



UNIVERSITÀ  
DI TRENTO

Dipartimento di  
Fisica

II

Luce: onda o particella?

[questo è - e resta - il problema ...]

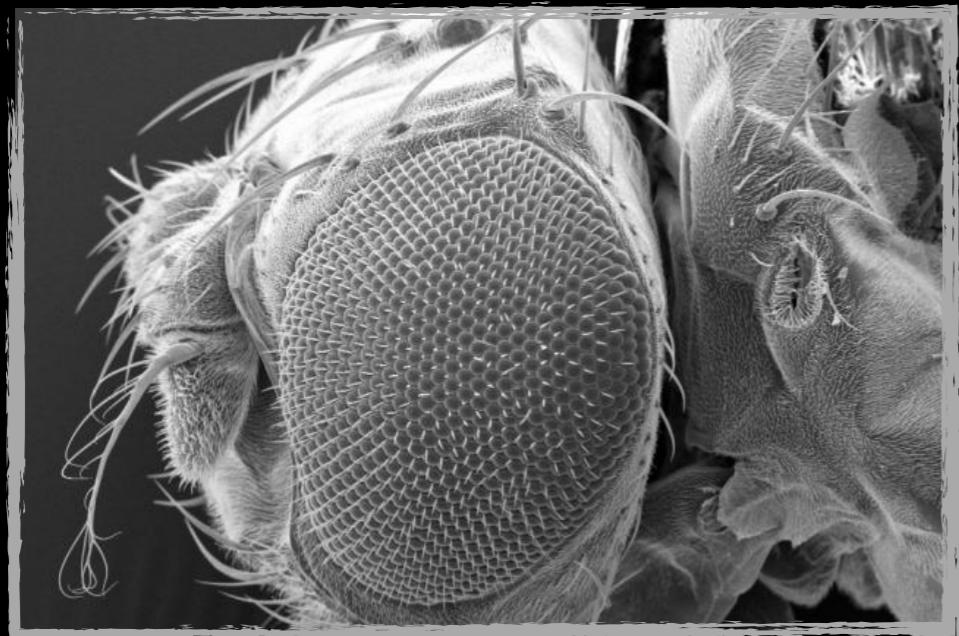
ELEMENTI di FISICA MODERNA

[e intelligenza artificiale] 2025

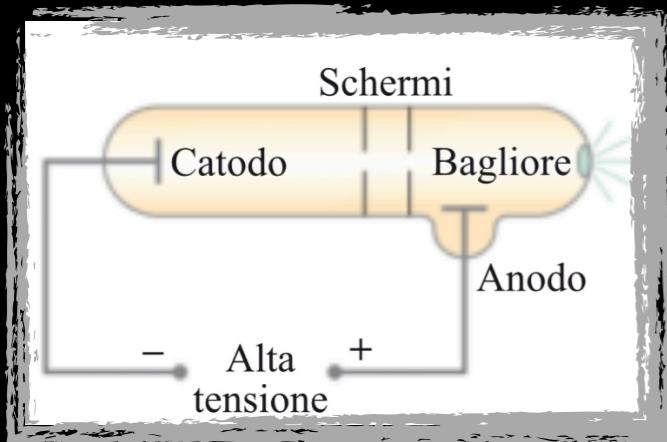
> Un protagonista,  
una pubblicazione «mirabile»  
1905

> Molti protagonisti,  
una sequenza di pubblicazioni  
1900-1927

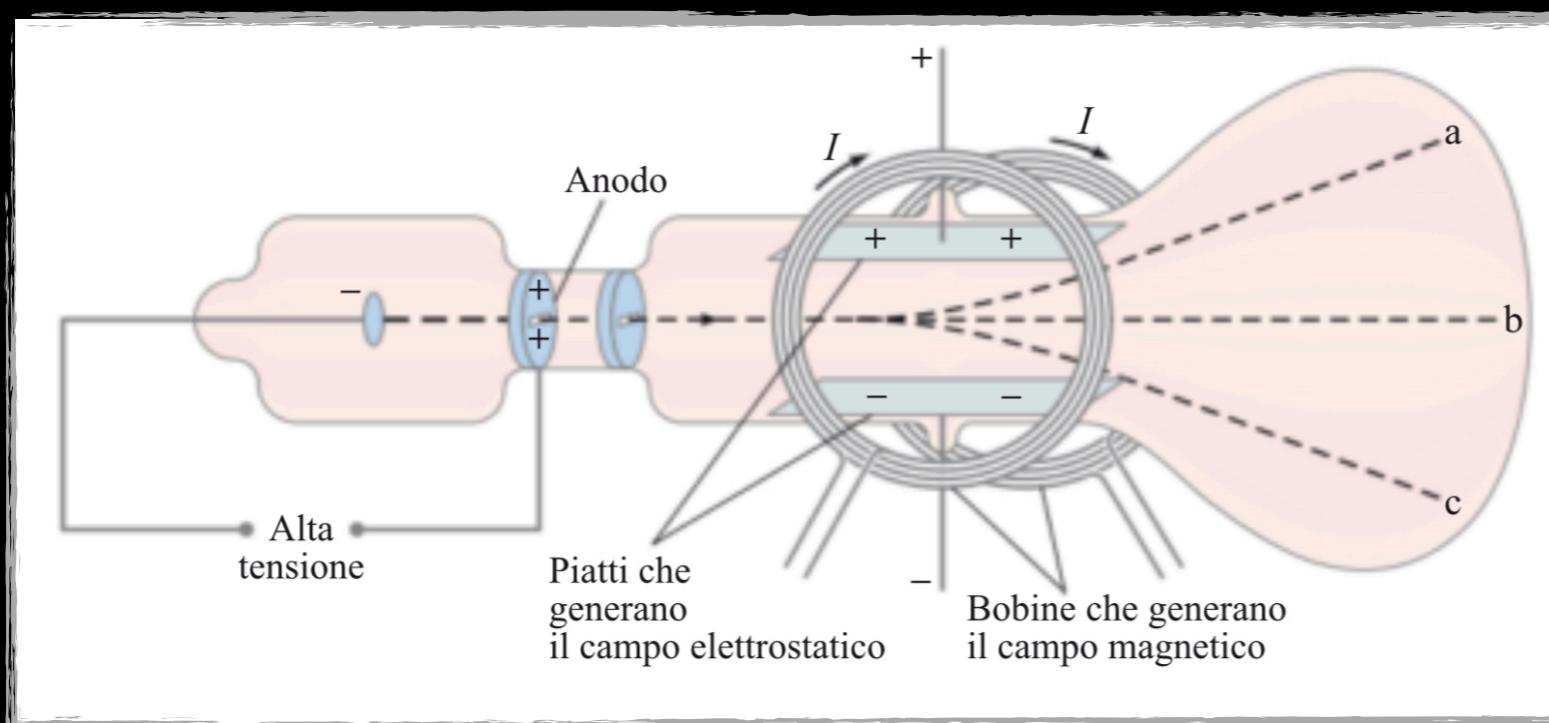
alla scoperta della fisica quantistica:  
primo protagonista, l'elettrone



