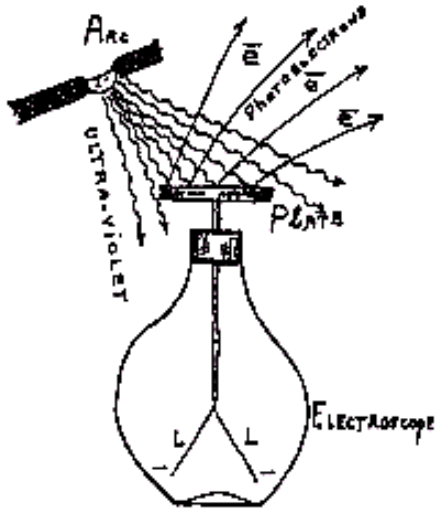
Quando gli esperimenti non bastano

Dall'effetto fotoelettrico all'ipotesi di De Broglie



Antonio Testoni

XI Scuola Nazionale di Didattica della Chimica "Giuseppe Del Re"
Ancona, 19-22 Settembre 2026

Perché approfondire l’effetto fotoelettrico?

La scelta di approfondire l’effetto fotoelettrico non dipende soltanto dal fatto che il fenomeno riguardi l’interazione tra la luce e i metalli e trovi una naturale collocazione in questo contesto. La sua rilevanza è soprattutto ***storico-concettuale***. Per interpretarlo, Einstein mise in discussione l’idea che la luce avesse una natura esclusivamente ondulatoria e avanzò l’ipotesi dei *«quanti di luce»*. L’effetto fotoelettrico rappresentò così uno dei passaggi ***fondamentali*** verso il riconoscimento dell’aspetto corpuscolare della radiazione, aprendo la strada alla concezione della dualità ***onda-corpuscolo***.

De Broglie estese successivamente tale dualità alla materia e ***Schrödinger***, muovendo da questa ipotesi, formulò nel 1926 la ***meccanica ondulatoria***, uno dei capisaldi teorici della nascente meccanica quantistica. La descrizione degli elettroni mediante funzioni d'onda pose così le basi del concetto di ***orbitale.*** Un concetto destinato ad assumere un ruolo fondamentale nello sviluppo della chimica moderna.

Quale sequenza didattica viene proposta?

Il percorso segue, in ordine ***storico*** e ***concettuale***, le principali tappe attraverso le quali l'effetto fotoelettrico ha contribuito a trasformare la concezione della luce e della materia:

EFFETTO FOTOELETTRICO (la scoperta, i problemi: Hertz, *Hallwachs* e Righi) ***1887 - 1889***

THOMSON (1ª interpretazione dell'interazione luce-materia: *l'elettrone*) ***1897 – 1899***

PLANCK (2ª interpretazione dell'interazione luce materia: *la quantizzazione*) ***1900***

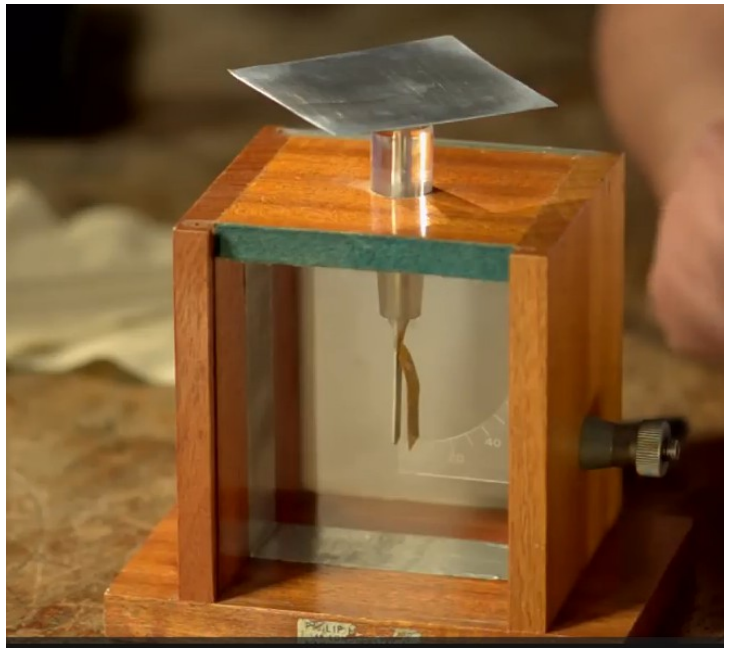
LENARD (nuove evidenze *sperimentali* e nuovi problemi) ***1902***

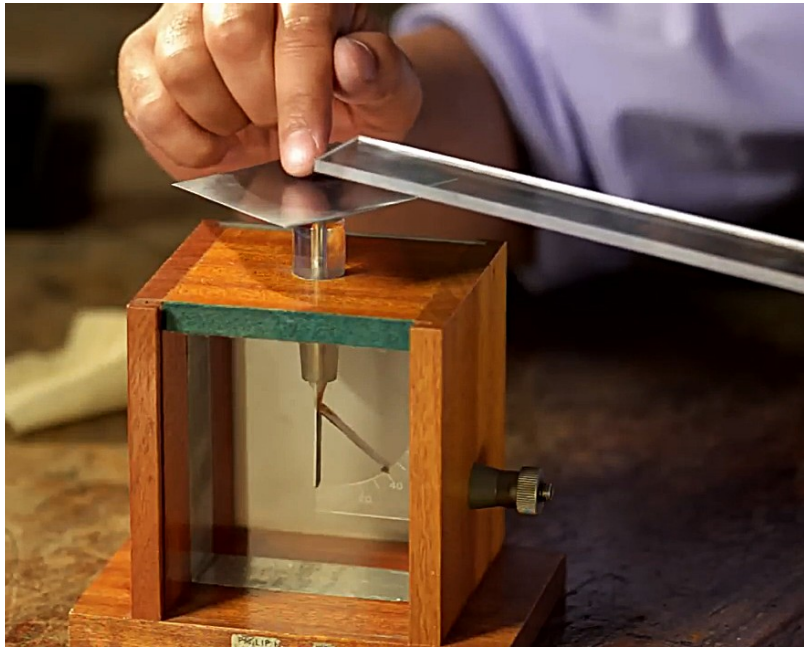
EINSTEIN (3ª interpretazione dell'interazione luce-materia: *il fotone* e la dualità *onda-corpuscolo*) ***1905***

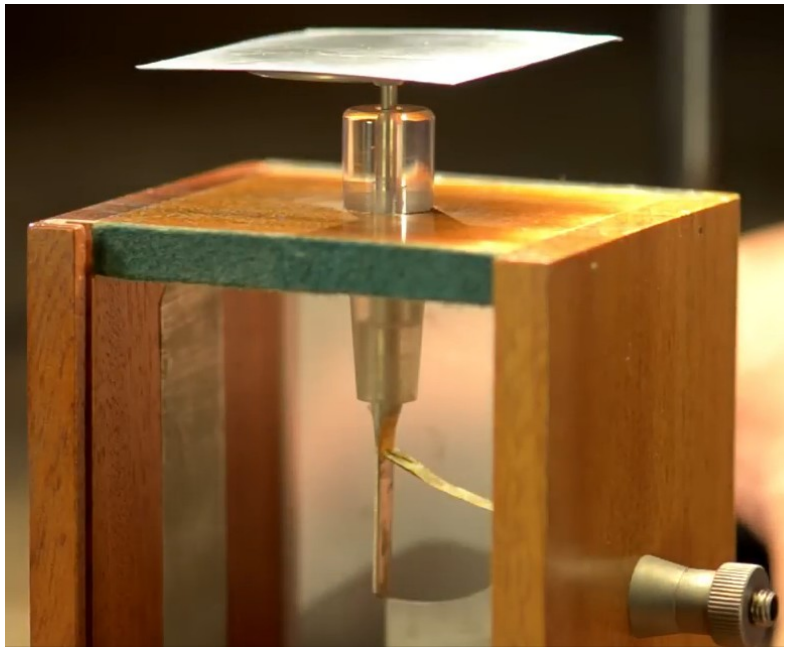
MILLIKAN (conferma sperimentale della *previsione* - equazione - di Einstein) ***1916***

