



Einstein e la nascita della Meccanica Quantistica

Prof. Augusto Garuccio

Dipartimento Interateneo di Fisica

Università di Bari

garuccio@fisica.uniba.it



MECCANICA QUANTISTICA

- CALCOLATORI ELETTRONICI
- SATELLITI CON MIGLIAIA DI LINEE TELEFONICHE
- LASER (RICERCA, MEDICINA, METALLURGIA ...)
- CENTRALI FOTOELETTRICHE
- ENERGIA ATOMICA
- SUPERCONDUTTIVITA'
- CRITTOGRAFIA QUANTISTICA
- COMPUTER QUANTISTICO
- TELETRASPORTO DI SISTEMI QUANTICI
- ...



FISICA CLASSICA E MECCANICA QUANTISTICA

“**STATO**”: REALTA' OGGETTIVA DEL SISTEMA CONSIDERATO

“**OSSERVABILI**”: GRANDEZZE MISURABILI

PER FISICA CLASSICA: **STATO** ≡ **OSSERVABILI**

PER M. Q. : **STATO** ≠ **OSSERVABILI**

[L'OSSERVAZIONE, A CAUSA DELL'ESISTENZA DEL QUANTO D'AZIONE, MODIFICA IN MANIERA IMPREVEDIBILE LO STATO DEL SISTEMA]

Fisica Classica	Meccanica Quantistica
$\overset{p}{F} = m \overset{p}{a}$ $x(t) = x(x_0, v_0, t)$	$i \hbar \frac{\partial \psi(x,t)}{\partial t} = H \psi(x,t)$ $ \psi(x,t) ^2 = \textit{probabilit\`a}$



L'unificazione del sapere fisico nell'800

Meccanica

Termodinamica



Meccanica statistica

Elettricità

Magnetismo

Ottica



Equazioni di Maxwell



Elettromagnetismo

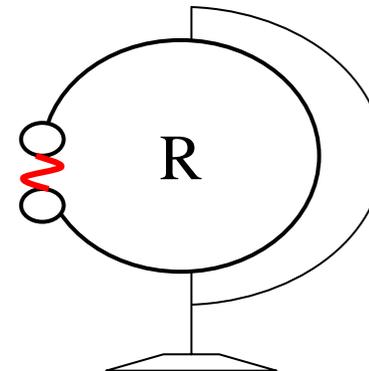
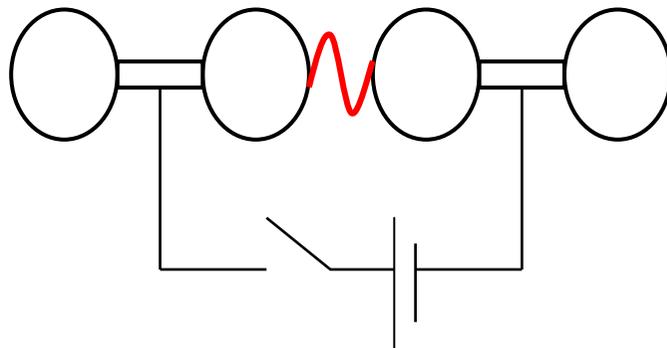


Effetto fotoelettrico



Hertz (1887) : *Gli effetti della luce ultravioletta in una scarica elettrica*

Esperimenti su onde e.m. con fenomeno secondario: **effetto fotoelettrico**





“In modo occasionale racchiusi la scintilla del ricevitore in una scatola scura in modo da osservarla più facilmente, e così osservai che la lunghezza massima della scintilla diveniva più piccola rispetto a prima. Rimuovendo successivamente le varie pareti della scatola, vidi che l'unica parete che causava questo strano effetto era quella che schermava la scintilla del ricevitore dalla scintilla del trasmettitore. Tale parete mostrava questo strano effetto non solo quando era nelle immediate vicinanze della scintilla del ricevitore, ma anche quando essa era posta tra il trasmettitore e il ricevitore a grande distanza dallo stesso ricevitore. Un fenomeno così notevole richiedeva una ulteriore indagine”.

