

Il Mondo Microscopico: Atomi e Elettroni

L. Martina
15/01/2015

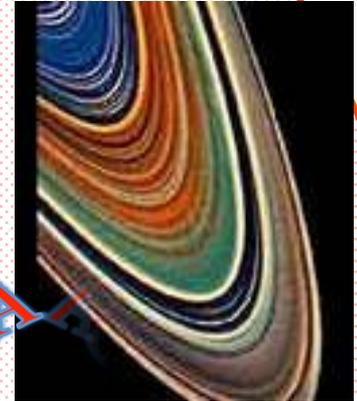
*Dipartimento di Fisica
Università del Salento
Sezione INFN - Lecce*

La Radiazione esplora la Materia

Perché malleabile e conduttore?



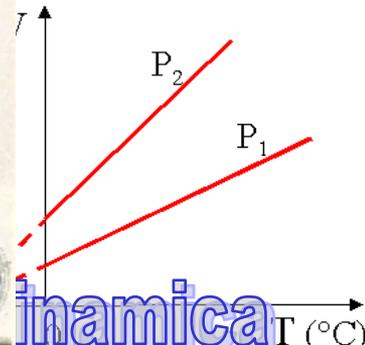
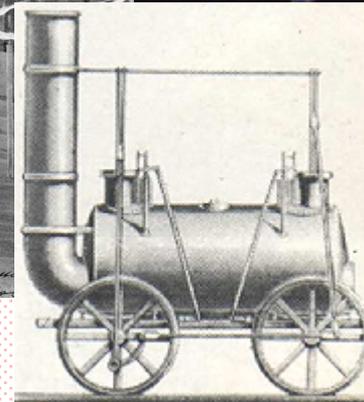
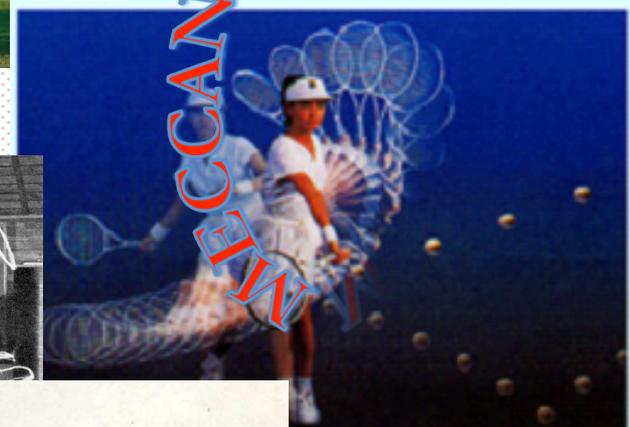
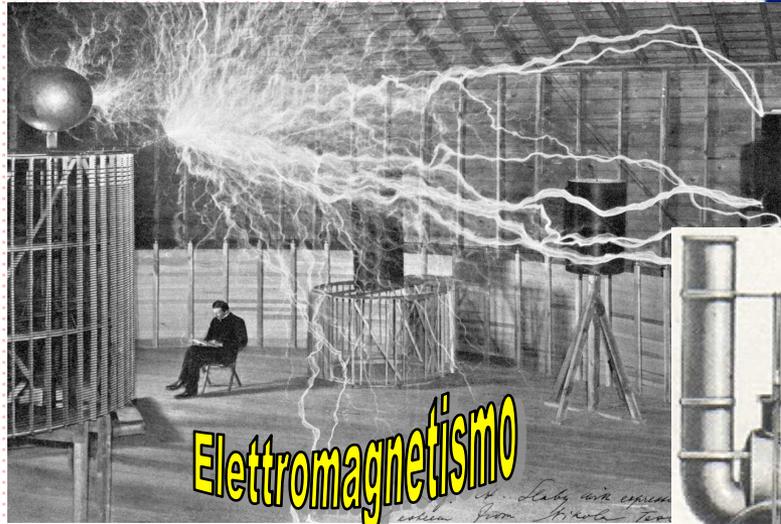
Come si trasforma la luce in forza vitale?



Perché duro trasparente e isolante?

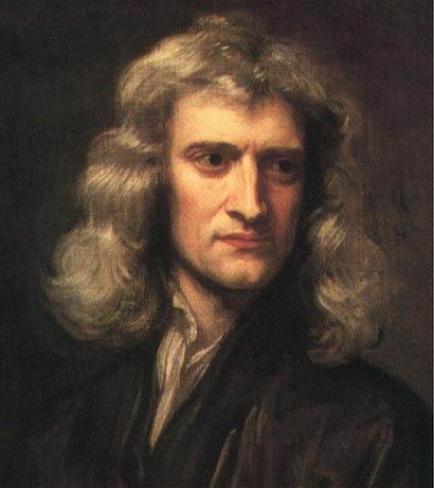


Quale l'origine della sua energia?

