

# OLD (BUT GOLD) QUANTUM THEORY

**Marco Giliberti** - Luisa Lovisetti

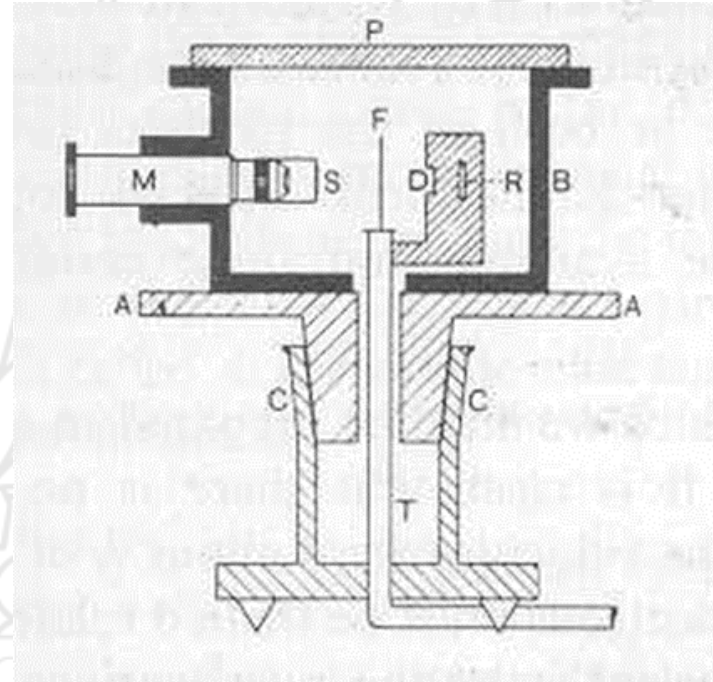


UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI MILANO

## Atomo di Bohr

«L'apparato consisteva essenzialmente in una robusta scatola metallica cilindrica B che conteneva la sorgente R di particelle  $\alpha$ , il foglio bersaglio F, e lo schermo di solfuro di zinco S attaccato rigidamente a un microscopio M. La scatola era fissata ad una piattaforma circolare A, che poteva essere ruotata tramite il giunto a tenuta d'aria C. Il microscopio e lo schermo di solfuro di zinco ruotavano insieme con la scatola, mentre il foglio diffusore e la sorgente rimanevano fissi. La scatola era chiusa dal coperchio di vetro P e, al suo interno, poteva essere fatto il vuoto tramite il tubo di aspirazione T. La sorgente di particelle era un tubo da raggi  $\alpha$  riempito con radon.[...] Un sottile pennello di particelle a uscenti dalla sorgente R veniva diretto ortogonalmente sul foglio F dopo essere passato attraverso il diaframma D. Ruotando la piattaforma A le particelle a diffuse in direzioni differenti potevano essere osservate sullo schermo di solfuro di zinco [tramite il microscopio che permetteva di vedere le scintillazioni che esse producevano]»

## RIPRENDIAMO GLI ESPERIMENTI DI GEIGER E MARSDEN



*Geiger H. and Marsden E., Proc. Roy. Soc., 82, 495 (1909).*

## Torniamo agli esperimenti di Geiger e Marsden e al «modello» atomico di Rutherford. Ipotesi del modello?

- 1) Lo scattering a grandi angoli di deflessione è dovuto ad un singolo urto violento.
- 2) L'atomo del target è costituito da un nucleo che assumiamo puntiforme e di carica  $Ze$ , contenente praticamente tutta la massa dell'atomo e circondato da una distribuzione sferica uniforme di carica  $-Ze$  e raggio  $R$ .
- 3) Nell'urto il nucleo rimane praticamente fermo e non assorbe energia.
- 4) L'unica forza agente nello scattering è quella elettrostatica.
- 5) Nel caso di angoli di deflessione non troppo piccoli l'interazione avviene solo col nucleo dell'atomo.

Inoltre conviene precisare che:

- 6) L'interazione è descritta in termini non relativistici.

E, visto che all'epoca in cui Rutherford fece questo modello la meccanica quantistica non si era ancora sviluppata,

- 7) L'interazione è descritta dalla Meccanica Classica.

