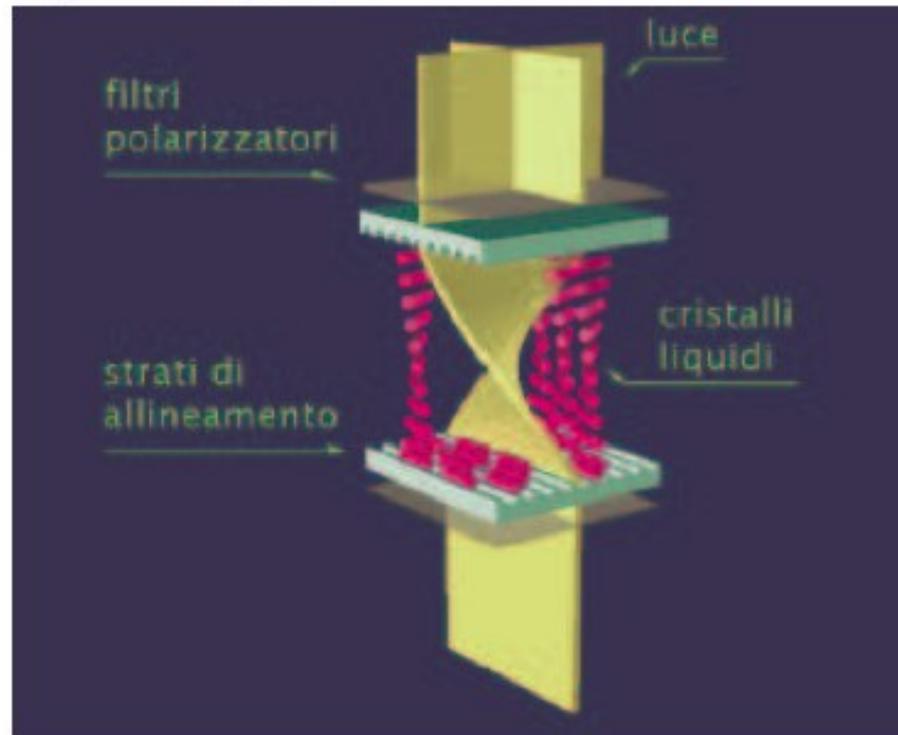
Scoperti nel 1888 (Friedrich Reinitzer, botanico austriaco), sono usati negli LCD dal 1968, e su scala industriale dal 1986