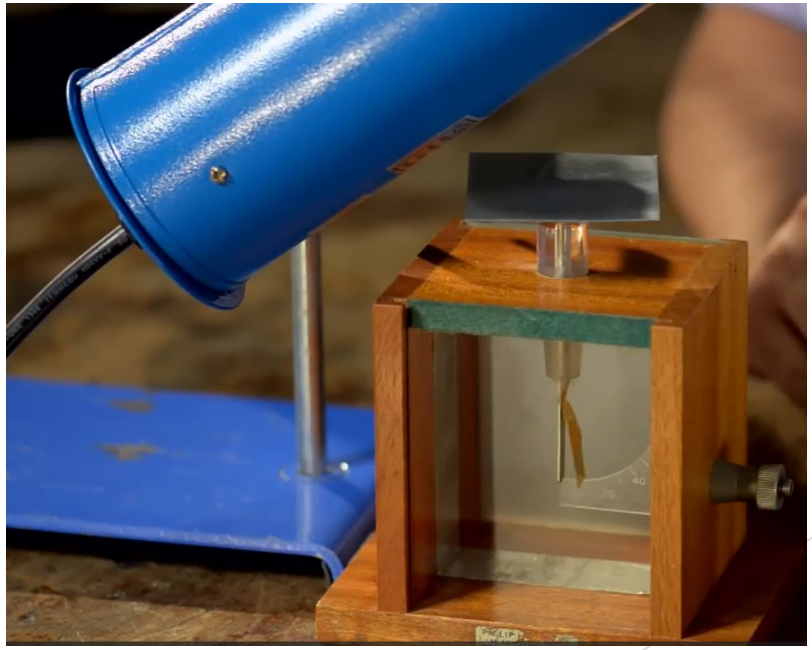
DE BROGLIE (dall'intuizione di Einstein alla dualità *onda-corpuscolo* per l'elettrone) ***1924***

COMPTON e **BOTHE** (conferme sperimentali decisive*: la quantità di moto del fotone*) ***1925***