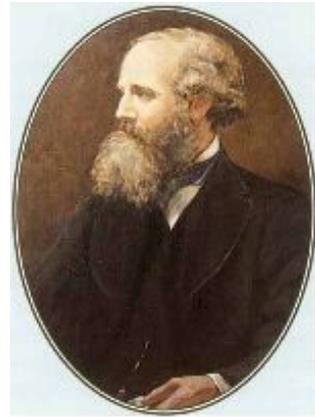


inamica T (°C)

MECCANICA



Newton vs Maxwell



Materia - Corpuscoli

Radiazione - Campi

James Clerk Maxwell
1831 - 1879

1. Ogni corpo preserva lo stato di quiete o di moto rettilineo uniforme, a meno che non sia costretto a cambiarlo a causa di **FORZE** ad esso impresse (**principio d'inerzia**)

2. Il cambiamento dello stato di moto è proporzionale alla forza impressa lungo la linea retta di applicazione

$$\vec{F} = m \vec{a}$$

3. Le forze che due particelle esercitano reciprocamente l'una sull'altra sono uguali in intensità e opposte in verso

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$$

1. Legge di Gauss

$$\Phi_{S_{chiusa}}(\vec{E}) = \frac{Q_{Tot. \text{ in } S_{chiusa}}}{\epsilon_0}$$

2. Assenza di Cariche Magnetiche

$$\Phi_{S_{chiusa}}(\vec{B}) = 0$$

3. Legge dell' Induzione EM

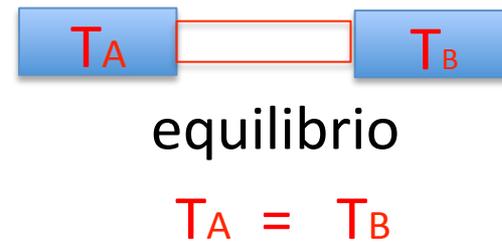
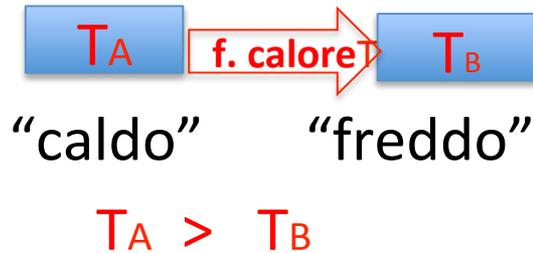
$$\oint_{\gamma_1} \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{d\Phi_{S_{\gamma_1}}(\vec{B})}{dt}$$

4. Legge di Ampère - Maxwell

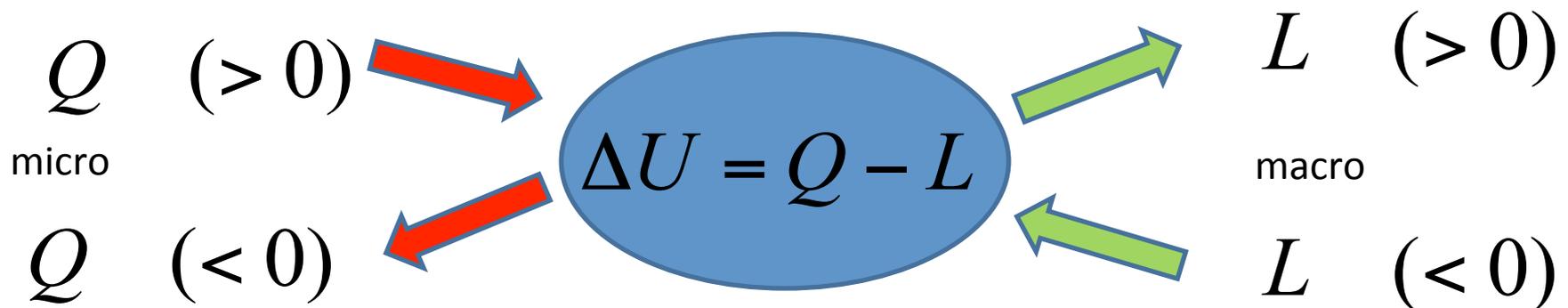
$$\oint_{\gamma_2} \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_{S_{\gamma_2}} + \epsilon_0 \frac{d\Phi_{S_{\gamma_2}}(\vec{E})}{dt}$$

Termodinamica - 1

- Lavoro, Calore, Temperatura

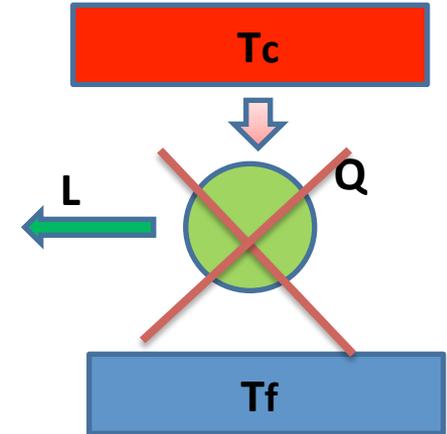


- **Principio "0"**: *se i corpi A e B sono entrambi in equilibrio termico con un terzo corpo C, allora lo sono anche fra loro.*
- **Primo principio** ([conservazione dell'energia](#)): *la variazione di energia interna di un sistema è la somma algebrica del calore e del lavoro scambiati con l'ambiente*

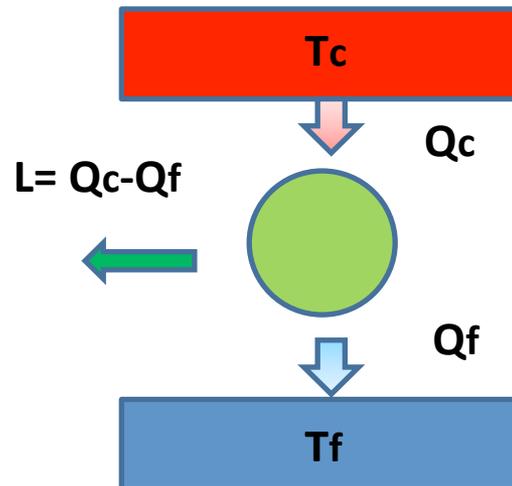
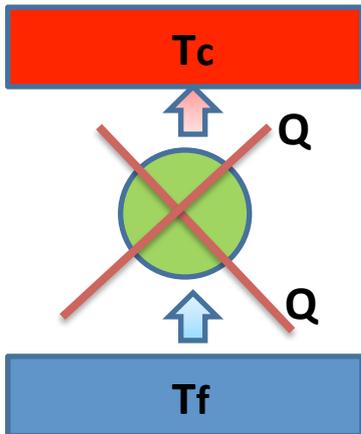


