

CAPIRE L'INIMMAGINABILE: LA MECCANICA QUANTISTICA

SIMONE BARONI
PESARO, 11 OTTOBRE 2024

COME PORTARE LA MECCANICA QUANTISTICA IN AULA

1. GLI ARGOMENTI

METODO 1: SEGUENDO L'ORDINE STORICO DELLE SCOPERTE

1. La scoperta del mondo dei quanti (1900)
2. La prima rivoluzione quantistica (1913-1927)
3. L'intricazione quantistica (1935-2024)
4. Applicazioni della meccanica quantistica (1930-2024)
5. La seconda rivoluzione quantistica (1998-2024)

METODO 2: A SALTII, SCEGLIENDO CONCETTI SPECIFICI

Per es.:

- Il Principio di Indeterminazione di Heisenberg e il Primo Teorema di Noether
- La non-località delle leggi di Natura e l'intricazione quantistica
- Il teletrasporto quantistico
- Il dualismo onda-particella
- I computer quantistici

COME PORTARE LA MECCANICA QUANTISTICA IN AULA

2. GLI STRUMENTI CATALIZZANTI

ESPERIMENTI IN AULA

- Lo spin e l'induzione e.m.
- La nascita della meccanica quantistica e la creazione di onde stazionarie
- ...

GIOCHI DI RUOLO

- Lunapark, partecipanti con budget totale fissato.
Concetto: come la quantizzazione dell'energia risolve il problema del corpo nero.
- ...

DOMANDE O LETTURE STIMOLANTI

- È tutto già scritto? O abbiamo veramente libertà di scelta?
- Perché i filamenti del tostapane diventano rosso fuoco?
- Libri o articoli da leggere
- ...

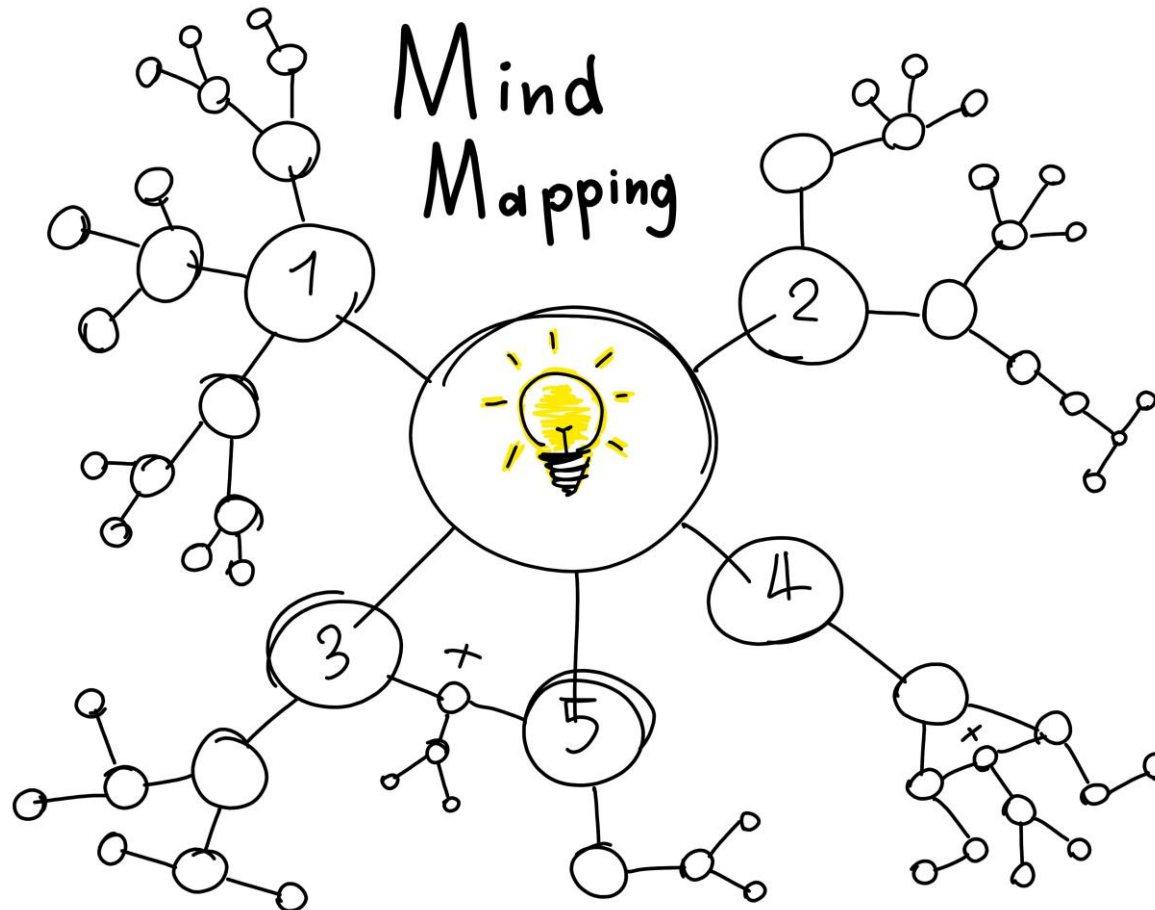
QUIZ ABCD

- Perché Einstein attacca la meccanica quantistica nel 1935?
- Chi disse «Davvero credi che la Luna non esista quando non la osservo?» e perché?

