

Calore e clima

Andrea Beraudo

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare - Sezione di Torino

aggiornaMenti
Corso di formazione per insegnanti



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
SEZIONE DI TORINO

Scopo della lezione

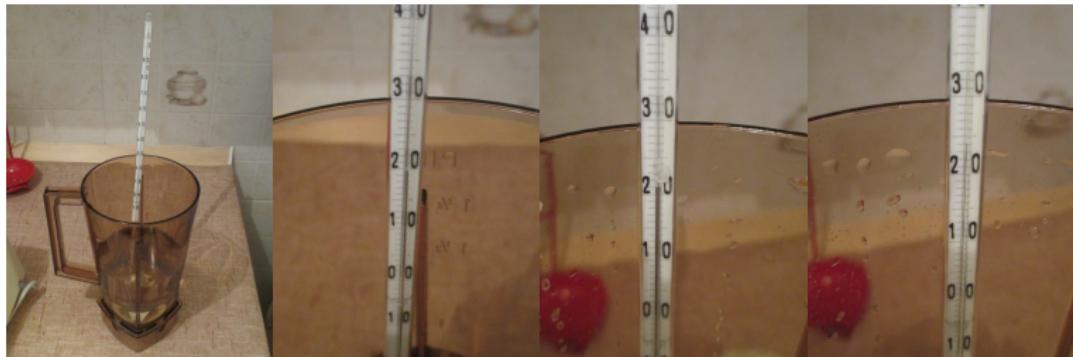
Oggi cercheremo di trovare la risposta, attraverso semplici esperienze, a domande quali:

- Qual è il legame tra movimento delle particelle, calore e temperatura
- Come si propaga il calore e come si raffreddano i corpi?
- Cos'è l'effetto serra e perché è fondamentale/rischioso per la vita sul nostro pianeta?
- Cosa sono le nuvole, come si formano, perché sono bianche?
- Qual è il ciclo dell'acqua sul nostro pianeta?

Cercheremo per prima cosa di *osservare* i diversi **fenomeni** e poi di **darne una interpretazione teorica**. Tutti gli esperimenti saranno fatti con materiali e oggetti molto semplici, che potrete trovare anche a casa, dove potrete divertirvi a ripeterli davanti ai vostri familiari.

Il frullatore che scalda l'acqua

Occorrente: frullatore con un po' d'acqua (1/2 litro) e termometro



- Misurate la temperatura dell'acqua (19.5° C)
- Azionate il frullatore per 30 s e misurate la temperatura (21° C)
- Azionate il frullatore per 60 s e misurate la temperatura (24° C)

Il **movimento ordinato** delle pale del frullatore (**energia meccanica**) si è trasferito (*dissipato*) nel **movimento caotico** (**energia termica**) delle **molecole d'acqua**: la temperatura è aumentata.

Le calorie degli alimenti e le proprietà dell'acqua

L'esperimento appena descritto è stato quello che, con i mezzi dell'epoca, ha consentito al fisico **Joule** nel 1850 di stabilire l'*equivalente meccanico del calore*. In suo onore in fisica l'unità di misura dell'energia è il Joule (simbolo: J).

Le calorie degli alimenti e le proprietà dell'acqua

L'esperimento appena descritto è stato quello che, con i mezzi dell'epoca, ha consentito al fisico **Joule** nel 1850 di stabilire l'*equivalente meccanico del calore*. In suo onore in fisica l'unità di misura dell'energia è il Joule (simbolo: J).

Nello studio del calore, ma anche in biologia e in nutrizione (etichette degli alimenti!), l'energia viene spesso misurata in **chilocalorie** (simbolo: Cal o kcal). La chilocaloria è definita come l'**energia necessaria per aumentare di 1 grado la temperatura di 1 kg di acqua** (**1 Cal = 4186 J**).

Le calorie degli alimenti e le proprietà dell'acqua

L'esperimento appena descritto è stato quello che, con i mezzi dell'epoca, ha consentito al fisico Joule nel 1850 di stabilire l'*equivalente meccanico del calore*. In suo onore in fisica l'*unità di misura dell'energia* è il Joule (simbolo: J).