Termodinamica - 2

- **Secondo Principio:** *in un ciclo termodinamico (Kelvin - Planck) e' impossibile convertire completamente in lavoro il calore assorbito dal serbatoio "caldo"*



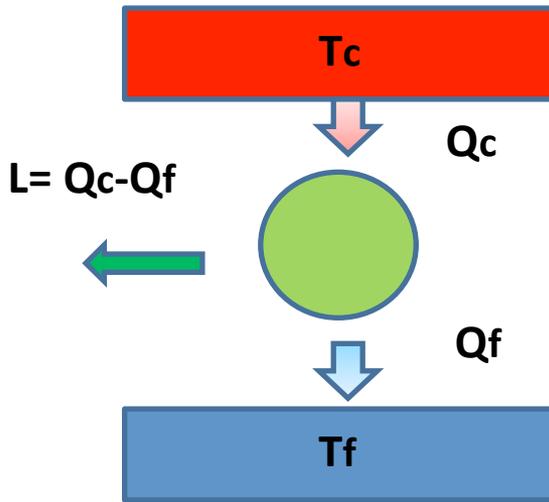
(Clausius) *e' impossibile far passare **spontaneamente** il calore dal serbatoio "freddo" a quello "caldo"*



$$\eta = \frac{L}{Q_c} = 1 - \frac{Q_f}{Q_c}$$

Rendimento di una macchina termica

ENTROPIA



Ciclo di Carnot Tr. reversibile

$$\eta = 1 - \frac{Q_f}{Q_c} \leq \eta_C = 1 - \frac{T_f}{T_c}$$

$$\frac{-Q_f}{T_f} + \frac{Q_c}{T_c} \begin{cases} < 0 \\ = 0 \text{ Tr. reversibile} \end{cases}$$

$$\oint_{\text{ciclo}} \frac{\delta Q}{T} \leq 0$$

$$\int_A^B \frac{\delta Q}{T} \leq \int_{A_{\text{reversibile}}}^B \frac{\delta Q}{T} = S(B) - S(A)$$

ENTROPIA

$$S(B) \geq S(A)$$

nei sistemi isolati l'**entropia** è una funzione **non decrescente** delle variabili di stato

Freccia del TEMPO

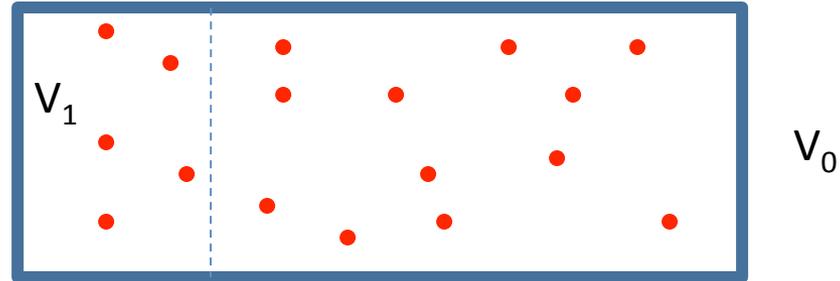
L'ipotesi Atomistica

- [D. Bernoulli](#) (1738) teoria cinetica dei gas,
- [J. Dalton](#) (*New System of Chemical Philosophy*, 1808), legge delle proporzioni multiple, principi elementari, atomi della stessa specie (molecole),
- [J.-L. Gay-Lussac](#) (1809), legge sui volumi di combinazione dei gas,
- [A. Avogadro](#) (1811):
 - 1) *I gas sono formati da molecole integranti, costituite a loro volta da una, due o più molecole elementari: gli atomi*
 - 2) *a temperatura, volume e pressione uguali, gas diversi contengono lo stesso **numero** di molecole*

1. Congr. dei Chimici, Karlsruhe (1860) : definizione di molecola e di atomo
2. J.C. Maxwell: *“Benché nel corso dei tempi si siano verificate catastrofi ... le molecole... continuano ad esistere oggi esattamente come vennero create: perfette in numero, misura e peso “* (1873)
3. W. Thomson: *“ E’ un fatto assodato che un gas consista di molecole in movimento Il diametro di una molecola di gas non puo’ essere inferiore a 2×10^{-9} cm .”* (1870)
4. L. Boltzmann : *“...dare una dimostrazione del tutto generale della II legge della teoria del calore, come scoprire il teorema meccanico ad essa corrispondente.”* (1866)
5. L. Boltzmann : *“I problemi della teoria meccanica del calore sono ... problemi di teoria della probabilità .”* (1871)
6. M. Planck : *“ La piena validita’ del II principio ... e’ incompatibile con l’ipotesi di atomi finiti”* (1883)
7. W. Ostwald: *“ L’asserzione che tutti i fenomeni ... sono riducibili a fenomeni meccanici ...e’ sbagliata. Tutte le equazioni della meccanica ammettono l’inversione temporale ... Quindi ... un albero potrebbe diventare di nuovo germoglio e seme, una farfalla bruco e un vecchio bambino. ”*
8. E. Mach : *“ Non e’ confacente alla fisica considerare mutevoli strumenti , quali molecole e atomi, alla stregua di realtà sottostanti ai fenomeni.”* (1895)

