
Physics Education

Laboratory

Lecture 13 - recap ...

Content Knowledge for

Electromagnetism

Francesco Longo - 01/12/22

Behind the curtains ...

- **EXPLORING the SIMULATION**
 - <https://phet.colorado.edu/en/simulations/faraday>
 - **EXPLORING STUDENTS' SHEETS**
 - <https://phet.colorado.edu/en/contributions/view/2827>
 - **FOLLOWING the INSTRUCTIONS**
 - <https://phet.colorado.edu/en/teaching-resources/activity-guide>
-

Electricity and Magnetism Conceptual Assessment (EMCA)

<https://drive.google.com/file/d/1pG16k-lvDqwohShthWi8MpTngtK2D8NZ/view?usp=sharing>

Non solo formule

*Analisi e costruzione della prova interdisciplinare di
Matematica e Fisica per l'Esame di Maturità*

<https://drive.google.com/file/d/156cR4r503024X78u6WGM6fwFgt3scgeK/view?usp=sharing>

L'analisi del testo

Il cambiamento concettuale richiesto per affrontare la nuova prova interdisciplinare di matematica e fisica nell'Esame di Maturità introdotta con il decreto ministeriale 769 (2018), non è stato ancora del tutto messo in atto nell'azione didattica da parte dei docenti che devono preparare i loro studenti ad affrontare il più temuto dei temi. Sono da evitare infatti sia, come spesso è consuetudine, una mera applicazione strumentale della matematica confinata alla risoluzione procedurale di una situazione problematica fisica, sia una limitazione della risoluzione dei problemi fisici al loro puro 'risultato' matematico, non sviluppando la competenza argomentativa nell'attribuire senso fisico ai medesimi risultati.

Si è scelto come argomento interdisciplinare LE DERIVATE E L'INDUZIONE ELETTROMAGNETICA

All'interno di un solenoide lungo $l = 20$ cm, composto da $N_1 = 1000$ spire e percorso da una corrente stazionaria di intensità $i = 3,0$ A, è disposta una seconda bobina di $N_2 = 50$ spire circolari di raggio $r = 3,0$ cm. La bobina, polarizzata inizialmente con il suo asse parallelo a quello del solenoide, viene messa in rotazione intorno a un asse perpendicolare alle linee di forza del campo magnetico prodotto dal solenoide con una frequenza di $\nu = 100$ Hz. Determinare l'espressione del flusso $\Phi(t)$ del campo magnetico concatenato con la bobina e tracciarne il grafico in funzione del tempo. Dedurre da questo il grafico della forza elettromotrice indotta nella spira $\mathcal{E}(t)$ in funzione del tempo e ricavare la sua espressione analitica.

Esercizio tratto da un libro di testo di liceo scientifico¹

La richiesta di tracciare il grafico del flusso è decontestualizzata da una sua interpretazione dal punto di vista fisico. Rappresentare in linguaggio grafico, in questo modo, non aggiunge alcun valore concettuale. Come non viene aggiunto se si mantiene la descrizione in termini relazionali tra le grandezze, senza attribuirne una misura.

Una bobina è costituita da N spire quadrate di lato l , ha una resistenza elettrica R ed è montata su un carrello che può muoversi con attrito trascurabile su un piano orizzontale. Il carrello viene tirato con velocità costante v ed entra in una zona in cui è presente un campo magnetico \vec{B} , perpendicolare al piano della spira². Spiegare perché la bobina si riscalda e determinare l'espressione della potenza dissipata. Cosa accade se il carrello viene lanciato con velocità v verso la stessa regione?

Seconda prova scritta 2019, sessione suppletiva (questo 7)

Avanzare un nuovo modo pratico di costruire le funzioni f e g ad attinenza

$$f(x) = \sqrt{2(x-1)} \quad g(x) = e^{2(x-1)}$$

1. Provare che, qualunque sia $x > 1$, nell'intervallo $[0, 1]$ il grafico di f ha un unico punto di incontro $F(x, y)$ ed il grafico di g ha un unico punto di incontro $G(x, y)$. Verificare che si ha $x_F = 2x - 1$ e $y_F = (2x - 1)^2$.
2. Verificare che, qualunque sia $x > 1$, i grafici delle due funzioni sono ortogonali nell'origine, solo a dire che le tangenti sono tangenti in tale punto sono tra loro ortogonali. Determinare per quale valore positivo di x i due grafici si intersecano ortogonalmente anche nei loro ulteriori punti di incontro.

Il problema sottoposto non integra le due discipline, ma sostanzialmente rimane un problema solo di matematica. Infatti, i primi due quesiti sono solo esercizi di matematica e il terzo e quarto fanno riferimento alla fenomenologia fisica ma solo come contesto generale.

L'esercizio proposto sul libro di testo del liceo risulta della stessa complessità di quello universitario perché viene richiesto di determinare la relazione matematica che descrive il flusso di un campo magnetico concatenato: questo implica un numero molto elevato di passaggi concettuali che non sono nemmeno esplicitati nella descrizione.

Una spira conduttrice di raggio a , avente resistenza elettrica R , è posta in una zona di spazio in cui è presente un campo di induzione magnetica \vec{B} uniforme, diretto perpendicolarmente al piano della spira. Il modulo B varia nel tempo con andamento sinusoidale $B(t) = B_0 \sin(\omega t)$. Risolvere:

- l'andamento della forza elettromotrice indotta in funzione del tempo $\mathcal{E}(t)$;
- la potenza massima P_{max} dissipata per effetto Joule nella spira;
- il modulo del campo elettrico indotto $E(t)$ al variare del tempo.

Esercizio tratto da un libro di testo universitario³

La richiesta di questo quesito non è commisurata al livello degli studenti, perché per essere risolta correttamente richiede di capire che la velocità, come funzione del tempo, debbe essere trovata risolvendo un'equazione differenziale. La richiesta di argomentazione invece è adeguata e poteva essere valorizzata maggiormente, richiedendone casomai una giustificazione matematica, come caso limite.

1. Provare che, qualunque sia $x > 1$, nell'intervallo $[0, 1]$ il grafico di f ha un unico punto di incontro $F(x, y)$ ed il grafico di g ha un unico punto di incontro $G(x, y)$. Verificare che si ha $x_F = 2x - 1$ e $y_F = (2x - 1)^2$.

2. Provare che, qualunque sia $x > 1$, i grafici delle due funzioni sono ortogonali nell'origine, solo a dire che le tangenti sono tangenti in tale punto sono tra loro ortogonali. Determinare per quale valore positivo di x i due grafici si intersecano ortogonalmente anche nei loro ulteriori punti di incontro.

3. Effettuare la derivata, assumere $\omega = 1$. In un riferimento cartesiano, dare la tangente alla spirale in un punto P . Partendo dagli archi di curva di equazioni $y = f(x)$ e $y = g(x)$, per $x \in [0, 1]$, rappresenta il profilo di una spira spirale. Sia R la regione piana delimitata da tali spire.

4. Supponendo che nella regione R sia presente un campo magnetico uniforme, perpendicolare al piano di R , avente intensità $B_0 = 1,0 \cdot 10^{-2}$ T, verificare che il valore analitico del flusso di tale campo attraverso R è pari a $1,0 \cdot 10^{-10}$ Wb.

5. Supporre che la spira abbia resistenza elettrica R pari a 70Ω e che il campo magnetico, rimanendo perpendicolare al piano di R , si partecola dall'interno di R a un valore massimo di $1,0$ T.

$$B(t) = B_0 \sin(\omega t)$$

Calcolare la potenza massima dissipata per effetto Joule nella spira.

Simulazione seconda prova scritta 2019 (problema 2)

Sono stati confrontati quattro esercizi sull'argomento scelto

La relazione matematica scelta per descrivere il campo magnetico è ben nota agli studenti, che ne conoscono bene le caratteristiche matematiche.

Spira metallica in un campo magnetico variabile

Una spira metallica quadrata di lato $l = 60$ cm e di resistenza elettrica per ℓ $R = 70 \Omega$ si trova in una regione di spazio dove è presente un campo magnetico \vec{B} , uniforme e perpendicolare al piano della spira. A partire dall'istante di tempo $t_0 = 0$ s, l'intensità del campo magnetico inizia a variare secondo la legge:

$$B(t) = B_0 \cos(\omega t)$$

con $B_0 = 2.0 \cdot 10^{-2}$ T, $\omega = \pi$ rad/s e $t \geq 0$ espresso in secondi (s).

L'applicazione della formula di derivazione nella legge di Faraday-Neumann.

1. Rappresentare graficamente il flusso del campo magnetico $\Phi(t)$ concatenato alla spira, in funzione del tempo e descriverne l'andamento.
2. Dopo aver esposto che tipo di relazione esiste tra la variazione di flusso concatenato alla spira e la corrente indotta in essa dedurre, per via grafica, l'andamento della corrente indotta. Fornire quindi un'interpretazione fisica del fenomeno osservando i due grafici.
3. Ricavare l'espressione analitica della corrente indotta $i(t)$ al variare del tempo, trovare gli istanti di tempo in cui essa cambia verso e calcolare il suo valore massimo i_{max} .
4. Spiegare perché la spira si riscalda e trovare l'espressione della potenza elettrica dissipata $P(t)$ al variare del tempo. Cosa si può dire del grafico di $P(t)$? Calcolare il suo valore agli istanti $t_1 = 0$ s, $t_2 = 0.5$ s, $t_3 = 1.0$ s, $t_4 = 1.5$ s, $t_5 = 2.0$ s.
5. Supporto adesso che il campo magnetico nel nel tempo secondo la funzione

$$B(t) = B_0 e^{-\alpha t} \cos(\omega t)$$

(dove ω e B_0 hanno gli stessi valori numerici) il cui andamento è rappresentato dal seguente grafico per $t \geq 0$.

