

## La crisi della Fisica classica

- Fisica Classica: onde e particelle.
- Luce: onde
- Elettroni: particelle

Alcuni esperimenti inspiegabili dalla Fisica classica:

- *Radiazione di corpo nero*
- Effetto fotoelettrico. Luce: onde o particelle?
- Esperimento di Rutherford: come sono fatti gli atomi?
- Esperienza di Davisson e Germer: elettroni onde o particelle?

## Luce: onde o particelle?

Il comportamento della radiazione elettromagnetica nel vuoto si conformava bene al modello ondulatorio.

Le discrepanze si osservavano negli esperimenti riguardanti l'interazione fra radiazione e materia.

Alcuni degli esperimenti principali:

- L'effetto fotoelettrico.
- L'effetto Compton.

# Effetto fotoelettrico

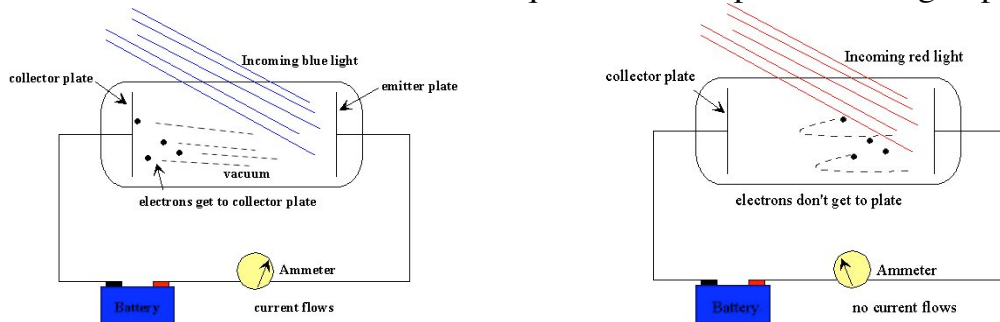
Emissione di elettroni da un metallo illuminato  
con radiazione di frequenza sufficientemente  
elevata

## Effetto fotoelettrico: un po' di storia (1)

- 1865: Maxwell pubblica la teoria delle onde elettromagnetiche, predicando che si propagano con velocità  $c$ .
- 1887: H. Hertz, durante i suoi studi sulle onde radio, nota che le scariche del suo rivelatore aumentano quando luce ultravioletta illumina le sfere metalliche di cui il rivelatore è costituito. Luce visibile non dà alcuna differenza rivelabile.
- 1888: Hallwach scopre, usando un elettroscopio a foglie, che l'illuminazione con UV di lastre di zinco cariche negativamente ne determinano una rapida scarica. Ciò non accade con lastre cariche positivamente.
- 1899: JJ Thomson mostra che un metallo illuminato emette cariche identiche agli elettroni.

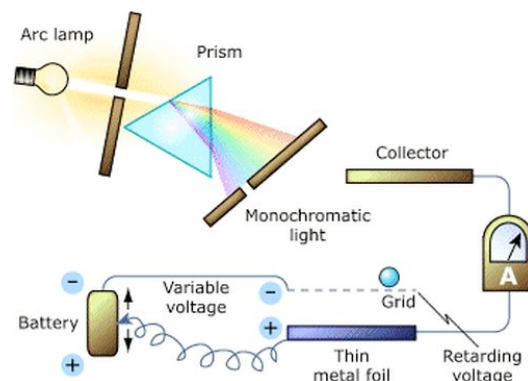
## Effetto fotoelettrico: un po' di storia (2)

- 1902: Lenard scopre che la produzione di elettroni da un metallo illuminato avviene esclusivamente con luce di frequenza al di sopra di una soglia precisa.



- 1905: abbandonando completamente la teoria classica della luce, Einstein descrive l'effetto fotoelettrico come l'assorbimento di un "quanto" di luce da un elettrone. Per questo (e altro) riceverà il Nobel nel 1921.
- 1915: Millikan, nel tentativo (iniziato nel 1905) di dimostrare l'infondatezza dell'ipotesi di Einstein, ne conferma con grande precisione le previsioni (!). Riceve il Nobel nel 1923 per questa scoperta.

## Effetto fotoelettrico: l'esperimento



Luce a frequenza selezionata (monocromatica) viene inviata sul metallo sotto studio, che emette elettroni (fotoelettroni o elettroni fotoemessi).

Con il potenziale applicato vengono *frenati* gli elettroni fotoemessi.