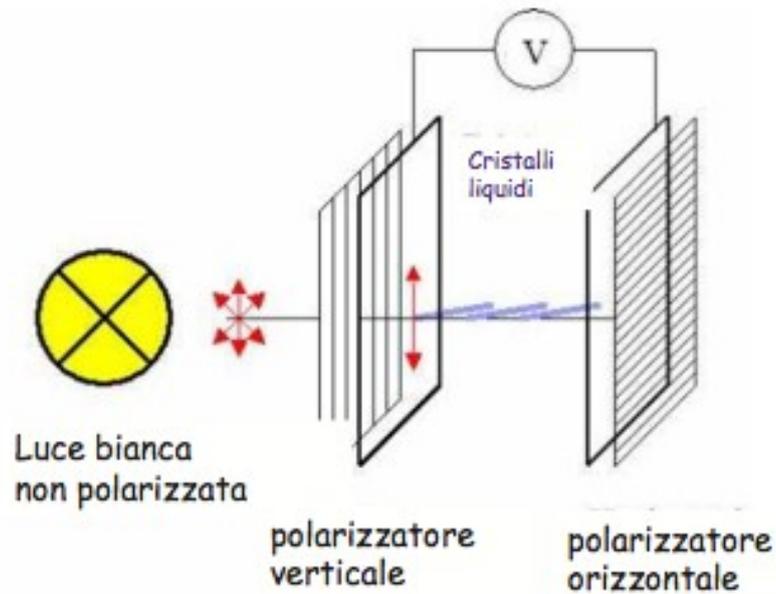
Schermo LCD



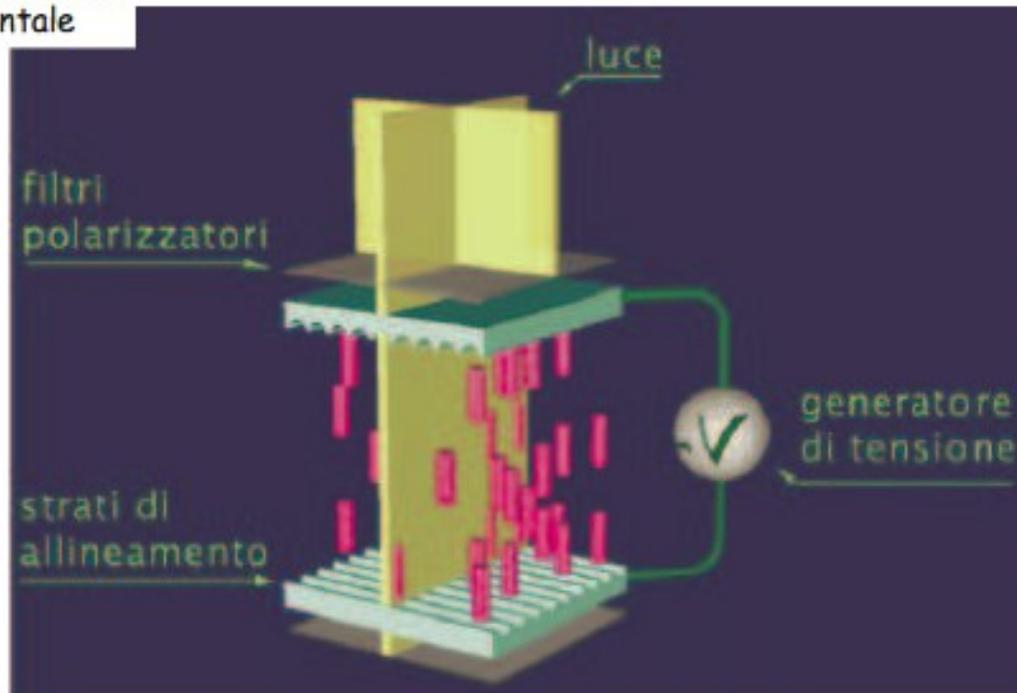
Sono molecole allungate che tendono ad allineare l'asse maggiore con i loro vicini. Possono