La rappresentazione grafica è funzionale alla descrizione del fenomeno fisico.

Il confronto tra le due descrizioni del campo magnetico conferisce alla relazione matematica un valore predittivo che offre la possibilità di integrare veramente le due discipline.

Come cambierà l'andamento della corrente indotta $i(t)$ rispetto alla situazione precedente? Ricavare anche in questo caso l'espressione analitica di $i(t)$.

6. Si vuole sfruttare la spira in questione per alimentare un dispositivo che funzioni grazie all'induzione elettromagnetica. Quale dei due andamenti temporali del campo magnetico sopra descritti è più conveniente considerare per avere la migliore efficienza? Giustificare la risposta confrontando i valori di $P(t)$ tra le due situazioni negli istanti di tempo t_1, t_2, t_3, t_4, t_5 .

Contestualizzazione del problema alla fenomenologia fisica.

La descrizione dell'andamento deve essere sia di tipo matematico che di tipo fisico.

L'argomentazione viene supportata dall'esemplificazione.

L'attenzione è stata focalizzata sulla costruzione delle prove, calibrate nelle richieste, nell'uso del formalismo, nella rappresentazione del fenomeno secondo i diversi linguaggi disciplinari tra loro opportunamente integrati; questo al fine di offrire allo studente la possibilità di incontrare e affrontare la pluralità dei significati che si possono evincere da una corretta interpretazione e dalle diverse traduzioni della medesima realtà fisica.

La costruzione del testa

È stato proposto a cinque classi quinte (per un totale di 110 studenti) del liceo scientifico G. Oberdan di Trieste un percorso sulle simulazioni in preparazione all'esame di Stato che avesse come scopo l'integrazione tra le due discipline. L'attività prevista ha coinvolto le classi dalle 5 alle 6 ore curricolari in presenza tra gennaio e febbraio del 2020.



Nella fase di somministrazione gli studenti sono stati guidati nella risoluzione del problema della spira metallica in un campo magnetico. Durante lo svolgimento del problema è stata posta particolare attenzione ai linguaggi disciplinari, sia matematico sia fisico, cercando di integrarli il più possibile nell'ottica di argomentare i risultati sia dal punto di vista di entrambe le discipline. Particolare attenzione è stata data alla descrizione della situazione fisica presentata, che, se non è correttamente compresa non può essere nemmeno rappresentata in linguaggio matematico¹.

Parallellamento di un alternatore

Un alternatore è un dispositivo in grado di trasformare energia meccanica in energia elettrica. Il suo principio di funzionamento consiste nel far ruotare, con frequenza f , una bobina di N spire in un campo magnetico uniforme di intensità B costante, in modo tale che la normale al piano della bobina forma con le linee del campo magnetico un certo angolo $\theta(t)$ variabile nel tempo.

1. Spiegare perché un dispositivo del tipo è in grado di generare corrente.

Si schematizzi l'interno di un alternatore con una bobina di N spire circolari, ciascuna di raggio $r = 0,25$ m, che ruota con una frequenza $f = 50$ Hz costante nel tempo ed è immersa in un campo magnetico uniforme di intensità costante $B = 0,5$ T. All'istante $t = 0$ la bobina è ferma e il piano dello suo apre è parallelo alla linea di campo.

2. Determinare la funzione $\Phi(N, t)$ che esprime il flusso del campo magnetico concatenato alla bobina in funzione del tempo, al variare del numero N di spire.

3. Determinare la funzione $\mathcal{E}(N, t)$ che descrive come varia la f.e.m. indotta nella bobina al variare del tempo, al variare del numero N di spire.

4. Calcola il numero N di spire necessario per ottenere una tensione massima di $V_{max} = 200$ V.

5. Con N stabilito nel punto precedente, rappresentare graficamente l'andamento temporale della corrente indotta $i(t)$ nella bobina, sapendo che la sua resistenza elettrica vale $R = 100$ Ω .

Sapere almeno che la bobina è in grado di ruotare dall'istante iniziale con accelerazione angolare $\alpha > 0$ costante e velocità angolare ω iniziale nulla.

6. Si riporta, in questa situazione, il grafico della funzione $\Phi(t)$ rappresentando il flusso concatenato alla bobina.

Trovare l'espressione analitica di $\Phi(t)$ in questa situazione. Quali sarà un andamento grafico approssimativo della funzione $\mathcal{E}(t)$? Fornire una spiegazione fisica di quanto ottenuto.



Il secondo problema proposto aveva le stesse caratteristiche organizzative del testo, la stessa tipologia di difficoltà e gli stessi obiettivi concettuali. Gli studenti sono stati lasciati autonomi nello svolgimento del problema, utilizzando anche gli appunti a loro disposizione. Al termine della somministrazione è stato corretto e commentato il problema cercando di mettere in risalto i nodi risolutivi, l'accettabilità delle argomentazioni matematiche e fisiche e la potenzialità di integrazione delle discipline che il problema voleva evidenziare.

La somministrazione

PROPOSTA ELABORATA DA:

V. Bologna*, A. Frontino Crisafulli**, F. Longo***
Dipartimento di Fisica - Università degli Studi di Trieste

IN COLLABORAZIONE CON:

D. La Macchia, M. Massarotti, S. Novello, G. Turri
Liceo Scientifico G. Oberdan, Trieste

* valentina.bologna@phd.units.it

** albertofrontinocrisafulli@studenti.units.it

*** francesco.longo@ts.infn.it

L'analisi delle prove somministrate ha offerto poi uno strumento per individuare le difficoltà principali e identificare i nodi concettuali meno consolidati sia di tipo matematico che fisico.

Sono state corrette le prove somministrate agli studenti e svolte da loro autonomamente come prova di simulazione. Gli errori sono stati raccolti e organizzati individuando quali competenze disciplinari trasversali alla matematica e alla fisica erano meno sviluppate o segnalavano la presenza di difficoltà concettuali.



È stato fatto un confronto tra il livello degli apprendimenti degli studenti in matematica (sull'argomento delle derivate) e gli esiti della prova di simulazione. Anche chi aveva raggiunto valutazioni molto alte ha evidenziato alcune tra le difficoltà individuate. Sicuramente un approccio didattico in matematica che favorisca l'integrazione degli usi della variabile (secondo il modello per esempio delle 3UV¹) probabilmente supporterebbe l'integrazione disciplinare come richiesto in una prova interdisciplinare per l'Esame di Maturità.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI:

- ⁽¹⁾ Caforio, A., & Ferilli, A. (2015). *Fisica! Pensare l'Universo*. Le Monnier Scuola.
- ⁽²⁾ Mencuccini, C., & Silvestrini, V. (2016). *Esercizi di Fisica. Elettromagnetismo e Ottica*. Ambrosiana.
- ⁽³⁾ Pospiech, G. (2019). *Framework of mathematization in Physics from a Teaching Perspective*. In G. Pospiech, M. Michelini & B. Eylon (Eds.), *Mathematics in Physics Education*, Cham, CH: Springer.
- ⁽⁴⁾ Ursini, S. (2011). *Il Modello 3UV: uno strumento teorico a disposizione degli insegnanti di matematica*. *QuaderniCIRD*, **2**.