Termodinamica e Statistica

Gas ideale costituito da N molecole all'equilibrio termico



Probabilità per la singola molecola di trovarsi in V_1

$$p = \frac{V_1}{V_0}, \quad q = \frac{V_0 - V_1}{V_0}$$

Probabilità per n molecole di trovarsi in V_1 e $N-n$ in $V_0 - V_1$

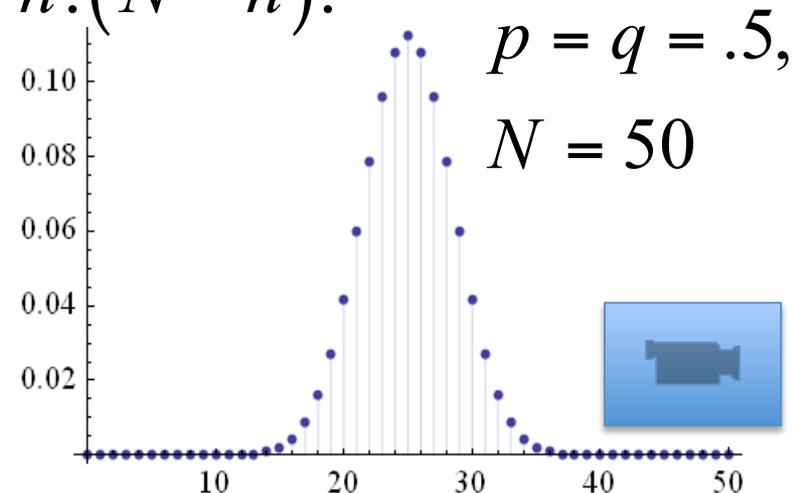
$$P(n) = \frac{N!}{n!(N-n)!} p^n q^{N-n}$$

Il sistema **tende** al macrostato di massima entropia, cioè a quello che possiede il numero massimo di microstati

Principio di Boltzmann

Funz. ENTROPIA

$$S = k \ln P + c$$

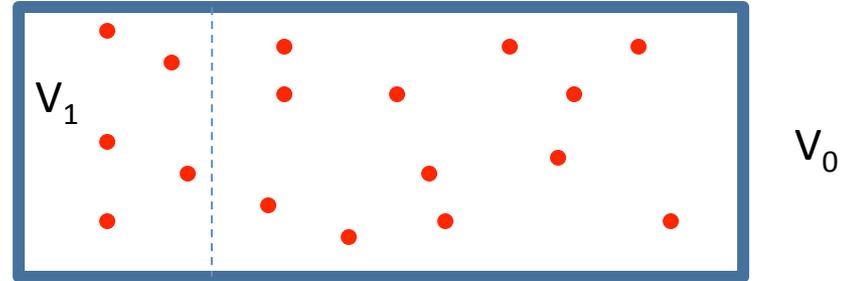


Espansione Libera

Stato iniziale : N molecole in $V_0 - V_1$,
0 molecole in V_1

Stato finale : N molecole in V_0

Lavoro compiuto $L=0$, Calore fornito $Q=0$



$$p = \frac{V_1}{V_0}, \quad q = \frac{V_0 - V_1}{V_0}$$

$$\Delta S = S_{fin} - S_{in} = k \ln \frac{P(n_{eq})}{P(n=0)}$$

$$P(n_{eq}) = \frac{N!}{(Np)!(Nq)!} p^{Np} q^{Nq}$$

$$P(n=0) = \frac{N!}{N!} q^N$$

Formula di Stirling $\ln x! = x \ln x - x$

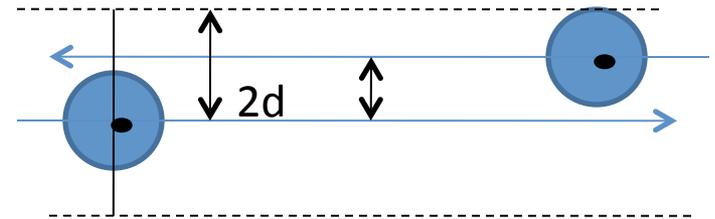
$$\Delta S = S_{fin} - S_{in} = k N \ln \frac{V_0}{V_0 - V_1} + \text{corr} \approx n R \ln \frac{V_{fin}}{V_{in}} \quad R = N_A k$$