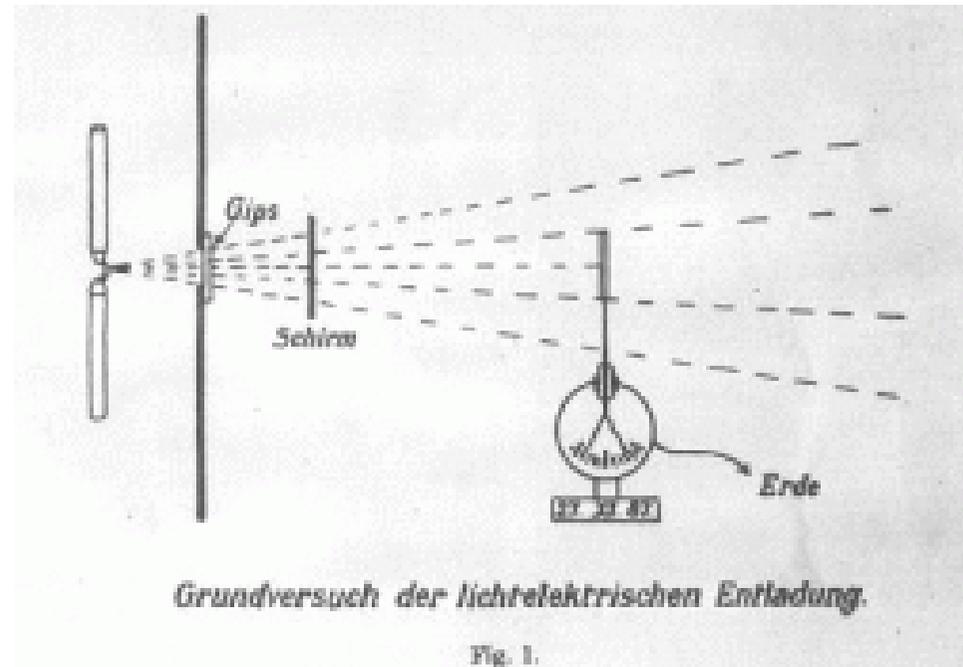


"La luce ultravioletta facilita l'aumento della lunghezza della scintilla in un apparato^T ad induzione....

Mi sono limitato, attualmente, a comunicare i risultati ottenuti, **senza tentare alcuna teoria rispetto alle cause che hanno determinato i fenomeni osservati**".



**Halbwachs
(1888)**

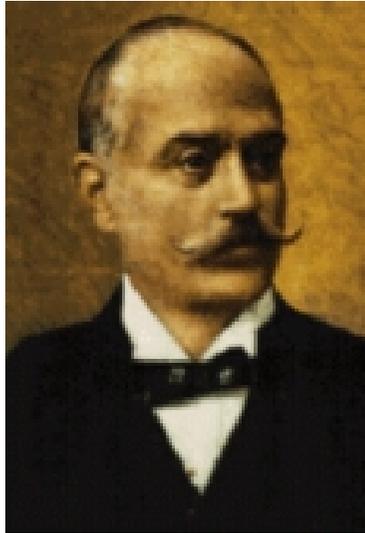


Effetto f.e. su elettroscopio di Zn

- Se caricato negativamente si scarica
- Se neutro si carica positivamente



Augusto Righi



(1888) Dimostra che quando due elettrodi sono esposti a una radiazione ultravioletta si comportano come un arco voltaico.

A questo fenomeno dà il nome di *effetto fotoelettrico*.