Nello studio del calore, ma anche in biologia e in nutrizione (etichette degli alimenti!), l'energia viene spesso misurata in **chilocalorie** (simbolo: Cal o kcal). La chilocaloria è definita come l'**energia necessaria per aumentare di 1 grado la temperatura di 1 kg di acqua** ($1 \text{ Cal} = 4186 \text{ J}$).

Se vogliamo stimare a cosa ciò corrisponda *in termini in energia meccanica* (cioè di fatica fisica che dovremmo fare!) si trova che essa è pari all'**energia necessaria per sollevare una massa di 1 kg di 427 metri** (da qui alla basilica di Superga); per una persona di 42.7 kg di peso equivale all'**energia spesa per superare un dislivello di 10 m**, cioè grosso modo a fare 3 piani di scale. **Per aumentare di un solo grado la temperatura di un kg di acqua bisogna spendere una quantità di energia molto grande!** Per questo l'**acqua è usata come termostato** per mantenere costante la temperatura di oggetti o ambienti o negli impianti di raffreddamento.

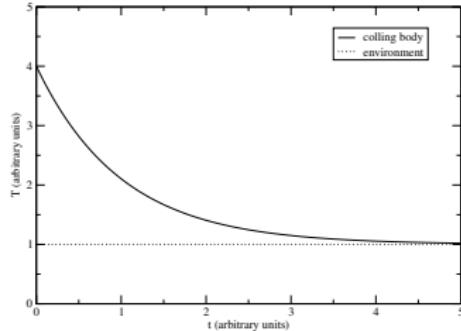
Il trasporto del calore

Nella vita quotidiana incontriamo situazioni in cui si viene a creare localmente un eccesso di temperatura, ad esempio un corpo più caldo posto in un ambiente più freddo o con una sua parte posta a contatto con una sorgente di calore. La temperatura localmente più elevata riflette un eccesso di energia cinetica associata al moto disordinato delle particelle (atomi, molecole, ioni, elettroni...) del corpo in questione (energia termica). Tale **eccesso di energia termica** tende a **ridistribuirsi nello spazio** fino a raggiungere una situazione in cui, in assenza di sorgenti di calore, tutti i corpi (e anche la radiazione elettromagnetica) saranno alla stessa temperatura: si parla allora di **equilibrio termico**.

L'energia può venire trasportata in tre modi diversi:

- Per **conduzione**, in seguito alle **collisioni** e alle **vibrazioni reticolari**;
- Per **convezione**, con il **trasporto diretto di materia** dalle regioni più calde a quelle più fredde;
- Per **irraggiamento**, attraverso la **radiazione di onde elettromagnetiche** (a temperatura ambiente nella regione dell'infrarosso).

La legge della conduzione



Versa dell'acqua molto calda in una bottiglia e misura come evolve la sua temperatura nel tempo: inizialmente decresce molto velocemente per poi farlo sempre più lentamente man mano che la sua temperatura di avvicina a quella dell'ambiente circostante. Questo discende dalla legge della conduzione del calore (qui scritta rispetto alla direzione x)

$$q_x = -\kappa(dT/dx) \quad \rightarrow \quad \Delta T(t) = \Delta T(0)e^{-t/\tau}$$

dove q_x è il **flusso di energia lungo la direzione x** (W/m^2), κ la **conducibilità termica** ($\text{W}/(\text{mK})$) del materiale: **man mano che il gradiente di temperatura diminuisce diminuisce anche il flusso di calore!**

Conduttori e isolanti

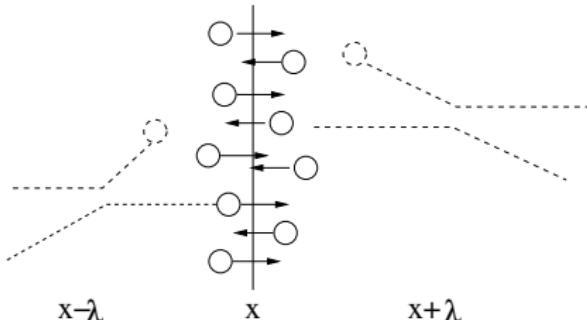
Con un semplice esperimento si può verificare che alcuni materiali conducono il calore meglio di altri:



- I metalli sono degli ottimi conduttori di calore
- Legno e plastica sono invece degli isolanti termici

La ragione per cui i metalli conducono bene il calore (e l'elettricità) va cercata nella loro struttura microscopica. I metalli possono essere descritti come un reticolo di ioni positivi (e.g. Fe^{2+} , Al^{3+}) immersi in un mare di elettroni molto poco legati (elettroni di conduzione) responsabili della conduzione del calore (e della corrente elettrica). Negli isolanti il calore si propaga invece attraverso le vibrazioni reticolari degli ioni intorno alle loro posizioni di equilibrio.

La legge della conduzione: approccio microscopico



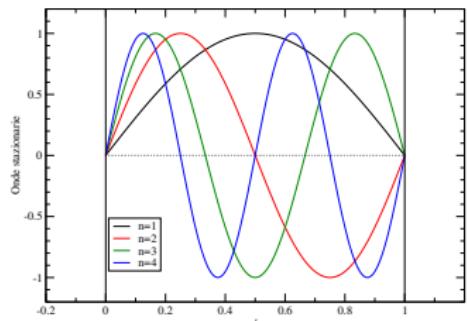
Una derivazione microscopica della legge della conduzione può essere fatta nel caso di un gas debolmente interagente. Consideriamo il flusso di energia termica attraverso una superficie ortogonale all'asse x . Abbiamo

$$\begin{aligned} q_x &= \frac{1}{2} n \bar{v}_x [\epsilon(x - \lambda_{\text{mfp}}) - \epsilon(x + \lambda_{\text{mfp}})] = \frac{1}{2} n \bar{v}_x \frac{d\epsilon}{dx} (-2\lambda_{\text{mfp}}) \\ &= -\frac{\bar{v}}{\sqrt{3}} (n \lambda_{\text{mfp}}) \frac{d\epsilon}{dT} \frac{\partial T}{\partial x} = -\frac{\bar{v}}{\sqrt{3}} c \frac{\partial T}{\partial x} \equiv -\kappa \frac{\partial T}{\partial x}, \end{aligned}$$

dove $c = (3/2)K_B$ è il *calore specifico per particella* e $\bar{v} \equiv \sqrt{3K_B T/M}$ è la velocità quadratica media delle particelle dovuta all'agitazione termica.

Pertanto la **conducibilità termica aumenta con la temperatura**.

La conduzione del calore in un metallo



La **meccanica quantistica** stabilisce che una particella di quantità di moto p confinata in una regione di spazio (*buca di potenziale*) può essere descritta da **un'onda stazionaria** di lunghezza d'onda λ , secondo la **relazione di de-Broglie** $p = h/\lambda$, dove h è la costante di Planck.

La condizione da rispettare è, come per la corda di una chitarra, che **la dimensione a della buca contenga un numero intero di mezze lunghezze d'onda**

$$a = n \frac{\lambda}{2} \quad (n = 1, 2, 3\dots) \quad \rightarrow \quad k \equiv \frac{2\pi}{\lambda} = n \frac{\pi}{a}$$

Pertanto, per la quantità di moto di una particella (in 3 dimensioni) otteniamo la **condizione di quantizzazione**

$$\vec{p} = \hbar \vec{k} = \hbar \left(n_x \frac{\pi}{a_x}, n_y \frac{\pi}{a_y}, n_z \frac{\pi}{a_z} \right)$$

$n_x, n_y, n_z\dots$ sono i numeri quantici della particella.

La conduzione del calore in un metallo

A condurre il calore (e la corrente elettrica) in un metallo sono gli elettroni. Gli elettroni in meccanica quantistica sono particelle identiche che obbediscono al principio di esclusione di Pauli: non posso avere due elettroni con gli stessi numeri quantici. Pertanto, poiché gli elettroni hanno spin 1/2 che può essere orientato in alto o in basso, in uno stesso livello identificato da (n_x, n_y, n_z) posso avere al massimo due elettroni: uno con spin +1/2 e uno con spin -1/2.