0 usando la costanza dell'energia interna

Misurare gli atomi

J. Loschmidt (1866)

Diametro
molecolare
effettivo



Cammino libero medio $\rightarrow \lambda n \pi d^2 = 3/4$

Costante di Loschmidt
Numero di molecole
per unità di volume

$$\frac{n \pi d^3}{6} = \alpha \frac{\rho_{gas}}{\rho_{liq}}$$

$$n = \frac{\alpha}{\lambda^3} \left(\frac{\rho_{gas}}{\rho_{liq}} \right)^2$$

$$n = 2.69 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$$

$$d \sim 10^{-8} \text{ cm}$$

$$n = N_A p_0 / (RT_0)$$

Molecole e Moto Browniano

mod

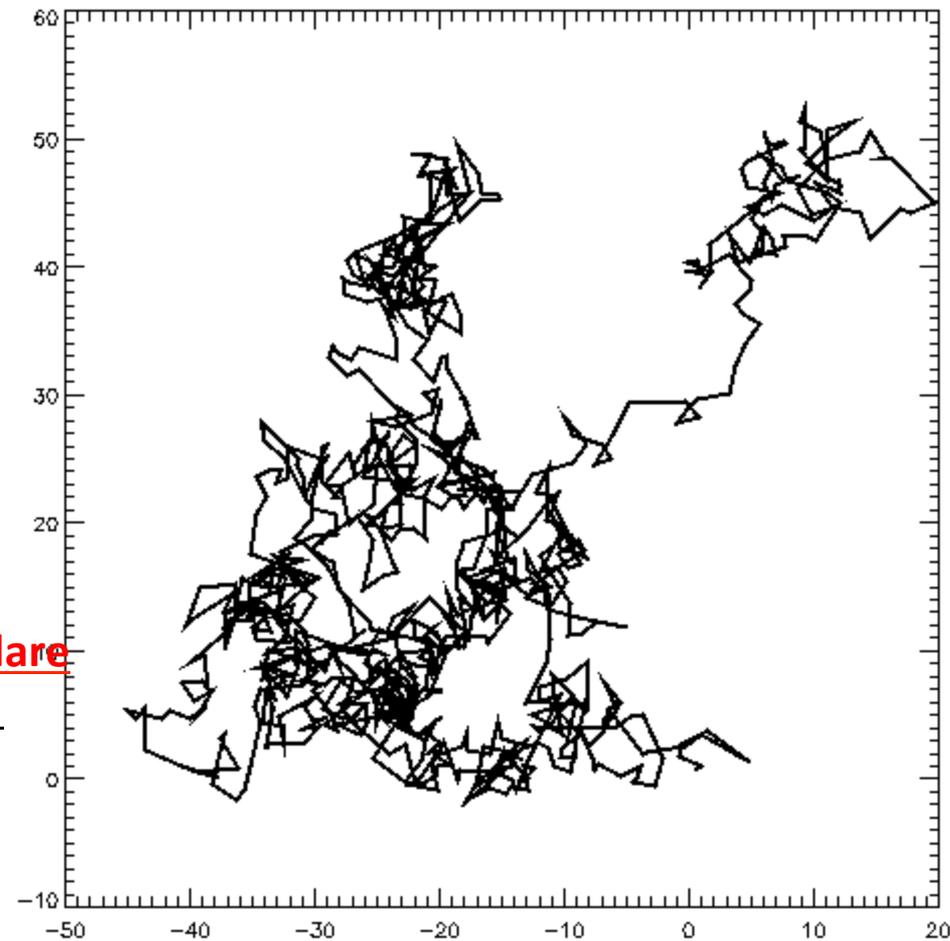
Milk

In questo articolo dovremo mostrare che, ..., particelle di dimensioni visibili al microscopio sospese in un fluido, **in seguito al moto molecolare del calore** possono descrivere moti osservabili.

A. Einstein, *Ann. d. Phys.*, 17 (1905) 549

$$D = \frac{RT}{N_A} \frac{1}{6\pi\eta d}$$

N_A = Numero di Avogadro
 d = raggio della particella
 η = coeff. di viscosita'



$$D = \frac{1}{2} \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\langle \vec{r}^2(t) \rangle}{t}$$

Coefficiente di diffusione

Interpretazione di Einstein

1. Le particelle sospese sono sfere e sono rarefatte nel solvente
2. Per le particelle in sospensione all'equilibrio termico valgono le leggi per di 't Hoff delle soluzioni (gas):
$$p V = n R T$$
3. Le particelle sospese sono grandi rispetto alle caratteristiche del solvente (continuo)
4. Si trascurano i moti rotatori delle sfere
5. Le particelle sospese sono soggette ad una forza di attrito di tipo viscoso dovuto al fluido con coefficiente di **viscosita' corretto**

sperimentale $\rightarrow \eta^* / \eta = 1 + \frac{5}{2} \varphi, \quad \varphi = \frac{N_A \rho}{m} \frac{4\pi}{3} d^3$ Frazione di volume occupato dalle sfere



Forza / (unita' di volume)

$$F = \frac{K \rho N_A}{m}$$

All'equilibrio termico

$$\frac{K \rho N_A}{m} = \frac{dp}{dx} = \frac{RT}{m} \frac{d\rho}{dx}$$

Legge di Stokes
per l'attrito viscoso

$$F_{visc} = 6\pi\eta d v$$

All'equilibrio dinamico

$$F_{visc} \equiv K \Rightarrow v = \frac{K}{6\pi\eta d}$$

Flusso di sfere
nella direzione -x $\frac{N_A \rho}{m} v$ $\xrightarrow{\text{blue}}$ Diffusione
nella direzione +x $D \frac{N_A}{m} \frac{d\rho}{dx}$

Coefficiente di diffusione
(sperimentale)