essere configurate in modo da ruotare il piano di polarizzazione della luce



Schermo LCD

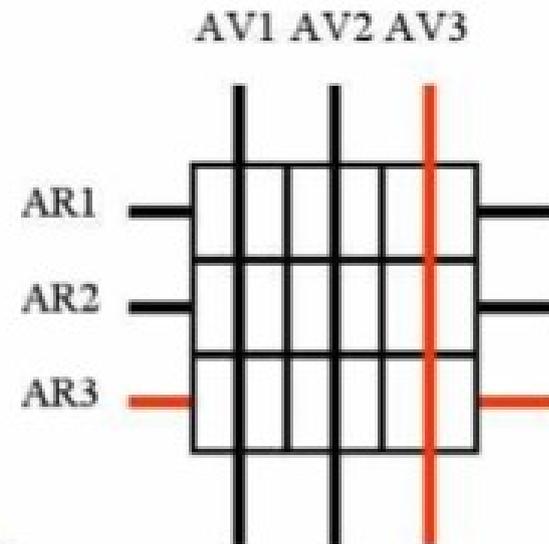
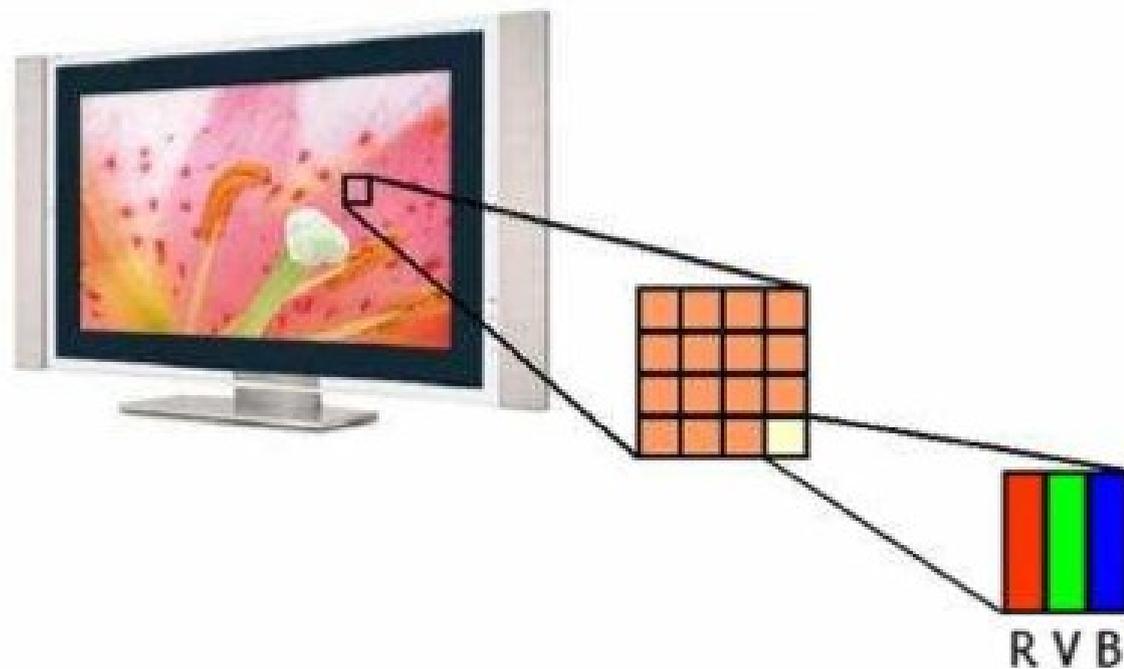