Se ora devo sistemare un numero di Avogadro di elettroni, sarò costretto ad andare a riempire livelli energetici ($E = \vec{p}^2/2m_e$) sempre più alti, caratterizzati da valori sempre più grandi di (n_x, n_y, n_z) . L'energia del più alto livello occupato è detta *energia di Fermi* e consente di ricavare la *velocità di Fermi* degli elettroni che occupano questo livello:

$$E_F = \frac{p_F^2}{2m_e} = \frac{1}{2} m_e v_F^2 \quad \rightarrow \quad \frac{v_F^2}{c^2} = \frac{2E_F}{m_e c^2}$$

Per un metallo tipicamente si ha $E_F \approx 10$ eV. La massa di un elettrone è $m_e c^2 = 0.511$ MeV. Si ottiene $v_F \approx 2 \cdot 10^6$ eV: è una velocità enorme (circa un centesimo della velocità della luce). È la velocità degli elettroni di conduzione a spiegare la conducibilità termica dei metalli

La convezione

La convezione è un modo per trasportare energia (termica) da una regione più calda a una più fredda attraverso il **trasporto diretto di materia**. È pertanto tipica di gas e liquidi. È causa dell'instabilità che si verifica quando **una regione di fluido meno denso si trova al di sotto di una regione di fluido più denso**. Poichè in generale la densità di un liquido decresce con la temperatura possiamo visualizzare il fenomeno con il seguente esperimento



La convezione



- Riempì due bicchieri di acqua fredda e due bicchieri di acqua bollente, con un po' di colorante alimentare;

La convezione



- Riempì due bicchieri di acqua fredda e due bicchieri di acqua bollente, con un po' di colorante alimentare;
- Capovolgi il bicchiere di acqua fredda su quello di acqua calda, tenendoli separati con una carta da gioco: quando rimuovi la carta a causa della forza di gravità l'acqua calda (blu), meno densa, tende a salire e quella fredda, più densa a scendere;

La convezione



- Riempì due bicchieri di acqua fredda e due bicchieri di acqua bollente, con un po' di colorante alimentare;
- Capovolgi il bicchiere di acqua fredda su quello di acqua calda, tenendoli separati con una carta da gioco: quando rimuovi la carta a causa della forza di gravità l'acqua calda (blu), meno densa, tende a salire e quella fredda, più densa a scendere;
- Ripeti l'esperimento invertendo la configurazione: l'acqua calda rimane in alto e quella fredda in basso, senza mescolarsi. Succede lo stesso **in atmosfera** nei giorni di **inversione termica**, quando l'aria più calda negli strati alti provoca il **ristagno dello smog!**

La fisica della convezione

Poiché la convezione è un importantissimo meccanismo di trasporto di energia termica in natura (in atmosfera, negli oceani, nel mantello terrestre, nel sole...) e poiché molto spesso ne viene data una descrizione superficiale, vale la pena esaminare in dettaglio quali sono le condizioni che danno luogo alla convezione. Lo faremo partendo dallo studio di una mole di gas, ricordando i principi della termodinamica e l'equazione di stato dei gas (Q calore, U energia interna, V volume di una mole):

$$\delta Q = dU + pdV \quad \text{e} \quad pV = RT$$

Per una trasformazione a *volume costante* abbiamo

$$\delta Q = dU \equiv C_v dT \quad \rightarrow \quad dU \equiv C_v dT$$

Per una trasformazione a *pressione costante* abbiamo

$$\delta Q = C_v dT + RdT \equiv C_p dT \quad \rightarrow \quad C_p = C_v + R$$

Il calore specifico *molare* a pressione costante è pertanto maggiore di quello a volume costante, perché parte del calore va non ad aumentare l'energia termica, ma a compiere lavoro. Si definisce $\gamma \equiv C_p/C_v > 1$.

La fisica della convezione

Particolare importanza per lo studio della convezione hanno le trasformazioni adiabatiche, cioè quelle che avvengono senza scambio di calore ($\delta Q=0$) e quindi senza aumento di entropia ($\delta Q=T dS$).

