



UNIVERSITÀ
DI TRENTO

Dipartimento di
Fisica



② Luce: onda o particella?

[questo è - e resta - il problema...]

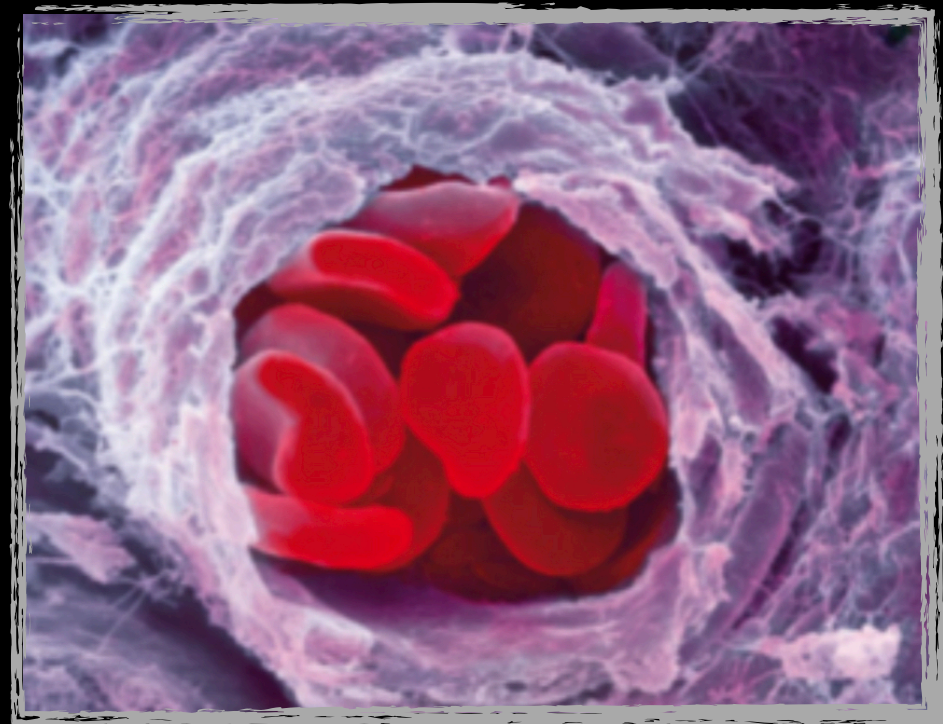
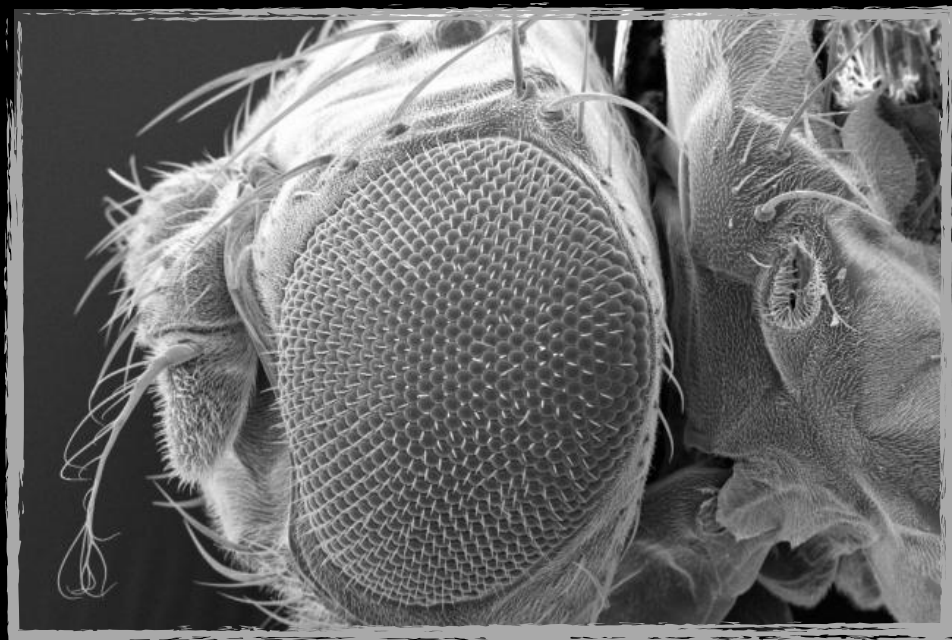
ELEMENTI di FISICA MODERNA

[e intelligenza artificiale] 2025

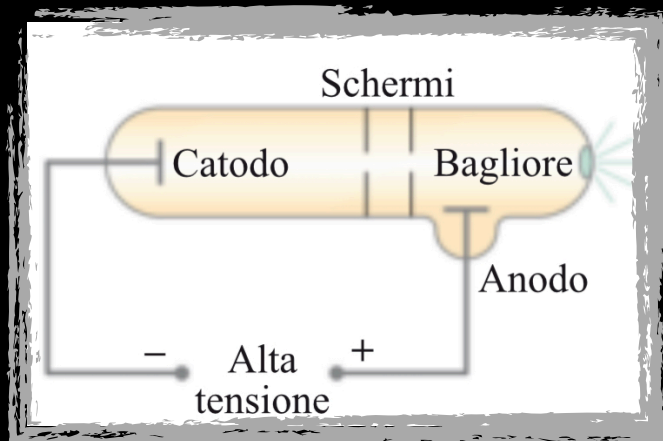
> Un protagonista,
una pubblicazione « mirabile »
1905

> Molti protagonisti,
una sequenza di pubblicazioni
1900-1927

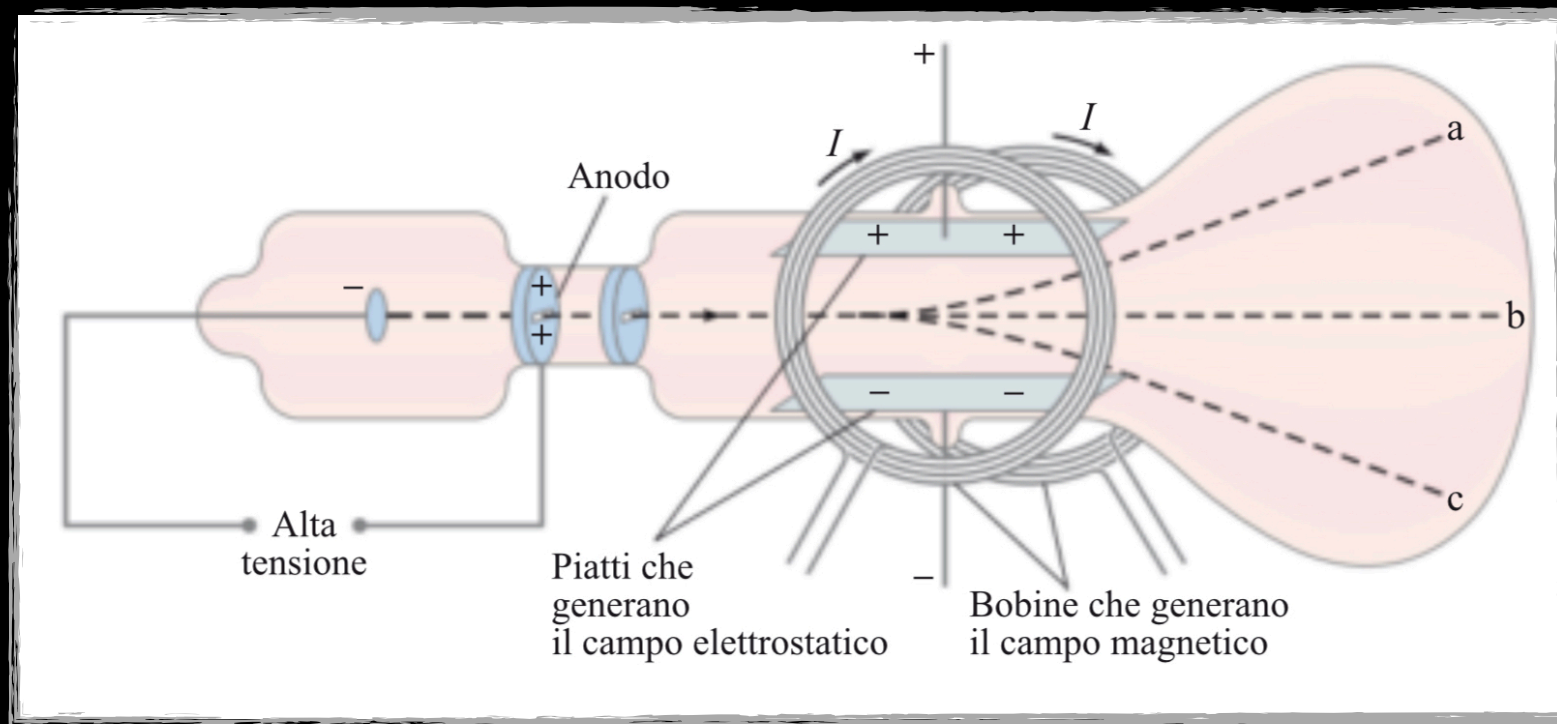
alla scoperta della fisica quantistica:
primo protagonista, l'elettrone