Quando si applica una tensione le molecole si allineano perpendicolarmente ai piani dei polarizzatori e la luce non passa più



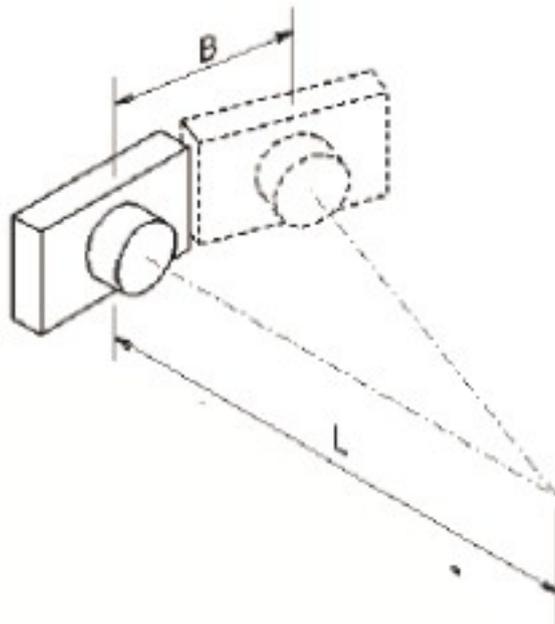
Schermo LCD

Tre per ogni pixel (RVB) e la tensione è applicata da una griglia



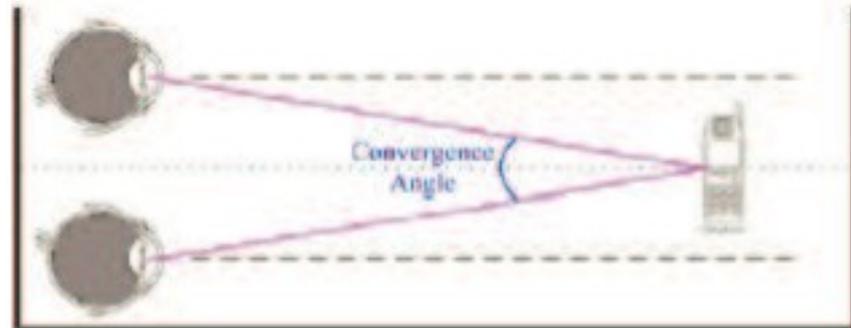
La visione 3D

Il cinema e i videogiochi 3D



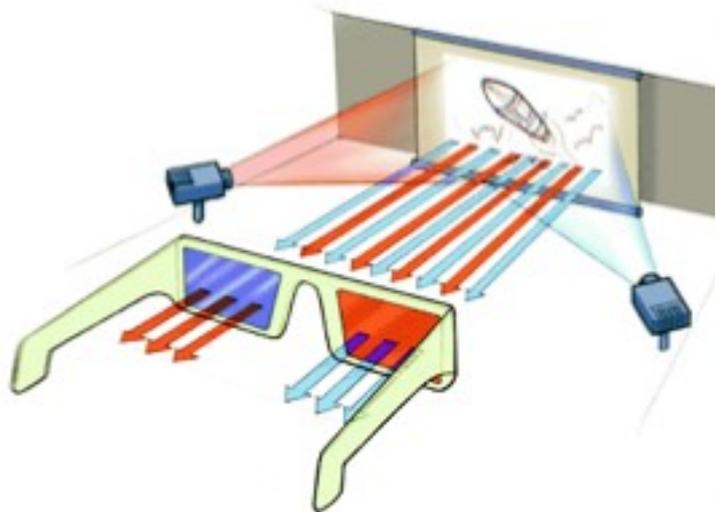
La visione Binoculare:
il cervello valuta la distanza

L'occhio destro vede: ●●
L'occhio sinistro vede: ●●

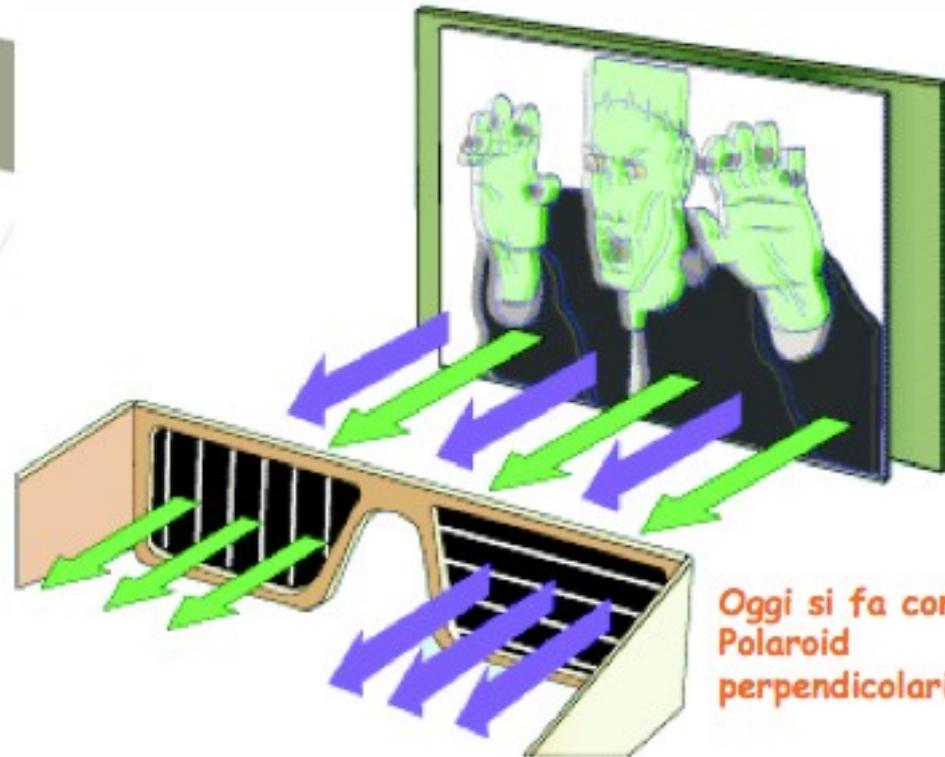


La visione 3D

Le due immagini, riprese da angolature diverse, sono proiettate con polarizzazioni diverse, ed ogni occhio ne vede solo una



Negli anni 80 si faceva con filtri di colore



Oggi si fa con Polaroid perpendicolari

La visione 3D

Utilizzando la polarizzazione circolare, due immagini vengono proiettate sovrapposte sul medesimo schermo circolare attraverso filtri di polarizzazione opposta (R e L). Lo spettatore indossa occhiali economici con una coppia di filtri polarizzatori circolari montati in senso inverso. La luce destinata al filtro polarizzatore circolare sinistro viene bloccata dal filtro polarizzatore circolare destro, e viceversa.

Il risultato è simile a quello prodotto dalla polarizzazione lineare, con la differenza che attraverso la polarizzazione circolare, lo spettatore può inclinare la testa senza problemi di sovrapposizione delle immagini.