1889 progetta un dispositivo per produrre una corrente fotoelettrica continua



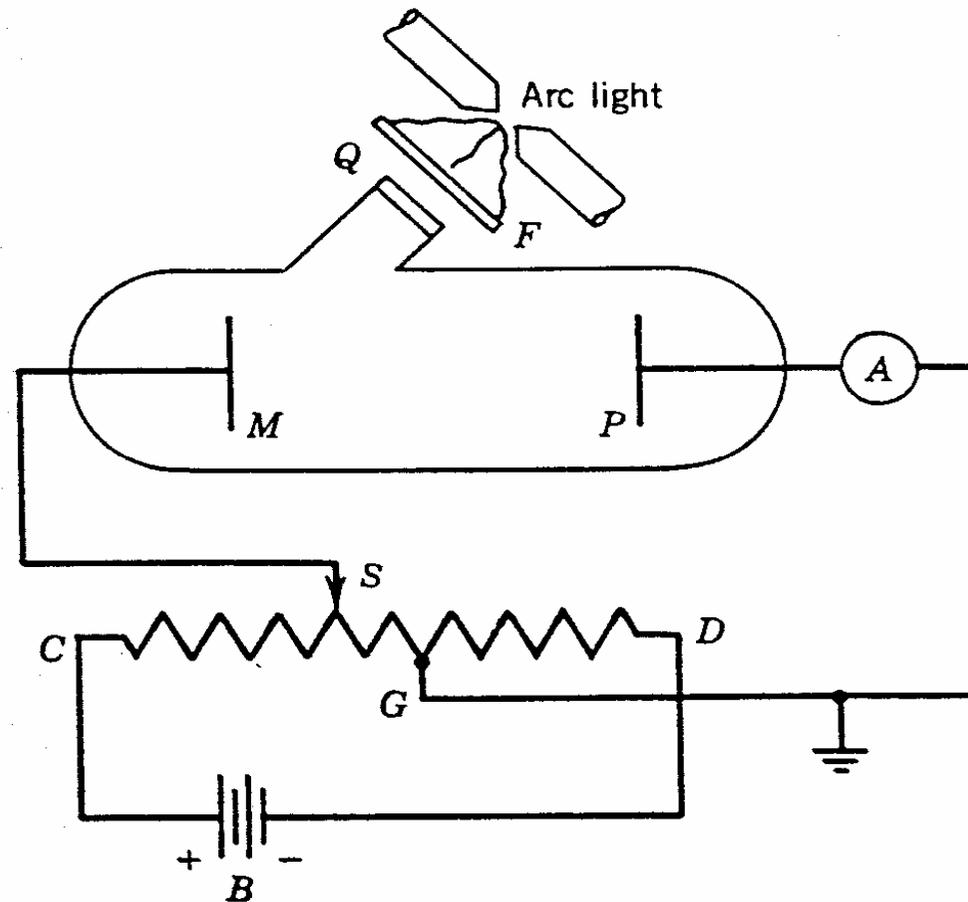
Aleksandr Stoletov

Elster, Geitel (1889-1892): Relazione tra potenziali voltaici e sensibilità fotoelettrica

