



UNIVERSITÀ  
DI PAVIA

# Introduzione alla fisica quantistica con i cammini di Feynman per classi quarte: sperimentazione con studenti di liceo scientifico.



Malgieri M., **Sutrini C.**

Università degli studi di Pavia, ISS Taramelli Pavia  
(ITT Varalli Milano)

Arcavacata di Rende (CS), 18/09/2018

# Bubble

- Master IDIFO-6 Udine 2017-2019  
(Innovazione didattica in fisica e orientamento)
- Università Pavia PLS
- ISS Taramelli - Foscato, Pavia  
4 classi  $\approx$  80 studenti





UNIVERSITÀ  
DI PAVIA



# Obiettivi

## Obiettivi

### Concetti Chiave

### Bubble

### Lezioni 1 2 3

### Lezione 4

### Lezione 5

### Lezione 6

### Lezione 7

### Dati raccolti

### Conclusioni

### Modifiche

- Rompere con l'impostazione pseudo storica della FQ a favore di un'impostazione concettuale fin dal quarto anno
- Proporre un percorso impostato fortemente su modelli alternativi (ondulatorio - a cammini) inserito nella didattica tradizionale e anticipatore della proposta sulla FQ già formulata per le classi quinte
- Proporre la FQ come scienza razionale: fatti, linguaggio, regole
- Stabilire le reali possibilità e i limiti di un'esposizione il quarto anno
- Comprendere il grado di interesse suscitato negli studenti e nei colleghi



UNIVERSITÀ  
DI PAVIA



# Concetti chiave

Obiettivi

Concetti Chiave

Bubble

Lezioni 1 2 3

Lezione 4

Lezione 5

Lezione 6

Lezione 7

Dati raccolti

Conclusioni

Modifiche

- Modello
- Ondulatorio - A fotoni
- Interpretazione probabilistica dei fenomeni
- Linguaggio
- Visualizzazione dei modelli fisici



UNIVERSITÀ  
DI PAVIA



# Bubble

Obiettivi

Concetti Chiave

**Bubble**

Lezioni 1 2 3

Lezione 4

Lezione 5

Lezione 6

Lezione 7

Dati raccolti

Conclusioni

Modifiche

- **Lezione 1:** Iridescenza
- **Lezione 2:** Laboratorio doppia fenditura
- **Lezione 3:** Laboratorio diffrazione
- **Lezione 4:** Introduzione modello Feynman
- **Lezione 5:** Applicazioni modello (esercizi)
- **Lezione 6:** Laboratorio Geogebra (lamina sottile)
- **Lezione 7:** Sviluppo del modello (lamina sottile)





UNIVERSITÀ  
DI PAVIA



Obiettivi

Concetti Chiave

Bubble

Lezioni 1 2 3

Lezione 4

Lezione 5

Lezione 6

Lezione 7

Dati raccolti

Conclusioni

Modifiche

## MODELLO ONDULATORIO

meccanica classica

Lezione teorica

Laboratorio - Lezione teorica

Lezione teorica - Laboratorio

RIFLESSIONE  
LAMINA SOTTILE

INTERFERENZA  
FENDITURE

DIFFRAZIONE

## MODELLO A CAMMINI

rappresentazione  
probabilistica

Lezione teorica - Simulazione  
Geogebra - Problemi strutturati

Lezione teorica - Problemi  
strutturati

Lezione teorica - Geogebra



UNIVERSITÀ  
DI PAVIA



## Introduzione al modello a cammini

Obiettivi

Concetti Chiave

Bubble

Lezioni 1 2 3

Lezione 4

Lezione 5

Lezione 6

Lezione 7

Dati raccolti

Conclusioni

Modifiche

Modello ondulatorio

≠

Quantizzazione della luce



**Problema:** un modello corpuscolare classico non è adatto

**Soluzione:** prospettiva probabilistica



MODELLO FEYNMAN  
QED



## Nuovo linguaggio

Obiettivi

Concetti Chiave

Bubble

Lezioni 1 2 3

Lezione 4

**Lezione 5**

Lezione 6

Lezione 7

Dati raccolti

Conclusioni

Modifiche

**Postulato:** la luce è composta da oggetti discreti indivisibili detti fotoni, il cui comportamento non è paragonabile a quello delle particelle in senso classico.

