



Associazione per  
l'Insegnamento  
della Fisica

# SUMMER SCHOOL QUANTUM TECHNOLOGIES

TERZA EDIZIONE

PER STUDENTI DEL QUINTO ANNO DI SCUOLA SUPERIORE

Università degli studi di Pavia,  
Dipartimento di Fisica

MALGIERI MASSIMILIANO  
ZUCCARINI GIACOMO  
SUTRINI CLAUDIO  
BONDANI MARIA  
MACCHIAVELLO CHIARA

2-6 SETTEMBRE 2024

La manipolazione di singoli **sistemi quantistici** e le nascenti **tecnologie** richiedono lo studio della meccanica quantistica non più solo a fisici ma anche a matematici, informatici, ingegneri, chimici e biologi. La scuola si basa su un **approccio integrato e multidisciplinare** che conduca gli studenti a comprendere la dialettica tra fisica, matematica, logica, probabilità e informatica, orientandoli verso un nuovo modo di pensare il mondo.

## Esperimenti didattici per l'introduzione alla MQ nella scuola secondaria.

*Claudio Sutrini, Massimiliano Malgieri  
Università di Pavia.*

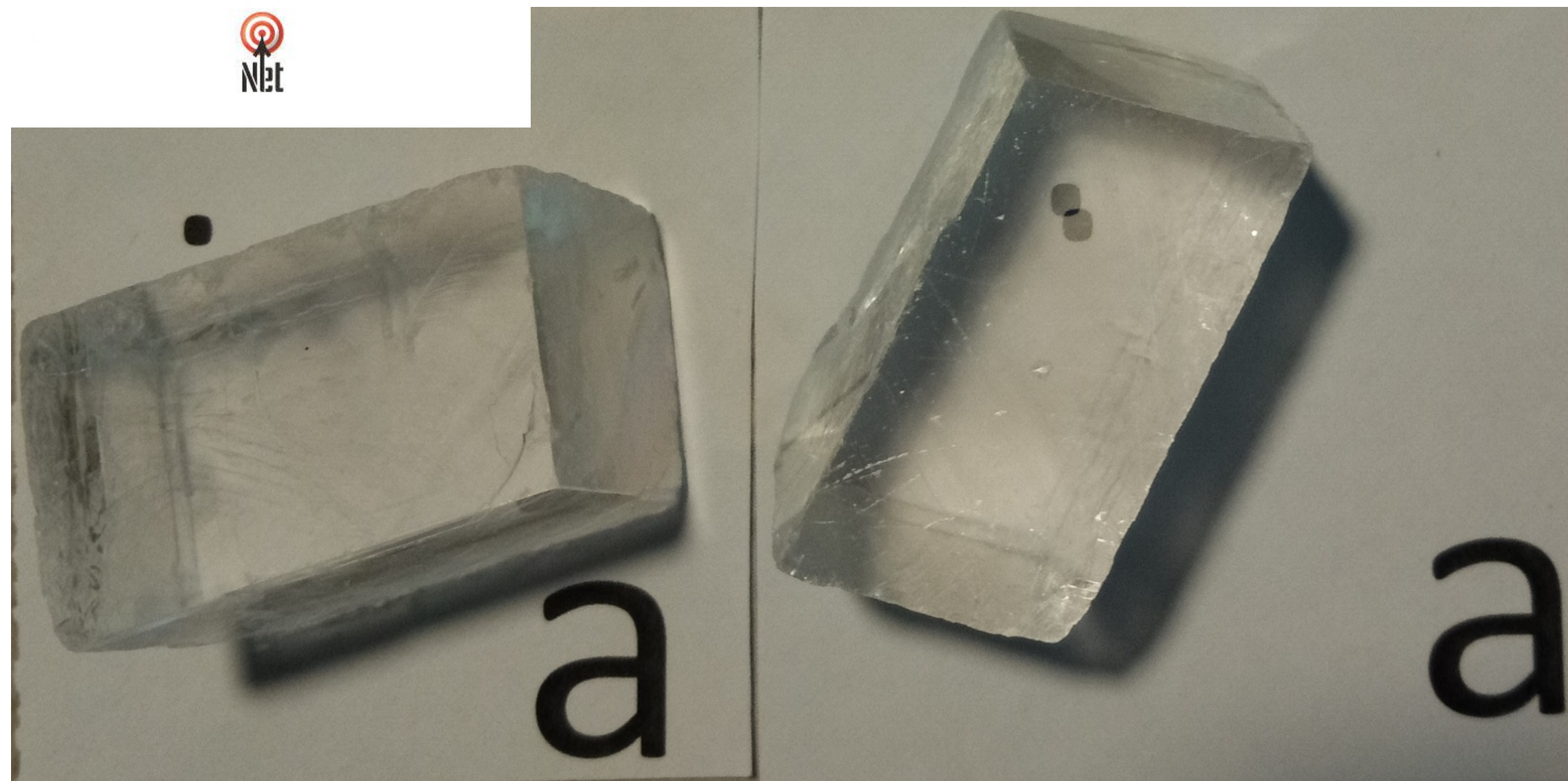


UNIVERSITÀ  
DI PAVIA

# Approccio a due stati: Polarizzatori e Cristalli birifrangenti



**Classico  $\implies$  Quantistico**



# Approccio a due stati: Polarizzatori e Cristalli birifrangenti

Unità 1: Introduzione alla misurazione quantistica e alle osservabili (filtri e cristalli)

Unità 2: lo stato quantistico e la sua rappresentazione formale

Unità 3: la sovrapposizione quantistica

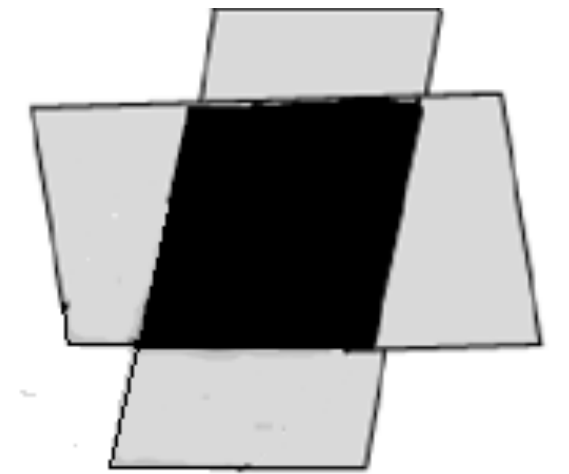
Unità 4: la propagazione (cristalli)

Ora	Lunedì	Martedì	Mercoledì	Giovedì	Venerdì
09:30	Presentazione e introduzione	Introduzione MQ	Codifica in cammini e porte logiche	Esercizi	Estensione algoritmo di Deutsch
09:45					Introduzione MQ
10:00	Introduzione MQ	Introduzione MQ	Seminario Prof. Maurizio Dabbicco	Algoritmo di Deutsch	
10:15					Introduzione MQ
10:30	Introduzione MQ	Introduzione al calcolo quantistico	Seminario Prof. Maurizio Dabbicco	Algoritmo di Deutsch	
10:45					Introduzione MQ
11:00	PAUSA	PAUSA	PAUSA	PAUSA	
11:15	PAUSA	PAUSA	PAUSA	PAUSA	PAUSA
11:30	PAUSA	PAUSA	PAUSA	PAUSA	PAUSA
11:45	Introduzione MQ	Introduzione al calcolo quantistico	Seminario Prof. Maurizio Dabbicco	Algoritmo di Deutsch	Algoritmo di Grover
12:00	Introduzione MQ	Introduzione al calcolo quantistico	Seminario Prof. Maurizio Dabbicco	Algoritmo di Deutsch	Algoritmo di Grover
12:15	Introduzione MQ	Introduzione al calcolo quantistico	Seminario Prof. Maurizio Dabbicco	Algoritmo di Deutsch	Algoritmo di Grover
12:30	Introduzione MQ	Introduzione al calcolo quantistico	Seminario Prof. Maurizio Dabbicco	Algoritmo di Deutsch	Algoritmo di Grover
12:45	Introduzione MQ	Introduzione al calcolo quantistico	Seminario Prof. Maurizio Dabbicco	Algoritmo di Deutsch	Algoritmo di Grover
13:00	PAUSA PRANZO	PAUSA PRANZO	PAUSA PRANZO	PAUSA PRANZO	PAUSA PRANZO
14:00	Introduzione MQ	Seminario Dott. Scala	Calcolo a più qubit	Laboratorio di ottica per la computazione Prof.ssa Maria Bondani	Seminario Dott. Chesi "Quantum Cryptography"
14:15					
14:30	Introduzione MQ	Seminario Dott. Scala	Calcolo a più qubit	Laboratorio di ottica per la computazione Prof.ssa Maria Bondani	Seminario Dott. Chesi "Quantum Cryptography"
14:45					
15:00	Introduzione MQ	Seminario Dott. Scala	Calcolo a più qubit	Laboratorio di ottica per la computazione Prof.ssa Maria Bondani	Seminario Dott. Chesi "Quantum Cryptography"
15:15					
15:30	PAUSA	PAUSA	PAUSA	PAUSA	PAUSA
15:45	Introduzione alla logica classica	Porte logiche codificate in polarizzazione	Esercizi	Laboratorio di ottica per la computazione: algoritmo di Deutsch Prof.ssa Bondani	Verifica finale
16:00					
16:15	Introduzione alla logica classica	Porte logiche codificate in polarizzazione	Esercizi	Laboratorio di ottica per la computazione: algoritmo di Deutsch Prof.ssa Bondani	Verifica finale
16:15					
16:30	Introduzione alla logica classica	Porte logiche codificate in polarizzazione	Esercizi	Laboratorio di ottica per la computazione: algoritmo di Deutsch Prof.ssa Bondani	Verifica finale
16:45					
17:00	Conclusione	Conclusione	Conclusione	Conclusione	Conclusione
17:30	Conclusione	Conclusione	Conclusione	Conclusione	Conclusione

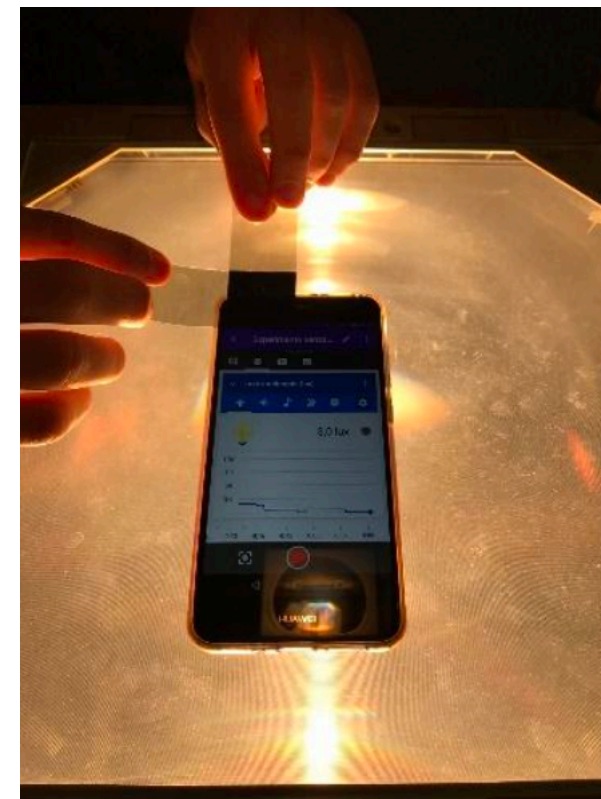
Ora	Lunedì	Martedì	Mercoledì	Giovedì	Venerdì	
09:30	Presentazione e introduzione	Introduzione MQ	Codifica in cammini e porte logiche	Esercizi	Estensione algoritmo di Deutsch	
09:45					Crittografia classica	
10:00						
10:15						
10:30						
10:45	PAUSA					
11:00	PAUSA					PAUSA
11:15						
11:30	PAUSA					PAUSA
11:45	Introduzione MQ					Introduzione al calcolo quantistico
12:00						
12:15						
12:30						
12:45						
13:00	PAUSA PRANZO	PAUSA PRANZO	PAUSA PRANZO	PAUSA PRANZO	PAUSA PRANZO	
14:00	Introduzione MQ	Seminario Dott. Scala	Calcolo a più qubit	Laboratorio di ottica per la computazione Prof.ssa Maria Bondani	Seminario Dott. Chesi "Quantum Cryptography"	
14:15						
14:30						
14:45						
15:00		PAUSA				
15:15	PAUSA	PAUSA	PAUSA	PAUSA		
15:30	Introduzione alla logica classica	Porte logiche codificate in polarizzazione	Esercizi	Laboratorio di ottica per la computazione: algoritmo di Deutsch Prof.ssa Bondani	Verifica finale	
15:45						
16:00						
16:15						
16:15						
16:30	Conclusione	Conclusione	Conclusione	Conclusione		
16:45						
17:00	Conclusione			Conclusione		
17:30						

# Descrizione della prima parte

1: Introduzione alla polarizzazione lineare della luce con filtri polaroid



2: Legge di Malus con smartphone



3: Introduzione del modello della luce a singolo fotone e interpretazione probabilistica della legge di Malus

# ESPLORAZIONE EMPIRICA INTERAZIONE TRA LUCE E FILTRI



OSSERVAZIONE: **In che modi cambia la luce nel passaggio attraverso il filtro?** [diventato più scuro]

INTERPRETAZIONE: **come lo esprimereste in termini scientifici, mediante grandezze fisiche?** [l'intensità luminosa è ridotta].

ANALISI: **Che grandezza è l'intensità della luce?** [quanta energia passa attraverso una superficie unitaria in un secondo]

PREVISIONE: **vi aspettate che la luce uscente cambi se lo ruoto?** [No, perché dovrebbe?]  
Ruoto il filtro. **Infatti**

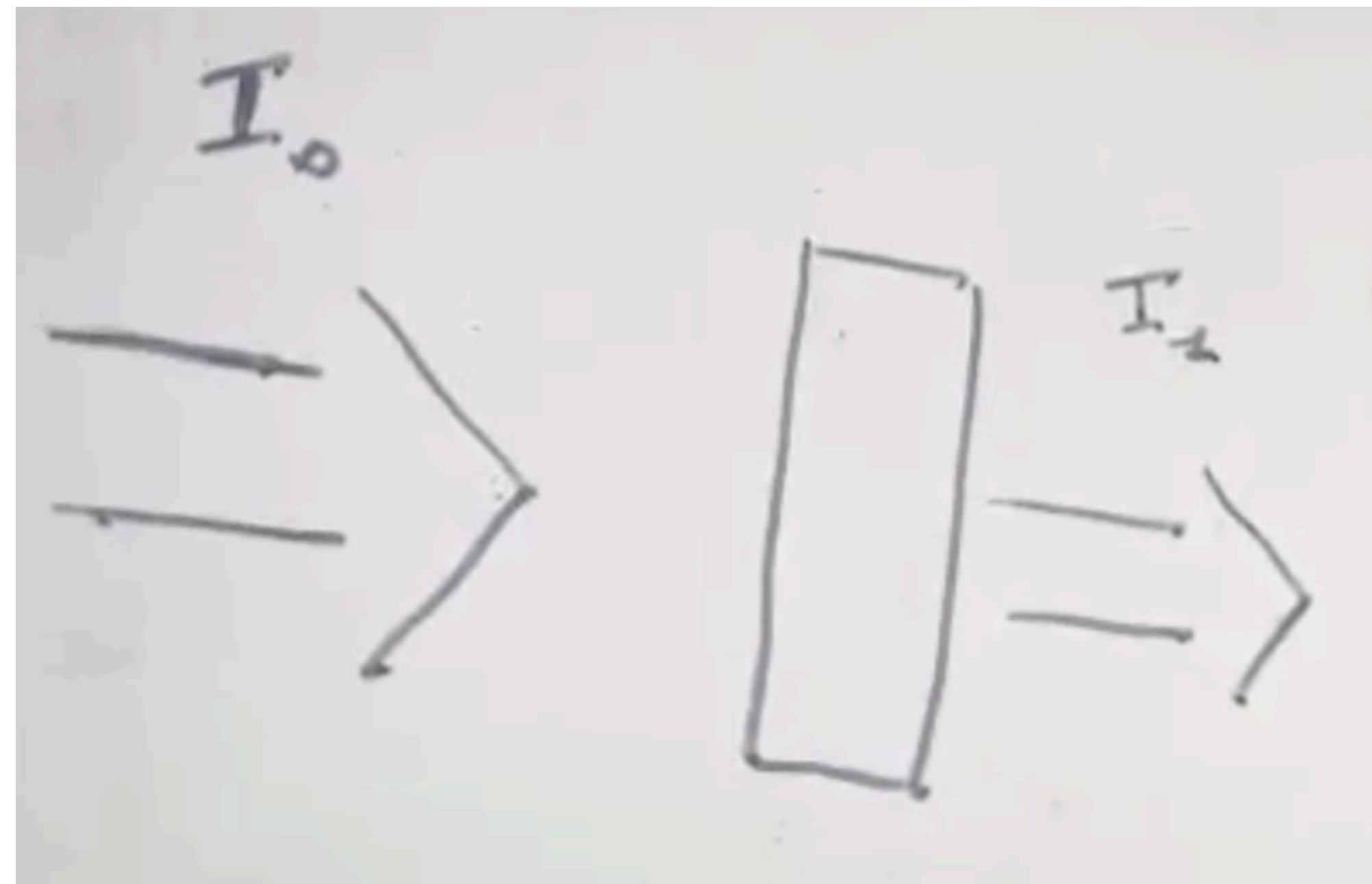
**Abbiamo altri filtri identici al primo, li abbiamo tagliati dallo stesso materiale.**