« Scoperta » dell'elettrone



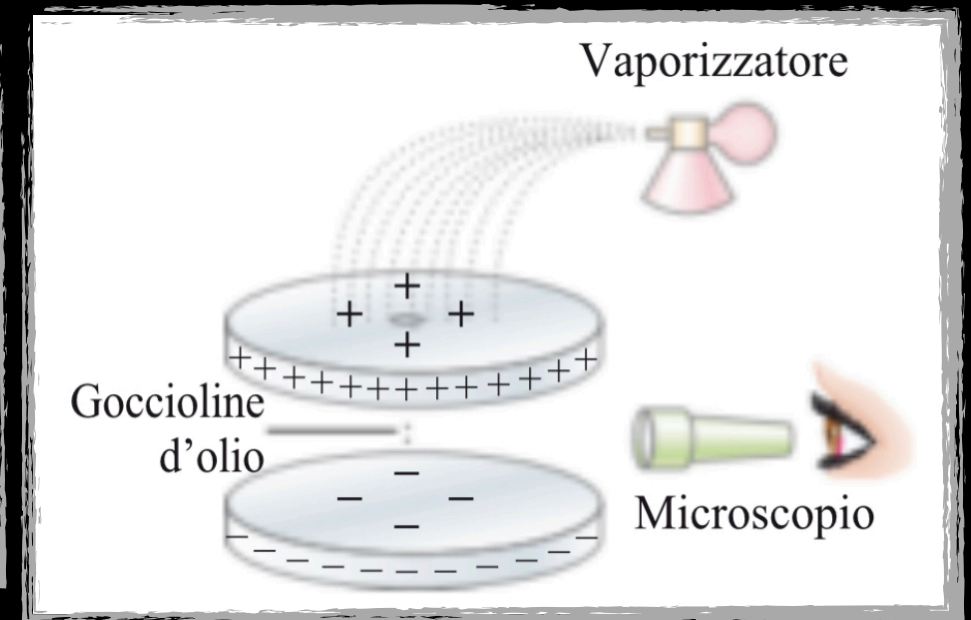
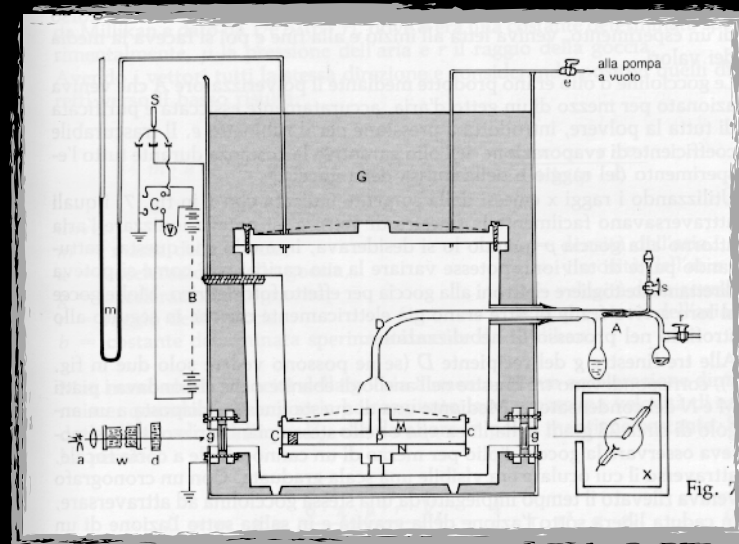
raggi catodici
[particelle cariche]



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

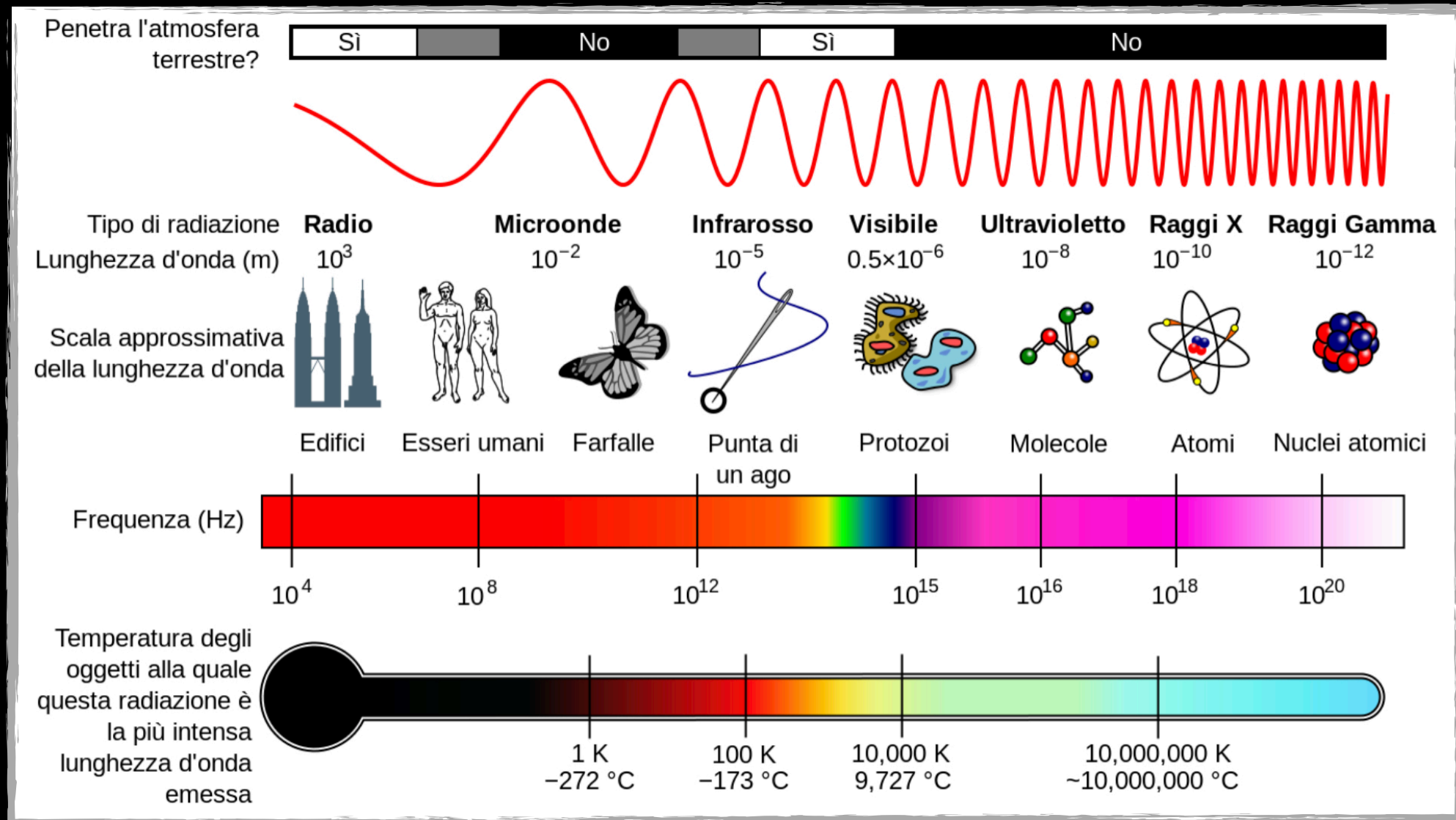
(Huygens)