Risultati e discussione

Physics Education

Laboratory

Lecture 15

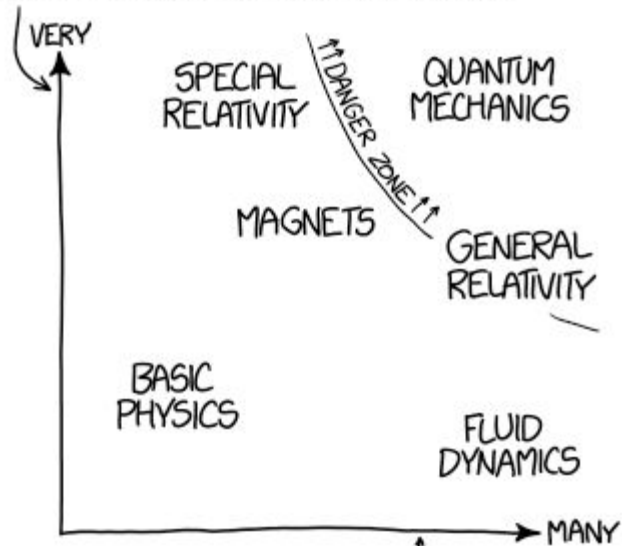
Content Knowledge for Quantum Mechanics

Physics. The use of metaphors & the history

of Physics

Francesco Longo • 13/12/2022

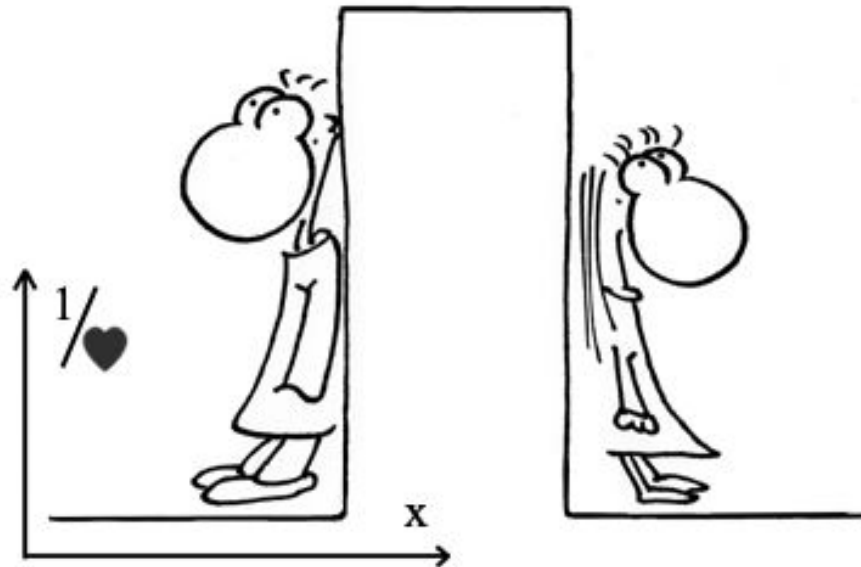
HOW PHILOSOPHICALLY EXCITING THE QUESTIONS ARE TO A NOVICE STUDENT



HOW MANY YEARS OF MATH ARE NEEDED TO UNDERSTAND THE ANSWERS

WHY SO MANY PEOPLE HAVE WEIRD IDEAS ABOUT QUANTUM MECHANICS

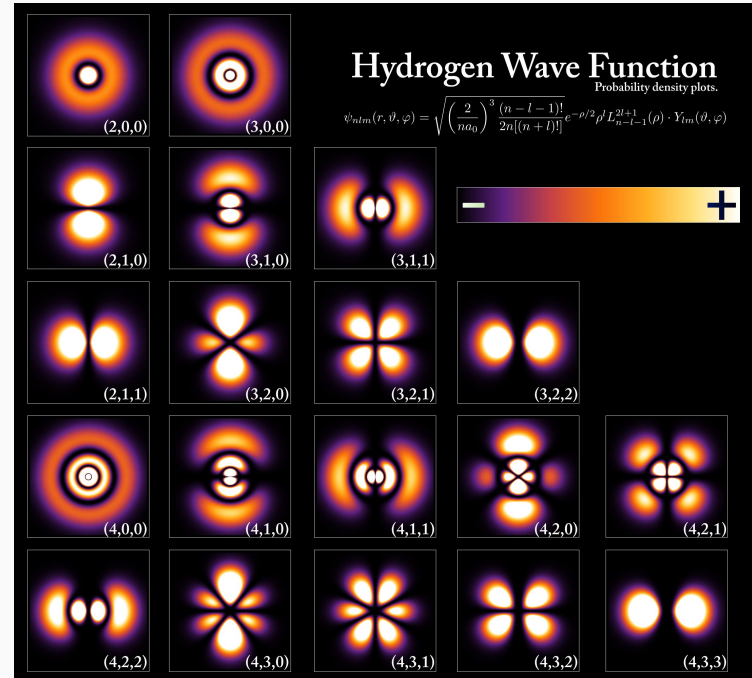
thescientificcartoonist.com



Waiting for the tunnel effect.

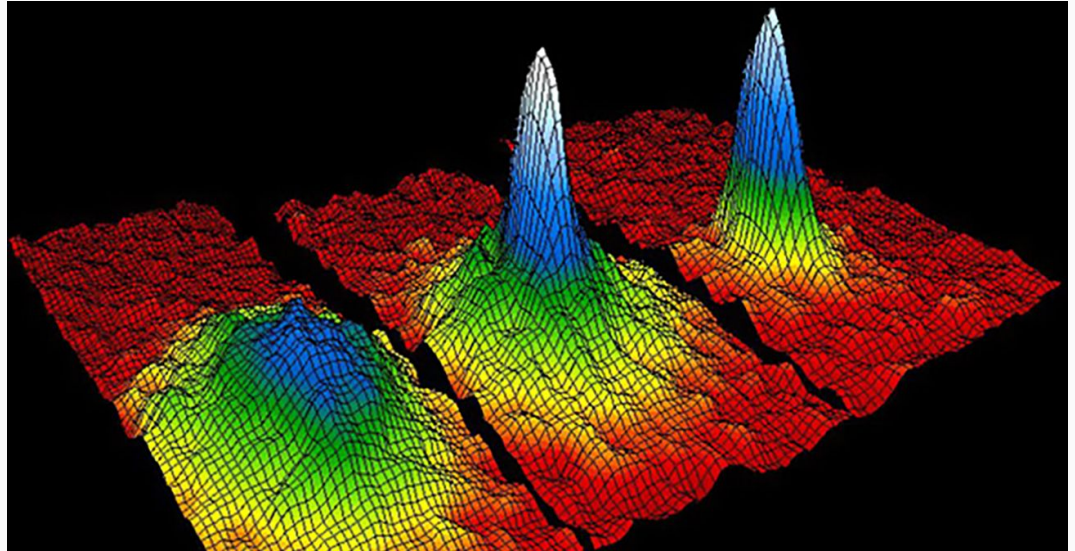
Key Concepts in Quantum Mechanics

- Discrete vs Continuous
- Waves or Particles
- Probability Theory
- What?



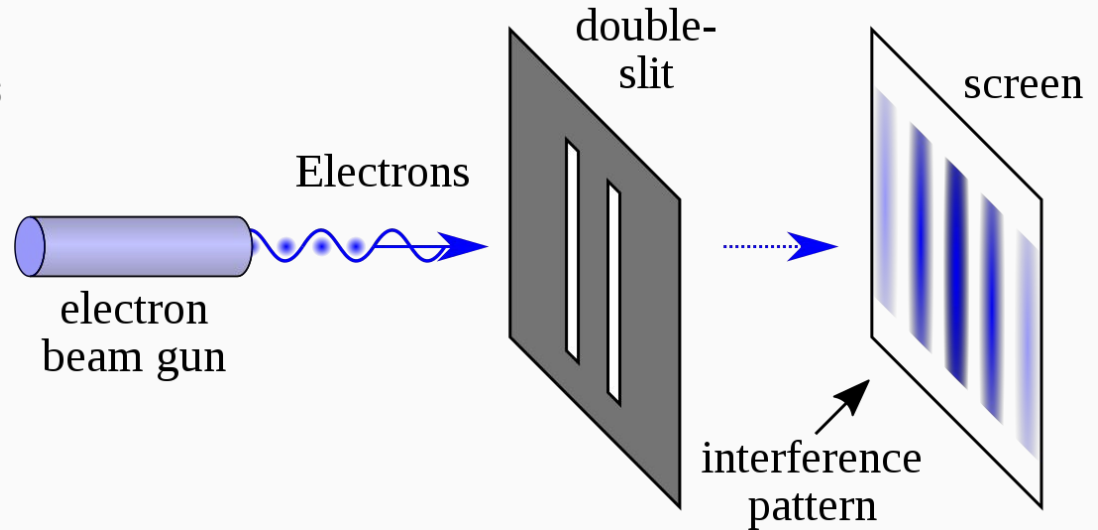
Key Concepts in Quantum Mechanics

- Discrete vs Continuous
- Microscopic vs Macroscopic



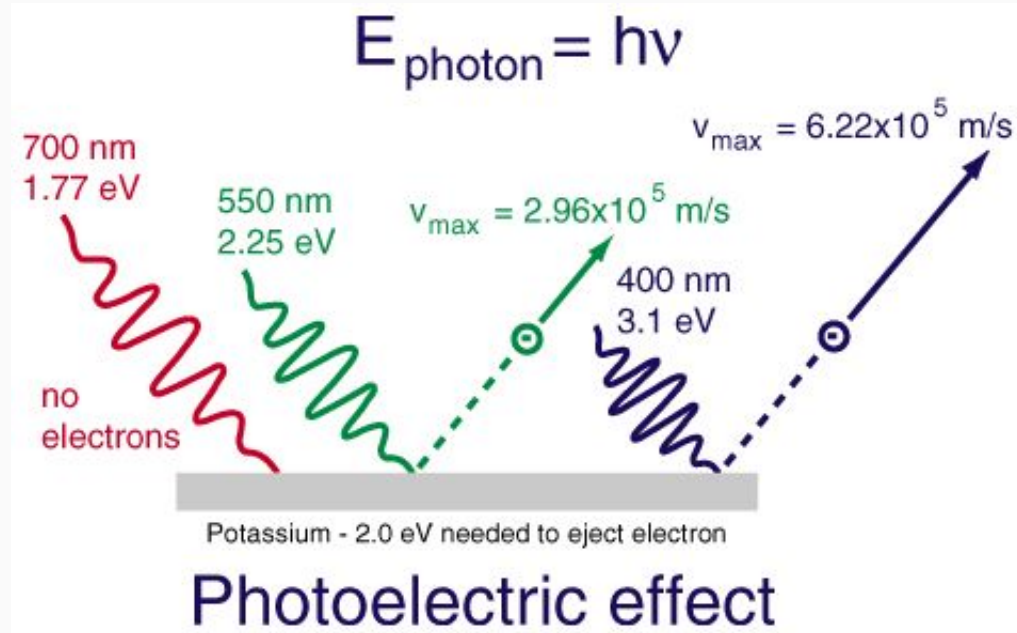
Key Concepts in Quantum Mechanics

- Waves or Particles ?
- The role of the observers



Key Concepts in Quantum Mechanics

- Key Experiments



Key Concepts in Quantum Mechanics

- Theory of Probability
- Schrodinger equation
- What?