PREVISIONE: **se ne aggiungo un altro, cosa vi aspettate che succeda alla luce uscente?** [Più scuro, meno luce]

PREVISIONE: **che vi aspettate accada alla luce se aggiungo altri filtri** [sempre meno intensa].  
**E se ne metto infiniti?** [buio]

# ESPLORAZIONE EMPIRICA INTERAZIONE TRA LUCE E FILTRI

ANALISI: Disegnare sulla lavagna fascio entrante (largo), 1 filtro, fascio uscente (stretto).  
**Come posso esprimere l'effetto del filtro sulla luce?** [cioè l'attenuazione. Rapporto tra intensità pari ad un valore]



Se qualcuno dice “differenza”, chiedere: **quindi il filtro toglie un valore definito  $D = I_{in} - I_{out}$  alla luce.** [siete tutti d'accordo? Fare discutere]. **E se  $I_{in} < D$ ?**

[Resta la frazione  $I_1 = T * I_0$ ]

ANALISI: stabilita la legge per 1 filtro. **E l'attenuazione dopo n filtri?** [ $I_n = T^n * I_0$ ]

# ESPLORAZIONE EMPIRICA INTERAZIONE TRA LUCE E FILTRI

## 2. Filtri polaroid – il fenomeno, preparazione, analisi

Porre sulla lavagna 1 filtro polaroid senza specificarlo: **prendiamo altri filtri.**

OSSERVAZIONE: ora com'è la luce? [attenuata, frequenze non tagliate]

PREVISIONE: sovrapporre un altro filtro con direzione permessa parallela. **Vi aspettate che la luce cambi se lo ruoto?**

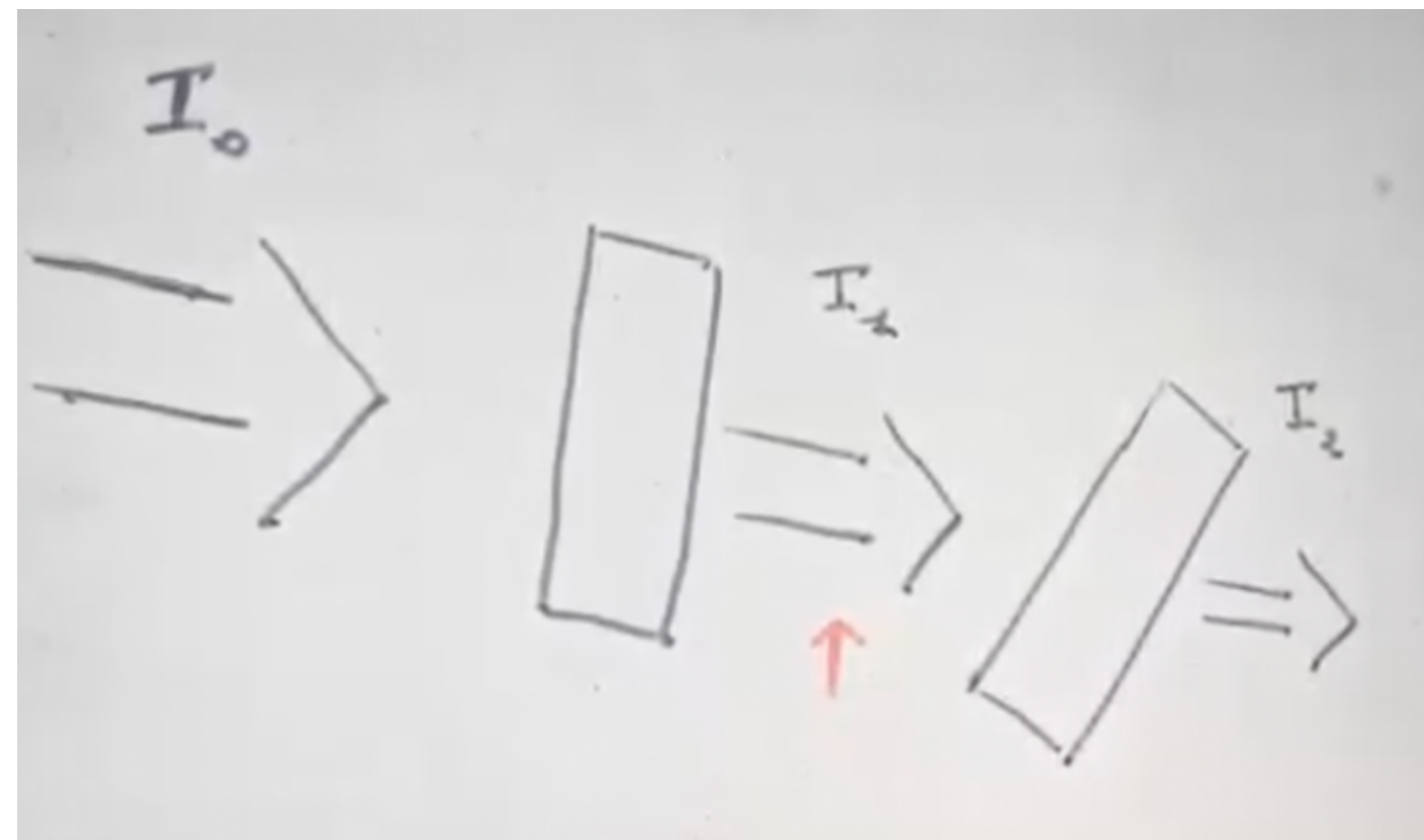
OSSERVAZIONE: ruotare. **Che caratteristiche ha la variazione di intensità?**

[va da un max ad un minimo, è una variazione periodica con periodo di  $180^\circ$ ].

INTERPRETAZIONE: **Se vogliamo esaminare questa strana attenuazione, quali fasci bisogna prendere in esame? Quali sono i fasci entrante e uscente? Il fenomeno riguarda il fascio nella regione tra la lavagna e primo filtro o quello tra il primo e secondo?**

[quello tra il primo e il secondo]

ANALISI: disegnare su lavagna fascio entrante ( $I_0$ ) uscente dal 1° filtro ( $I_1$ ), dal 2° filtro ( $I_2$ ).





# ESPLORAZIONE EMPIRICA INTERAZIONE TRA LUCE E FILTRI

PREVISIONE: e se tolgo il primo filtro e ruoto il secondo, cosa vi aspettate di vedere?

[nessuna variazione]

INTERPRETAZIONE: Anche il primo conta? Cosa fa alla luce che lo attraversa?

[la riduce di intensità, ma le conferisce una proprietà. Gestisci dibattito]

COMMENTO DOCENTE: la luce che esce dal primo filtro è diversa da quella entrante. Ma per esaminarla ne serve un altro. E' una proprietà rivelata dalla variazione d'intensità ma che non coincide con essa.

DEF: il primo filtro è detto *preparatore*, il secondo *analizzatore*.

INTERPRETAZIONE: Esaminiamo le caratteristiche di questa proprietà. Fisso il secondo filtro e ruoto il primo. L'attenuazione del secondo filtro cambia. Che informazione mi dà sul fascio 1 mentre ruoto? [cambia la proprietà conferita dal primo. Lo vedo dalla variazione d'intensità oltre il secondo]

INTERPRETAZIONE: La proprietà del fascio 1 dipende da come è orientato il secondo filtro? Come fa la luce tra i due a sapere che ci sarà un altro filtro e come sarà orientato?

[Non può, la proprietà del fascio 1 dipende solo dal primo filtro]

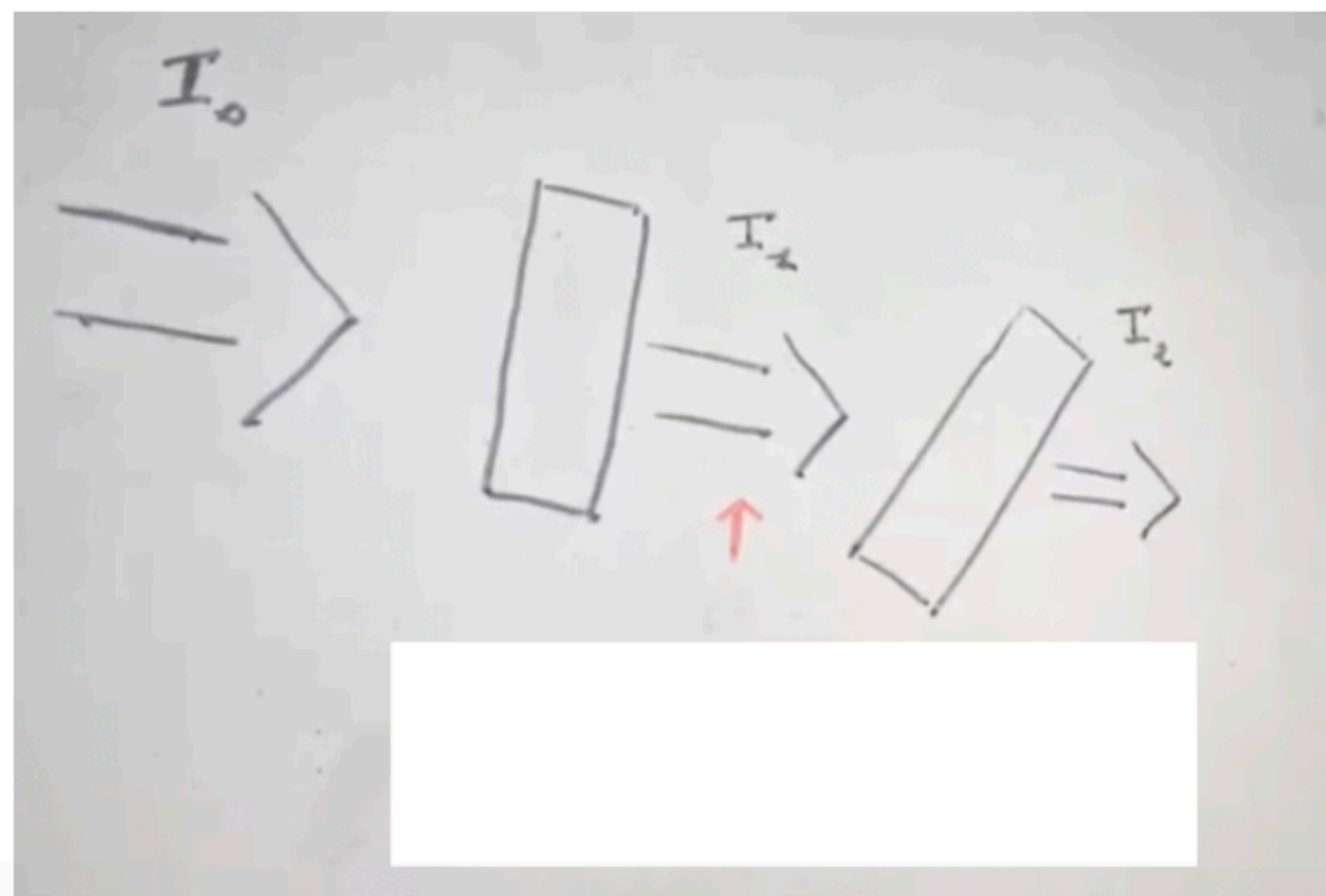


# ESPLORAZIONE EMPIRICA INTERAZIONE TRA LUCE E FILTRI

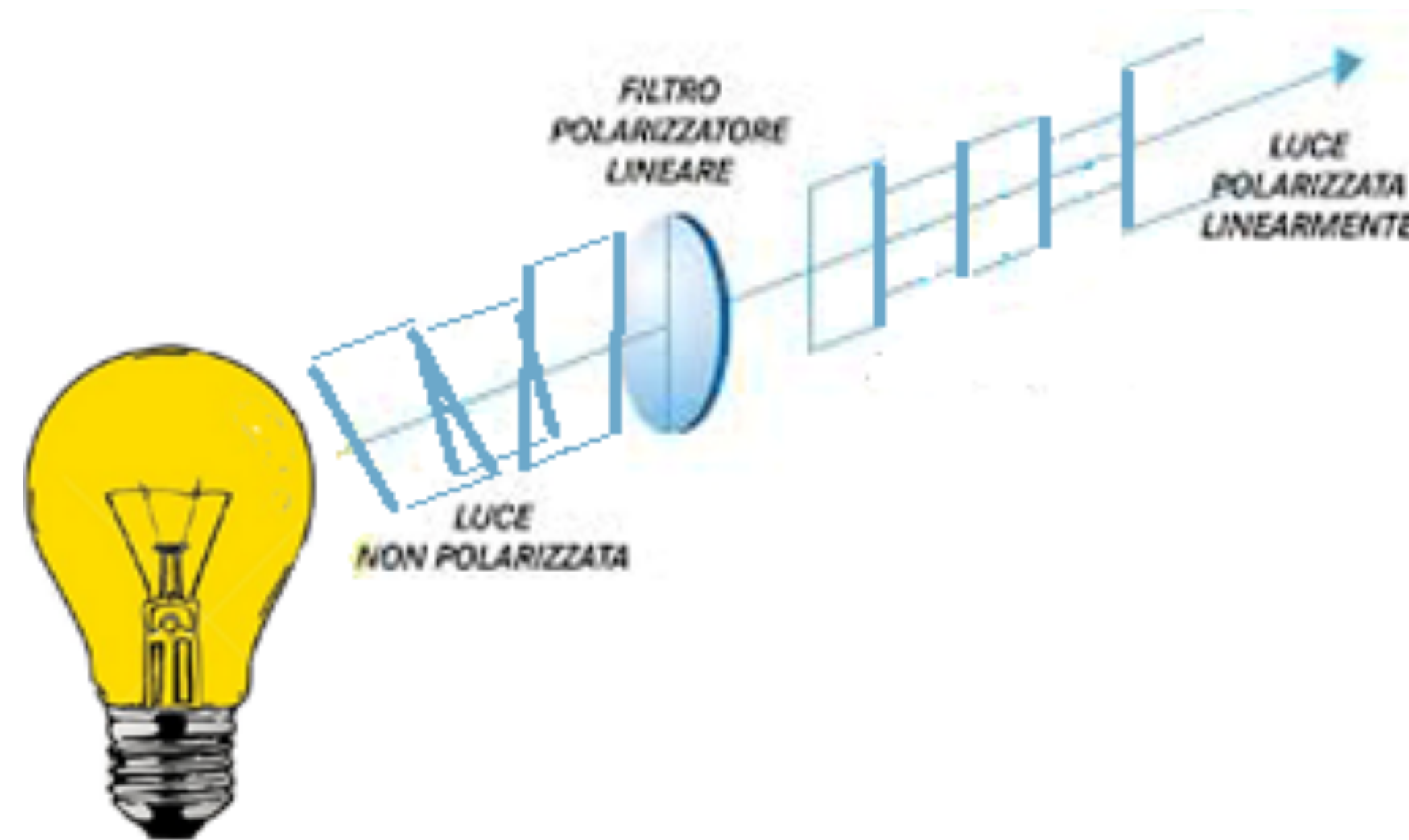
INTERPRETAZIONE: **Quale elemento geometrico identifica la proprietà del fascio 1?** [un angolo] **Su quale piano?** [sul piano perpendicolare alla propagazione della luce] **Un angolo individuato da quale filtro?** [solo dal primo filtro]

DEF: il primo filtro assegna alla luce una direzione di polarizzazione.