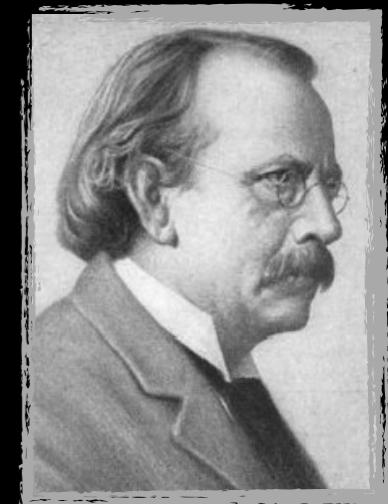
# «Scoperta» dell'elettrone



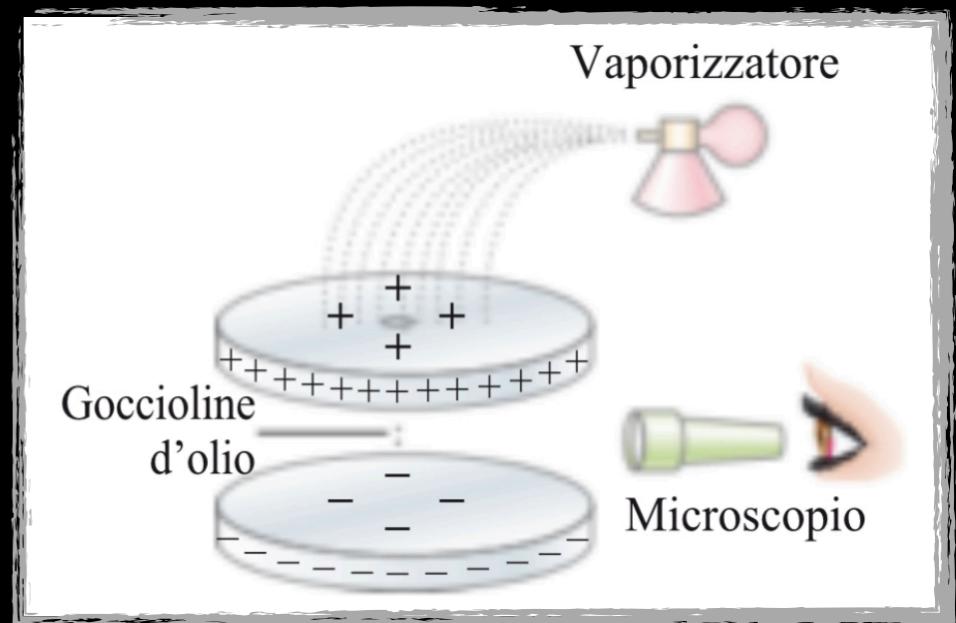
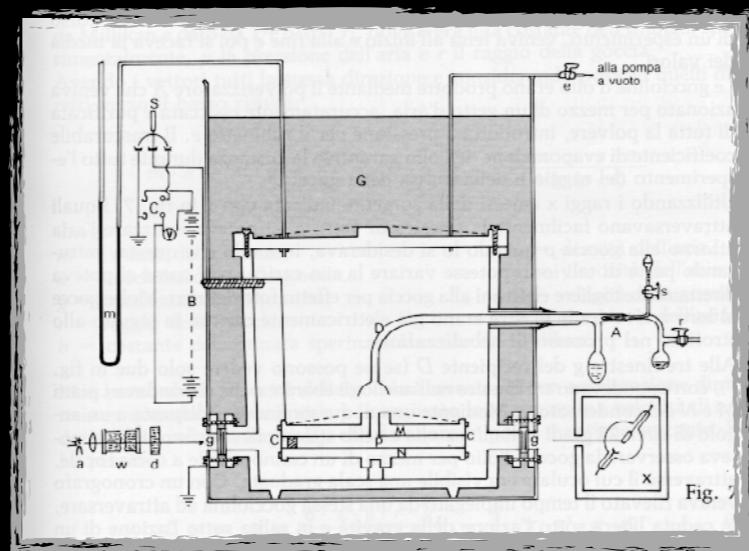
raggi catodici  
[particelle cariche]



J.J. Thomson  
1897  
 $e/m$



# Quantizzazione della carica elettrica



R. Millikan 1909

$e \rightarrow m \rightarrow$  gli elettroni non  
sono atomi

$$M \sim 10^{-27} \text{ kg}$$
$$M \sim 10^{-30} \text{ kg}$$
$$e \sim 10^{-19} \text{ C}$$

# Quantizzazione della carica elettrica



R. Millikan



H. Fletcher

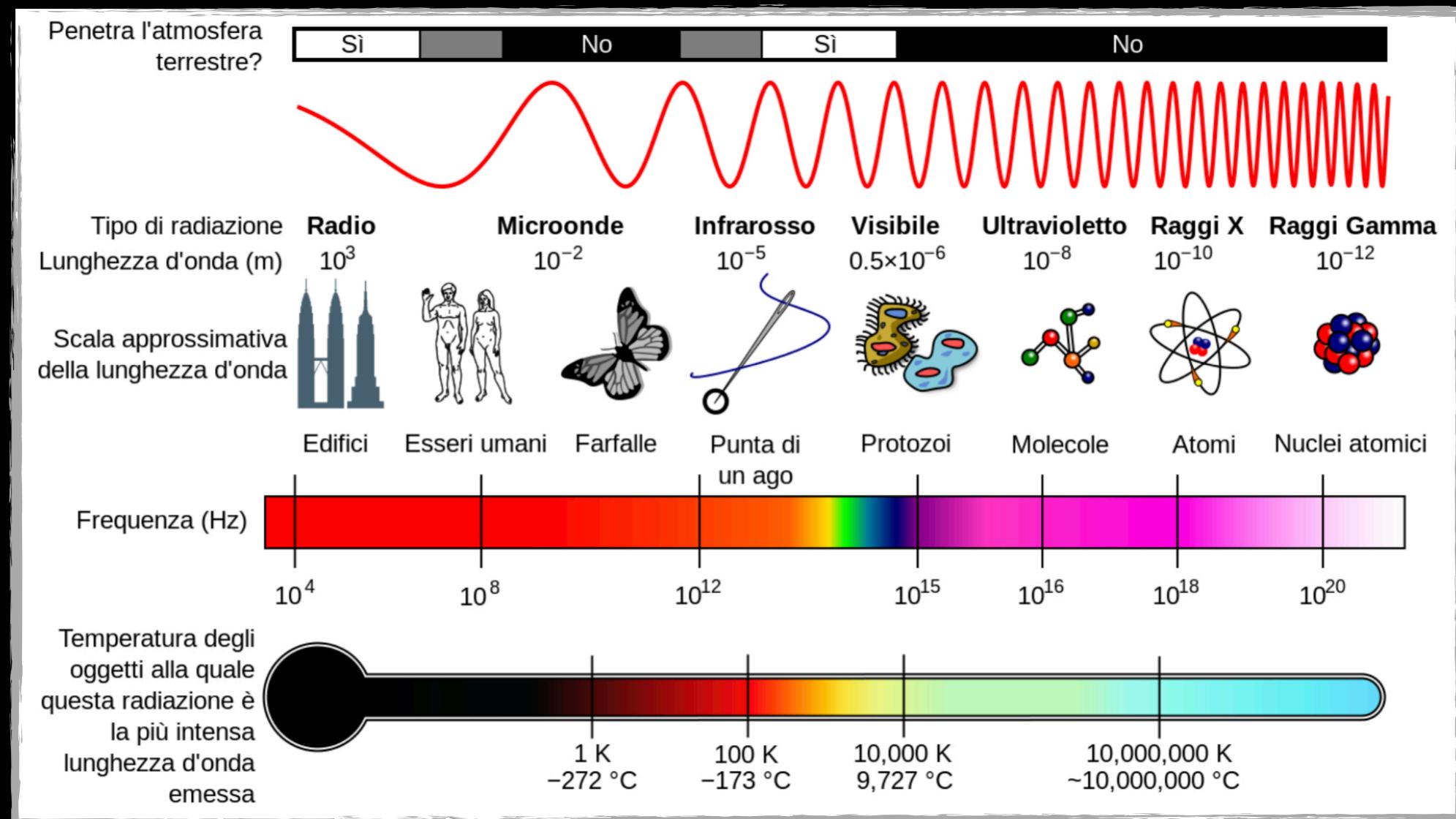
Cos'è la luce ?

onda (Huygens)

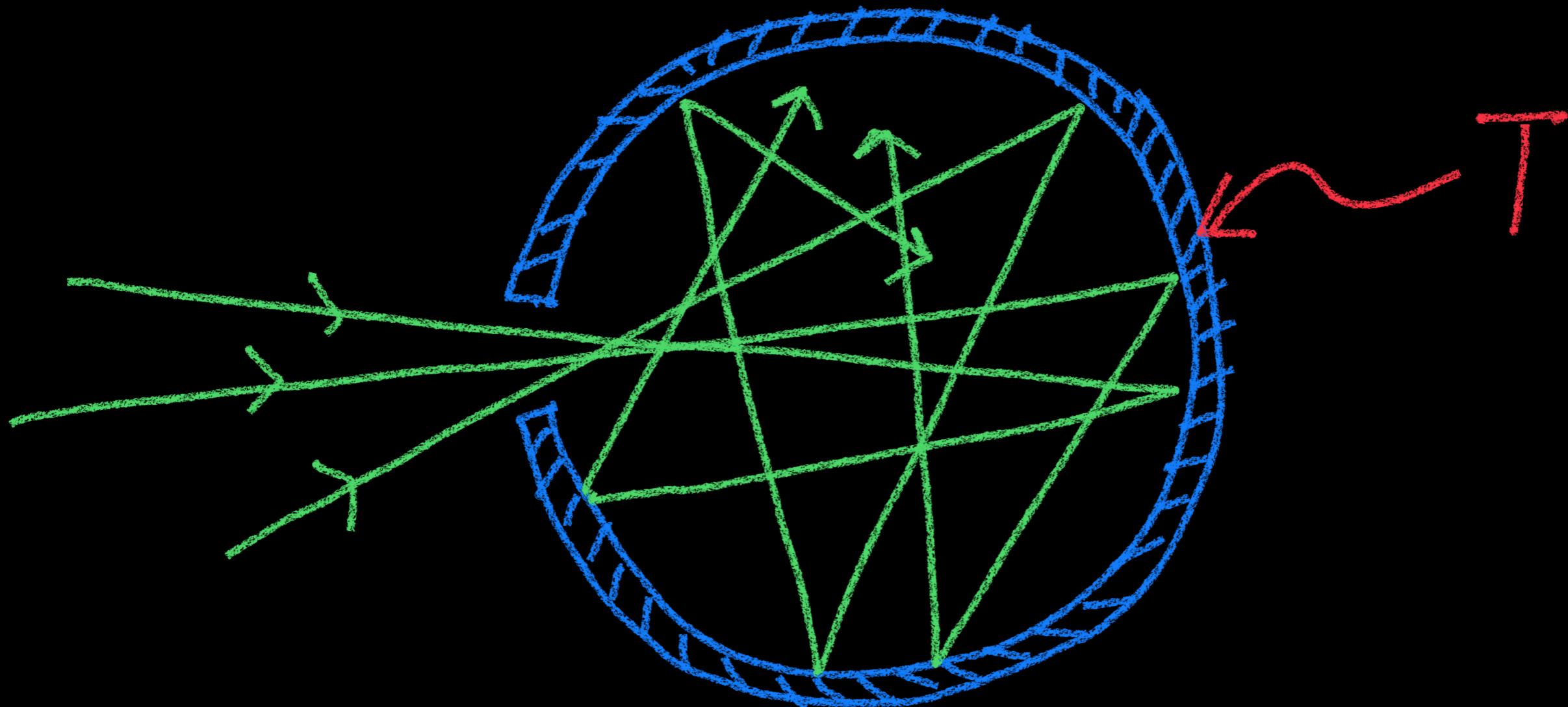
particella (Newton)