- Regole:**
- il fotone viene emesso da una sorgente S e rilevato da un rivelatore R
  - si determinano tutti i possibili cammini che il fotone può percorrere compatibili con il sistema
  - ad ogni cammino si associa un fasore, la cui fase cambia lungo il cammino secondo la relazione  $\phi = (2\pi/\lambda) \cdot x$
  - si sommano i fasori con il modulo e la fase che hanno in R
  - la probabilità che il fotone sia rivelato in R è il quadrato del modulo del fasore risultante





## Applicazione del modello

Obiettivi

Concetti Chiave

Bubble

Lezioni 1 2 3

Lezione 4

**Lezione 5**

Lezione 6

Lezione 7

Dati raccolti

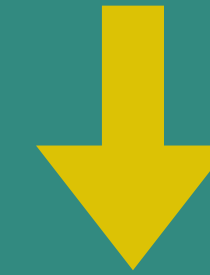
Conclusioni

Modifiche

- Doppia fenditura
- Tripla fenditura
- Fenditure in successione

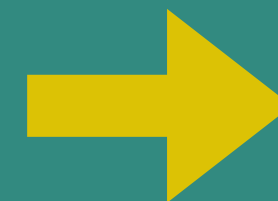


Schede di lavoro (lavoro a coppie)



- Comprensione attiva del modello
- Adeguamento del (al) linguaggio
- Analisi dati

- Diffrazione



- Sviluppo del modello
- Recupero dell'ottica geometrica
- Visualizzazione Geogebra



UNIVERSITÀ  
DI PAVIA



## Simulazione Geogebra

Obiettivi

Concetti Chiave

Bubble

Lezioni 1 2 3

Lezione 4

Lezione 5

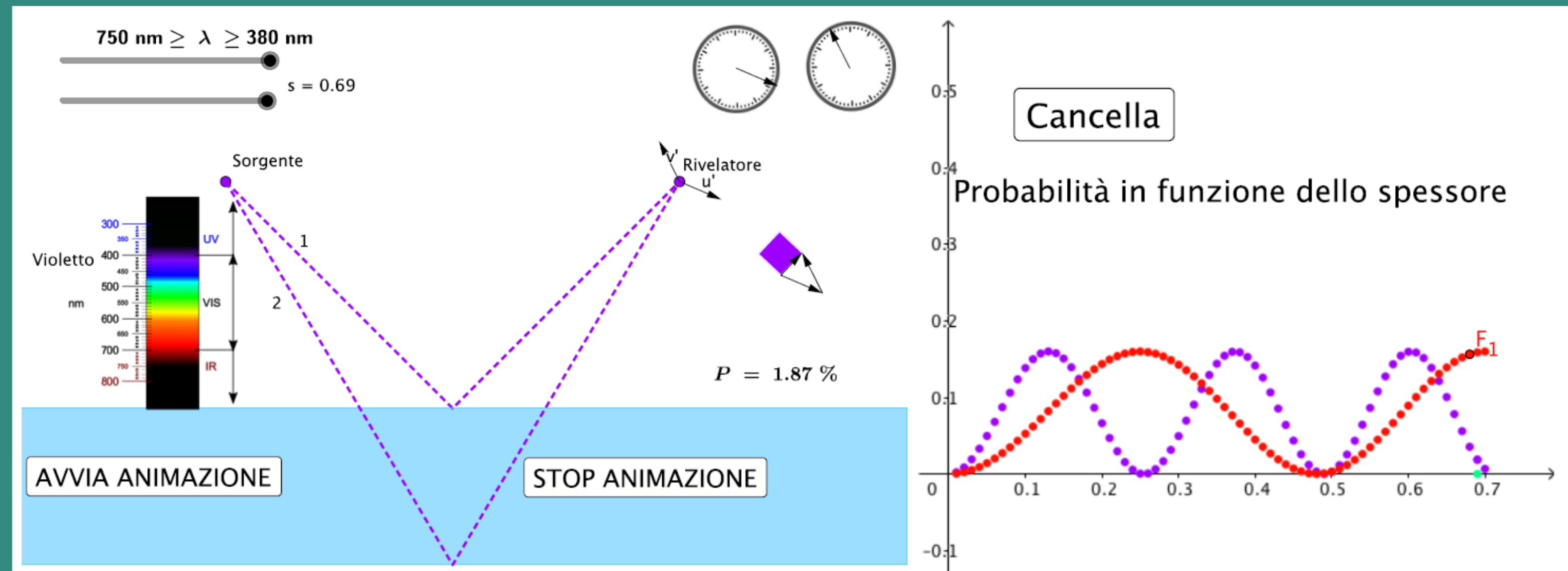
Lezione 6

Lezione 7

Dati raccolti

Conclusioni

Modifiche



Semplificazione:

- Unica lunghezza d'onda
- Vettori al posto dei numeri complessi



# Simulazione Geogebra

Obiettivi

Concetti Chiave

Bubble

Lezioni 1 2 3

Lezione 4

Lezione 5

Lezione 6

Lezione 7

Dati raccolti

Conclusioni

Modifiche

## PROTOCOLLO DI COSTRUZIONE GEOGEBRA

*Riflessione lastra sottile*

1. Si consideri una sorgente S (posta per comodità nel secondo quadrante  $S(-1;1)$ ) di luce monocromatica rossa ( $\lambda = 750 \text{ nm}$ ). Si ingrandisca il piano fino a contenere al massimo i valori compresi tra -3 e 3 sull'asse x per meglio visualizzare la costruzione.
2. Per mostrare come la probabilità di rivelazione in R di un fotone vari in funzione dello spessore della lamina si definisca uno **slider** s che determini la variazione di ordinata di un punto del quadrilatero che rappresenta la lamina sottile. In questo modo sarà possibile costruire una **animazione** in modo da far variare lentamente lo spessore e mostrare la funzione che esprime la probabilità in funzione di s. Lo slider abbia valore minimo 0.01, massimo 1 incremento 0.001 e velocità 0.2.
3. Rappresentare i vertici del quadrilatero di coordinate  $A(-2;0)$ ,  $B(-2;-s)$ ,  $C(2;-s)$  e  $D(2;0)$ . Si definisca il quadrilatero ABCD (**poligono**) e lo si colori di azzurro chiaro.
4. Ora considerare un rivelatore R che per comodità posizioniamo simmetricamente rispetto alla sorgente S.
5. Si costruiscano i due cammini (di lunghezza  $f$  e  $g$ ) tra sorgente e rivelatore: uno che si riflette sulla parte anteriore della lamina e uno su quella posteriore. Per quest'ultimo è necessario che il punto di incidenza vari con lo spessore della lamina.  
Per costruire il primo cammino si definisca un punto E sulla superficie anteriore e si costruisca la spezzata SER (**spezzata**). Per il secondo cammino si costruisca un punto F ottenuto come intersezione (**intersezione**) tra il lato del quadrilatero e l'asse y. Togliere tutti gli elementi e le etichette inutili ai fini della rappresentazione. I cammini, la sorgente S e il rivelatore R siano rossi.
6. Si definiscano le due fasi  $\varphi_1$  e  $\varphi_2$  associate ai due cammini. Per ragioni di grandezze si consideri  $\lambda = 0.75$ . Costruire quindi i due fasori con l'operatore vettore  $v(\text{modulo}; \text{fase})$  (Il modulo dei vettori deve essere 0.2 !!!). Si nominino i due fasori  $v_1$  e  $v_2$ .
7. Si trasli (**trasla**) quindi il secondo vettore in modo che il suo punto di applicazione sia F. Rinominare questo vettore traslato  $v_2$  e nascondere il precedente.
8. Per vedere come variano i fasori con il variare dello spessore si attivi l'animazione dello slider.
9. Poiché la probabilità è il quadrato del modulo della somma dei due fasori, si costruisca il vettore somma (traslando i due fasori in modo che siano consecutivi; il primo sia u. Per traslare il secondo si individui un punto G sulla punta di u e poi **trasla**( $v_2, x(G), y(G)$ ) e il quadrato (**poligono regolare**) di lato la lunghezza del vettore somma ottenuto congiungendo la coda di u con la punta di v (**vettore**). L'area di questo quadrato varino in funzione dello spessore della lamina. Il colore sia rosso.
10. In un secondo grafico si costruisca la funzione che esprime la probabilità in funzione dello spessore definendo un punto di coordinate (s, area del quadrato). Il grafico abbia lo stesso colore della sorgente di luce. Inserire il tasto CANCELLA con **ZoomAvanti[1]** nelle impostazioni per cancellare il grafico al clic.

- Guida per gli studenti nella realizzazione

- Aiuto a ripercorrere mediante un linguaggio adeguato la struttura logica del modello