Dall'equazione di stato dei gas ideali abbiamo

$$0 = C_v dT + RT \frac{dV}{V} \quad \rightarrow \quad C_v \frac{dT}{T} + R \frac{dV}{V} = 0$$

Integrando abbiamo quindi

$$\ln T^{C_v} + \ln V^R = \text{Const} \quad \rightarrow \quad TV^{R/C_v} = TV^{(C_p - C_v)/C_v} = \text{Const}$$

Esprimendo il tutto in termini del coefficiente $\gamma \equiv C_p/C_v$, si trova pertanto che durante una trasformazione adiabatica temperatura, volume (o densità $\rho \equiv M/V$, dove M è la massa di una mole) e pressione evolvono in modo da mantenere costanti le combinazioni (usando l'equazione di stato per una mole di gas $pV = RT$)

$$TV^{\gamma-1} = \text{Const}, \quad PV^\gamma = \text{Const}, \quad pT^{-\gamma/(\gamma-1)} = \text{Const}$$

La fisica della convezione

Possiamo ora seguire il destino di una **mole di gas**, che immaginiamo racchiusa in un **palloncino** che non consente lo scambio di particelle e calore con l'esterno, **spostata nell'atmosfera a una diversa quota rispetto alla posizione di partenza**. Perchè le pareti del palloncino siano in equilibrio **la pressione del gas all'interno** deve essere **uguale a quella dell'atmosfera circostante**. Salendo di quota la pressione atmosferica diminuisce e pertanto anche quella all'interno del palloncino. Poichè abbiamo supposto che il **gas nel palloncino evolva adiabaticamente** ($\delta Q=0$) la sua densità nel salire di quota deve diminuire in modo da mantenere il rapporto **P/ρ^γ costante**: il palloncino salendo di quota si **espande!** Inoltre **la sua temperatura diminuisce**, poiché per una trasformazione adiabatica anche il rapporto **$T/\rho^{\gamma-1}$ deve rimanere costante**. Cosa succederà al palloncino una volta lasciato andare? Dipende dalla sua densità rispetto a quella dell'atmosfera circostante. Se la sua densità è maggiore allora sarà spinto di nuovo in basso, se è minore continuerà a salire: si parla allora di **instabilità convettiva**. **Sotto quali condizioni si verifica tale instabilità?**

La fisica della convezione

Vediamo come evolve con la quota la densità dell'atmosfera nel **limite adiabatico**, ovvero nel caso in cui l'**entropia per mole di gas** sia costante: la densità dell'aria circostante sarà allora uguale a quella nel palloncino, che non sentirà alcuna spinta. Perchè un cubetto d'aria sia in equilibrio statico la differenza di pressione deve compensare la gravità:

$$\frac{dP}{dz} = -\rho g \quad \rightarrow \quad -\frac{dP}{dz} = \frac{PM}{RT}g \quad (\text{da } P = \rho RT/M)$$

Per una trasformazione adiabatica abbiamo, differenziando

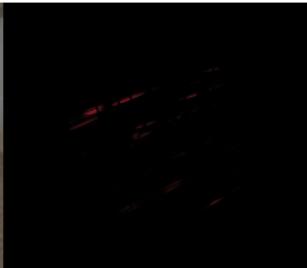
$$\frac{P}{T^{\gamma/(\gamma-1)}} = \text{Const} \quad \rightarrow \quad dP = \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{P}{T} dT$$

Pertanto

$$-\frac{dT}{dz} \frac{\gamma}{\gamma-1} = \frac{gM}{R} \quad \rightarrow \quad -\frac{dT}{dz} = \frac{g}{C_p} \quad (\text{dove } C_p \equiv \mathcal{C}_p/M)$$

Nel caso in cui il gradiente di temperatura sia in modulo maggiore di tale valore critico, $|dT/dz| > g/C_p \approx 10^\circ\text{C}/\text{km}$, la densità dell'aria nel palloncino sarà minore di quella circostante e su di essa agirà una **spinta ascensionale**: si parla allora di **instabilità convettiva**.