J. C. Maxwell

# Lo spettro della radiazione elettromagnetica

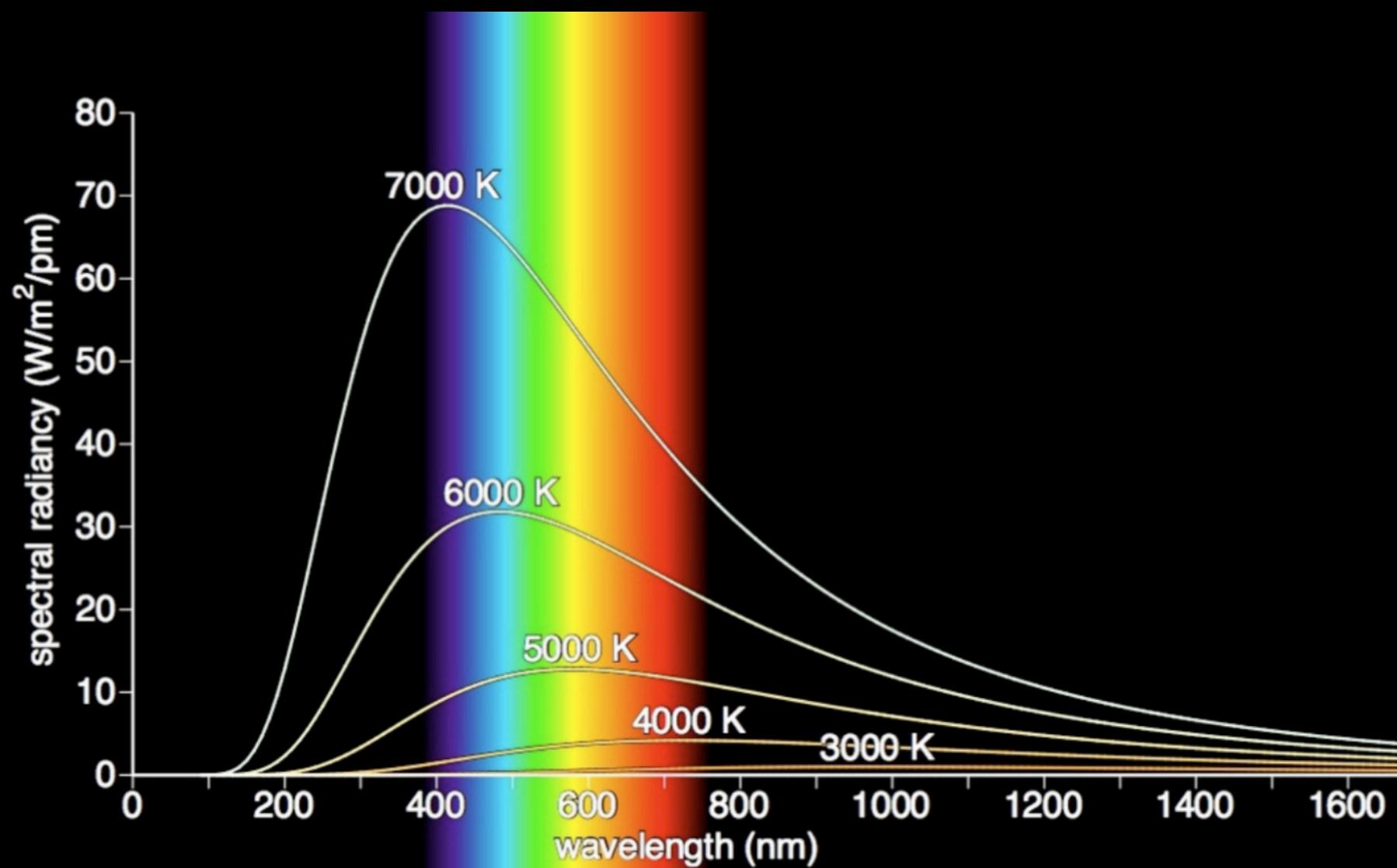


# Lo spettro della radiazione elettromagnetica



CORPO NERO

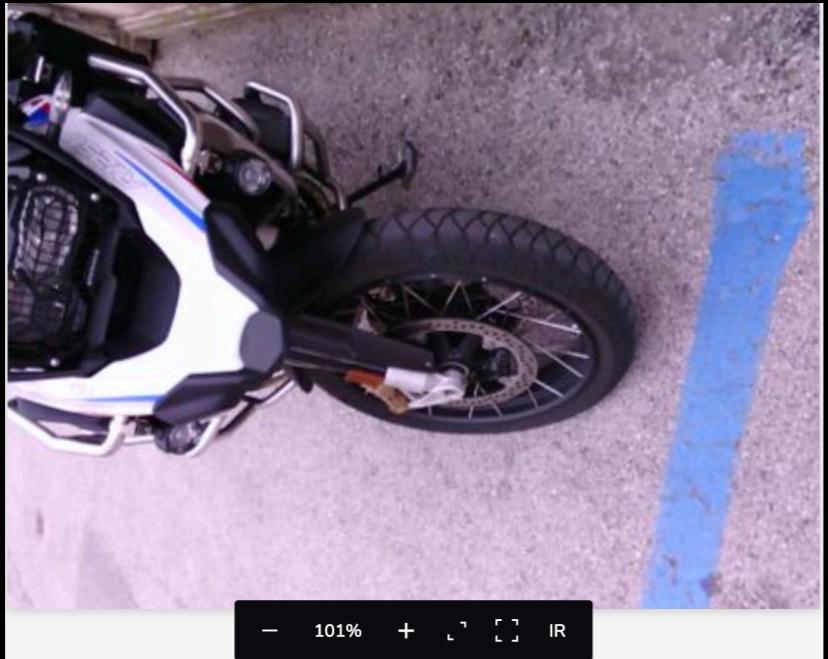
# Lo spettro della radiazione elettromagnetica