- Garanzia di una corretta visualizzazione del modello



UNIVERSITÀ  
DI PAVIA



## Sviluppo del modello

Obiettivi

Concetti Chiave

Bubble

Lezioni 1 2 3

Lezione 4

Lezione 5

Lezione 6

Lezione 7

Dati raccolti

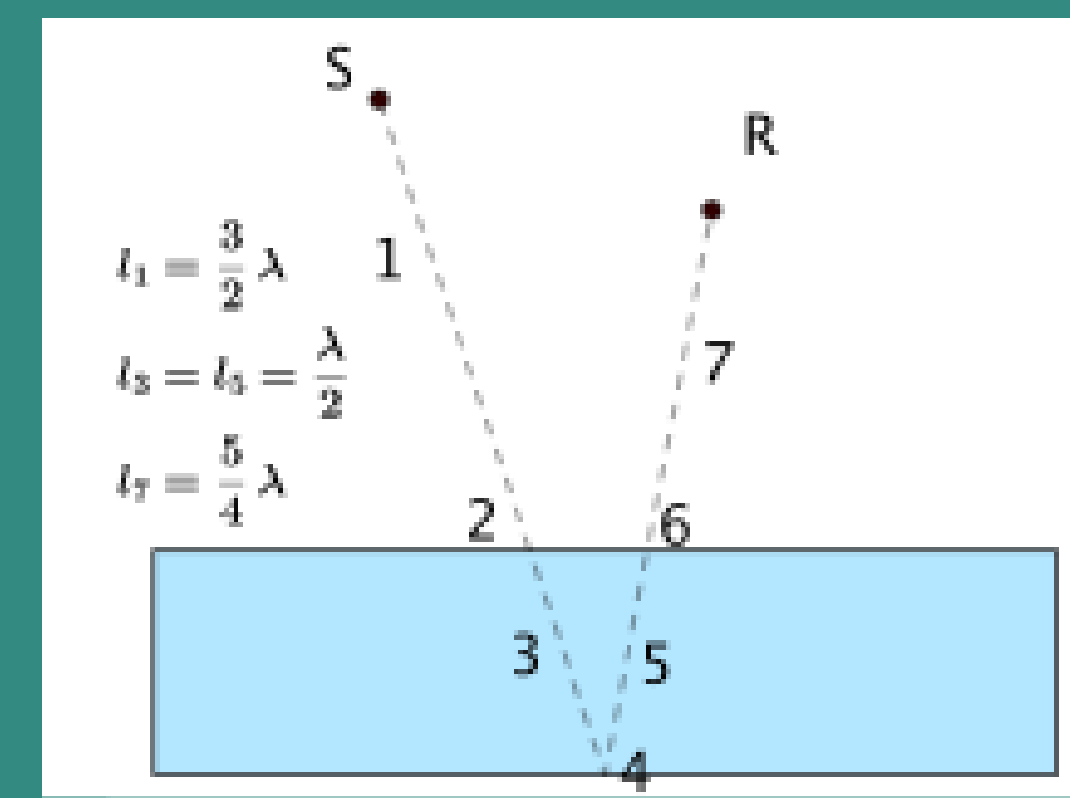
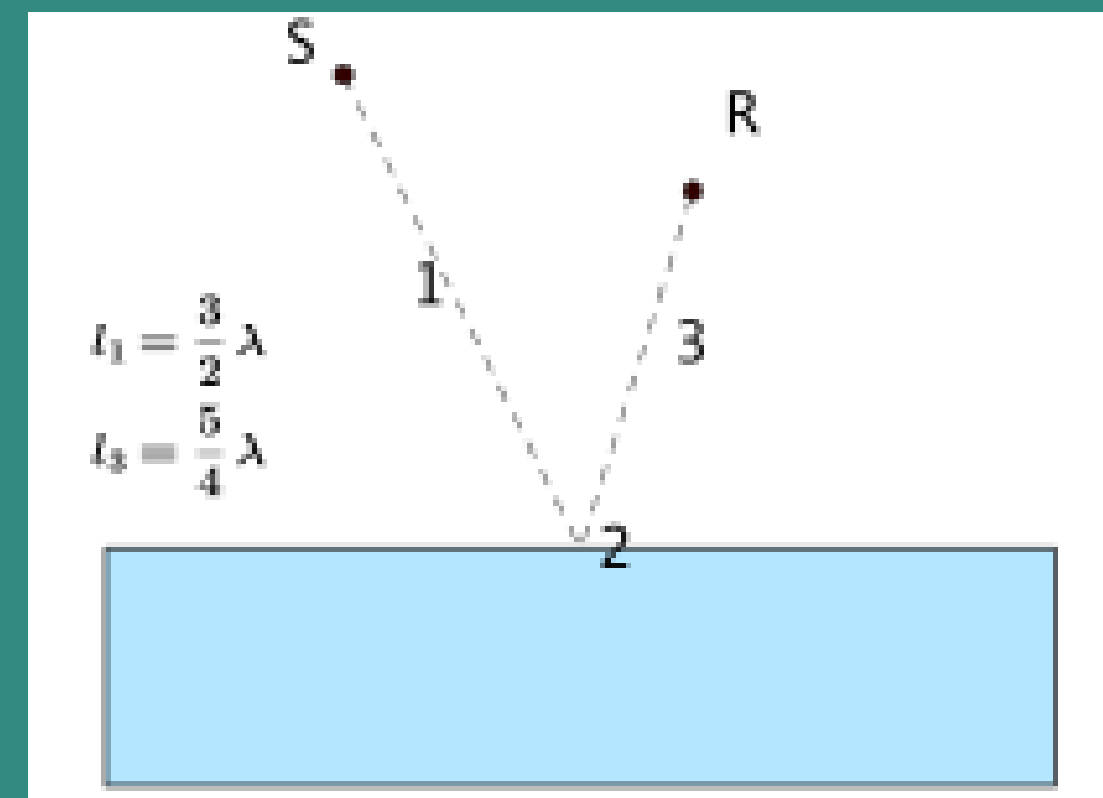
Conclusioni

Modifiche

Lamina sottile QED



Scheda di lavoro individuale





UNIVERSITÀ  
DI PAVIA



# Dati Raccolti

(in elaborazione)

