

*Dottorato in Storia e didattica delle matematiche,  
della fisica e della chimica  
Palermo, 03/12/2009*

# ***RELAZIONE SULL'AVANZAMENTO DEL PROGETTO DI DOTTORATO***

*Onofrio R. Battaglia*

# RILEVANZA DEL RAGIONAMENTO STATISTICO/PROBABILISTICO

Elementi di probabilità e statistica sono argomenti dei nuovi programmi di Matematica per le scuole superiori. Si tratta di argomenti spesso isolati e trascurati rispetto ai restanti argomenti più tradizionali.

# RILEVANZA DEL RAGIONAMENTO STATISTICO/PROBABILISTICO

Le ragioni di questo isolamento delle discipline probabilistico-statistiche della matematica tradizionale risiedono in parte nel fatto che quest'ultima ha costituito storicamente il principale supporto della fisica per quanto attiene alla modellizzazione dei fenomeni di natura **deterministica** o a leggi fisiche appropriate per sistemi **macroscopici**.

# RILEVANZA DEL RAGIONAMENTO STATISTICO/PROBABILISTICO

L'indagine dei fenomeni **microscopici** invece dovrebbe essere già un buon motivo per ritenere molto importante questa branca della matematica.

# RILEVANZA DEL RAGIONAMENTO STATISTICO/PROBABILISTICO

Ma non solo lo studio della fisica del mondo microscopico, ma anche quello dei fenomeni **biologici, economici, sociologici** richiede il supporto della probabilità e della statistica se si vogliono fare delle indagini realistiche.

# PERCORSO DIDATTICO

Dalle concezioni comuni alle distribuzioni statistiche in fisica, in particolare la statistica di Maxwell-Boltzmann

- Concezioni comuni;
- Esempi di distribuzioni statistiche (campione e popolazione);
- Un esperimento di facile realizzazione che metta in luce la distribuzione statistica di velocità (energia) di una popolazione di particelle (Gas di elettroni emessi nel vuoto per effetto termoionico);
- Simulazione al calcolatore di un sistema meccanico analogo al gas di elettroni liberi;
- Applicazione della statistica di MB: il fattore di Boltzmann come termine unificante di diverse aree della fisica

# FASI DELLA RICERCA

Sperimentazione del percorso didattico su due livelli, il livello della scuola media superiore (V anno di un liceo scientifico) e quello dei corsi di fisica generale universitari (I o II anno del corso di laurea in Ingegneria).

- Analisi dello stato dell'arte;
- Indagine attraverso un test di ingresso di quelle che sono le concezioni comuni sulle idee di base (in senso matematico) dei fenomeni regolati da leggi statistiche e/o probabilistiche;
- Somministrazione di scheda di lavoro su semplici sistemi le cui grandezze possono essere descritte in termini statistici;  
Ad esempio: incertezze su misure ripetute, altezze di studenti in una classe, intensità delle precipitazioni piovose,....

## FASI DELLA RICERCA

- Somministrazione di schede di lavoro per la realizzazione dell'esperimento per l'individuazione della distribuzione del gas di elettroni liberi.
- Costruzione di un modello sulla base dei risultati ottenuti e realizzazione di una simulazione attraverso cui descrivere il fenomeno studiato.
- Somministrazione di un questionario sui sistemi a due livelli descrivibili attraverso le leggi della meccanica statistica;
- Realizzazione di alcuni esperimenti e simulazioni su fenomeni modellizzabili come sistemi a due livelli e descritti dal fattore di Boltzmann;



# L'ESPERIMENTO - INTRODUZIONE

Un metodo sperimentale semplice attraverso  
cui trovare la funzione di distribuzione statistica  
del gas di elettroni emessi nel vuoto

# L'ESPERIMENTO - INTRODUZIONE

Il tubo elettronico o valvola termoionica come importante esempio di storia della tecnologia elettronica ma anche spunto per diversi tipi di indagine sperimentale in fisica come:

- lavoro di estrazione dei metalli;
- differenza di potenziale dovuta al contatto fra metalli diversi;
- distribuzione statistica degli elettroni, ecc..

# L'ESPERIMENTO - INTRODUZIONE

L'esecuzione di esperimenti che evidenziano le distribuzioni di energia e velocità di un sistema di particelle in equilibrio ad una data temperatura  $T$  è molto complessa nel caso di gas.

Esperimenti storici sono riportati nei libri di testo  
[Zartman (1931); Miller e Kusch (1955)]

Storicamente l'effetto termoionico risulta essere il primo esperimento di validazione della teoria di Maxwell Boltzmann sulle distribuzioni statistiche [Brown, 1909]

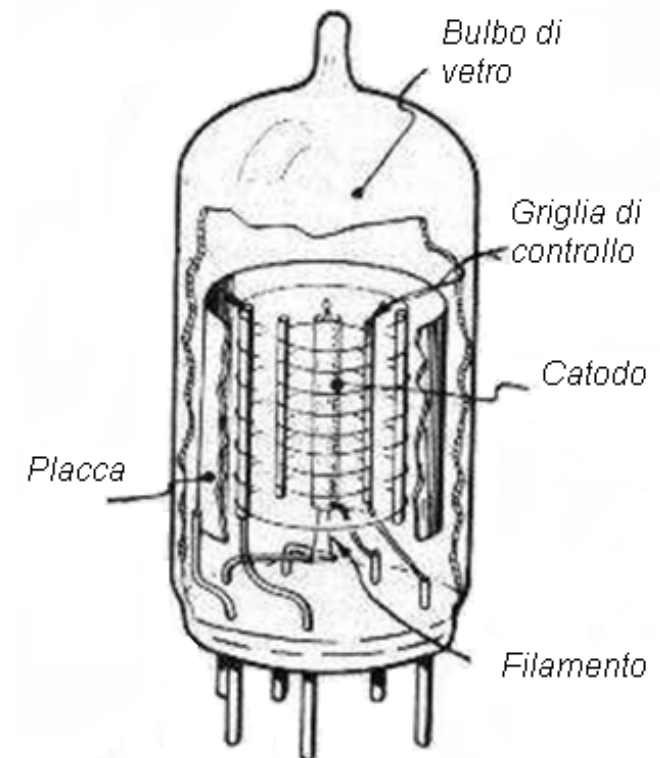
## L'ESPERIMENTO - INTRODUZIONE

Il tipico diodo attraverso cui studiare l'effetto termoionico è composto da due o più cilindri metallici (catodo, anodo, griglia) (concentrici posti molti vicini fra loro).

All'interno del catodo viene fatto passare un filamento percorso da corrente che riscalda il catodo stesso.

Quest'ultimo portato ad una data temperatura emette elettroni secondo la legge di Richardson - Dushman.

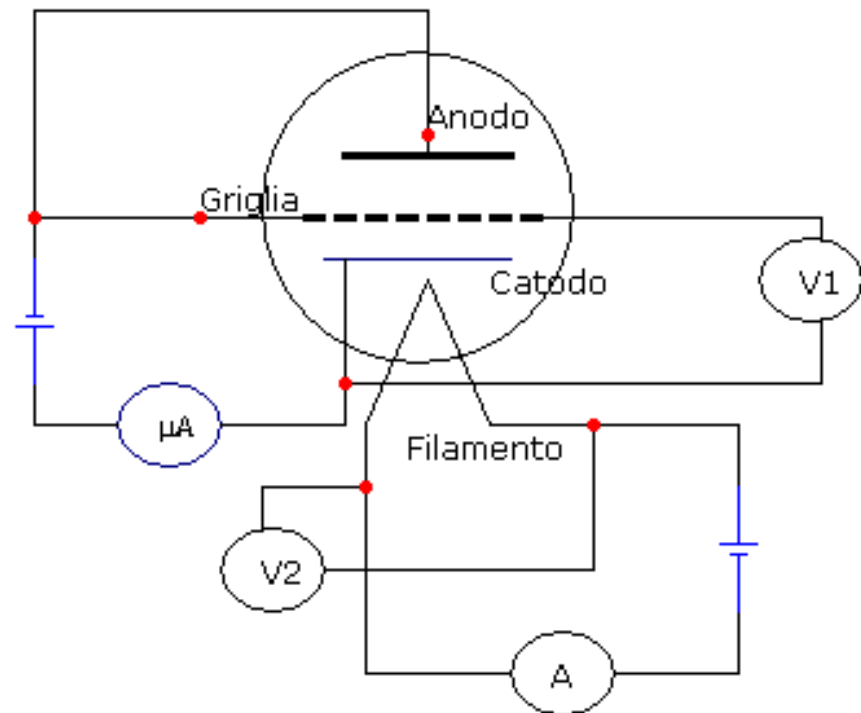
L'emissione avviene nel vuoto.



## SET - UP SPERIMENTALE

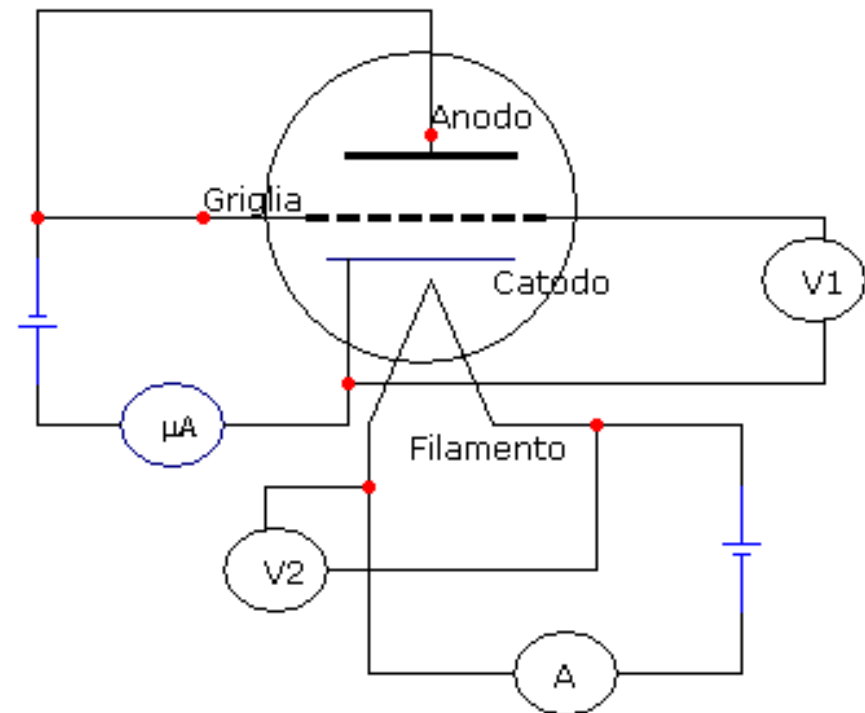
L'esperimento viene eseguito attraverso il seguente circuito elettrico.

Il tubo usato è il triodo *ECL82* a riscaldamento indiretto con tensione e corrente di filamento pari rispettivamente a  $6,3\text{ V}$  e  $300\text{ mA}$



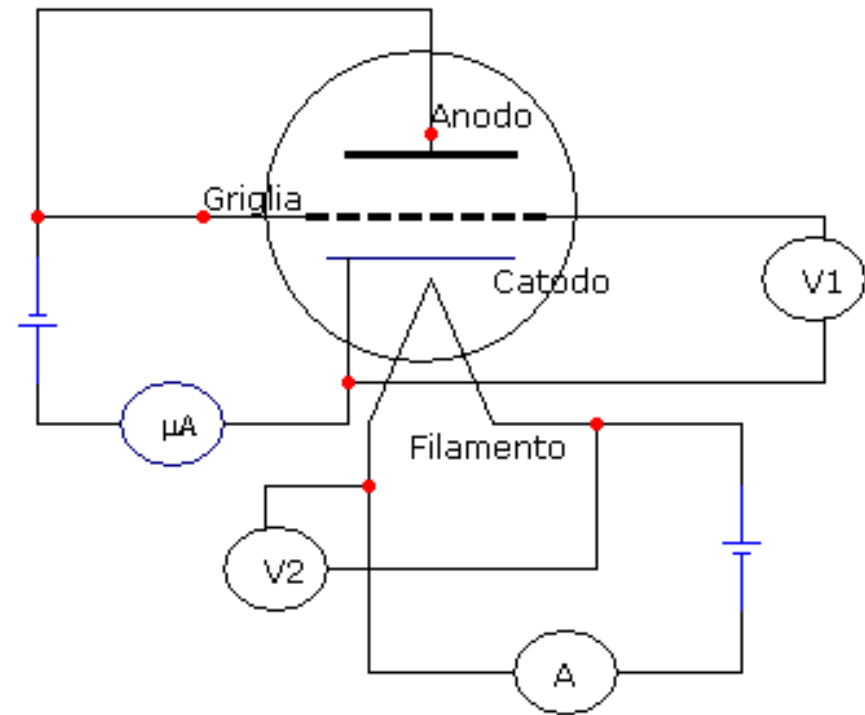
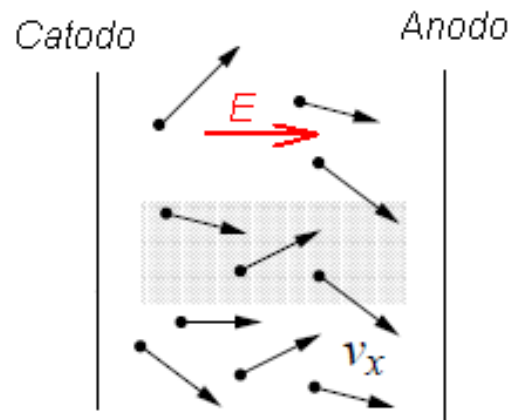
## SET - UP SPERIMENTALE

Per data corrente di filamento (che fissa la temperatura  $T$ ) si applica un potenziale ritardante fra griglia e catodo che ne varia la corrente di anodica.

