



Università degli Studi di Ferrara

SSIS Indirizzo FIM Classe A049 Ciclo VIII
Dissertazione Finale A.A. 2007/2008

Introduzione della Meccanica Quantistica nella Scuola Secondaria Superiore

Specializzando Dott. Mirco Andreotti
Supervisore Prof. Davide Neri
Relatore Prof. Diego Bisero



- Premesse
 - ✓ Inquadramento della MQ nella scuola
 - ✓ La MQ nei libri e su internet
 - ✓ Metodologie didattiche

- Intervento didattico
 - ✓ Premesse
 - ✓ Introduzione storica mirata
 - ✓ Costruzione delle basi della MQ

- Conclusioni



➤ La MQ nei programmi ministeriali

✓ Licei di ordinamento → cenni MQ solo nello scientifico

✓ PNI → tradizionale introduzione della MQ
dalla spettroscopia fino al principio di indeterminazione

✓ Brocca → vari indirizzi-tradizionale introduzione della MQ
+ approfondimenti di MQ nella tecnologia
+ esame di stato
- no MQ nell'indirizzo economico

Pressione sulla dualità onda-corpuscolo come nodo cruciale per la MQ (???)
→ molto importante per il percorso storico della MQ
→ necessita di approfondimento affinché rientri in uno schema teorico coerente

- Introduzione della MQ nella scuola si può fare
- Approfondimenti vari a seconda degli indirizzi e dell'esame di stato nel Brocca



➤ Testi dal 1996 al 2006 per Brocca

- ✓ Fotoelettrico, Compton, termoionico, doppia fenditura, calcoli onda-corpuscolo
- ✓ 2000 – quesito su onda-corpuscolo

Il candidato:

- spieghi il significato dell'espressione “*la radiazione ha un comportamento duale, ondulatorio e corpuscolare*” e descriva un esperimento che ha messo in evidenza il comportamento corpuscolare;
- spieghi il significato dell'espressione “*fu formulata l'ipotesi che la materia, considerata composta da particelle, potesse presentare caratteristiche ondulatorie*” e descriva un esperimento che ha confermato la realtà di questa ipotesi teorica;

- Come devono rispondere gli studenti a questi quesiti?
 - *secondo l'interpretazione onda-corpuscolo di de Broglie?*
 - *oppure secondo la corrente interpretazione della MQ secondo Born?*
- Quale risposta si aspetta chi ha formulato il quesito? Come giudicare?



➤ Libri di testo per la scuola

- ✓ Caforio-Ferilli (2005) → introduzione storica tradizionale completa con molti approfondimenti
 - non c'è evidente distinzione fra concetti e fenomeni più o meno importanti
- ✓ PPC (1990) → testo datato
 - introduzione storica tradizionale indirizzata all'aspetto sperimentale
 - ricco di schede di laboratorio

Per gli studenti è importante avere un testo completo...

- ✓ Insegnante
 - scelta accurata degli argomenti dal libro di testo
 - preparazione personale sulla MQ su testi universitari
Sakurai, Dirac, Born, Rossetti ...
 - eventuale integrazione con dispense



Approfondimenti storici – vita scientifica di Heisenberg

Applet

Stern-Gerlach Experiment

number of magnets: 1, 2, 3
angle: 0, 90
Reset

spin orientation:
+z ↑
+x ←
-z ↓
random xz

10315 (50.2%)
10246 (49.8%)

5152 (49.9%)
5163 (50.1%)

Franck-Hertz Experiment

Filament: 10.0 V
Grid: 10.0 V
Anode: 1.5 V, 75.4 mA

Gas: Neon (Ne), Mercury (Hg)

Filament Voltage (V_F): 0 to 10 V
Grid Voltage (V_G): 0 to 10 V

Plot: Clear

The Photoelectric Effect (1.00)

Intensity: 90%
392 nm

Current: 0.144

Target: Sodium

Graphs:
- Current vs. battery voltage
- Current vs. light intensity
- Electron energy vs. light frequency