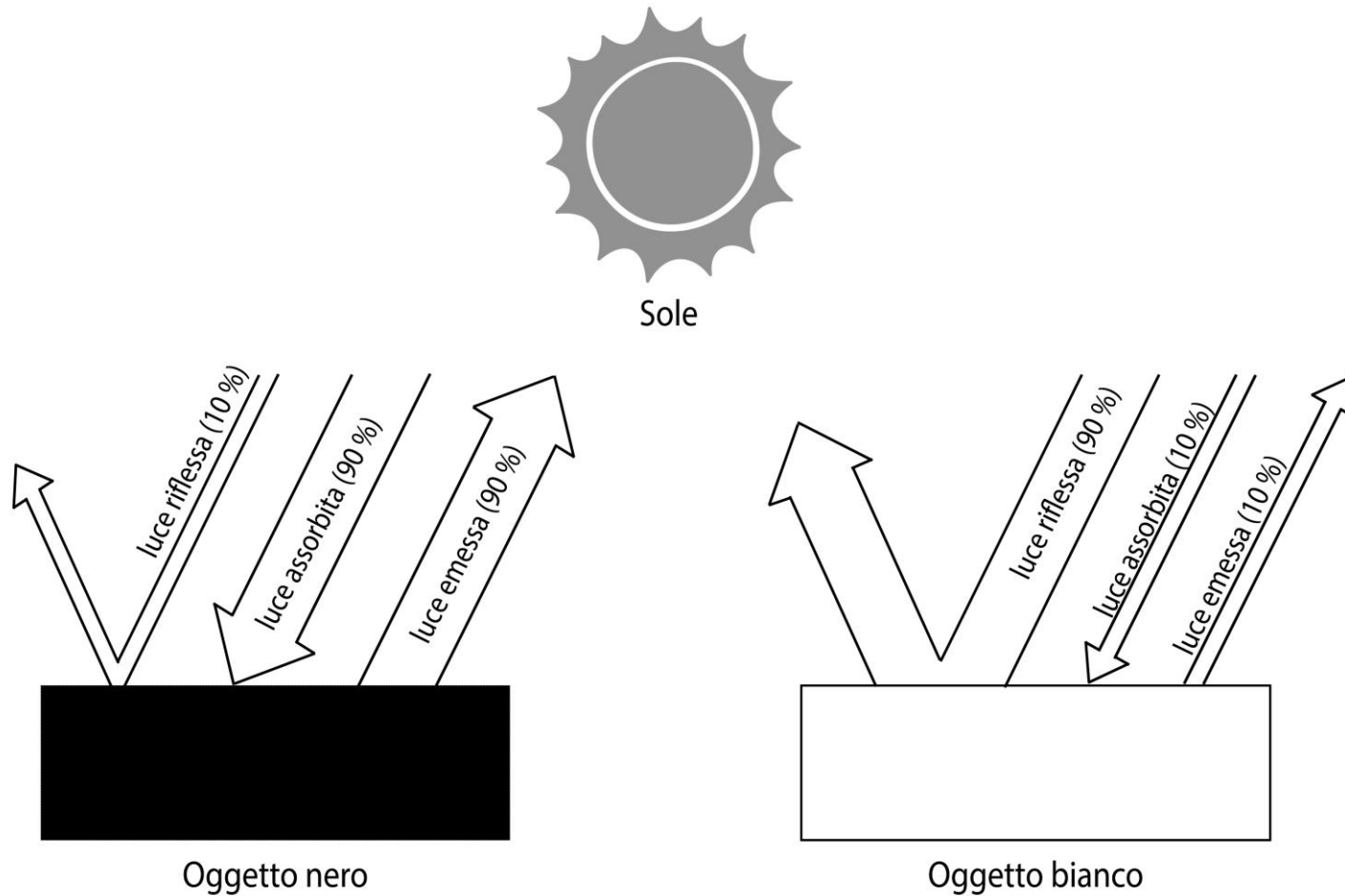
COME PORTARE LA MECCANICA QUANTISTICA IN AULA

3. I COLLEGAMENTI CON IL RESTO DEL PROGRAMMA

MAPPE MENTALI PER INTRODURRE IL CONCETTO
O IN CUI IL CONCETTO È IL PUNTO DI PARTENZA



ESPERIMENTO: CORPO NERO E CORPO BIANCO



Credit: Simone Baroni, “La meccanica quantistica – Volume I” (2024)

ESPERIMENTO: CORPO NERO E CORPO BIANCO

Concetti principali:

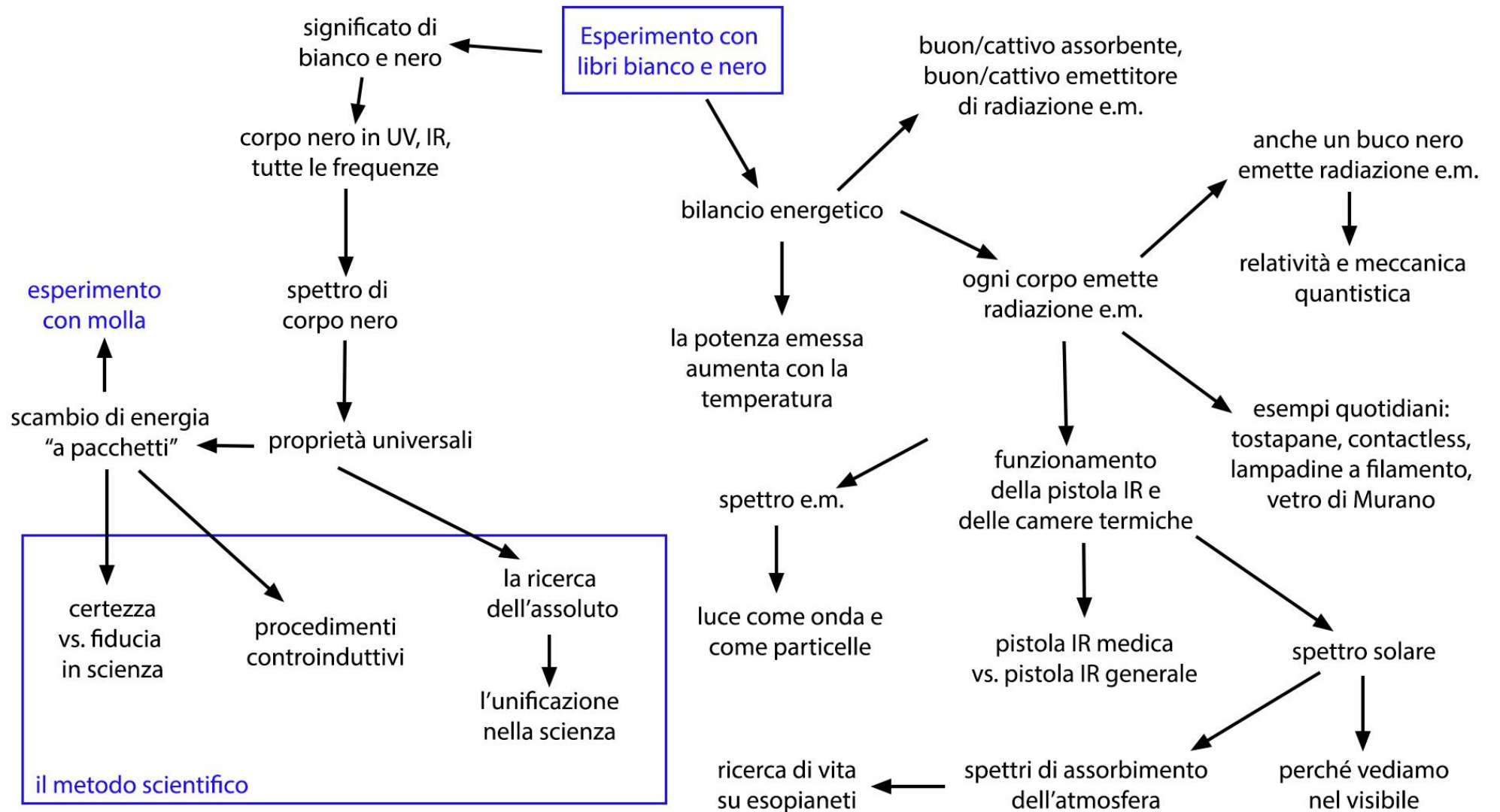
- Ogni corpo emette radiazione e.m. tutto il tempo
- A temperatura ambiente si tratta di radiazione IR
- Un corpo nero assorbe (quasi) tutta la luce visibile