particella

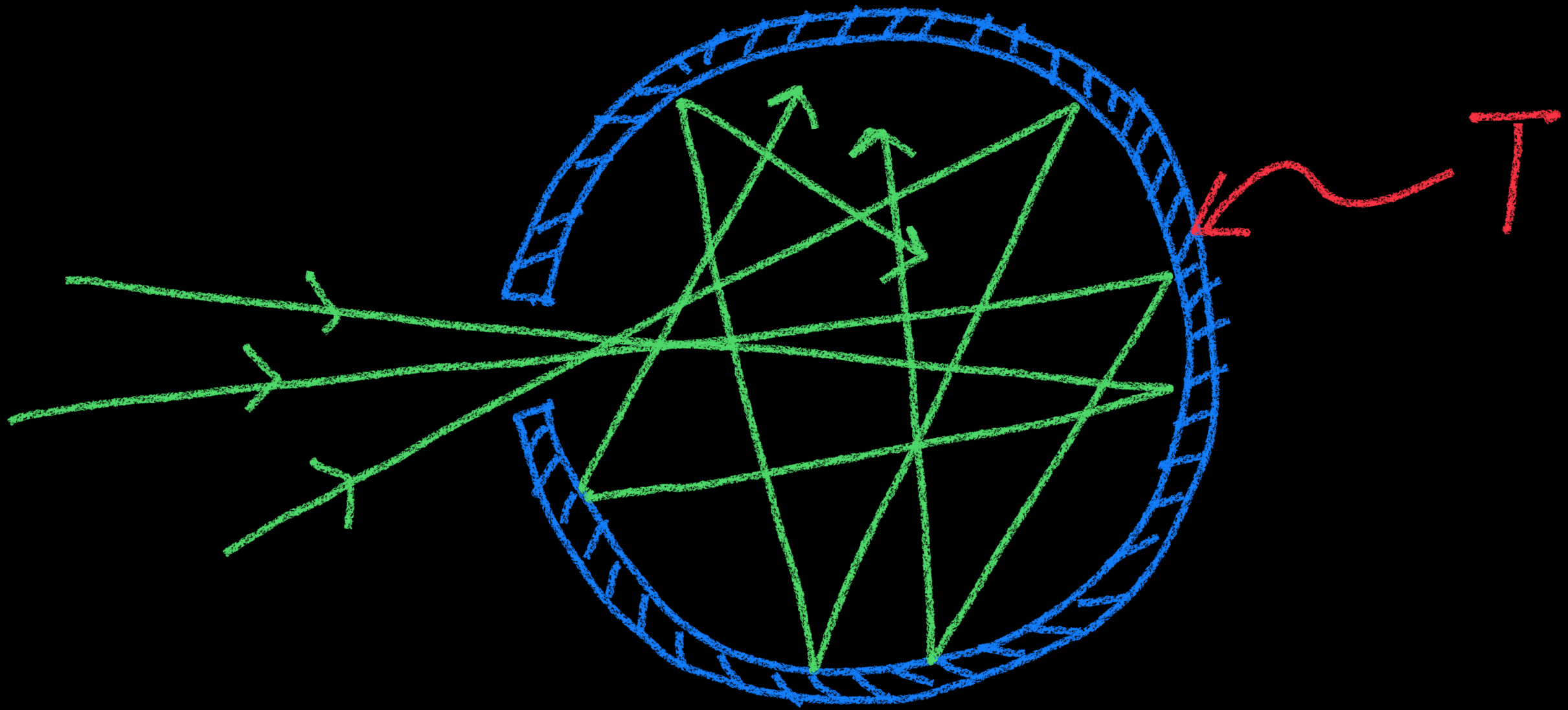
(Newton)

J.C. Maxwell

Lo spettro della radiazione elettromagnetica

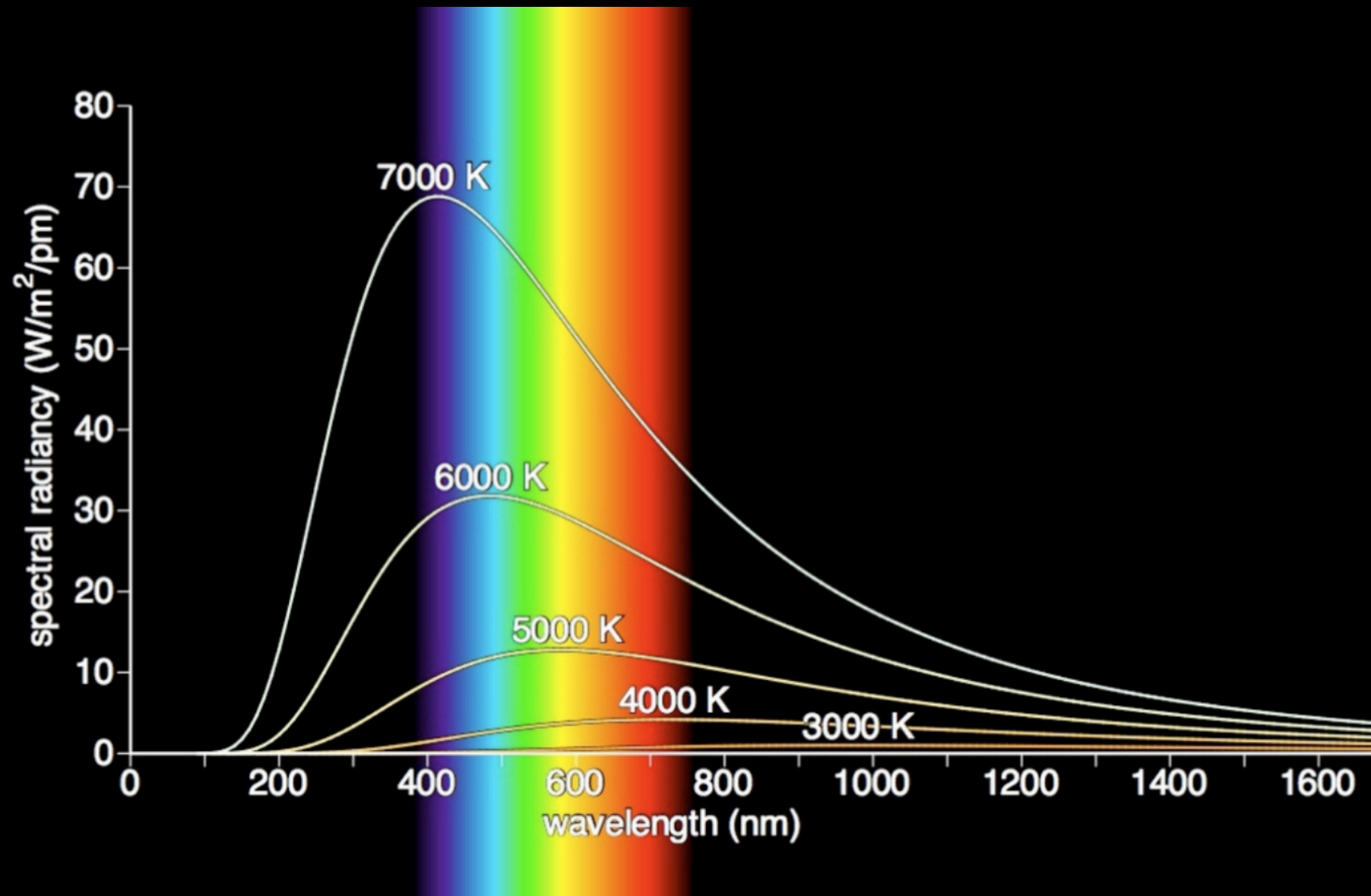


Lo spettro della radiazione elettromagnetica



CORPO NERO

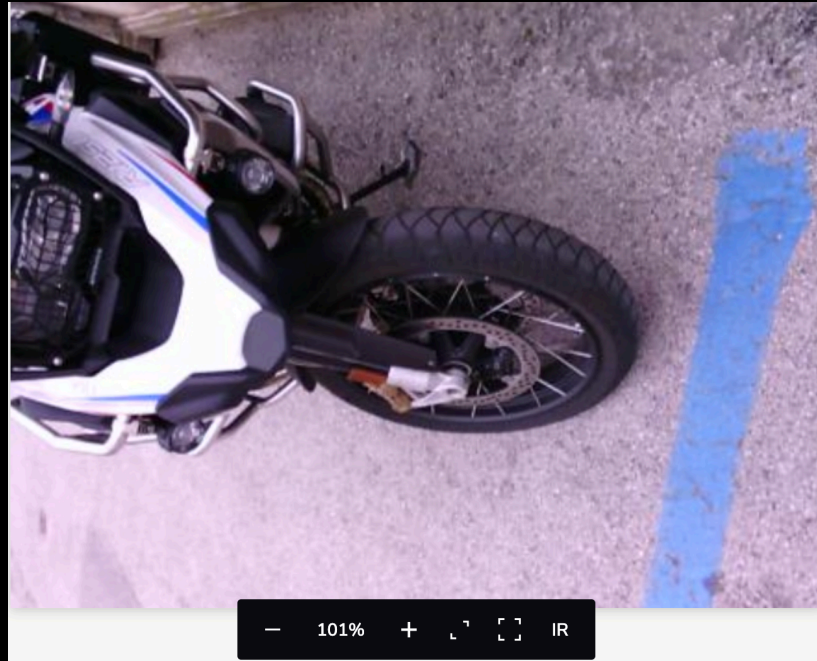
Lo spettro della radiazione elettromagnetica