- Ruolo disciplinare della MQ
 - ✓ *evidenziare la inadeguatezza dei ragionamenti intuitivo-classici*
 - ✓ *stimolo per una maggiore elasticità di pensiero*

- Inquadramento storico
 - ✓ *Evoluzione del pensiero e dei concetti della fisica*
 - ✓ *Percorso tortuoso per i fisici degli ultimi 100 anni*

- Metodologie del percorso didattico
 - ✓ *Introduzione storica mirata + esperimenti non collocati nel percorso storico (per tutti)*
 - *evidenziare i concetti e fenomeni fondamentali*
 - *uso di applet per una rappresentazione mentale dei fenomeni*

 - ✓ *Costruzione delle basi della MQ con esperimenti di polarizzazione dei fotoni (forse non per tutti)*
 - *gli studenti sono protagonisti dell'interpretazione dei risultati*
 - *gli studenti si scontrano con l'inadeguatezza dei ragionamenti intuitivo-classici come hanno fatto i grandi Fisici*



- Destinatari: Classe V Liceo PNI
- Prerequisiti

Fisica

1. proprietà elementari di elettroni e atomi (elettromagnetismo e chimica);
2. basi di ottica geometrica;
3. fenomeni di interferenza e diffrazione della luce;
4. luce come onda elettromagnetica e spettro elettromagnetico;
5. polarizzazione della luce;
6. comportamento di cariche elettriche in campi elettrici;
7. cenni di cinematica relativistica.

Matematica

1. Piano cartesiano;
2. vettori nel piano, vettori di base nel piano e loro combinazioni lineari;
3. vettori ortogonali e prodotto scalare nel piano;
4. vettori linearmente indipendenti e dipendenti nel piano;
5. circonferenza goniometrica e funzioni goniometriche;
6. basi di probabilità e statistica;



Intervento didattico – Premesse

1. Obiettivi generali

- a) Acquisire gli obiettivi specifici previsti per questo percorso didattico;
- b) comprendere l'utilità della fisica nelle diverse discipline, scientifiche e non;
- c) comprendere l'utilità di possedere una conoscenza elastica dei fenomeni fisici al fine di comprendere e saper spiegare i fenomeni che si incontrano tutti i giorni;
- d) riconoscere i fenomeni fisici negli ambiti di tutti i giorni al fine di non pensare la fisica come un groviglio di leggi scritte solo sui libri;

2. Obiettivi trasversali

- a) Sviluppare l'attitudine alla comunicazione e alla cooperazione con gli altri studenti e con il docente;
- b) aumentare le proprie conoscenze e la propria preparazione nell'ambito della fisica;
- c) abituare e approfondire all'osservazione e all'uso dell'intuito e del ragionamento per la schematizzazione;
- d) sviluppare e ampliare la capacità di riconoscere relazioni logiche e nessi causali;

3. Obiettivi specifici

- a) Conoscenze
 - i. sviluppo storico, non approfondito, della nascita della meccanica quantistica;
 - ii. applicazioni nella vita quotidiana della meccanica quantistica;
 - iii. i concetti fondamentali sui quali si costruisce l'argomento e loro formulazione;
- b) Competenze
 - i. essere in grado di interpretare un fenomeno quantistico con i concetti fondamentali della meccanica quantistica;
 - ii. essere in grado di vedere come certe situazioni in meccanica quantistica non possono trovare analogie classiche;
- c) Capacità
 - i. essere in grado di comprendere e risolvere semplici esercizi di meccanica quantistica con le regole delle probabilità;
 - ii. essere in grado di comprendere i problemi e le loro soluzioni in meccanica quantistica.