Lenard

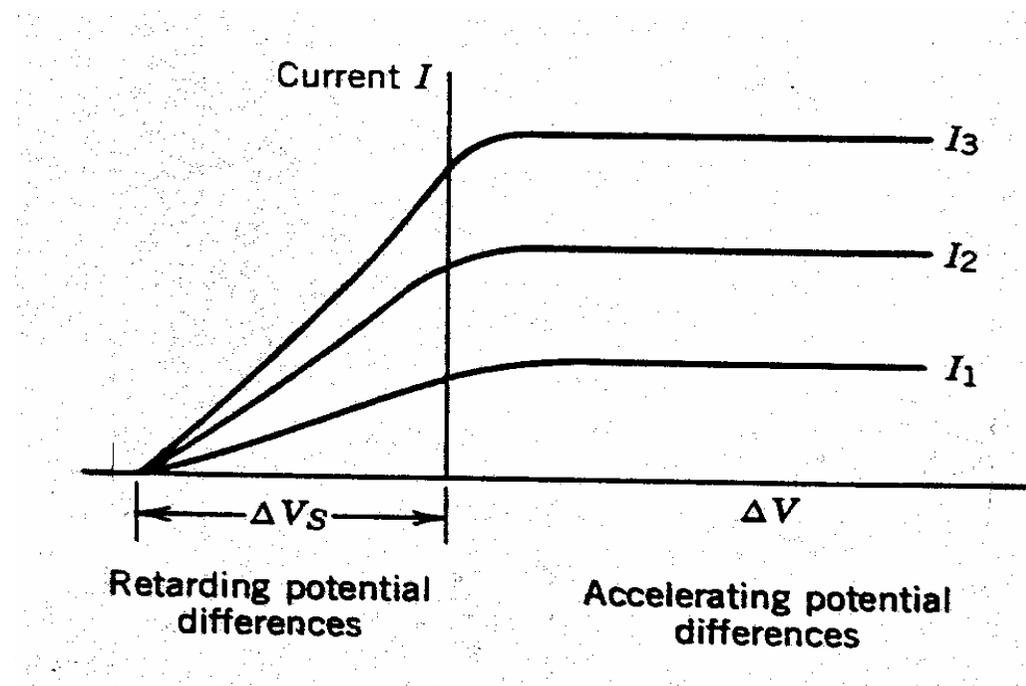


(1902) Studio sistematico effetto f.e.



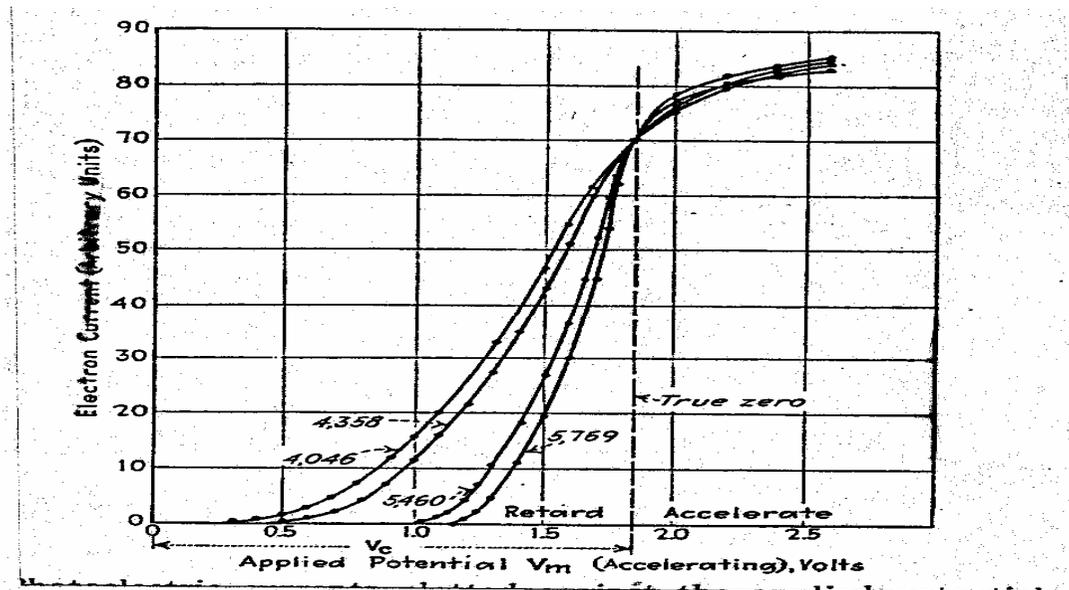


- 1) Corrente proporzionale all'intensità della radiazione incidente (anche a bassa intensità)
- 2) Esistenza di un valore del potenziale di arresto





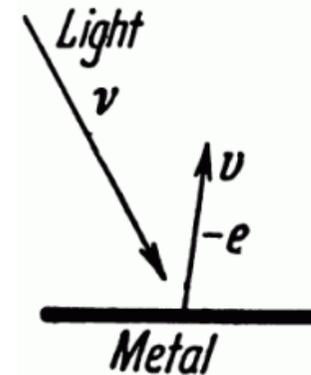
3) Potenziale di arresto funzione della λ della radiazione incidente



4) Esistenza di λ_0 oltre il quale il processo scompare



Difficoltà di spiegazione dell'effetto fotoelettrico



Dopo il 1902 ci si rese gradualmente conto che qualcosa di fondamentale doveva esser cambiato nella concezione della luce. Nel 1903 Joseph Thomson propose di pensare alla luce come composta di "macchie luminose su un fondo nero".



Albert Einstein



Fig.21 Albert Einstein (1879-1955). L'immagine ritrae all'epoca in cui il giovane Einstein lavorava come impiegato di seconda classe presso l'Ufficio federale dei brevetti di Berna e scriveva gli immortali lavori che comparvero nel 1905 sugli 'Annalen der Physik'.