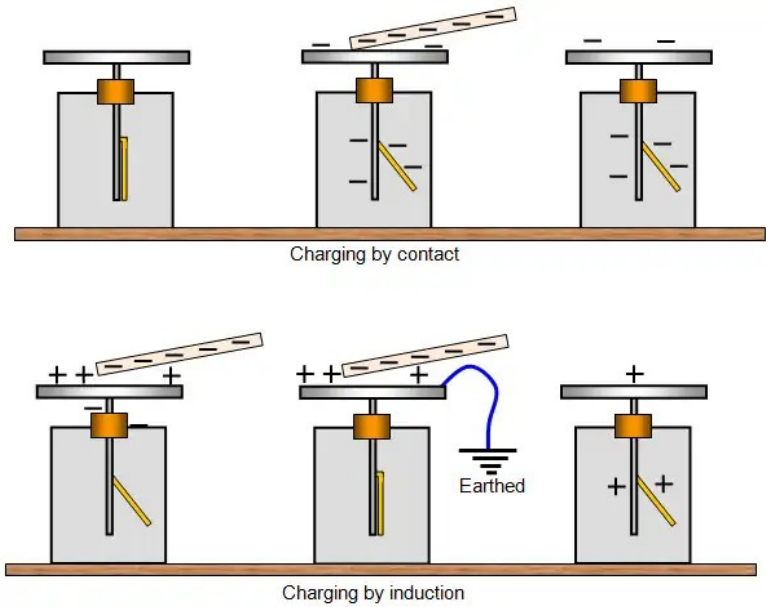


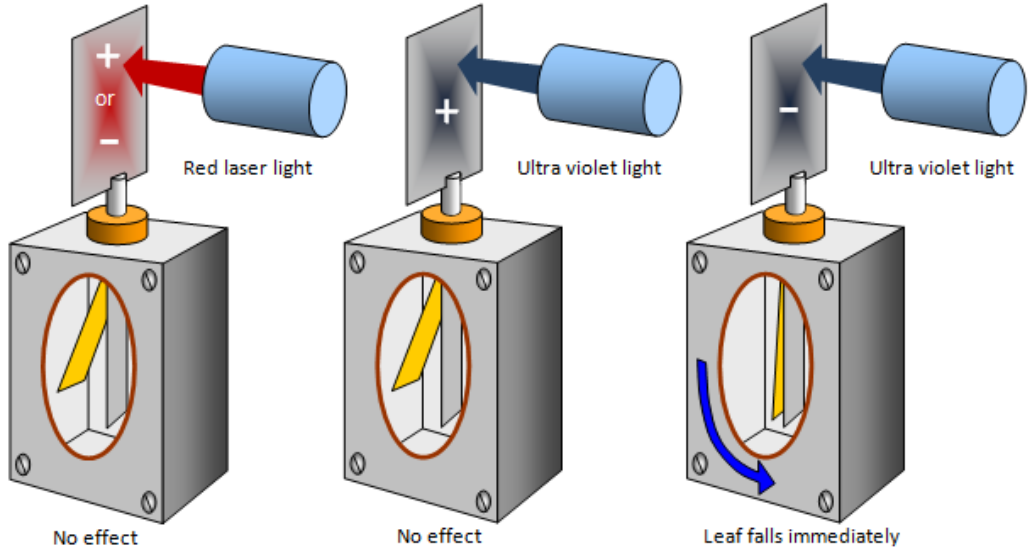


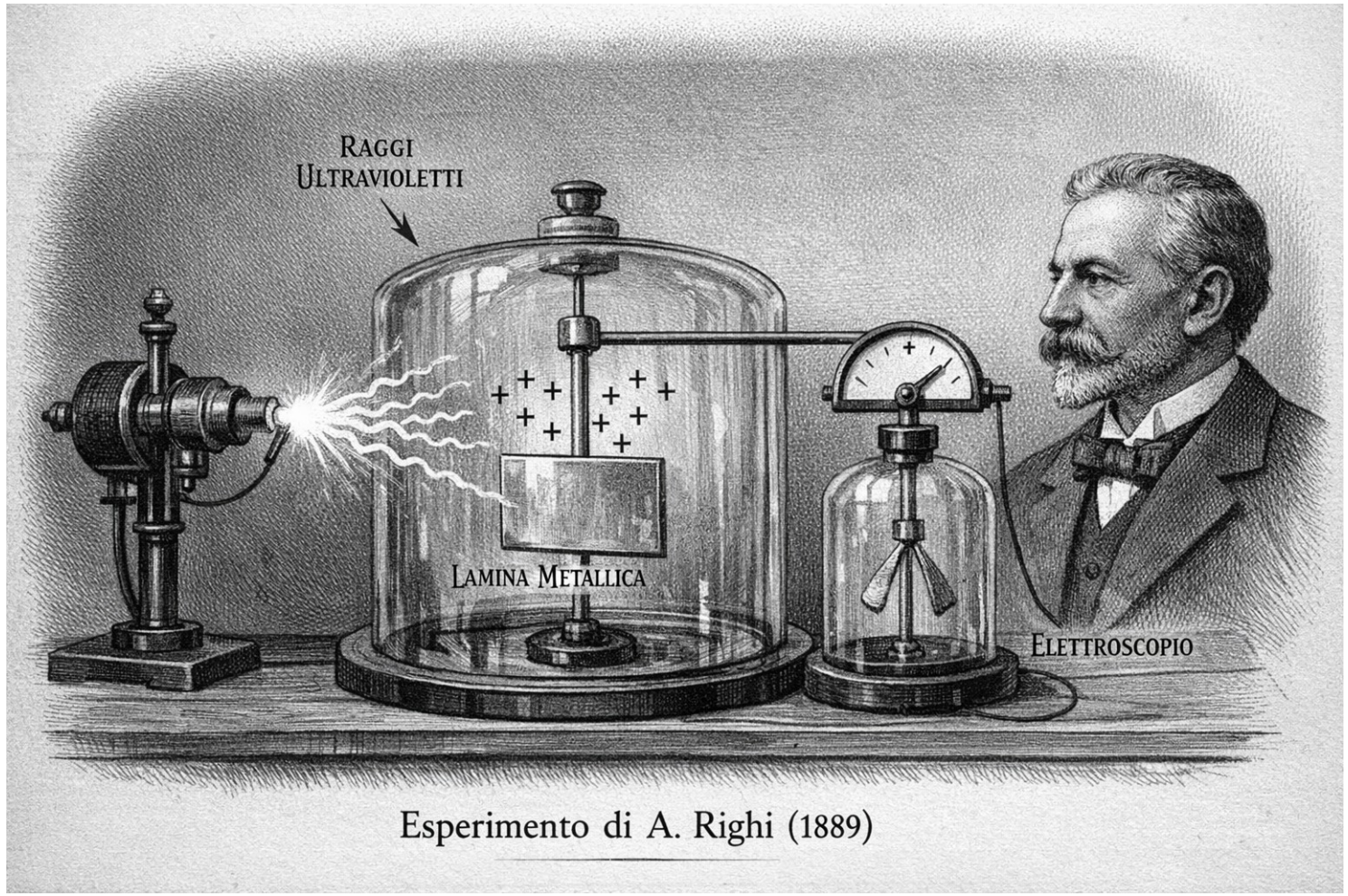




Esperimento di Hallwachs (1888)







Esperimento di A. Righi (1889)

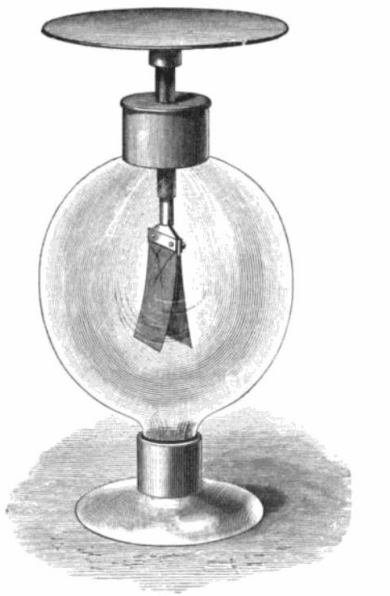
Nel ***1897*** J.J. ***Thomson***, con la celebre esperienza sui raggi catodici, identificò una nuova particella subatomica, ***l'elettrone***, determinandone il rapporto *e/m*. Una serie di ulteriori esperimenti, condotti dallo stesso Thomson e da altri ricercatori, lo portarono a concludere che la ***corrente elettrica*** nei conduttori ***metallici*** consiste in un flusso di particelle cariche negativamente che si muovono dal polo negativo a quello positivo.

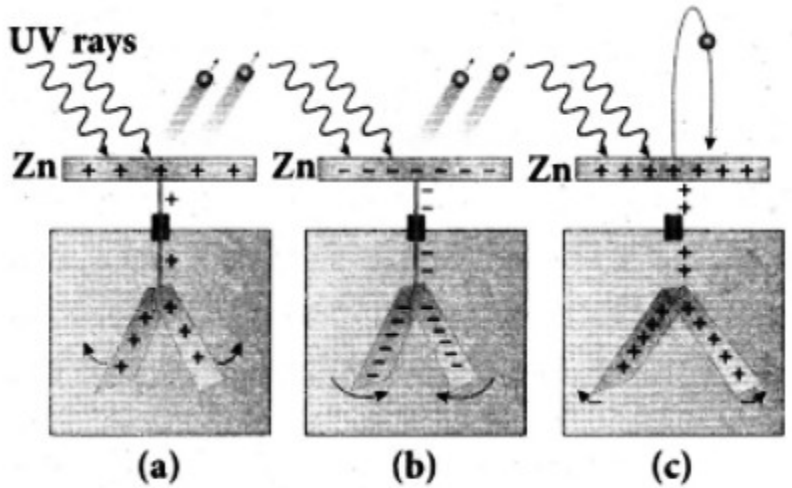
A partire da questa interpretazione, divenne naturale ***ipotizzare*** che anche l'elettricità negativa emessa da superfici metalliche irradiate con radiazione ultravioletta fosse costituita da elettroni.

Nel ***1899*** J.J. ***Thomson*** realizzò un esperimento che confermò tale ipotesi, mostrando che le particelle emesse nel fenomeno ***fotoelettrico*** presentavano le stesse proprietà fondamentali di quelle dei raggi catodici (stesso ordine di grandezza del rapporto *e/m* e del valore di *e*) .

In questo modo, fenomeni elettrici apparentemente distinti venivano ricondotti a un medesimo portatore di carica: l'***elettrone***, di cui Thomson era riuscito a determinare sperimentalmente il rapporto carica/massa e, poco dopo, anche la carica elementare.

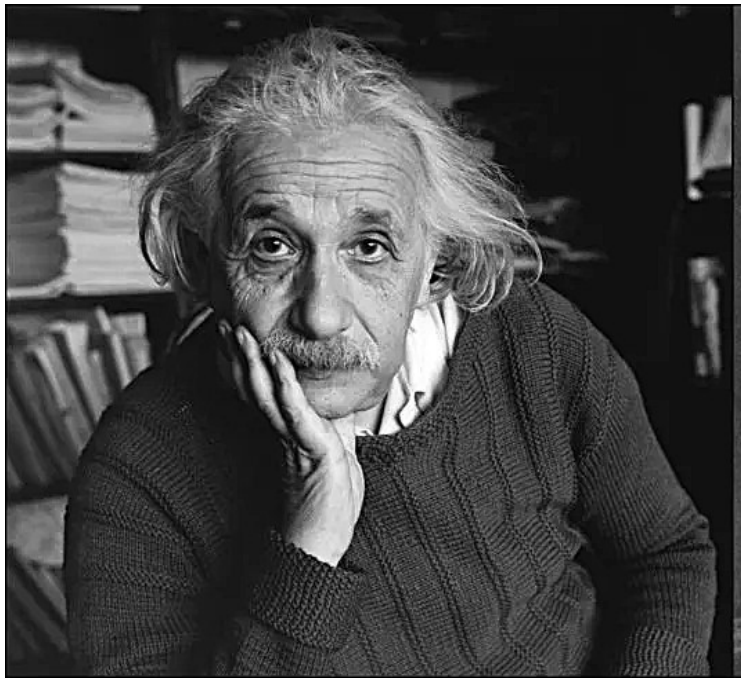
Con l'identificazione dell'elettrone, ***J.J. Thomson*** ricondusse l'effetto fotoelettrico alla dinamica interna dell'atomo, fornendo una base sperimentale e concettuale per la ***prima*** interpretazione moderna del fenomeno.