La radiazione termica dei corpi

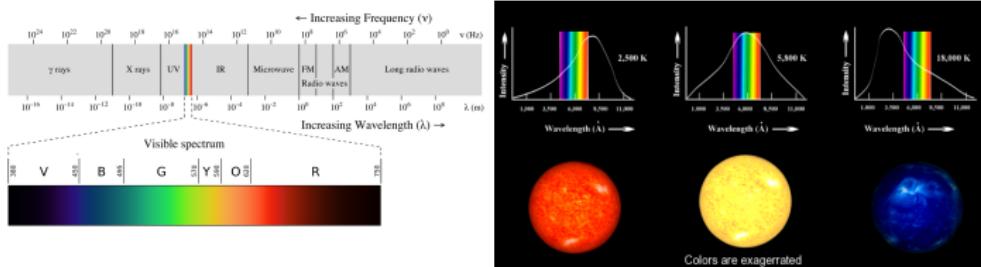


Accendendo un tostapane le sue resistenze, percorse da corrente elettrica, si scaldano, raggiungendo anche temperature intorno al migliaio di gradi, ed emettono una luce rossastra. In un altoforno si raggiungono temperature ancora maggiori ($T \approx 2000$ K) ed esso irradia una luce di colore tendente al giallo. Da queste osservazioni impariamo che

- i corpi caldi emettono onde elettromagnetiche irradiando energia con un'intensità (W/m^2) $I = \sigma T^4$ (*legge di Stefan-Boltzmann*)
- il colore (i.e. la lunghezza d'onda dominante) della radiazione emessa dipende dalla temperatura $\lambda_{\max} \sim 1/T$ (*legge di Wien*)

La stessa legge descrive l'**energia irradiata dalla superficie incandescente delle stelle**, con colori dal rosso all'azzurro.

La radiazione termica dei corpi

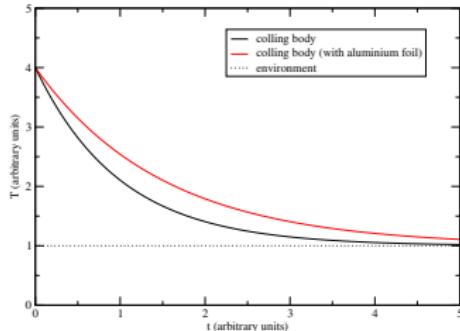


Accendendo un tostapane le sue resistenze, percorse da corrente elettrica, si scaldano, raggiungendo anche temperature intorno al migliaio di gradi, ed emettono una luce rossastra. In un altoforno si raggiungono temperature ancora maggiori ($T \approx 2000$ K) ed esso irradia una luce di colore tendente al giallo. Da queste osservazioni impariamo che

- i corpi caldi emettono onde elettromagnetiche irradiando energia con un'intensità (W/m^2) $I = \sigma T^4$ (*legge di Stefan-Boltzmann*)
- il colore (i.e. la lunghezza d'onda dominante) della radiazione emessa dipende dalla temperatura $\lambda_{\max} \sim 1/T$ (*legge di Wien*)

La stessa legge descrive l'**energia irradiata dalla superficie incandescente delle stelle**, con colori dal rosso all'azzurro.

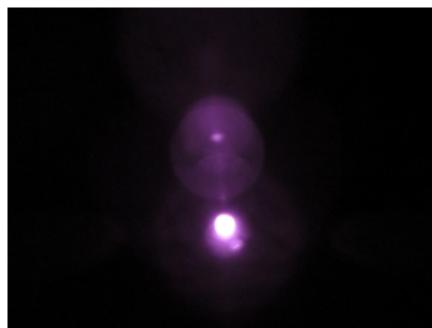
La radiazione termica dei corpi



Prova a ripetere la misura del tempo di raffreddamento dell'acqua **avvolgendo la bottiglia con della pellicola di alluminio: l'acqua si raffredda più lentamente.** La cosa non può certamente essere dovuta allo spessore del foglio di alluminio, che è sottilissimo. Cosa ostacola allora il passaggio di energia dall'acqua calda all'ambiente circostante a una temperatura inferiore?