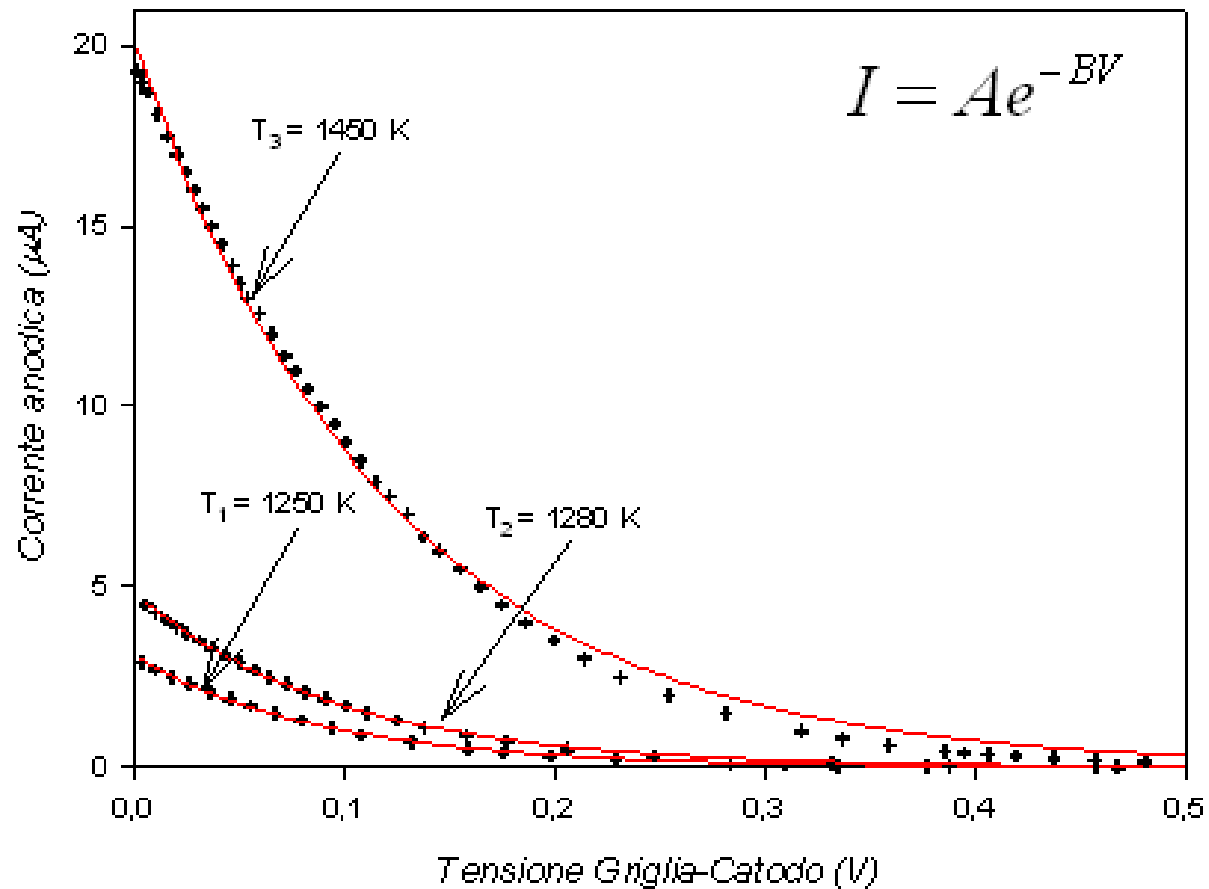


# SET - UP SPERIMENTALE

In tal modo si selezionano le componenti della velocità perpendicolari alla superficie del catodo emittente



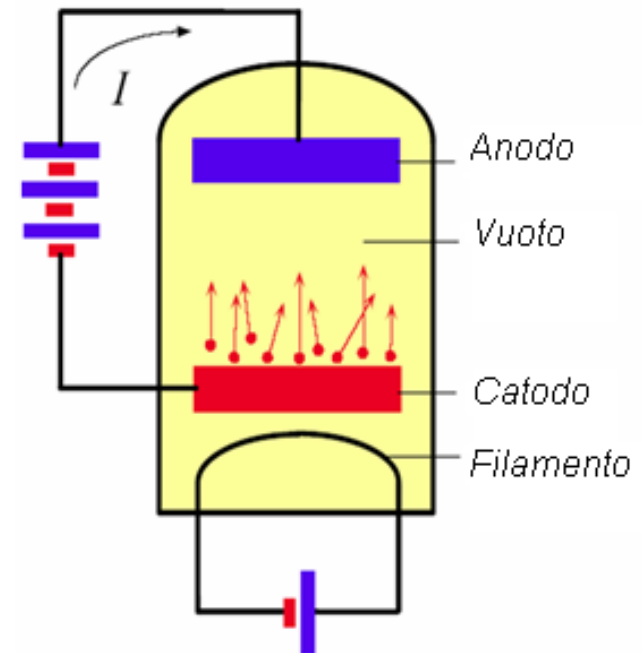
# RISULTATI SPERIMENTALI





# MODELLO

- Geometria a facce piane e parallele  
(Approfondimento per la geometria cilindrica attraverso la funzione di Schottky)
- Gas di elettroni liberi nel vuoto in equilibrio termico con il catodo.
- Elettroni distribuiti secondo MB
- Densità di carica spaziale trascurabile



Con tali approssimazioni

$$I(V) = Ae^{-\frac{eV}{kT}}$$

## MODELLO MATEMATICO

La corrente in direzione  $\mathbf{x}$  perpendicolare alle facce catodo ed anodo è data da:

$$I = eS \int_0^{\infty} v_x n(v_x) dv_x$$

Dove  $e$  indica la carica dell'elettrone,  $S$  superficie,  $n(v_x)$  distribuzione unidimensionale delle velocità

Poiché siamo interessati al moto nella direzione  $\mathbf{x}$  indichiamo con

$$\mathcal{E} = \frac{1}{2} m v_x^2$$

e con

$$f(\mathcal{E})$$

la sua funzione di distribuzione

avremo

$$n(v_x) = g(\mathcal{E}) f(\mathcal{E}) \frac{d\mathcal{E}}{dv_x} = A \frac{1}{\sqrt{\mathcal{E}}} f(\mathcal{E}) m v_x = \sqrt{2m} A f(\mathcal{E})$$

# MODELLO MATEMATICO

Da cui

$$n(v_x) \propto f(\varepsilon) \quad \text{e} \quad I \propto \frac{e}{m} S \int_0^{\infty} f(\varepsilon) d\varepsilon$$

Nel caso in cui venga applicato un potenziale ritardante

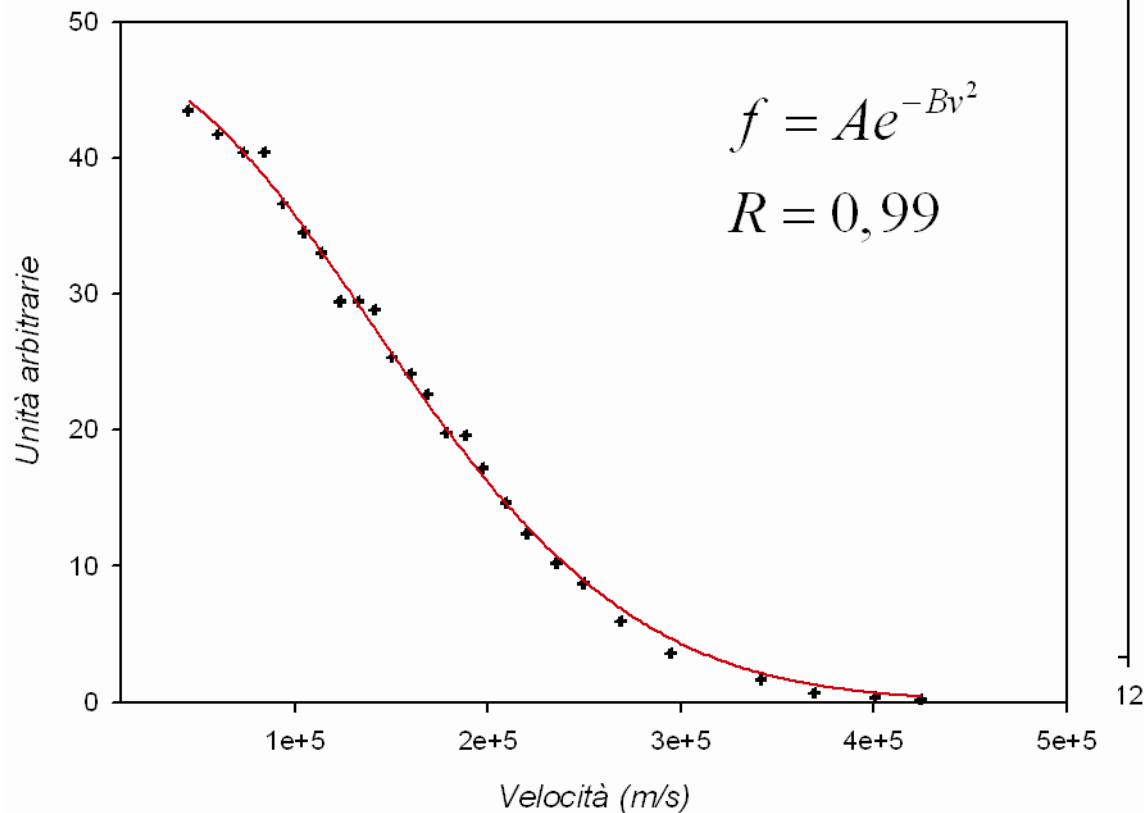
$$I \propto \frac{e}{m} S \int_{eV}^{\infty} f(\varepsilon) d\varepsilon$$

e derivando rispetto all'energia  $\varepsilon$

$$f(\varepsilon) \propto \frac{m}{eS} \frac{dI}{d\varepsilon}$$

# FUNZIONE DI DISTRIBUZIONE

Ottenuta attraverso l'operazione di derivazione numerica  
Distribuzione della componente  $v_x$



$$B(T_1) = (0,60 \pm 0,02)10^{-20} J$$

$$T_1 \cong 1208K$$

$$R(T_1) = 0,99$$

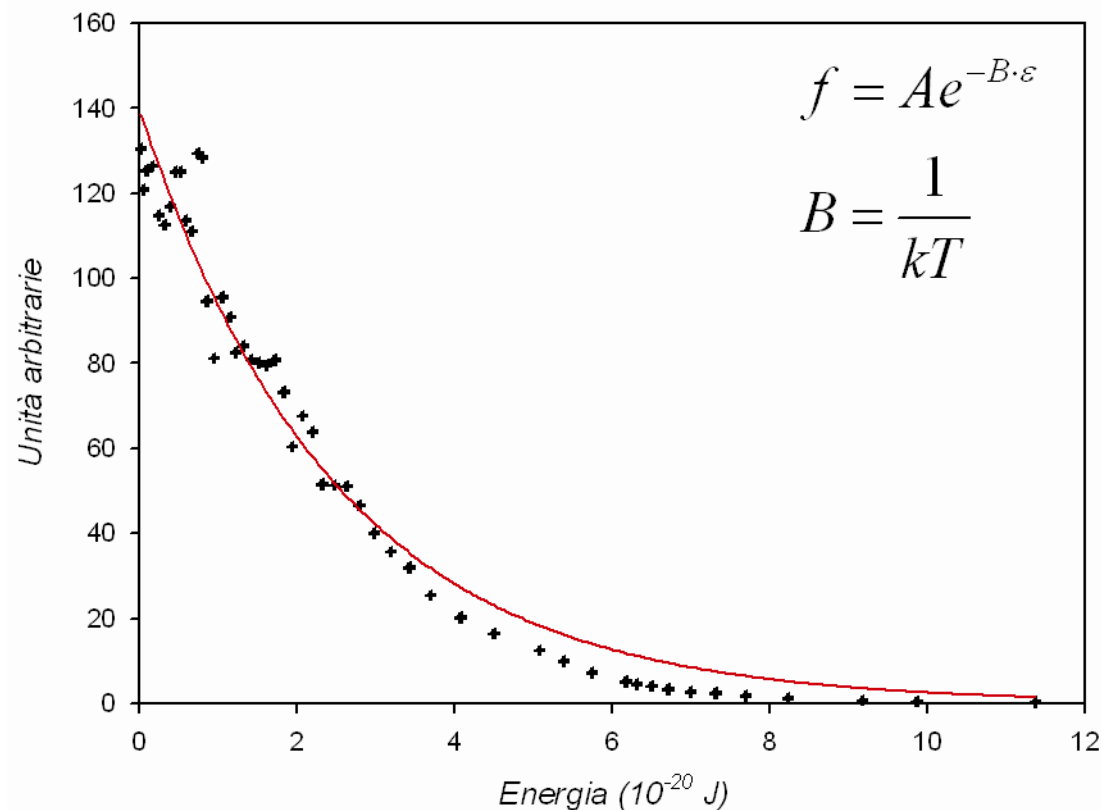
$$B(T_2) = (0,58 \pm 0,01)10^{-20} J$$

$$T_2 \cong 1250K$$

$$R(T_2) = 0,99$$

# FUNZIONE DI DISTRIBUZIONE

Ottenuti attraverso l'operazione di derivazione numerica



$$f = Ae^{-B \cdot \varepsilon}$$

$$B = \frac{1}{kT}$$

$$B = (0,40 \pm 0,02)10^{-20} J$$

$$T \cong 1811K$$

$$R = 0,97$$

## ANALISI DEI RISULTATI

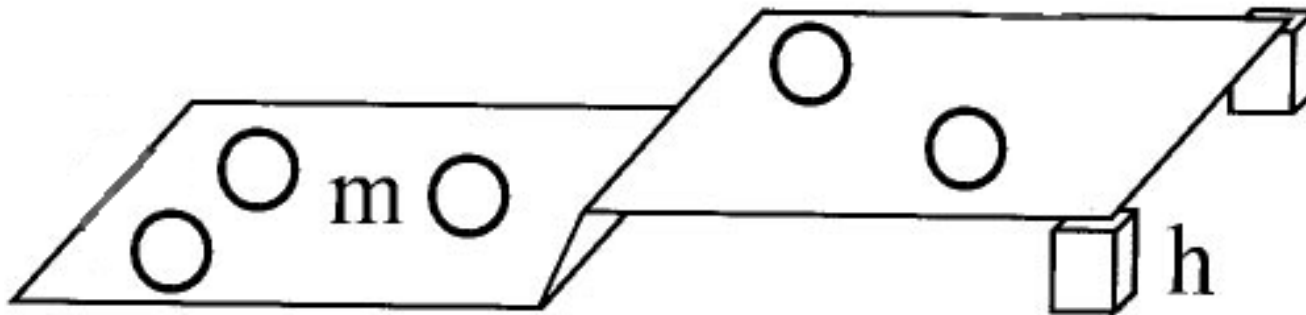
Nel range di temperature e di densità più basse possibili per l'apparato a nostra disposizione si nota un buon accordo con la statistica di MB. Per temperature e densità più elevate invece l'accordo diminuisce.

Alcune delle ipotesi fatte nel modello precedentemente menzionato cominciano a non essere più valide.

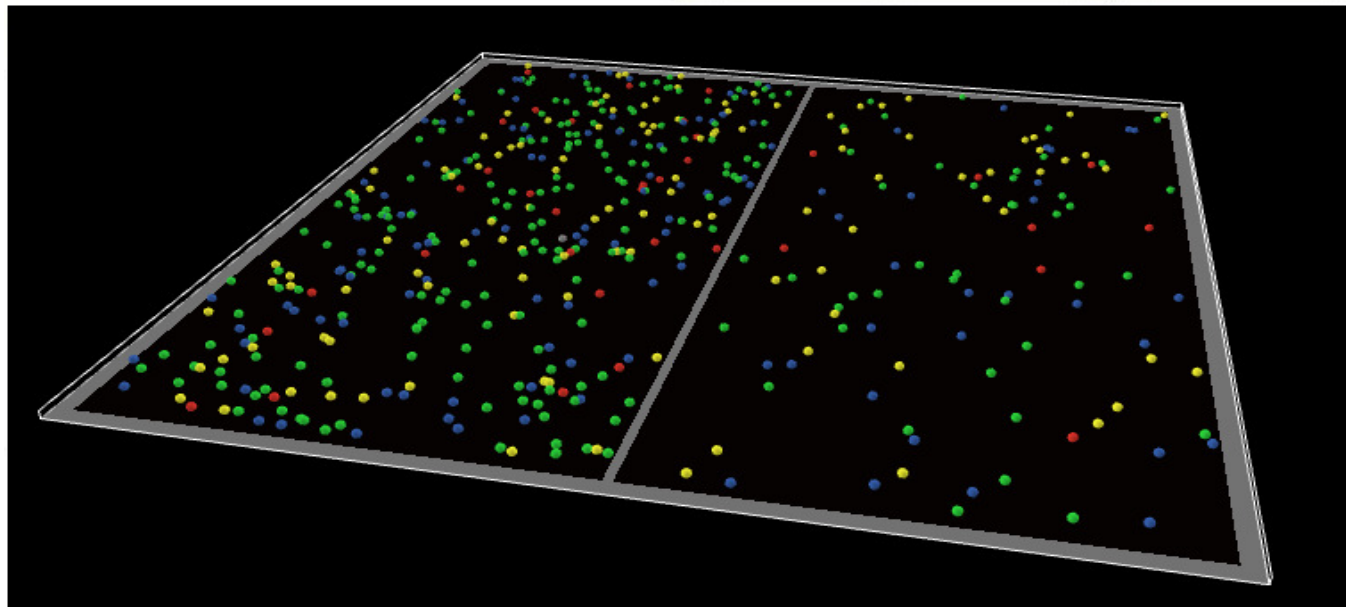
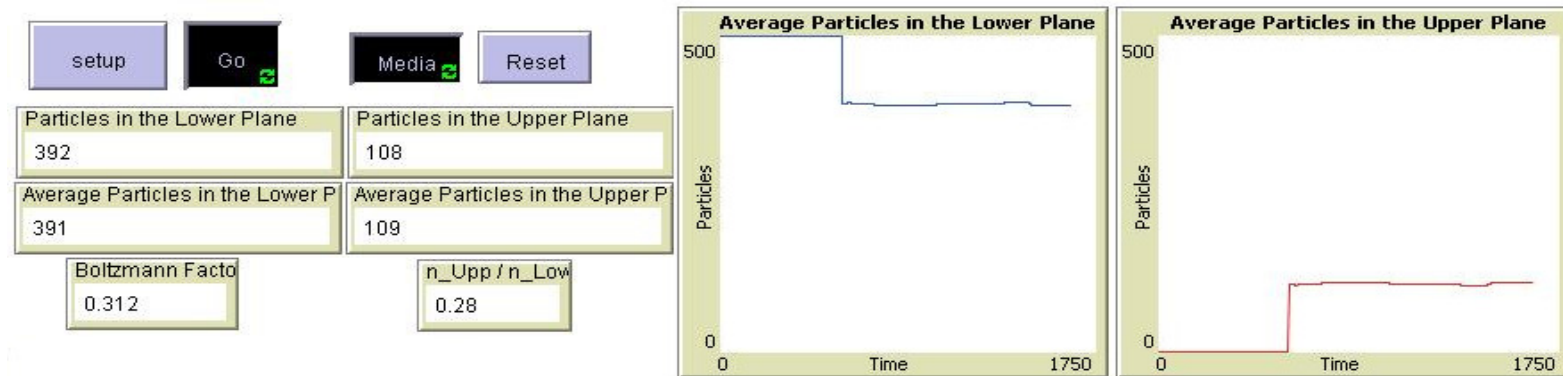
In effetti la densità di carica spaziale non risulta essere più trascurabile