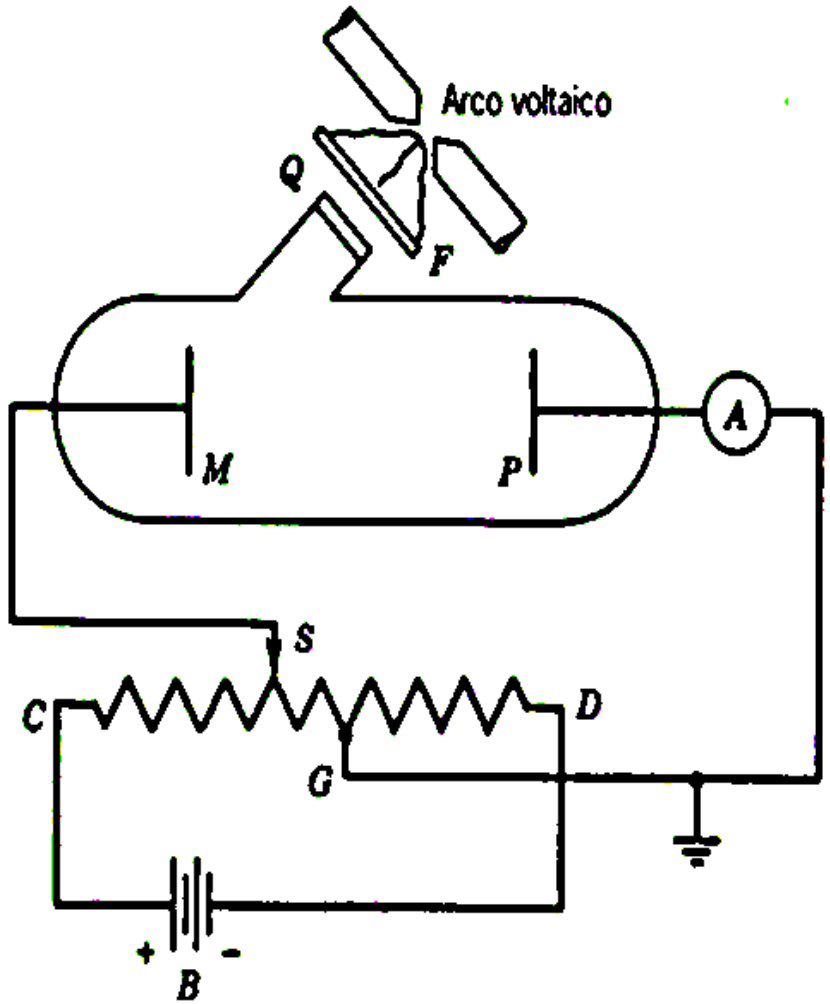
Irradiation of ultraviolet light on (a) uncharged zinc plate (b) negatively charged plate (c) positively charged plate

Contributi di P. Lenard e A. Einstein





Nel ***1902 Lenard*** effettuò alcune misure per studiare la caratteristiche dell'effetto fotoelettrico, utilizzando un'apparecchiatura di questo tipo:



un tubo di vetro, in cui è stato fatto il vuoto, contiene una lastra metallica M (catodo) e un elettrodo P (anodo);

la luce proviene da un arco voltaico a elettrodi di carbone o di zinco, oppure da una scarica a scintilla tra sfere di zinco, e incide su M passando attraverso la finestra di quarzo Q, trasparente alla radiazione ultravioletta. Utilizzando il filtro F si ottiene luce monocromatica;

M è connessa al contatto strisciante S della resistenza variabile a filo CD, e la differenza di potenziale tra M e P è misurata da un voltmetro;

P è connesso al punto di mezzo della resistenza variabile attraverso un galvanometro sensibile A, per la misura della intensità di corrente.

Le ***variabili fisiche*** associate al fenomeno che vengono studiate da ***Lenard***:

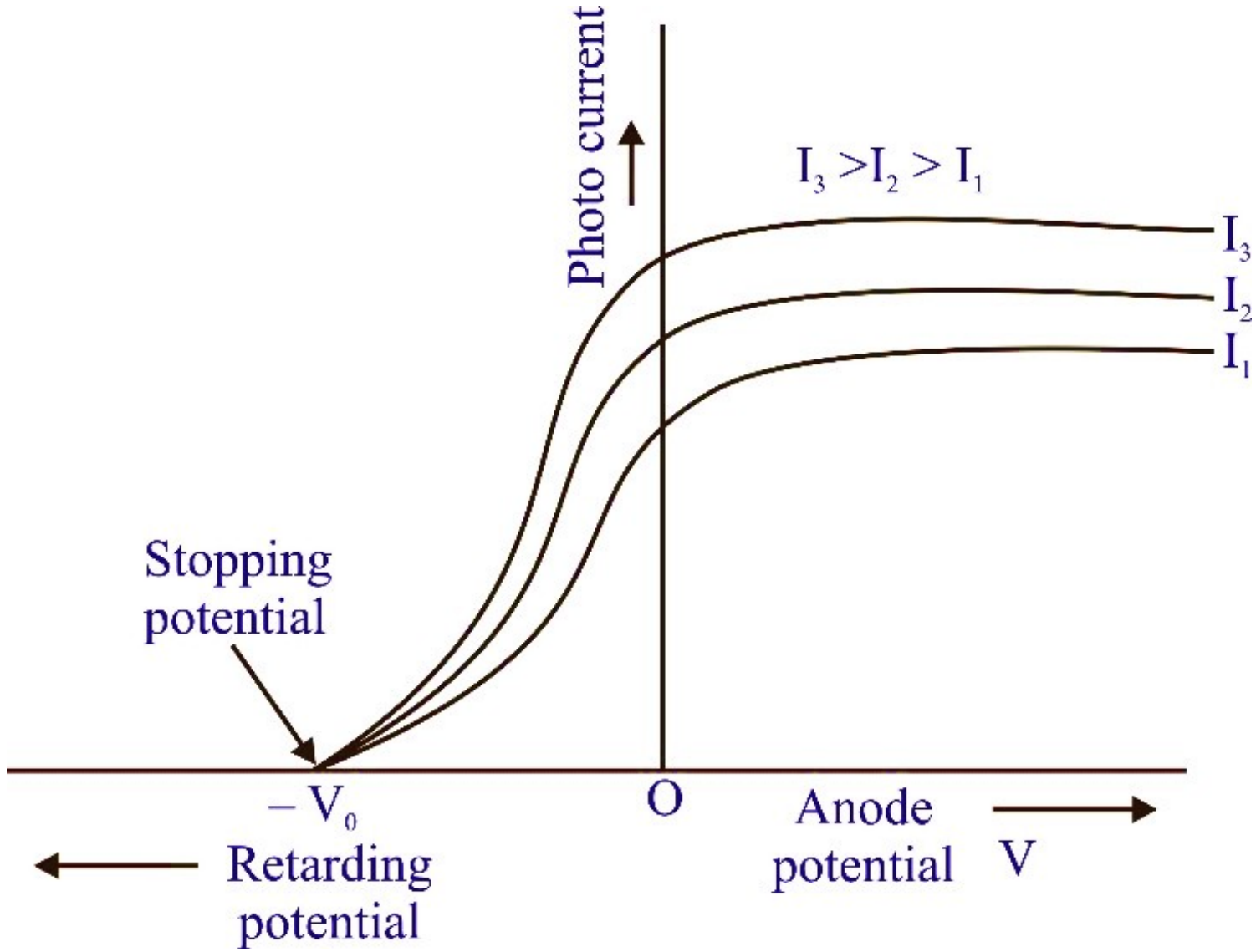
- la frequenza della luce monocromatica incidente ($\boldsymbol{\nu}$), modificabile cambiando la sorgente luminosa o usando filtri particolari;
- la d.d.p. presente tra il catodo e l'anodo ($\boldsymbol{\Delta V}$), modificabile sia in valore che in polarità;
- l'intensità di corrente rilevata dal galvanometro ($\boldsymbol{i}$);
- il tempo necessario per osservare l'eventuale foto-emissione degli elettroni ($\boldsymbol{t}$);
- l'intensità di luce incidente ($\boldsymbol{I}$), modificabile variando la potenza della lampada;
- la d.d.p. ritardante minima ($\boldsymbol{\Delta V_l}$) tale da determinare una i = 0 cioè $E_c = 0$.