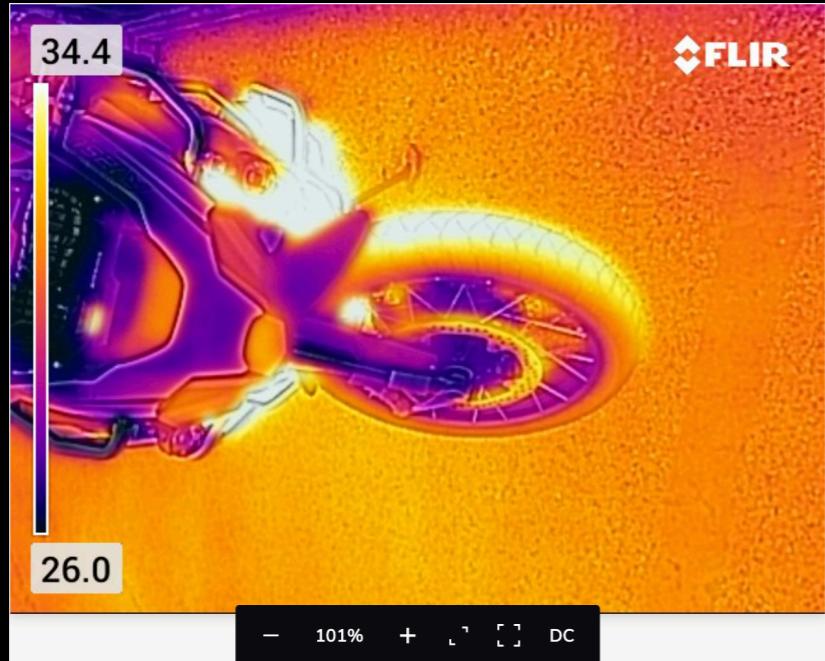
$$I = \sigma T^4$$

$$\lambda I = c_w$$

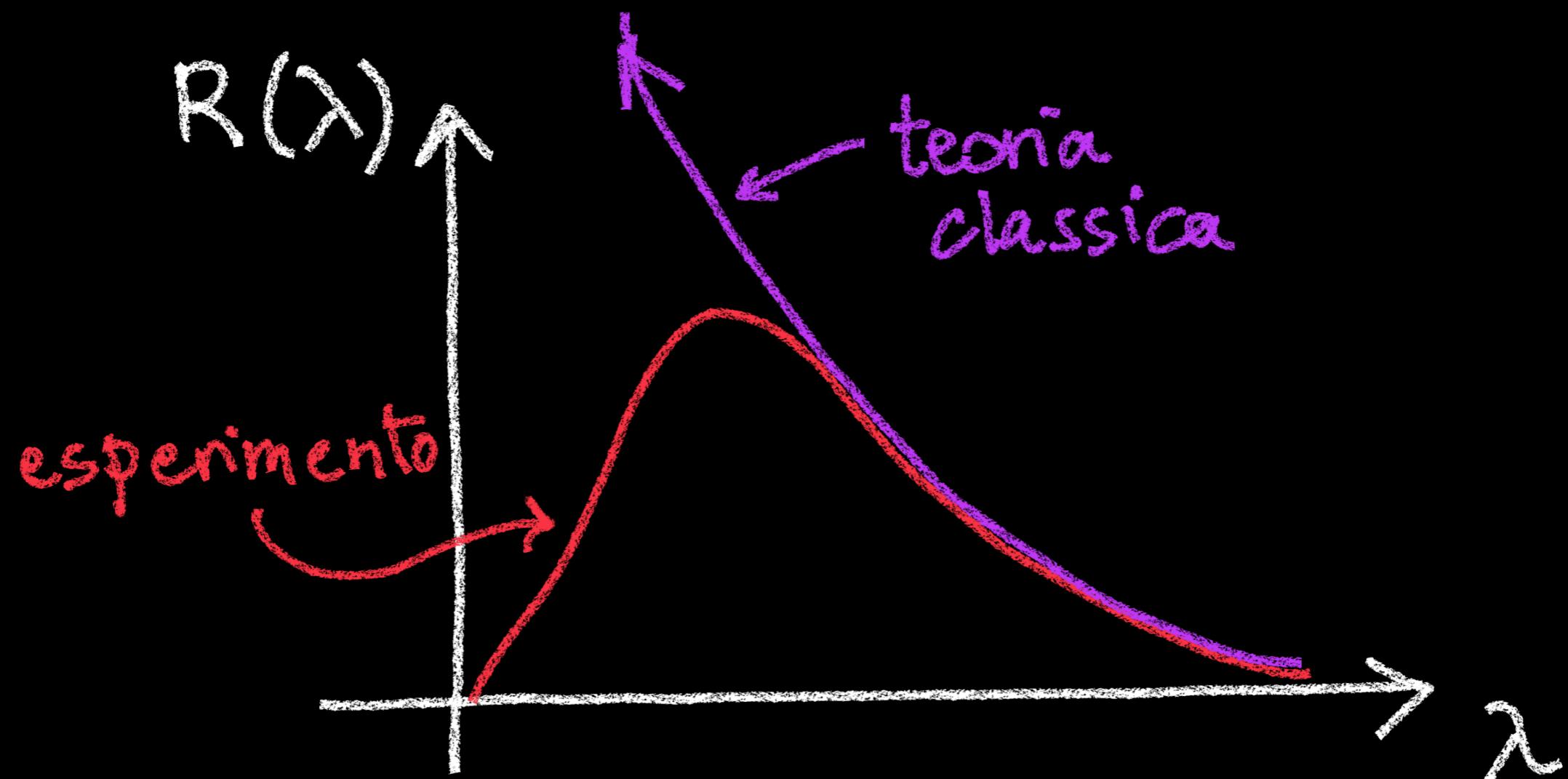
# Lo spettro della radiazione elettromagnetica



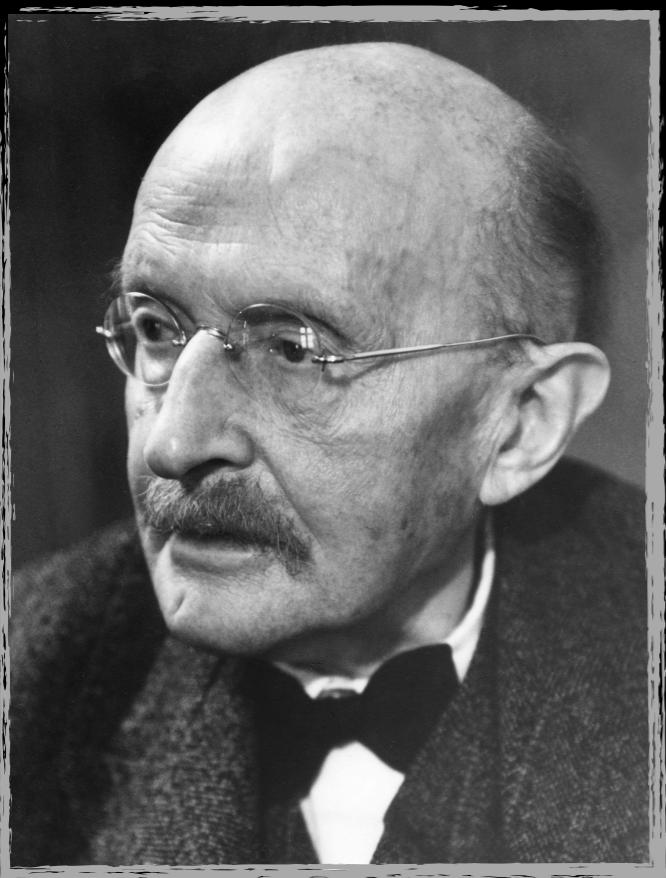
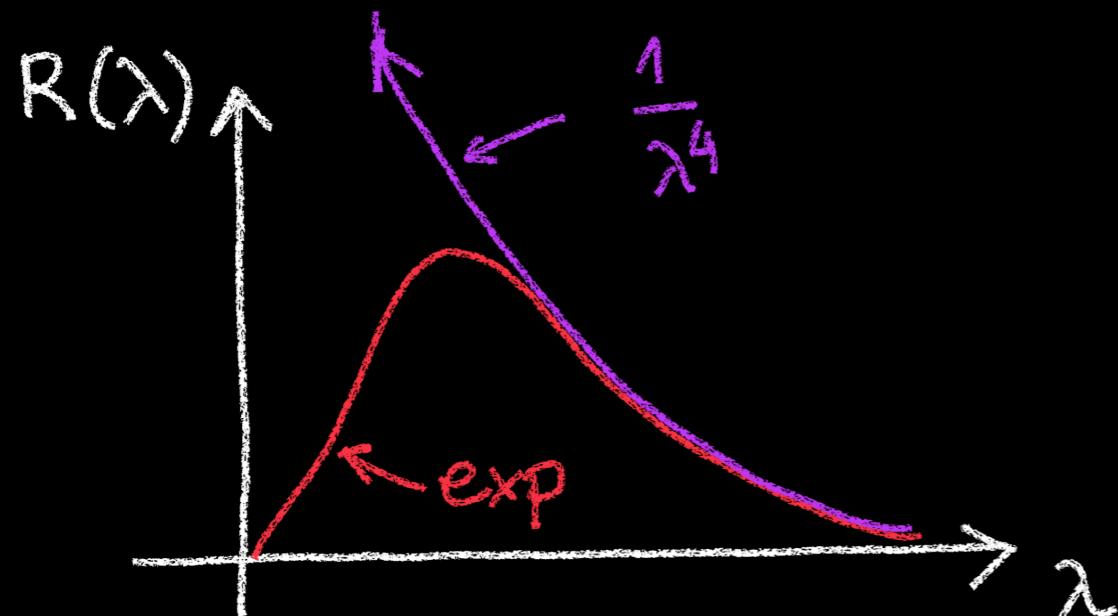
# Lo spettro della radiazione elettromagnetica