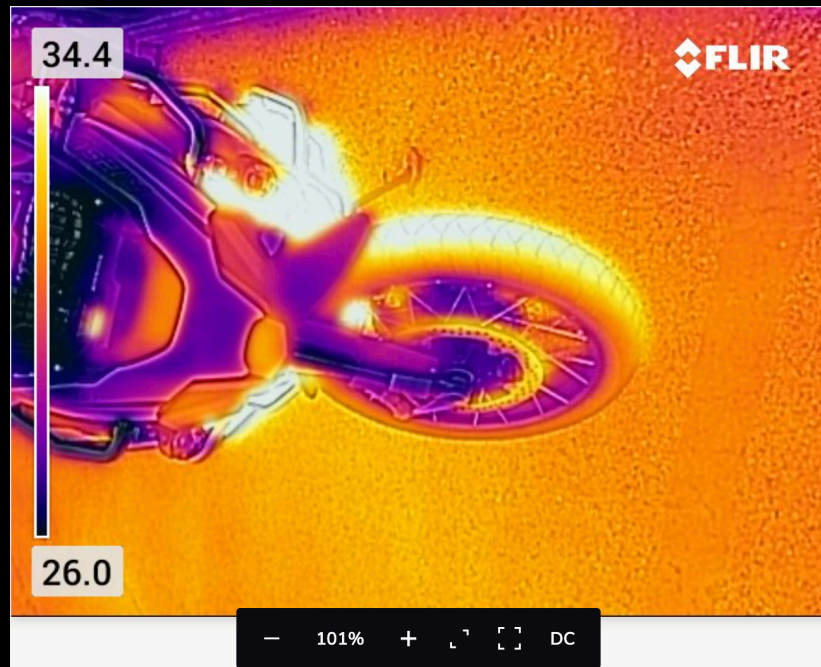
$$I = \sigma T^4$$

$$\lambda T = c_w$$

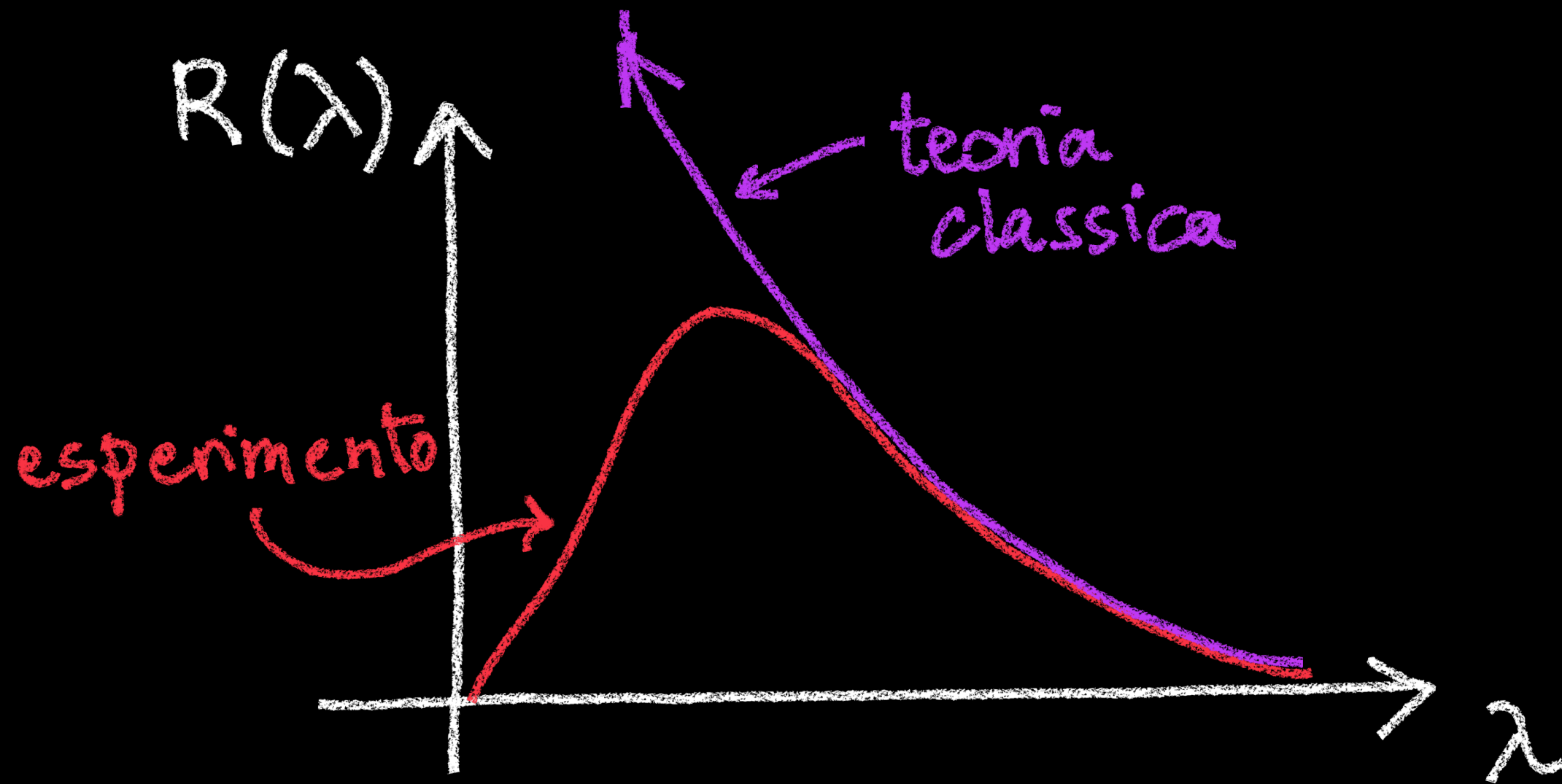
Lo spettro della radiazione elettromagnetica