La visione 3D

RealD Cinema è un esempio di proiezione che utilizza filtri polarizzatori circolari guidati elettronicamente da un computer, e che per questo motivo non necessita di una coppia di proiettori ma di un singolo proiettore che proietta un filmato a doppia velocità avente i fotogrammi destinati al canale destro e quelli destinati al canale sinistro montati alternativamente gli uni agli altri: in questo modo la discriminante del filtraggio permette a ciascun occhio di vedere lo stesso numero di fotogrammi che si vedrebbero con un normale filmato 2-D, evitando così lo "sfarfallio" dell'immagine.

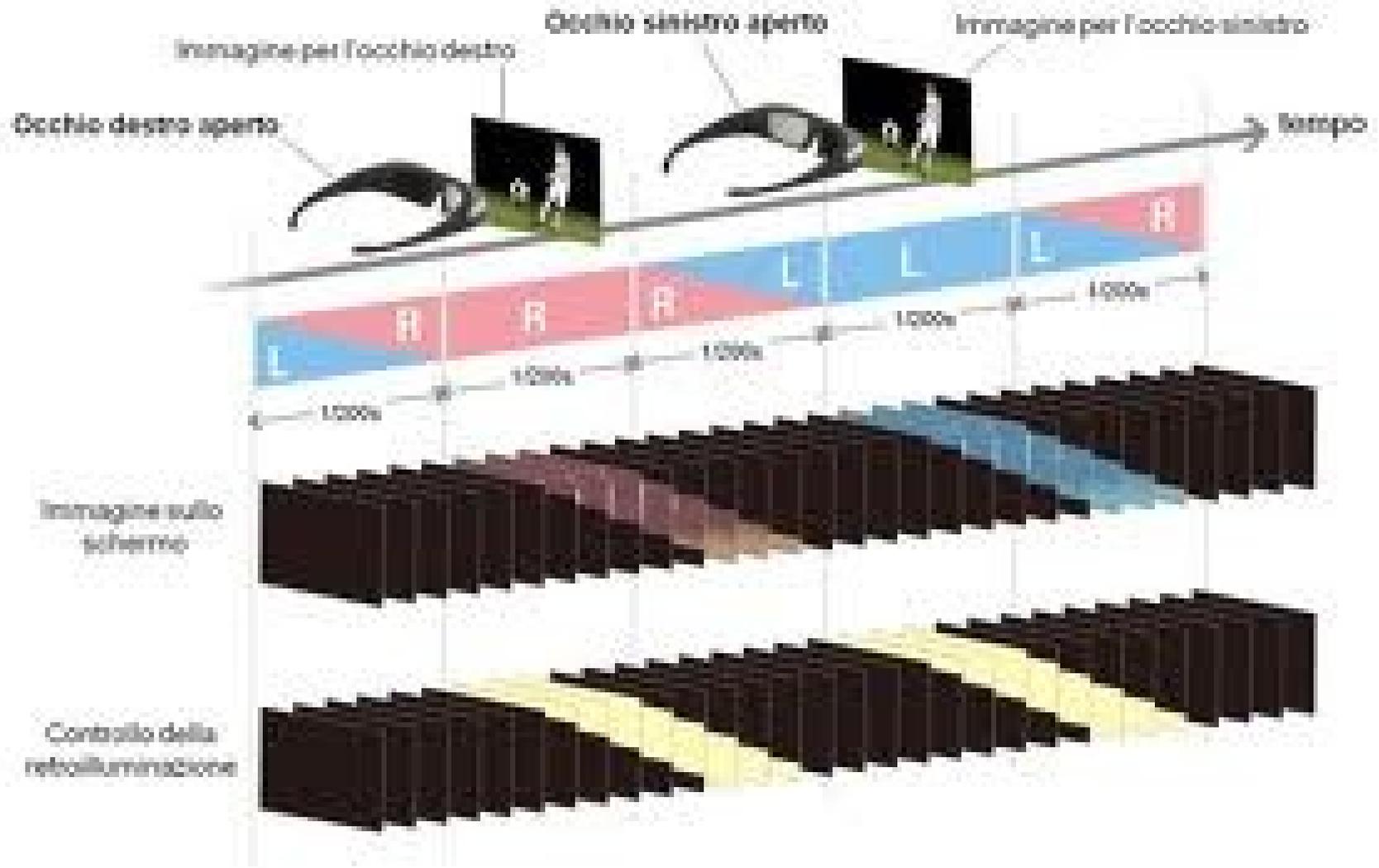
La visione 3D a casa

Per fare in modo di dividere i fotogrammi uno per l'occhio sinistro e uno per l'occhio destro, **vengono utilizzati degli occhiali speciali**; nelle lenti di questi occhiali c'è uno strato di cristalli liquidi che si oscurano quando ricevono un segnale elettrico. Di conseguenza **questi occhiali devono essere sincronizzati con i fotogrammi sullo schermo in modo tale che gli occhiali oscurano uno o l'altra lente in base