La radiazione termica dei corpi

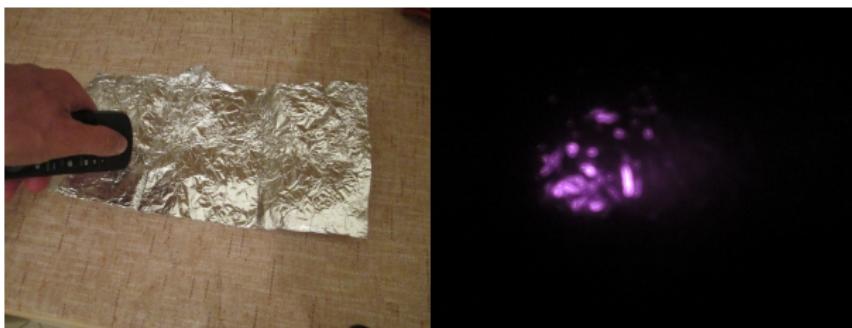
Tutti i corpi a temperature sopra lo zero assoluto emettono in realtà onde elettromagnetiche. A **temperatura ambiente** ($T \approx 300$ K) la *legge di Wien* $\lambda_{\text{max}} \sim 1/T$ implica che la radiazione emessa sta nella regione dell'**infrarosso**. La luce infrarossa è quella emessa, ad esempio da un telecomando, che non è in grado di eccitare i recettori della nostra retina, ma viene rivelata da una fotocamera digitale



Il foglio di alluminio, come tutti i metalli, ha la proprietà di **riflettere le onde elettromagnetiche**, non solo nel visibile, ma anche nell'infrarosso. Avvolgendo la bottiglia con la pellicola di alluminio l'energia irradiata in radiazione IR dall'acqua calda viene pertanto riflessa.

La radiazione termica dei corpi

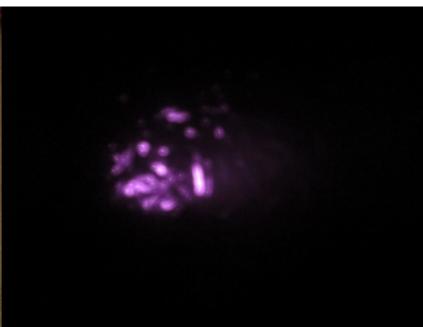
Tutti i corpi a temperature sopra lo zero assoluto emettono in realtà onde elettromagnetiche. A **temperatura ambiente** ($T \approx 300$ K) la *legge di Wien* $\lambda_{\text{max}} \sim 1/T$ implica che la radiazione emessa sta nella regione dell'**infrarosso**. La luce infrarossa è quella emessa, ad esempio da un telecomando, che non è in grado di eccitare i recettori della nostra retina, ma viene rivelata da una fotocamera digitale



Il foglio di alluminio, come tutti i metalli, ha la proprietà di **riflettere le onde elettromagnetiche**, non solo nel visibile, ma anche nell'infrarosso. Avvolgendo la bottiglia con la pellicola di alluminio l'energia irradiata in radiazione IR dall'acqua calda viene pertanto riflessa.

La radiazione termica dei corpi

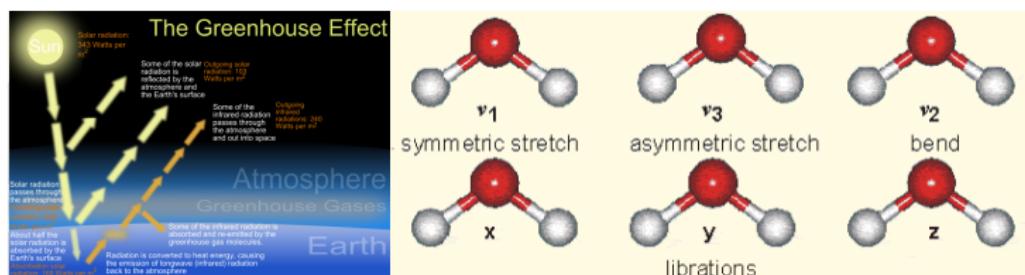
Tutti i corpi a temperature sopra lo zero assoluto emettono in realtà onde elettromagnetiche. A **temperatura ambiente** ($T \approx 300$ K) la *legge di Wien* $\lambda_{\text{max}} \sim 1/T$ implica che la radiazione emessa sta nella regione dell'**infrarosso**. La luce infrarossa è quella emessa, ad esempio da un telecomando, che non è in grado di eccitare i recettori della nostra retina, ma viene rivelata da una fotocamera digitale



Il foglio di alluminio, come tutti i metalli, ha la proprietà di **riflettere le onde elettromagnetiche**, non solo nel visibile, ma anche nell'infrarosso. Avvolgendo la bottiglia con la pellicola di alluminio l'energia irradiata in radiazione IR dall'acqua calda viene pertanto riflessa.