# La CATASTROFE ULTRAVIOLETTA



# La CATASTROFE ULTRAVIOLETTA

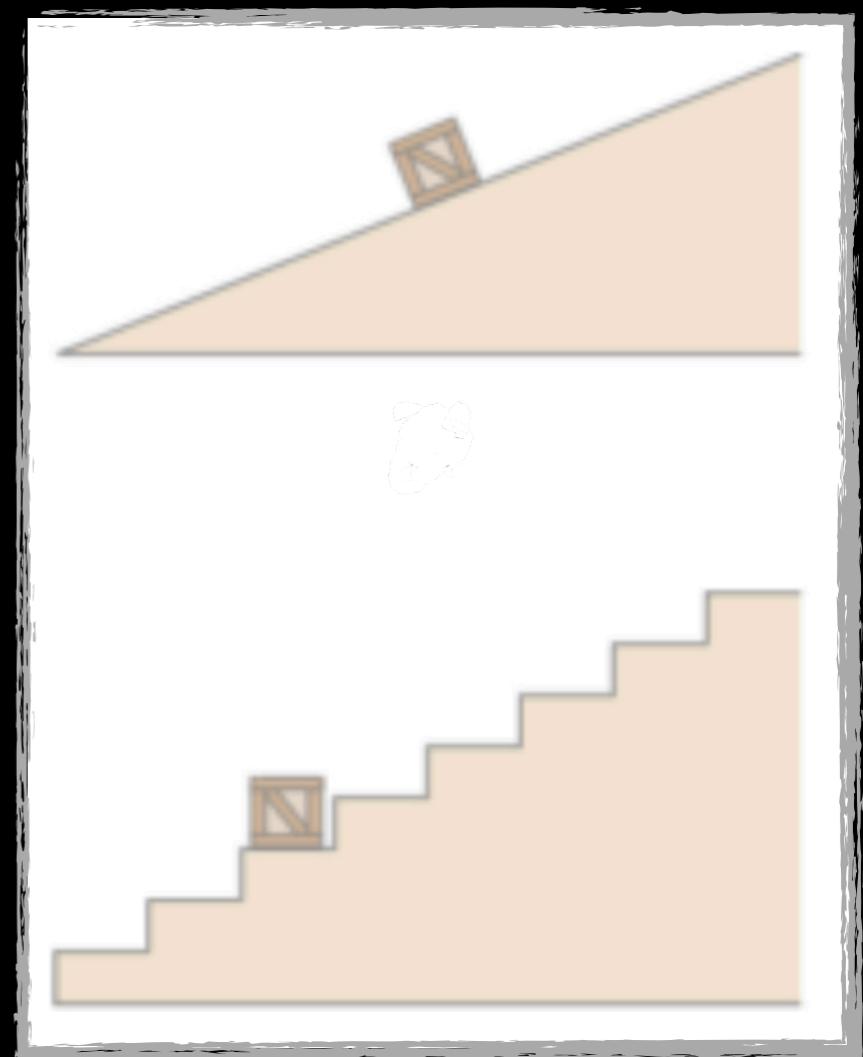


M. Planck

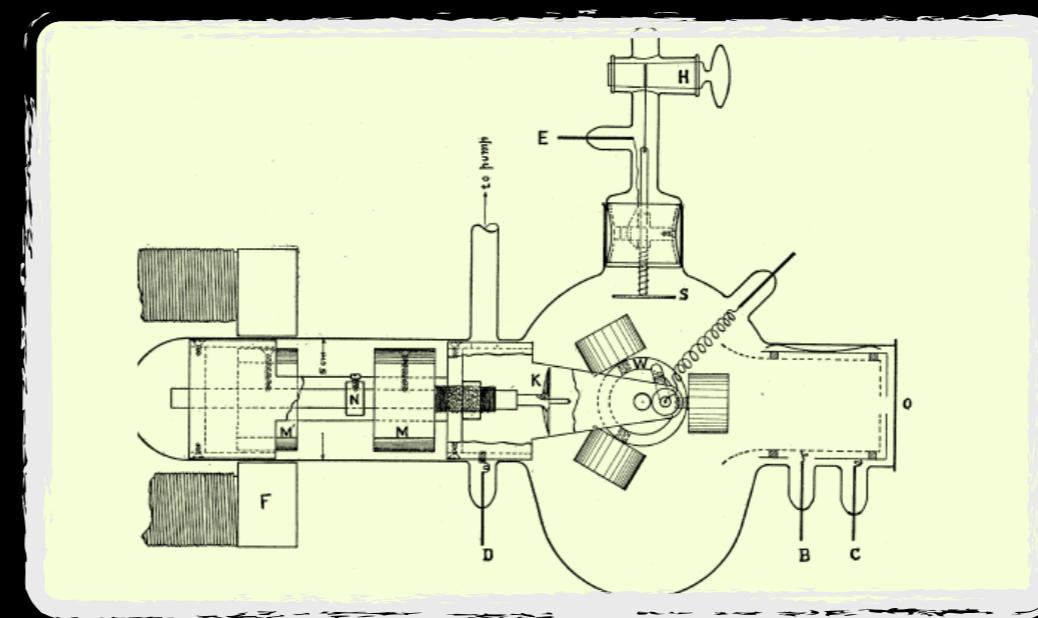
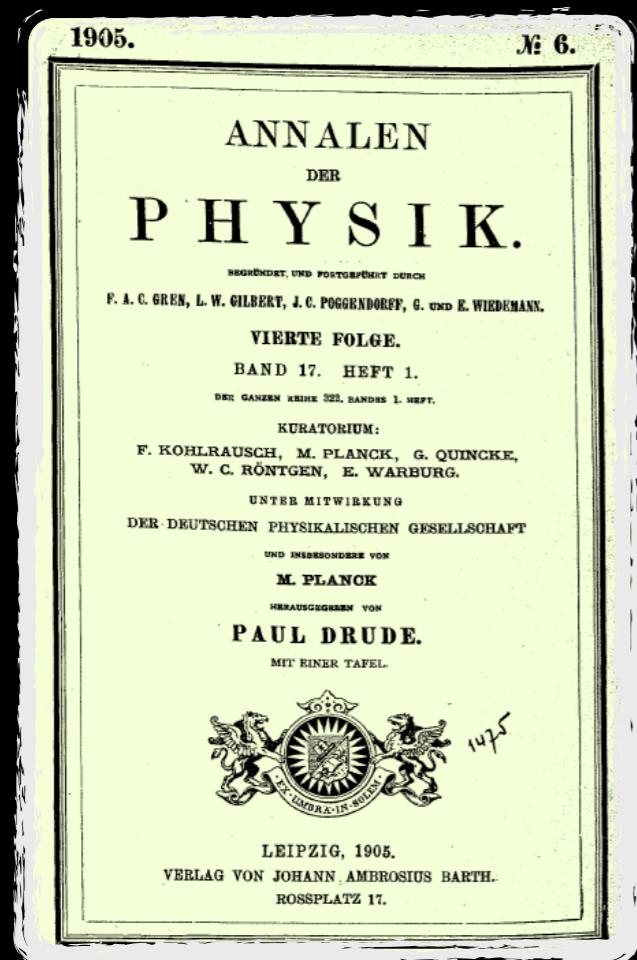
1900

$$E = h\nu$$

$$h \approx 6.6 \times 10^{-34} \text{ Js}$$



# Effetto fotoelettrico



# Effetto fotoelettrico

- seconda metà del XIX secolo, tentativi di spiegare la conduzione elettrica nei fluidi.
- 1865 Maxwell pubblica il trattato sull'elettricità e magnetismo e sulla natura delle onde elettromagnetiche.
- 1880 Hertz riprende e sviluppa lavori di Schuster sulla scarica dei conduttori elettrizzati tramite una scintilla, fenomeno più intenso con elettrodi illuminati da luce ultravioletta.
- 1880 Wiedemann ed Ebert capiscono che la scarica avviene all'elettrodo negativo e Hallwachs trova che la dispersione delle cariche elettriche negative è più rapida se gli elettrodi sono illuminati da luce ultravioletta.
- 1880 Righi scopre che una lastra metallica conduttrice sotto luce UV si carica positivamente. Introduce il termine fotoelettrico per questo fenomeno.
- 1888 Hallwachs scopre che non si tratta di trasporto ma di produzione di elettricità. Il fenomeno è noto come effetto Hertz-Hallwachs.
- 1899: J.J. Thomson mostra che un metallo illuminato emette cariche identiche agli elettroni.
- 1902: Lenard scopre che la produzione di elettroni da un metallo illuminato avviene solo con luce di frequenza al di sopra di una soglia precisa.
- 1905 Einstein ne dà un'interpretazione corretta, premiata dal premio Nobel per la fisica del 1921.
- 1915: Millikan tenta di dimostrare l'infondatezza dell'ipotesi di Einstein, ma ne conferma le previsioni con grande precisione. Riceve premio il Nobel nel 1923.