# Torniamo agli esperimenti di Geiger e Marsden e al «modello» atomico di Rutherford. Che cosa ci dice questo modello?

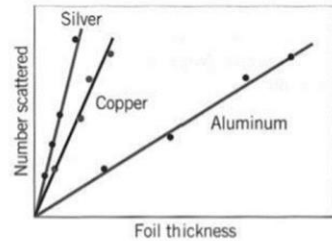


FIGURE 6.11 The dependence of scattering rate on foil thickness for three different scattering foils.

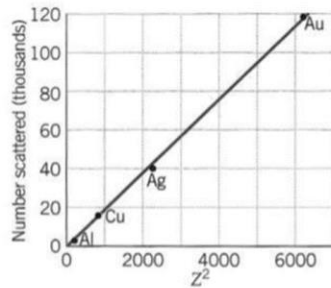
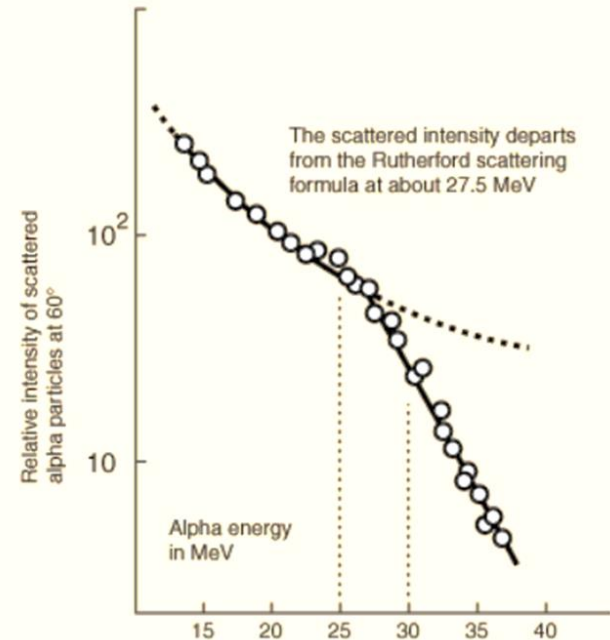


FIGURE 6.12 The dependence of scattering rate on the nuclear charge  $Z$  for foils of different materials. The data are plotted against  $Z^2$ .

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left( \frac{Zze^2E}{16\pi\epsilon_0} \right)^2 \text{cosec}^4 \frac{\phi}{2}$$



Eisberg, R. M. and Porter, C. E., Rev. Mod. Phys. 33, 190 (1961)

# ATOMO DI BOHR





**«... come ha mostrato Rutherford, l'assunzione dell'esistenza dei nuclei [...] sembra essere necessaria per tenere conto dei risultati degli esperimenti con grandi angoli di scattering dei raggi alfa.»**

**«Il risultato della discussione di questi problemi sembra essere il riconoscimento generale dell'inadeguatezza dell'elettrodinamica classica nel descrivere il comportamento di sistemi di dimensioni atomiche.**

**Qualunque modifica ci possa essere nelle leggi del moto degli elettroni, sembra necessario introdurre nelle leggi in questione una quantità estranea all'elettrodinamica classica, cioè la costante di Planck... [Si assume] che l'equilibrio dinamico del sistema negli stati stazionari possa essere discusso con l'aiuto della meccanica ordinaria, mentre la transizione dei sistemi tra stati stazionari diversi non può essere trattata sulle stesse basi.»**

*Bohr N., «(1913) On the Constitution of Atoms and Molecules”, Phil. Mag., XXVI,*

**D'altra parte il modello di Rutherford è carente perché non contiene alcuna quantità dalla quale determinare le dimensioni dell'atomo.**

**«Con l'introduzione [della costante di Planck] la questione della configurazione stabile degli elettroni negli atomi viene essenzialmente cambiata perché tale costante [...] insieme con la massa e la carica delle particelle, può determinare una lunghezza dell'ordine di grandezza richiesto».**

*Bohr N., (1913) On the Constitution of Atoms and Molecules*

# Lavora tu

Se  $m$  ed  $e$  sono rispettivamente la massa e la carica di un elettrone, la grandezza  $h^2/me^2$  ha le dimensioni di una lunghezza e ordine di grandezza di  $10^{-9}$  m