Obiettivi

Concetti Chiave

Bubble

Lezioni 1 2 3

Lezione 4

Lezione 5

Lezione 6

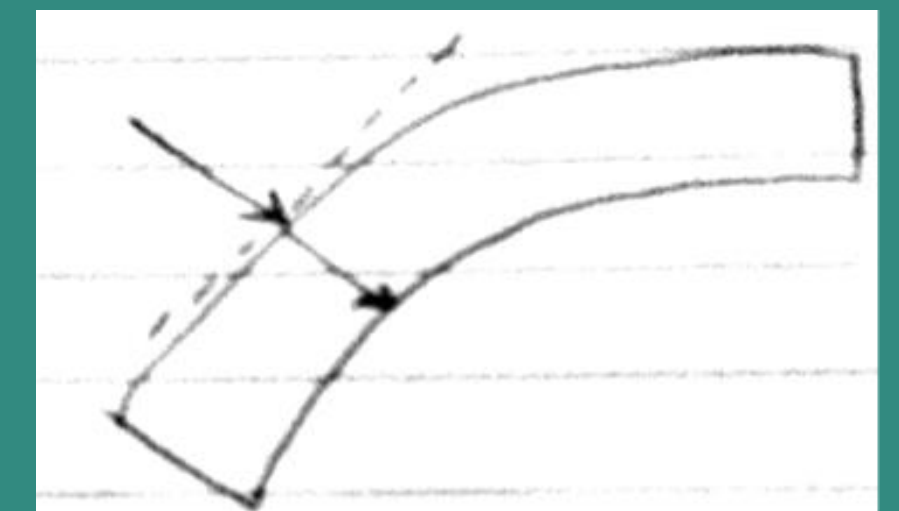
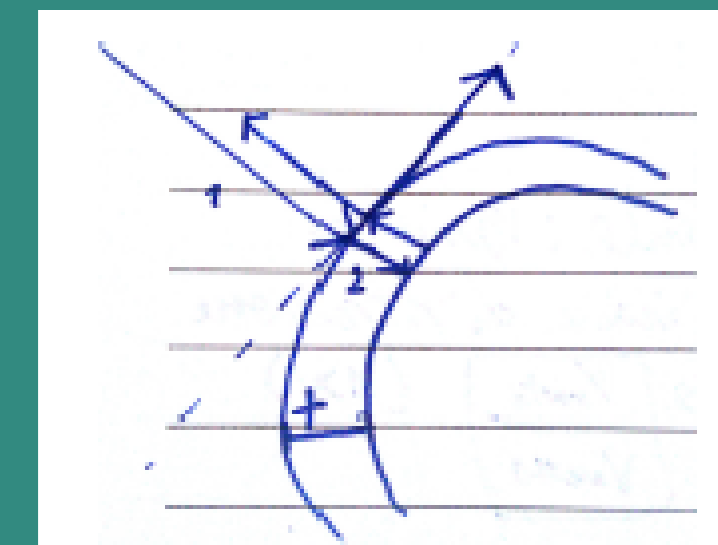
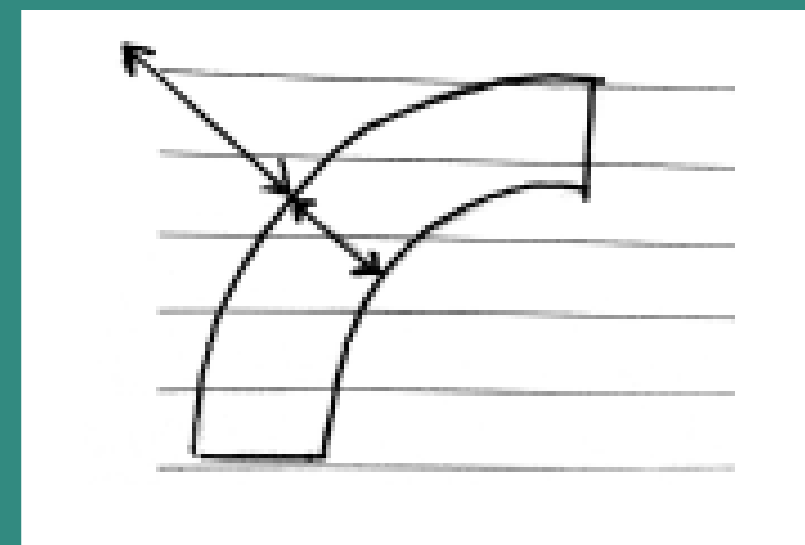
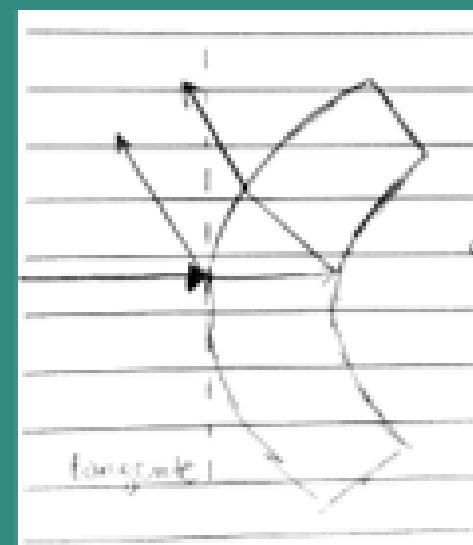
Lezione 7