(1905) Emissione e trasformazione della luce da un punto di vista euristico

Fra le descrizioni teoriche che i fisici si sono formati dei gas e di altri corpi ponderabili, e la teoria di Maxwell dei processi elettromagnetici nel cosiddetto spazio vuoto, vi è una profonda differenza formale.



Einstein (1905) Emissione e trasformazione della luce da un punto di vista euristico

Mentre, infatti, lo stato di un corpo si considera completamente determinato dalla posizione e dalla velocità **di un numero finito**, anche se grandissimo, **di atomi e di elettroni**, per la determinazione dello stato elettromagnetico di uno spazio si utilizzano **funzioni spaziali continue**, sicché a definire compiutamente un tale stato non può essere considerato sufficiente un numero finito di grandezze.



Secondo la teoria di Maxwell, in tutti i fenomeni puramente elettromagnetici, e quindi anche nel caso della luce, l'energia deve essere concepita come una funzione spaziale continua, mentre, secondo la concezione attuale dei fisici, l'energia di un corpo ponderabile deve essere rappresentata come una somma estesa agli atomi e agli elettroni.

L'energia di un corpo ponderabile non può suddividersi in parti arbitrariamente numerose e arbitrariamente piccole, mentre secondo la teoria di Maxwell (o, più in generale, secondo ogni teoria ondulatoria) l'energia di un raggio luminoso emesso da una sorgente di luce puntiforme si distribuisce con continuità su un volume via via crescente.



La teoria ondulatoria della luce basata su funzioni spaziali continue si è dimostrata eccellente per la descrizione dei fenomeni puramente ottici e non sarà certo mai sostituita da un'altra teoria.

Si deve tuttavia tener presente che le osservazioni ottiche si riferiscono a valori medi temporali, e non già a valori istantanei, e nonostante gli esperimenti abbiano pienamente confermato la teoria della diffrazione, della riflessione, della rifrazione, della dispersione e costa via, **è concepibile che una teoria della luce basata su funzioni spaziali continue porti a contraddizioni con l'esperienza se la si applica ai fenomeni della generazione e della trasformazione della luce.**



A me sembra in effetti che le osservazioni sulla «radiazione di corpo nero », la fotoluminescenza, la generazione dei raggi catodici tramite luce ultravioletta e altre classi di fenomeni concernenti la generazione o la trasformazione della luce appaiano più comprensibili nell'ipotesi di una distribuzione spaziale discontinua dell'energia luminosa.



Secondo l'ipotesi che sarà qui considerata, quando un raggio luminoso uscente da un punto si propaga, l'energia non si distribuisce in modo continuo in uno spazio via via più grande;

essa consiste invece in un numero finito di quanti di energia, localizzati in punti dello spazio, i quali si muovono senza dividersi e possono essere assorbiti e generati solo nella loro interezza.

Nel seguito esporrò il ragionamento e citerò i fatti che mi hanno condotto su questa strada, nella speranza che il punto di vista qui illustrato possa dimostrarsi utile alle ricerche di qualche studioso.



- Richiama risultato dell'e.m. classico

$$\rho_{\nu} = C \nu^2 T$$

- Da Planck per $T/\nu \gg 1$ ottiene stesso risultato
- Da Wien deduce relazione tra entropia ed energia
- Per $\nu/T \gg 1$ ottiene, per una radiazione che si espande da un volume V_0 a V

$$S - S_0 = \frac{E}{\beta\nu} \ln\left(\frac{V}{V_0}\right) = \frac{R}{N} \ln\left[\left(\frac{V}{V_0}\right)^{\frac{NE}{R\beta\nu}}\right]$$