Prova a fare i conti e controlla che quanto dice Bohr sia vero

$$h \sim 6.6 \times 10^{-34} \text{ Js}; \quad m \sim 9 \times 10^{-31} \text{ kg}; \quad e \sim 1.6 \times 10^{-19} \text{ C},$$





Consideriamo un sistema semplice costituito da un nucleo carico positivamente di dimensioni molto piccole e da un elettrone che descrive orbite chiuse attorno ad esso. Per semplicità, *supponiamo* che la massa dell'elettrone sia trascurabilmente piccola rispetto a quella del nucleo e, inoltre, che la velocità dell'elettrone sia piccola rispetto a quella della luce. *Assumiamo* dapprima che non ci sia radiazione di energia. In questo caso l'elettrone descriverà orbite ellittiche stazionarie. [...]

*Supponiamo* che l'elettrone all'inizio dell'interazione con il nucleo fosse a grande distanza dal nucleo e non avesse una velocità apprezzabile rispetto a quest'ultimo. *Supponiamo* inoltre che l'elettrone dopo che l'interazione è avvenuta si sia stabilizzato in un'orbita stazionaria attorno al nucleo. *Assumeremo*, per le ragioni che si vedranno in seguito, che l'orbita in questione sia circolare: questa ipotesi, tuttavia, non modificherà i calcoli per i sistemi contenenti un solo elettrone.

*Bohr N., (1913) On the Constitution of Atoms and Molecules*

Let us now *assume* that, during the binding of the electron, a homogeneous radiation is emitted of a frequency  $\nu$ , equal to half the frequency of revolution of the electron [ $f$ ] in its final orbit; then, from Planck's theory, we might expect that the amount of energy emitted by the process considered is equal to  $n\nu h$ , where  $h$  is Planck's constant and  $n$  an integer number.

*Bohr N., (1913) On the Constitution of Atoms and Molecules*

Let us now *assume* that, during the binding of the electron, a homogeneous radiation is emitted of a frequency  $\nu$ , equal to half the frequency of revolution of the electron [ $f$ ] in its final orbit; then, from Planck's theory, we might expect that the amount of energy emitted by the process considered is equal to  $n\nu h$ , where  $h$  is Planck's constant and  $n$  an integer number.

Secondo voi, perché Bohr ipotizza che la frequenza della radiazione emessa sia la metà di quella di rotazione dell'elettrone?

*Bohr N., (1913) On the Constitution of Atoms and Molecules*

Let us now *assume* that, during the binding of the electron, a homogeneous radiation is emitted of a frequency  $\nu$ , equal to half the frequency of revolution of the electron [ $f$ ] in its final orbit; then, from Planck's theory, we might expect that the amount of energy emitted by the process considered is equal to  $n\nu h$ , where  $h$  is Planck's constant and  $n$  an integer number.

Secondo voi, perché Bohr ipotizza che la frequenza della radiazione emessa sia la metà di quella di rotazione dell'elettrone?

$$E = -\frac{me^2Q^2}{8\varepsilon_0^2h^2} \frac{1}{n^2}; \quad \nu = \frac{me^2Q^2}{8\varepsilon_0^2h^3} \frac{1}{n^3}; \quad r = \frac{h^2\varepsilon_0}{m\pi eQ} n^2 = a_0 n^2; \quad a_0 \equiv \frac{h^2\varepsilon_0}{m\pi eQ}$$

*Bohr N., «(1913) On the Constitution of Atoms and Molecules”, Phil. Mag., XXVI,*

# Lavora tu

Se il raggio della prima orbita di Bohr è un quadretto, disegna le prime 10 orbite dell'atomo di Bohr.



## Terza parte: confronto con i dati sperimentali

Per  $n=1$  e  $Q=e$  si ottiene

$$2r=1.1 \times 10^{-10} \text{m}; \quad \nu=6.2 \times 10^{15} \text{Hz}; \quad E=-13.6 \text{eV}.$$

Vediamo che questi valori sono dello stesso ordine di grandezza delle dimensioni lineari dell'atomo, delle frequenze ottiche e dei potenziali di ionizzazione.