# MODELLO MECCANICO

- ✓ Sistema a due livelli
- ✓ Dinamica molecolare
- ✓ Risoluzione numerica delle equazioni del moto
- ✓ Urti fra le sferette e con le pareti completamente elastici
- ✓ Interazioni fra le sferette dovute soltanto alle collisioni



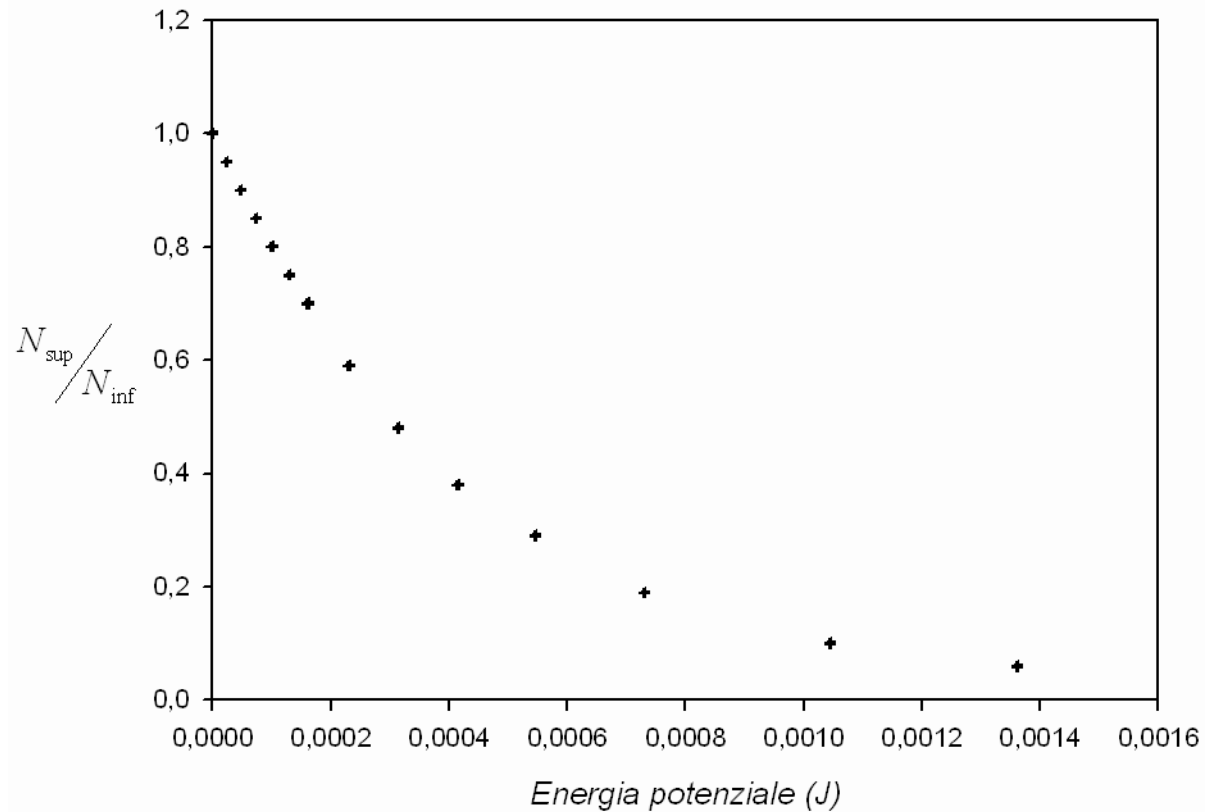
# INTERFACCIA DI NETLOGO





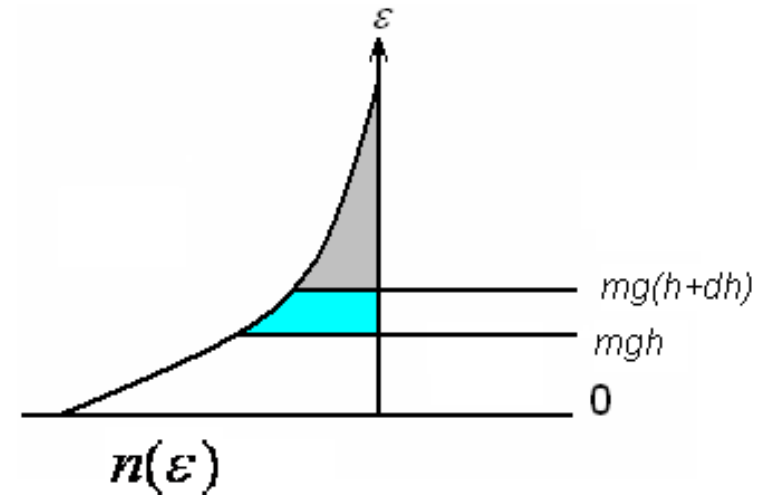
# I RISULTATI DELLA SIMULAZIONE

$$N = 500, m = 3\text{gr}, \langle E \rangle = 4,5 \cdot 10^{-4} \text{ J}$$



# ANALISI MODELLO MECCANICO

Per la determinazione della distribuzione di energia delle particelle del livello inferiore bisogna **derivare** rispetto all'energia la frazione di queste particelle con energia  $\varepsilon > mgh$



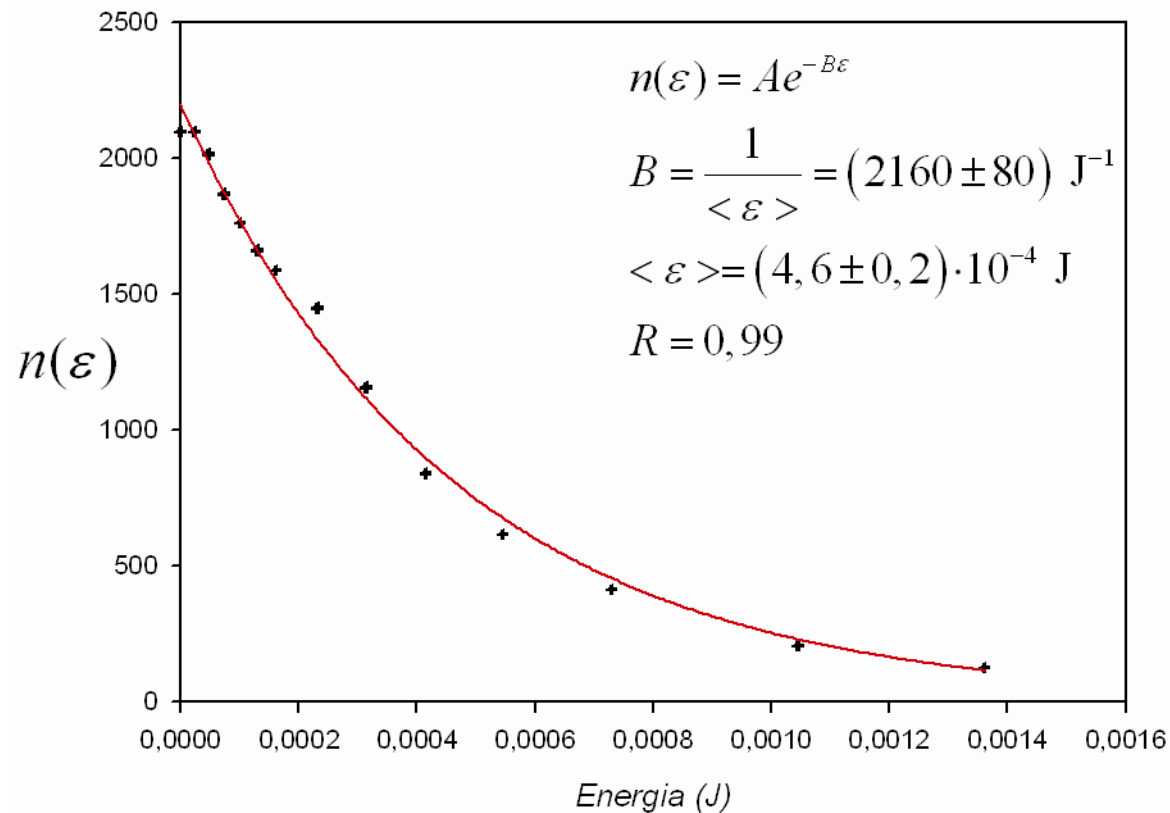
$$r = \frac{N_{\text{sup}}}{N_{\text{inf}}} = \int_{mgh}^{\infty} n(\varepsilon) d\varepsilon \quad \longrightarrow \quad n(\varepsilon) = \frac{dr}{d\varepsilon}$$

Dove  $n(\varepsilon)$  è tale che

$$\int_0^{\infty} n(\varepsilon) d\varepsilon = 1$$

# DISTRIBUZIONE DI ENERGIA

$$N = 500, m = 3\text{gr}, \langle E \rangle = 4,5 \cdot 10^{-4} \text{ J}$$



Area sotto la curva

$$A \approx 0,96$$

# CONCLUSIONI

- Particolarmente significativo dal punto di vista didattico è l'analogia tra modello meccanico e modello elettrico.
- Un semplice approfondimento del modello meccanico permette di interpretare la variazione della densità dell'atmosfera con l'altezza.

# APPLICAZIONI DELLA STATISTICA DI MB

La distribuzione statistica di MB ci consente di ottenere un fattore unificante di aree diverse della fisica (**Fattore di Boltzmann**)

# APPROCCIO PEDAGOGICO

## *RELATIVO AD INNOVAZIONI CURRICULARI*

- ✓ Focalizza su concetti/idee unificanti che strutturano i diversi campi della fisica (meccanica, termodinamica, elettromagnetismo,...).
- ✓ Utilizzano strategie didattiche fortemente basate sull'uso delle tecnologie informatiche.

Il fattore di Boltzmann

$$e^{-\frac{E}{kT}}$$

- ✓ Presente nei diversi ambiti della fisica ma anche della chimica e della biologia
- ✓ Utile per l'introduzione alla meccanica statistica

# APPROCCIO TEORICO CONVENZIONALE

- ✓ **Calcolo combinatorio**

*(Teoria cinetica dei gas, dovuta a Maxwell e Boltzmann)*

- ✓ **Insieme statistico**

*(Gibbs)*

- ✓ **Giustificazione euristica**

*(Feynman e l'atmosfera esponenziale)*

# APPROCCIO TEORICO CONVENZIONALE

## I problemi

- ❖ Approssimazione di Stirling  
(*Logaritmo fattoriale*)
- ❖ Ipotesi ergodica  
(*Medie temporali e medie statistiche*)
- ❖ Dimostrazione non sufficientemente rigorosa
- ❖ La complessità, sia matematica che concettuale  
delle trattazioni



# LA NOSTRA PROPOSTA

1. Esperimenti
2. Simulazione attraverso modelli descrittivi ed interpretativi
3. Una deduzione teorica che mostri la plausibilità del modello

# POSSIBILI ESPERIMENTI

*Inquadrare fenomeni diversi in un contesto unitario*

- ✓ Reazioni chimiche
- ✓ Equilibrio liquido-vapore
- ✓ Effetto termoionico
- ✓ Resistenza dei termistori (Semiconduttori)

# REAZIONE CHIMICA

Una reazione chimica può avvenire soltanto quando le molecole dei reagenti  $a$  e  $b$  urtano.

Affinche l'urto sia efficace devono essere soddisfatte le seguenti condizioni:

- $a$  e  $b$  devono possedere sufficiente energia cinetica (fattore energetico)
- $a$  e  $b$  devono urtare secondo una appropriata direzione reciproca (fattore sterico)

Se la concentrazione rimane costante, la velocità di reazione dipende soltanto dalla frazione di urti efficaci per unità di tempo, trascurando il fattore sterico

L'energia cinetica media deve essere confrontata con "l'energia di attivazione",  $E_a$  tipica della reazione