**Dati raccolti**

Conclusioni

Modifiche

Riflessione lamina sottile: luce monocromatica in condizioni di quasi normalità







UNIVERSITÀ  
DI PAVIA



# Dati Raccolti

(in elaborazione)

Configurazioni di minimo di probabilità nel caso di tripla fenditura

Obiettivi

Concetti Chiave

Bubble

Lezioni 1 2 3

Lezione 4

Lezione 5

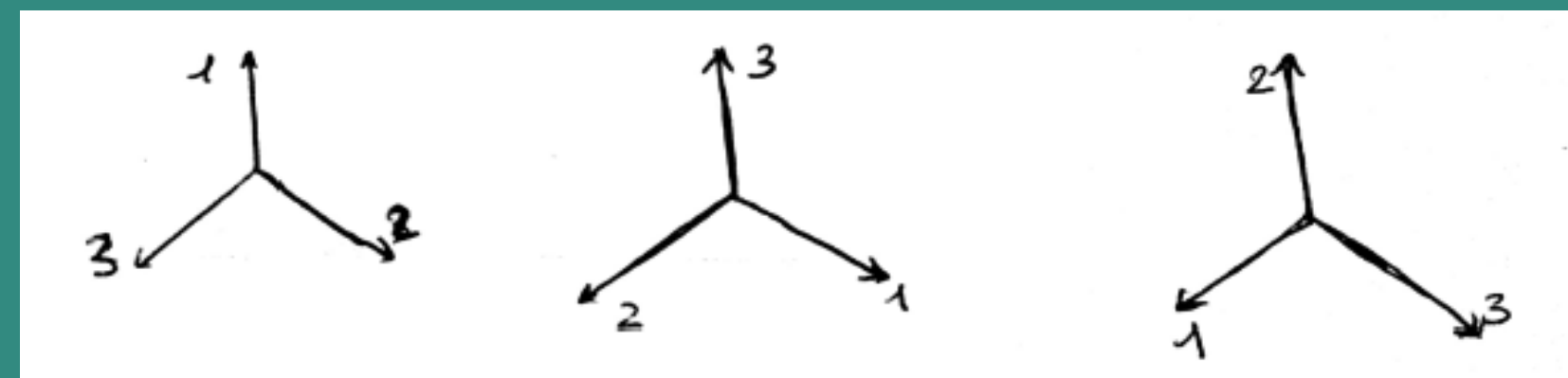
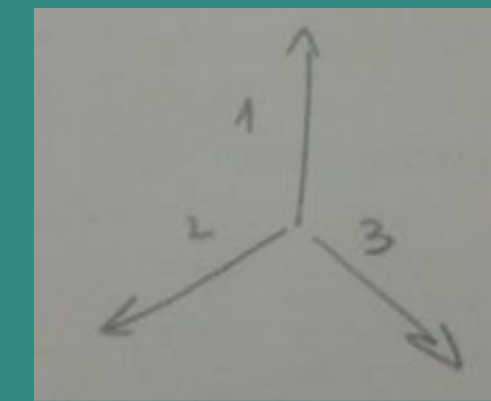
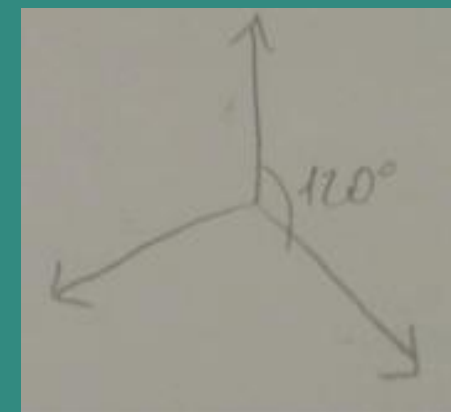
Lezione 6

Lezione 7

Dati raccolti

Conclusioni

Modifiche



Analisi Scheda 4: Fenditure multiple ( MINIMI ) ( 19 schede - 38 studenti )				
DOMANDE	CORRETTA E COMPLETA	CORRETTA E INCOMPLETA	ERRATA	BIANCA
4. Rappresentazione fasori	6 - 7	6 - 11	6 - 1	1 - 0