La quantità di energia emessa dal passaggio del sistema da uno stato corrispondente a  $n=n_1$  a uno corrispondente a  $n=n_2$  è di conseguenza

$$E_2 - E_1 = \frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \left( \frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right)$$

*Bohr N., (1913) On the Constitution of Atoms and Molecules*



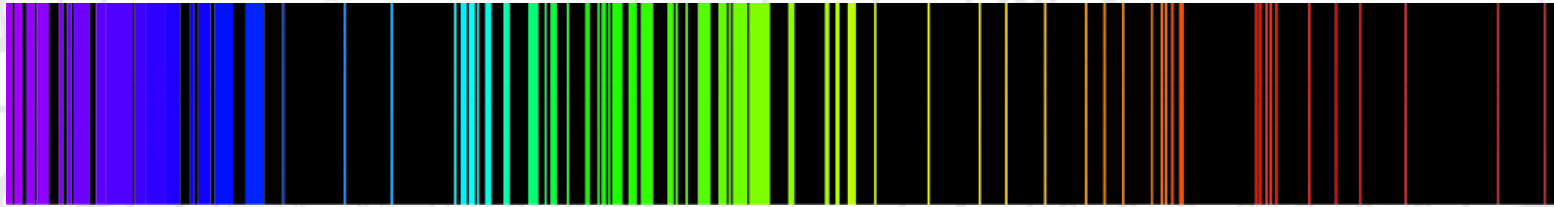
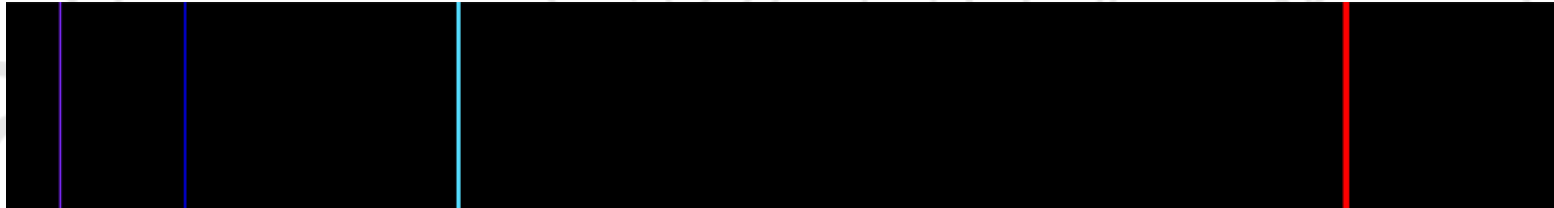
Egli suppone che nel passaggio da un livello energetico a un altro l'elettrone emetta un fotone di energia  $h\nu$  da cui segue che la frequenza della radiazione emessa è:

$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h} = \frac{me^4}{\varepsilon_0^2 h^2} \left( \frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right)$$

“We see that this expression accounts for the law connecting the lines in the spectrum of hydrogen. If we put  $n_2 = 2$  and let  $n_1$  vary, we get the ordinary Balmer series. If we put  $n_2 = 3$ , we get the series in the ultra-red observed by Paschen and previously suspected by Ritz. If we put  $n_2 = 1$  and  $n_1 = 2, 3, 4, 5, \dots$ , we get series respectively in the extreme ultraviolet and the extreme ultra-red, which are not observed, but the existence of which may be expected

*Bohr N., (1913) On the Constitution of Atoms and Molecules*

# Spettri di emissione



## Considerazione poco citata

«... il fatto che non è stato possibile osservare più di 12 linee della serie di Balmer in esperimenti con i tubi a vuoto, mentre 33 linee sono state osservate negli spettri di alcuni corpi celesti, è proprio quanto dovremmo aspettarci dalla teoria precedente. [...] il diametro dell'orbita dell'elettrone [...] è proporzionale a  $n^2$ .

Per  $n=12$  il diametro è uguale a  $1.6 \times 10^{-6}$  cm, cioè uguale alla distanza media tra le molecole in un gas alla pressione di circa 7 mm di mercurio;

per  $n=33$  il diametro è uguale a  $1.2 \times 10^{-5}$  cm, corrispondente alla distanza media delle molecole di un gas alla pressione di circa 0.02 mm di mercurio.

Secondo la teoria la condizione necessaria per l'apparire di un gran numero di linee è perciò una densità molto bassa del gas; per avere simultaneamente una intensità sufficiente per l'osservazione, lo spazio riempito col gas deve essere molto grande. Se la teoria è corretta, possiamo aspettarci di non poter mai osservare in esperimenti con i tubi a vuoto le linee corrispondenti ad alti numeri della serie di Balmer...»