# L'ESPERIMENTO

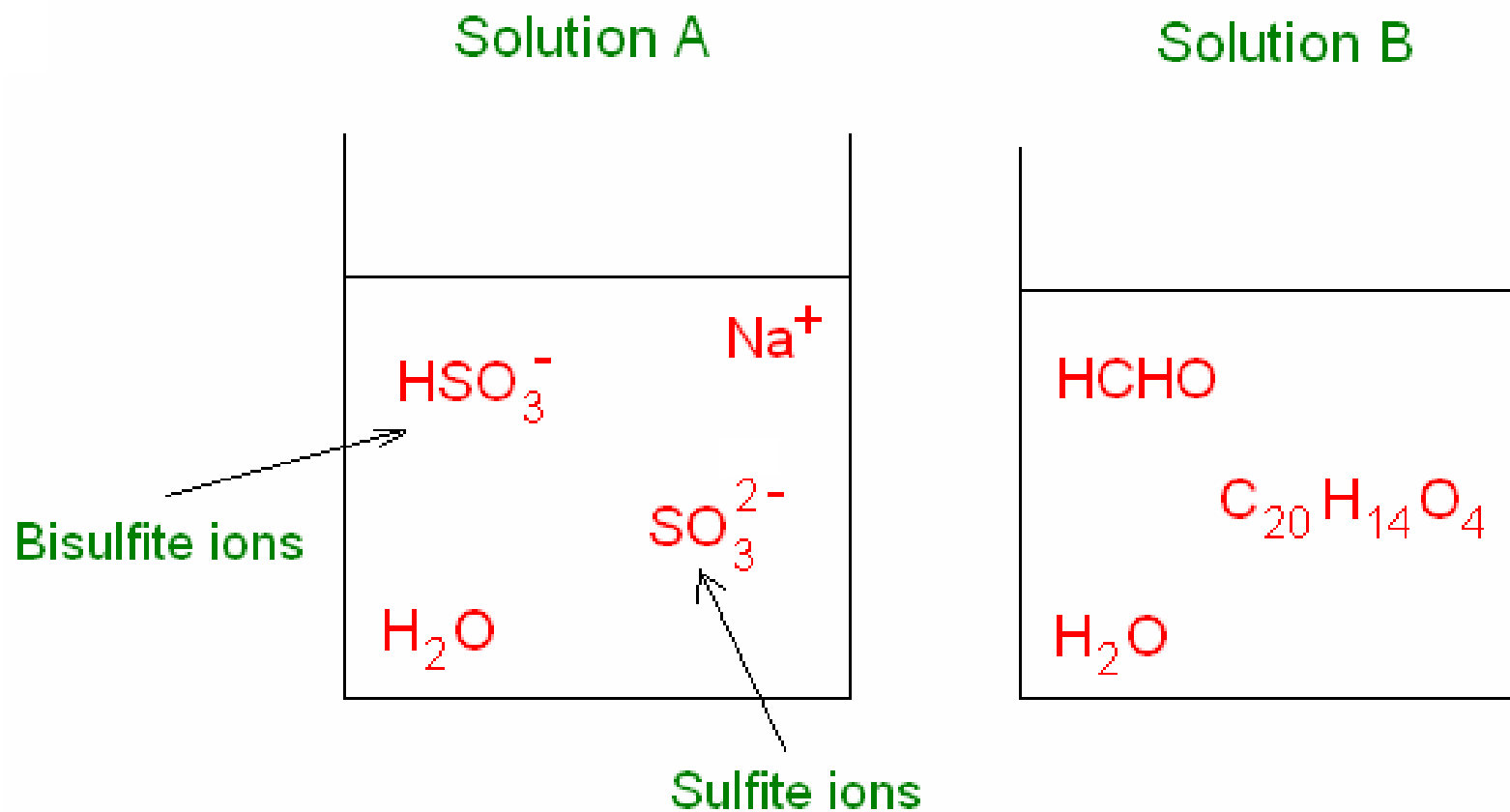
Studio della velocità di reazione chimica

Consumo di una sostanza chimica miscelando due soluzioni

A – disolfito di sodio ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ ) e solfito di sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ )  
sciolti in acqua;

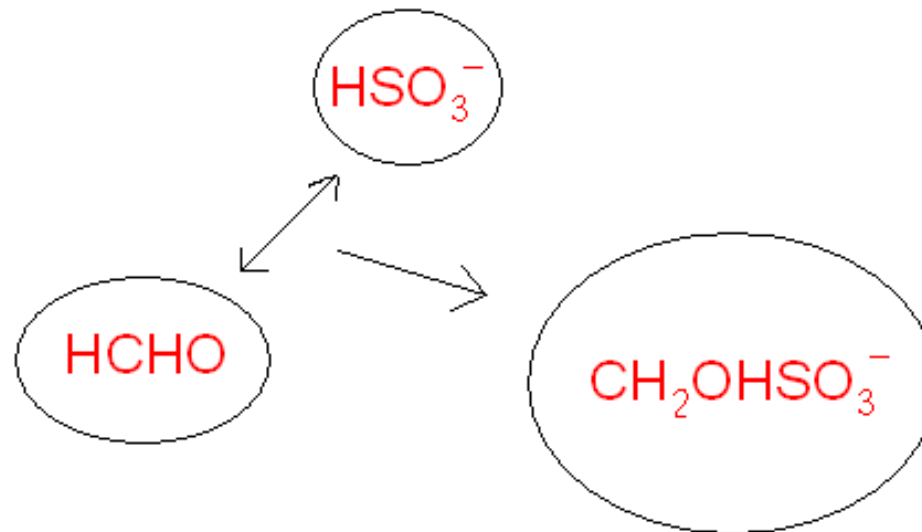
B - metanale (formaldeide) ( $\text{HCHO}$ ) e Fenolftaleina  
( $\text{C}_{20}\text{H}_{14}\text{O}_4$ ), in soluzione acquosa.

# REAZIONE CHIMICA



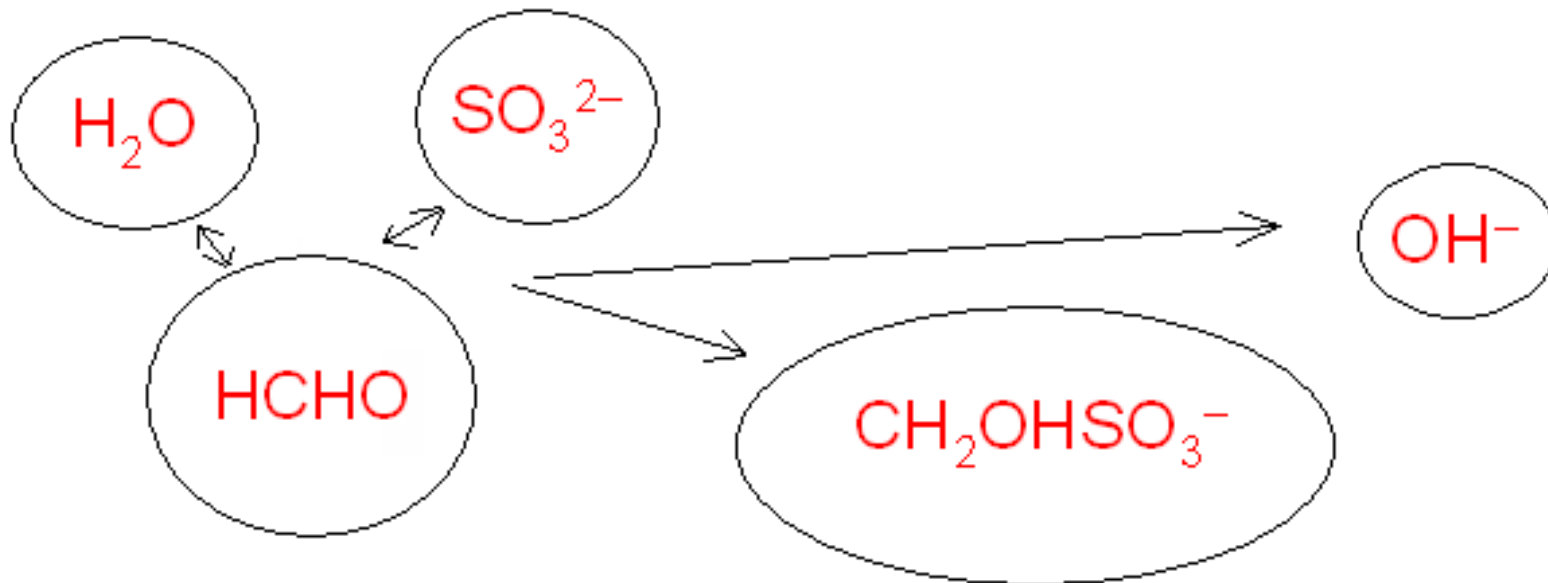
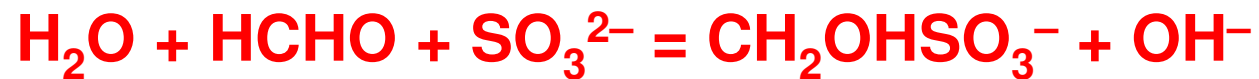
# REAZIONE CHIMICA

La reazione principale tra metanale (HCHO) e ione bisolfito ( $\text{HSO}_3^-$ ) :



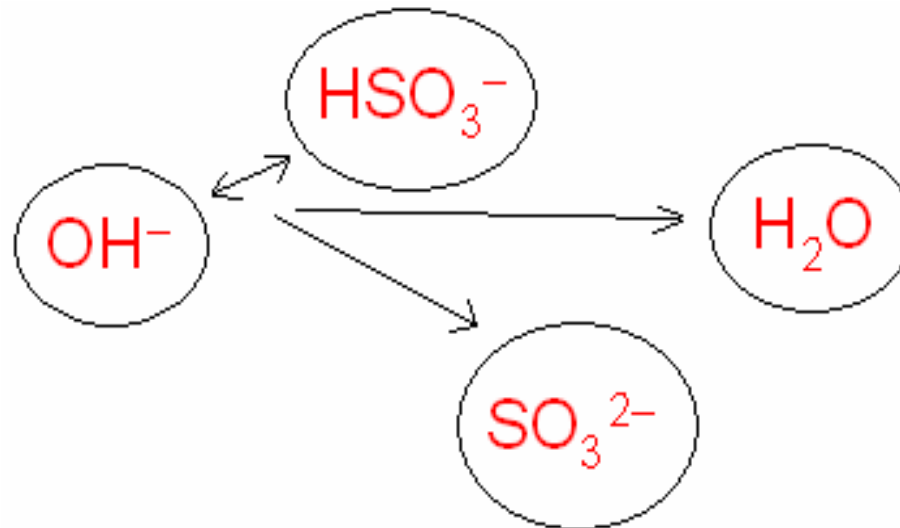
# REAZIONE CHIMICA

Ioni solfito ( $\text{SO}_3^{2-}$ ) reagiscono con il metanale in acqua attraverso una reazione lenta, dove sono prodotti ioni  $\text{OH}^-$ :



# REAZIONE CHIMICA

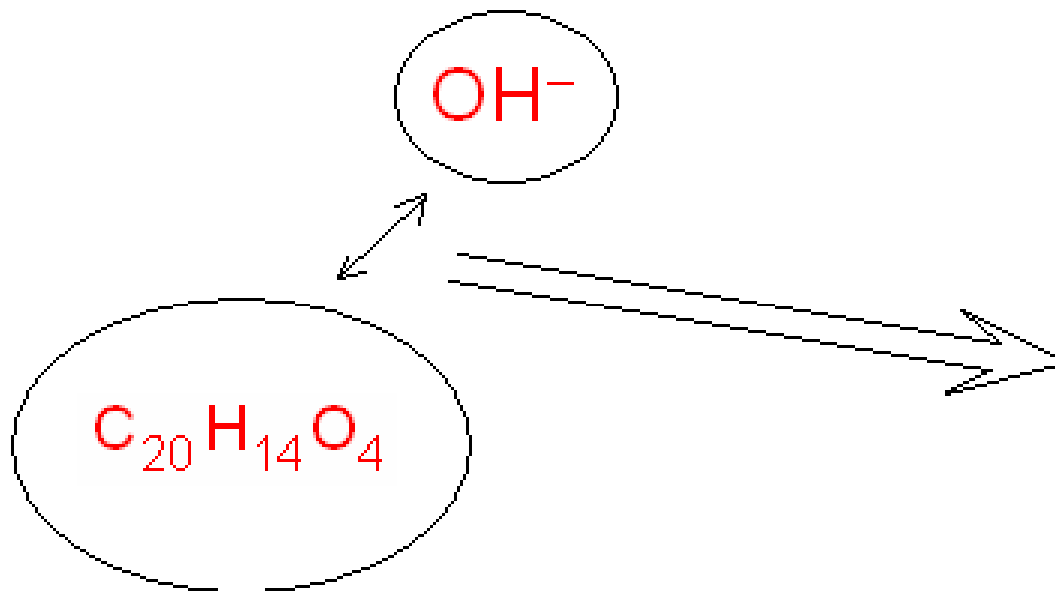
Gli ioni  $\text{OH}^-$  fanno virare la phenolphthalein sul rosa, ma questi sono catturati dagli ioni di bisolfito, più velocemente di quanto siano generati, attraverso la reazione veloce :





# REAZIONE CHIMICA

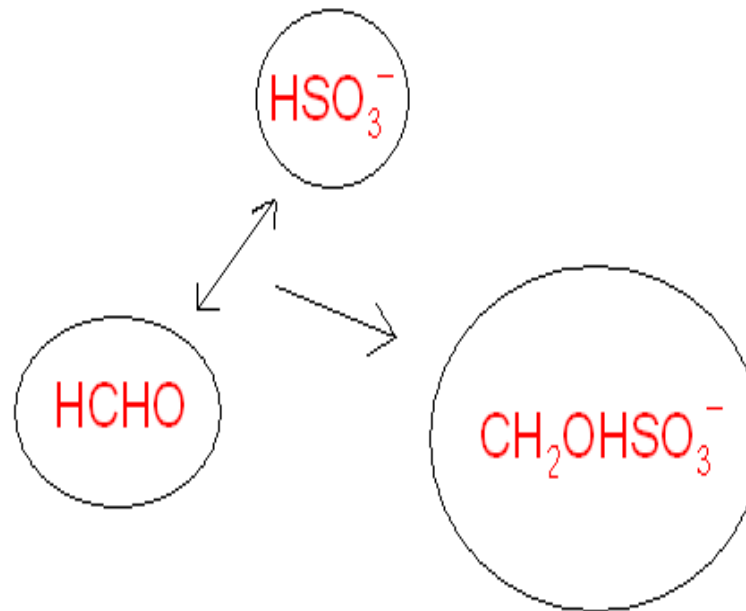
Quando tutto lo ione bisolfito è stato consumato dalla reazione principale, gli ioni  $\text{OH}^-$  non possono essere più rimossi e la Fenolftaleina vira sul rosa indicando la conclusione della reazione principale



Solution turns pink

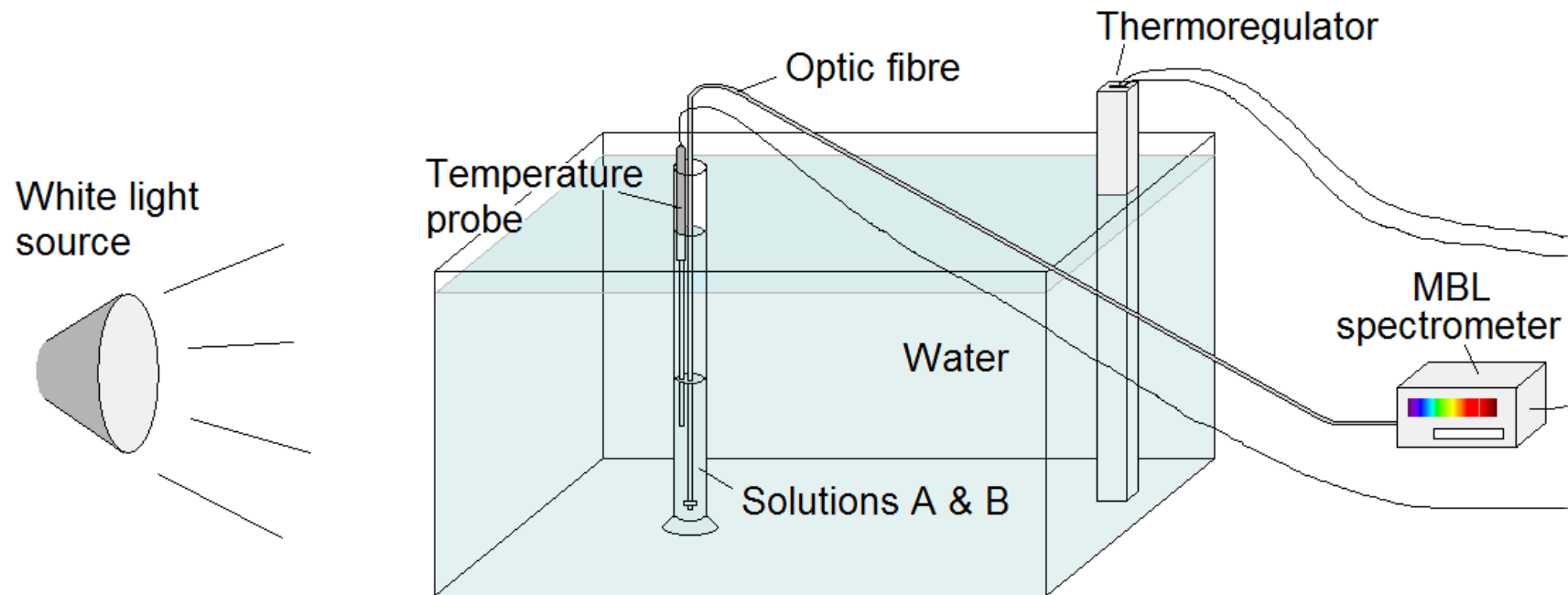
# REAZIONE CHIMICA

Si può studiare quindi la dipendenza dalla temperatura della velocità della reazione principale