all'immagine sullo schermo**. Quando, durante la riproduzione di un video in 3d, ci sarà l'immagine per l'occhio sinistro verrà inviato un segnale che oscurerà l'occhio destro e viceversa.

I tv 3d rispetto agli altri televisori hanno la particolare caratteristica di avere una frequenza d'ingresso di almeno 120 hz. Dobbiamo pensare, infatti, che durante la visione 3d i fotogrammi verranno dimezzati (uno per occhio).

Le televisioni attuali hanno una frequenza intorno ai 50 hz, 60 hz questo permette una visione fluida dell'immagine, se questa frequenza venisse dimezzata, avremo un'immagine piuttosto tremolante.

La visione 3D a casa



L'angolo di Brewster

Onda riflessa e rifratta soddisfano la legge di Snell:

$$\frac{\sin(\theta_{\text{incidente}})}{\sin(\theta_{\text{trasmesso}})} = n$$

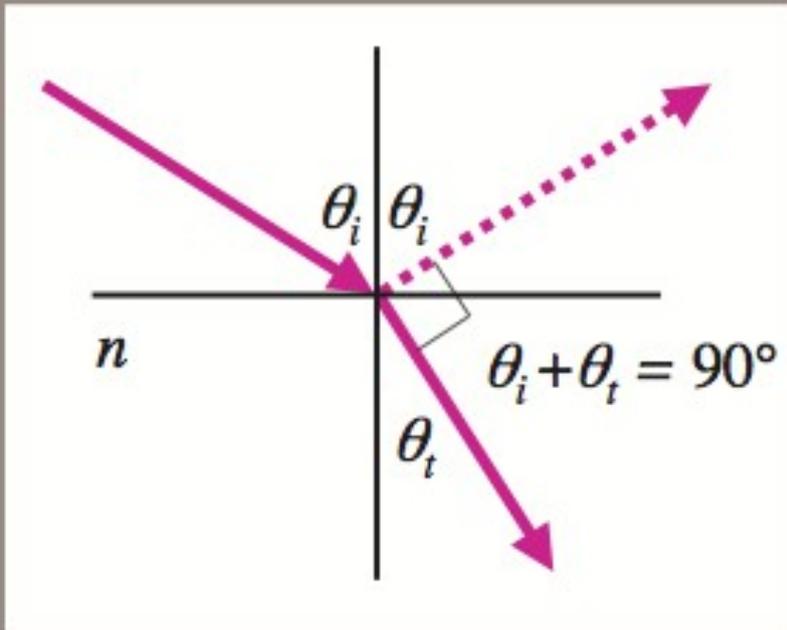
Essendo però $\theta_i + \theta_t = 90^\circ$:

$$\begin{aligned} \frac{\sin(\theta_{\text{incidente}})}{\sin(\theta_{\text{trasmesso}})} &= \frac{\sin \theta_i}{\sin(90^\circ - \theta_i)} = \\ &= \frac{\sin \theta_i}{\cos \theta_i} = \tan \theta_i \end{aligned}$$