Concetti avanzati:

- Spettro e.m.
- Quantizzazione dell'energia
- Potenza emessa dai corpi
- Leggi universali e unificazione delle teorie scientifiche



ESPERIMENTO: CORPO NERO E CORPO BIANCO



ESPERIMENTO:

CORPO NERO E CORPO BIANCO

Materiale:

- Pistola IR
- 1 libro bianco e uno nero, con copertina non lucida, con meno scritte possibile
- Una lampadina da 3500 lumens, con supporto e prolunga

Come si esegue l'esperimento:

- Posizionare i due libri in verticale e la lampadina alla stessa distanza dai due libri (circa 2 centimetri).
- Accendere la lampadina e attendere qualche minuto.
- Rimuovere la lampadina e misurare la temperatura dei punti dei 2 libri che erano più prossimi alla lampadina.

ESPERIMENTO:

CORPO NERO E CORPO BIANCO

Alcune domande per stimolare la discussione:

- (Prima di mostrare l'esperimento) Al Sole è meglio indossare una maglietta nera o una bianca? Perché?
- Il libro nero si è scaldato di più. Perché?
- Cosa significa "nero"? E cosa significa "bianco"?
- La temperatura dei due libri rimane costante. Cosa possiamo dedurre? Se un conto in banca riceve bonifici continuamente, ma il saldo rimane costante, cosa possiamo dedurre?
- Emette più radiazione un corpo nero o uno bianco?
- Assorbe più radiazione un corpo nero o uno bianco?
- Di quale porzione dello spettro e.m. parliamo?

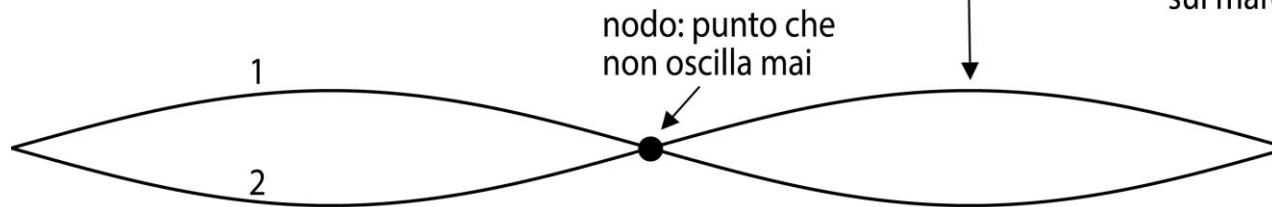
ESPERIMENTO:

ONDE STAZIONARIE CON UNA MOLLA ELICOIDALE

Armonica fondamentale (o prima armonica):

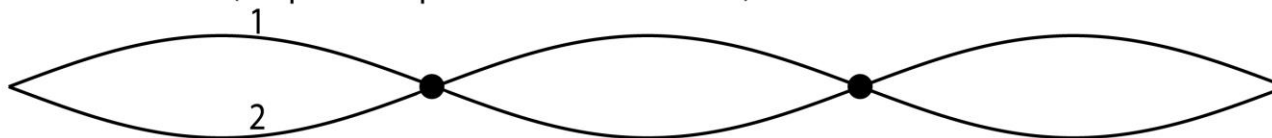


Seconda armonica (frequenza doppia della fondamentale):

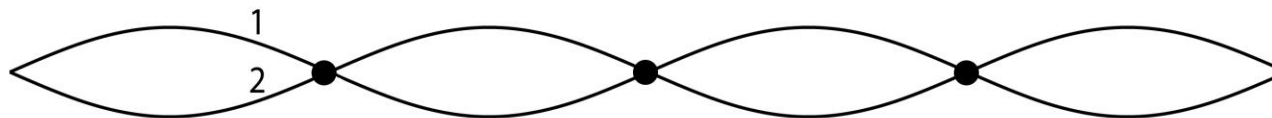


i picchi non si spostano,
al contrario delle onde
sul mare

Terza armonica (frequenza tripla della fondamentale):



Quarta armonica (frequenza quadrupla della fondamentale):



Credit: Simone Baroni, "La meccanica quantistica – Volume I" (2024)

ESPERIMENTO:

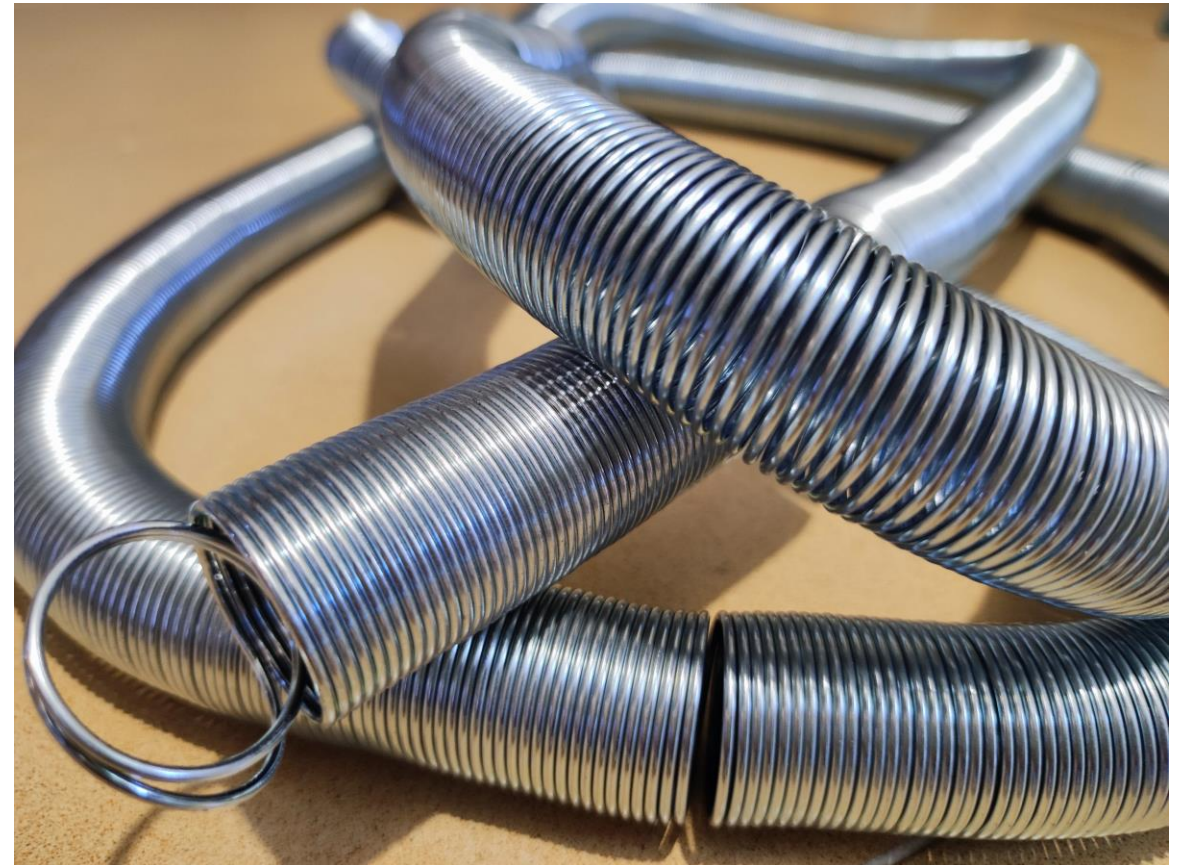
ONDE STAZIONARIE CON UNA MOLLA ELICOIDALE

Concetti principali:

- Onda
- Onda stazionaria
- Quantizzazione della frequenza

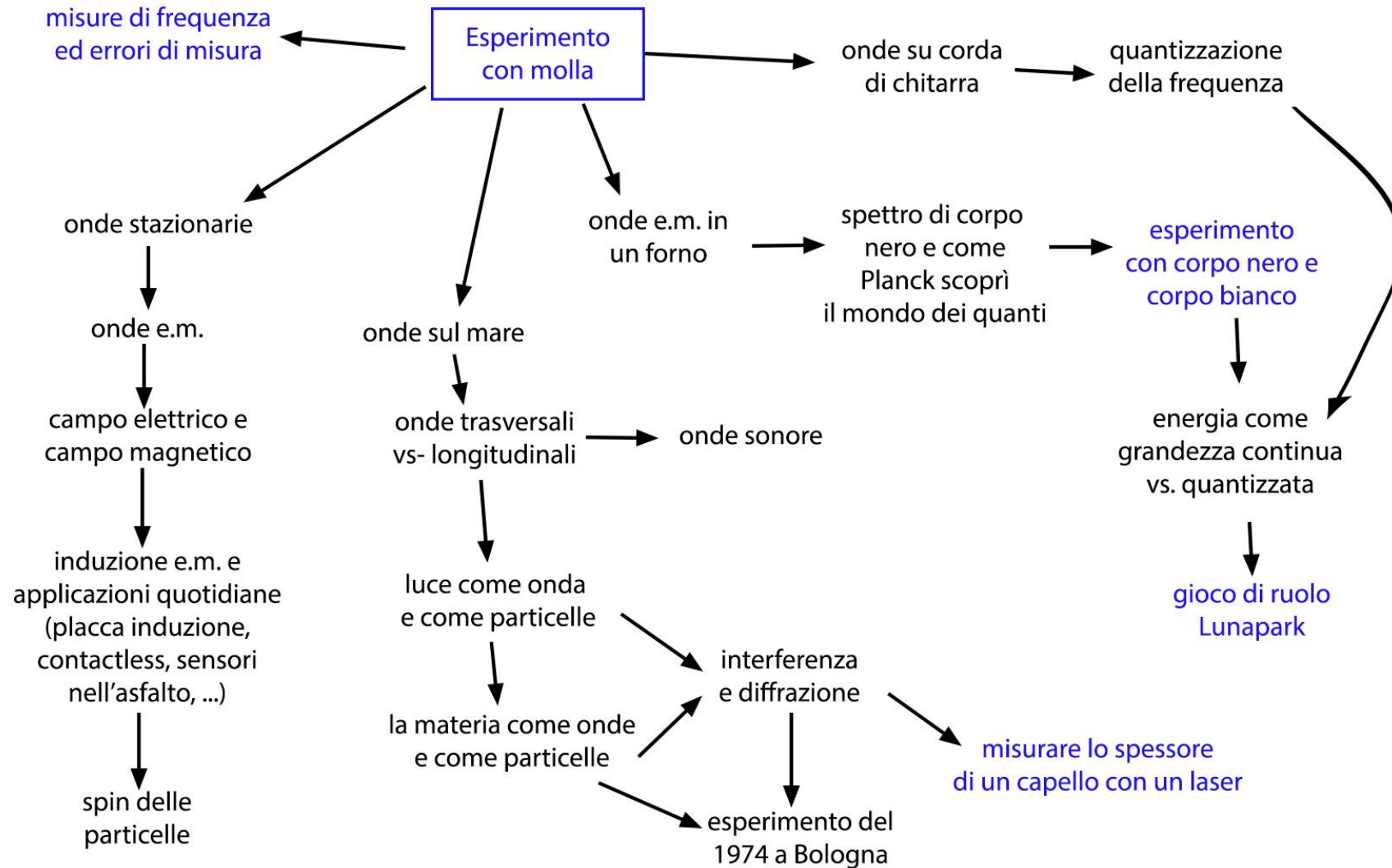
Concetti avanzati:

- Spettro di corpo nero
- Campi elettromagnetici
- Equazione delle onde
- Eccitazione di fotoni ad alta energia



ESPERIMENTO:

ONDE STAZIONARIE CON UNA MOLLA ELICOIDALE



ESPERIMENTO:

ONDE STAZIONARIE CON UNA MOLLA ELICOIDALE

Materiale:

- Molla elicoidale di 1,5-2 m
- In alternativa, una corda

Come si esegue l'esperimento:

- Posizionare la molla in posizione orizzontale ed estesa, mantenendone le estremità ferme alla stessa altezza con le mani (sono necessarie due persone).
- Mantenere una delle estremità immobile e far oscillare l'altra, allontanandosi di pochi centimetri dalla posizione iniziale. Cercare la frequenza corretta per far oscillare la molla con un massimo/minimo al centro.
- Far oscillare una estremità con frequenze multiple della prima per creare onde stazionarie con frequenze maggiori.
- Si può anche misurare la frequenza delle onde create.