Intervento didattico – Premesse

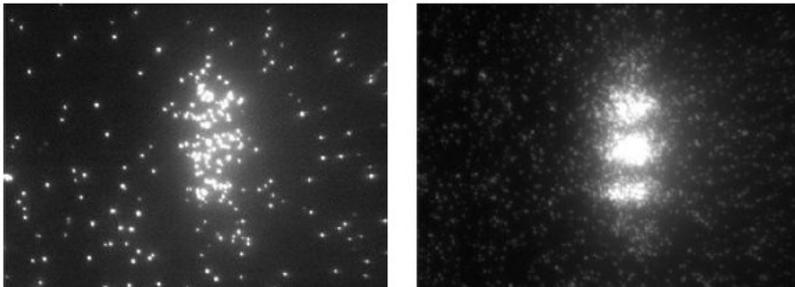
➤ Contenuti e tempi dell'intervento didattico

Attività	Lezione (Ore)	Laboratorio (Ore)	Totale (Ore)
Introduzione storica mirata			
-L'atomo di Rutherford			
-Quantizzazione dell'energia	2	1	3
-Comportamento corpuscolare della luce			
-Comportamento ondulatorio della materia	2	0	2
-Dualità onda-corpuscolo	1	0	1
-La meccanica ondulatoria			
-La contraddizione del dualismo onda-corpuscolo			
-La MQ in tasca: l'effetto tunnel	1	0	1
Costruzione delle basi della MQ			
-Esperimenti sulla polarizzazione e loro interpretazione			
-Il principio di sovrapposizione			
-Il processo di misura in MQ			
-Il principio di indeterminazione	3	2	5
Approfondimenti vari	2	0	2
Verifica sommativa	2	0	2
Totale	13	3	16



Intervento didattico – Introduzione storica mirata

- 1908-1911 Atomo di Rutherford → *non spiega la stabilità e le righe spettrali*
- 1913 Atomo di Bohr → *introduce le orbite privilegiate* → **concetto non classico**
- 1905 Effetto fotoelettrico → *Einstein ipotizza la **quantizzazione della luce***
- *Approfondimento con applet*
- Comportamento corpuscolare della luce → *esperimenti con singoli fotoni (1988)*
- *approfondimento con applet effetto Compton*



- ✓ La luce è costituita da corpuscoli
- ✓ Non sono corpuscoli classici
- ✓ Hanno un comportamento ondulatorio
- ✓ l'intensità dell'onda → numero di corpuscoli



Intervento didattico – Introduzione storica mirata

- 1927 Comportamento ondulatorio della materia
 - *elettroni fanno diffrazione e interferenza come la luce*
 - *esperimenti di diffrazione e interferenza con singoli elettroni (2003)*
→ *Gli e^- si distribuiscono sullo schermo con una **probabilità corrispondente alla figura di interferenza***

- 1924 de Broglie: dualità onda-corpuscolo
 - ✓ *Onde em e fotoni*

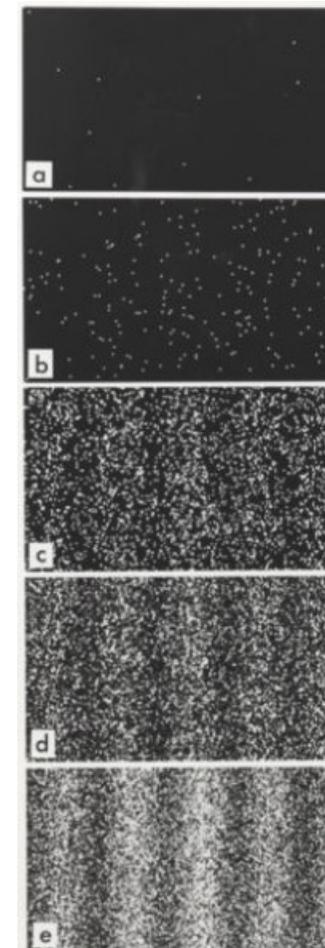
$$\begin{aligned} \text{Onda em con } \lambda &\mapsto \text{Fotone con } p = \frac{h}{\lambda} \\ \text{Fotone con } p &\mapsto \text{Onda em con } \lambda = \frac{h}{p} \end{aligned}$$