$$D = \frac{RT}{N_A} \frac{1}{6\pi\eta d}$$

Gradiente
di concentrazione

Realta' delle molecole



J. Perrin: Nobel 1926

N_A

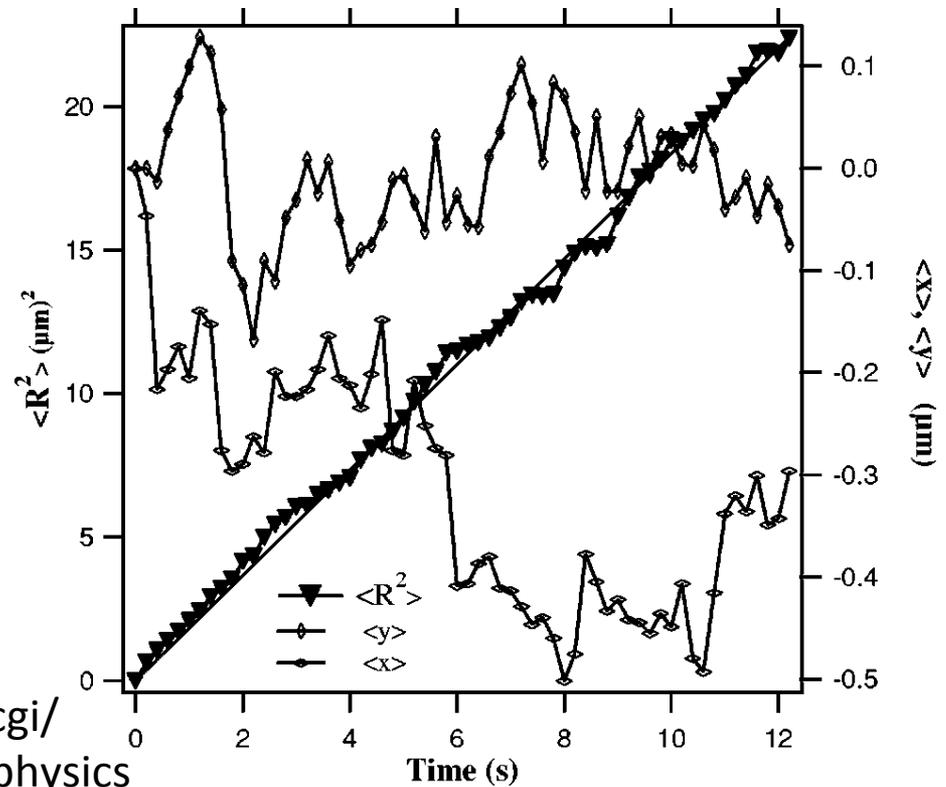
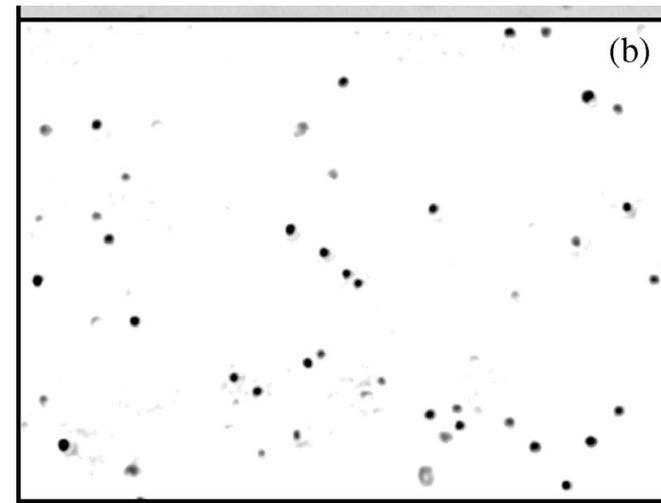
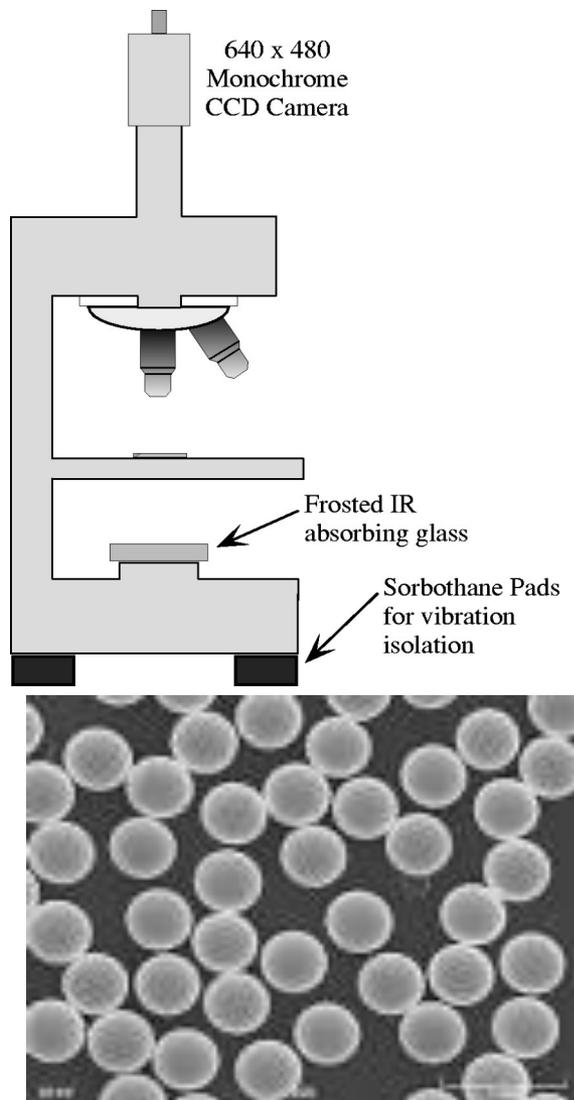
68×10^{22}	per mezzo di emulsioni analoghe a gas;
62×10^{22}	“ emulsioni analoghe a liquidi;
60×10^{22}	“ fluttuazioni emulsioni concentrate;
64×10^{22}	“ moto Browniano traslazionale;
65×10^{22}	“ moto Browniano rotazionale;
75×10^{22}	“ opalescenza critica;
65×10^{22}	“ azzurro del cielo;
64×10^{22}	“ radiazione di corpo nero;
61×10^{22}	“ goccioline ionizzate secondo Millikan;
62×10^{22}	“ decadimento radioattivo

“La teoria atomica ha trionfato. Ancora poco tempo fa assai numerosi, i suoi avversari, infine conquistati, rinunciano uno dopo l'altro a sfide che furono a lungo legittime e senz'altro utili” J. Perrin “Les Atomes”, (Paris, 1913)

Fundamental Physical Constants

$N_A = 6.022\ 141\ 79 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

$$l_{\text{atomo}} \approx \sqrt[3]{\frac{M_{\text{atomo}}}{N_A \delta_{\text{atomo}}}} \approx 10^{-10} \text{ m} = 1 \text{ \AA}$$