$$\tan \theta_i = n$$

$$\theta_{\text{acqua}} \approx 53^\circ$$

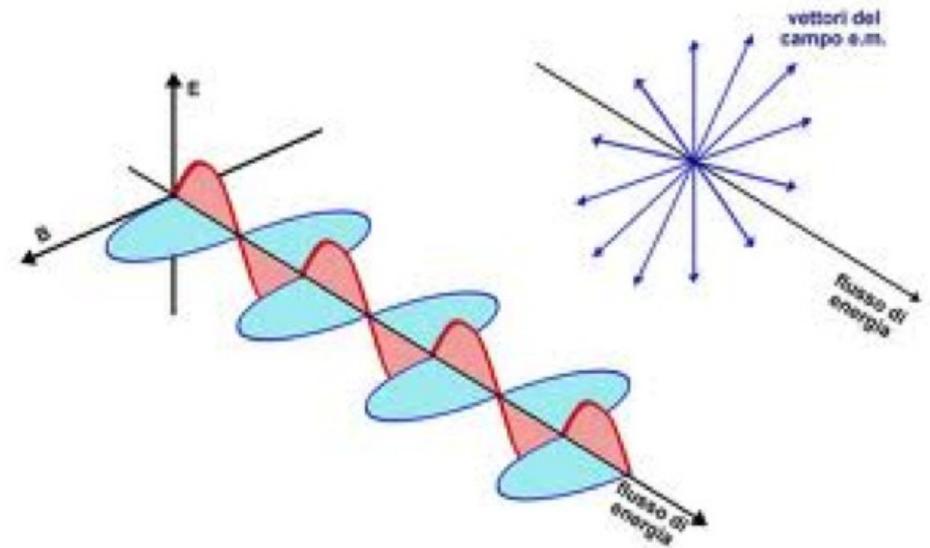
$$\theta_{\text{vetro}} \approx 56^\circ$$



Esperienza VI – Polarizzazione

Sommario:

1. Esperimenti proposti
 - 1.1 Verifica della legge di Malu
2. Analisi dei risultati



Tutti i fenomeni ondulatori sono caratterizzati da un'oscillazione o da una vibrazione del mezzo in cui viaggiano, ma l'onda elettromagnetica non necessita di un mezzo in cui propagarsi, che cos'è allora che oscilla in questo caso? La luce è una vibrazione del campo elettromagnetico, e le quantità che oscillano nella propagazione della luce sono proprio i campi elettrico e magnetico che compongono l'onda. La direzione di oscillazione è identificata dal campo elettrico e viene detta polarizzazione.

Esperienza VI – Polarizzazione

Per l'implementazione degli esperimenti proposti sulla polarizzazione sono necessari i seguenti elementi:

- lampade a bassa tensione
- diodo laser
- fotometro
- fotodiodo
- multimetro
- polaroid