Schrödinger equation

$$i\hbar \frac{\partial \Psi(\vec{r}, t)}{\partial t} = \left[-\frac{\hbar^2 \nabla^2}{2m} + V(\vec{r}) \right] \Psi(\vec{r}, t)$$

Second Series

December, 1926

Vol. 28, No. 6

THE PHYSICAL REVIEW

AN UNDULATORY THEORY OF THE MECHANICS OF ATOMS AND MOLECULES

BY E. SCHRÖDINGER

ABSTRACT

The paper gives an account of the author's work on a new form of quantum theory. §1. The Hamiltonian analogy between mechanics and optics. §2. The analogy is to be extended to include real "physical" or "undulatory" mechanics instead of mere geometrical mechanics. §3. The significance of wave-length;

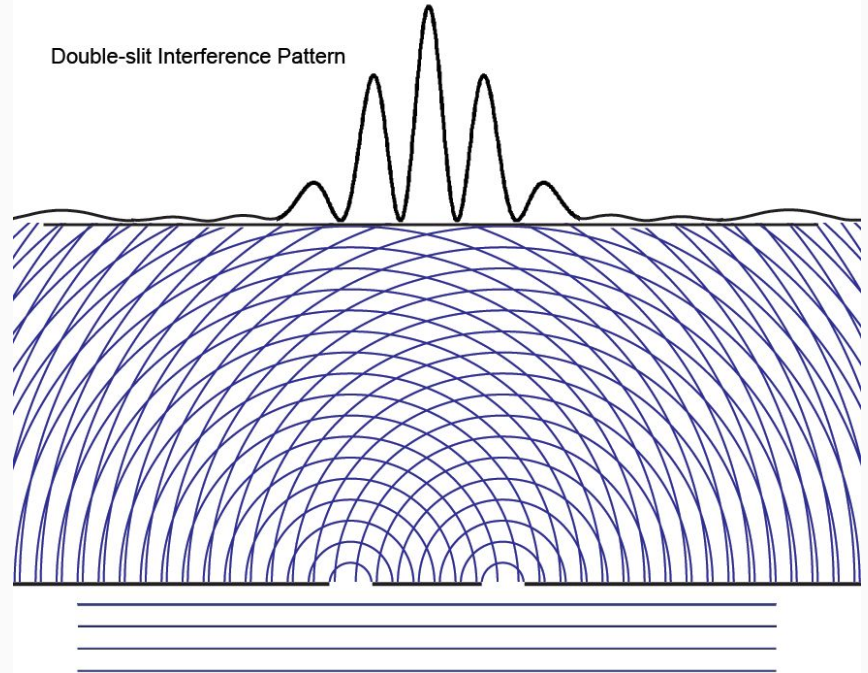


The Nobel Prize in Physics 1933
Erwin Schrödinger, Paul A.M. Dirac

The Nobel Prize in Physics 1933 was awarded jointly to Erwin Schrödinger and Paul Adrien Maurice Dirac "for the discovery of new productive forms of atomic theory."

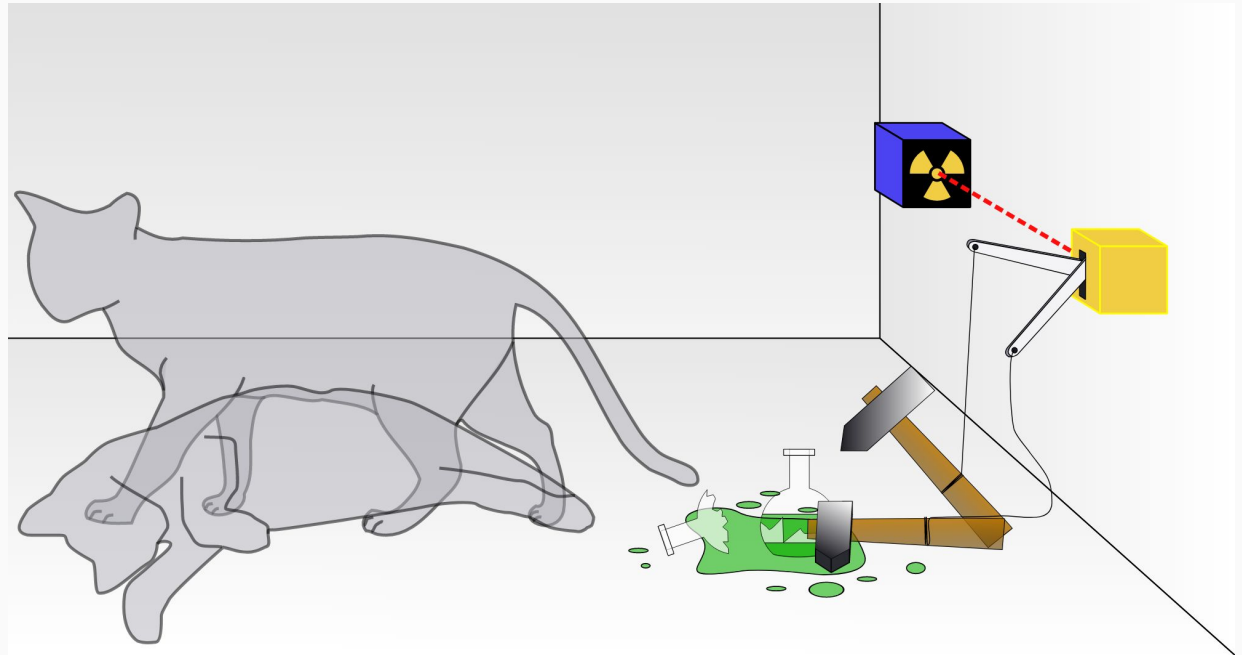


Double-slit Interference Pattern



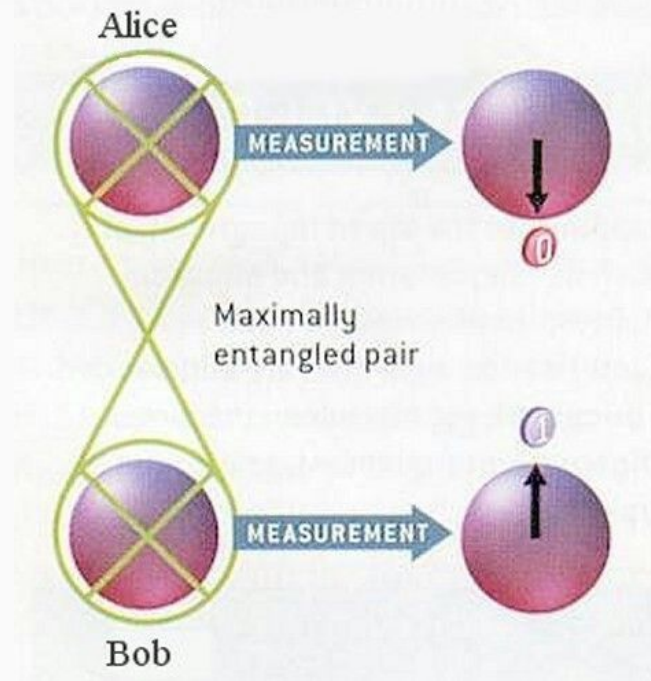
Key Concepts in Quantum Mechanics

- Quantum paradoxes

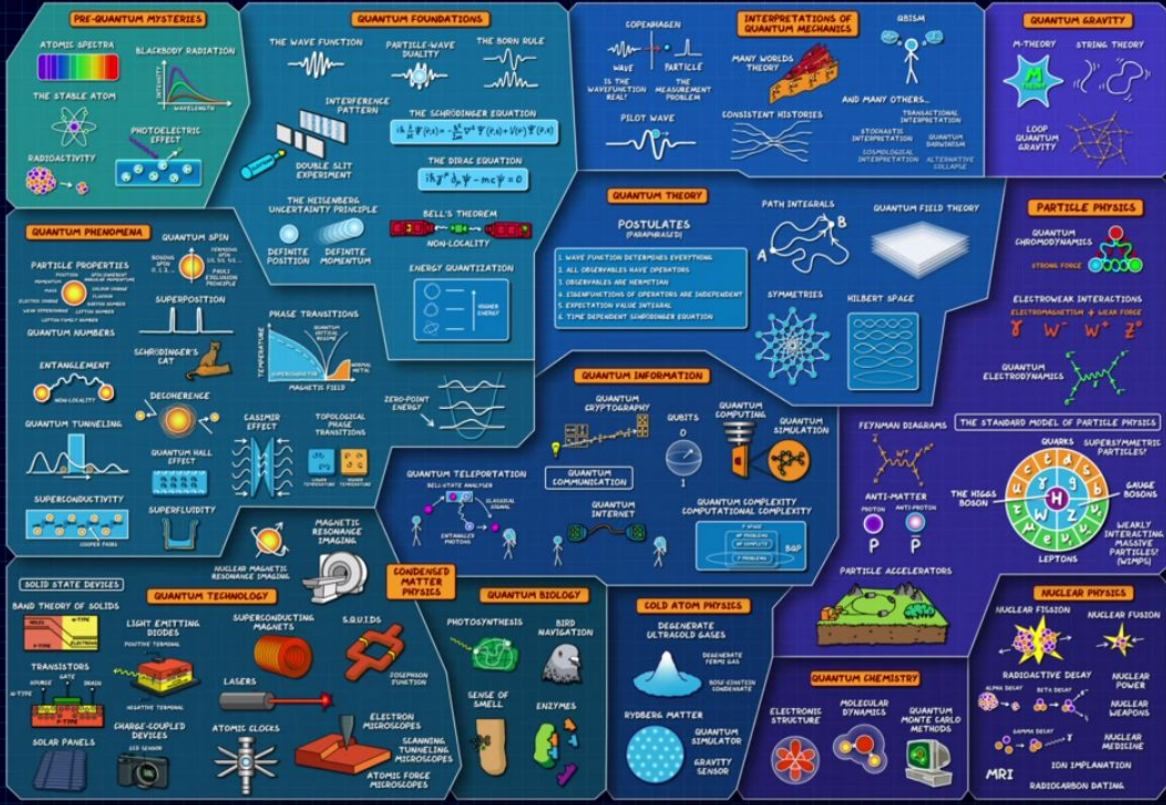


Key Concepts in Quantum Mechanics

- The entanglement



THE MAP OF QUANTUM PHYSICS

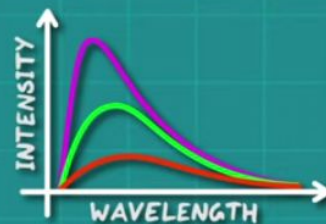


PRE-QUANTUM MYSTERIES

ATOMIC SPECTRA



BLACKBODY RADIATION



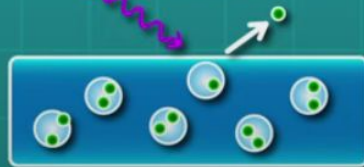
THE STABLE ATOM



RADIOACTIVITY



PHOTOELECTRIC EFFECT



PRE-QUANTUM MYSTERIES

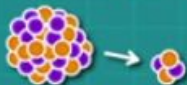
ATOMIC SPECTRA



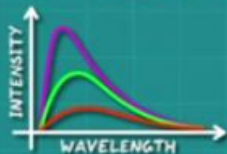
THE STABLE ATOM



RADIOACTIVITY



BLACKBODY RADIATION



PHOTOELECTRIC EFFECT



QUANTUM FOUNDATIONS

THE WAVE FUNCTION



PARTICLE-WAVE DUALITY



THE BORN RULE



INTERFERENCE PATTERN



THE SCHRÖDINGER EQUATION

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(\vec{r}, t) = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi(\vec{r}, t) + V(\vec{r}) \Psi(\vec{r}, t)$$