ANALISI: **Come esprimereste l'attenuazione ora?** [ $I_2 = T(\theta) * I_1$ , con  $T = 1$  per  $\theta = 0$  e  $T = 1$  per  $\theta = 90$ ] **Chi è  $\theta$ ?** [angolo tra la direzione di polarizzazione del fascio 1 e quella di 2]



# Conclusioni dell'esplorazione



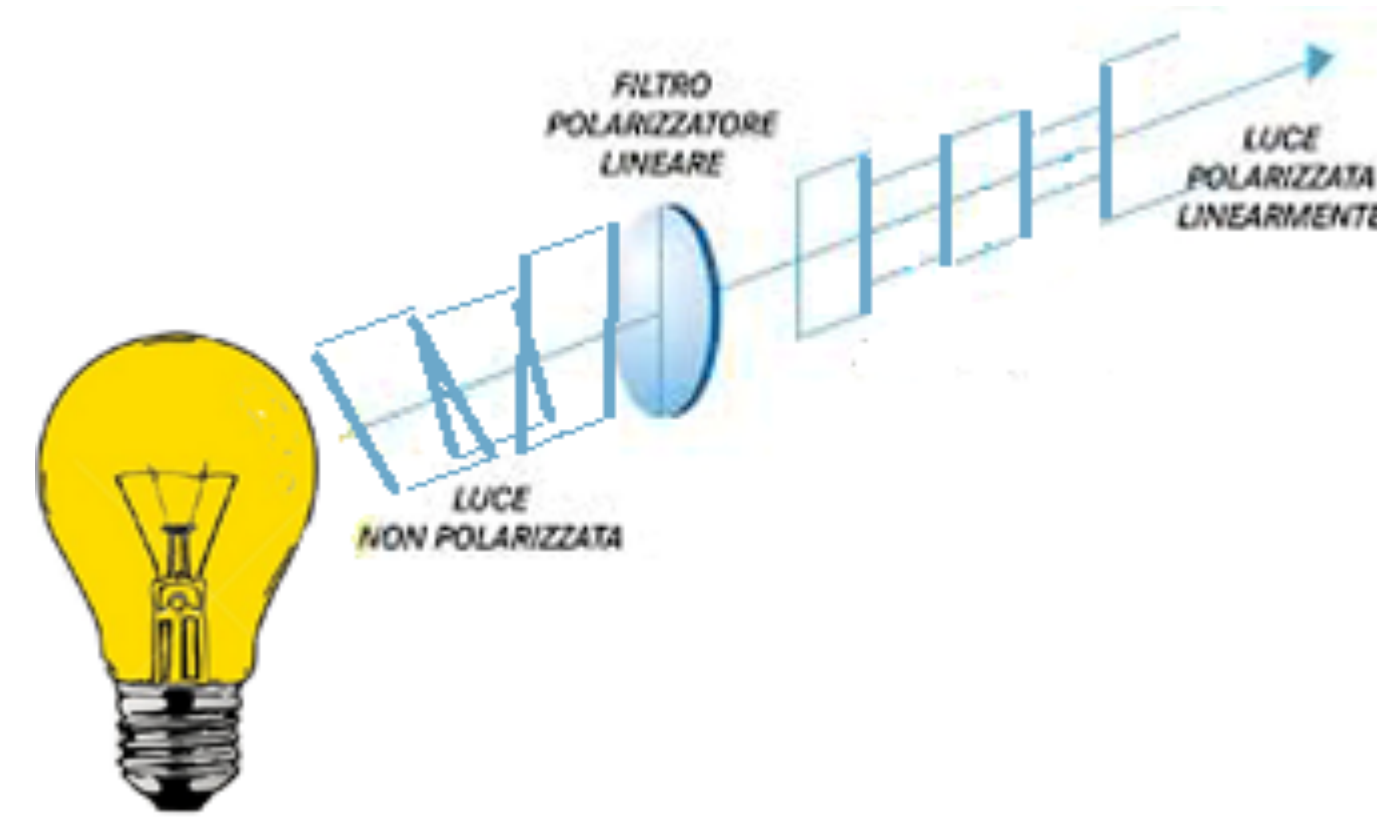
LA **POLARIZZAZIONE** LINEARE È UNA CARATTERISTICA DELLA LUCE IDENTIFICATA DA UNA DIREZIONE NEL PIANO ORTOGONALE ALLA LINEA DI PROPAGAZIONE

INDICHIAMO COME **PROPRIETÀ** DI POLARIZZAZIONE IL SUO VALORE IN GRADI

# Conclusioni dell'esplorazione

## 1. PREPARAZIONE

Luce non polarizzata che attraversa un filtro polaroid  
**acquisisce una polarizzazione** lineare  
con proprietà nella **direzione permessa** del filtro



## 2. ANALISI

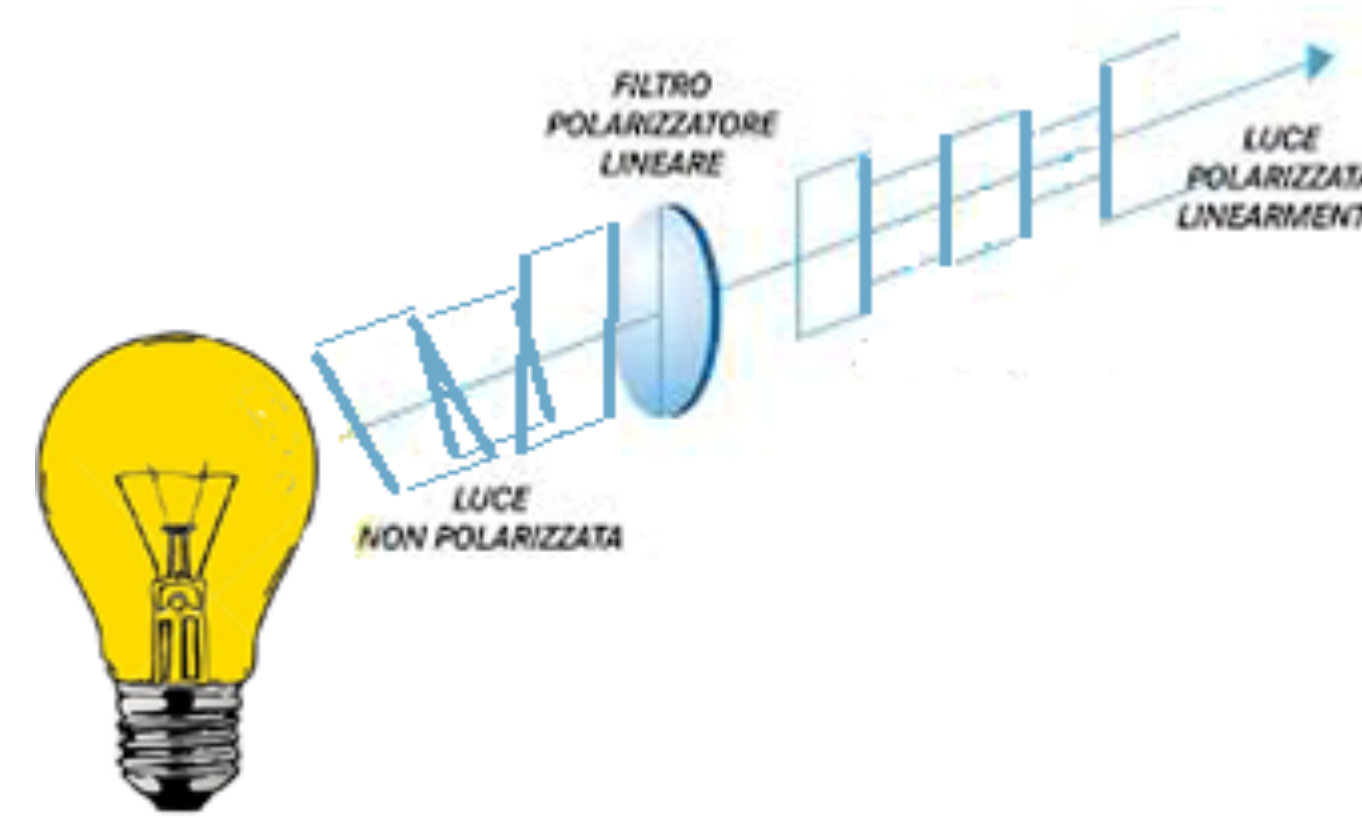
La sua polarizzazione è **rilevabile** facendola passare attraverso un ulteriore filtro polaroid e ruotando il filtro



# Conclusioni dell'esplorazione

## 1. PREPARAZIONE

Luce non polarizzata che attraversa un filtro polaroid  
**acquisisce una polarizzazione** lineare  
con proprietà nella **direzione permessa** del filtro



## 2. ANALISI

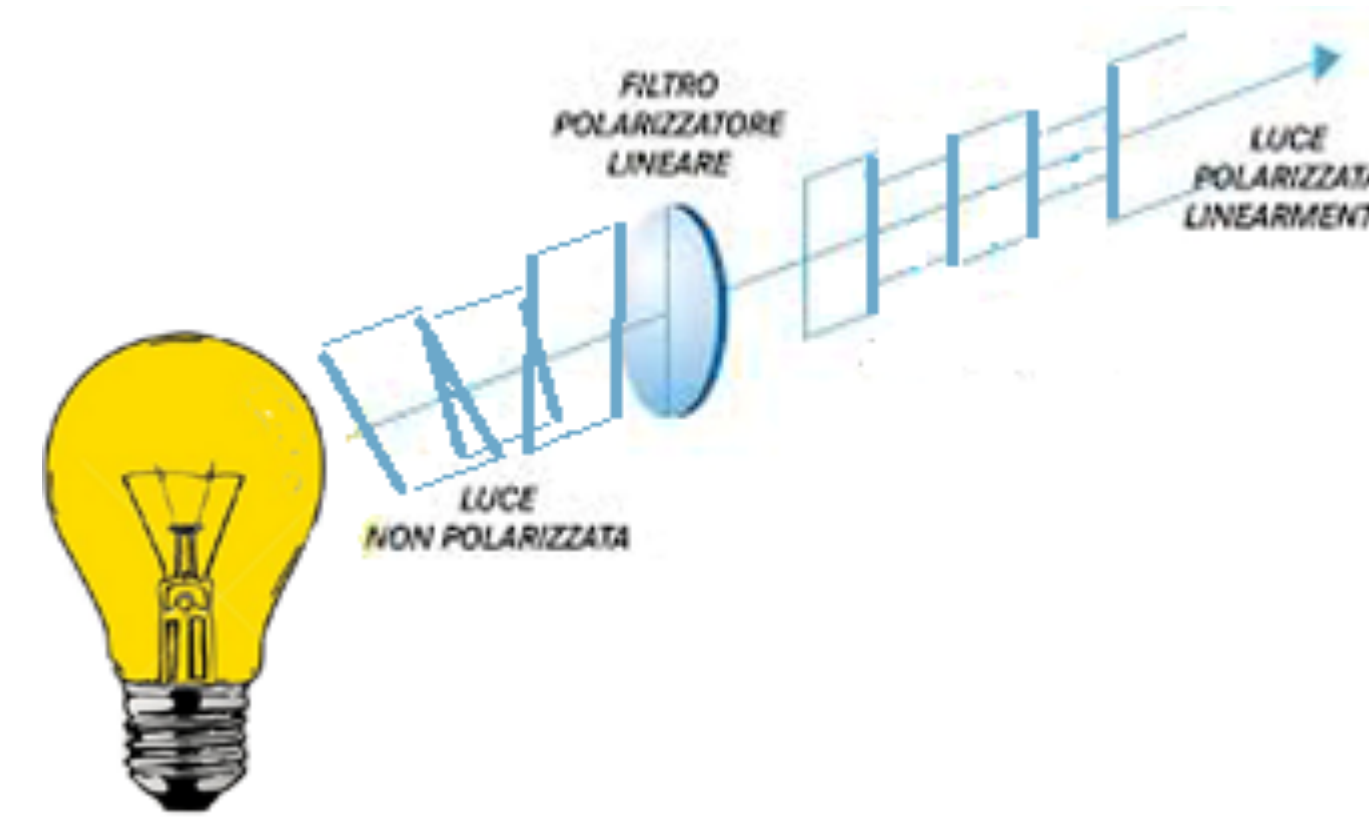
La sua polarizzazione è **rilevabile** facendola passare attraverso un ulteriore filtro polaroid e ruotando il filtro



# Conclusioni dell'esplorazione

## 1. PREPARAZIONE

Luce non polarizzata che attraversa un filtro polaroid  
**acquisisce una polarizzazione** lineare  
con proprietà nella **direzione permessa** del filtro



## 2. ANALISI

La sua polarizzazione è **rilevabile** facendola passare attraverso un ulteriore filtro polaroid e ruotando il filtro



Si osserverà una riduzione di intensità della luce trasmessa  
che cresce al crescere dell'angolo tra le due direzioni permesse

Se l'angolo tra la polarizzazione della luce e quella del filtro è  $\perp$   
-> non passa luce. La luce è polarizzata nella **direzione proibita** del filtro



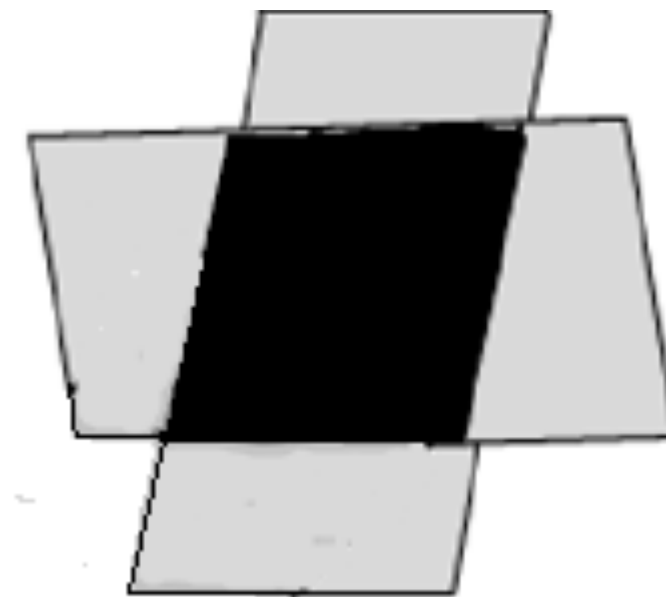
# Conclusioni dell'esplorazione

## 3. RUOLO ATTIVO DEL FILTRO

Se un fascio di luce polarizzata in una direzione attraversa un filtro con direzione permessa  $\neq$  non solo l'intensità del fascio trasmesso è ridotta

➤ ma il filtro cambia la proprietà di polarizzazione della luce del fascio nella direzione permessa

**Un esito antintuitivo**



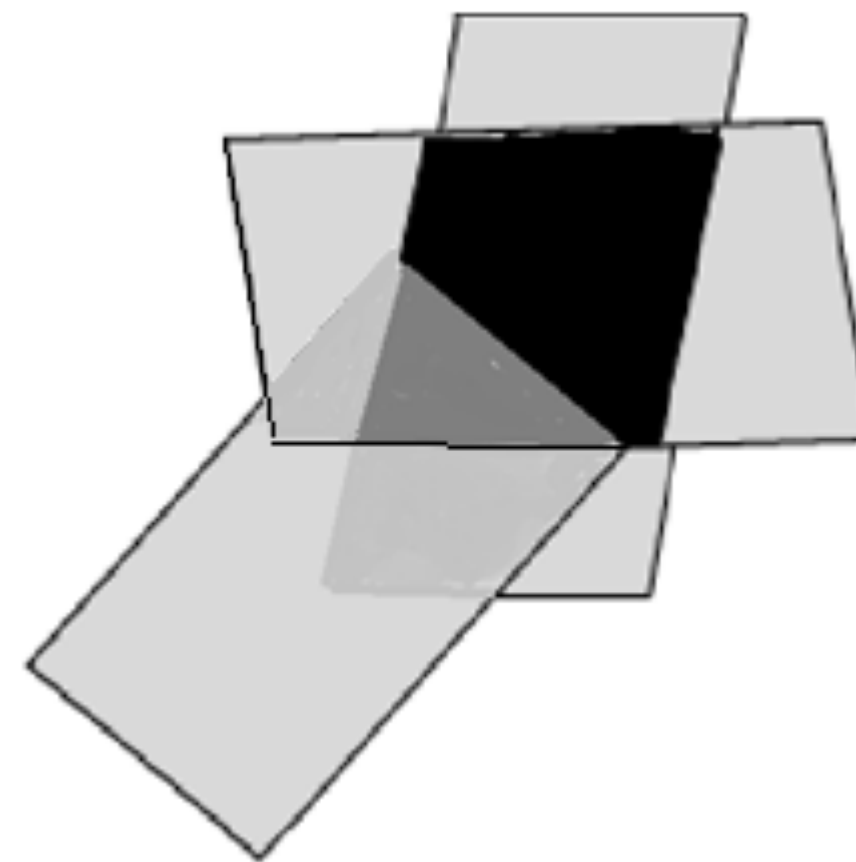
# Conclusioni dell'esplorazione

## 3. RUOLO ATTIVO DEL FILTRO

Se un fascio di luce polarizzata in una direzione attraversa un filtro con direzione permessa  $\neq$  non solo l'intensità del fascio trasmesso è ridotta

➤ ma il filtro cambia la proprietà di polarizzazione della luce del fascio nella direzione permessa

**Un esito antintuitivo**



aggiungendo un filtro tra i due, la luce trasmessa complessivamente aumenta

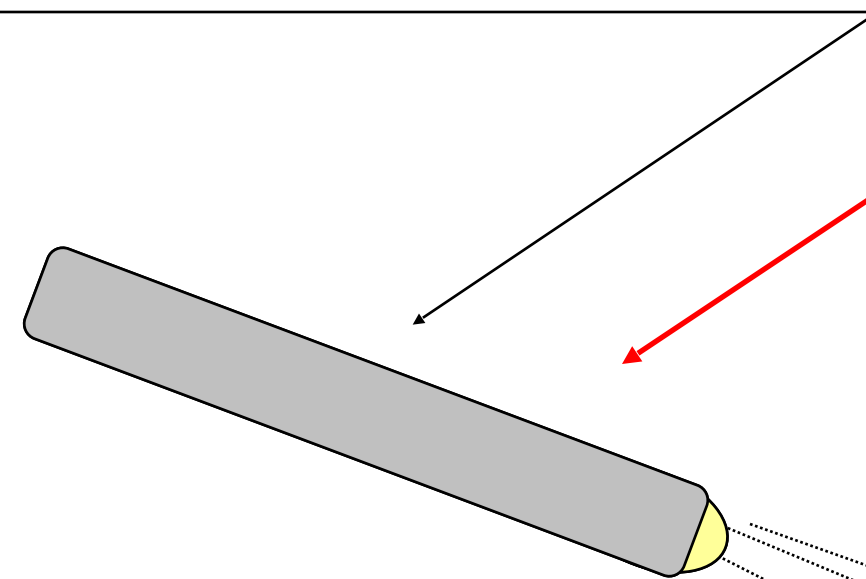
**Ciò non è possibile per filtri passivi  
(ad esempio: assorbimento passivo luce)**