# Effetto fotoelettrico



JCM



HH



AR



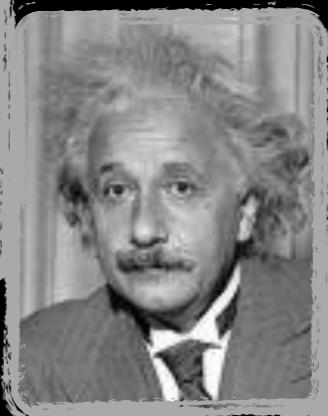
JJT



PL



MP

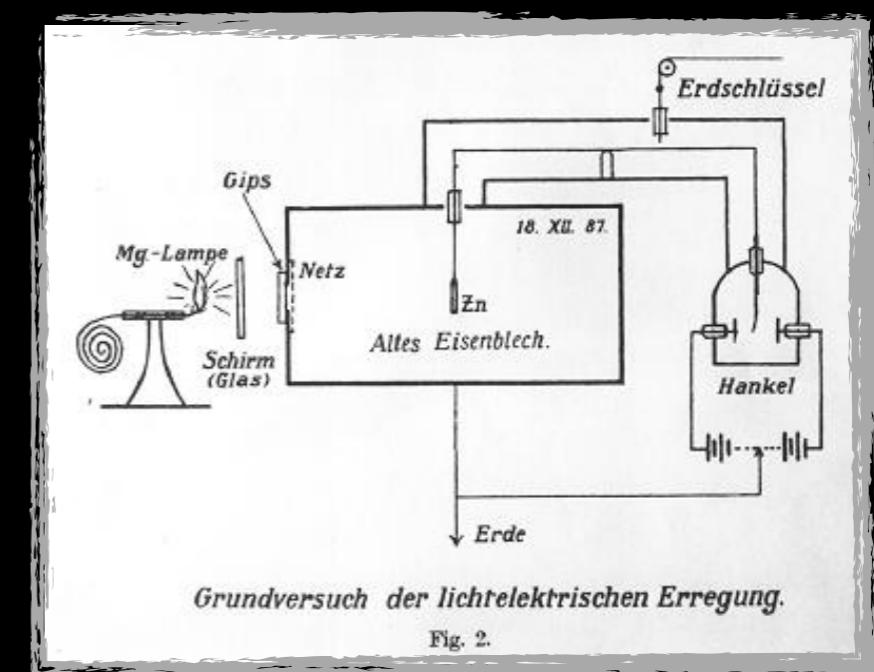
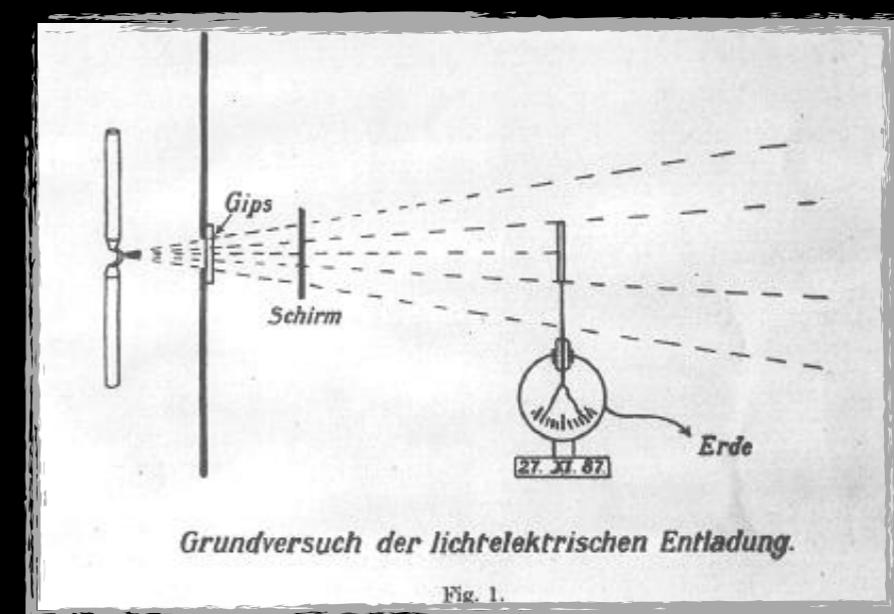
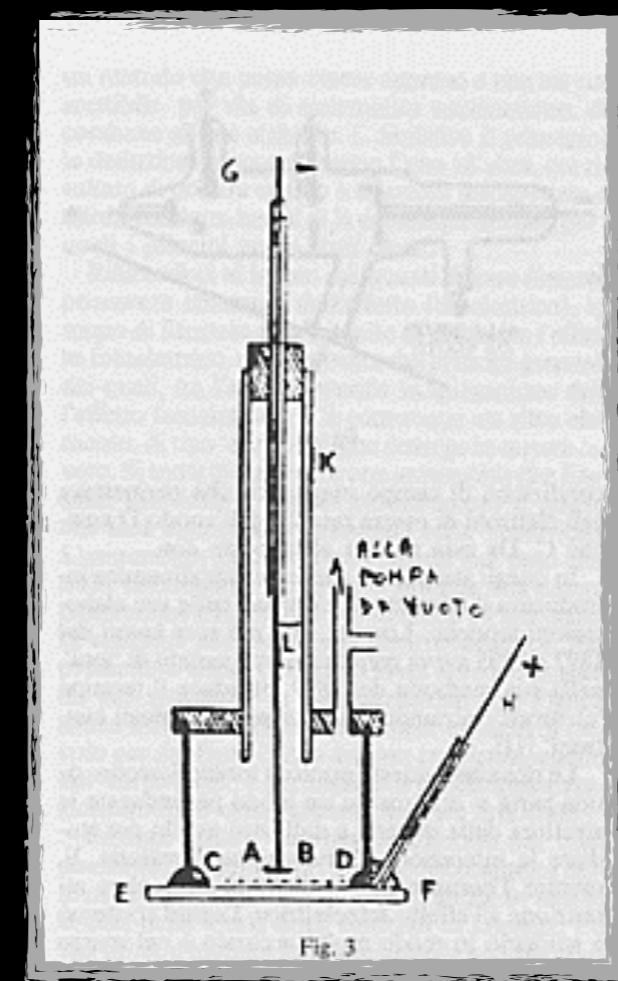
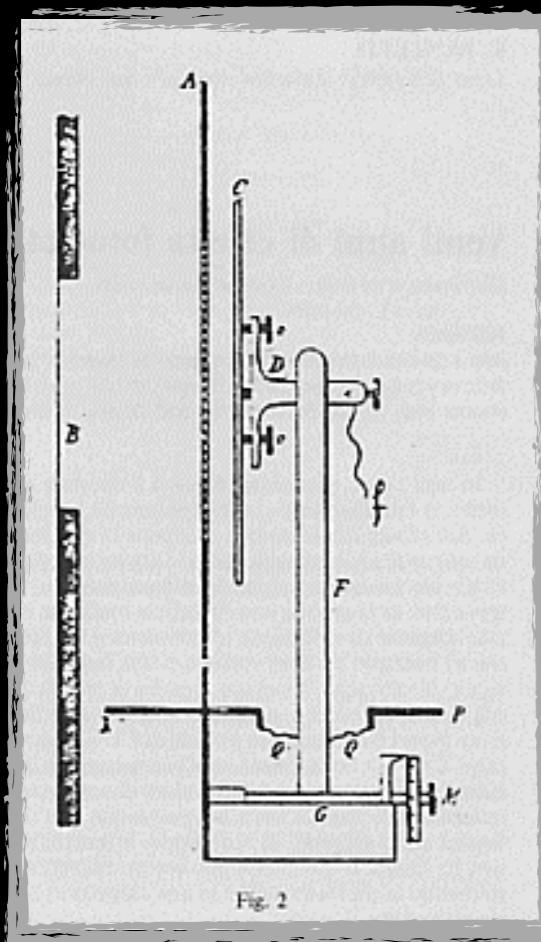