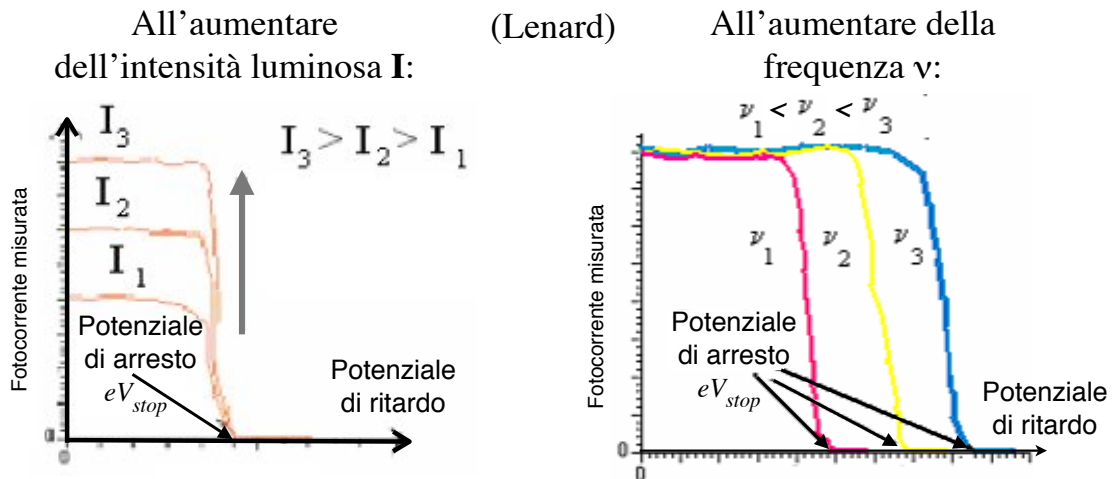
Quando  $V=V_{stop}$ , nel rivelatore  $I=0$ ; *tutti* i fotoelettroni sono stati bloccati,

ovvero l'*energia cinetica massima* dei fotoelettroni è

$$K_{max} = eV_{stop} \quad (e \text{ è la carica dell'elettrone}).$$

L'esperimento misura l'*energia massima* degli elettroni fotoemessi.

## Effetto fotoelettrico: risultati sperimentali



Potenziale di arresto (ovvero energia cinetica massima dei fotoelettroni):

*non dipende dall'intensità luminosa ma dipende dalla frequenza.*

Fotocorrente (numero di elettroni fotoemessi):

*dipende dall'intensità luminosa.*

Inoltre (osservazioni qualitative):

*solo sopra una certa frequenza si ha fotoemissione; il processo di emissione è pressoché istantaneo*

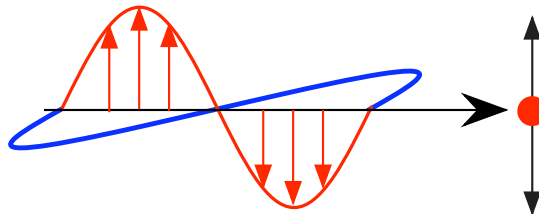
## Effetto fotoelettrico: risultati sperimentali (2)

Quanto trovato si riassume con:

- Aumentando l'intensità della radiazione incidente:
  - l'energia massima dei fotoelettroni *non cambia*.
  - aumenta il *numero* dei fotoelettroni.
- Aumentando la frequenza della radiazione incidente:
  - vengono emessi fotoelettroni *esclusivamente al superamento di una frequenza caratteristica (soglia)*.
  - l'energia massima dei fotoelettroni *aumenta*.

## La spiegazione classica

L'onda incidente pone in oscillazione gli elettroni, sotto l'azione del campo **E**.



Gli elettroni accumulano energia nel tempo, poiché il campo continua a forzarne l'oscillazione.

Il tempo necessario ad accumulare energia sufficiente a sfuggire dal metallo dipende dall'energia ceduta per ciclo e dal numero di cicli, ovvero *dipende dall'intensità luminosa e dalla frequenza*.

Intensità luminosa maggiore = campo elettrico maggiore, quindi emissione più intensa *e con maggior energia cinetica*.

*Evidente disaccordo con l'esperimento.*

## La spiegazione di Einstein

1905: tre (!) pagine dell'articolo "Su un punto di vista euristico a proposito della creazione e conversione della luce" (Ann. Physik **17**, 132).

Si assuma che:

- 1] la luce sia composta da "quanti", ciascuno di energia  $h\nu$ .
- 2] per lasciare il metallo, ciascun elettrone debba spendere un certo lavoro  $\Phi$ , caratteristico del metallo.
- 3] l'energia di un solo "quanto" venga assorbita in tutto o in parte da un elettrone, e trasformata in energia cinetica (ovvero il processo viene trattato come un *urto* fra corpuscoli).