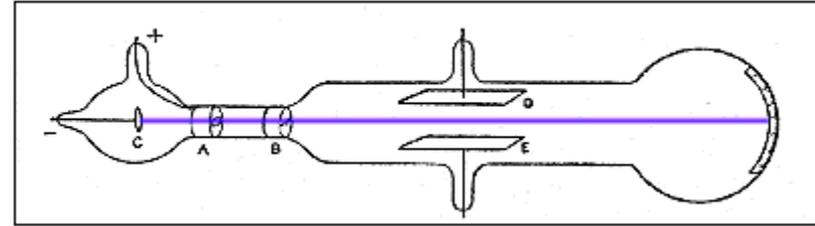
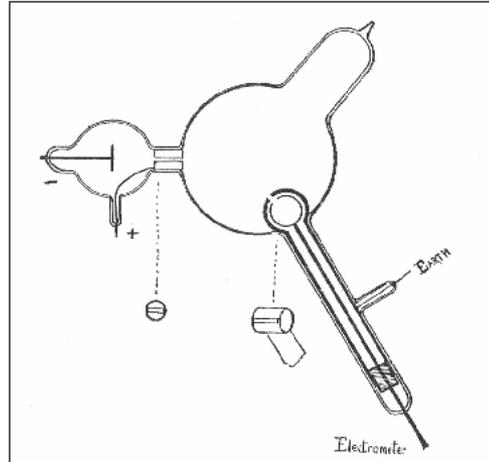


<http://digitalcommons.usm.maine.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1000&context=physics>

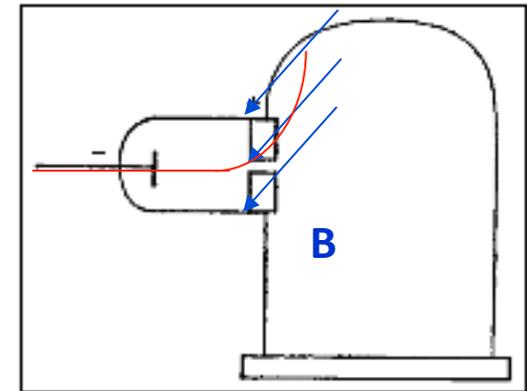
Fig. 4. Mean square displacement for 107 polystyrene spheres of diameter



La scoperta dell'elettrone



$$\frac{e}{m} = \frac{2V}{B^2 r^2}$$



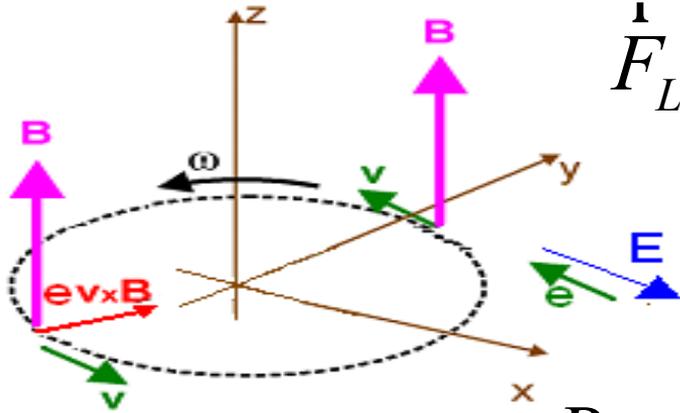
"We have in the cathode rays matter in a new state, a state in which the subdivision of matter is carried very much further than in the ordinary gaseous state: a state in which all matter... is of one and the same kind; this matter being the substance from which all the chemical elements are built up."

(J.J. Thomson, "Cathode Rays," The London Phil. Mag. J. Science, V, Oct.1897)

$$\frac{e}{m} = -1.758\,820\,12(15) \times 10^{11} \text{ C kg}^{-1}$$

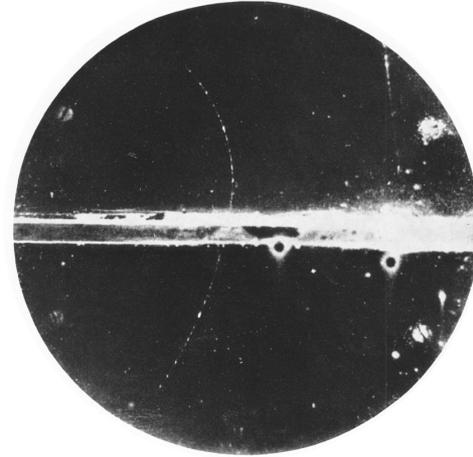
La carica dell'elettrone

$$\vec{F}_{Lorentz} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}$$

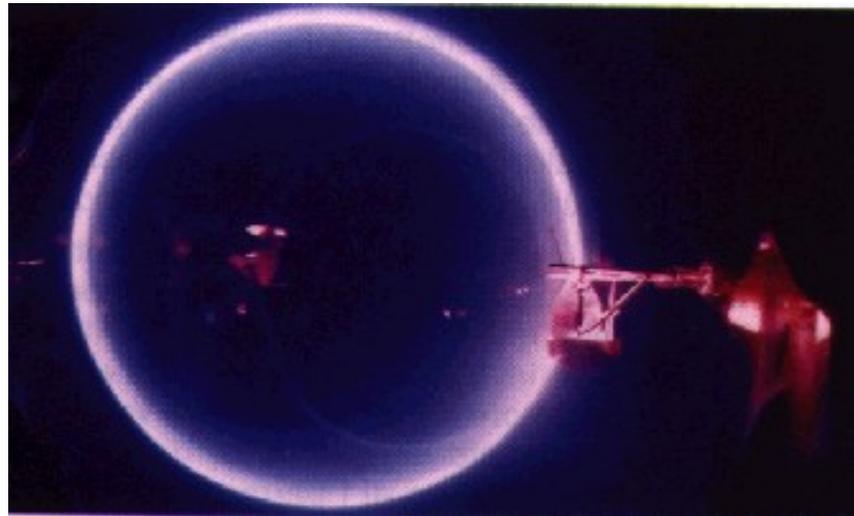


$$evB = \frac{mv^2}{r} \quad \frac{mv^2}{2} = eV$$

$$\frac{e}{m} = \frac{2V}{B^2 r^2}$$



tubo di Wehnelt
bobine di Helmholtz , alimentatori, voltimetri, amperometro
cavetti di collegamento