Le previsioni in base al ***modello ondulatorio*** della luce:

- la *corrente* misurata dal galvanometro è proporzionale all'intensità della luce incidente;
- il *potenziale d'arresto* ΔV_l dipende dall'intensità della luce. Per intensità maggiori, l'energia cinetica con cui vengono emessi gli elettroni aumenta concordemente;
- l'energia trasferita dall'onda all'elettrone avviene per *qualsiasi frequenza* della luce;
- per due diverse intensità di luce incidenti si hanno *tempi di emissione* della corrente elettrica diversi (se l'intensità è minore, occorrerà più di tempo per trasferire agli elettroni sufficiente energia per essere emessi).

Le osservazioni *sperimentali* di Lenard (***rosso***) e le previsioni del modello ondulatorio della luce (***nero***):

- ***L'intensità di corrente misurata dal galvanometro è proporzionale all'intensità della luce incidente;***
- l'intensità di corrente è *proporzionale* all'intensità della radiazione incidente;
- ***Il fenomeno presenta una frequenza di soglia ν_0 (detta soglia fotoelettrica), la quale dipende dal tipo di metallo presente sul catodo ed al di sotto della quale non si ha emissione di elettroni;***
- l'energia trasferita dall'onda all'elettrone dipende dal modulo del campo elettrico dell'onda (dall'intensità) e quindi avviene per *qualsiasi frequenza* della luce;
- ***Il potenziale di arresto Δv_l degli elettroni emessi è indipendente dall'intensità della radiazione incidente;***
- il *potenziale d'arresto* ΔV_l dipende dall'intensità della luce. Per intensità maggiori, l'energia cinetica con cui vengono emessi gli elettroni aumenta concordemente;
- ***Gli elettroni sono emessi dalla superficie del metallo quasi istantaneamente, anche quando la luce ha intensità molto bassa;***
- per due diverse intensità di luce incidenti si hanno *tempi di emissione* della corrente elettrica diversi (se l'intensità è minore, occorrerà più di tempo per trasferire agli elettroni sufficiente energia per essere emessi).


Photo current
$I_3 > I_2 > I_1$
I_3
I_2
I_1
Stopping potential
$-V_0$
O
Anode potential
V
Retarding potential

Una prima ***interpretazione*** di Lenard: se la velocità degli elettroni non dipende dall'intensità della radiazione significa che essa è predeterminata all'***interno dell'atomo***. Quando una radiazione arriva su di atomo, la sua energia non si trasforma nell'energia dell'elettrone fotoelettrico. L'energia della radiazione ha solo la proprietà di ***innescare*** un processo di liberazione degli elettroni. L'energia con la quale gli elettroni fuoriescono dal metallo dipende solo dal precedente moto che essi avevano all'interno dell'atomo. Un elettrone può essere liberato solo quando si è in condizioni di ***risonanza***, quando cioè la frequenza della luce incidente è identica a quella dell'oscillazione dell'elettrone nell'atomo. In definitiva è la struttura dell'atomo e non una qualche caratteristica della radiazione che determina l'energia (e quindi la velocità) dei fotoelettroni.

Dopo una seconda fase di sperimentazioni, un'obiezione alla concezione di Lenard fu questa: dato che i metalli rispondono a ***tutte*** le frequenze che superano un certo valore di soglia, è difficile pensare che l'atomo contenga un numero di elettroni così grande...

6. *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt; von A. Einstein.*

Zwischen den theoretischen Vorstellungen, welche sich die Physiker über die Gase und andere ponderable Körper gebildet haben, und der Maxwellschen Theorie der elektromagnetischen Prozesse im sogenannten leeren Raume besteht ein tiefgreifender formaler Unterschied. Während wir uns nämlich den Zustand eines Körpers durch die Lagen und Geschwindigkeiten einer zwar sehr großen, jedoch endlichen Anzahl von Atomen und Elektronen für vollkommen bestimmt ansehen, bedienen wir uns zur Bestimmung des elektromagnetischen Zustandes eines Raumes kontinuierlicher räumlicher Funktionen, so daß also eine endliche Anzahl von Größen nicht als genügend anzusehen ist zur vollständigen Festlegung des elektromagnetischen Zustandes eines Raumes. Nach der Maxwellschen Theorie ist bei allen rein elektromagnetischen Erscheinungen, also auch beim Licht, die Energie als kontinuierliche Raumfunktion aufzufassen, während die Energie eines ponderabeln Körpers nach der gegenwärtigen Auffassung der Physiker als eine über die Atome und Elektronen erstreckte Summe darzustellen ist. Die Energie eines ponderabeln Körpers kann nicht in beliebig viele, beliebig kleine Teile zerfallen, während sich die Energie eines von einer punktförmigen Lichtquelle ausgesandten Lichtstrahles nach der Maxwellschen Theorie (oder allgemeiner nach jeder Undulationstheorie) des Lichtes auf ein stets wachsendes Volumen sich kontinuierlich verteilt.

Die mit kontinuierlichen Raumfunktionen operierende Undulationstheorie des Lichtes hat sich zur Darstellung der rein optischen Phänomene vortrefflich bewährt und wird wohl nie durch eine andere Theorie ersetzt werden. Es ist jedoch im Auge zu behalten, daß sich die optischen Beobachtungen auf zeitliche Mittelwerte, nicht aber auf Momentanwerte beziehen, und es ist trotz der vollständigen Bestätigung der Theorie der Beugung, Reflexion, Brechung, Dispersion etc. durch das

AMERICAN JOURNAL of PHYSICS

A Journal Devoted to the Instructional and Cultural Aspects of Physical Science

VOLUME 33, NUMBER 5 MAY 1965

Einstein's Proposal of the Photon Concept—a Translation of the *Annalen der Physik* Paper of 1905*

A. B. ARONS† AND M. B. PEPPARD‡

Amherst College, Amherst, Massachusetts

(Received 2 December 1964)

Of the trio of famous papers that Albert Einstein sent to the *Annalen der Physik* in 1905 only the paper proposing the photon concept has been unavailable in English translation. The *American Journal of Physics* is publishing the following translation in recognition of the sixtieth anniversary of the appearance of the original work. Physics teachers may take particular interest in the following aspects: (1) Einstein's keen awareness of the heuristic character of his new conception. (2) His demonstration from *thermodynamic* and *statistical* considerations that electromagnetic radiation might be conceived as consisting of finite numbers of discrete corpuscles of energy $h\nu$. (3) His *prediction* of the linear relation between the stopping potential of photoelectrons and the frequency of the incident light. This latter aspect of the photoelectric effect was not included among Lenard's early investigations. It remained for Millikan and others to develop the elegant experimental techniques that confirmed Einstein's bold prediction. Readers interested in pursuing the background in greater depth will find it rewarding to refer to the critical analyses by Martin J. Klein in "Einstein's First Paper on Quanta," in *The Natural Philosopher* (Blaisdell Publishing Company, New York, 1963), Vol. II, and "Einstein and the Wave–Particle Duality," in *The Natural Philosopher*, Vol. III, 1964. We are grateful to Professor Klein for his criticism and advice regarding this translation and for his generosity in making available to us an unpublished translation of his own.

CONCERNING AN HEURISTIC POINT OF VIEW TOWARD THE EMISSION AND TRANSFORMATION OF LIGHT

BY A. EINSTEIN

A PROFOUND formal distinction exists between the theoretical concepts which physicists have formed regarding gases and other ponderable bodies and the Maxwellian theory of electromagnetic processes in so-called empty space. While we consider the state of a body to be completely determined by the positions and velocities of a very large, yet finite, number of atoms and electrons, we make use of continuous spatial functions to describe the electromagnetic state of a given volume, and a finite number of parameters cannot be regarded as sufficient for the complete determination of such a state. According to the Maxwellian theory, energy is to be considered a continuous spatial function in the case of all purely electromagnetic phenomena including light, while the energy of a ponderable object should, according to the present conceptions of physicists, be represented as a sum carried over the atoms and electrons. The energy of a ponderable body cannot be subdivided into arbitrarily many or arbitrarily small parts, while the energy of a beam of light from a point source (according to the Maxwellian theory of light or, more generally, according to any wave theory) is

* Ann. Physik **17**, 132 (1905); Translation published with the permission of *Annalen der Physik*.