 - ✓ *Particelle e onde di materia*

$$\begin{aligned} \text{Onda di materia con } \lambda &\mapsto \text{Particella con } p = \frac{h}{\lambda} \\ \text{Particella con } p &\mapsto \text{Onda di materia con } \lambda = \frac{h}{p} \end{aligned}$$

- *Microscopico e macroscopico*
 - ✓ *Effetti ondulatori a confronto (approfondimento con l'esercizio svolto)*
 - *micro: e^- accelerato da $V \rightarrow \lambda \sim 10^{-10}$ - 10^{-11} m (\sim raggi X)*
 - *macro: proiettile $\rightarrow \lambda \sim 10^{-34}$ m*

- 1924-1925 Cenni di
 - *meccanica ondulatoria di Schrödinger*
 - *interpretazione di Copenaghen di Heisenberg e Bohr*





➤ Contraddizione dualità onda-corpuscolo

- *Come si può collocare in un quadro teorico coerente un ente fisico che a volte è onda altre volte è particella?*
- *Come si può immaginare questo ente fisico che nello stesso esperimento per un po' è onda poi diventa corpuscolo?*
- *...???*

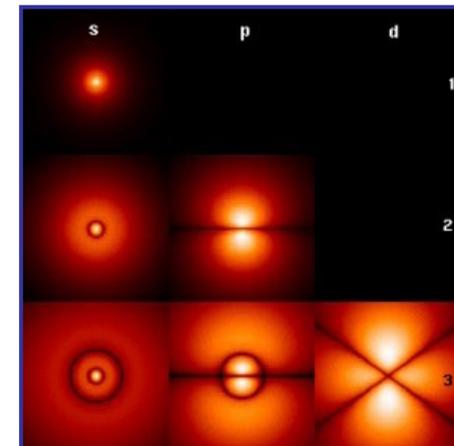
➔ **Born concilia il comportamento ondulatorio e corpuscolare in termini di probabilità:**

- ➔ *ψ funzione d'onda soluzione dell'eq di Schrödinger → $|\psi|^2$ probabilità di uno stato*
- ➔ *I corpuscoli (NON sono corpuscoli classici) si comportano secondo l'onda di probabilità*

➔ Interpretazione di Copenaghen della MQ:

- ➔ *predice i risultati in termini di probabilità*
- ➔ *non dice cosa sono i corpuscoli*
- ➔ *non dice cosa avviene durante il processo di misura*

➔ **Approfondimento orbitali dell'atomo di idrogeno** ➔



➤ La MQ in tasca: effetto tunnel nei MOSFET ➔ telepass



Intervento didattico – Costruzione delle basi della MQ

➤ In analogia con:

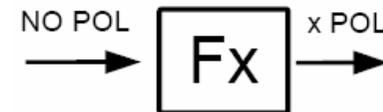
- ✓ esperimenti di Stern-Gerlach (Sakurai)
- ✓ comportamento di fotoni polarizzati (Dirac + progetti proposti per la scuola)

➔ Proponiamo esperimenti di polarizzazione della luce
 ➔ interpretati in termini di fotoni polarizzati



Incompatibilità fra i risultati e una loro interpretazione fondata su ragionamenti intuitivo-classici

➔ Misura di polarizzazione dei fotoni



➔ **Ipotesi intuitivo classica:** il fascio iniziale è una miscela di fotoni $|P_x\rangle, |P_{x'}\rangle, |P_{x''}\rangle \dots$