Allora:

l'energia cinetica massima  $K_{max}$  del fotoelettrone è:

$$K_{max} = h\nu - \Phi.$$

dove  $\nu$  è la frequenza della luce incidente.

## Conseguenze della spiegazione di Einstein

L'energia cinetica massima  $K_{max}$  del fotoelettrone è:

$$K_{max} = h\nu - \Phi.$$

dove  $\nu$  la frequenza della luce incidente.

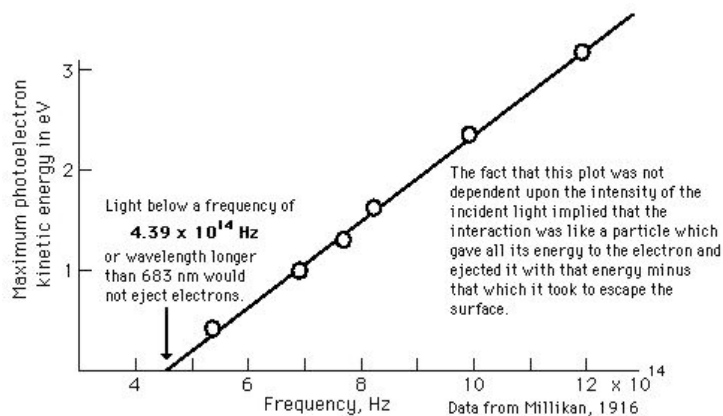
Ne consegue:

- 1- la relazione fra  $K_{max}$  e  $\nu$  è lineare, e ha *pendenza universale*  $h$ .
- 2- L'intercetta  $\Phi$  dipende dal materiale che fotoemette.
- 3- Esiste un effetto di soglia *in frequenza*: se  $h\nu < \Phi$  non si ha emissione.
- 4- La rapidità del processo non dipende dall'intensità luminosa, si tratta sempre di un "urto" fra due soli enti.
- 5- Il numero di fotoelettroni, non l'energia  $K_{max}$ , dipende dall'intensità.

Inoltre, dal punto 1] della slide precedente, e ritenendo valida la relatività ristretta,  
6- Il "quanto di luce" deve avere, oltre a energia, un momento  $p = h\nu/c$

## Le verifiche di Richardson e Millikan

- 1- la relazione lineare fra  $K_{max}$  e  $\nu$  ha *pendenza universale*  $h$ .
- 2- L'intercetta  $\Phi$  dipende dal materiale che fotoemette.
- 2- Esiste un effetto di soglia *in frequenza*.
- 3- Il processo è più rapido di  $10^{-9}$  s, e non dipende dall'intensità luminosa.
- 4- Il numero di fotoelettroni, non l'energia  $K_{max}$ , dipende dall'intensità.



Tutte le previsioni di Einstein si rivelarono corrette.

# Millikan

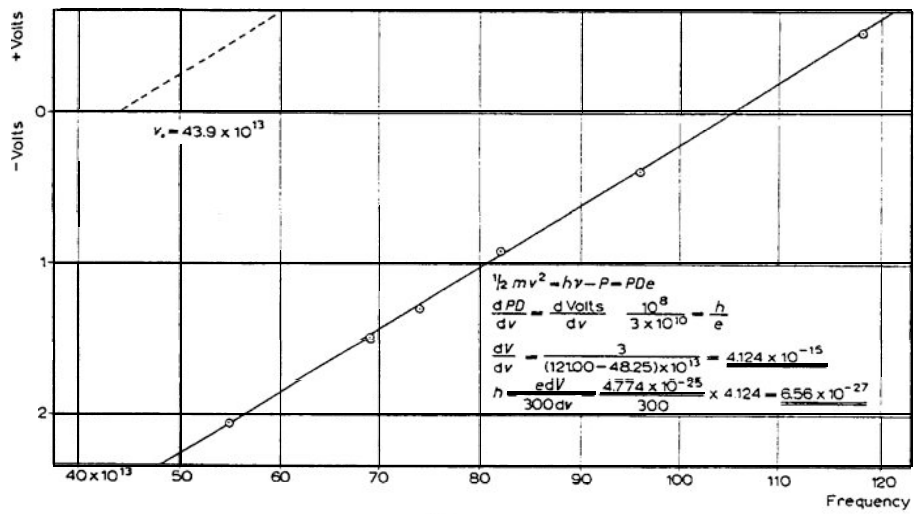


Fig. 4.

Figura originale, tratta dalla Nobel Lecture di Millikan.

<http://nobelprize.org>

e il momento del “quanto di luce”?