UNIVERSITÀ  
DI PAVIA



# Dati Raccolti (in elaborazione)

Obiettivi

Concetti Chiave

Bubble

Lezioni 1 2 3

Lezione 4

Lezione 5

Lezione 6

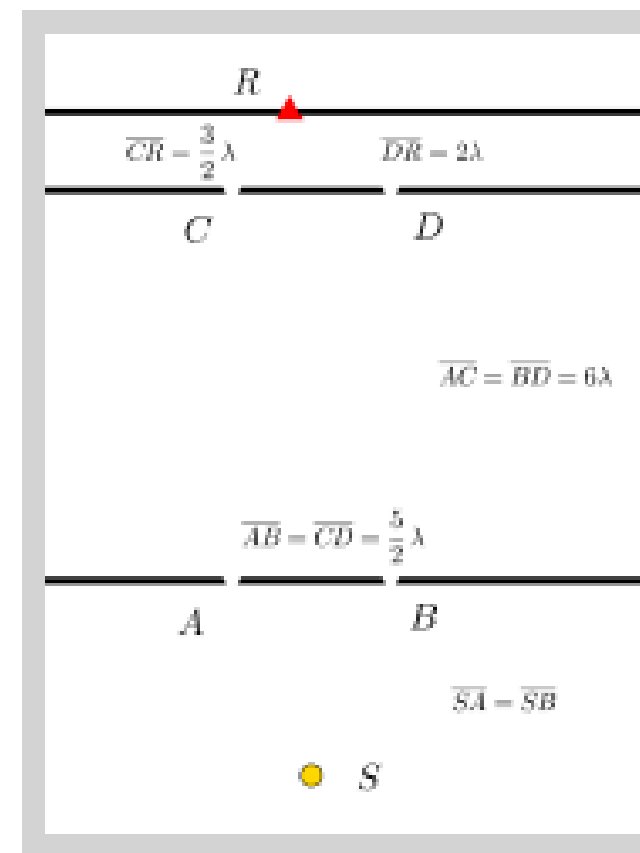
Lezione 7

Dati raccolti

Conclusioni

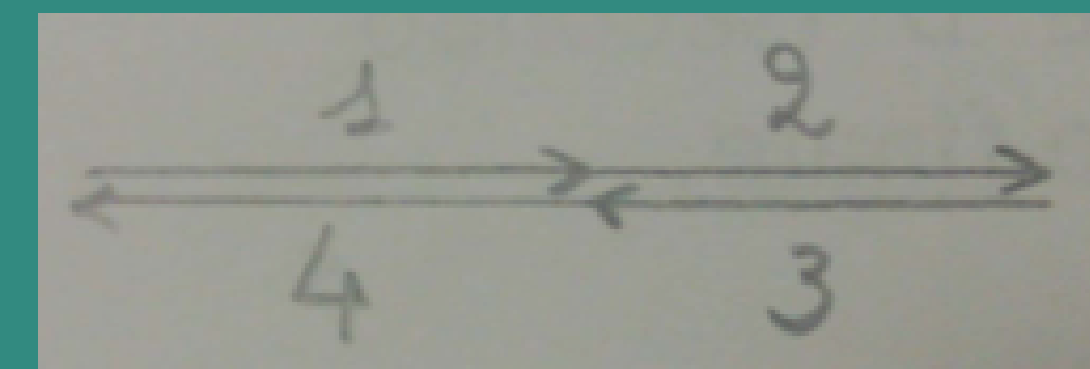
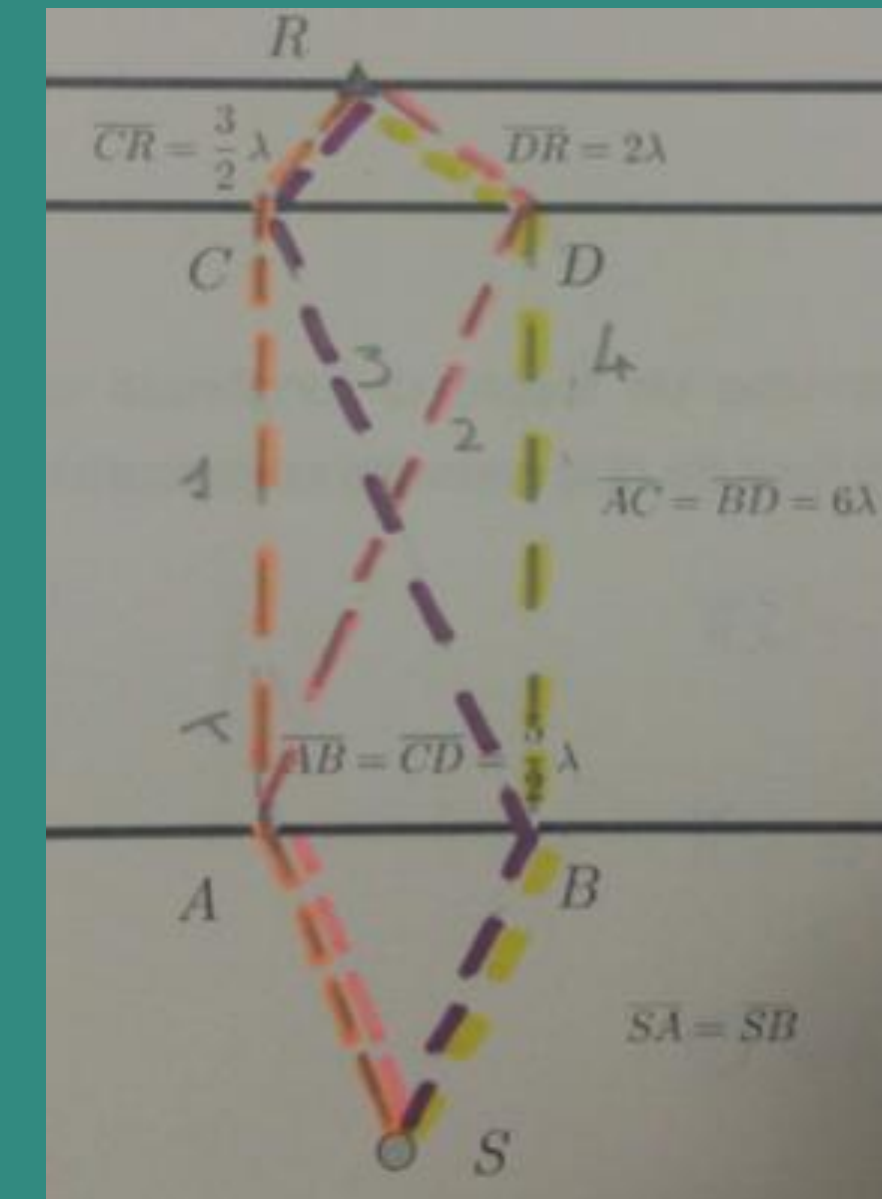
Modifiche