*Bohr N., (1913) On the Constitution of Atoms and Molecules*

## Costruzione del modello a partire dal principio di corrispondenza

Se  $n$  è grande il rapporto tra la frequenza prima e dopo l'emissione sarà molto vicino a 1; e secondo l'elettrodinamica ordinaria dovremmo quindi aspettarci che anche il rapporto tra la frequenza di radiazione e la frequenza di rivoluzione sia quasi uguale a 1.»

“There was rarely in the history of physics a comprehensive theory which owed so much to one principle as quantum mechanics owed to Bohr’s correspondence principle” (Jammer 1966)

*Bohr N., (1913) On the Constitution of Atoms and Molecules*

## Quinta parte: costruzione del modello per gli stati stazionari a partire dalla quantizzazione del momento angolare)

A questo punto Bohr fa un'osservazione che rimarrà come punto di partenza in tutti i manuali: le condizioni rodate in precedenza conducono a un momento angolare dell'elettrone sull'orbita circolare dato da:

$$L_n = n \frac{h}{2\pi}$$

*Bohr N., (1913) On the Constitution of Atoms and Molecules*

L'equazione precedente può essere assunta come nuova regola di quantizzazione.

Si trova così quanto si legge normalmente nei manuali:

1. Un elettrone in un atomo si muove su orbite circolari attorno al nucleo, sotto l'influenza dell'attrazione coulombiana, obbedendo alle leggi della meccanica classica.
2. Al contrario di quanto avviene in meccanica classica non tutte le orbite sono possibili. Un elettrone può muoversi solo su orbite per le quali il momento angolare  $L$  sia un multiplo intero di  $\hbar$ . Tali orbite sono dette orbite o stati stazionari.
3. Un elettrone che si muove su un'orbita permessa non irraggia energia elettromagnetica.
4. L'atomo emette radiazione elettromagnetica solo quando l'elettrone passa da un'orbita con energia totale  $E_i$  a un'orbita con energia totale  $E_f$ . In tal caso la frequenza della radiazione emessa è:

$$\nu = \frac{E_i - E_f}{h}$$

*Bohr N., (1913) On the Constitution of Atoms and Molecules*



## Pregi

- Tale modello riesce a ricondurre a grandezze note la costante di Rydberg per l'idrogeno
- a determinare il valore corretto dell'energia di ionizzazione dell'idrogeno,
- a determinare correttamente le dimensioni atomiche (basta porre  $n=1$  e  $Z=1$  nella formula dei raggi permessi per ottenere che le dimensioni dell'atomo di idrogeno nello stato fondamentale),
- a spiegare la serie di Balmer
- a predire le serie di Lyman, Brackett e Pfund.
- a predire lo spettro dell'elio.
- Non solo: la dipendenza dalla massa del nucleo (contenuta nell'espressione della massa ridotta) permette di spiegare l'effetto isotopico e cioè la piccola differenza che si nota negli spettri di isotopi differenti dello stesso elemento.

*Bohr N., (1913) On the Constitution of Atoms and Molecules*

# Difetti

- Si applica solo ad atomi idrogenoidi (cioè con un solo elettrone); inoltre, anche per tali atomi,
- non fornisce alcun modo per calcolarne l'intensità delle righe spettrali
- una analisi spettroscopica raffinata mostra che la maggior parte delle righe spettrali risulta costituita da più componenti vicine, presenta, cioè, una struttura fine che il modello non è in grado di spiegare.
- Fornisce, inoltre, una stima errata del momento angolare  $L$  dell'elettrone nello stato fondamentale (cioè quello di minima energia) dell'atomo di idrogeno; infatti, per il secondo postulato,  $L$  dovrebbe valere  $\hbar$ , mentre gli esperimenti forniscono chiaramente  $L=0$ . Pertanto, contrariamente all'ipotesi di Bohr, l'elettrone nello stato fondamentale non può ruotare.
- Inoltre il modello “costruisce” un atomo bidimensionale!...
- I postulati di Bohr non possiedono una convincente motivazione né teorica né empirica. “Bohr però era perfettamente conscio di tutte le sue gravi imperfezioni e del fatto che essa [la sua teoria dell'atomo] poteva essere solo una stadio temporaneo; e lo ripeteva ad ogni occasione”.