## SET-UP SPERIMENTALE

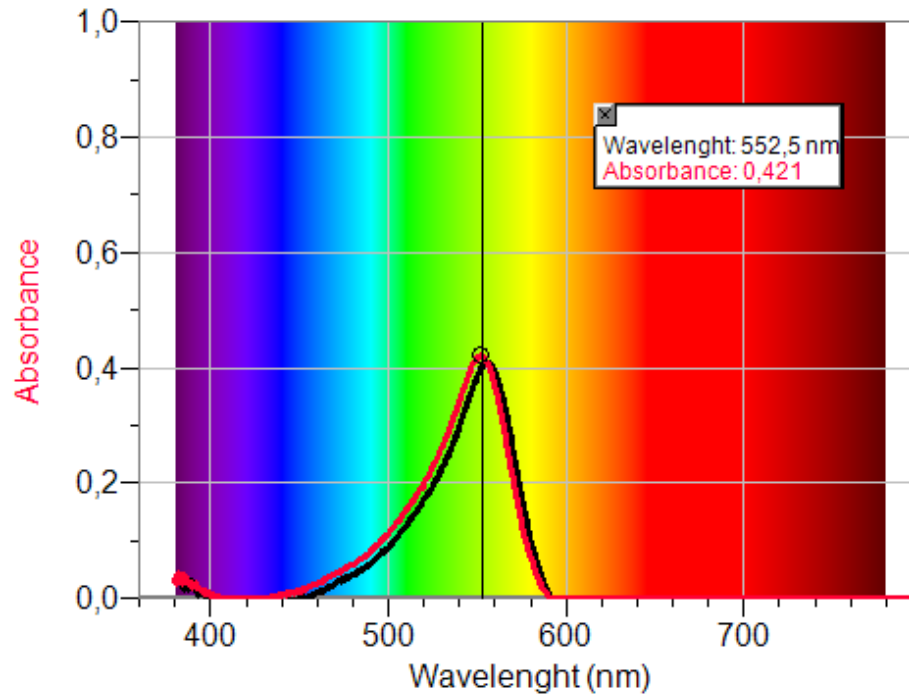
Al fine di minimizzare gli errori sperimentali si può usare uno spettrometro per determinare l'istante in cui la phenolphthalein comincia a virare verso il rosso



**Uso di uno spettrometro per misurare l'assorbimento di luce**

# RISULTATI SPERIMENTALI

Al fine di determinare l'esatta lunghezza d'onda dell'assorbonza misurata, si può misurare l'assorbanza della soluzione a e b in funzione della lunghezza d'onda.

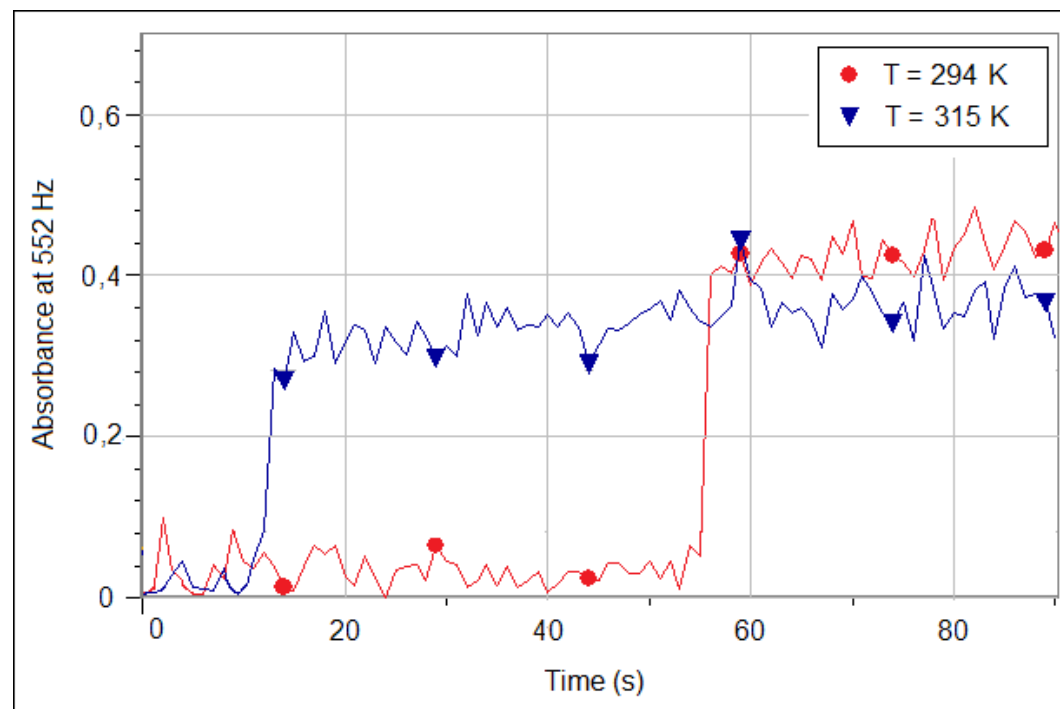


*Spettro di assorbanza*



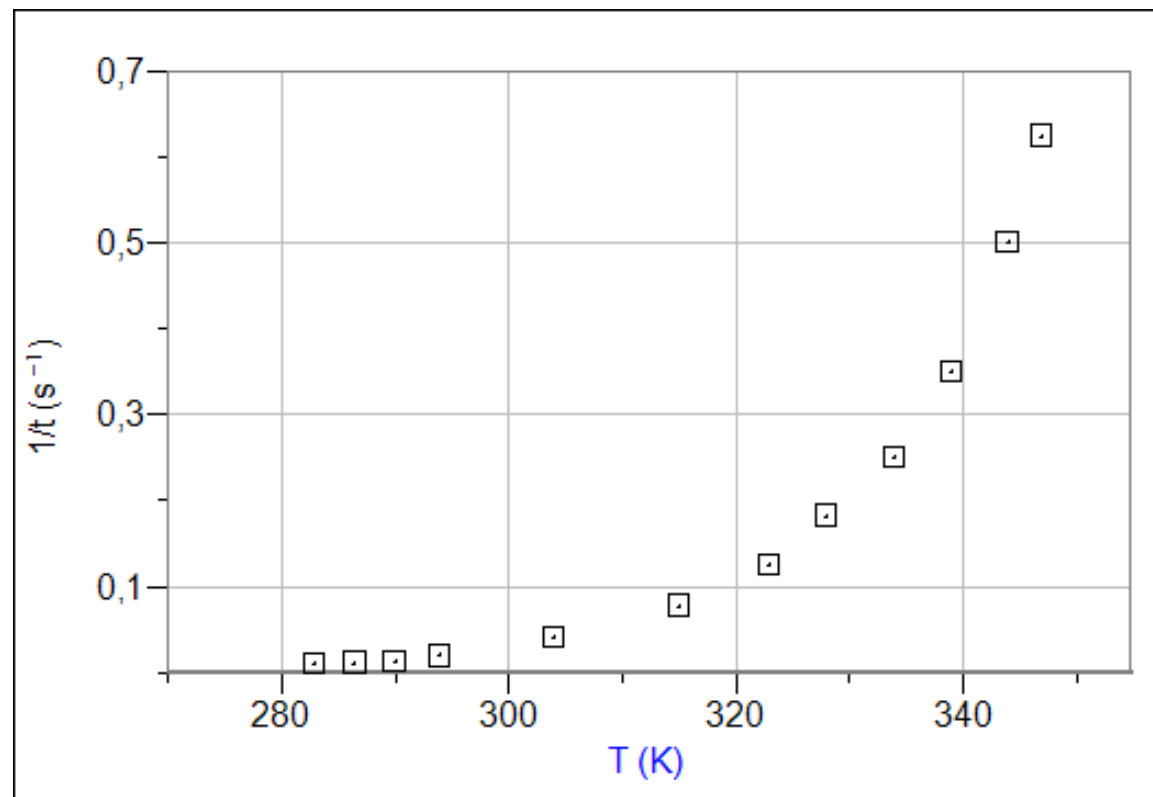
# RISULTATI SPERIMENTALI

Misura dell'assorbanza della soluzione a&b a 552 nm in funzione del tempo



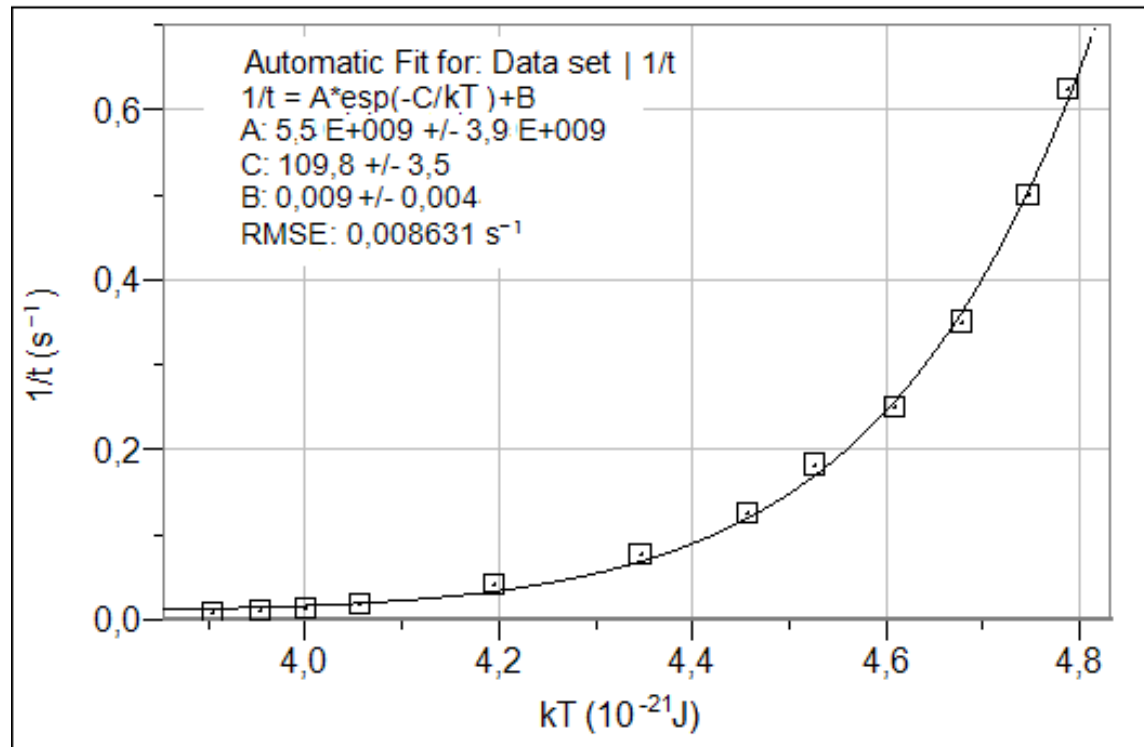
## RISULTATI SPERIMENTALI

La figura riporta il reciproco dei tempi misurati in funzione della temperatura a cui è avvenuta la reazione



## RISULTATI SPERIMENTALI

La figura riporta il reciproco dei tempi misurati in funzione della temperatura a cui è avvenuta la reazione



I risultati sono in buon accordo con la legge di Arrhenius

$$V = A e^{-\frac{E_a}{kT}}$$

$$E_a = (1,10 \pm 0.03) 10^{-19} \text{ J per molecola}$$

## CONCLUSIONI

L'esperimento mostra come il fenomeno fisico possa essere descritto, in una situazione di equilibrio come un semplice **sistema a due livelli** descritto dal **fattore di Boltzmann**, in cui il dislivello di energia è dato dall'energia di attivazione della reazione chimica.

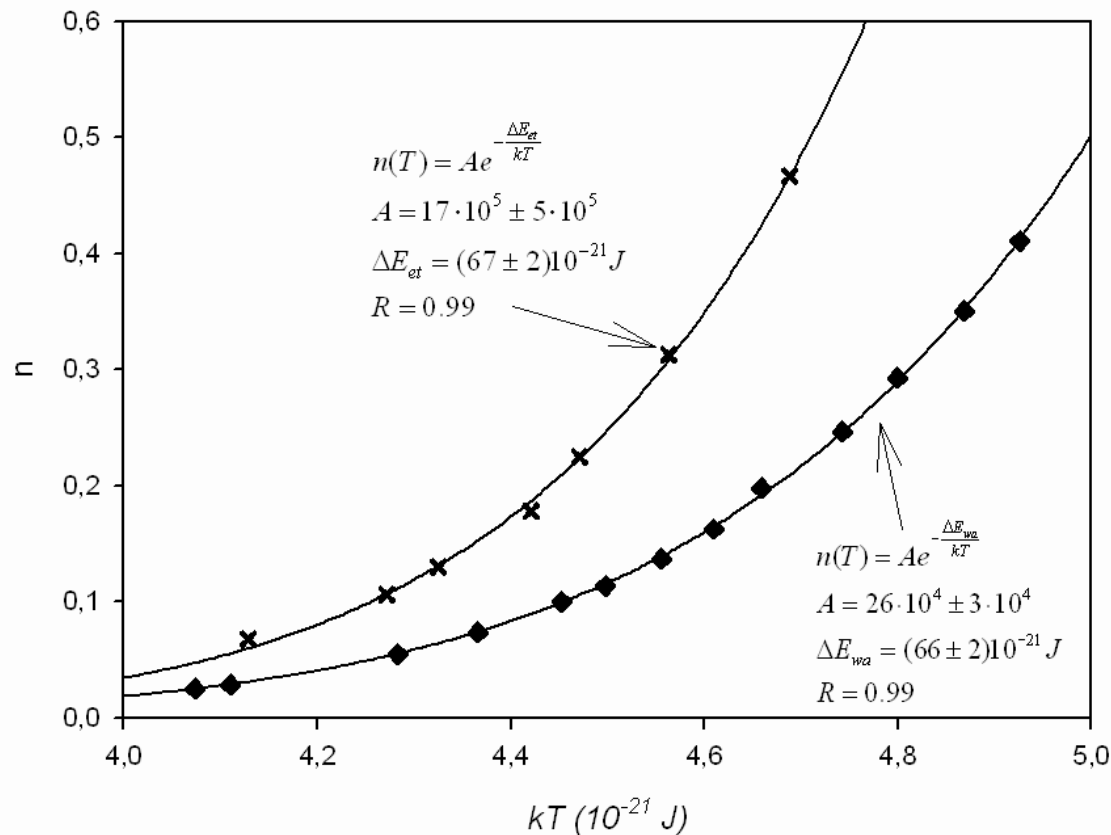
Esistono altri sistemi in campi diversi della fisica che possono essere descritti in modo analogo.