DOUBLE SLIT EXPERIMENT



THE DIRAC EQUATION

$$i\hbar \gamma^\mu \partial_\mu \psi - mc\psi = 0$$

THE HEISENBERG UNCERTAINTY PRINCIPLE



DEFINITE POSITION



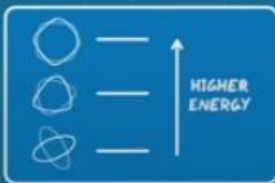
DEFINITE MOMENTUM

BELL'S THEOREM



NON-LOCALITY

ENERGY QUANTIZATION



QUANTUM PHENOMENA

PARTICLE PROPERTIES



QUANTUM NUMBERS

QUANTUM SPIN



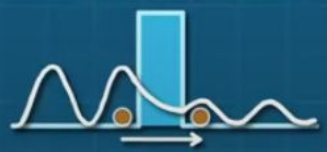
SUPERPOSITION



ENTANGLEMENT



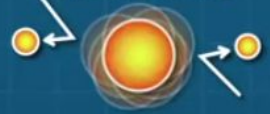
QUANTUM TUNNELING



SUPERCONDUCTIVITY



DECOHERENCE



QUANTUM HALL EFFECT



SUPERFLUIDITY



CASIMIR EFFECT



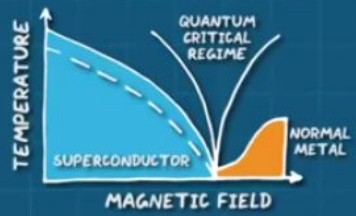
TOPOLOGICAL PHASE TRANSITIONS



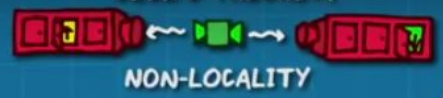
UNCERTAINTY PRINCIPLE



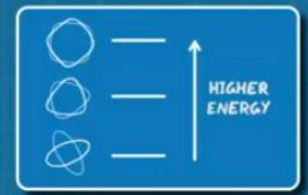
PHASE TRANSITIONS



BELL'S THEOREM



ENERGY QUANTIZATION



ZERO-POINT ENERGY





COOPER PAIRS

SUPERFLUIDITY



NUCLEAR MAGNETIC RESONANCE IMAGING

MAGNETIC RESONANCE IMAGING



SOLID STATE DEVICES

QUANTUM TECHNOLOGY

BAND THEORY OF SOLIDS



LIGHT EMITTING DIODES

POSITIVE TERMINAL



NEGATIVE TERMINAL

SUPERCONDUCTING MAGNETS

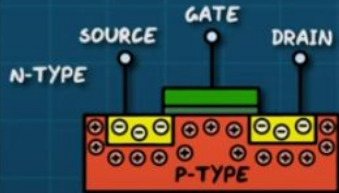


S.Q.U.I.D.S



JOSEPHSON JUNCTION

TRANSISTORS



LASERS



ELECTRON MICROSCOPES



SCANNING TUNNELING MICROSCOPES

SOLAR PANELS



CHARGE-COUPLED DEVICES

CCD SENSOR

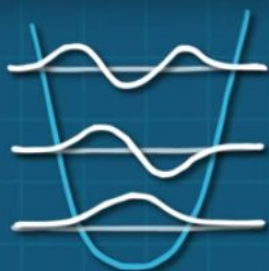


ATOMIC CLOCKS



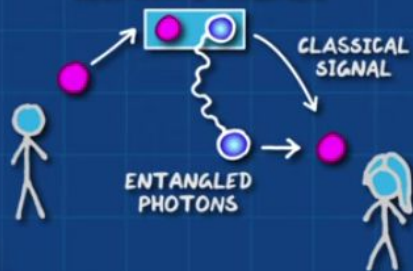
ATOMIC FORCE MICROSCOPES

ZERO-POINT ENERGY



QUANTUM TELEPORTATION

BELL-STATE ANALYSER



QUANTUM INFORMATION

QUANTUM CRYPTOGRAPHY



QUBITS



QUANTUM COMPUTING



QUANTUM SIMULATION

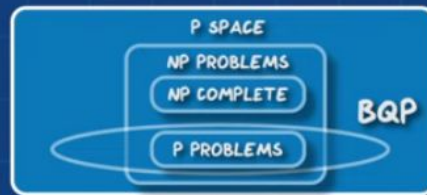


QUANTUM COMMUNICATION

QUANTUM INTERNET



QUANTUM COMPLEXITY COMPUTATIONAL COMPLEXITY



CONDENSED
MATTER
PHYSICS

QUANTUM BIOLOGY

PHOTOSYNTHESIS



BIRD
NAVIGATION



SENSE OF
SMELL



ENZYMES



COLD ATOM PHYSICS

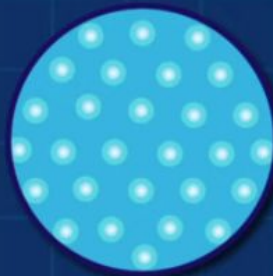
DEGENERATE
ULTRACOLD GASES



DEGENERATE
FERMI GAS

BOSE-EINSTEIN
CONDENSATE

RYDBERG MATTER



QUANTUM
SIMULATOR

GRAVITY
SENSOR

PHONON
TRANSPORT

QUANTUM
TUNNELING

SCANNING
TUNNELING
MICROSCOPES

FORCE
MICROSCOPES

QUANTUM CHEMISTRY

ELECTRONIC
STRUCTURE



MOLECULAR
DYNAMICS



QUANTUM
MONTE CARLO
METHODS



NUCLEAR PHYSICS

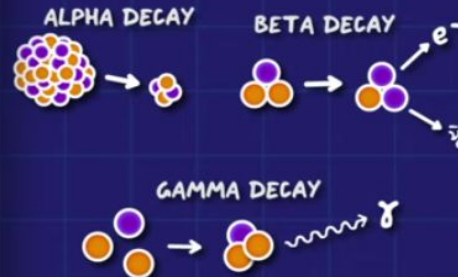
NUCLEAR FISSION



NUCLEAR FUSION



RADIOACTIVE DECAY



NUCLEAR
POWER

NUCLEAR
WEAPONS

NUCLEAR
MEDICINE

MRI

ION IMPLANATION

RADIOCARBON DATING

PARTICLE PHYSICS

QUANTUM CHROMODYNAMICS

STRONG FORCE

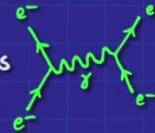


ELECTROWEAK INTERACTIONS

ELECTROMAGNETISM + WEAK FORCE

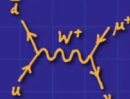
γ W^- W^+ Z^0

QUANTUM ELECTRODYNAMICS



UM
TION

FEYNMAN DIAGRAMS



ANTI-MATTER

PROTON ANTI-PROTON



P

P-bar

PARTICLE ACCELERATORS



THE STANDARD MODEL OF PARTICLE PHYSICS

QUARKS



THE HIGGS BOSON

GAUGE BOSONS

LEPTONS

NUCLEAR PHYSICS

NUCLEAR FISSION



NUCLEAR FUSION



QUANTUM THEORY

POSTULATES (PARAPHRASED)

1. WAVE FUNCTION DETERMINES EVERYTHING
2. ALL OBSERVABLES HAVE OPERATORS
3. OBSERVABLES ARE HERMITIAN
4. EIGENFUNCTIONS OF OPERATORS ARE INDEPENDENT
5. EXPECTATION VALUE INTEGRAL
6. TIME DEPENDENT SCHRÖDINGER EQUATION

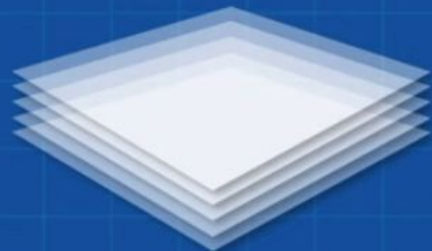
QUANTUM INFORMATION

QUANTUM

PATH INTEGRALS



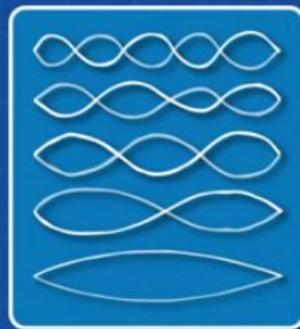
QUANTUM FIELD THEORY



SYMMETRIES



HILBERT SPACE



INTERPRETATIONS OF QUANTUM MECHANICS

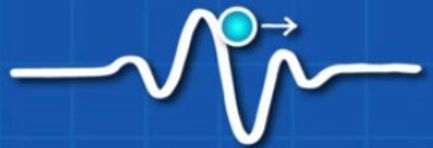
COPENHAGEN



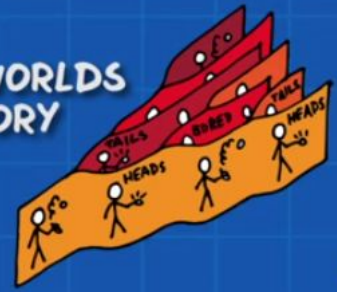
IS THE WAVEFUNCTION REAL?