Esercizio:

Un elettrone viene accelerato da una ddp $V = 10^4$ Volt
e poi sottoposto all'azione di un campo magnetico di intensità $B = 1.00$ Tesla.
Trovare il raggio di curvatura della traiettoria.

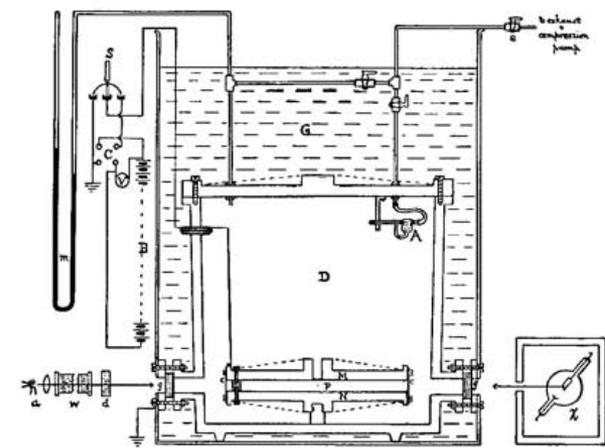
$$r = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2V}{e/m}} \approx 1.00 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 10^4}{1.758 \cdot 10^{11}}} = 3.37 \text{ m}$$



L'esperienza di Millikan

$$e = 1.602\,176\,53(14) \times 10^{-19} \text{ C}$$

The NIST Reference on Constants, Units, and Uncertainty



$$F_{visc} = 6\pi r\eta v \text{ velocità limite } v,$$

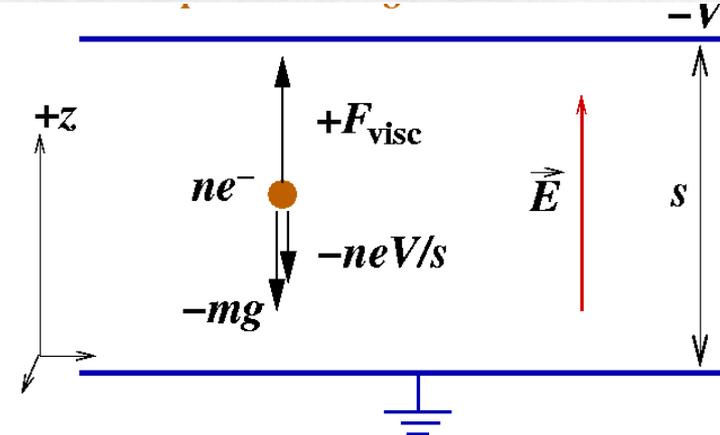
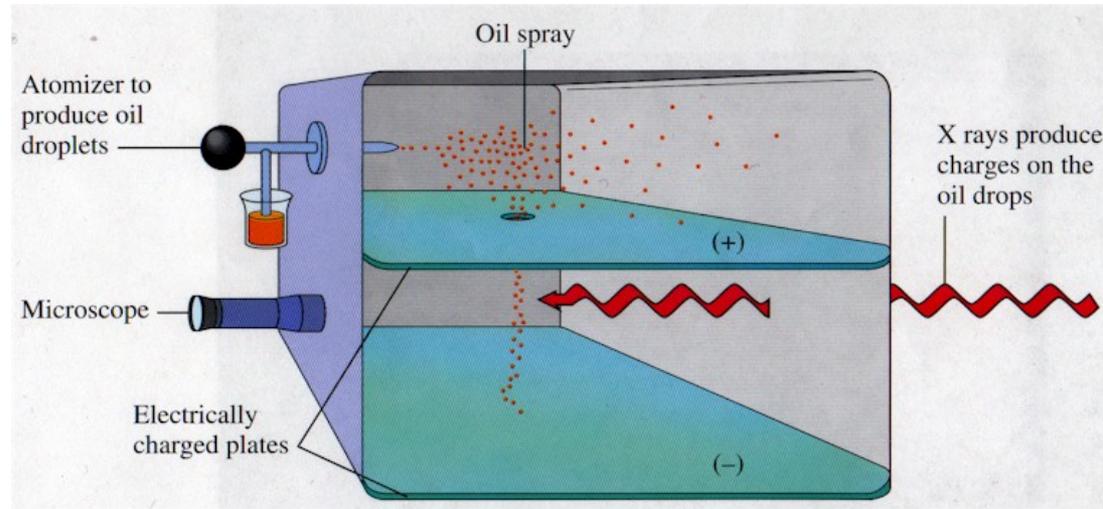
$$\frac{4}{3}\pi r^3 \rho g = 6\pi r\eta v$$

$$r = \sqrt{\frac{9\eta v}{2\rho g}}$$

$$qE = mg$$

$$E = \frac{V}{d}$$

$$q = \frac{18\pi d}{V} \sqrt{\frac{\eta^3 v^3}{2\rho g}}$$



<http://www.aip.org/history/gap/Millikan/Millikan.html>