# PRESSIONE DI VAPORE

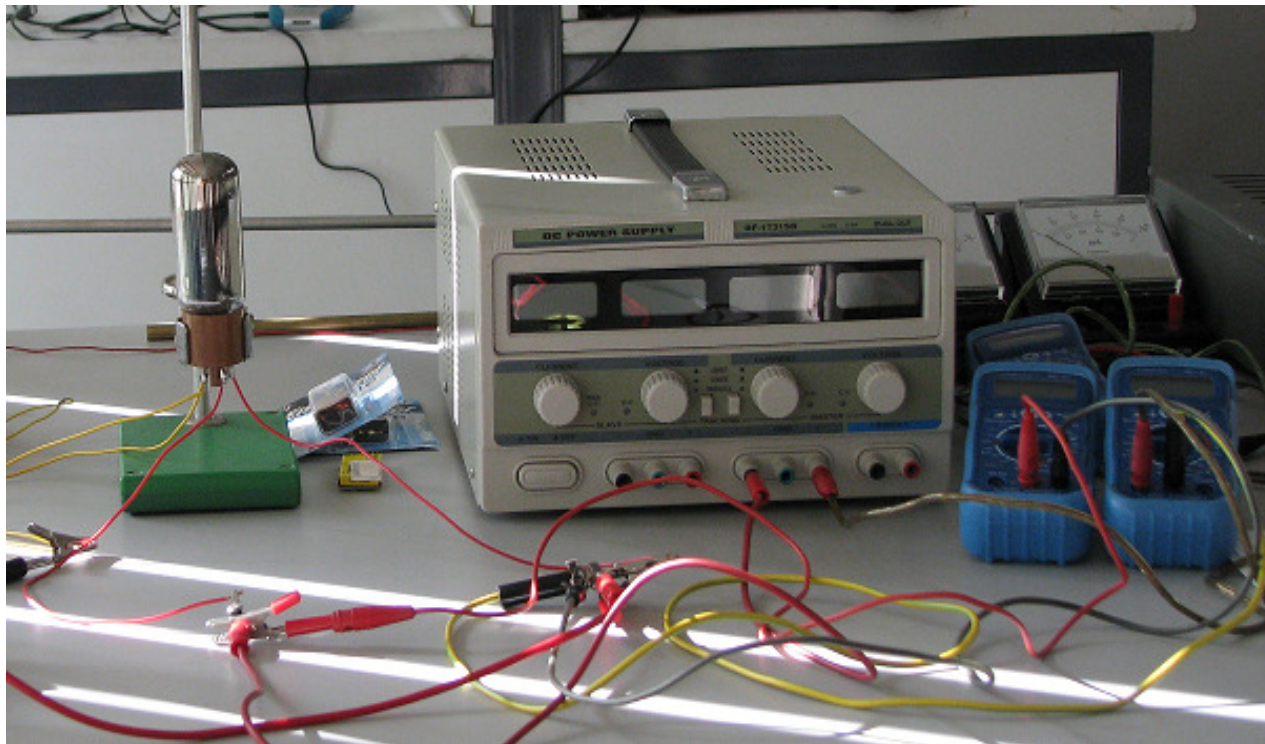
## RISULTATI SPERIMENTALI

Frazione di molecole di vapore per l'acqua (diamanti) e etanolo (croci) vs.  $kT$



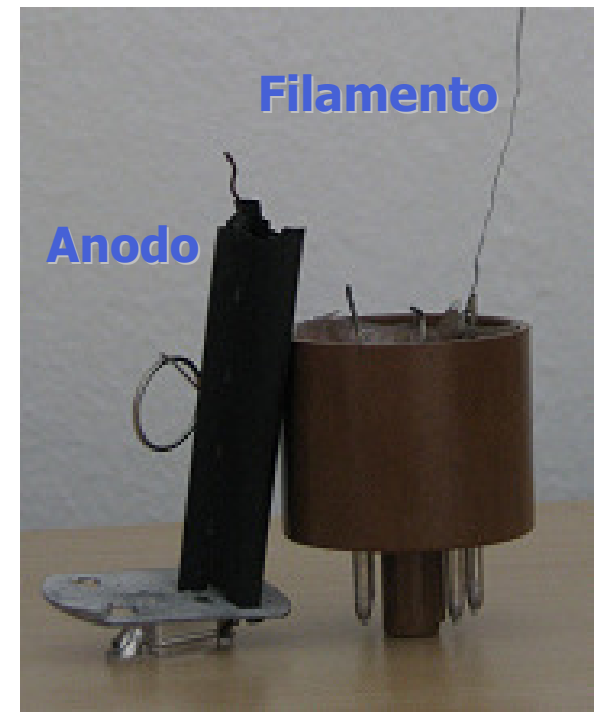
L'evaporazione di un liquido, dove l'energia caratteristica è l'energia media da fornire per far avvenire la transizione liquido vapore

# EFFETTO TERMOIONICO



SET-UP SPERIMENTALE

Struttura interna del diodo

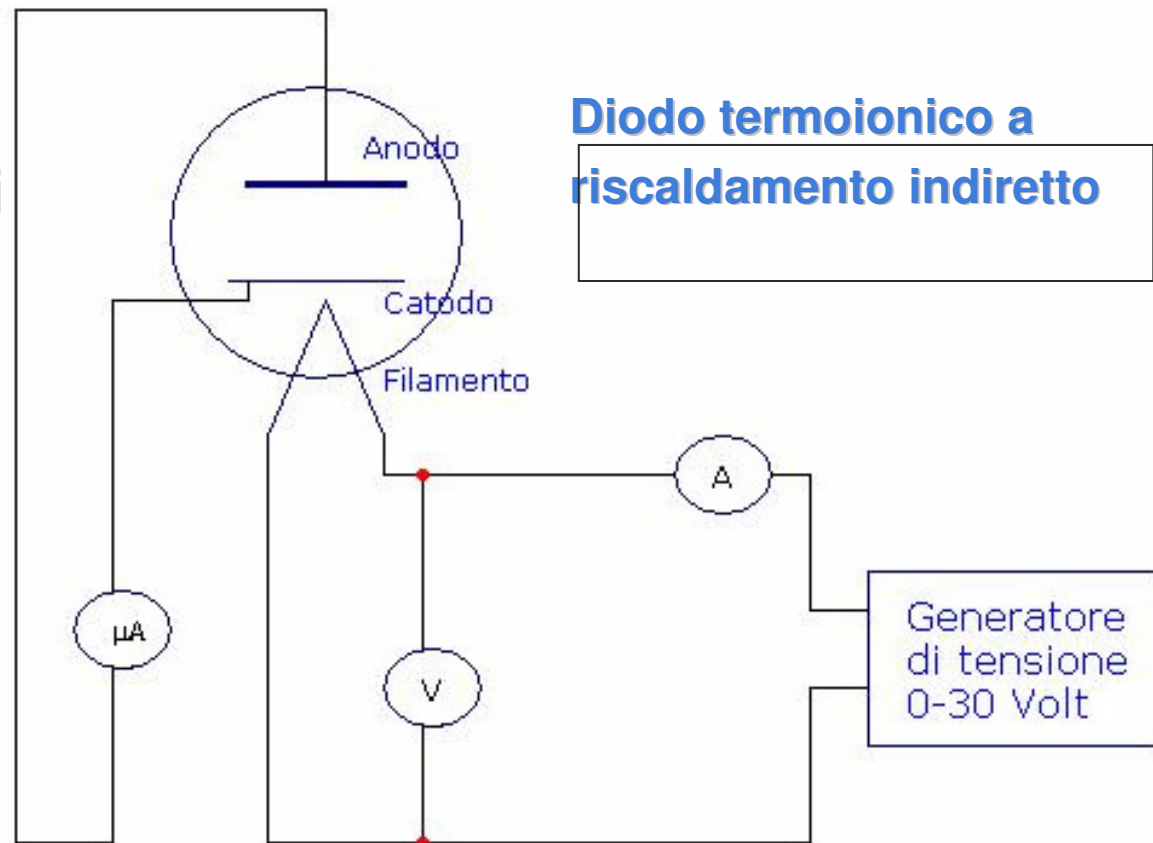


# SET-UP SPERIMENTALE

## Circuito equivalente

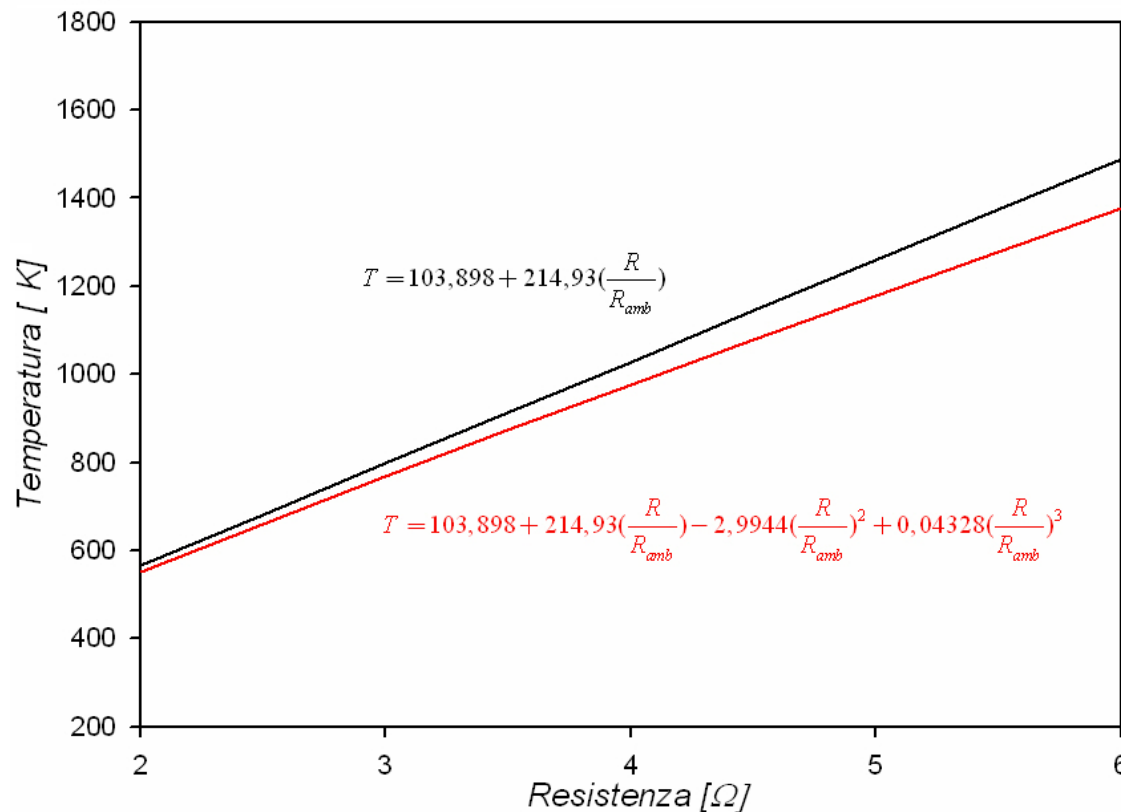
### Le misure

- ✓ Tensione e corrente di filamento
- ✓ Corrente di anodo (*termionica*)



# CALCOLO DELLA TEMPERATURA

La temperatura di filamento ( $T_{\text{filamento}} > T_{\text{catodo}}$ ) è stimata attraverso la seguente relazione fenomenologica :



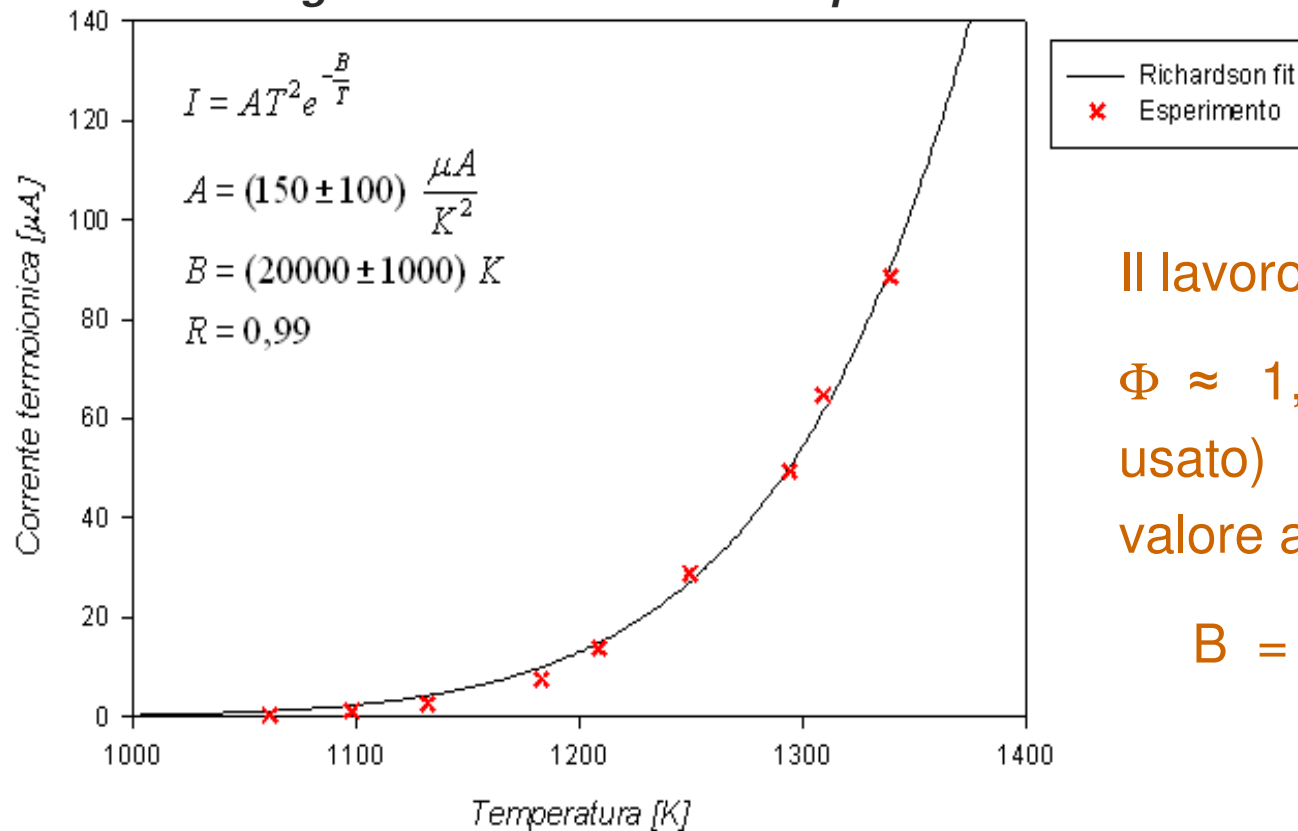
$$T = a_0 + a_1 \frac{R}{R_{amb}} + a_2 \left(\frac{R}{R_{amb}}\right)^2 + a_3 \left(\frac{R}{R_{amb}}\right)^3$$

La resistenza di filamento è calcolata a diverse temperature

$R_{amb}$  Resistenza a temperatura ambiente

# DATI SPERIMENTALI

**Fitting dei dati corrente vs. temperatura**



Il lavoro di estrazione,  
 $\Phi \approx 1,5$  eV, (per il diodo  
usato) corrisponde ad un  
valore accettato di