ESPERIMENTO:

ONDE STAZIONARIE CON UNA MOLLA ELICOIDALE

Alcune domande per stimolare la discussione:

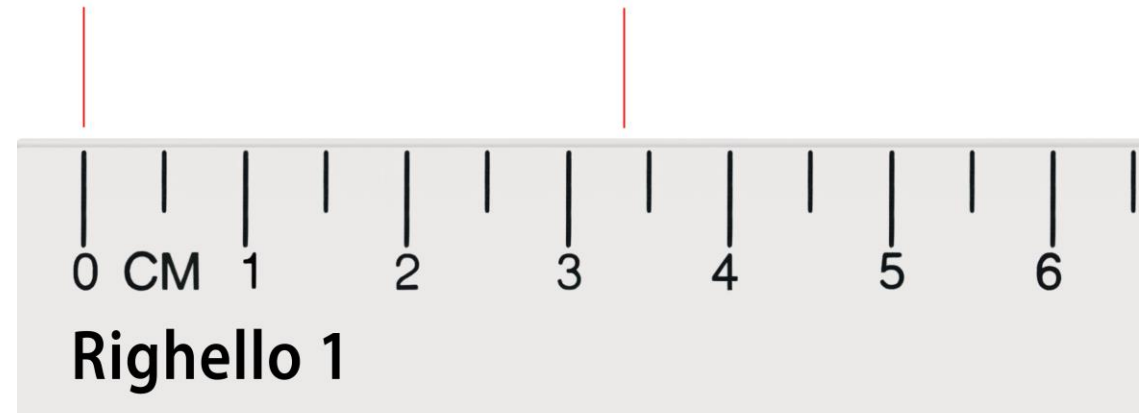
- (Dopo aver ottenuto l'armonica fondamentale) Cosa abbiamo creato?
- È un'onda come quelle sul mare? Che differenza c'è?
- E che differenza c'è con una corda di chitarra?
- Qual è la frequenza di quest'onda? Come possiamo misurarla?
- La frequenza (e l'energia) di queste onde può prendere qualsiasi valore?
- Pensate a un fenomeno in cui l'energia prende valori qualsivoglia.
- Un'onda è un fenomeno continuo. Eppure la frequenza delle onde stazionarie è quantizzata. Come è possibile?

ESPERIMENTO:

L'INCERTEZZA (E L'INDETERMINAZIONE) DELLE MISURE

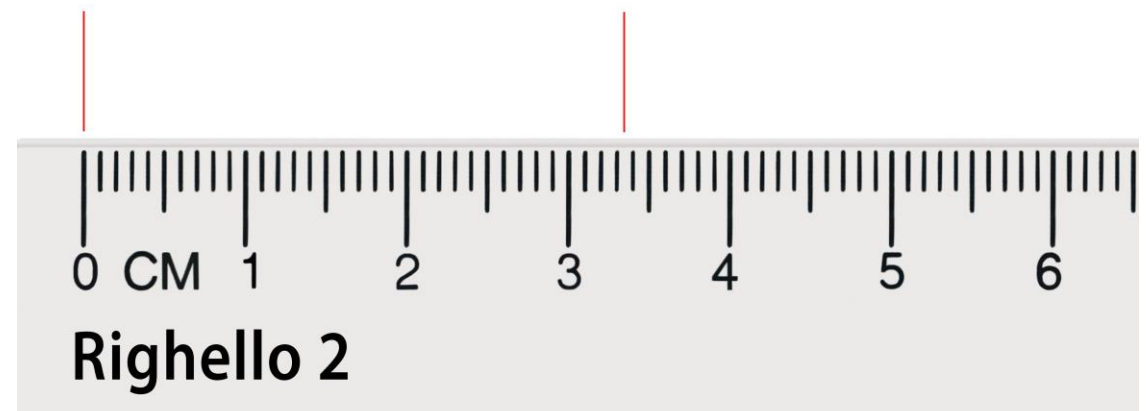
Concetti principali:

- L'incertezza di una misura
- Il Principio di Indeterminazione di Heisenberg e l'impossibilità di ridurre ulteriormente l'incertezza



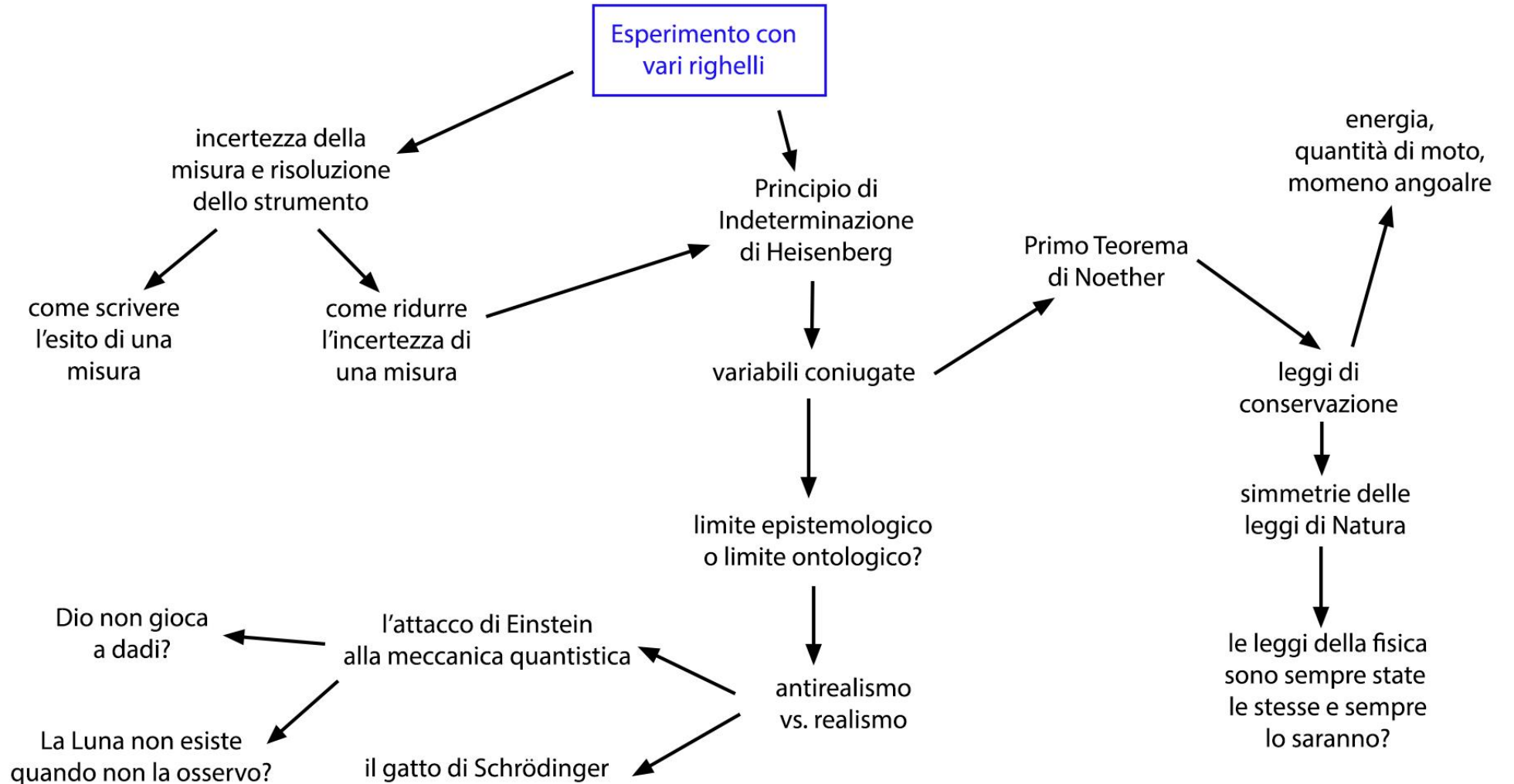
Concetti avanzati:

- Il Principio di Indeterminazione per energia e tempo, e per angolo e momento angolare
- Il Primo Teorema di Noether
- La quantizzazione spaziale di Bohr e Sommerfeld



ESPERIMENTO:

L'INCERTEZZA (E L'INDETERMINAZIONE) DELLE MISURE



ESPERIMENTO:

L'INCERTEZZA (E L'INDETERMINAZIONE) DELLE MISURE

Materiale:

- Righelli con risoluzione differente (1 mm, 1 cm, 0,5 cm, ...)
- Un calibro ventesimale e/o cinquantesimale
- Un oggetto solido di cui si misurerà un lato

Come si esegue l'esperimento:

- Si divide la classe in gruppi e ad ogni gruppo viene affidato uno strumento di misura.
- Si mostra l'oggetto da misurare e la dimensione specifica da misurare (anche più d'una).
- Si lascia che i gruppi misurino e si raccoglie infine il risultato delle misure.

ESPERIMENTO:

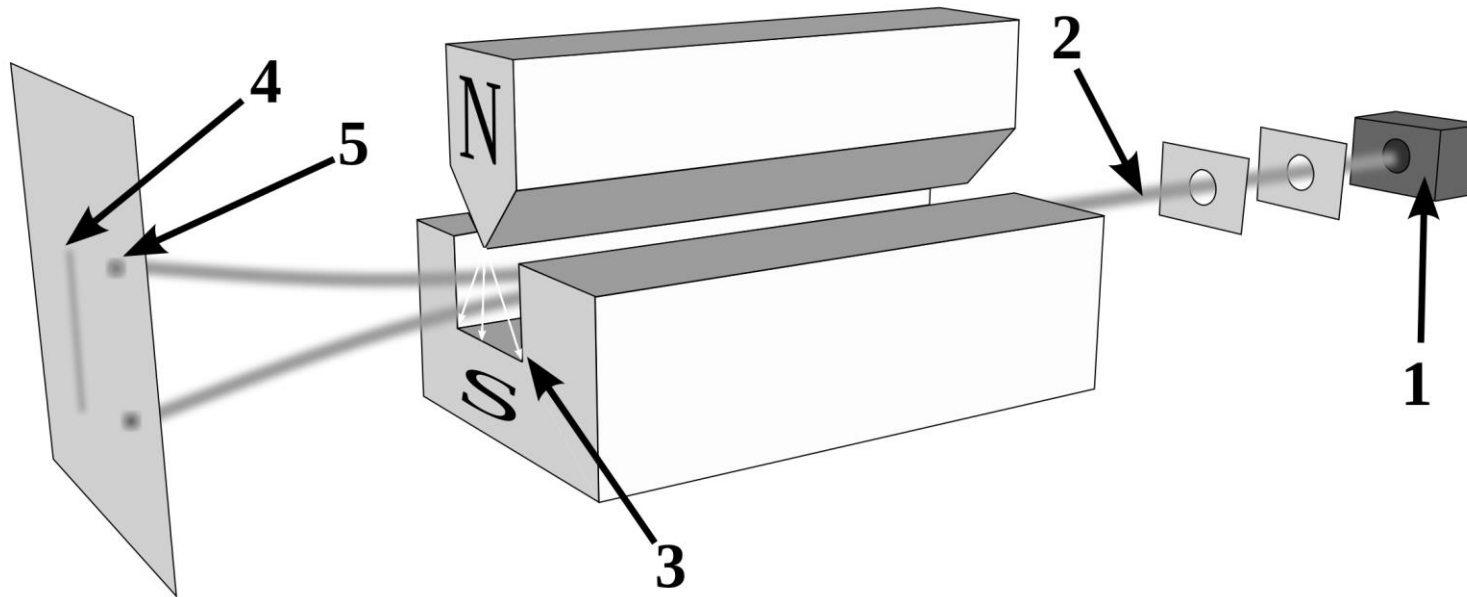
L'INCERTEZZA (E L'INDETERMINAZIONE) DELLE MISURE

Alcune domande per stimolare la discussione:

- La distanza da misurare non coincide esattamente con una delle tacche dello strumento. Dobbiamo arrotondare?
- Possiamo arrotondare a un valore che non è segnato da nessuna tacca?
- Qual è l'informazione massima che possiamo estrarre da ognuna di queste misure? (Si riferisce all'errore di misura che deriva dalla risoluzione dello strumento)
- Come possiamo ridurre l'incertezza della misura? (Usando uno strumento con risoluzione più fine)
- Il Principio di Indeterminazione di Heisenberg dice che non si può ridurre a piacere l'incertezza di una misura quantistica. È un limite epistemologico (legato cioè agli strumenti usati e come interagiamo con la Natura) o ontologico (legato cioè alla reale impossibilità di ridurre l'incertezza a piacere)?