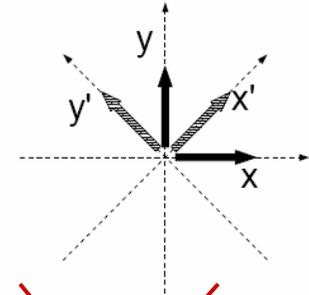
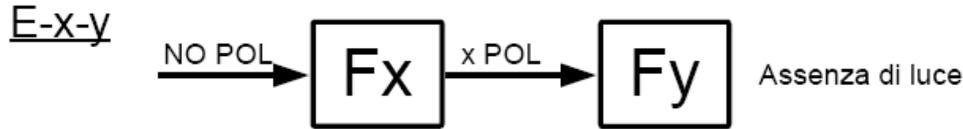
$$\begin{aligned}
 100 \text{ fotoni } |P_?\rangle &\rightarrow \boxed{F_x} \rightarrow 50 \text{ fotoni } |P_x\rangle \\
 100 \text{ fotoni } |P_?\rangle &\rightarrow \boxed{F_{x'}} \rightarrow 50 \text{ fotoni } |P_{x'}\rangle \\
 100 \text{ fotoni } |P_?\rangle &\rightarrow \boxed{F_{x''}} \rightarrow 50 \text{ fotoni } |P_{x''}\rangle
 \end{aligned}$$

➔ Conduce a delle contraddizioni ➔ il fascio iniziale non è una miscela, cosa è?



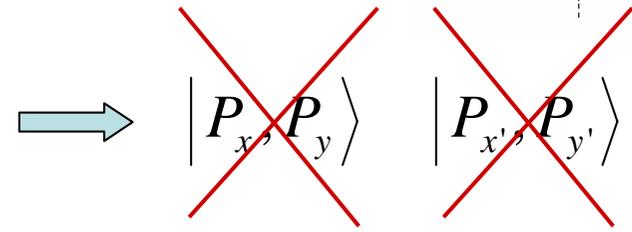
Intervento didattico – Costruzione delle basi della MQ

→ Esperimenti sequenziali di polarizzazione

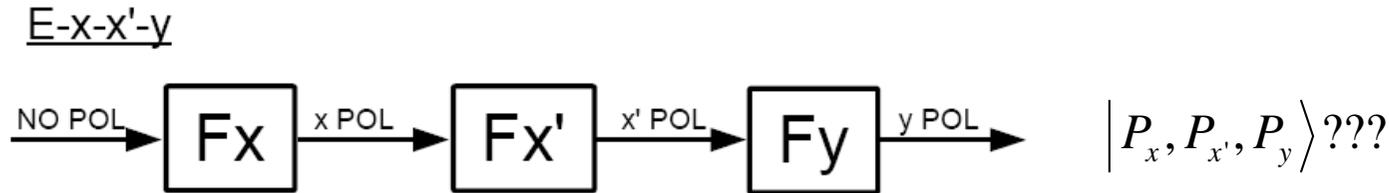
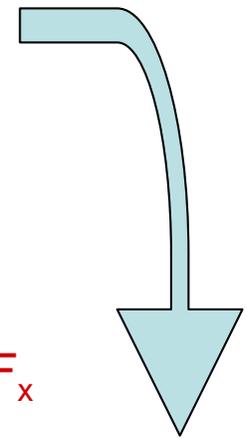


→ Stati di polarizzazione ortogonali

$$|P_x\rangle, |P_y\rangle \text{ e } |P_{x'}\rangle, |P_{y'}\rangle \xrightarrow{\text{riferimento ai vettori nel piano}} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$



?) domanda: gli stati $|P_x, P_{x'}\rangle$, $|P_x, P_{y'}\rangle$... possono esistere?