† Department of Physics.

‡ Department of German.

*"La teoria **ondulatoria** della luce, che fa uso di funzioni spaziali continue, ha funzionato bene per quel che riguarda i fenomeni puramente **ottici** e sembra veramente **insostituibile** in questo campo. Bisogna tener presente che le osservazioni ottiche si riferiscono a valori medi nel tempo e non a valori istantanei. Nonostante la conferma sperimentale completa della teoria quando viene applicata alla diffrazione, all'interferenza… è plausibile che la teoria della luce, che opera con funzioni spaziali continue, possa condurre a **contraddizioni** con l'esperienza se viene applicata a fenomeni di emissione e trasformazione della luce* [cioè ad interazioni su scala microscopica]. *A mio parere le osservazioni relative alla radiazione del corpo nero, all'**effetto fotoelettrico** e ad altri fenomeni correlati … possano essere comprese più facilmente se si assume che l'energia della luce **non** sia distribuita nello spazio in modo continuo, ma che sia costituita da un numero finito di **quanti di energia** localizzati nello spazio che si muovono senza suddividersi e che **non** possono essere assorbiti od emessi parzialmente."*

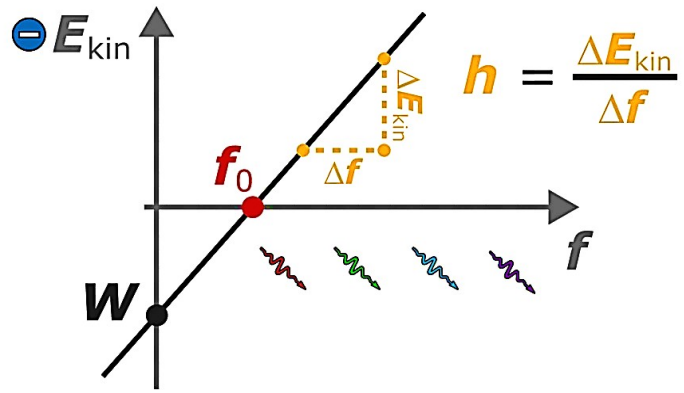
A. Einstein, *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt,*
Annalen der Physik, 17, **1905**

"La consueta concezione, per la quale l'energia della luce si distribuisce in modo continuo nello spazio irradiato, incontra, nel tentativo di spiegare i fenomeni fotoelettrici, notevoli difficoltà, che sono state fatte oggetto di uno studio particolarmente approfondito dal Signor ***Lenard****. Partendo dal principio che la luce eccitatrice sia costituita di quanti di energia* ***hv****, l'emissione di raggi catodici si può spiegare nel seguente modo. I quanti di energia penetrano nello strato superficiale del corpo e la loro energia si* ***trasforma****, almeno in parte, in energia cinetica di elettroni. L'ipotesi più semplice consisterebbe nell'affermare che un quanto di luce trasmette* ***tutta*** *la sua energia ad un unico elettrone [...] Inoltre va supposto che ogni elettrone, nell'abbandonare il corpo, debba effettuare un lavoro* $\boldsymbol{w_o}$ *(che è caratteristico del corpo considerato). Ad uscire dal corpo con la massima velocità normale [*V_{max}*] saranno gli elettroni eccitati che si trovano direttamente alla sua superficie e che acquistano una velocità normale ad essa... "*

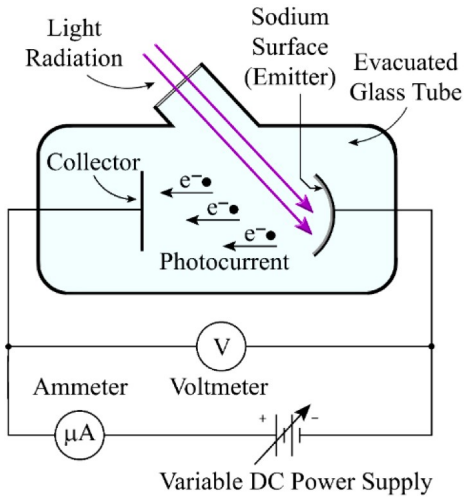
"*L'energia cinetica degli elettroni è:* $E_{c,max} = h\nu - W_o$ *Se il corpo emittente è caricato con una differenza di potenziale positiva rispetto ad un conduttore posto nelle vicinanze e se* ΔV_l *rappresenta la più piccola differenza di potenziale che ferma la corrente fotoelettrica* [per cui $e\Delta V_l$ viene ad essere uguale all'energia cinetica massima degli elettroni emessi] *abbiamo che:*

$$e\Delta V_l = h\nu - W_o \ (h\nu_o)$$

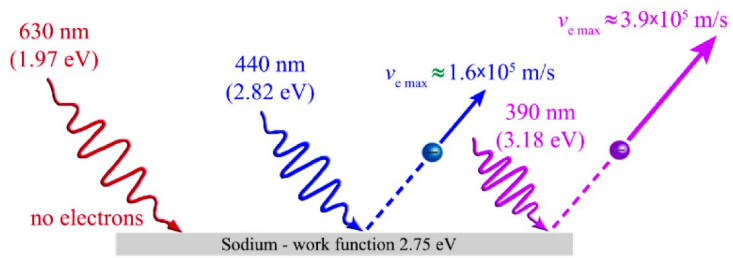
dove ***e*** *indica la carica elettrica … Se la formula dedotta è corretta, il grafico di* ΔV_l *in funzione della frequenza della luce incidente deve essere una* ***retta*** *con una pendenza che è indipendente dalla sostanza emittente…* [un'audace congettura non sostenuta da alcun dato sperimentale!!]".



"Per quanto posso vedere, non esiste contraddizione tra queste idee e le proprietà dell'effetto fotoelettrico osservate da ***Lenard****. Se ogni quanto di energia della luce incidente, indipendentemente da qualunque altra cosa, cede tutta la sua energia ad un elettrone, allora la distribuzione di velocità degli elettroni emessi sarà indipendente dall'intensità della luce incidente; d'altro canto, se tutte le altre condizioni sono mantenute costanti, il numero di elettroni che lasciano il corpo sarà proporzionale all'intensità della luce incidente…* [con una velocità che sarà tanto più elevata quanto maggiore sarà la frequenza della radiazione incidente]"



(a)



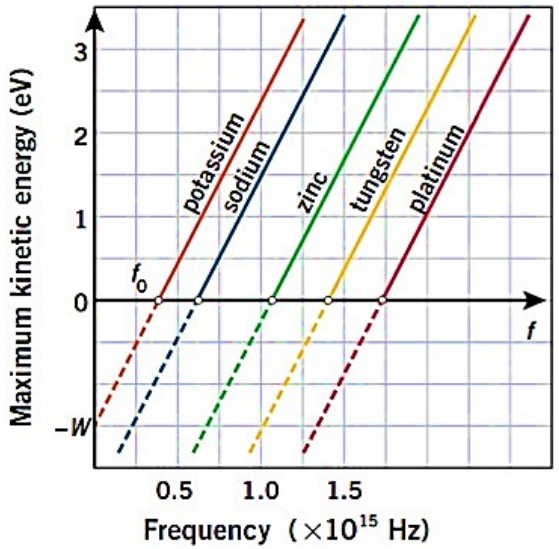
(b)

L’atteggiamento generale della comunità scientifica internazionale verso l’ipotesi dei quanti di luce di Einstein fu ***nettamente ostile***. Anche Planck, uno dei grandi estimatori di Einstein, non dette credito a questa dirompente ipotesi:

“Si può dire che difficilmente troviamo anche uno soltanto dei grandi problemi di cui è ricca la fisica moderna a cui Einstein non abbia dato un contributo significativo … Non si può neanche rinfacciargli troppo d’aver ***mancato talvolta il bersaglio*** *nelle sue speculazioni, come, per esempio, nella sua ipotesi dei* ***quanti di luce****, perché non è possibile introdurre concetti davvero nuovi nella più esatta tra le scienze senza prendersi a volte dei rischi.”*

M. Planck, *Proposta per l’ammissione di Einstein alla prestigiosa Accademia Prussiana*, **1913**

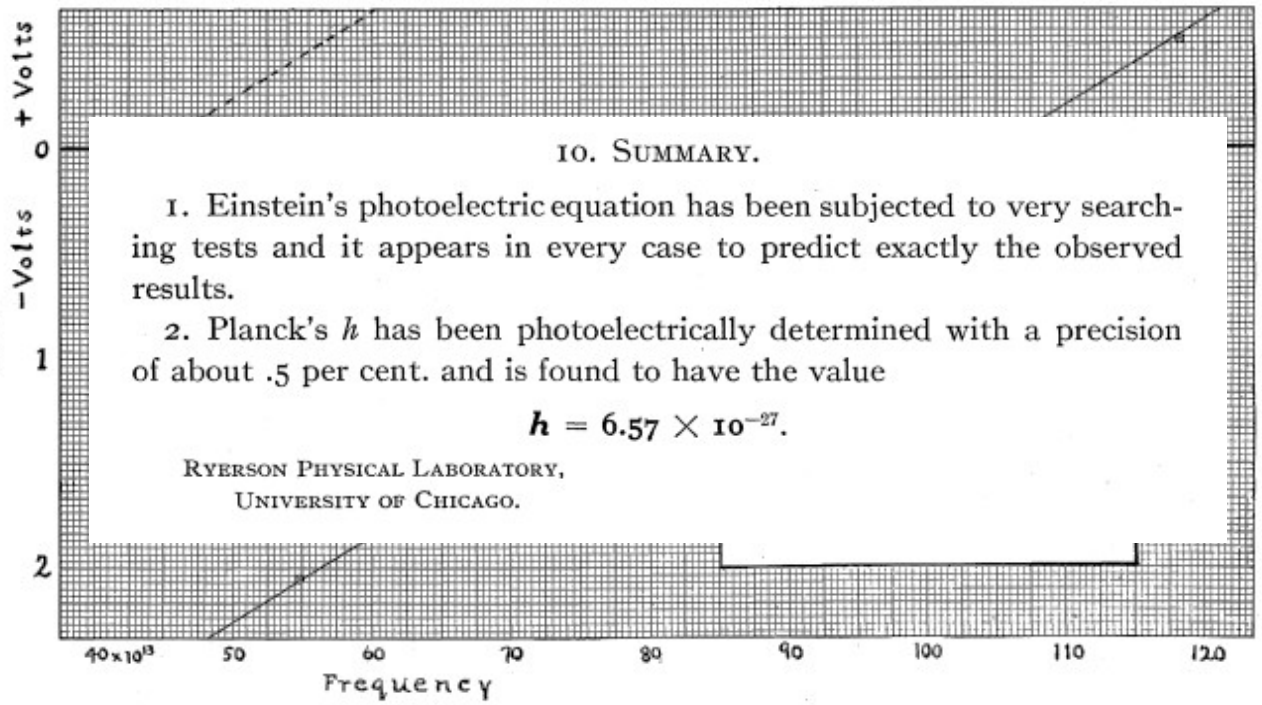
Dopo il 1905 vengono effettuati diversi tentativi per determinare esattamente la dipendenza della velocità degli elettroni foto-emessi dalla frequenza della radiazione incidente, ma con risultati molto incerti fino al ***1916***, anno in cui ***Millikan*** pubblica i risultati del suo lavoro. Millikan è un brillantissimo fisico sperimentale e le sue misure danno un risultato inequivocabile: ***"la legge di Einstein è confermata al di là di ogni ragionevole dubbio"***.



A DIRECT PHOTOELECTRIC DETERMINATION OF PLANCK'S "h."[1]

By R. A. Millikan.

1. Introductory.



10. Summary.

1. Einstein's photoelectric equation has been subjected to very searching tests and it appears in every case to predict exactly the observed results.

2. Planck's h has been photoelectrically determined with a precision of about .5 per cent. and is found to have the value

$$h = 6.57 \times 10^{-27}.$$

Ryerson Physical Laboratory,
University of Chicago.

While this was the main if not the only basis of Einstein's assumption, this assumption enabled him at once to predict that the maximum energy

[1] An abstract of this paper was presented before the Am. Phys. Soc. in April, 1914. (Phys. Rev., IV., 73, '14.) The data on lithium were however first reported at the meeting of the Am. Phys. Soc. in April, 1915. (Phys. Rev., VI., 55, '15.)

[2] Ann. d. Phys. (4), 17, 132, 1905, and (4), 20, 199, 1906.

Nel ***1923*** il Premio Nobel per la Fisica venne assegnato a Robert Andrews ***Millikan*** *"For his work on the elementary charge of electricity and on the photoelectric effect"*:

*"Alla luce di tutti questi metodi ed esperimenti, la validità generale dell'**equazione** di Einstein è, a mio avviso, ormai universalmente riconosciuta [...] Ma la **concezione** dei quanti di luce localizzati da cui Einstein trasse la sua equazione deve essere ancora considerata **ben lungi** dall'essere accertata.*

*Se il meccanismo di interazione tra onde ed elettroni abbia sede nelle condizioni e nelle leggi sconosciute esistenti all'interno dell'atomo, o sia da ricercare principalmente nella concezione essenzialmente corpuscolare di Thomson-Planck-Einstein sulla natura dell'energia radiante, è **l'incertezza** che pervade i confini della fisica moderna..."*

R.A. Millikan, *The electron and the light-quant from the experimental point of view,* Nobel Lecture, **1923**

"Il terzo articolo di Einstein del 1905 [Effetto fotoelettrico] *rivela in modo più sorprendente di entrambi i precedenti la sua* ***audacia*** *nel rompere con la tradizione […] La spiegazione data da Einstein ignorava e in effetti sembrava contraddire tutti i molteplici fatti sull'interferenza e così pareva un deciso ritorno alla teoria corpuscolare della luce, che era stata completamente abbandonata dal tempo di Yuong e Fresnell, intorno al 1800.*

Passai ***10 anni della mia vita*** *sottoponendo a verifica l'equazione di Einstein del 1905 e,* ***contrariamente*** *a tutte le mie aspettative, nel 1915 fui* ***costretto*** *a dichiarare la sua verifica sperimentale senza ambiguità, nonostante tutta la sua* ***mancanza*** *di ragionevolezza, dal momento che sembrava violare tutto ciò che sapevamo sull'interferenza della luce»*

R.A. Millikan, *Albert Einstein on His Seventieth Birthday,* Rev. Mod. Physics, **1949**

I ripetuti esperimenti che Millikan fece prima di pubblicarne i risultati avevano davvero lo ***scopo*** *di confermare l'interpretazione dell'effetto fotoelettrico proposta da Einstein?*

“La perseveranza dimostrata da Millikan nel suo tentativo di ***smentire*** *Einstein sembra sconfinare nell’****ossessione****, e possiamo chiederci perché ci sia voluto tutto quel tempo per arrivare ad una conclusione. Il motivo è prettamente* ***umano****: i risultati ottenuti* ***frustravano*** *Millikan e lo* ***affliggevano*** *proprio perché stava cercando di smentire Einstein, mentre i suoi esperimenti dimostravano che non ci stava riuscendo… Misurò perfino la costante di Planck con un’approssimazione dello 0,5%, di gran lunga la migliore misurazione fatta fino a quel momento.”*