ESPERIMENTO:

I 3 FILTRI POLARIZZATORI



Schema dell'esperimento di Stern e Gerlach del 1922. Un forno (1) riscalda ed emette atomi di argento, che vengono collimati (2) e inviati tra i due poli di un forte campo magnetico (3). Il campo magnetico è tale da cambiare rapidamente di intensità man mano che ci si muove lungo la direzione verticale. In uscita, una placca raccoglie gli atomi: se la quantizzazione spaziale non esistesse, sulla placca si dovrebbe osservare una distribuzione continua degli atomi (4). Secondo il modello di Bohr-Sommerfeld, invece, gli atomi avrebbero dovuto dividersi in due fasci (5). Credit: Simone Baroni, "La meccanica quantistica – Volume I" (2024). Immagine originale: Tatoute, CC BY-SA 4.0

ESPERIMENTO: I 3 FILTRI POLARIZZATORI

Concetti principali:

- Collasso quantistico
- Sovrapposizione di stati
- Polarizzazione della luce

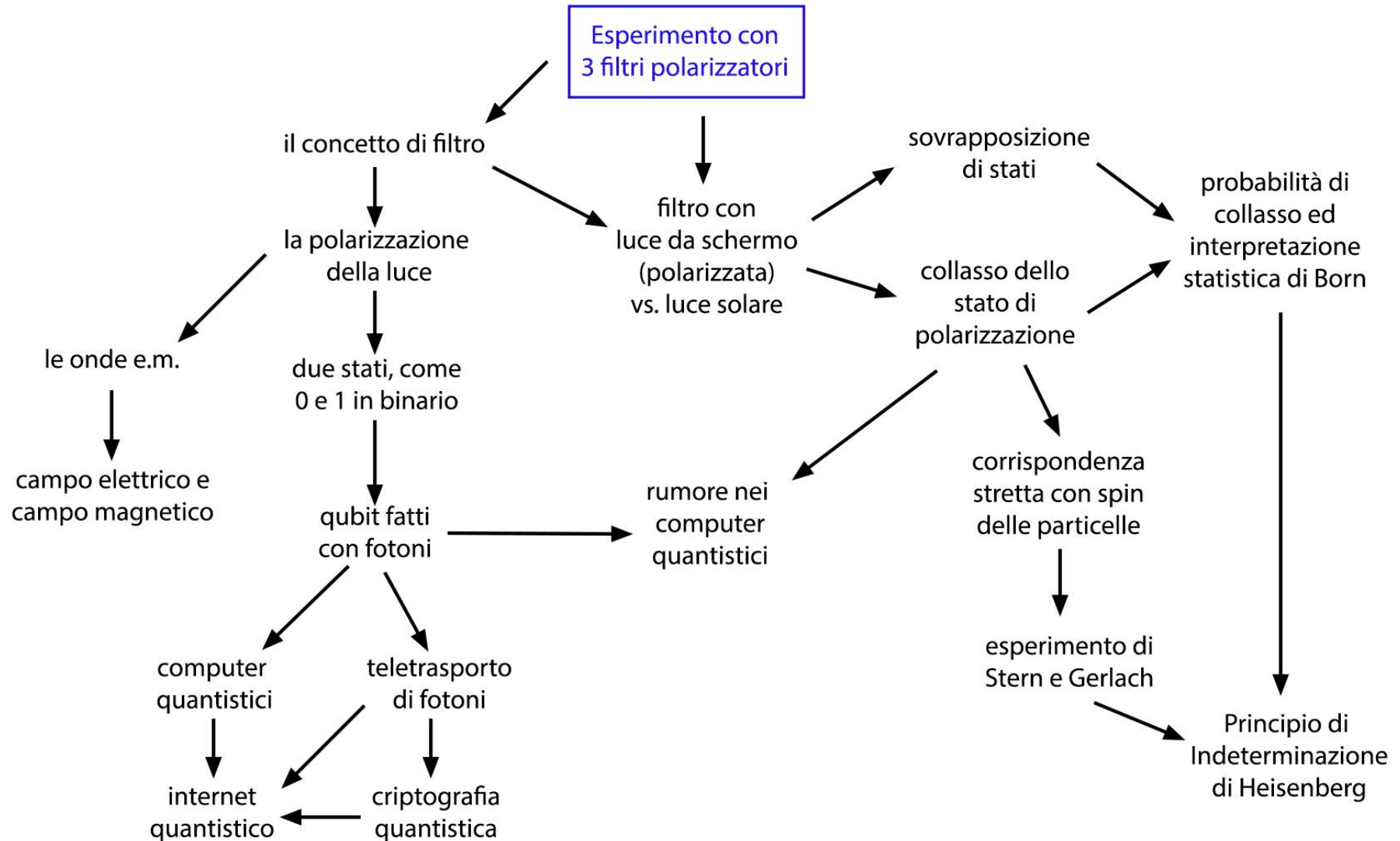
Concetti avanzati:

- Il Principio di Indeterminazione di Heisenberg per lo spin
- Lettura di un Qubit
- Gli errori di un computer quantistico dovuti al rumore
- Probabilità in meccanica quantistica



ESPERIMENTO:

I 3 FILTRI POLARIZZATI



ESPERIMENTO:

I 3 FILTRI POLARIZZATI

Materiale:

- 3 filtri polarizzatori
- Uno schermo di computer
- Uno schermo di telefono cellulare

Come si esegue l'esperimento:

- Con luce solare: posizionare un filtro in controluce e osservare cosa accade; posizionarne un secondo davanti al primo e osservare cosa accade ruotando il secondo filtro; posizionarne un terzo davanti ai primi due e ruotarlo ed osservare cosa accade; spostare il terzo filtro tra il primo ed il secondo.
- Con luce da schermo (PC o telefono): osservare le differenze con il caso della luce solare.

ESPERIMENTO:

I 3 FILTRI POLARIZZATI

Alcune domande per stimolare la discussione:

- Cosa succede in una ricerca di un hotel se impongo sempre più filtri?
- Cosa succede se aggiungo il terzo filtro davanti ai primi due?
- E se lo aggiungo tra il primo e il secondo? Posso ancora dire che si comportano come “filtri”?
- Perché se ruoto uno di questi “filtri” di 90 gradi, a volte passa da opaco a trasparente o viceversa?
- Quale proprietà deve avere la luce affinché possa passare attraverso questi “filtri”?
- (Con schermo di PC o di telefono) Se un filtro lascia passare luce polarizzata in una certa direzione, perché un secondo filtro a un angolo inferiore a 90 gradi non blocca tutti i fotoni?
- (Con luce solare) Perché si produce tutta una gradazione di intensità del filtro quando lo si ruota?