AE



RM

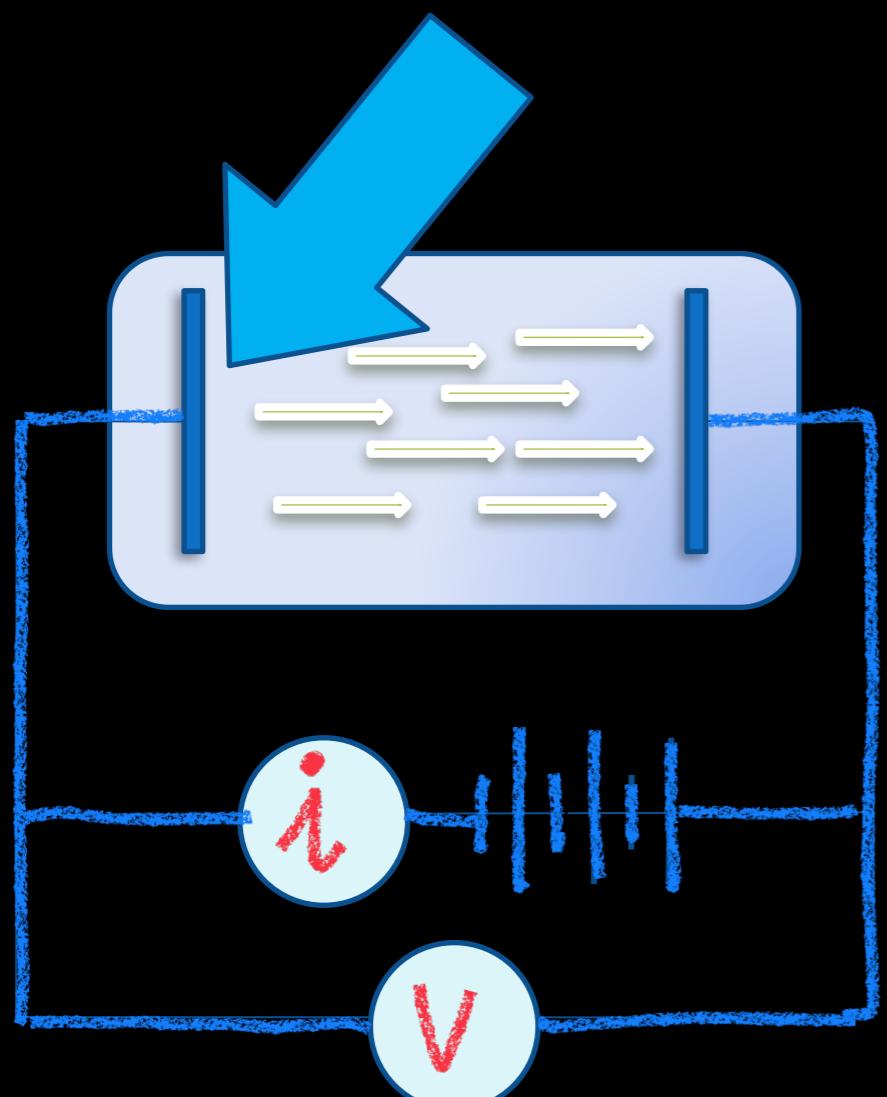
# Effetto fotoelettrico



Vecchi esperimenti

# Effetto fotoelettrico

→ Risultati attesi

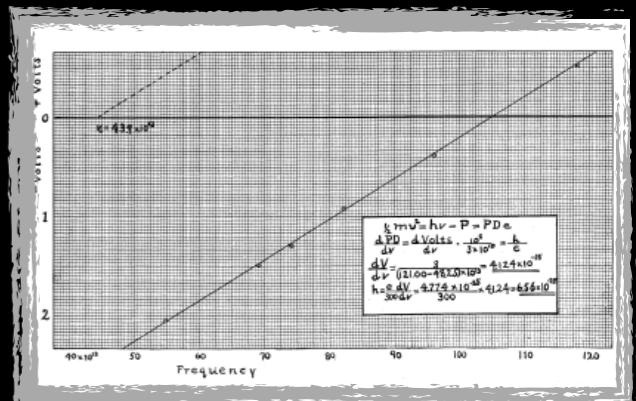
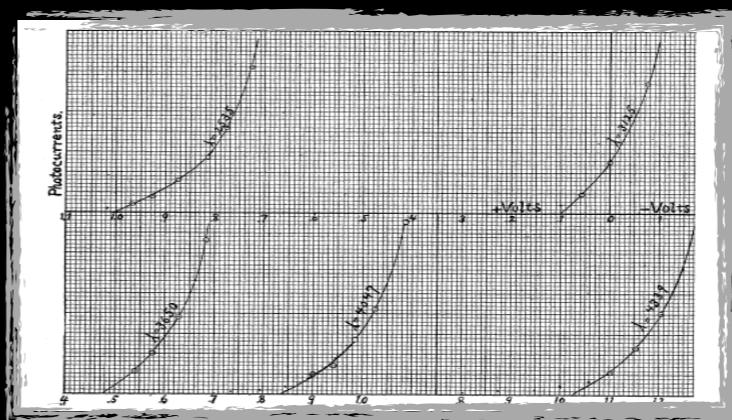
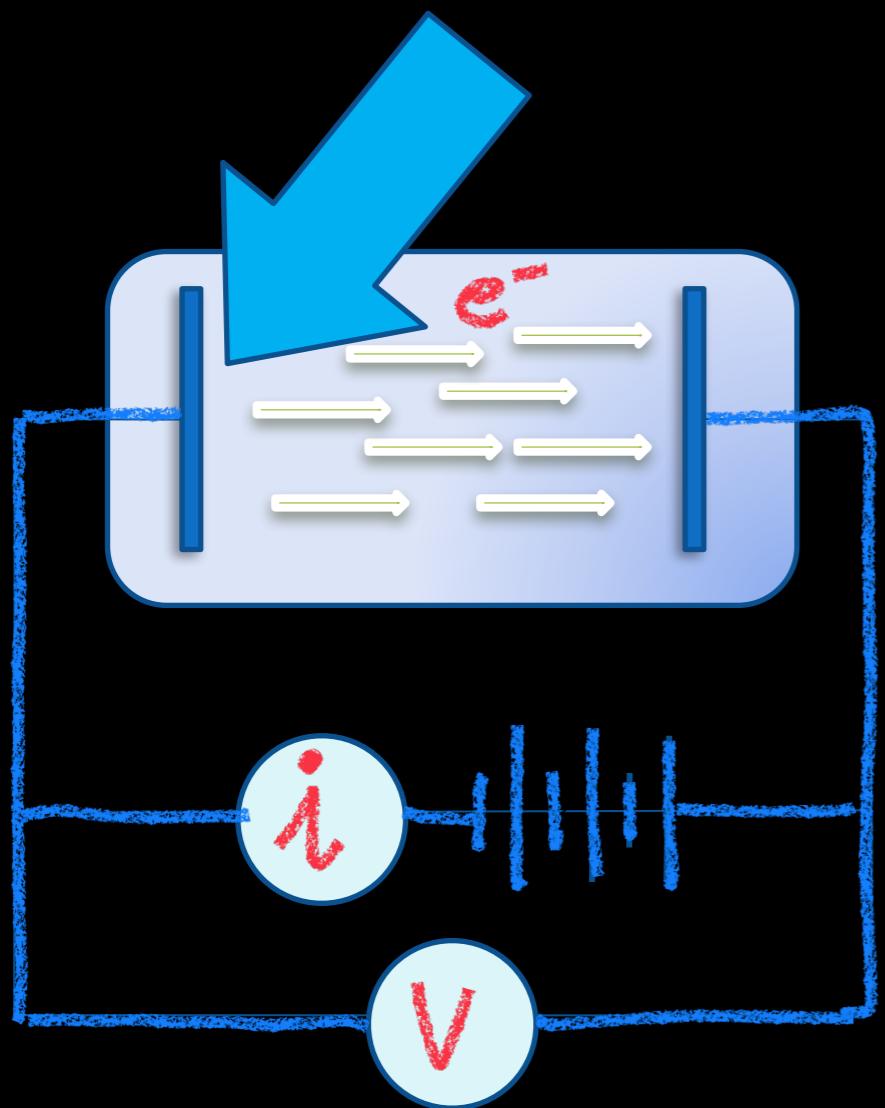


- L'energia degli elettroni deve crescere con l'intensità della luce
- L'energia non può dipendere dal colore della luce
- Bisogna aspettare del tempo per iniziare

# Effetto fotoelettrico

→ Risultati sperimentali

- L'energia non varia con l'intensità della luce
- sotto una frequenza minima non succede nulla
- l'effetto è immediato



# Effetto fotoelettrico

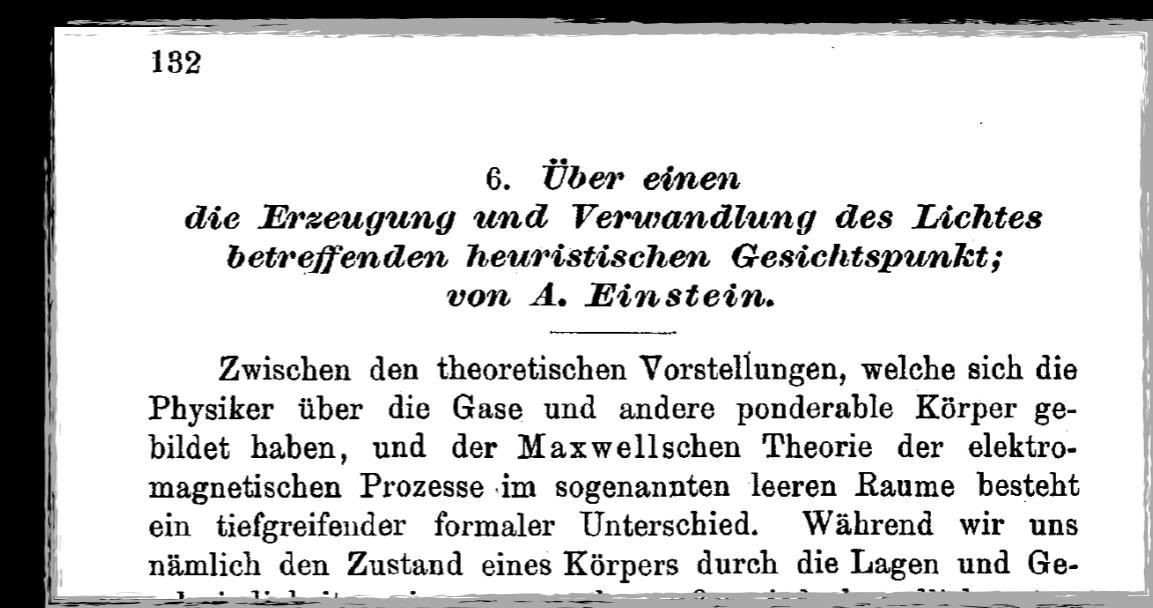
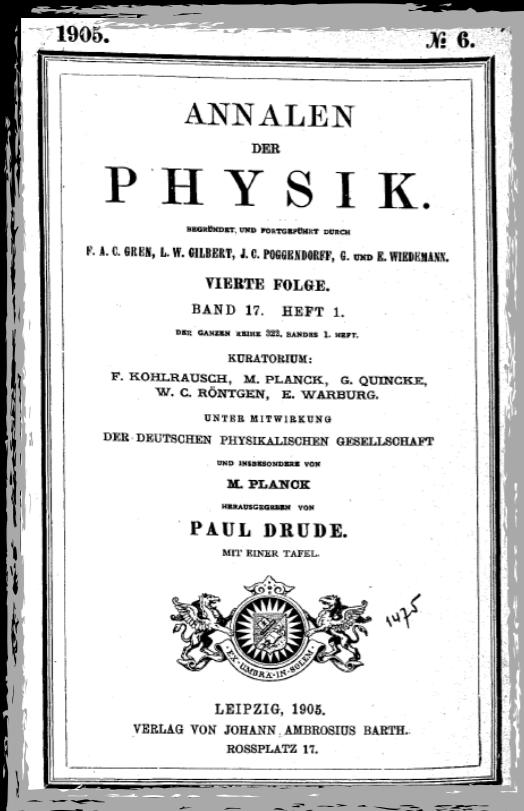
Emissione e trasformazione della luce da un punto di vista euristico