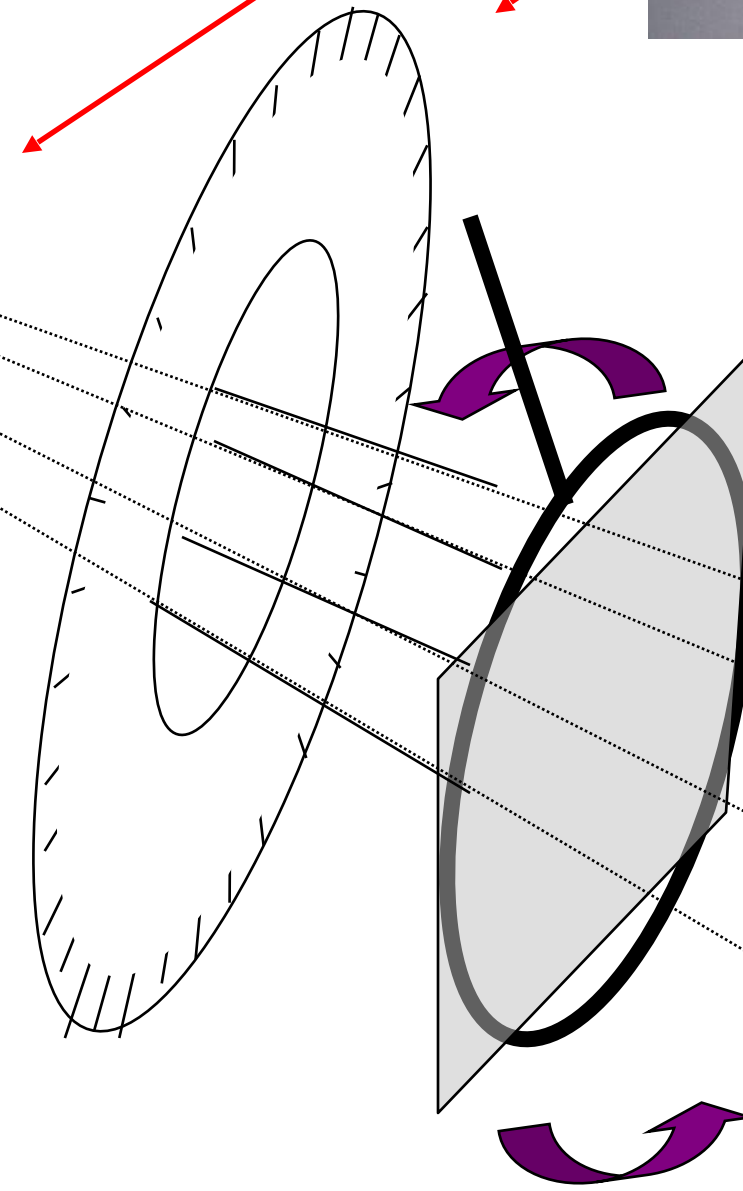
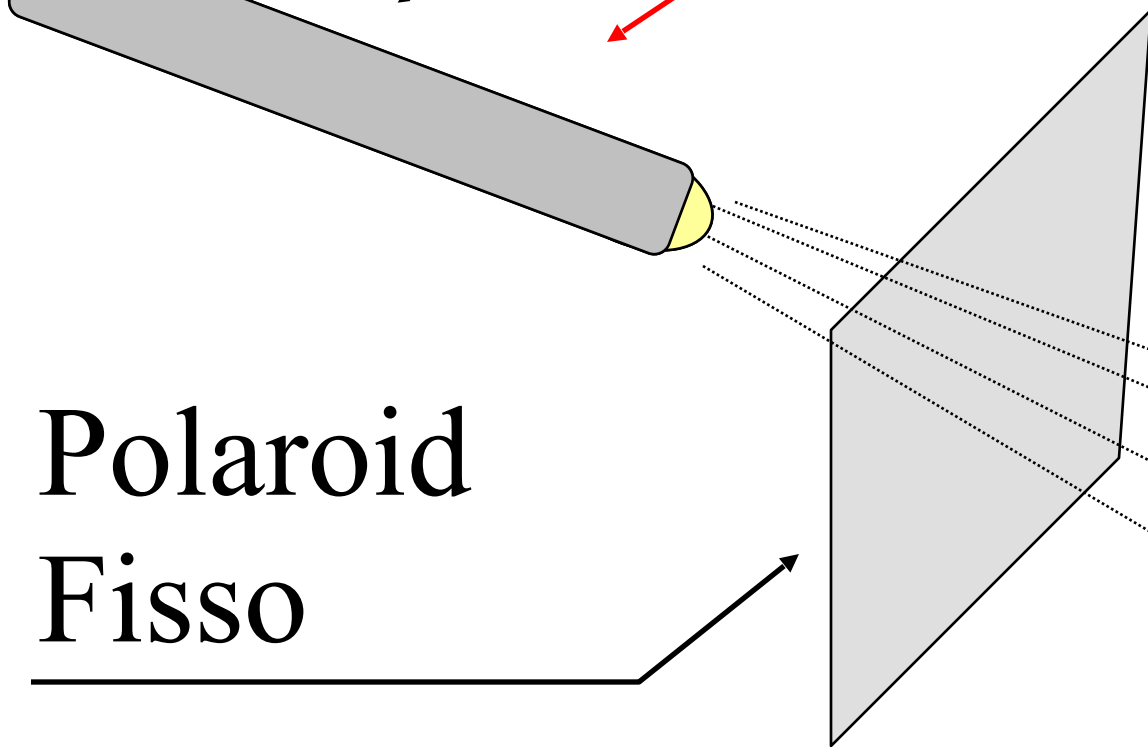
# Analisi Quantitativa

La misura di  $I_t/I_0(\alpha)$

Sorgente di luce

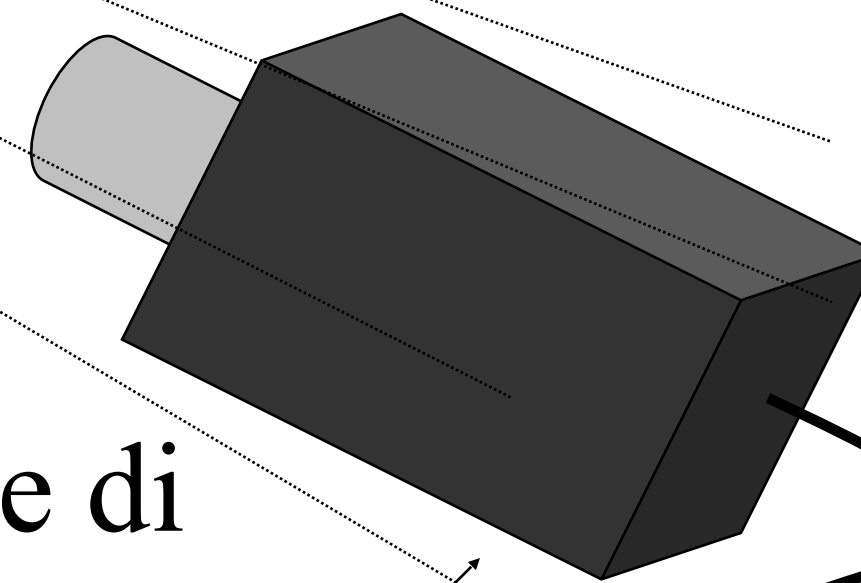


Polaroid Fisso

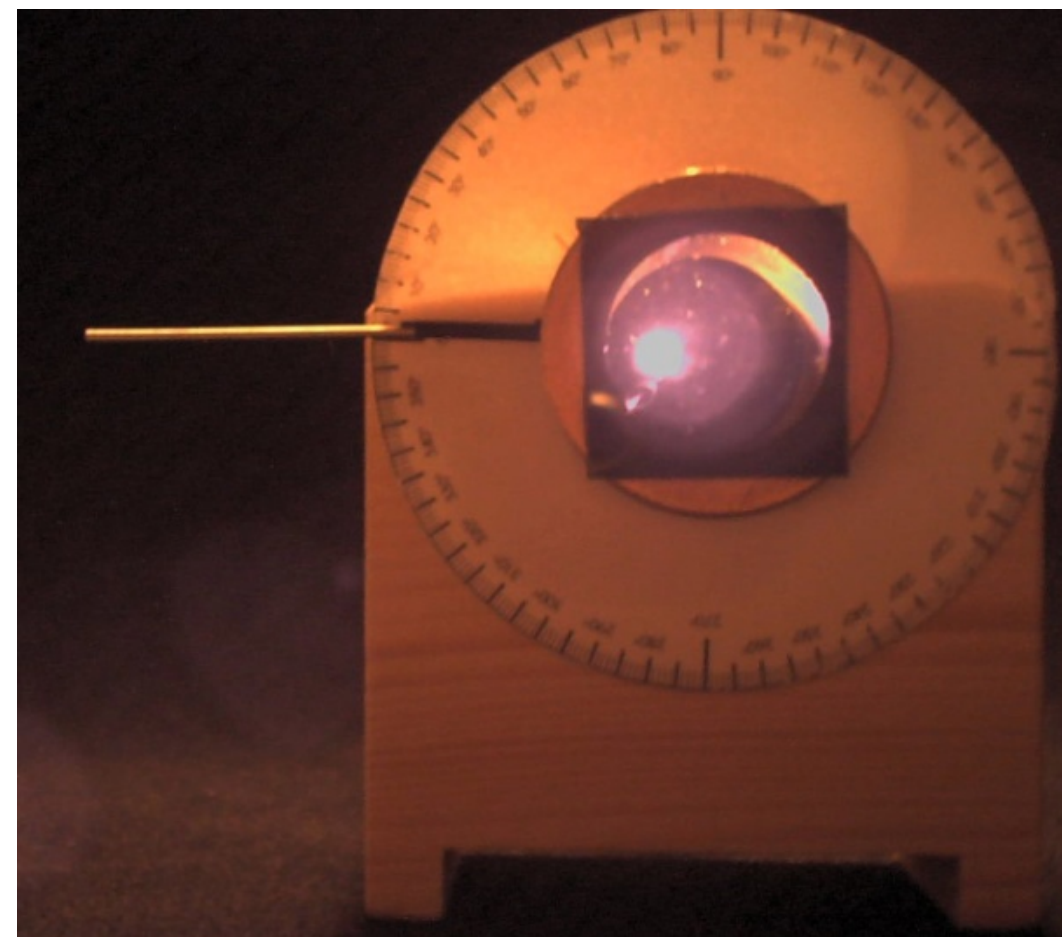
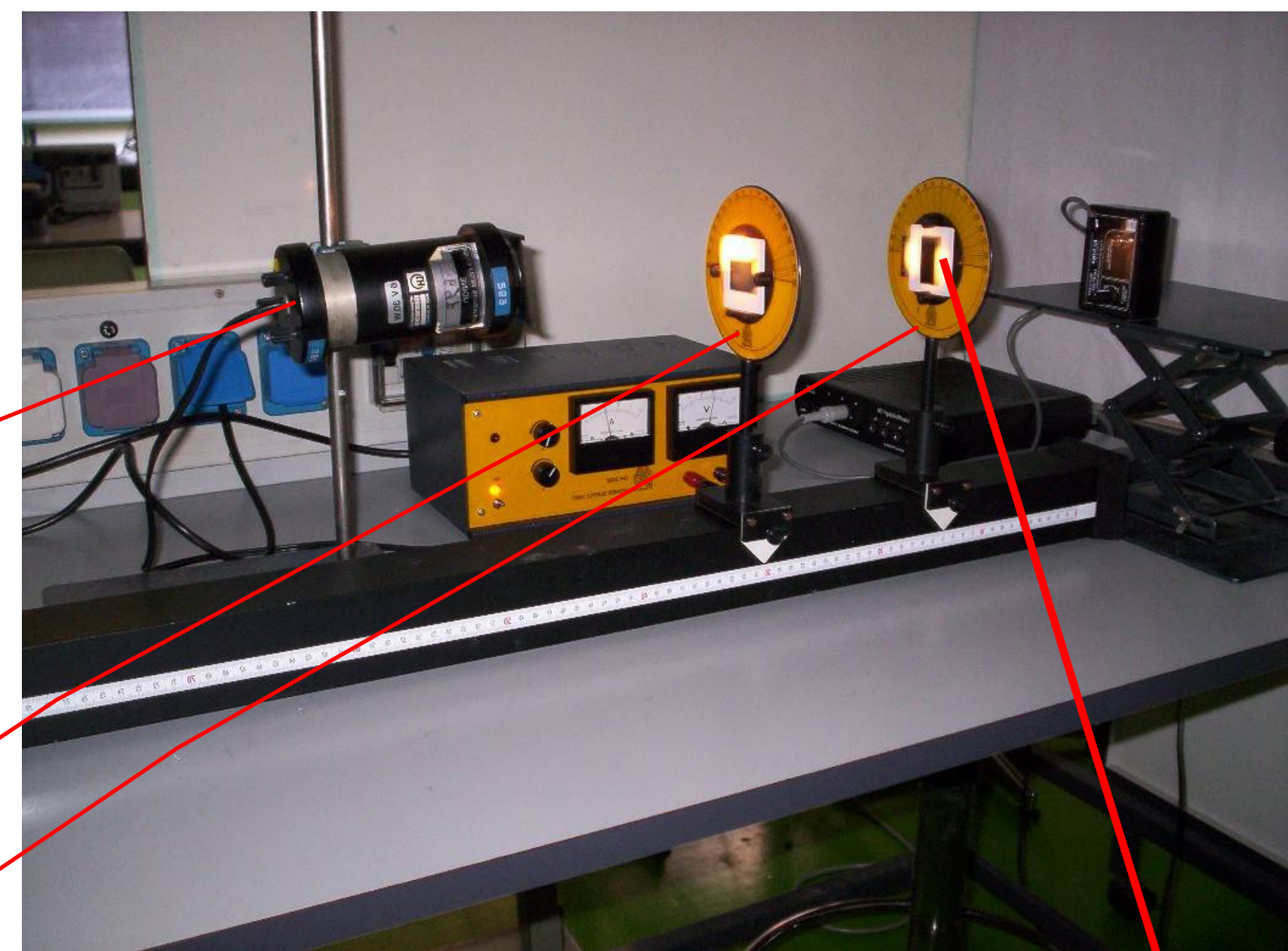


Polaroid sul supporto rotante

Sensore di luce



al PC



# Legge di Malus con smartphone



DIAPOSITIVE FILTRE POLARISANT  
 3,60 €\* · Disponibile · Brand: Labomalin  
[Visita >](#)



Light Meter



0	0	570	570
30	0,52359878	484	427,5
45	0,78539816	300	285
60	1,04719755	150	142,5
90	1,57079633	5	2,13716E-30
120	2,0943951	110	142,5
135	2,35619449	280	285
150	2,61799388	440	427,5
180	3,14159265	580	570

# Legge di Malus con smartphone

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.optimize import curve_fit

# Dati forniti
angles = np.array([0, 0.523598776, 0.785398163, 1.047197551, 1.570796327, 2.0943951, 2.35619449, 2.61799388, 3.14159265])
values1 = np.array([570, 484, 300, 150, 5, 110, 280, 440, 570])
values2 = np.array([570, 427.5, 285, 142.5, 2, 142.5, 285, 427.5, 570])

# Funzione di fit (coseno al quadrato)
def cos_squared_fit(x, A, B):
    return A * np.cos(x)**2 + B

# Eseguire il fit sui dati
params1, covariance1 = curve_fit(cos_squared_fit, angles, values1)
params2, covariance2 = curve_fit(cos_squared_fit, angles, values2)