- Da analogia con gas ideale

$$S - S_0 = \frac{R}{N} \ln \left[\left(\frac{V}{V_0} \right)^n \right]$$

- Deduce che comportamento dell'onda e.m. simile ad un gas di n quanti di energia del valore di

$$E = n E_0 = n \left(\frac{R\beta}{N} \nu \right)$$



- Parte dall'e.m. classico (**equazioni di Maxwell**)
- Considera espansione di un'onda e.m. da un volume V_0 a un volume V
- Considera variazione di entropia
- Da analogia con gas ideale deduce che comportamento dell'onda e.m. è simile ad un gas di n quanti di energia del valore di

$$E = n E_0 = n \left(\frac{R\beta}{N} \right) \nu$$



- **Applicazione alla regola di Stokes per la luce di fluorescenza**

$$\left(\frac{R\beta}{N} \right) \nu_e \leq \left(\frac{R\beta}{N} \right) \nu_i$$

Prevede deviazioni dalla legge "se sono implicati più di un quanto di luce alla volta"

- **Ionizzazione dei gas tramite radiazione u.v.**



- Effetto fotoelettrico

$$eV = \left(\frac{R\beta}{N} \right) \nu - P$$

(P = potenziale di estrazione)

“Se la formula è corretta, V deve essere, riportato su assi cartesiani come funzione della frequenza della luce eccitatrice, una retta la cui inclinazione è indipendente dalla natura della sostanza analizzata”



Difficoltà per la teoria ad essere accettata:

- Stark- favorevole
- Sommerfeld - favorevole, contrario, favorevole,
- Planck- contrario per molto tempo

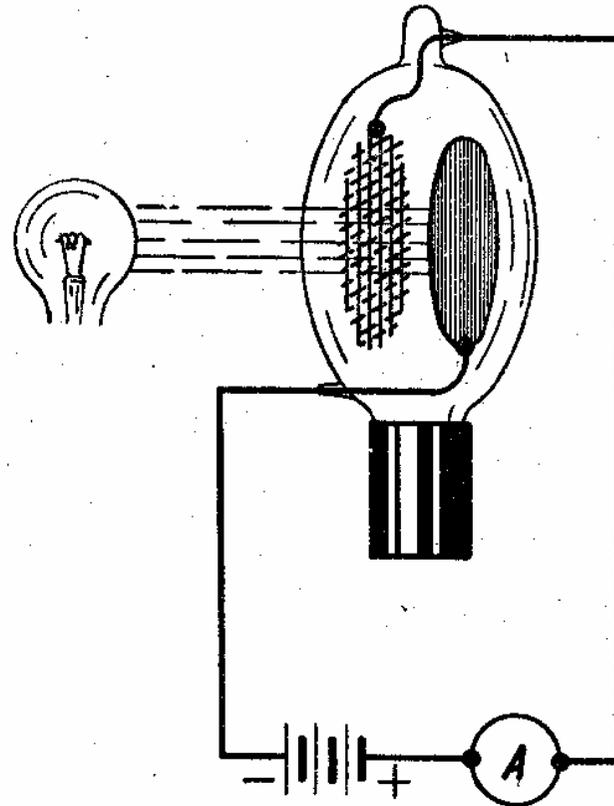
(1907) Teoria dei calori specifici

(1909) Fluttuazione quadratica media dell'energia

$$E^2 - \overline{E}^2 = \overline{E} h \nu + \alpha E^2$$



(1910) J. Elster e H. Geitel costruiscono la prima cellula fotoelettrica.