*Segrè E. Personaggi e scoperte della fisica contemporanea, Oscar Saggi Mondatori 490, Arnoldo Mondatori Editore, Farigliano (Cn) 1996*

## **QP CE**

**Da molti anni stiamo sperimentando i risultati della prima rivoluzione quantistica: elettronica – computer – celle fotovoltaiche – laser.**

**Siamo già entrati nella seconda rivoluzione quantistica:  
E abbiamo visto quanti sforzi vengono fatti per preparare la popolazione a vari livelli scolastici.**

**Purtroppo questi sforzi, uniti alla generale consapevolezza dell'importanza della fisica nella tecnologia, non bastano perché la fisica entri nei nostri cuori e germogli, generando cultura per la società.**

## QP CE

Uno dei principali aspetti culturali della fisica risiede nella sua spinta a trascendere il pensiero comune, a trasgredire la consueta interpretazione della realtà, e a comprendere che domande che per secoli sono sembrate significative sono, invece, prive di significato; e a proporre, così, di nuove.

Come scrive Steven Weinberg a tale proposito

**L'importanza storica della meccanica quantistica non sta tanto nel fatto che fornisce domande a un certo numero di vecchie questioni [ma che] ha cambiato la nostra idea su quali domande sia lecito porre.**

Weinberg S., *Dreams of a final theory. The search for the fundamental laws of nature* (Vintage edition, Londra) 1993, p. 65.

## QP CE

Il lavoro che sto per illustrarvi brevemente è partito 30 anni fa – poi PLS, Teatro

### COSA VUOL DIRE INSEGNARE MQ?

Adesso si è arricchito con un lavoro di dottorato su una presentazione culturale della MQ

Culturale inteso come il contrario di chiacchierata, discorsiva, confusa, divulgativa ecc.

Al livello «giusto» *but* **NOT IN BETWEEN**

Con la prospettiva di essere utile - **A PARTIRE DA FATTI CONCRETI**: da come si insegna oggi a scuola in Italia e nel mondo

**QP CE**

**NOT IN THE VALLEY - NOT ON THE HILL**  
ma vari fronti

Educazione formale

**STORIA PER LA DIDATTICA/DIDATTICA PER LA STORIA**

**EDUCATIONAL RECONSTRUCTION MQ**

Educazione informale

**TEATRO PER MQ**



## **QP CE**

**Studiare l'atomo di Thomson o la meccanica delle matrici o scoprire la differenza tra le onde di Schrödinger e quelle di de Broglie serve a riflettere sul significato fisico di ciò di cui stiamo parlando**

**e ci aiutano moltissimo a inserire questo significato in una rete di conoscenze e relazioni che cambia il nostro modo di vederci nel mondo con conseguenze personali, sociali, etiche...**

## QP CE

**FONTI PRIMARIE (per ora circa un migliaio)**

Fondamentali anche perché le fonti secondarie selezionano aspetti particolari. La fonte primaria consente una visione più ampia

## **QP CE**

### **FONTI PRIMARIE (per ora circa ottocento)**

Fondamentali anche perché le fonti secondarie selezionano aspetti particolari. La fonte primaria consente una visione più ampia

### **FONTI SECONDARIE (per conoscere visioni e interpretazioni e quadri di riferimento)**

## **QP CE**

### **FONTI PRIMARIE (per ora circa un migliaio)**

Fondamentali anche perché le fonti secondarie selezionano aspetti particolari. La fonte primaria consente una visione più ampia

### **FONTI SECONDARIE (per conoscere visioni e interpretazioni e quadri di riferimento)**

**STUDIO DIDATTICO SULL'APPRENDIMENTO** (per conoscere nodi concettuali e disciplinari disciplinari e nodi di apprendimento)

## QP CE

### **FONTI PRIMARIE** (per ora circa un migliaio)

Fondamentali anche perché le fonti secondarie selezionano aspetti particolari. La fonte primaria consente una visione più ampia – **la storia aiuta la didattica**