THE MEASUREMENT PROBLEM

PILOT WAVE



MANY WORLDS THEORY



CONSISTENT HISTORIES



QBISM



AND MANY OTHERS...

TRANSACTIONAL INTERPRETATION

STOCHASTIC INTERPRETATION

QUANTUM DARWINISM

COSMOLOGICAL INTERPRETATION

ALTERNATIVE COLLAPSE

QUANTUM GRAVITY

QUANTUM FIELD THEORY



QUANTUM
MECHANICS

SPECIAL
RELATIVITY

**BUT NOT
GENERAL RELATIVITY
AND SO NOT GRAVITY**

QUANTUM GRAVITY

M-THEORY



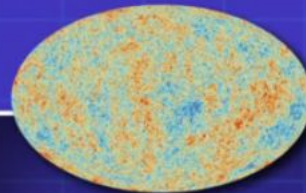
STRING THEORY



LOOP
QUANTUM
GRAVITY



BLACK
HOLES



COSMIC MICROWAVE
BACKGROUND

**WHAT IS REALLY
IMPORTANT TO TEACH?**



Historical
approach

Conceptual
approach



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Riflessioni sull'insegnamento/ apprendimento della fisica quantistica

Olivia Levrini

Dipartimento di Fisica e Astronomia

L'istruzione "tradizionale" per argomenti di fisica quantistica è molto simile in tutti i paesi occidentali.

Corpo nero

Effetto fotoelettrico

Effetto Compton

Modello atomico di Thomson

Modello atomico di Rutherford

Modello atomico di Bohr

De Broglie...

L'elettrone
come una
trottola

Modello
atomico di
Sommerfeld

Il principio di
indeterminazione
(microscopio di
Heisenberg)

Modello
atomico a
orbitali

Interplay between mathematics and physics to catch the nature of a scientific breakthrough: The case of the blackbody

Laura Branchetti*

Department of Mathematical, Physical and Computer sciences, University of Parma, Parma 43124, Italy

Alessia Cattabriga[†]

Department of Mathematics, University of Bologna, Bologna 40126, Italy

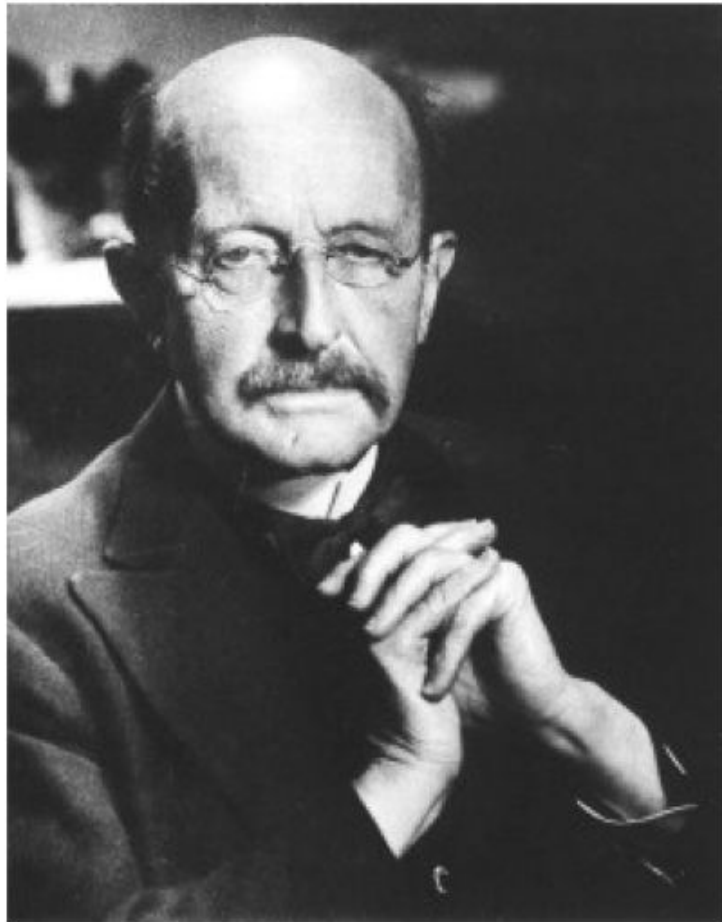
Olivia Levrini[‡]

Department of Physics and Astronomy, University of Bologna, Bologna 40126, Italy



(Received 26 December 2018; published 23 September 2019)

This paper aims to provide a contribution to the research in physics education regarding the interplay between mathematics and physics in teaching and learning physics at the university level. The argument is developed through a study focused on the historical case study of the blackbody that led Planck to make one of the most significant scientific breakthroughs in physics: the introduction of discreteness and quantization into physical processes. The study is methodologically guided by the model that Udden, Karam, Pietrocola, and Pospiech elaborated to highlight the interplay between physics and mathematics within teaching and learning practices [O. Udden, R. Karam, M. Pietrocola, and G. Pospiech, *Modelling mathematical reasoning in physics education*, *Sci. Educ. Netherlands* **21**, 485 (2012)]. The model emphasizes the distinction between the technical and structural roles of mathematics in physics, with the latter role being argued to correspond to processes of mathematization and interpretation. We used this model to analyze Planck's original papers and to reconstruct the reasoning that, thanks to the structural role played by mathematics, paved the way for the quantistic scientific breakthrough. The results of the analysis led us to design a teaching tutorial that we implemented with mathematics and physics university students. Students' reactions are reported to discuss the educational potential of the approach beyond the specific case and to argue for its potential general application to other similar physics topics.



Max Planck
(Kiel 1858, Gottinga 1947)

- a. *On an Improvement of Wien's Equation for the Spectrum (1900a)*
- b. *On the Distribution Law of Energy in the Normal Spectrum (1900b)*
- c. ...

“We must now give the distribution of the energy over the separate resonators of each group, first of all the distribution of the energy E over the N resonators of frequency ν .

If E considered to be continuously divisible quantity, this distribution is possible in infinitely many ways.

We consider, however – this is the most essential point of the whole calculation – E to be composed of a very definite number of equal parts and use thereto the constant of nature $h = 6.55 \times 10^{-27}$ erg·sec.” (Planck, 1900b)

“È ben noto come la soluzione che Planck offre al problema della distribuzione spettrale della radiazione emessa da un corpo «nero» si basi **sull'ipotesi, indubbiamente sconcertante, della «quantizzazione» dell'energia**. Il significato di una simile ipotesi non è a prima vista ben chiaro: occorreranno quasi dieci anni di dibattito teorico perché, la comunità scientifica si renda conto che con la teoria di Planck **il concetto stesso di processo fisico deve subire una trasformazione radicale, e non può più essere coerentemente inserito nell'immagine classica della realtà fisica**. La teoria del «corpo nero» impone infatti che le **grandezze dinamiche fondamentali che caratterizzano il comportamento di atomi ed elettroni debbano variare in modo discontinuo, passando da un valore all'altro senza percorrere tutti i possibili valori intermedi**. La dottrina atomistica, fino allora centrata sull'ipotesi della limitata divisibilità della materia, deve quindi fare un passo ulteriore ed estendersi anche alla **concezione dei processi fisici elementari**. Anche questi hanno una struttura «atomica», **ossia implicano «transizioni» intere, finite, discontinue.**”

(Tarsitani, Dilemma onda-corpuscolo, 1983)

Albert Einstein
(Ulm 1979, Princeton 1955)



*[...] mi sembra che le osservazioni effettuate sulla “radiazione del corpo nero”, la fotoluminescenza, l’emissione di raggi catodici mediante luce ultravioletta e su altri fenomeni che **implicano l’emissione o la trasformazione della luce, possano essere meglio comprese se si adotta l’ipotesi** che l’energia della radiazione sia distribuita nello spazio in modo discontinuo. In base all’ipotesi che qui viene avanzata, quando un raggio di luce si propaga partendo da un punto, l’energia non si distribuisce con continuità su di un volume sempre crescente, bensì consiste in un numero finito di quanti di energia, localizzati nello spazio, che si muovono senza suddividersi e che possono essere assorbiti o emessi solo globalmente”.*

Albert Einstein, “Un’ipotesi euristica sulla natura della radiazione”,
Annalen der Physik 177, 1905



Effetto fotoelettrico e la nuova tappa del dilemma continuo-discreto

“Le due grandi «scoperte» [di Einstein] del 1905, la teoria dei quanti di luce e la teoria della relatività, hanno in comune **l'attacco spregiudicato all'etere**, fino allora considerato in modo pressoché unanime l'ente fisico primario. Dimostrare che una gamma molto ampia di fatti sperimentali **rende necessario attribuire anche alla radiazione una struttura corpuscolare**, significa allora per Einstein indicare una strada per ricomporre lo stridente dualismo tra onde e corpuscoli che caratterizzava il punto di arrivo dei recenti sviluppi della fisica teorica.