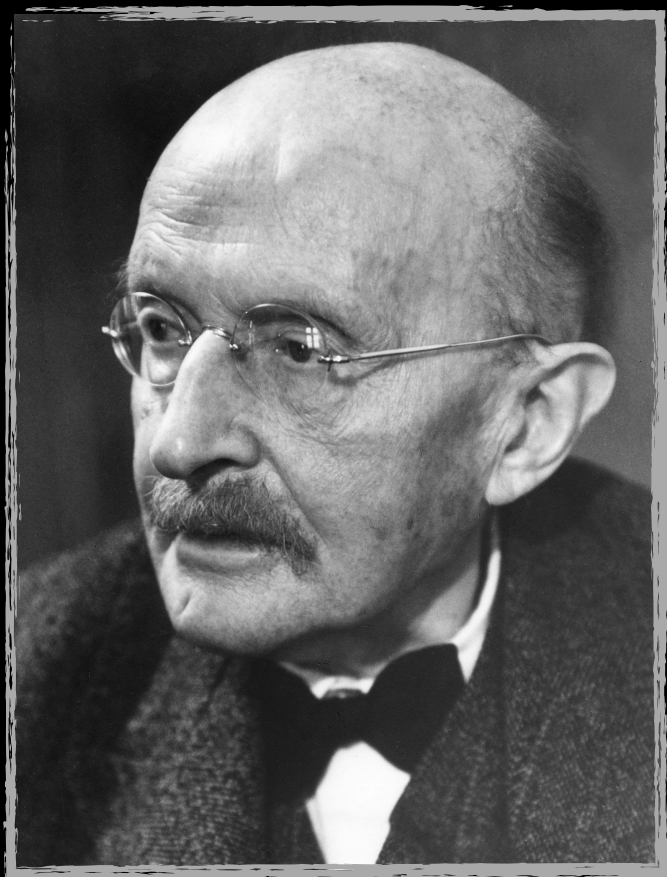
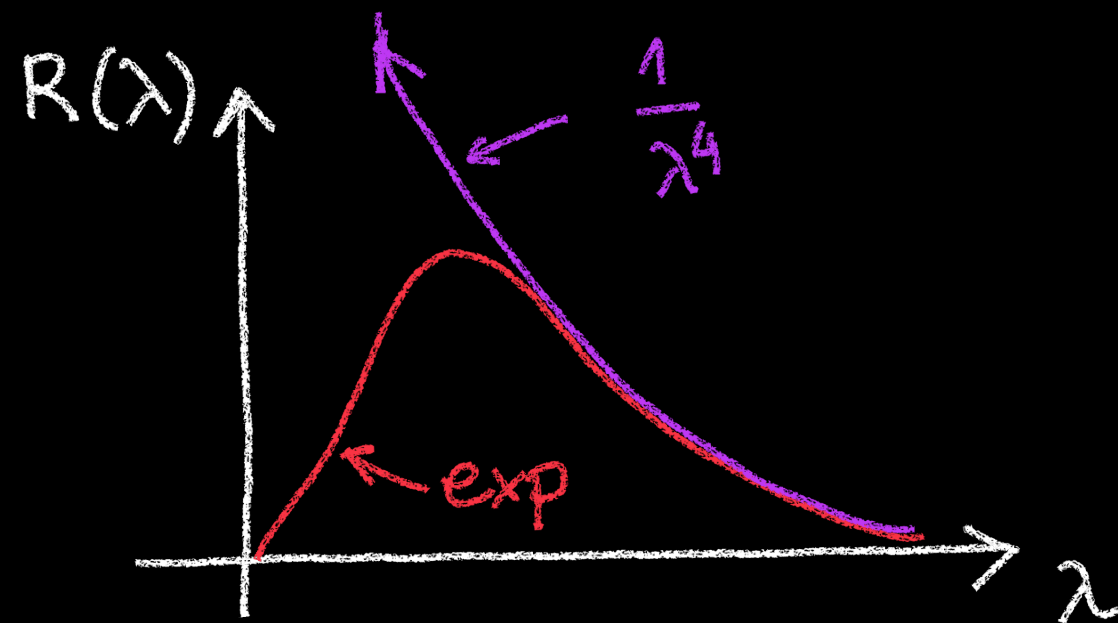
Lo spettro della radiazione elettromagnetica



La CATASTROFE ULTRAVIOLETTA



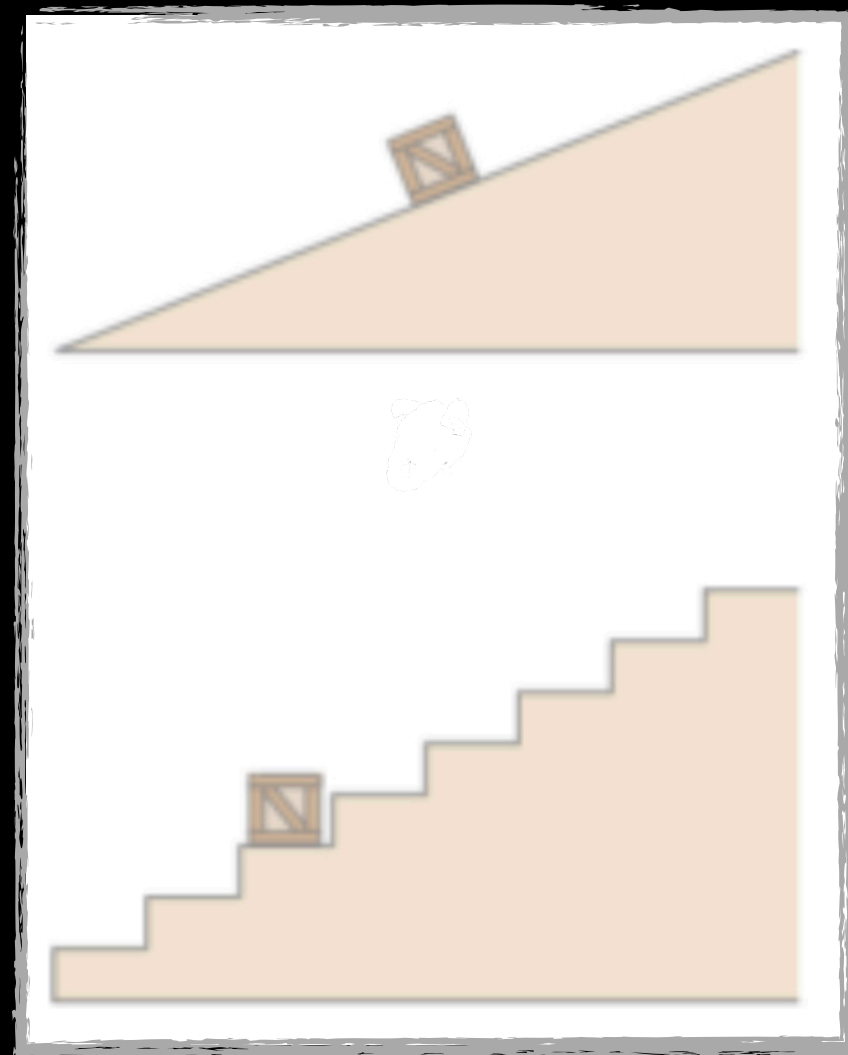
La CATASTROFE ULTRAVIOLETTA



M. Planck

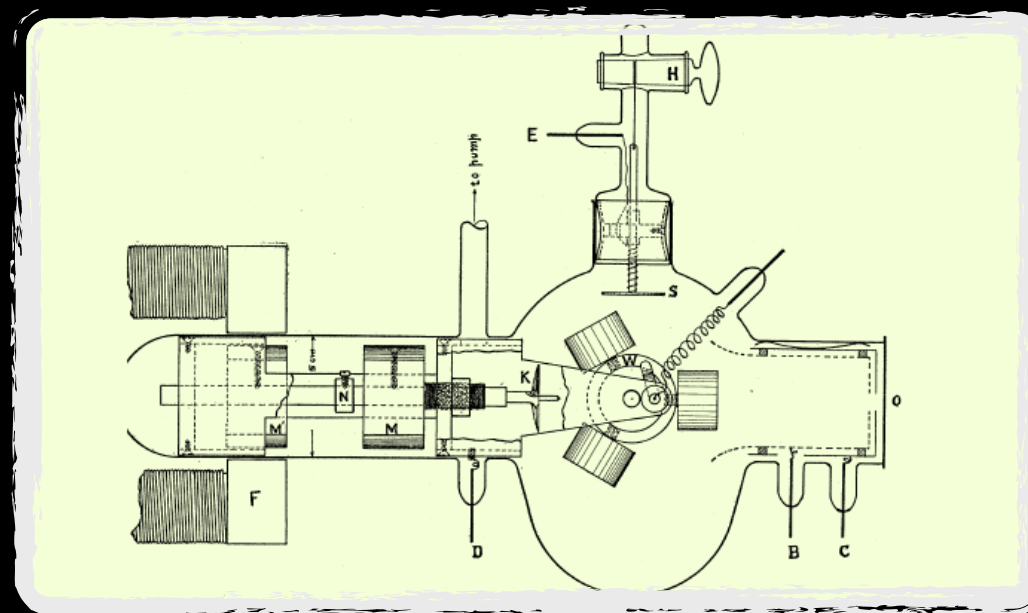
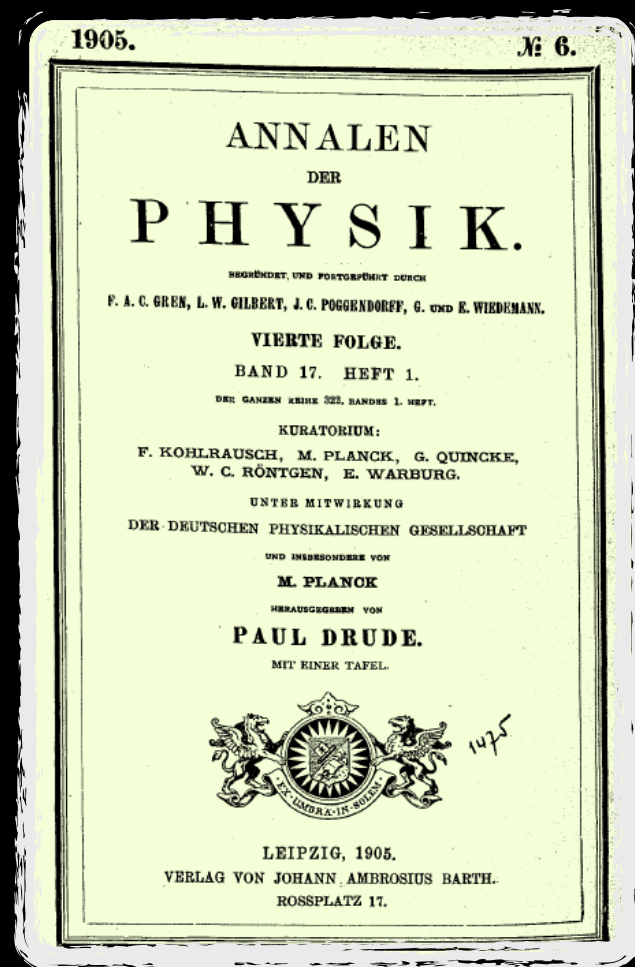
1900