ESPERIMENTO: INDUZIONE E.M. E SPIN

Concetti principali:

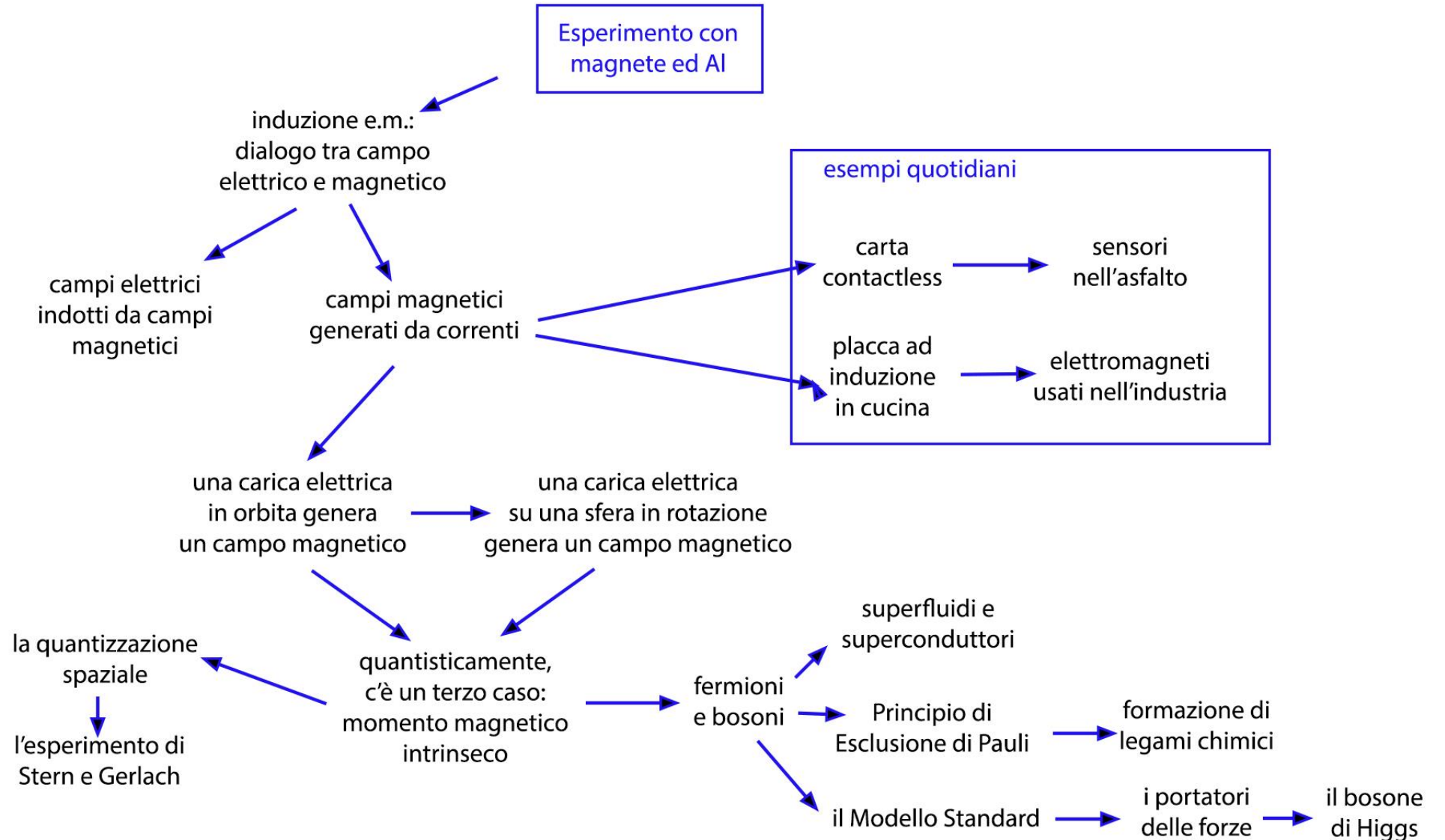
- Induzione e.m. e corrente parassita
- Equivalenza tra una bobina con corrente e un magnete
- Spiegazione classica (errata) dello spin (momento magnetico intrinseco) delle particelle

Concetti avanzati:

- Momento magnetico orbitale vs. intrinseco
- Fermioni e bosoni
- Principio di Esclusione di Pauli



ESPERIMENTO: INDUZIONE E.M. E SPIN



ESPERIMENTO:

INDUZIONE E.M. E SPIN

Materiale:

- Un magnete molto forte
- Un pezzo di ferro o di alluminio
- Una superficie di alluminio

Come si esegue l'esperimento:

- Posizionare il pezzo di metallo sulla superficie di alluminio e verificare che non si attraggono.
- Lasciare poi scivolare il pezzo di metallo sulla superficie di alluminio.
- Ripetere con il magnete: prima di tutto verificare che non si attacchi alla superficie di alluminio.
- Lasciare poi scivolare il magnete sulla superficie di alluminio.
- Osservare la differenza di velocità con cui scivolano i due oggetti.

ESPERIMENTO:

INDUZIONE E.M. E SPIN

Alcune domande per stimolare la discussione:

- Quali leggi potremmo utilizzare per descrivere il moto del pezzo di metallo lungo la superficie di alluminio?
- Cosa accade con il magnete?
- Se il magnete non è attratto dall'alluminio, perché scende più lentamente rispetto al pezzo di metallo?
- Quali leggi potremmo utilizzare per descrivere il moto del magnete lungo la superficie di alluminio?
- Se un campo magnetico variabile nel tempo induce una corrente elettrica, e viceversa una corrente elettrica genera un campo magnetico, cosa accade a un elettrone attorno a un nucleo atomico?
- E se l'elettrone ruotasse su sé stesso e considerassimo la sua carica elettrica distribuita sulla superficie dell'elettrone (pensato come una sfera di dimensioni finite)?

APPROFONDIMENTI

Libri

Simone Baroni, “La meccanica quantistica – Volume I – La prima rivoluzione quantistica” (2024)

Gian Carlo Ghirardi, “Un’occhiata alle carte di Dio” (1997)

Richard Feynman, “QED. La strana teoria della luce e della materia” (1985)

Articoli

Bloch, “Heisenberg and the early days of quantum mechanics”, *Physics Today* 29 (12) (1976)

B. Friedrich, D. Herschbach, “Stern and Gerlach: How a bad cigar helped reorient atomic physics”, *Physics Today* 56 (12) (2003)

I. Gonzalez de Arrieta, “Beyond the infrared: a centenary of Heinrich Rubens’s death”, *The European Ph. J. H* 47:11 (2022)