Con Einstein il dilemma onda-corpuscolo entra nella sua fase decisiva. La teoria dei quanti di luce non può spiegare tutti i fatti sperimentali, così come non può farlo la teoria ondulatoria. Per la prima volta nella storia della fisica appare allora evidente che *lo stesso oggetto, la radiazione, deve possedere contemporaneamente proprietà corpuscolari e proprietà ondulatorie.* “ (Tarsitani, 1983)



I processi della fisica classica e la legge di continuità

“natura non operator per saltum”

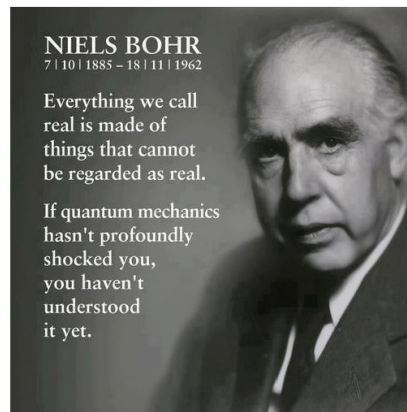
uno dei dogmi centrali della descrizione fisica



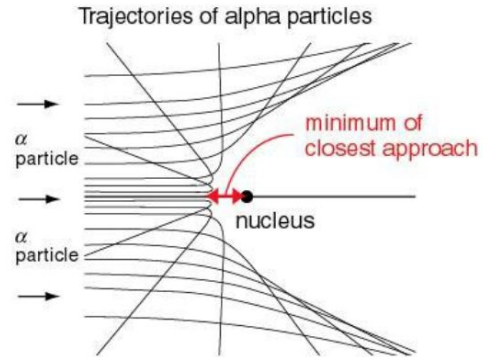
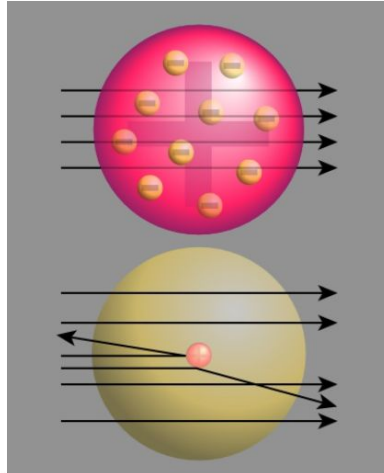
I livelli energetici...

1913: natura facit saltus...

Niels Bohr
(Copenaghen 1885-1962)



L'atomo di Rutherford (1911)



Un "nucleo nudo"



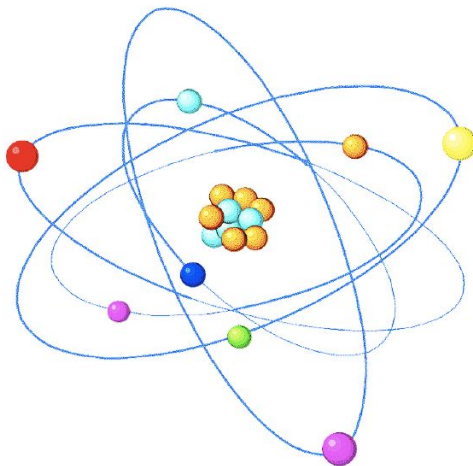
Il problema della struttura atomica...

“Mentre Rutherford e Darwin avevano considerato il nucleo e gli elettroni atomici separatamente, ignorando di volta in volta l’una o l’altra componente dell’atomo, Bohr comprese che una teoria che riuscisse a spiegare il modo in cui le particelle alfa interagivano con gli elettroni atomici ci avrebbe potuto svelare la vera struttura dell’atomo” (Kumar, 2008)

**... che necessariamente non era
“classica”.**

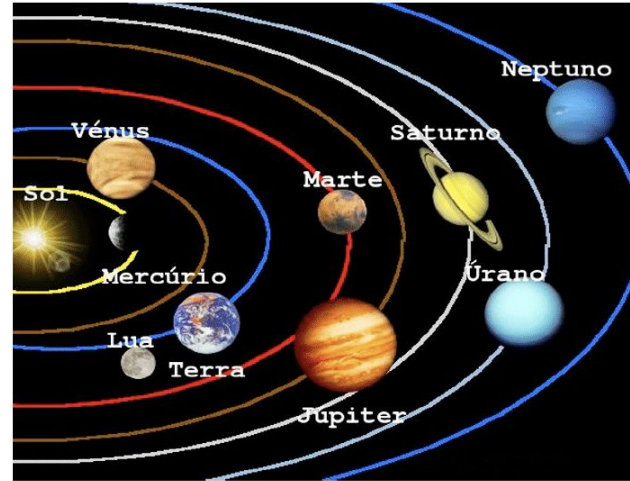
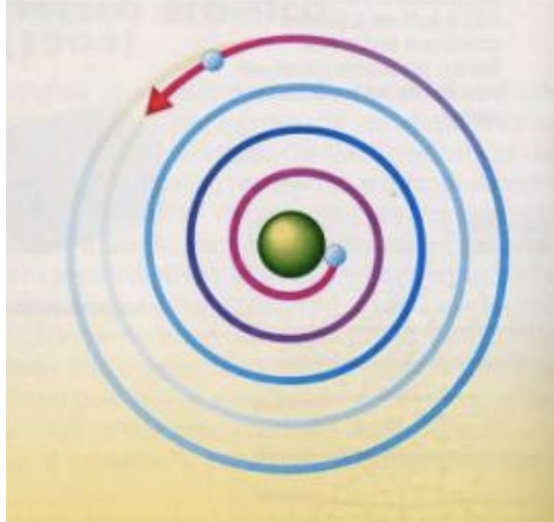


**Un “classico” modello planetario, benché elegante,
semplicemente non poteva funzionare**

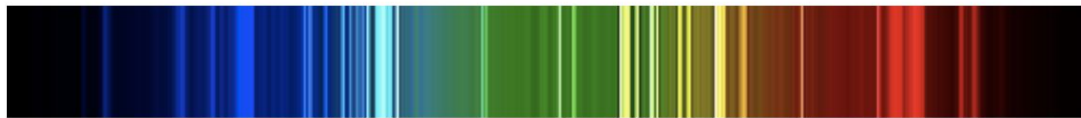


ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

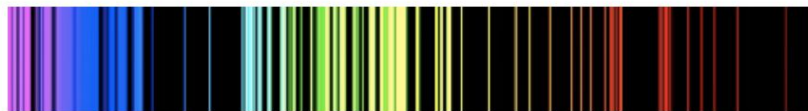
Il problema della stabilità



I “fatti” sul tappeto di cui tener conto



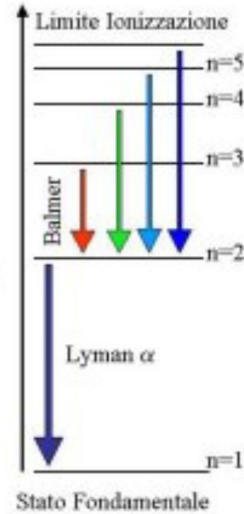
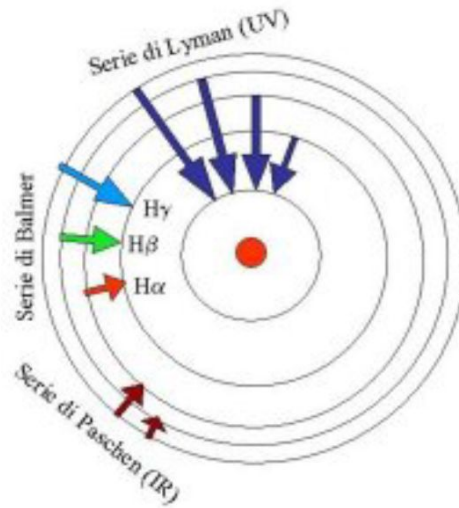
La “firma” dell’azoto



La “firma” del ferro



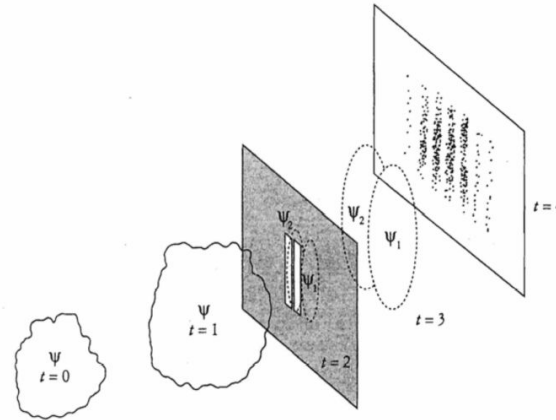
L'atomo di Bohr e le sue forme di rappresentazione



E. SCHRÖDINGER:

“Le particelle sono semplici apparenze” (The Interpretation of Quantum Mechanics, Ox Bow Press, Woodbridge 1995)

“Non si deve attaccare alcun significato speciale al cammino dell’elettrone... e ancor meno alla posizione di un elettrone nel suo cammino.... l’onda...non solo riempie tutto il cammino simultaneamente, ma si estende addirittura notevolmente in tutte le direzioni”.



M. BORN: “l’interpretazione [ondulatoria di Schrödinger] sembrava inaccettabile”

(The statistical interpretation of quantum mechanics - Nobel Lecture, December 11, 1954. In Nobel Lectures in Physics 1942-1962, Elsevier, Amsterdam 1964)

“Schrödinger credeva ancora che la sua teoria ondulatoria permettesse un ritorno alla fisica classica deterministica [...]

Alla luce dei fatti sperimentali, a noi di Gottinga questa interpretazione sembrava inaccettabile. A quel tempo era infatti già possibile contare le particelle mediante scintillazione o col contatore di Geiger, e fotografare le loro tracce con l’aiuto della camera a nebbia di Wilson.”



Il dualismo onda-particella (*)

Introdotta da Einstein nel 1909, a proposito della relazione di Planck sul corpo nero;

Esplorato in tutte le sue possibili accezioni:

-una forma è manifestazione dell'altra (Schrödinger e Born);

-sia onda sia particella (De Broglie, Bohm);

-a volte l'una, a volte l'altra (un po', un po') (Bohr, Pauli).