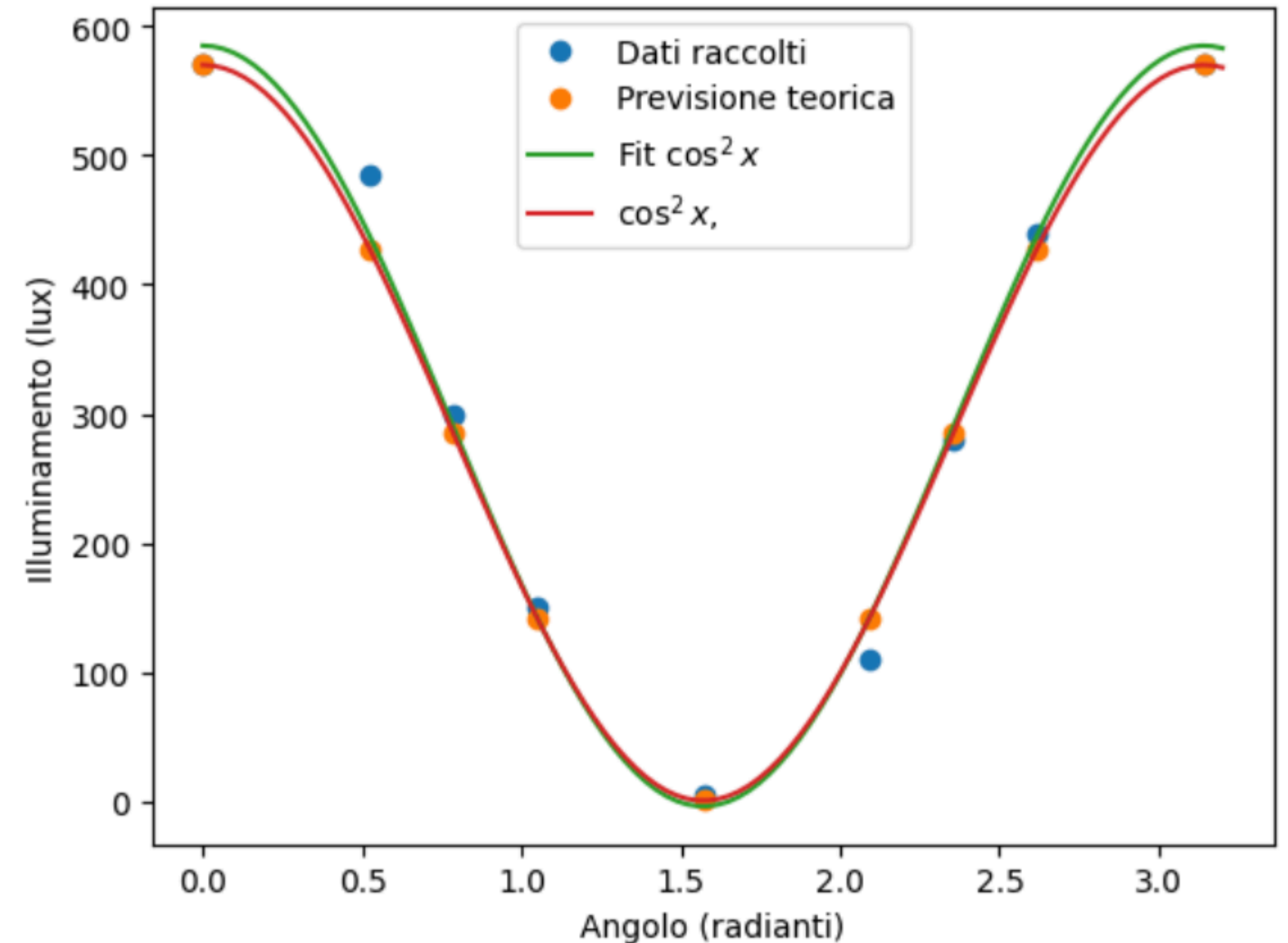
# Creare un array di angoli per il plotting più fine
fine_angles = np.linspace(0, 3.2, 100)

# Calcolare i valori fit
fit_values1 = cos_squared_fit(fine_angles, *params1)
fit_values2 = cos_squared_fit(fine_angles, *params2)

# Creare il grafico
plt.plot(angles, values1, 'o', label='Dati raccolti')
plt.plot(angles, values2, 'o', label='Previsione teorica')
plt.plot(fine_angles, fit_values1, label='Fit  $\cos^2 x$ ')
plt.plot(fine_angles, fit_values2, label=' $\cos^2 x$ ,')