**BUBBLE: Scheda5**  
Fenditure in successione



Considerare il setup sperimentale descritto in figura, costituito da una sorgente  $S$  che emette un fotone di lunghezza d'onda  $\lambda$ , due schermi successivi con doppie fenditure  $A$  e  $B$  (primo schermo) e  $C$  e  $D$  (secondo schermo) e un rivelatore  $R$  su uno schermo finale. Considerare le fenditure puntiformi.

1. Rappresentare tutti i possibili cammini che il fotone percorre per andare dalla sorgente al rivelatore e indicarli con la successione di lettere corrispondenti.
2. Calcolare la lunghezza di ciascun cammino.
3. Associamo ad ogni cammino un fasore di lunghezza unitaria. Indicare le fasi  $\varphi_i$ . Esprimere la differenza di fase tra due cammini consecutivi  $\Delta\varphi_{i,i+1}$ .
4. Dalle informazioni ottenute sulle differenze di fase rappresentare geometricamente i quattro fasori associati ai quattro cammini.
5. Che probabilità c'è che il fotone sia rivelato da  $R$ ?



Esercizio interamente corretto 80%



UNIVERSITÀ  
DI PAVIA



# Conclusioni

Obiettivi

Concetti Chiave

Bubble

Lezioni 1 2 3

Lezione 4

Lezione 5

Lezione 6

Lezione 7

Dati raccolti

**Conclusioni**

Modifiche

- Il percorso proposto si è mostrato adatto a studenti del quarto anno sia sotto il profilo formale che concettuale.
- Gli esercizi proposti sono serviti a mettere in luce il modello a cammini e, in alcuni casi, sono stati risolti con semplicità.
- Lavorare su due modelli permette di problematizzare subito le diverse interpretazioni di alcuni fenomeni legati alla luce.
- Il materiale predisposto ha rappresentato una guida importante per il processo di formazione dei concetti e per lo sviluppo del linguaggio, ma necessita di ulteriore approfondimento (esercizi e schede di lavoro per le simulazioni con Geogebra).
- L'interesse suscitato negli studenti è stato rilevante soprattutto nella ricerca di una didattica più possibile laboratoriale (ridotte al minimo le lezioni frontali).



UNIVERSITÀ  
DI PAVIA



# Bubble

## (versione modificata)

Obiettivi

Concetti Chiave

Bubble

Lezioni 1 2 3

Lezione 4

Lezione 5

Lezione 6

Lezione 7

Dati raccolti

Conclusioni

Modifiche

- **Lezione 1** (1 ora): modello Feynman
- **Lezione 2** (2 ore): applicazioni del modello (esercizi fenditure)
- **Lezione 3** (1 ora): correzione esercizi e diffrazione
- **Lezione 4** (1 ora): diffrazione con Geogebra (doppia fenditura)
- **Lezione 5** (1 ora): lamina sottile con Geogebra
- **Lezione 6** (1 ora): sviluppo del modello con lamina sottile
- **Lezione 7** (1 ora): verifica scritta (esercizi con domande)