-la fisica deve occuparsi di *perché* conosce e di *come* conosce (epistemologia e metodologia) e abbandonare ogni pretesa di dire come è fatto il mondo (ontologia) (Heisenberg e Jordan);

(*) Introzzi G. (2010). Il dualismo onda/particella: analisi storica e recenti interpretazioni. Atti Acc. Rov. Agiati, a. 260, 2010, ser. VIII, vol. X, B: 5-18.



I dati ottenuti in **condizioni sperimentali diverse [ponendo l'attenzione a diverse fenomenologie]** non si possono racchiudere in una singola immagine, ma debbono essere considerati complementari. Stando così le cose, l'attribuzione di qualità fisiche tradizionali agli oggetti atomici implica un elemento essenziale di ambiguità, come si vede immediatamente nella contraddizione relativa alle proprietà corpuscolari e ondulatorie degli elettroni e dei fotoni, in cui ci troviamo di fronte a immagini contrastanti, ognuna delle quali si riferisce a un aspetto essenziale dei dati sperimentali.

(Discussione con Einstein sui problemi epistemologici della fisica atomica, 1949, in Autobiografia scientifica, pp. 113- 114)



“Non è affatto sorprendente che il nostro linguaggio sia incapace di descrivere i processi che avvengono negli atomi, visto che ce lo siamo inventati per descrivere le esperienze della vita quotidiana e queste RIGUARDANO OGGETTI DI GRANDI DIMENSIONI. Per di più, è molto difficile modificare il nostro linguaggio in modo tale da renderlo adatto a descrivere i processi atomici, visto che le parole possono solo descrivere cose di cui possiamo formarci immagini mentali; e anche questa è una capacità che ci viene dall’esperienza quotidiana. Per fortuna la matematica non ha queste limitazioni ed è possibile inventare uno schema matematico – la teoria quantistica – che sembra del tutto adatta alla trattazione dei processi atomici; per quel che riguarda la visualizzazione, quindi, ci dobbiamo accontentare di due analogie incomplete – l’immagine ondulatoria e quella corpuscolare.”

(W. Heisenberg)



“La fisica è un tentativo di afferrare concettualmente la realtà fisica, quale la si concepisce indipendentemente dal fatto di essere osservata. In questo senso si parla di “realtà fisica”. Nella fisica prequantistica, non c’era alcun dubbio sul modo di intendere queste cose: nella teoria di Newton, la realtà era rappresentata da punti materiali nello spazio e nel tempo; nella teoria di Maxwell, dal campo nello spazio e nel tempo. Nella meccanica quantistica, la rappresentazione della realtà non è così facile.”

(A. Einstein, Autobiografia scientifica, pp. 49-51)

“La meccanica quantistica è degna di ogni rispetto, ma una voce interiore mi dice che non è ancora la soluzione giusta. È una teoria che ci dice molte cose, ma non ci fa penetrare più a fondo il segreto del gran Vecchio. In ogni caso, sono convinto che questi non gioca a dadi col mondo”.

(A. Einstein, 1926. Lettera a Max Born)



EINSTEIN

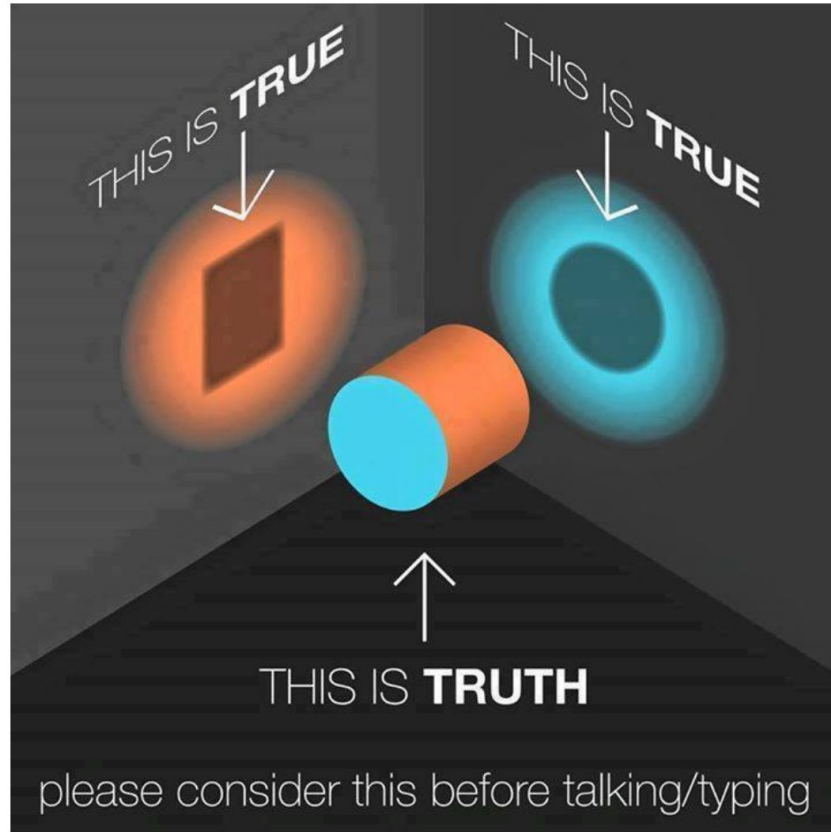
“Credo ancora
nella possibilità di
un modello di
realtà – cioè una
teoria – che
rappresenti le cose
di per sé, e non
solamente la
probabilità che
esse accadano.”



Per alcuni fisici....

“I fisici [...] hanno capito che il punto essenziale non è se una teoria piaccia o non piaccia, ma se fornisca previsioni in accordo con gli esperimenti. La ricchezza filosofica, la facilità, la ragionevolezza di una teoria sono tutte cose che non interessano” (Feynman)





La relazione di indeterminazione

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

“ \hbar tagliato” = $1,054 \times 10^{-34} \text{Js}$

Apparentemente...

“[...] una formuletta - in sé piuttosto arida e arcana - che abbiamo imparato a recitare sui libri di Liceo, dal nome fastidiosamente indimenticabile: il principio di indeterminazione di Heisenberg.”

(M. Cattaneo, Heisenberg e la rivoluzione quantistica, I grandi della scienza, Le Scienze, 2000)



“... in certo senso cessa di essere valida la legge di causalità”

“Nella formulazione rigorosa della legge causale - ***se conosciamo il presente possiamo calcolare il futuro*** - non è la conclusione ad essere sbagliata bensì la premessa.

Non si possono conoscere con certezza la posizione e la velocità iniziali per cui si può calcolare solo un intervallo di possibilità, per posizione e velocità, in ogni istante futuro.

[...] le leggi e le predizioni della meccanica quantistica ‘sono in generale solo di tipo statistico’. Non si può mai predire esattamente il risultato di una singola misura di un qualsiasi processo atomico, ma si può predire solo la probabilità di un risultato in un intervallo di possibilità.”

Heisenberg, 1927



Nella fisica quantistica non sarà più possibile dire che:

a) *l'oggetto possiede valori determinati di posizione e di velocità ad ogni istante,*

b) *l'incertezza è di origine sperimentale,*

c) *la misura rivela il valore della proprietà posseduta dall'oggetto.*

Il concetto di variabili coniugate (la determinazione dell'una determina una indeterminazione nell'altra), di "spettro di valori" e di "probabilità non epistemica"



Il '900 e la Meccanica Quantistica

“La difficoltà con la teoria dei quanti risiede nei concetti, o meglio nelle parole che sono utilizzate nell'abituale descrizione della natura, che hanno tutte origine nella teoria classica” - N. Bohr

“Non è affatto sorprendente che il nostro linguaggio sia incapace di descrivere i processi che avvengono negli atomi, visto che ce lo siamo inventati per descrivere le esperienze della vita quotidiana...” -
W. Heisenberg

Termini classici come particella, onda, traiettoria o orbita non sono più idonei a descrivere la natura dei fenomeni quantistici.
Occorre pensare a quale linguaggio la fisica può utilizzare.



Ruoli della metafora (o dell'analogia) nella storia della Scienza

Nel corso della storia della scienza, la
Metafora è stata oggetto di pareri spesso contrastanti



- Artificio per celare il sapere (Alchimia)
- Fonte di 'inquinamento' del linguaggio scientifico (Bacone)



- Segno d'ingegno (Aristotele)
- Strumento per indagare nuovi fenomeni (Carnot, Keplero...)
- 'Science forming' ed analogia formale (Maxwell)



La metafora nella didattica della Fisica

Strumento noto nella letteratura di ricerca in didattica e che può svolgere differenti ruoli.



“A è B” oppure “A è come B in quanto...”
Attivazione di risorse cognitive per interpretare fenomeni nuovi:
• Circuito elettrico / acqua

Sostitutivo/comparativo (Boyd)



Fa cogliere il meccanismo di ragionamento che sta alla base della modellizzazione:
• Sistema solare / modello atomico

Interazione (Black)



Vantaggi:

- Ricerca delle similitudini e dei limiti: grazie alle dinamiche di mapping allena lo studente a ragionare e a migliorare la comprensione concettuale dei contenuti scientifici.
- Accomodamento: richiama all'attenzione dello studente modelli fisici già incontrati e favorisce così la rappresentazione di nuovi oggetti (corpo nero, fotone, dualismo..)

Svantaggi:

- Eccessiva banalizzazione: termini non chiari e poco comprensibili dagli studenti, metafore eccessivamente cristallizzate o troppo semplici possono allontanare troppo dal concetto che si vuole insegnare generando conoscenze imprecise e approssimative.