S. Sheehy, *Dodici esperimenti che hanno cambiato il mondo,* Bollati Boringhieri, 2022

Nonostante queste conferme sperimentali, come mai la teoria di Einstein ***non*** *venne accettata?*

"In generale, ***è importante distinguere le teorie dalle equazioni****. Di solito è l'equazione a essere verificata empiricamente, non la teoria… Questa situazione è generale nella verifica delle teorie, ed è parte del motivo per cui gli esperimenti spesso non riescono a produrre prove inequivocabili a favore o contro una particolare teoria* [i dati vincolano la teoria, ma non la determinano univocamente]… *Per varie ragioni, in particolare l'accettazione del modello quantistico dell'atomo di* ***Bohr****, le teorie non einsteiniane furono abbandonate intorno al* ***1914****, lasciando alla teoria di* ***Einstein la sola spiegazione dell'effetto fotoelettrico.***

H. Kragh, *A Sense of History: History of Science and the Teaching of Introductory Quantum Theory*

“In una situazione del genere, l'unica cosa razionale da fare, a quanto pare, sarebbe accettare la teoria di Einstein, poiché, come hanno sostenuto i filosofi della scienza, una teoria controversa è meglio di nessuna teoria. Ma qualunque fosse il punto di vista dei filosofi, non è questo che accadde. Durante il periodo dal 1914 al 1922 circa, i fisici erano ben disposti a ***rinunciare*** *a una spiegazione teorica della fotoelettricità … l'accettazione della teoria di Einstein avrebbe comportato un prezzo troppo elevato, ovvero* ***l'abbandono*** *dell'intera teoria* ***ondulatoria*** *elettromagnetica della luce, una delle teorie fisiche più impressionanti e meglio confermate … La strategia preferita era* ***accettare l'equazione*** *di Einstein, ma considerarla una* ***legge fenomenologica*** *e non una conseguenza della teoria dei quanti di luce di Einstein.”*

H. Kragh, *A Sense of History: History of Science and the Teaching of Introductory Quantum Theory*

“Nonostante il suo valore euristico, tuttavia, l'ipotesi dei quanti di luce, che è del tutto inconciliabile con i cosiddetti fenomeni di interferenza, ***non è in grado di far luce sulla natura della radiazione****. Basti ricordare che questi fenomeni d’interferenza costituiscono l’unico mezzo per studiare le proprietà della radiazione e per attribuire un significato preciso alla frequenza ν, proprio la grandezza che nell’ipotesi einsteiniana determina l’energia del quanto di luce* [E=*hν*]. ”

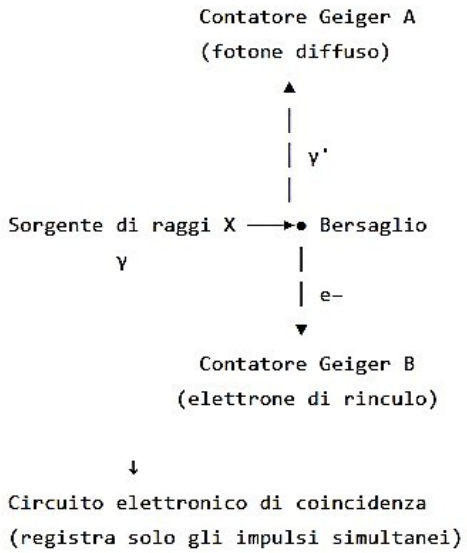
N. Bohr, *The structure of the atom,* Nobel Lecture, **1922**

Eppure, fu proprio quella teoria così controversa e così largamente respinta che aprì uno degli orizzonti concettuali più profondi della scienza moderna: la dualità ***onda-corpuscolo***. È proprio in questo contesto che l'ipotesi di ***De Broglie*** (***1924***) manifesta tutta la sua profondità:

*«Lo sviluppo delle teorie della luce, dopo aver imposto l'idea di onde luminose, ha mostrato che questa idea era insufficiente e occorreva integrarla con l'idea dei grani di luce. Ora, perché non fare un tentativo analogo per la teoria della materia? [...] Non si era forse trascurato l'**aspetto ondulatorio** dei corpuscoli elementari della materia, mentre per la luce si era a lungo disconosciuto l'aspetto corpuscolare?»*

L. de Broglie - *Onde, Corpuscoli, Meccanica ondulatoria*

La natura corpuscolare dei **“*quanti di luce*”** ricevette la sua consacrazione definitiva grazie a due esperienze decisive, condotte nel ***1925***: quella di Bothe e Geiger, che misurarono con due contatori Geiger le coincidenze temporali tra fotone ed elettrone nell'***urto*** fotone-elettrone, e quella di Compton e Simon, che rilevarono con una camera a nebbia le relazioni angolari dello stesso urto. Pur ricorrendo a tecniche sperimentali indipendenti, i due esperimenti giunsero a risultati convergenti, fornendo insieme la prova decisiva che consolidò l'interpretazione del fotone come quanto localizzato di energia avente una determinata quantità di moto ***(mv)***. Solo così il *"quanto di luce"*, da ipotesi euristica controversa, divenne un **“*oggetto fisico*”** con proprietà corpuscolari verificate direttamente, non solo inferite da una formula.



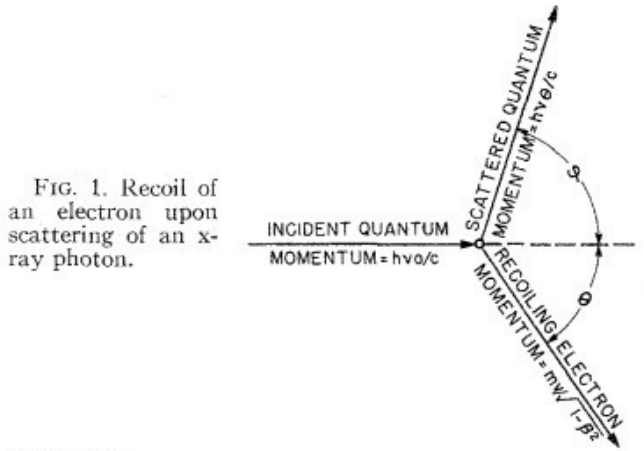


FIG. 1. Recoil of an electron upon scattering of an x-ray photon.

[2] A. H. Compton, Bull. Natl. Research Council, No. 20, 19 (1922).

Questa "storia" rivela qualcosa di importante sul modo in cui procede la ***scienza****?*

La scienza avanza perché gli scienziati ***credono*** *nelle nuove teorie, oppure perché cercano con ogni mezzo di metterle in* ***discussione****?*

Questa vicenda è una lezione che va ben oltre il contesto in esame, non tanto perché racconta di uno scienziato che aveva ragione e di uno che aveva torto, quanto piuttosto perché ritrae due atteggiamenti scientifici reciprocamente ***necessari***.

Einstein incarna l'audacia della ***creatività*** teorica, capace di rompere gli schemi consolidati e proporre nuove e sconvolgenti visioni. Millikan incarna la fiducia, razionale e umanamente rassicurante, in un ***paradigma*** costruito su solide conferme sperimentali e condiviso dalla comunità scientifica (la teoria ondulatoria della luce era una delle teorie fisiche meglio confermate!)

Il progresso della scienza non nasce semplicemente dal prevalere dell'una sull'altra, ma dal ***confronto*** e dal ***dialogo***, anche conflittuale, tra queste due componenti. Senza l'***audacia*** di chi rischia *"l'eresia",* la scienza si fossilizza; ma senza la ***resistenza*** critica e il rigore di chi pretende argomentazioni e prove sempre più convincenti, l'innovazione rischia di ridursi a mera speculazione.

Vi ringrazio dell'attenzione e passo il testimone al prof. Ugo Cosentino