# Aggiunta di etichette e legenda
plt.xlabel('Angolo (radianti)')
plt.ylabel('Illuminamento (lux)')
plt.legend()

# Mostra il grafico
plt.show()
```



# Natura granulare della luce

## Natura granulare della luce

1905: idea teorica di fotone di Einstein  
-> predizione legge effetto fotoelettrico

1923-1977: ricerca di sorgenti a singolo fotone

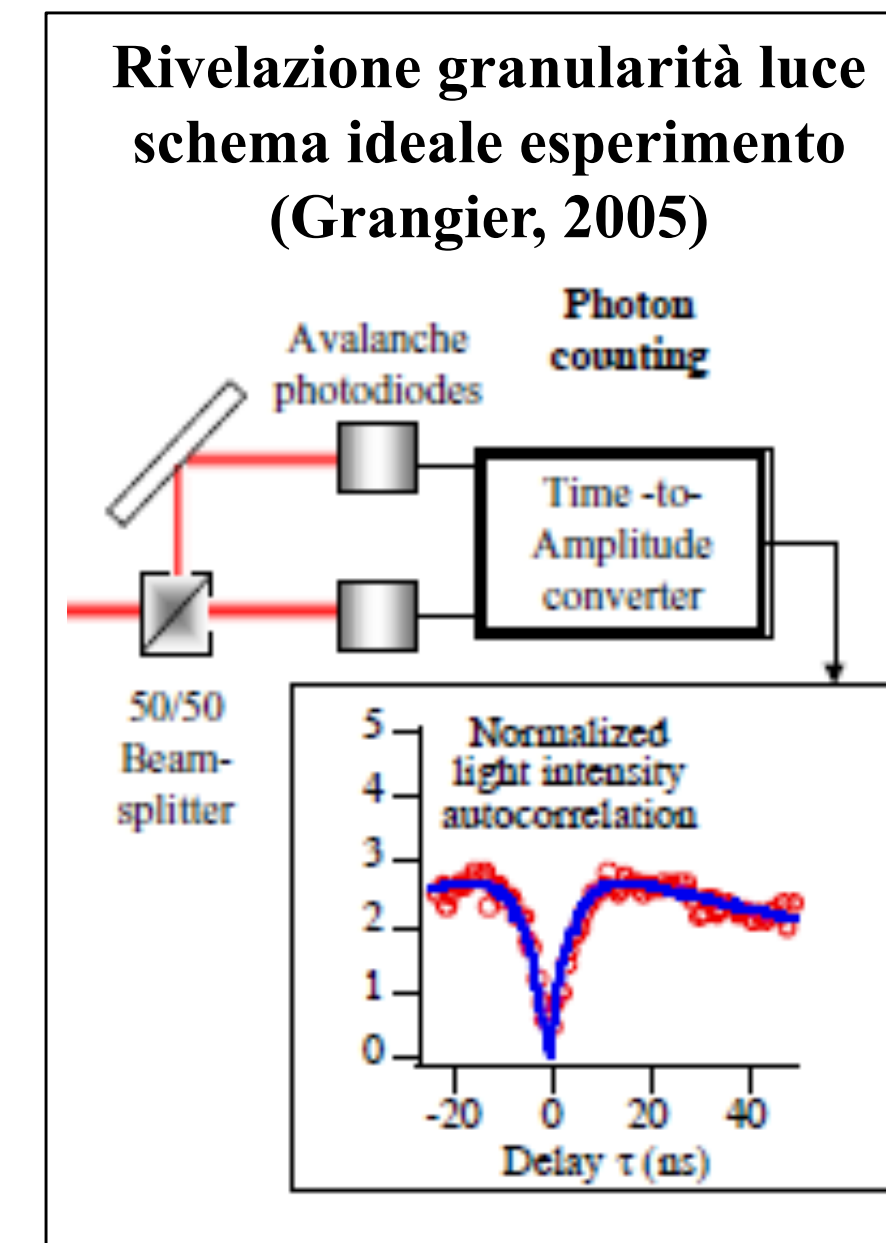
**1986: esperimento Roger, Grangier, Aspect**

*Risultato: assenza di coincidenze*

-per una sorgente corrispondente ad una transizione atomica

l'assorbimento della luce avviene in **pacchetti unitari**

-ogni pacchetto deve corrispondere ad un **ente individuale** altrimenti rivelerei il 50% di segnale in ciascuno dei due rivelatori (come per un'onda)



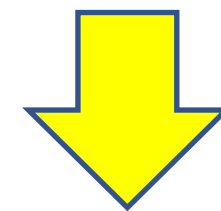
l'unità minima di emissione e assorbimento della luce  
è un ente individuale, che chiamiamo **fotone**

# Propagazione – Assunzione per modello a fotoni

Sappiamo che la luce viene emessa e assorbita in forma di enti individuali e localizzati

E per la propagazione?

per la costruzione di un modello a fotoni della luce



ipotizziamo che possa essere pensata nello stesso modo  
anche mentre si propaga

# Intensità della luce in un modello a fotoni

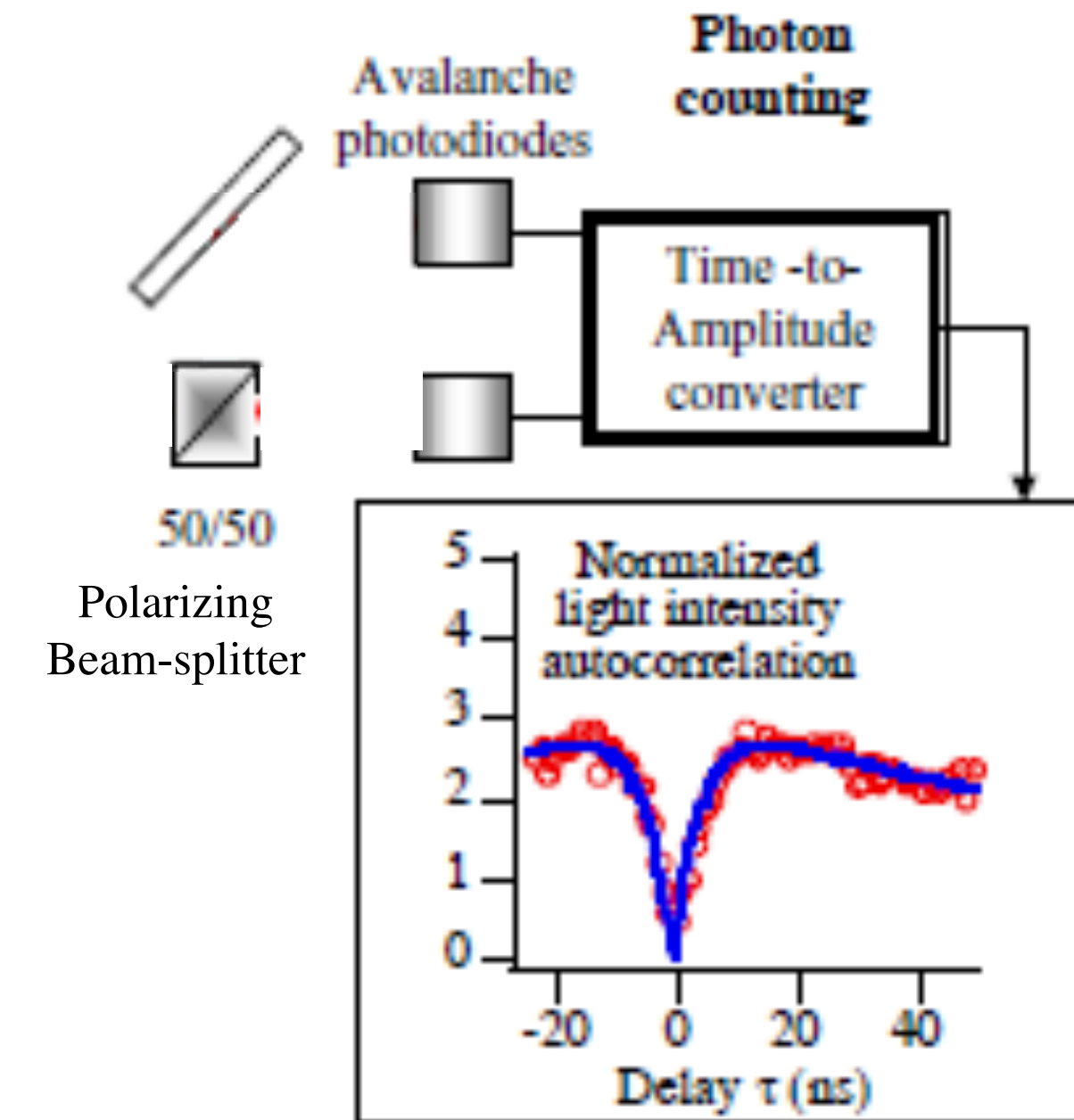
si accettano ipotesi...

In base a quanto visto:

al crescere del numero di fotoni emessi da una sorgente  
in un dato intervallo di tempo,  
cresce l'intensità della luce del fascio

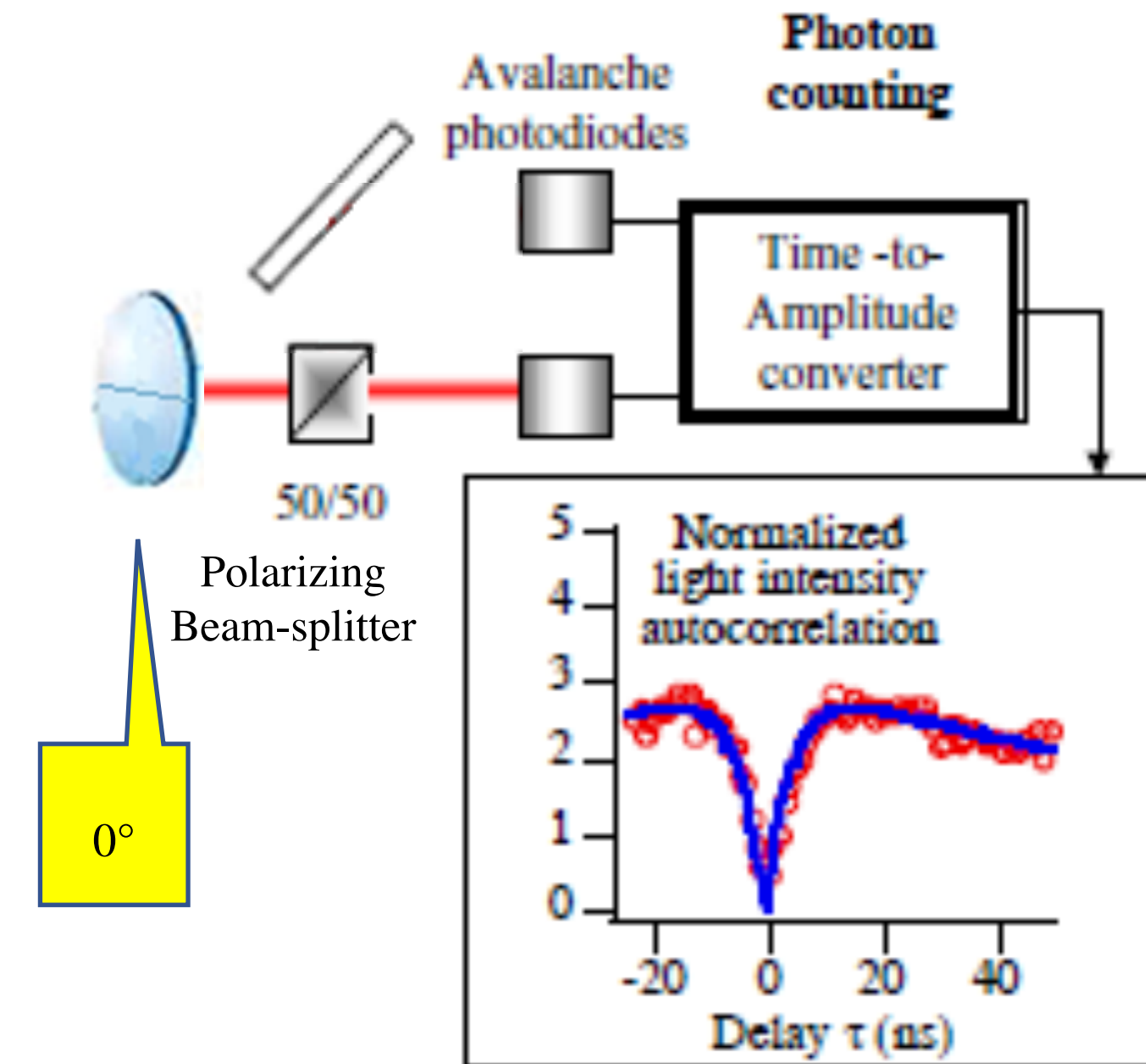
# La polarizzazione appartiene al singolo fotone

- sostituisco il beam splitter ordinario con uno splitter polarizzatore con canali ( $0^\circ$ ,  $90^\circ$ )
- prima del quale inserisco un filtro, inizialmente a  $0^\circ$  e poi a  $90^\circ$



# La polarizzazione appartiene al singolo fotone

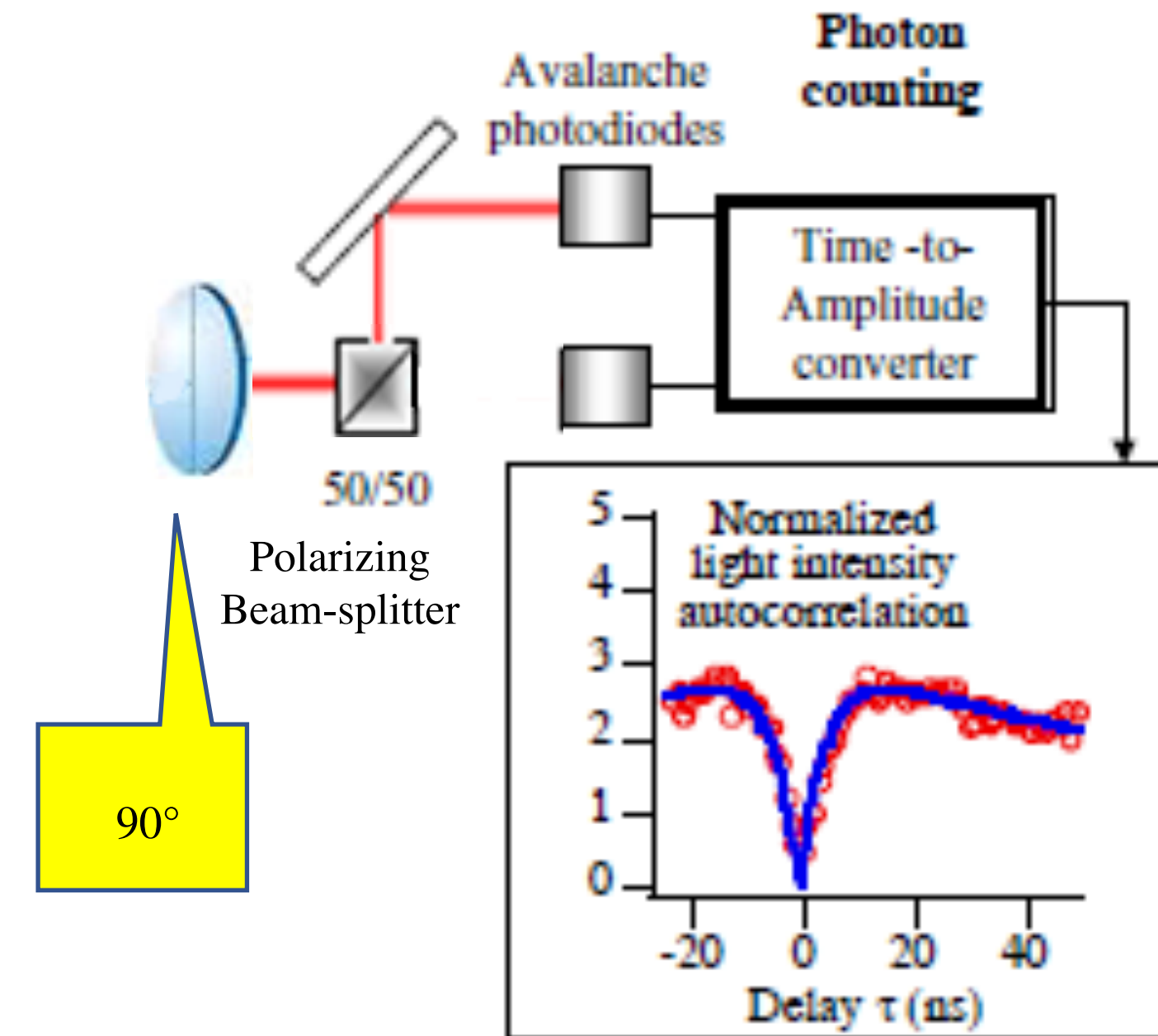
- sostituisco il beam splitter ordinario con uno splitter polarizzatore con canali ( $0^\circ$ ,  $90^\circ$ )
- prima del quale inserisco un filtro, inizialmente a  $0^\circ$  e poi a  $90^\circ$





# La polarizzazione appartiene al singolo fotone

- sostituisco il beam splitter ordinario con uno splitter polarizzatore con canali ( $0^\circ$ ,  $90^\circ$ )
- prima del quale inserisco un filtro, inizialmente a  $0^\circ$  e poi a  $90^\circ$



*risultato: assorbimento solo nel contatore  
corrispondente alla polarizzazione  
assegnata alla luce dal filtro (no coincidenze).*

il fotone che supera un filtro è polarizzato nella sua direzione permessa:  
la polarizzazione è una caratteristica del **singolo fotone**

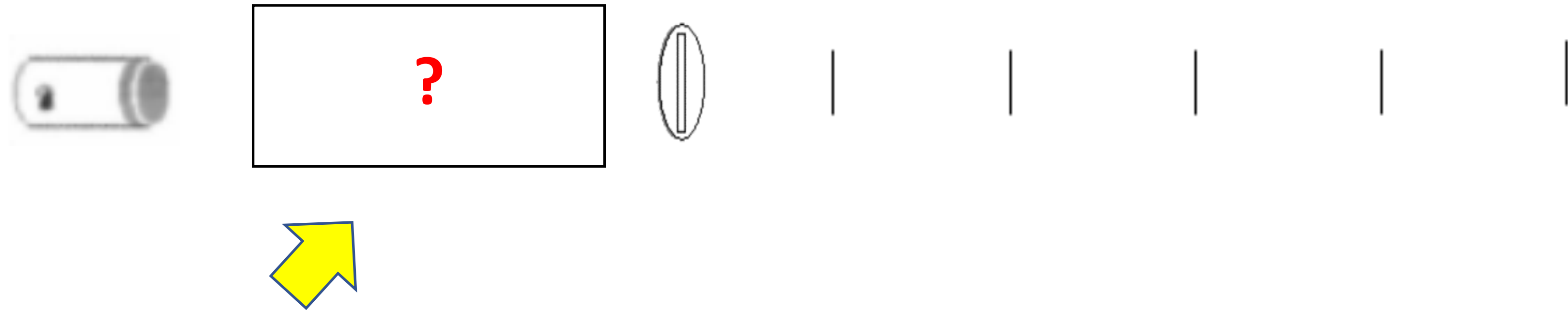
## Rappresentazione polarizzazione luce mediante modello a fotoni

**fascio di 5 fotoni polarizzato verticalmente**



(rappresentazione *applet JQM*)

# E prima del filtro?



**I fotoni hanno una singola proprietà di polarizzazione?**

**Se no, come sono fatti?**


**Se si, quale? Facciamo ipotesi ...**

# QUESITO A1


**A1.** La sorgente emette un fascio di luce *non polarizzata* di 4 fotoni incidente su un filtro verticale.

- Fare ipotesi sulla polarizzazione dei fotoni emessi e rappresentare il fascio
- Sulla base di ciascuna ipotesi, determinare cosa fa il filtro ai fotoni del fascio (Azione del filtro)
- A seconda del caso, stabilire se l'interazione dei fotoni con il filtro prevede una possibile riduzione del loro numero (Previsione)

## DISCUSSIONE IPOTESI

1  Sorgente di luce  Azione del filtro: \_\_\_\_\_  
Previsione: \_\_\_\_\_

2  Sorgente di luce  Azione del filtro: \_\_\_\_\_  
Previsione: \_\_\_\_\_

3  Sorgente di luce  Azione del filtro: \_\_\_\_\_  
Previsione: \_\_\_\_\_



- Vi sono ipotesi possibilmente compatibili con l'evidenza empirica a livello macroscopico? Spiegare
-

# Verifica

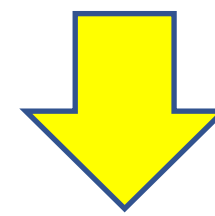
➤ inviamo il fascio non polarizzato sul filtro verticale

➤ sappiamo che solo il 50% dell'intensità viene trasmesso (metà dei fotoni)

➤ confrontiamo l'evidenza empirica con le previsioni basate su ciascuna ipotesi

se i fotoni del fascio non polarizzato fossero  
fotoni polarizzati in tutte le direzioni , che vengono spogliati delle proprietà,  
o fotoni non polarizzati , a cui viene aggiunta una proprietà

ne passerebbe il 100%



l'unica ipotesi compatibile con l'evidenza empirica è che luce non polarizzata è fatta di fotoni polarizzati in direzioni casuali (alcuni sono assorbiti dal filtro)

il singolo fotone è sempre polarizzato

# Luce non polarizzata in un modello a fotoni

## Visualizzazione JQM

**Fascio di luce non polarizzata costituito da 5 fotoni**



(iconografia *applet JQM*)

## Preparazione di luce polarizzata in un modello a fotoni

La *visualizzazione* della proprietà del fotone in JQM ci aiuta a ragionare sulla polarizzazione in un modello a fotoni della luce

Ma in un laboratorio reale non vi sono agevolazioni del genere....

Alcuni fotoni di un fascio non polarizzato hanno superato un filtro con direzione permessa orizzontale

-Come mostreresti a un tuo compagno che conosce la polarizzazione, ma non in termini di fotoni, che le particelle che superano il 1° filtro sono polarizzate a  $0^\circ$ ? Hai a disposizione *filtri in ogni direzione* e *un contatore di fotoni*



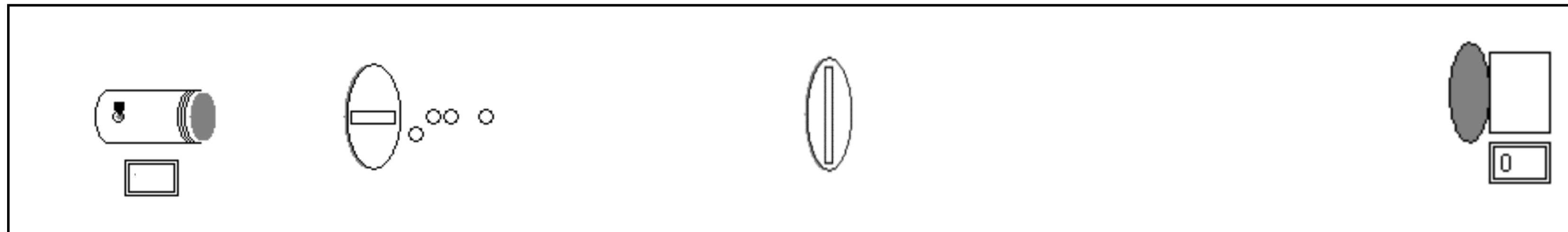
## Preparazione di luce polarizzata in un modello a fotoni

La *visualizzazione* della proprietà del fotone in JQM ci aiuta a ragionare sulla polarizzazione in un modello a fotoni della luce

Ma in un laboratorio reale non vi sono agevolazioni del genere....

Alcuni fotoni di un fascio non polarizzato hanno superato un filtro con direzione permessa orizzontale