(1911) I Congresso Solvay di Karlsruhe



(1914-16) Esperimenti di Millikan

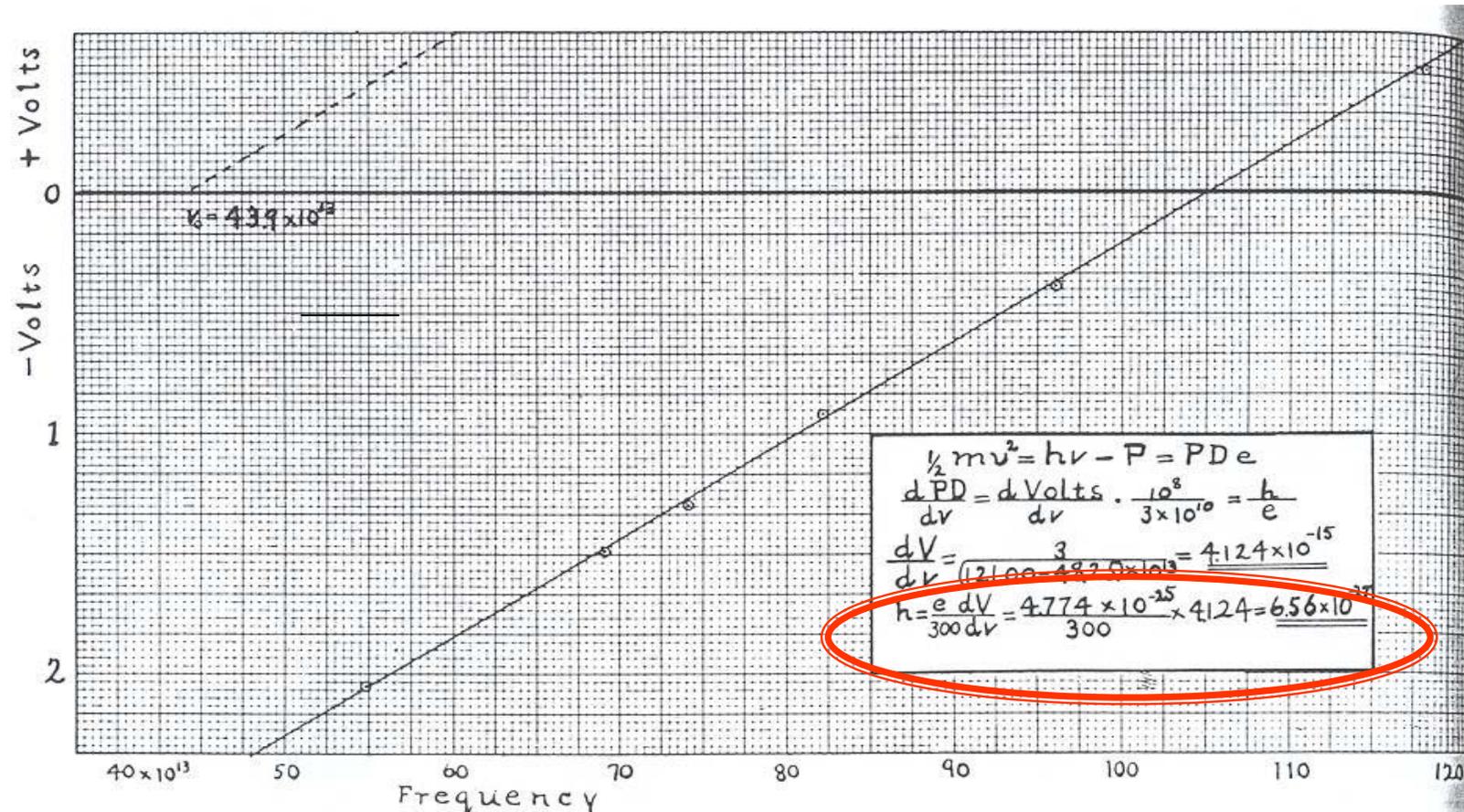


FIGURA 44B. Grafico tratto dall'articolo di Millikan [R. A. Millikan, in *Physical Review* 7, 1916, pag. 355] che rappresenta la relazione lineare fra il potenziale ritardatore critico V_0 e la frequenza

della luce, per una superficie fotosensibile di sodio. Come si vede, Millikan presentò il proprio calcolo della costante di Planck sulla base della sua curva sul grafico. (Concessa da *Physical Review*).



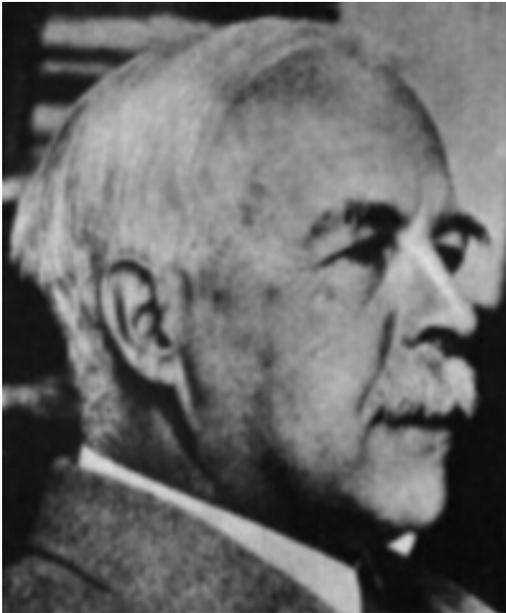
(1917) Einstein: I quanti di luce hanno anche quantità di moto