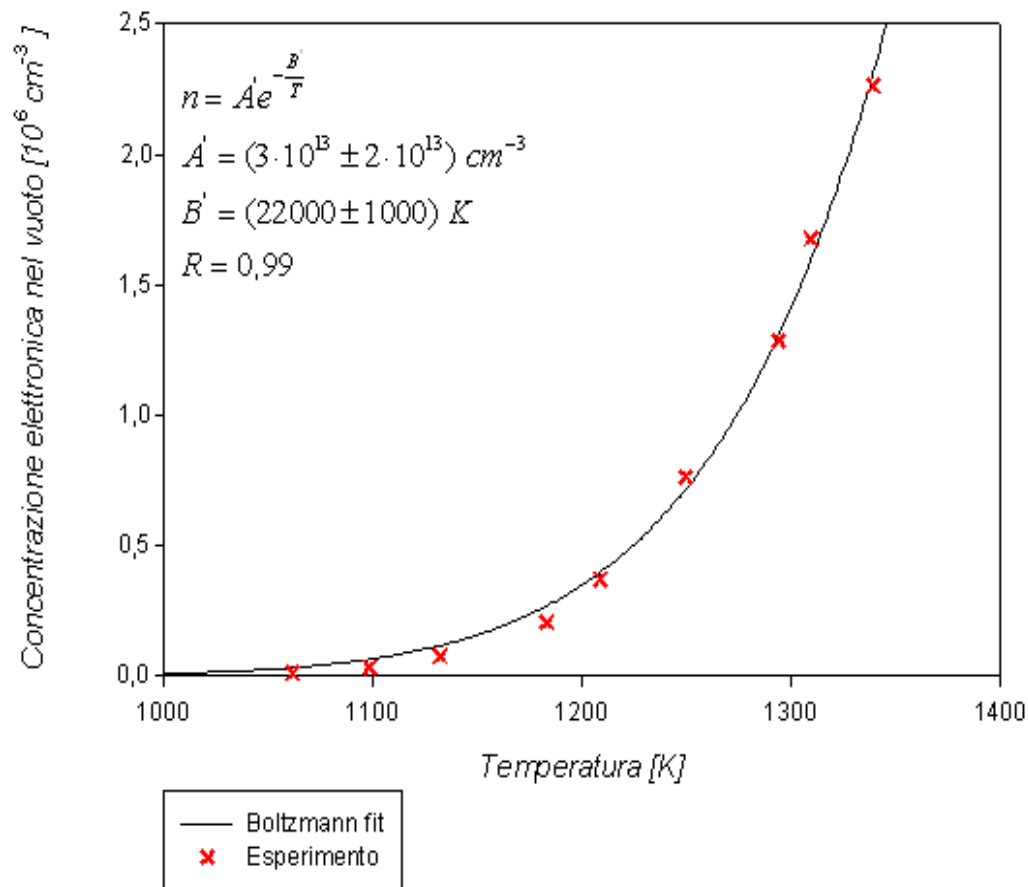
$$B = (\Phi / k) \approx 17400 K.$$

**La sovrastima del lavoro di estrazione ottenuto ( $\Phi \approx 1,7$ )  
dipende dalla sovrastima sulla temperatura.**

# ANALISI DEI DATI SPERIMENTALI

## I risultati

### Fitting concentrazione elettroni vs. temperature



La concentrazione “ $n$ ” degli elettroni può essere ottenuta dalla relazione:

$$j = \rho \langle v \rangle$$

$\langle v \rangle$  Valore medio delle velocità secondo **M. B.**

$$n = \frac{I_{th}}{q S} \sqrt{\frac{2 p m}{k T}}$$

# ANALISI DEI RISULTATI

- I risultati mostrano la dipendenza dal fattore di Boltzmann
- Il lavoro di estrazione risulta superiore a quello tabulato

## Approfondimenti

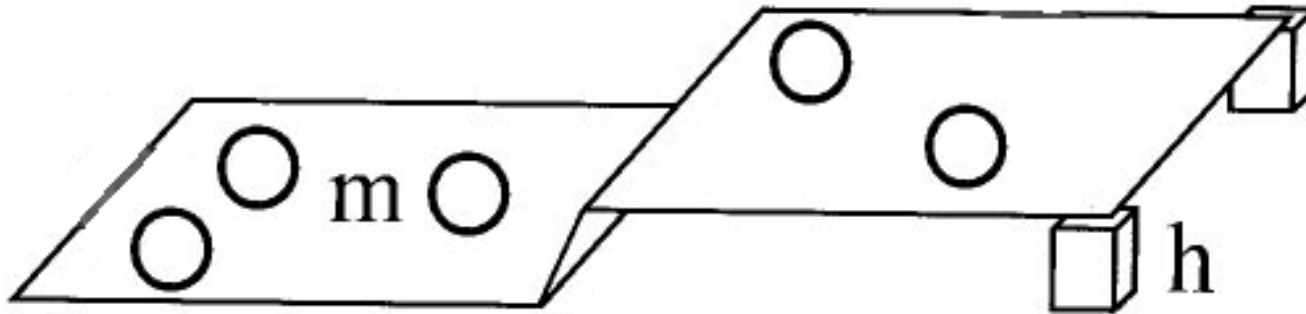
- ✓ Applicazione della legge di Richardson
- ✓ Stima della temperatura attraverso la legge di Stefan

$$I = AT^2 e^{-\frac{\phi}{kT}}$$

$$T^4 = \frac{VI}{\sigma(\epsilon S)}$$

# MODELLO MECCANICO

- ✓ Sistema a due livelli
- ✓ Dinamica molecolare
- ✓ Risoluzione numerica delle equazioni del moto
- ✓ Urti fra le sferette e con le pareti completamente elastici
- ✓ Interazioni fra le sferette dovute soltanto alle collisioni



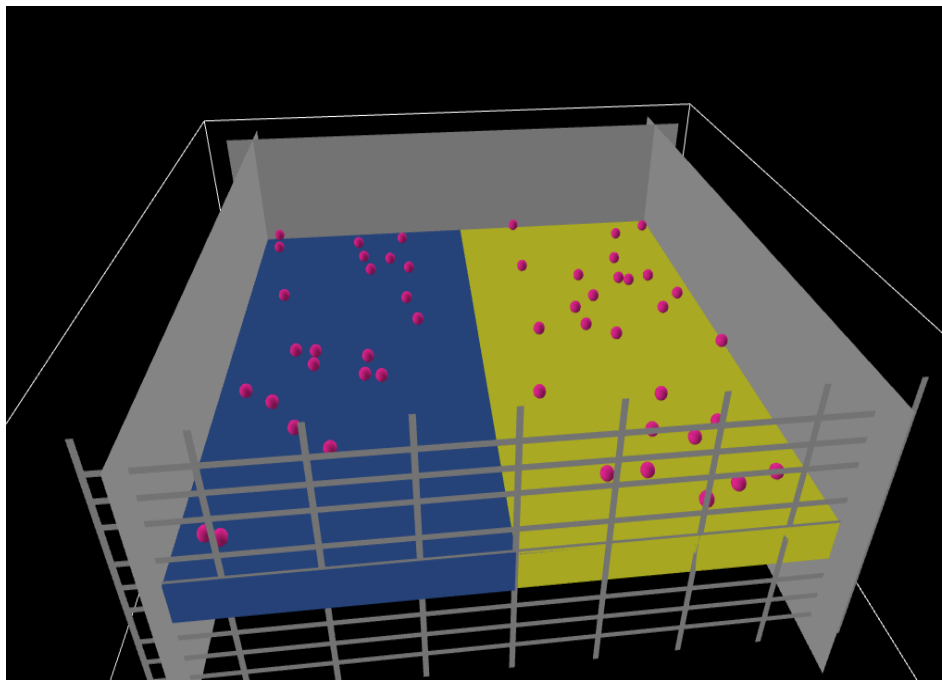


# LA SIMULAZIONE SU NETLOGO 3D

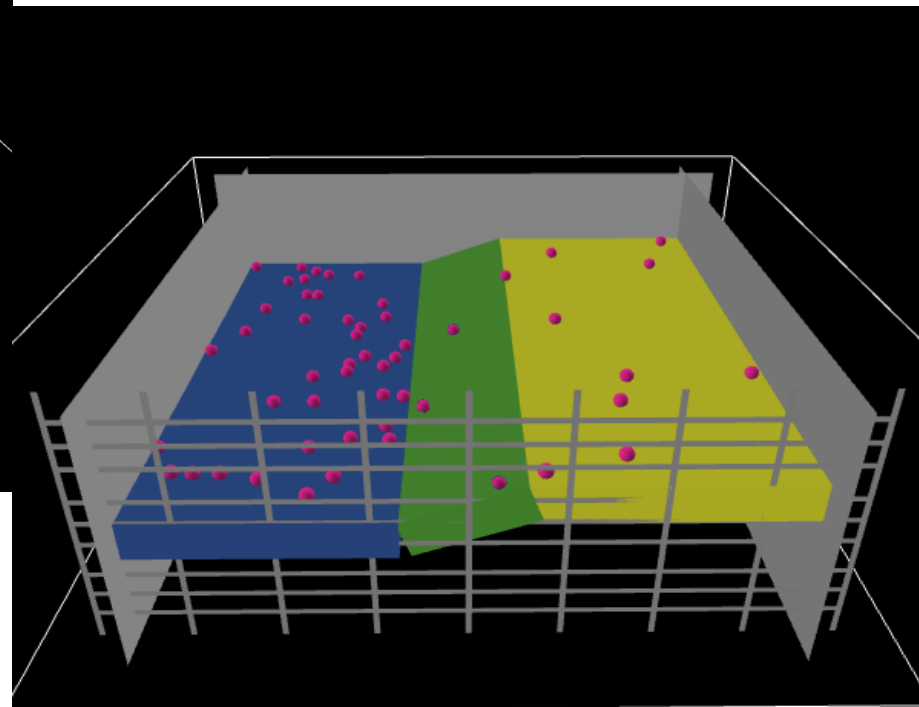
Analisi del moto di sferette rigide in una scatola

3D

**a) Allo stesso livello**  
(rapporto di popolazione circa 1)



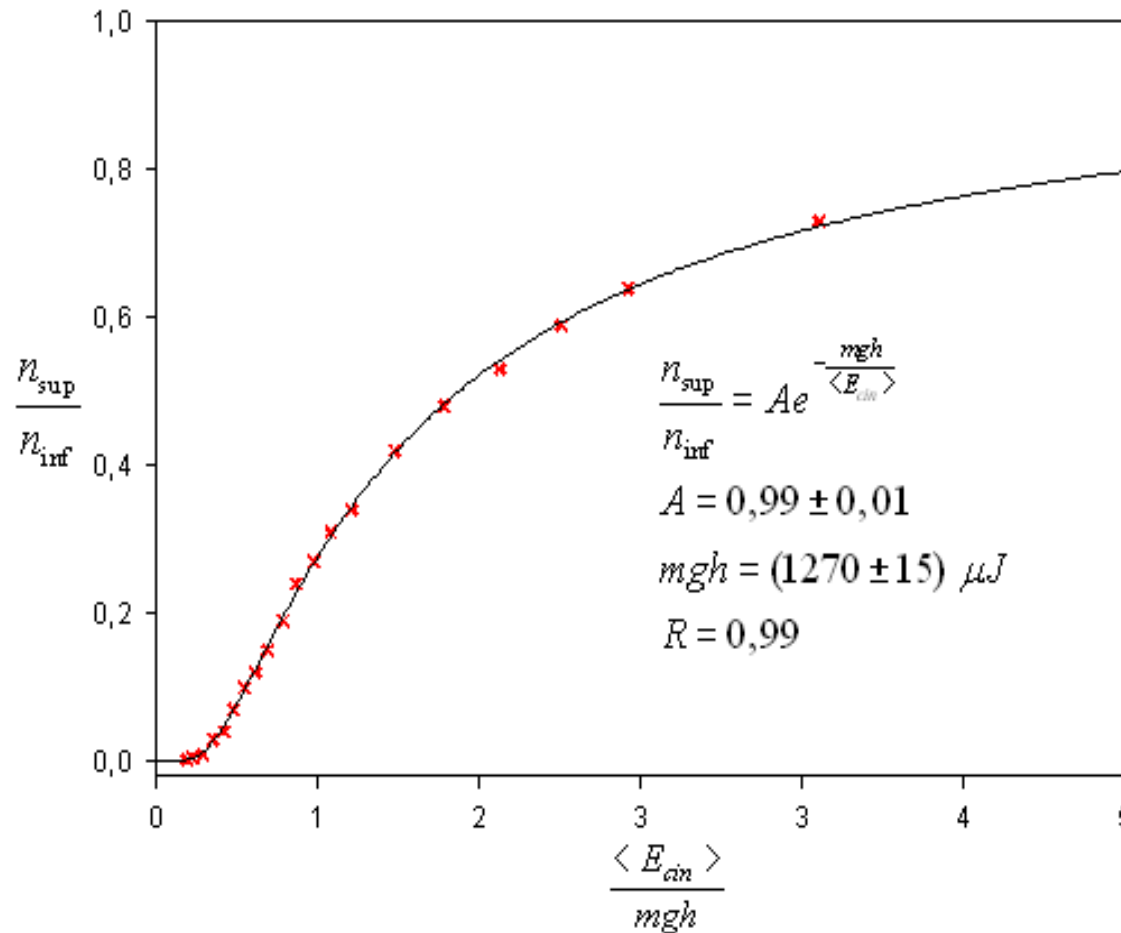
**b) Con un dato dislivello h**  
(rapporto di popolazione circa 0,3)