$$E = h\nu$$



$$h \approx 6.6 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

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



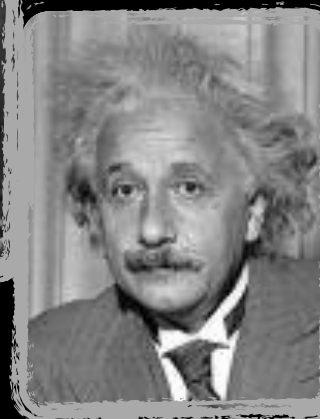
JJT



PL



MP

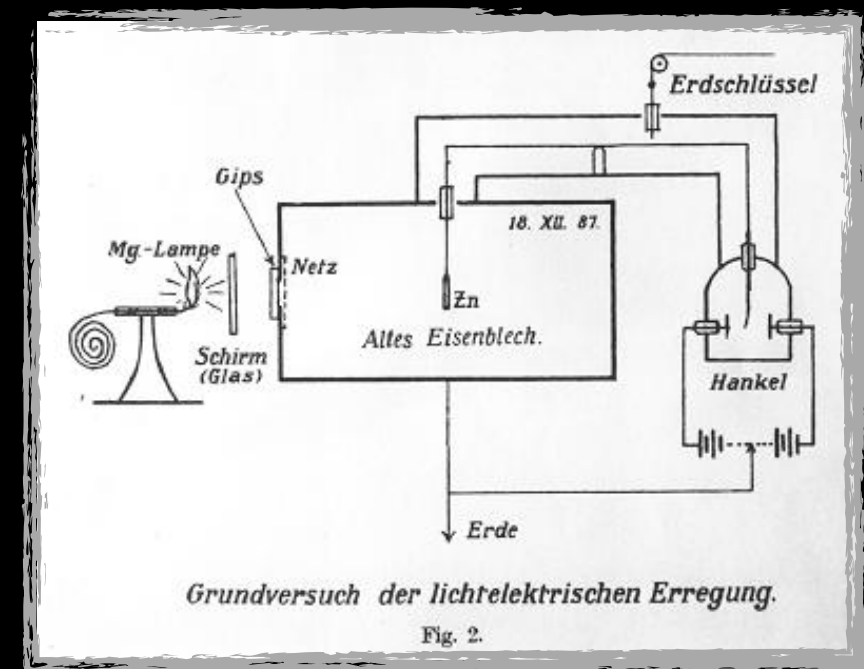
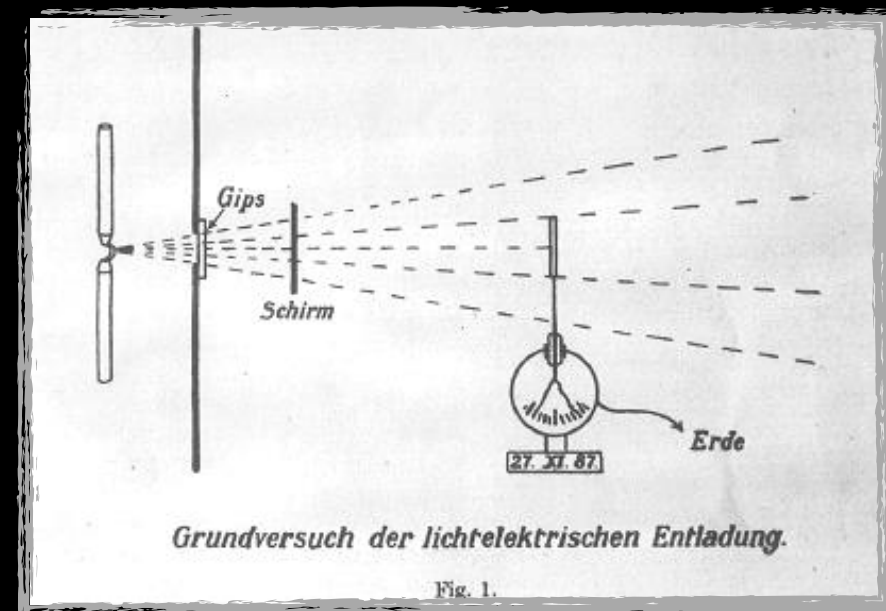
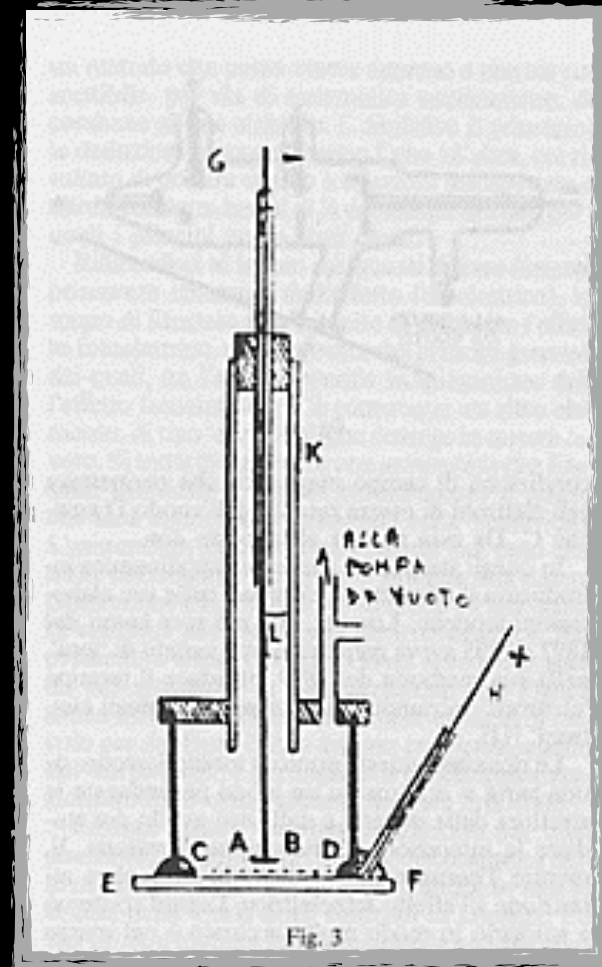
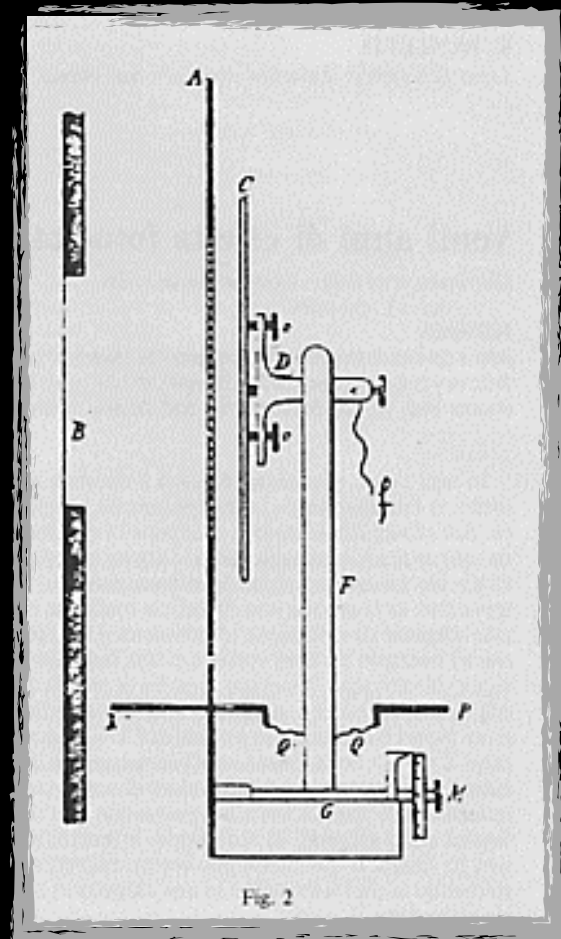