-Come mostreresti a un tuo compagno che conosce la polarizzazione, ma non in termini di fotoni, che le particelle che superano il 1° filtro sono polarizzate a  $0^\circ$ ? Hai a disposizione *filtri in ogni direzione* e *un contatore di fotoni*



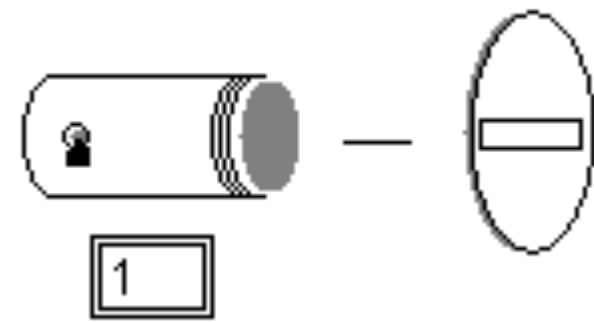
Aggiungendo un filtro con direzione permessa  $\perp$  al primo, tutti i fotoni saranno sempre assorbiti e il rivelatore conterà zero fotoni, così provando che avevano proprietà a  $0^\circ$



## Interpretazione interazione tra luce polarizzata e filtri in modello a fotoni

- un fotone preparato con proprietà nota (a  $0^\circ$ ) incide su un filtro polarizzatore con direzione permessa nota
- esaminiamo l'esito della sua interazione

*Filtro orizzontale*

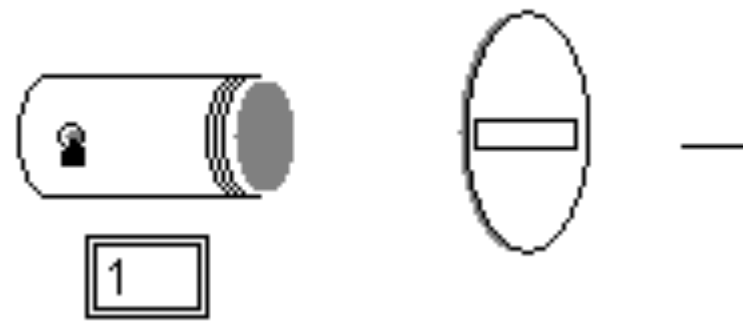


Il fotone supererà il filtro?

## Interpretazione interazione tra luce polarizzata e filtri in modello a fotoni

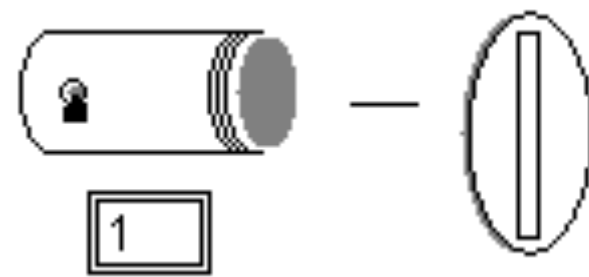
- un fotone preparato con proprietà nota (a  $0^\circ$ ) incide su un filtro polarizzatore con direzione permessa nota
- esaminiamo l'esito della sua interazione

*Filtro orizzontale*



Il fotone supera il filtro  
con certezza

*Filtro verticale*

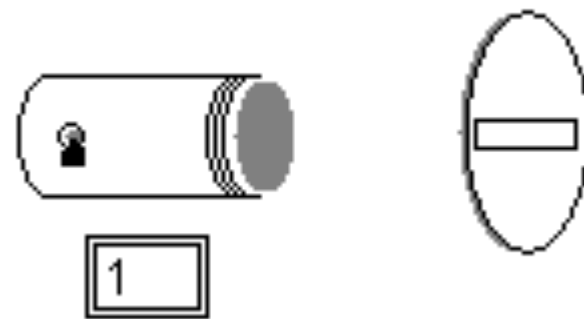


Il fotone supererà il filtro?

## Interpretazione interazione tra luce polarizzata e filtri in modello a fotoni

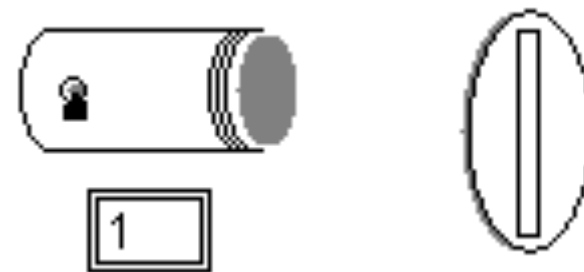
- un fotone preparato con proprietà nota (a  $0^\circ$ ) incide su un filtro polarizzatore con direzione permessa nota
- esaminiamo l'esito della sua interazione

*Filtro orizzontale*



Il fotone supera il filtro  
con certezza

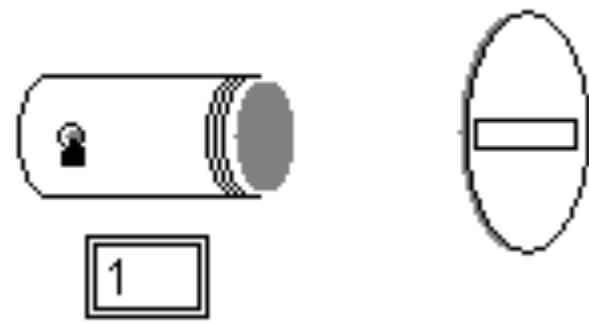
*Filtro verticale*



## Interpretazione interazione tra luce polarizzata e filtri in modello a fotoni

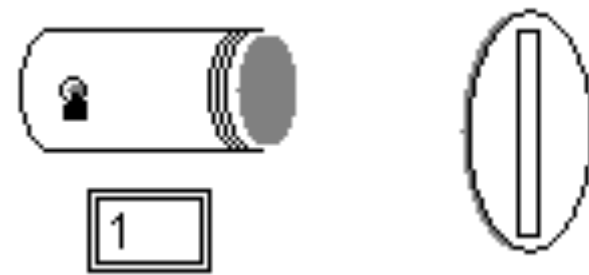
- un fotone preparato con proprietà nota (a  $0^\circ$ ) incide su un filtro polarizzatore con direzione permessa nota
- esaminiamo l'esito della sua interazione

*Filtro orizzontale*



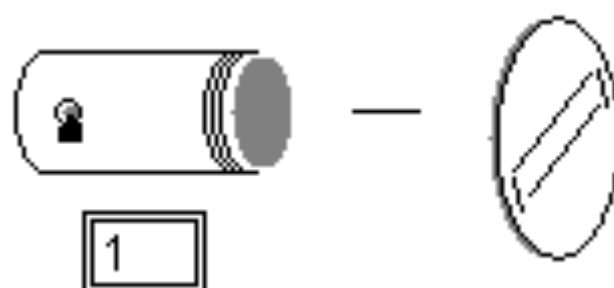
Il fotone supera il filtro  
con certezza

*Filtro verticale*



Il fotone è assorbito dal filtro  
con certezza

*Filtro a  $45^\circ$*

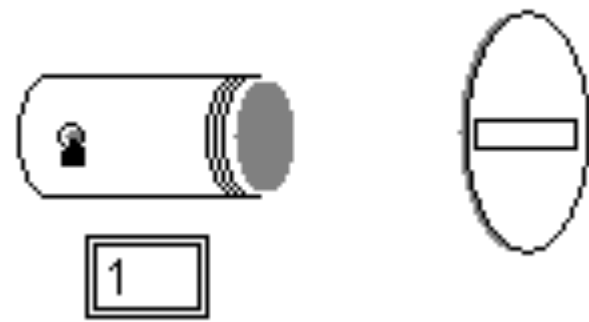


Il fotone supererà il filtro?

## Interpretazione interazione tra luce polarizzata e filtri in modello a fotoni

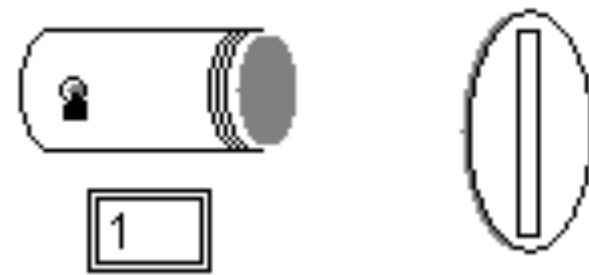
- un fotone preparato con proprietà nota (a  $0^\circ$ ) incide su un filtro polarizzatore con direzione permessa nota
- esaminiamo l'esito della sua interazione

*Filtro orizzontale*



Il fotone supera il filtro  
con certezza

*Filtro verticale*



Il fotone è assorbito dal filtro  
con certezza

*Filtro a  $45^\circ$*

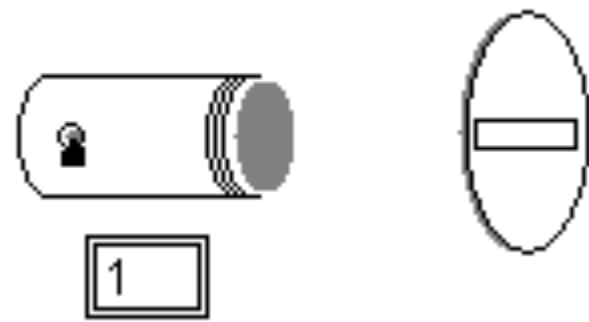


Lo ha superato

## Interpretazione interazione tra luce polarizzata e filtri in modello a fotoni

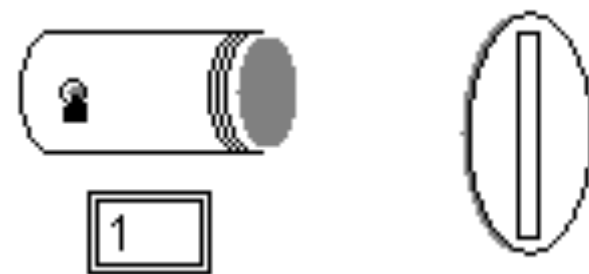
- un fotone preparato con proprietà nota (a  $0^\circ$ ) incide su un filtro polarizzatore con direzione permessa nota
- esaminiamo l'esito della sua interazione

*Filtro orizzontale*



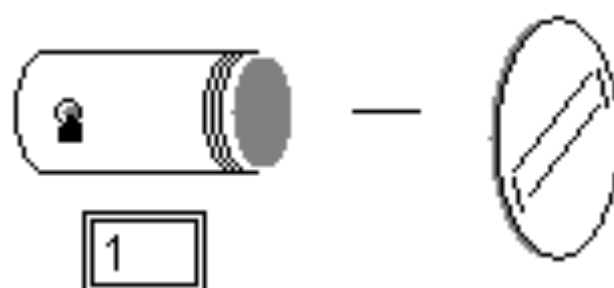
Il fotone supera il filtro  
con certezza

*Filtro verticale*



Il fotone è assorbito dal filtro  
con certezza

*Filtro a  $45^\circ$*

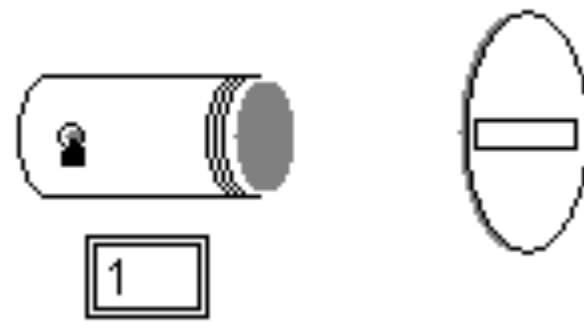


Riproviamo

## Interpretazione interazione tra luce polarizzata e filtri in modello a fotoni

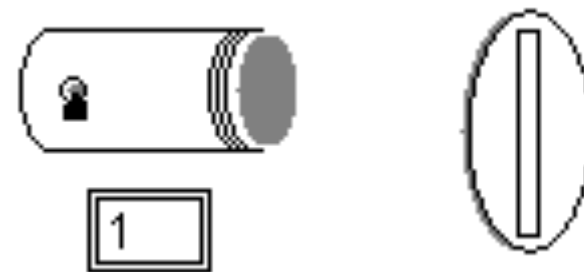
- un fotone preparato con proprietà nota (a  $0^\circ$ ) incide su un filtro polarizzatore con direzione permessa nota
- esaminiamo l'esito della sua interazione

*Filtro orizzontale*



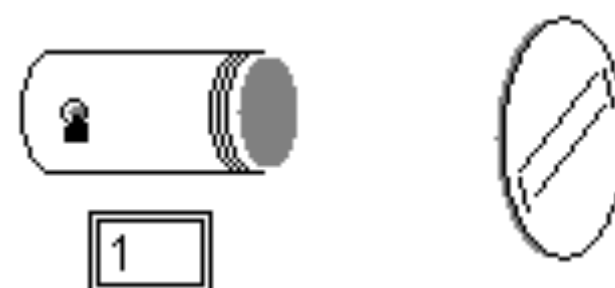
Il fotone supera il filtro  
con certezza

*Filtro verticale*



Il fotone è assorbito dal filtro  
con certezza

*Filtro a  $45^\circ$*

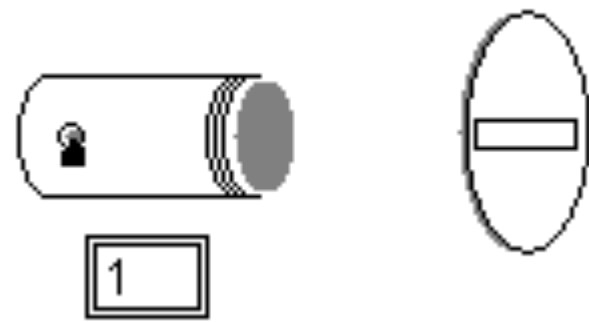


Questa volta è stato  
assorbito

## Interpretazione interazione tra luce polarizzata e filtri in modello a fotoni

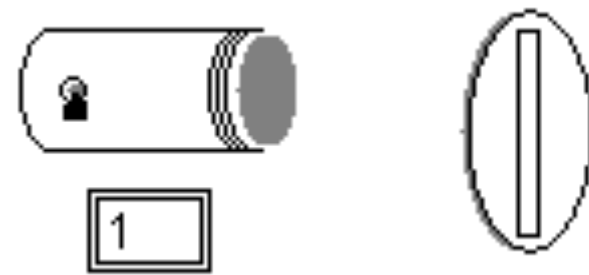
- un fotone preparato con proprietà nota (a  $0^\circ$ ) incide su un filtro polarizzatore con direzione permessa nota
- esaminiamo l'esito della sua interazione

*Filtro orizzontale*



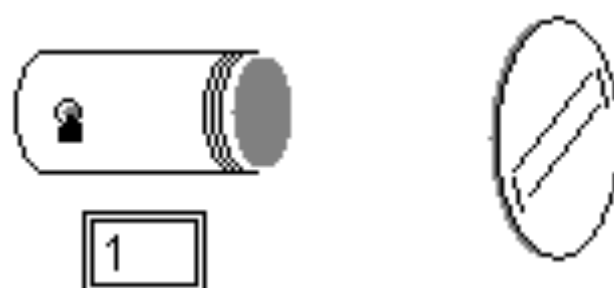
Il fotone supera il filtro  
con certezza

*Filtro verticale*



Il fotone è assorbito dal filtro  
con certezza

*Filtro a  $45^\circ$*



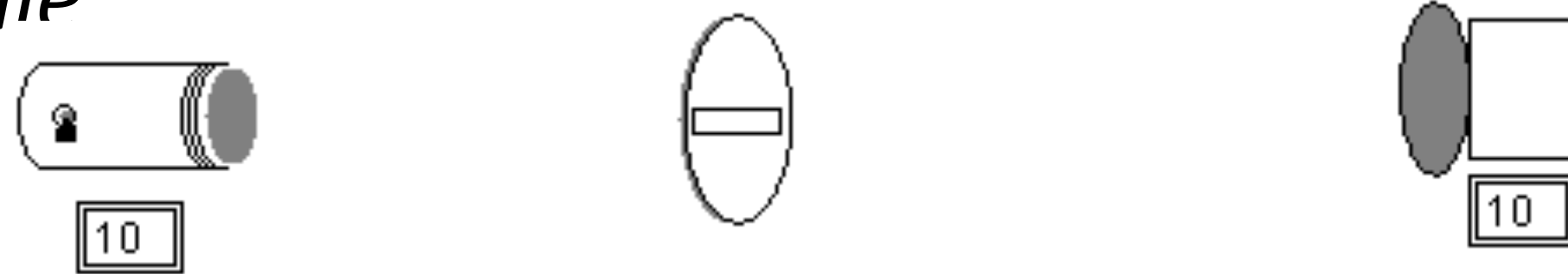
Ripetendo la prova si vede che  
a volte il fotone è assorbito  
a volte supera il filtro  
e acquisisce polarizzazione a  $45^\circ$



## Interpretazione interazione tra luce polarizzata e filtri in modello a fotoni

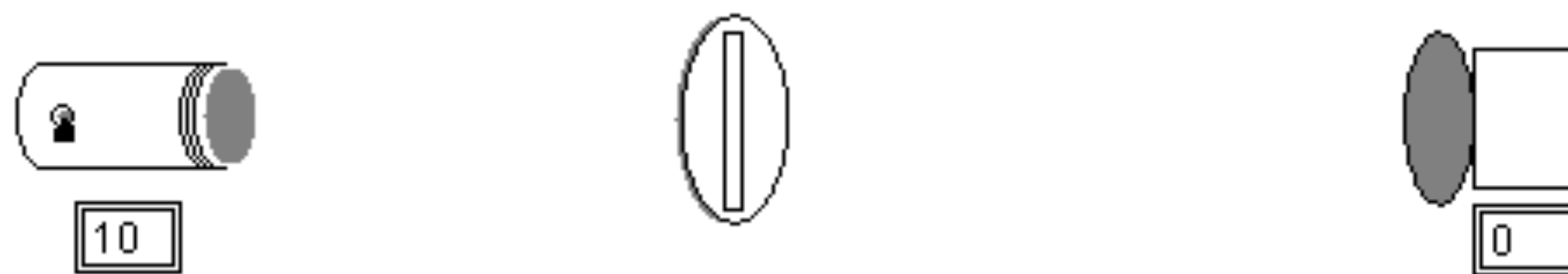
- inviamo 10 fotoni preparati con proprietà nota (a  $0^\circ$ ) su un filtro polarizzatore con direzione permessa nota
- contiamo il numero di fotoni trasmessi mediante rivelatore

*Filtro orizzontale*



Tutti i fotoni sono trasmessi

*Filtro verticale*



Nessun fotone viene trasmesso

*Filtro a  $45^\circ$*

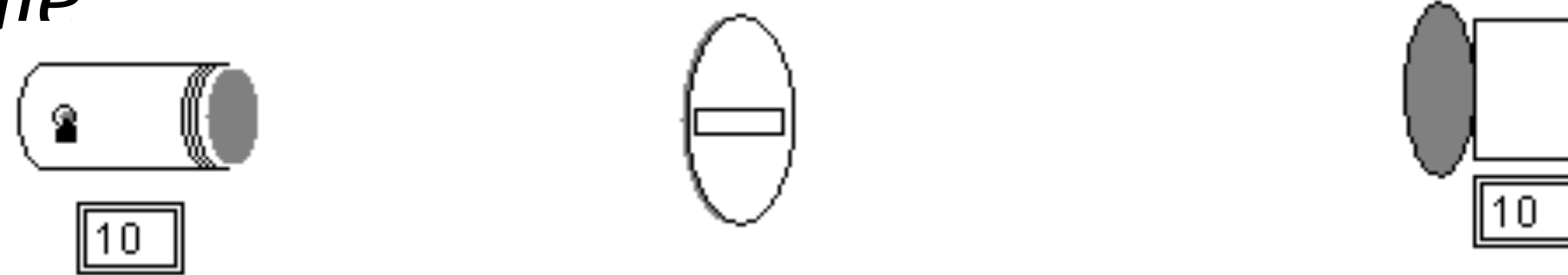


Quanti fotoni supereranno il filtro?

## Interpretazione interazione tra luce polarizzata e filtri in modello a fotoni

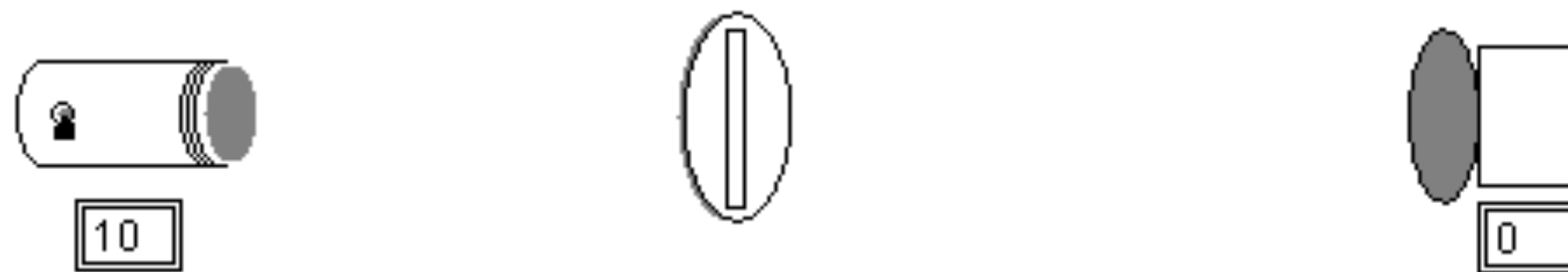
- inviamo 10 fotoni preparati con proprietà nota (a  $0^\circ$ ) su un filtro polarizzatore con direzione permessa nota
- contiamo il numero di fotoni trasmessi mediante rivelatore

*Filtro orizzontale*



Tutti i fotoni sono trasmessi

*Filtro verticale*



Nessun fotone viene trasmesso

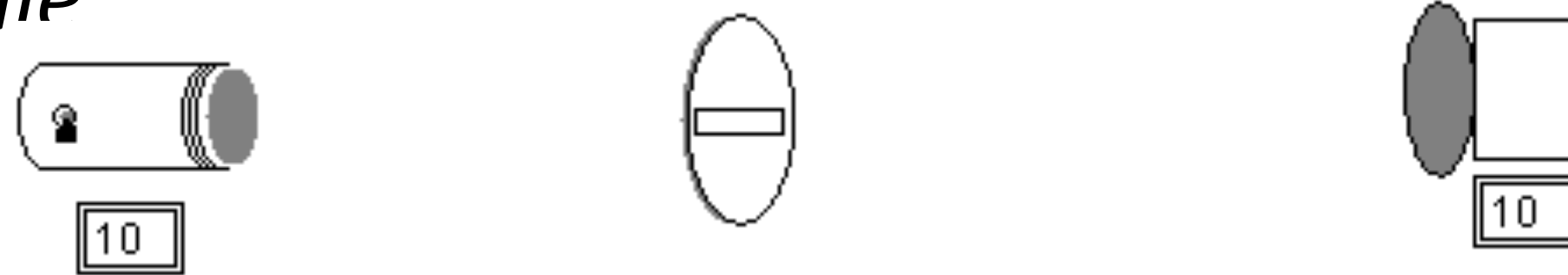
*Filtro a  $45^\circ$*