*Annalen der Physik, 1905, vol. 17, pag. 132 - Berna, 17 Marzo 1905*

- La Luce interagisce con gli elettroni del metallo in modo "discreto", a pacchetti
- ogni pacchetto viene completamente assorbito da un singolo elettrone che ne assume l'energia
- l'energia del pacchetto è proporzionale alla frequenza della radiazione che deve descrivere,  $E = h\nu$
- l'elettrone, dopo avere superato la barriera di potenziale elettrico di estrazione dal metallo,  $W$ , viene espulso

$$E_{k,\max} = h\nu - W$$

# Effetto fotoelettrico



lassen. Die kinetische Energie solcher Elektronen ist

$$\frac{R}{N} \beta v - P.$$

Ist der Körper zum positiven Potential  $\Pi$  geladen und von Leitern vom Potential Null umgeben und ist  $\Pi$  eben imstande, einen Elektrizitätsverlust des Körpers zu verhindern, so muß sein:

$$\Pi \epsilon = \frac{R}{N} \beta v - P,$$

wobei  $\epsilon$  die elektrische Masse des Elektrons bedeutet, oder

$$\Pi E = R \beta v - P',$$

wobei  $E$  die Ladung eines Grammäquivalentes eines einwertigen Ions und  $P'$  das Potential dieser Menge negativer Elektrizität in bezug auf den Körper bedeutet.<sup>1)</sup>

Setzt man  $E = 9,6 \cdot 10^8$ , so ist  $\Pi \cdot 10^{-8}$  das Potential in Volts, welches der Körper bei Bestrahlung im Vakuum annimmt.

Um zunächst zu sehen, ob die abgeleitete Beziehung der Größenordnung nach mit der Erfahrung übereinstimmt, setzen wir  $P' = 0$ ,  $v = 1,03 \cdot 10^{16}$  (entsprechend der Grenze des Sonnenspektrums nach dem Ultravioletten hin) und  $\beta = 4,866 \cdot 10^{-11}$ . Wir erhalten  $\Pi \cdot 10^7 = 4,3$  Volt, welches Resultat der Größenordnung nach mit den Resultaten von Hrn. Lenard übereinstimmt.<sup>2)</sup>

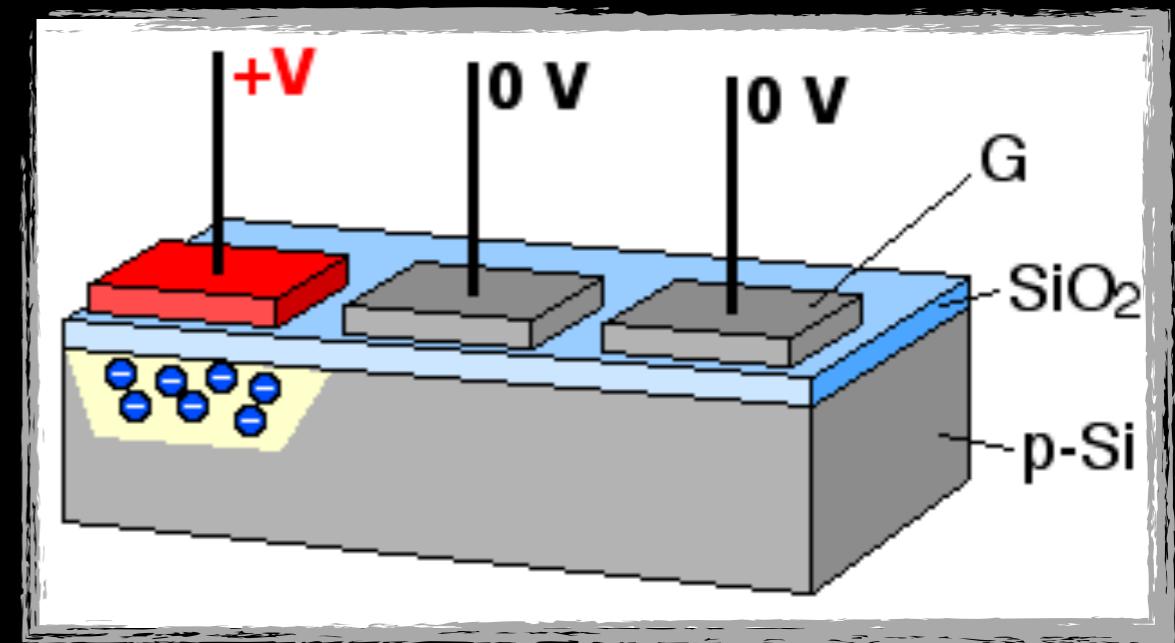
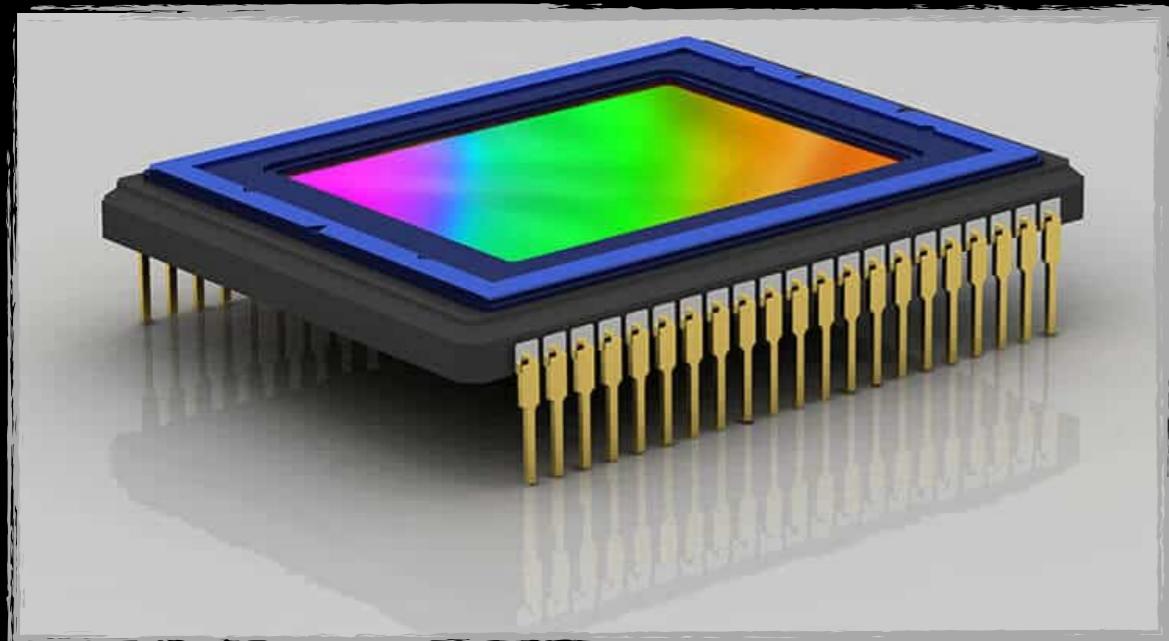
Cos'è la luce ?

nè onda (Huygens)

nè particella (Newton)

COMPLEMENTARIETÀ'

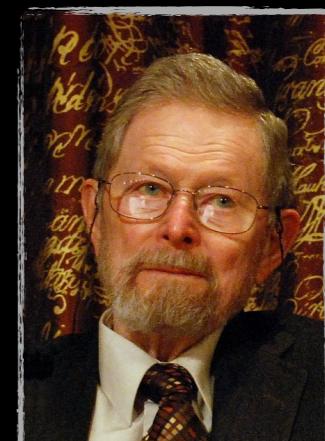
# Charged Coupled Device



CCD



Boyle



Smith