→ Bizzarra ricomparsa di fotoni $|P_y\rangle$ eliminati in precedenza da F_x

$$\langle \cancel{P_x}, \cancel{P_y} \rangle \Rightarrow \langle P_x, \cancel{P_{x'}}, P_y \rangle \Rightarrow \langle P_x, \cancel{P_{x'}} \rangle$$

NO



- I risultati trovano interpretazione coerente introducendo
il **Principio di sovrapposizione degli stati**

$$|P_{x'}\rangle = c_x |P_x\rangle + c_y |P_y\rangle$$

NON c'è nessuna analogia classica!!!

$$|P_x\rangle = c_{x'} |P_{x'}\rangle + c_{y'} |P_{y'}\rangle$$

→ Il processo di misura in MQ

- Introduzione delle osservabili P_{xy} e $P_{x'y'}$
- Processo di misura modifica il sistema in un autostato dell'osservabile con una certa probabilità
- P_{xy} e $P_{x'y'}$ sono incompatibili

→ Il principio di indeterminazione di Heisenberg riferito alle osservabili incompatibili



Estensione alle osservabili continue

$$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2}$$



Intervento didattico – Verifica sommativa

A.1 Testo della verifica

Quesito 1. (2 punti)

Si spieghi sinteticamente su quale ipotesi non classica si basa il modello atomico di Bohr.

Quesito 2. (5 punti)

Si consideri un fascio di particelle identiche di massa $m = 10^{-8} g$ che si muovono ad una velocità $v = 10^5 m/s$ verso una fenditura di larghezza d . Quanto deve essere l'ordine di grandezza della dimensione della fenditura affinché sullo schermo possano risultare evidenti effetti quantistici?

Quesito 3. (3 punti)

Si consideri l'apparato sperimentale per lo studio dell'effetto fotoelettrico. Ci si chiede quanti fotoni al secondo devono incidere sull'elettrodo affinché la corrente fra i due elettrodi dovuta agli elettroni sia $I \approx 1 nA$. Si supponga di essere nelle condizioni in cui l'effetto fotoelettrico si verifica. Si consideri per semplicità la carica dell'elettrone $e = 1.6 \cdot 10^{-19} C$.

Quesito 4. (3 punti)

Si consideri l'effetto fotoelettrico sul sodio, il quale ha un potenziale di estrazione pari a $W_{Na} = 4.17 J$. Si determini quale è il valore della lunghezza d'onda massima oltre la quale non si verifica l'effetto fotoelettrico.

Quesito 5. (3 punti)

Per quale motivo un modello atomico in cui l'elettrone ruota attorno al protone non può esistere nella realtà classica? Rispondere sinteticamente in non più di cinque righe.

Quesito 6. (8 punti)

Si consideri un esperimento di polarizzazione sequenziale della luce composto da un primo filtro F_x e un secondo filtro F_x' . Supponiamo di avere un singolo fotone in uno stato

$$|\alpha\rangle = \sqrt{\frac{2}{3}}|Px\rangle + \sqrt{\frac{1}{3}}|Py\rangle$$

che va ad incidere sul primo filtro. Si determinino le probabilità:

1. P_1 che il fotone esca dal primo filtro; (3 punti)
2. P_2 che il fotone esca dal secondo filtro; (5 punti)

Griglia punti

Quesito	Punti
Quesito 1	2
Quesito 2	5
Quesito 3	3
Quesito 4	3
Quesito 5	3
Quesito 6	(8)
-Domanda 1	3
-Domanda 2	5
Totale punti	24

Griglia corrispondenza

Punti	Voto
0-2	1-2
3-5	3
6-8	4
9-11	5
12-14	6
15-17	7
18-20	8
21-22	9
23-24	10



Conclusioni

- Una trattazione moderna della MQ rischia di discostarsi dai programmi ministeriali
 - ✓ *Problema per l'esame di stato nel Brocca*
 - ✓ *Nessun problema per gli altri licei*

- Percorso storico focalizzato su pochi aspetti importanti
 - ✓ *Approfondimento per una trattazione più matura della dualità onda-corpuscolo*

- Attività alternativa per la costruzione delle basi della MQ
 - ✓ *Inadeguatezza del ragionamento intuitivo-classico degli studenti per spiegare il fenomeno di polarizzazione*

- Il progetto è ambizioso, meriterebbe una sperimentazione diretta

This document was created with Win2PDF available at <http://www.win2pdf.com>.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.
This page will not be added after purchasing Win2PDF.