## Interpretazione interazione tra luce polarizzata e filtri in modello a fotoni

- inviamo 10 fotoni preparati con proprietà nota (a  $0^\circ$ ) su un filtro polarizzatore con direzione permessa nota
- contiamo il numero di fotoni trasmessi mediante rivelatore

*Filtro orizzontale*



Tutti i fotoni sono trasmessi

*Filtro verticale*



Nessun fotone viene trasmesso

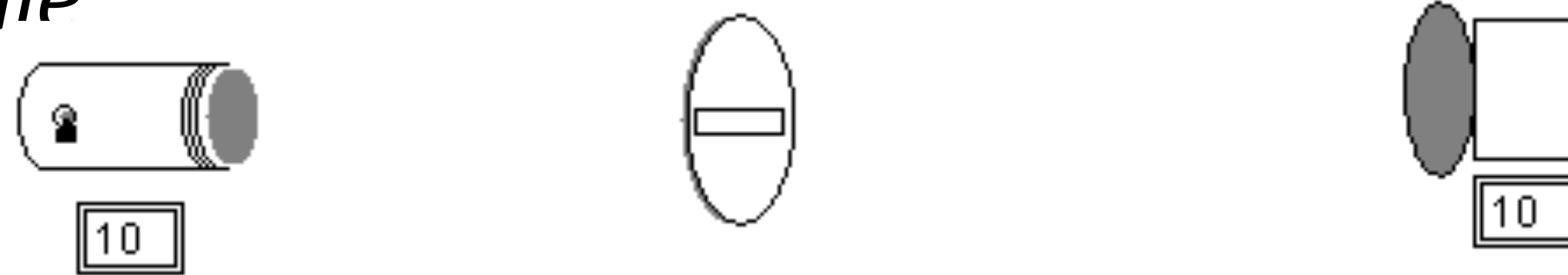
*Filtro a  $45^\circ$*



## Interpretazione interazione tra luce polarizzata e filtri in modello a fotoni

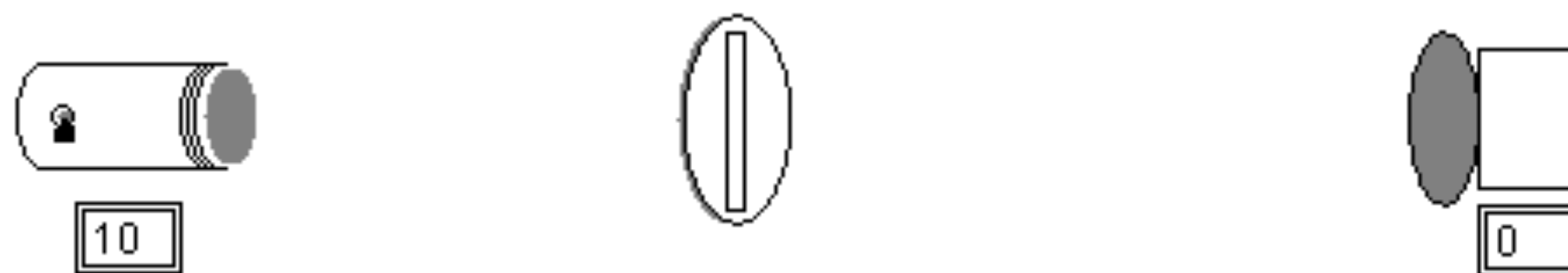
- inviamo 10 fotoni preparati con proprietà nota (a  $0^\circ$ ) su un filtro polarizzatore con direzione permessa nota
- contiamo il numero di fotoni trasmessi mediante rivelatore

*Filtro orizzontale*



Tutti i fotoni sono trasmessi

*Filtro verticale*



Nessun fotone viene trasmesso

*Filtro a  $45^\circ$*

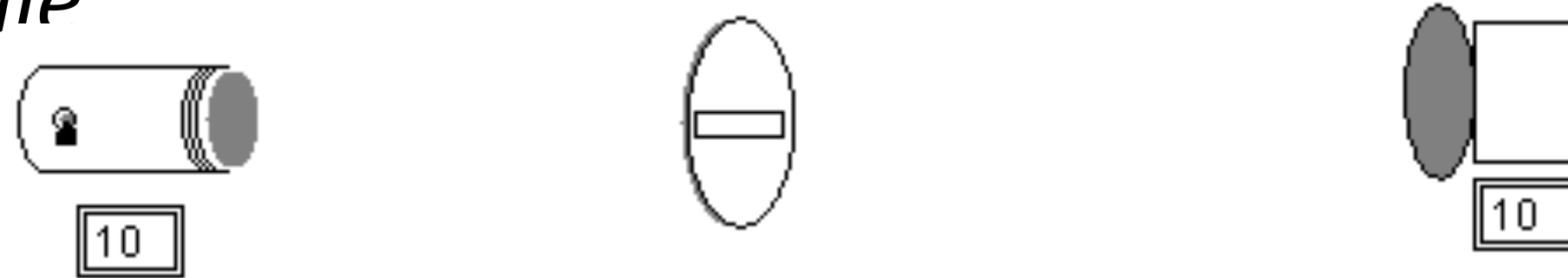


E ora quanti?

## Interpretazione interazione tra luce polarizzata e filtri in modello a fotoni

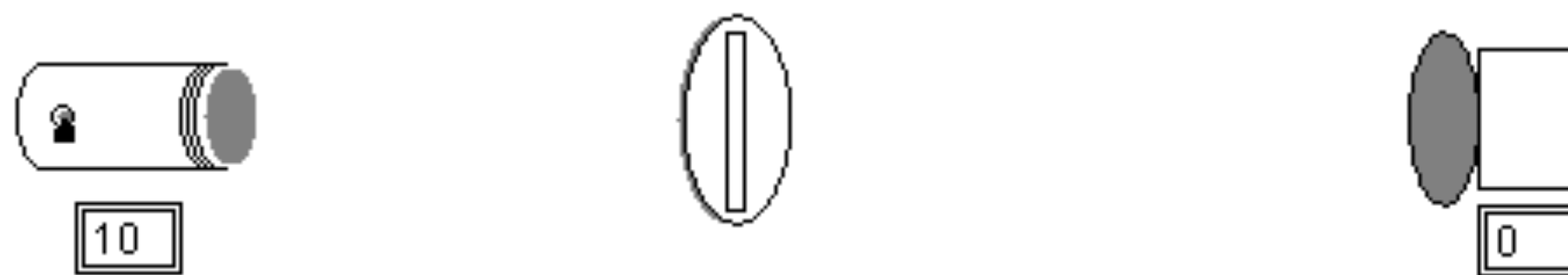
- inviamo 10 fotoni preparati con proprietà nota (a  $0^\circ$ ) su un filtro polarizzatore con direzione permessa nota
- contiamo il numero di fotoni trasmessi mediante rivelatore

*Filtro orizzontale*



Tutti i fotoni sono trasmessi

*Filtro verticale*



Nessun fotone viene trasmesso

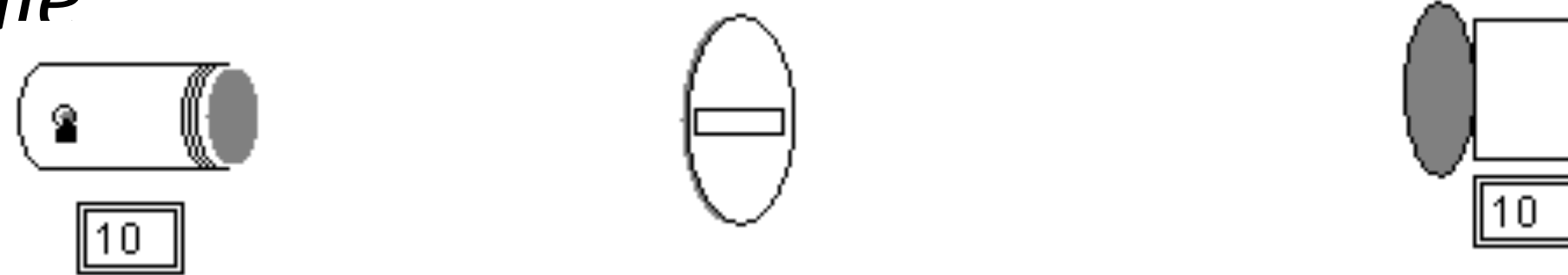
*Filtro a  $45^\circ$*



## Interpretazione interazione tra luce polarizzata e filtri in modello a fotoni

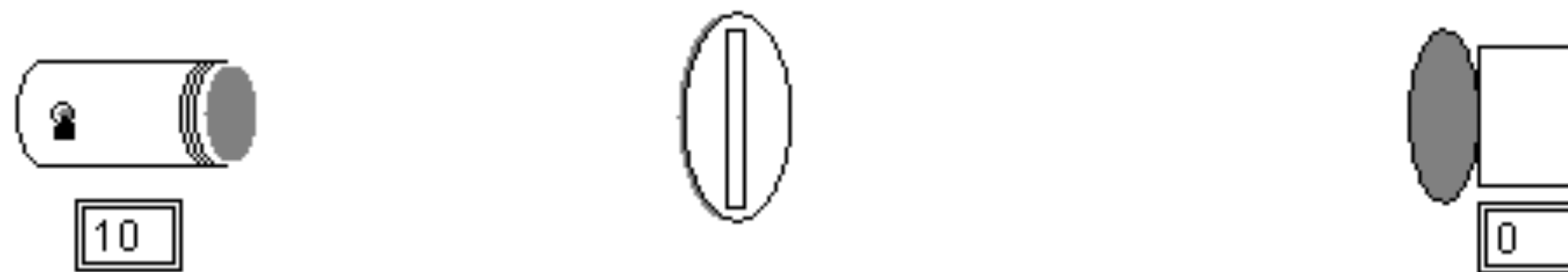
- inviamo 10 fotoni preparati con proprietà nota (a  $0^\circ$ ) su un filtro polarizzatore con direzione permessa nota
- contiamo il numero di fotoni trasmessi mediante rivelatore

*Filtro orizzontale*



Tutti i fotoni sono trasmessi

*Filtro verticale*



Nessun fotone viene trasmesso

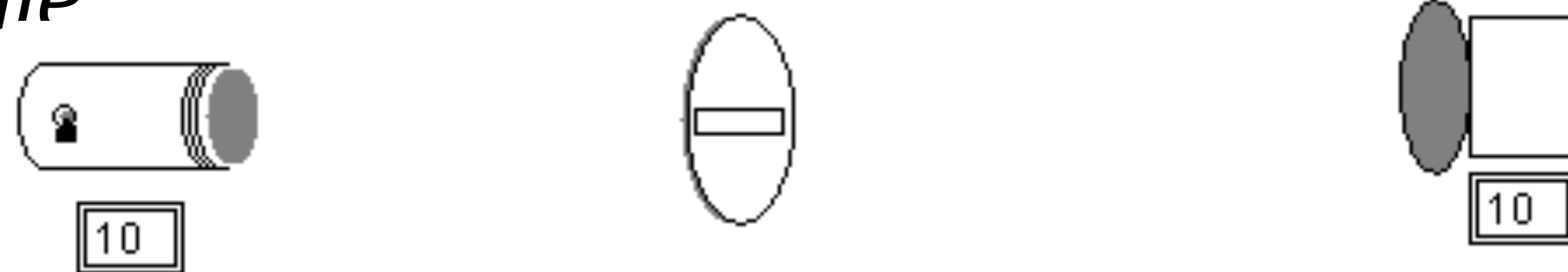
*Filtro a  $45^\circ$*



## Interpretazione interazione tra luce polarizzata e filtri in modello a fotoni

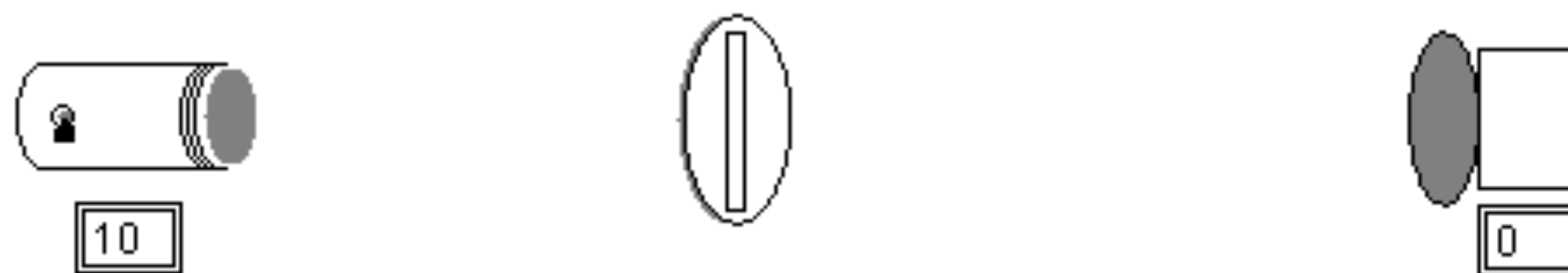
- inviamo 10 fotoni preparati con proprietà nota (a  $0^\circ$ ) su un filtro polarizzatore con direzione permessa nota
- contiamo il numero di fotoni trasmessi mediante rivelatore

*Filtro orizzontale*



Tutti i fotoni sono trasmessi

*Filtro verticale*



Nessun fotone viene trasmesso

*Filtro a  $45^\circ$*

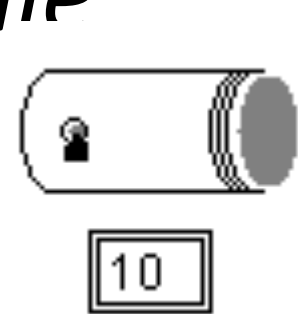


In media su molte prove  
la metà dei fotoni vengono trasmessi  
(l'accuratezza migliora per grandi numeri)

# Interpretazione interazione tra luce polarizzata e filtri in modello a fotoni

- inviamo 10 fotoni preparati con proprietà nota (a  $0^\circ$ ) su un filtro polarizzatore con direzione permessa nota
- contiamo il numero di fotoni trasmessi mediante rivelatore

Filtro orizzontale



frazione di fotoni trasmessi in media  
=  
frazione di intensità trasmessa secondo  
la legge di Malus  
=  
 $\cos^2(45^\circ) = 1/2$

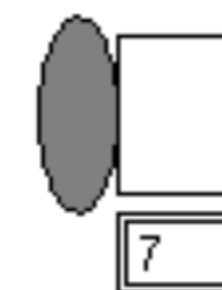
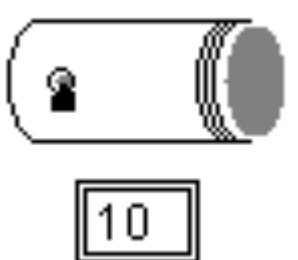
10 fotoni trasmessi

Filtro verticale



5 fotoni vengono trasmesso

Filtro a  $45^\circ$



In media su molte prove  
la metà dei fotoni vengono trasmessi  
(l'accuratezza migliora per grandi numeri)



# Approccio a due stati: Polarizzatori e Cristalli birifrangenti

Unità 1: Introduzione alla misurazione quantistica e alle osservabili (filtri e cristalli)

Unità 2: Lo stato quantistico e la sua rappresentazione formale

Unità 3: La sovrapposizione quantistica

Unità 4: La propagazione (cristalli)

Ora	Lunedì	Martedì	Mercoledì	Giovedì	Venerdì
09:30	Presentazione e introduzione	Introduzione MQ	Codifica in cammini e porte logiche	Esercizi	Estensione algoritmo di Deutsch
09:45					
10:00	Introduzione MQ	Introduzione MQ	PAUSA	PAUSA	PAUSA
10:15					
10:30	Introduzione MQ	Introduzione al calcolo quantistico	Seminario Prof. Maurizio Dabbicco	Algoritmo di Deutsch	Algoritmo di Grover
10:45					
11:00	PAUSA	PAUSA	Seminario Prof. Maurizio Dabbicco	Algoritmo di Deutsch	Algoritmo di Grover
11:15					
11:30	PAUSA	PAUSA	Seminario Prof. Maurizio Dabbicco	Algoritmo di Deutsch	Algoritmo di Grover
11:45					
12:00	Introduzione MQ	Introduzione al calcolo quantistico	Seminario Prof. Maurizio Dabbicco	Algoritmo di Deutsch	Algoritmo di Grover
12:15					
12:30	PAUSA PRANZO	PAUSA PRANZO	PAUSA PRANZO	PAUSA PRANZO	PAUSA PRANZO
12:45	Introduzione MQ	Seminario Dott. Scala	Calcolo a più qubit	Laboratorio di ottica per la computazione Prof.ssa Maria Bondani	Seminario Dott. Chesi "Quantum Cryptography"
13:00					
14:00	Introduzione MQ	Seminario Dott. Scala	Calcolo a più qubit	Laboratorio di ottica per la computazione Prof.ssa Maria Bondani	Seminario Dott. Chesi "Quantum Cryptography"
14:15					
14:30	Introduzione MQ	Seminario Dott. Scala	Calcolo a più qubit	Laboratorio di ottica per la computazione Prof.ssa Maria Bondani	Seminario Dott. Chesi "Quantum Cryptography"
14:45					
15:00	PAUSA	PAUSA	PAUSA	PAUSA	PAUSA
15:15	PAUSA	PAUSA	PAUSA	PAUSA	PAUSA
15:30	PAUSA	PAUSA	PAUSA	PAUSA	PAUSA
15:45	Introduzione alla logica classica	Porte logiche codificate in polarizzazione	Esercizi	Laboratorio di ottica per la computazione: algoritmo di Deutsch Prof.ssa Bondani	Verifica finale
16:00					
16:15	Introduzione alla logica classica	Porte logiche codificate in polarizzazione	Esercizi	Laboratorio di ottica per la computazione: algoritmo di Deutsch Prof.ssa Bondani	Verifica finale
16:15					
16:30	Introduzione alla logica classica	Porte logiche codificate in polarizzazione	Esercizi	Laboratorio di ottica per la computazione: algoritmo di Deutsch Prof.ssa Bondani	Verifica finale
16:45					
17:00	Conclusione	Conclusione	Conclusione	Conclusione	Conclusione
17:30					



THE END