### **FONTI SECONDARIE** (per conoscere visioni e interpretazioni e quadri di riferimento)

**STUDIO DIDATTICO SULL'APPRENDIMENTO** (per conoscere nodi concettuali e disciplinari disciplinari e nodi di apprendimento) – **la didattica aiuta la storia**

**PEDAGOGICAL DETOUR:** chiarimenti con lo sguardo di oggi e sull'oggi, considerazioni didattiche, considerazioni personali – sì, servono anche *opinioni* personali

## QP CE

SENZA PAURA: per es., se non osserviamo e commentiamo che  $\hbar$  è il simbolo di Saturno poi arrivano libri «stravaganti» a colmare questa necessità di tenere insieme aspetti diversi del «sapere», di non frammentare. **BOTH... AND...**

**Lavoro di ricerca per C-PCK**

## QP CE

SENZA PAURA: per es., se non osserviamo e commentiamo che  $\hbar$  è il simbolo di Saturno poi arrivano libri «stravaganti» a colmare questa necessità di tenere insieme aspetti diversi del «sapere», di non frammentare. **BOTH... AND...**

Consente di introdurre anche il problema del cambiamento di significato di simboli e parole:

l'elettrone di oggi non è l'elettrone di fine Ottocento.

La meccanica quantistica di oggi non è quella di Heisenberg (non solamente perché si è arricchita di scoperte, ma perché individua aspetti diversi del sapere).



## QP CE

SENZA PAURA: per es., se non osserviamo e commentiamo che  $\hbar$  è il simbolo di Saturno poi arrivano libri «stravaganti» a colmare questa necessità di tenere insieme aspetti diversi del «sapere», di non frammentare. **BOTH... AND...**

Consente di introdurre anche il problema del cambiamento di significato di simboli e parole:

l'elettrone di oggi non è l'elettrone di fine Ottocento.

La meccanica quantistica di oggi non è quella di Heisenberg (non solamente perché si è arricchita di scoperte, ma perché individua aspetti diversi del sapere).

**Abbiamo bisogno di strumenti (personali) di attribuzione di significato basati su conoscenze strutturate**

**QP CE**

**Tutto questo aiuta la meccanica quantistica a diventare cultura**

**Di questo abbiamo bisogno nella scuola**

**QP CE**

**Tutto questo aiuta la meccanica quantistica a diventare cultura**

**Di questo abbiamo bisogno nella scuola**

**Bisogna partire all'università per formare le persone (e i futuri insegnanti).**

**Anche con l'aiuto di professionisti di altre discipline (Flavio Albanese), testi letture articoli, poesie (anche di scienziati). BOTH... AND...**

## **QP CE**

**laboratorio didattico di orientamento**

**«Old (But Gold) Quantum Theory – Alla scoperta della prima Fisica dei quanti attraverso gli articoli originali dei suoi protagonisti»**

**In presenza - 9 docenti e a 36 studenti degli ultimi due anni di scuola superiore.**

**5 incontri pomeridiani (da 3 ore ciascuno)**

**impatto culturale generato dalla graduale e tormentata nascita della teoria dei quanti, visione multidisciplinare per inquadrare le fasi concettuali della vecchia teoria dei quanti in un contesto culturale risonante oggi**

**strumenti trasversali utili per una valutazione critica di quanto proposto/appreso.**

# QP CE

## Costituzione di un gruppo di lavoro/studio internazionale

### CUP-GTG

### CULTURAL UNDERSTANDING OF PHISICS - GIREP THEMATIC GROUP

[Info and Contact](#)[Forums](#)[GIREP Communities](#)[Login Area](#)[Members Area](#) 

# GIREP



Groupe International de Recherche sur l'Enseignement de la Physique

International Research Group on Physics Teaching

Internationaler Arbeitskreis zur Förderung des Physikunterrichtes

[Home](#)[About](#) [News](#) [Conferences](#)[Publications](#) [Thematic groups](#)[Representatives](#)[Awards](#)

Cooperations

**QP CE**

**Costituzione di un gruppo di lavoro/studio internazionale**

**CUP-GTG**

**CULTURAL UNDERSTANDING OF PHISICS - GIREP THEMATIC GROUP**

**GIREP**



Home About ▾ News ▾ Conferences Publications ▾ Thematic groups  
Cooperations

**Cultural Understanding of Physics:  
instruments and methods (CUP)**