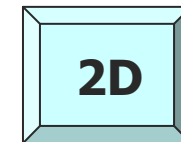
# I RISULTATI DELLA SIMULAZIONE

## NETLOGO 2D

$N = 500$     $h = 4 \text{ cm}$     $m = 3 \text{ gr}$



× Simulazione  
— Boltzmann fit



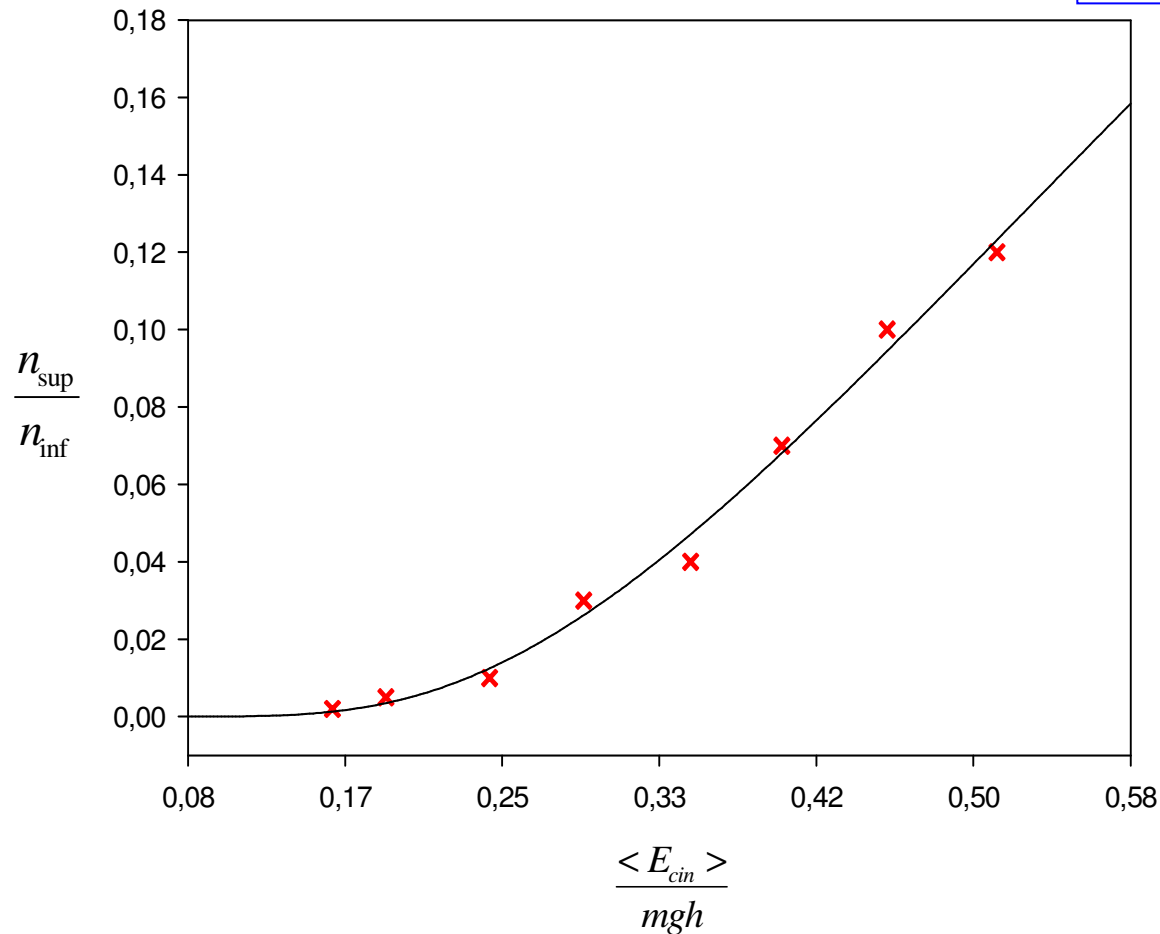
$\frac{n_{sup}}{n_{inf}}$

**Rapporto  
delle  
popolazioni**

# I RISULTATI DELLA SIMULAZIONE

NETLOGO 2D

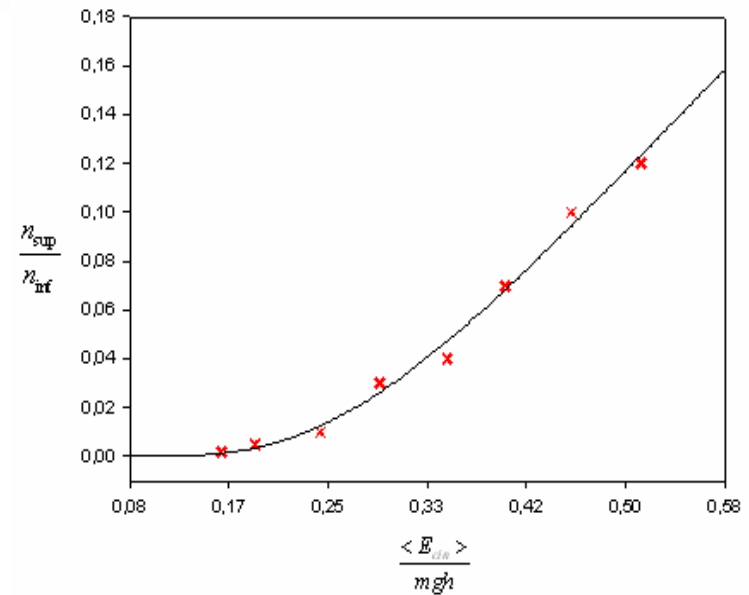
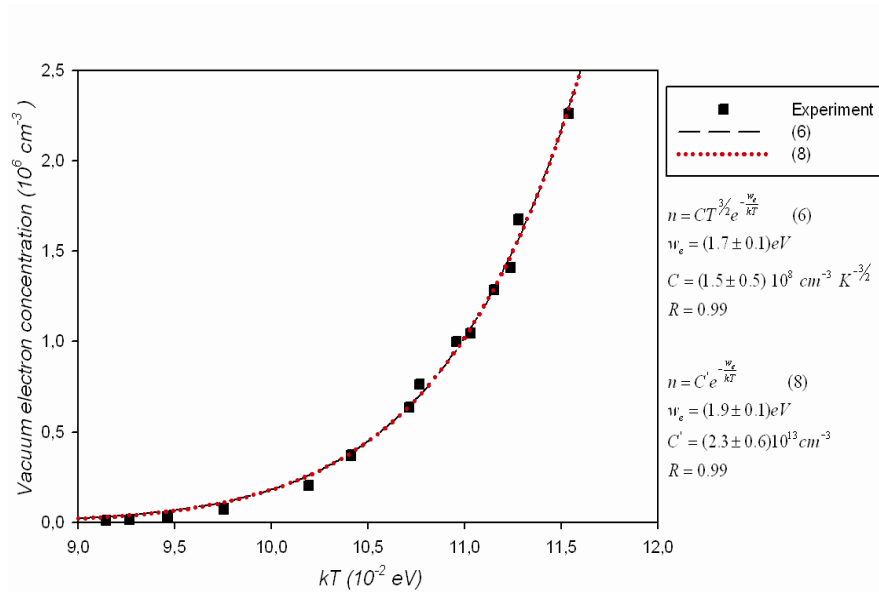
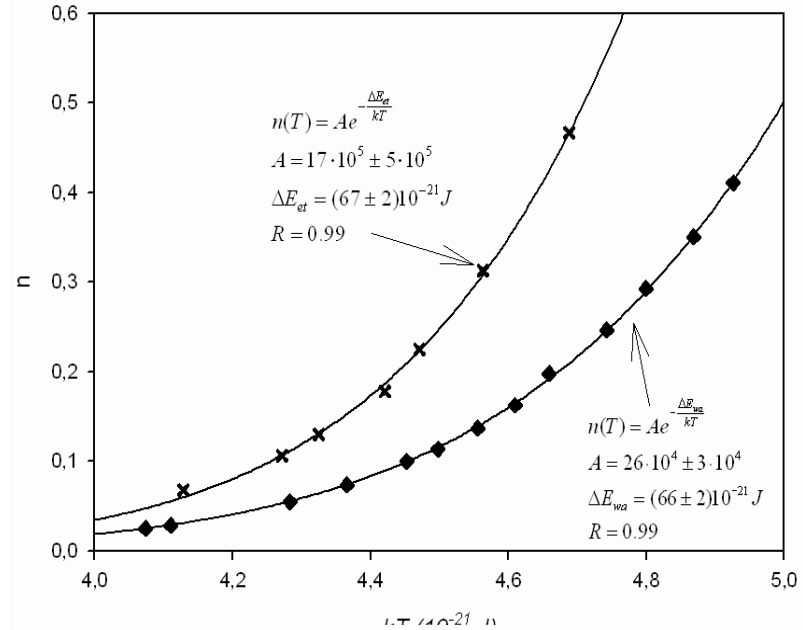
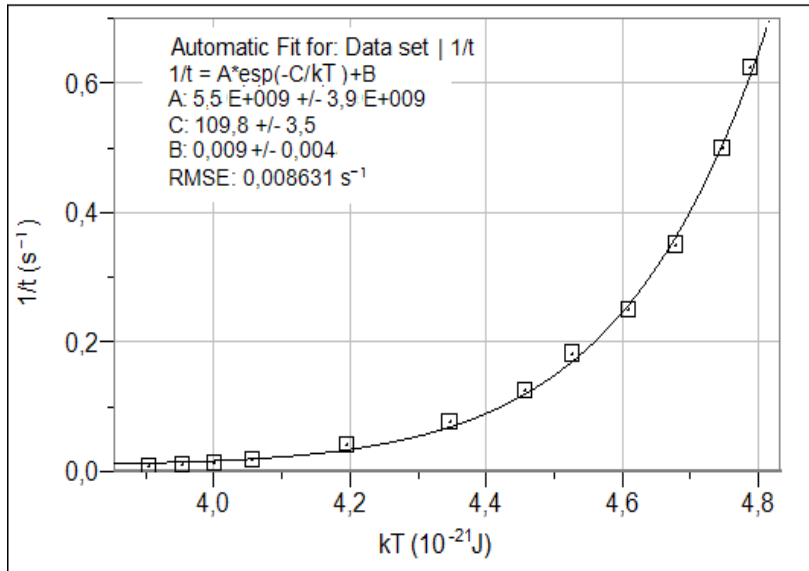
$N = 500$     $h = 4 \text{ cm}$     $m = 3 \text{ gr}$



$$\frac{n_{sup}}{n_{inf}}$$

Rapporto  
delle  
popolazioni

# CONFRONTO



## DEDUZIONE FORMALE

- ✓ Teoria cinetica dei gas
- ✓ Indipendenza dalle condizioni iniziali

$$n(v)dv$$

Numero di particelle con velocità compresa nell'intervallo

$$v, v + dv$$

$$N(v)dv = \frac{2Nv}{\langle v^2 \rangle} e^{-\frac{v^2}{\langle v^2 \rangle}} dv$$

$$n(\varepsilon)d\varepsilon$$

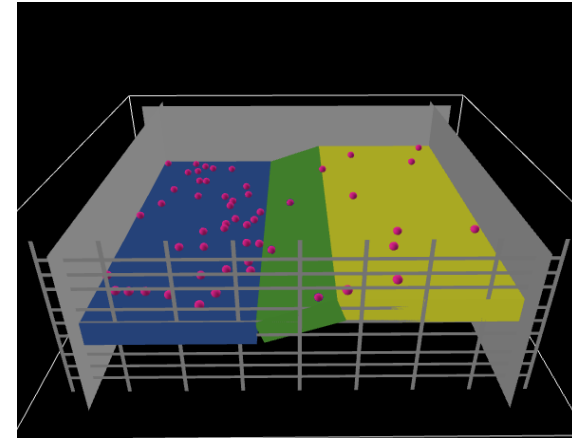
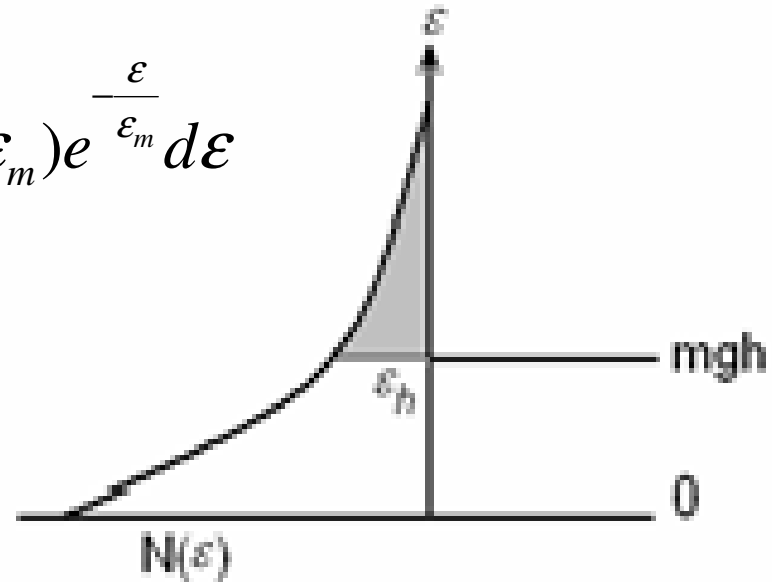
Numero di particelle con energia comprese nell'intervallo

$$\varepsilon, \varepsilon + d\varepsilon$$

$$N(\varepsilon)d\varepsilon = (N / \varepsilon_m) e^{-\frac{\varepsilon}{\varepsilon_m}} d\varepsilon$$

# DEDUZIONE FORMALE

$$N(\varepsilon)d\varepsilon = (N/\varepsilon_m)e^{-\frac{\varepsilon}{\varepsilon_m}}d\varepsilon$$



$P_{12}$

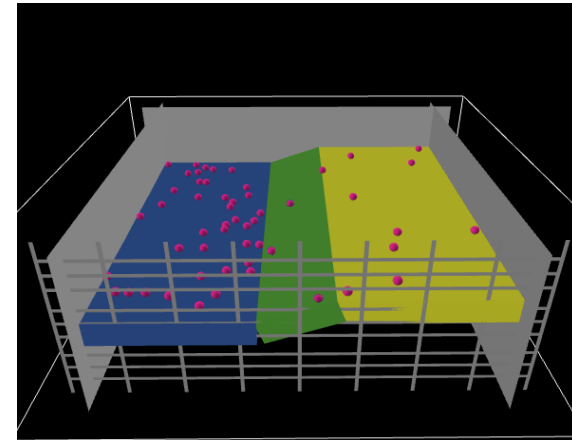
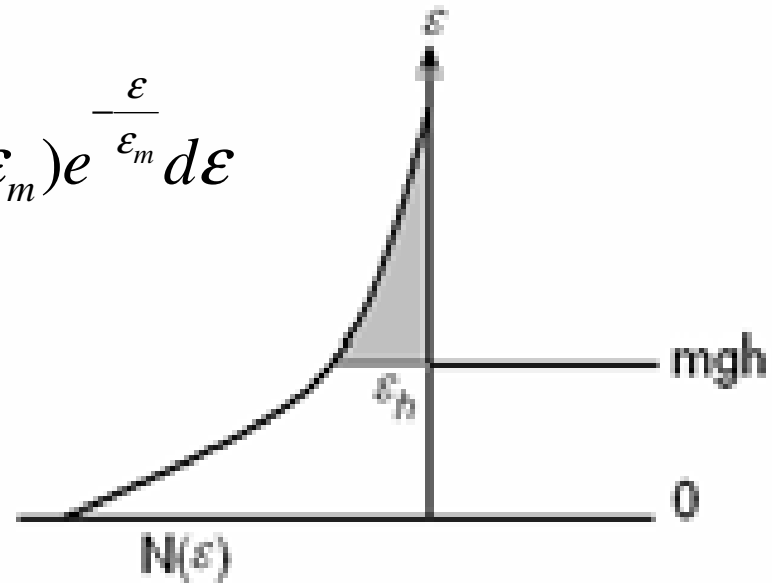
Probabilità di transizione dal livello inferiore a quello superiore

$P_{21}$

Probabilità di transizione dal livello superiore a quello inferiore

# DEDUZIONE FORMALE

$$N(\varepsilon)d\varepsilon = (N/\varepsilon_m)e^{-\frac{\varepsilon}{\varepsilon_m}}d\varepsilon$$



$$P_{12} = \frac{\int_{\varepsilon_2}^{\infty} N(\varepsilon)d\varepsilon}{\int_0^{\infty} N(\varepsilon)d\varepsilon} = \frac{Ne^{-\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_m}}}{N} = e^{-\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_m}}$$

$$P_{21} = \frac{\int_0^{\infty} N(\varepsilon)d\varepsilon}{\int_0^{\infty} N(\varepsilon)d\varepsilon} = 1$$

# DEDUZIONE FORMALE

Bilancio dettegiato

$$N_1 P_{12} = N_2 P_{21} \quad \Rightarrow \quad \frac{N_2}{N_1} = \frac{P_{12}}{P_{21}} = e^{-\frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{kT}}$$

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-\frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{kT}}$$



## PUBBLICAZIONI

- **Battaglia O. R.** , Fazio C (2009). The Boltzmann factor Through experiments and simulations.  
In: vyučovanie Fyziky vo svetle nových poznatkov vedy physics education in the light of new scientific knowledges. Rackova dolina (slovak republic), 14 - 18 ottobre 2009, nitre: mgr. Ján Ondruška, vol. 361, p. 550, isbn/issn: 978-80-8094-496-4
- **Battaglia O. R.** (2009). Modelling thermionic emission by using a two level mechanical system. Nuovo Cimento della società italiana di fisica. C, vol. 31 c, n° 4; p. 591-599, issn:1826-9885, doi: 10.1393/ncc/i2009-10321-0
- **Battaglia O. R.**, Bonura A, Sperandeo-Mineo R. M. (2009). A pedagogical approach to the Boltzmann factor through experiments and simulations.  
European Journal of Physics, vol. 30; p. 1025-1037, issn: 0143-0807, doi: 10.1088/0143-0807/30/5/011

## PRESENTAZIONI A CONGRESSI

- R. M. Sperandeo-Mineo, **O. R. Battaglia** and C. Fazio (2009) *The Module SMe&SMa “Statistical Mechanics & Structure of Matter”*. GIREP-EPEC Conference-Leicester 17-21 August- (in press)
- **O.R. Battaglia**, C. Fazio and I. Guastella: “*An introduction to the Boltzmann Factor by using information technology tools*”. Proceedings of MPTL 14th International Workshop, Udine, IT, 23-25 Sept. 2009
- **O R Battaglia**, I Guastella, R M sperandeo Mineo  
“*Un esperimento sull’emissione termoionica: la distribuzione di Maxwell-Boltzmann applicata al gas di elettroni liberi*”.  
Congresso della Società Italiana di Fisica, Bari, 29 sett – 3 ott 2009