AE



RM

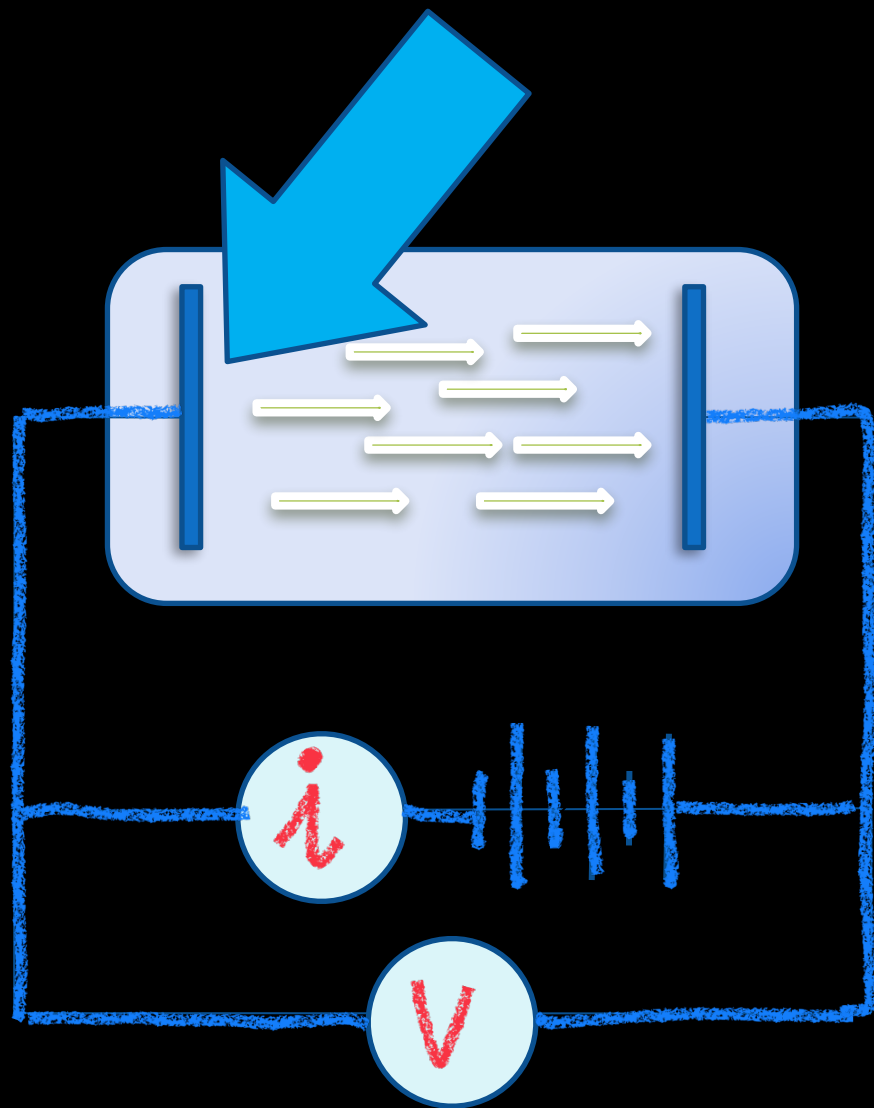
Effetto fotoelettrico



Vecchi esperimenti

Effetto fotoelettrico

→ Risultati attesi

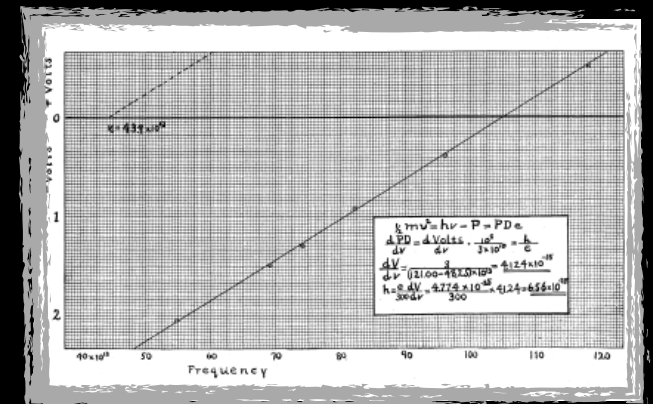
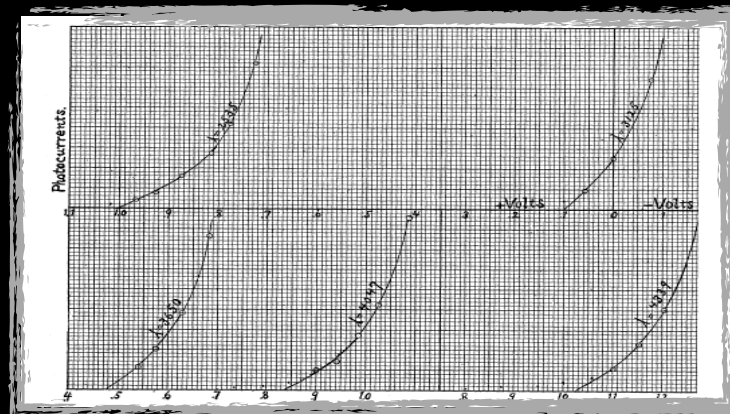
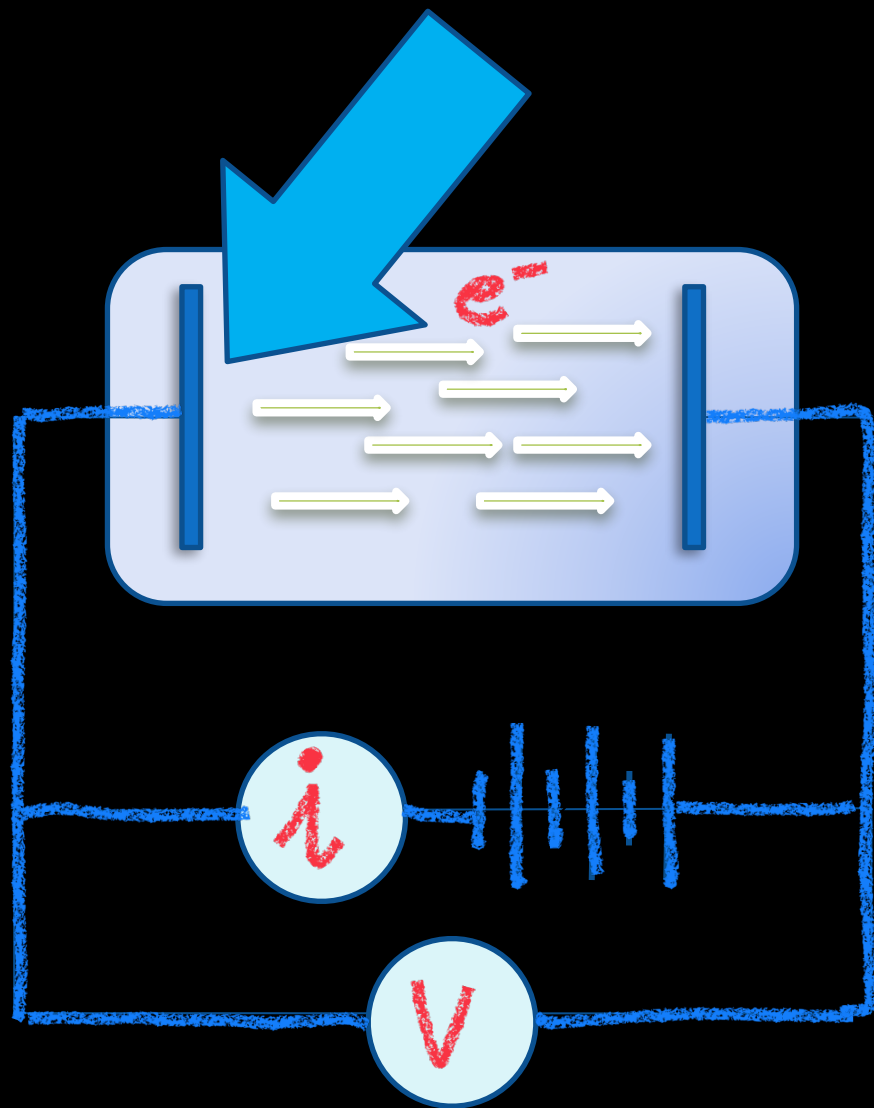