(1921) Viene conferito a Einstein **il premio Nobel** con la motivazione

"per i suoi servigi alla fisica teorica ed in particolare per la sua scoperta della legge dell'effetto fotoelettrico"



- (1923) Effetto Compton (difusione di raggi x nell'urto con elettroni)
- (1925) Compton-Simon
- (1925) Bothe, Geiger
- (1925) Joffè, Dobronzarov: effetto f.e. a bassissima intensità
- (1926) Bothe: emissione dei raggi X è quantizzata



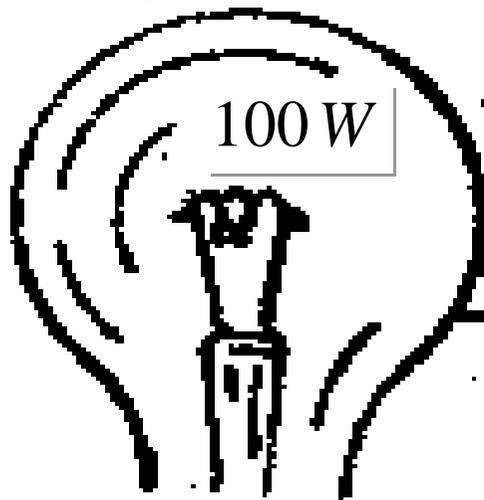
Gilbert Lewis

(1926)

“Mi prendo perciò la libertà di proporre per questo nuovo atomo... il nome di fotone ... una nuova specie di atomo...non creabile e indistruttibile, **che** agisce come portatore dell'energia radiante ”



QUANTO E' PICCOLO UN FOTONE



$$100 \text{ W} = 2,5 \times 10^{20} \text{ fotoni / sec}$$
$$= 250.000.000.000.000.000.000 \text{ fotoni / s}$$

?



“A quale distanza dalla lampadina si deve porre un osservatore affinché nel suo occhio entri un solo fotone al secondo?”.

44.000 Km !



Computer based Tutorials (CBT)

- **Photoelectric Tutor**,
<http://www.physics.umd.edu/perg/qm/qmcourse/NewModel/index.html>
- *Effetto fotoelettrico*
<http://www.unina.it/serverWWW/BSE/catalogo/-schede/f10.txt>
- *Understanding The Unobservable*
<http://beth.canberra.edu.au/eeap/CAUT94/caut94.htm>
- **L'effetto fotoelettrico**
<http://www.ba.infn.it/~garuccio/didattica/fotoelettrico/homepage.htm>



Conclusione

"L'effetto fotoelettrico era meritevole del premio Nobel? Senza alcun dubbio. La memoria di Einstein su quell'argomento fu la prima applicazione della teoria quantistica a sistemi diversi dalla radiazione pura. Quella memoria era veramente geniale. E' una sorprendente incongruenza della storia che il Comitato, conservatore per vocazione, abbia premiato Einstein per il contributo più rivoluzionario che abbia mai dato alla fisica".

(A. Pais, *Sottile è il Signore...*)



I PRECONCETTI SULL'EFFETTO FOTOELETTRICO

- La luce o è soltanto una particella o è soltanto un'onda.
- La luce può essere una particella in un punto e un'onda in un altro punto.
- La luce è una miscela di particelle e di onde.
- Le onde non possono avere proprietà corpuscolari.
- Un fotone è una particella con un'onda all'interno.
- I fotoni di frequenza più alta sono più grandi dei fotoni con frequenza più bassa.
- Il problema dell'effetto fotoelettrico nasce dopo l'introduzione dei quanti da parte di Planck nel 1900.
- Il lavoro di Einstein del 1905 è solo sull'effetto fotoelettrico.
- L'effetto fotoelettrico è tipico dei semiconduttori.