Esperienza VI – Polarizzazione

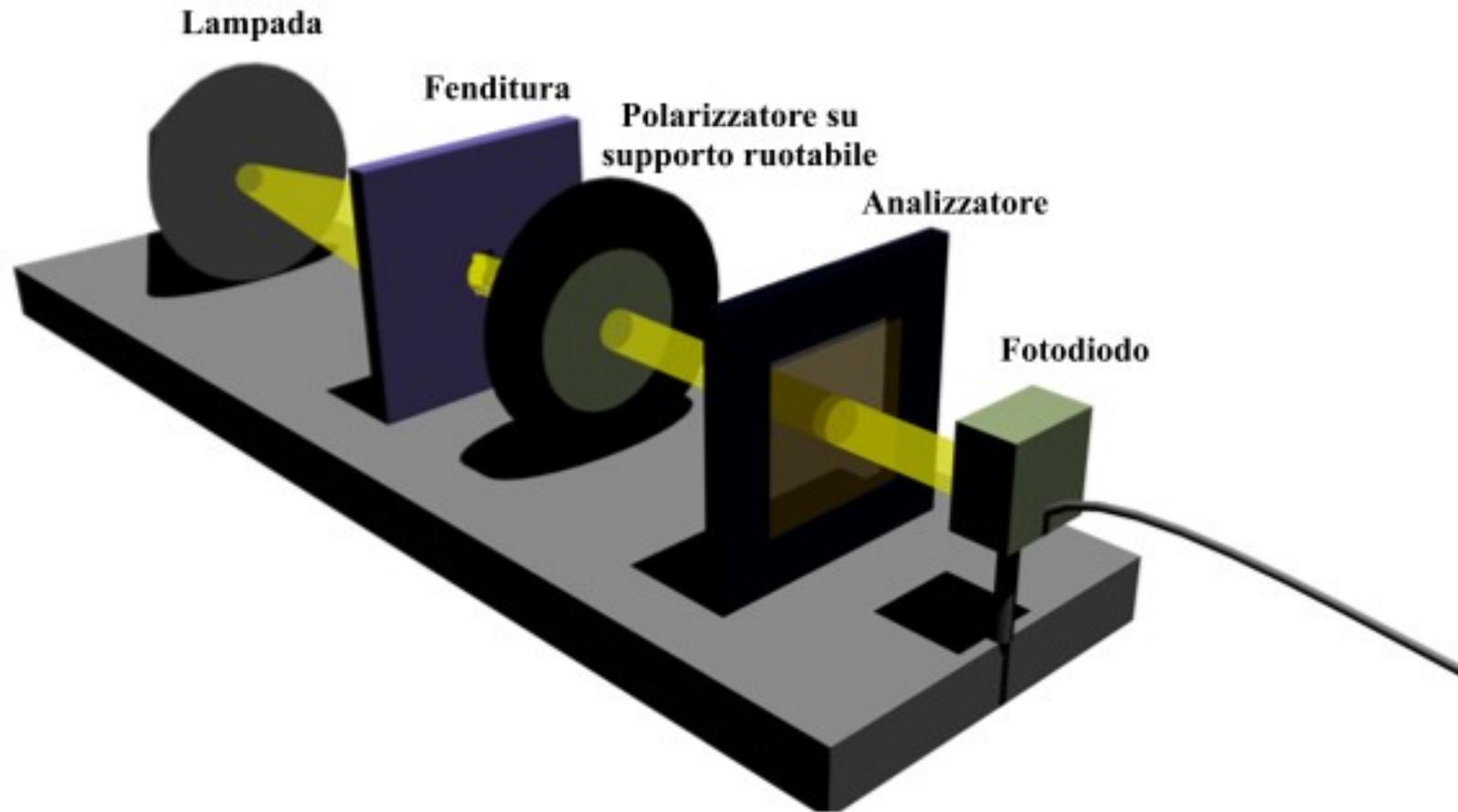


Figure 11: Setup sperimentale per la verifica della legge di Malus.

Esperienza VI – Polarizzazione

Le seguenti esperienze richiedono l'utilizzo di kit ottici PASCO e Leybold.

1. Verifica qualitativa della Legge di Malus.

I seguenti elementi ottici vengano disposti in serie sul banco ottico nell'ordine riportato sotto:

- Lampada alogena da 10 W alimentata a 12 V della serie Pasco 526-035.
- Due filtri polarizzatori su supporto goniometrico
- Fotometro a comparazione con disco adattabile portante una serie di filtri neutri che forniscono il 25%, 50%, 75%, 100% di trasmittanza.
- Lampada di luce bianca (pu' o essere prelevata dal kit Leybold).

2. Verifica quantitativa della Legge di Malus.

I seguenti elementi ottici vengano disposti in serie sul banco ottico nell'ordine riportato sotto:

- Lampada alogena da 10 W alimentata a 12 V della serie Pasco 526-035.
- Due filtri polarizzatori su supporto goniometrico
- Fotodiode connesso a multimetro

Esperienza VI – La polarizzazione

1. Verifica qualitativa della Legge di Malus:

- Disporre le due lampade agli estremi del binario PASCO su cui sono allineati i due polarizzatori disposti su un supporto goniometrico e il fotometro.
- Con i polarizzatori disposti in modo che passi il massimo dell'intensità calibrare la tensione della lampada Leybold in modo che il fotometro riporti la stessa intensità luminosa proveniente dalle due lampade.
- Disporre in corrispondenza di un ingresso del fotometro il disco di supporto dei filtri attenuatori, all'altro ingresso del fotometro vi sarà il fascio luminoso proveniente dalla lampada PASCO dopo l'attraversamento dei due polarizzatori.
- Per ciascuno dei quattro filtri attenuatori trovare il corrispondente angolo del polarizzatore di analisi che restituisce la stessa intensità ai due lati del fotometro.

Esperienza VI – La polarizzazione

2. Verifica quantitativa della legge di Malus:

- Disporre il setup come in figura 11.
- Ruotare la lamina di polarizzazione e disporla a 0°
- Ruotare il polarizzatore di analisi di 5° in 5° partendo dalla posizione corrispondente a 0° .
- Per ogni posizione della lamina di analisi registrare il corrispondente valore del voltaggio riportato dal multimetro collegato al fotodiodo.