- L'energia degli elettroni deve crescere con l'intensità della luce
- L'energia non può dipendere dal colore della luce
- Bisogna aspettare del tempo per iniziare

Effetto fotoelettrico

→ Risultati sperimentali

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



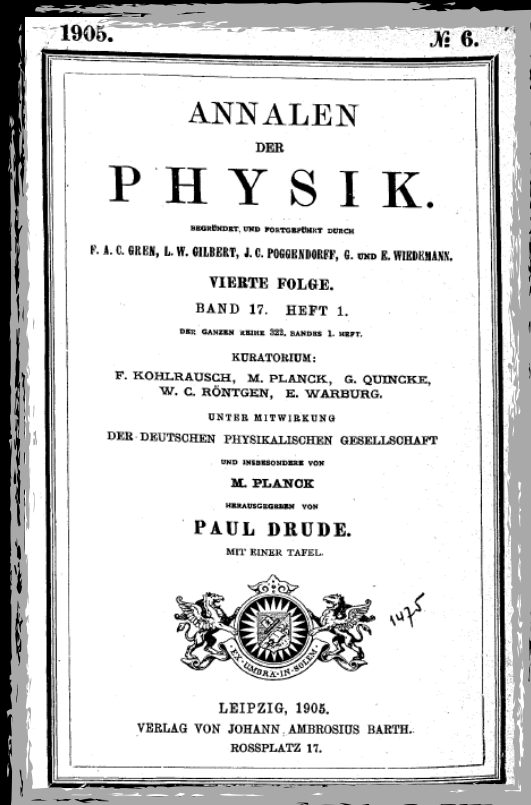
Effetto fotoelettrico

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, $E=hf$
- l'elettrone, dopo avere superato la barriera di potenziale elettrico di estrazione dal metallo, W , viene espulso

$$E_{k,max} = hf - W$$

Effetto fotoelettrico



132

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 Ge-

lassen. Die kinetische Energie solcher Elektronen ist

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

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

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

wobei ϵ die elektrische Masse des Elektrons bedeutet, oder

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

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

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 $P' = 0$, $\nu = 1,03 \cdot 10^{15}$ (entsprechend der Grenze des Sonnenspektrums nach dem Ultraviolett 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.²⁾

Cos'è la luce?

non

onda

(Huygens)

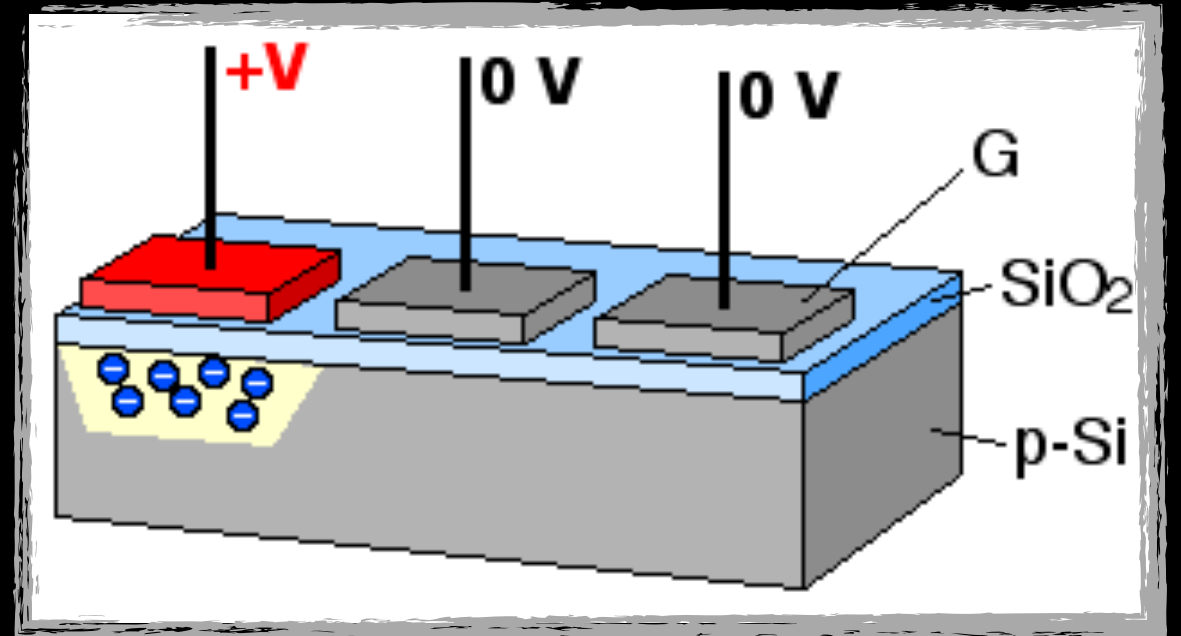
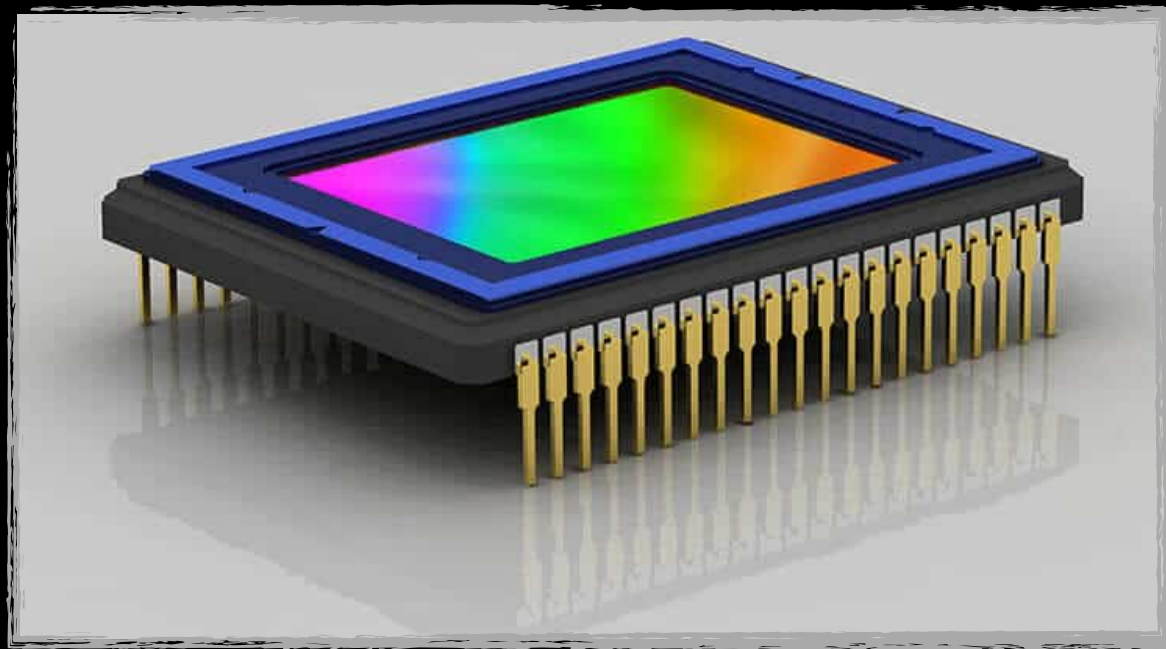
non

particella

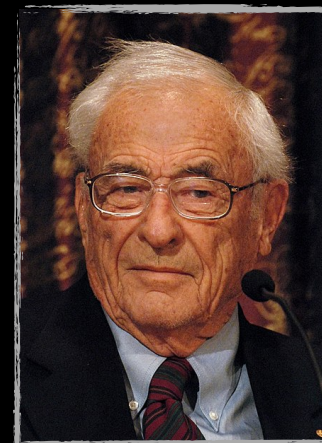
(Newton)

COMPLEMENTARIETÀ

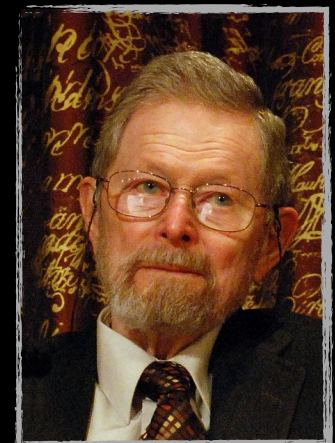
Charged Coupled Device



CCD



Boyle



Smith