L'effetto serra

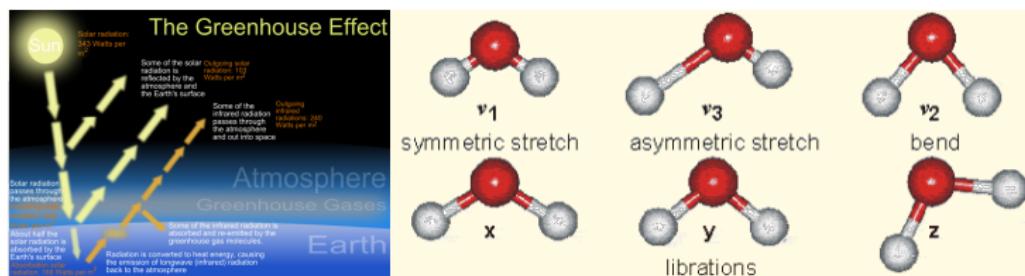
Il ruolo del foglio di alluminio che, riflettendo la radiazione infrarossa, mantiene l'acqua nella bottiglia calda più a lungo è simile a quello dell'**atmosfera** che, **assorbendo la radiazione infrarossa emessa dalla superficie terrestre**, mantiene la Terra a una temperatura più calda di quella che si avrebbe in sua assenza. Descriveremo in modo più quantitativo il fenomeno.



La radiazione termica infrarossa emessa dalla Terra ha la frequenza giusta (come spingere un'altalena alla sua frequenza propria) per **eccitare le vibrazioni di molecole triatomiche** presenti nell'atmosfera (CO_2 , H_2O , O_3) che la assorbono impendendo che si disperda direttamente nello spazio. La radiazione assorbita è poi riemessa in tutte le direzioni.

L'effetto serra

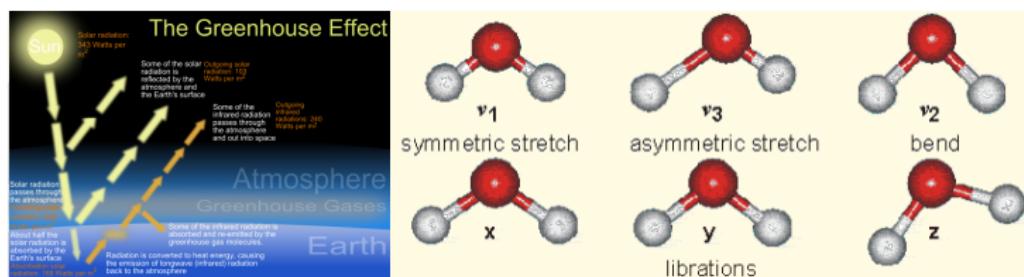
Il ruolo del foglio di alluminio che, riflettendo la radiazione infrarossa, mantiene l'acqua nella bottiglia calda più a lungo è simile a quello dell'**atmosfera** che, **assorbendo la radiazione infrarossa emessa dalla superficie terrestre**, mantiene la Terra a una temperatura più calda di quella che si avrebbe in sua assenza. Descriveremo in modo più quantitativo il fenomeno.



La radiazione termica infrarossa emessa dalla Terra ha la frequenza giusta (come spingere un'altalena alla sua frequenza propria) per **eccitare le vibrazioni di molecole triatomiche** presenti nell'atmosfera (CO₂, H₂O, O₃) che la assorbono impendendo che si disperda direttamente nello spazio. La radiazione assorbita è poi riemessa in tutte le direzioni.

L'effetto serra

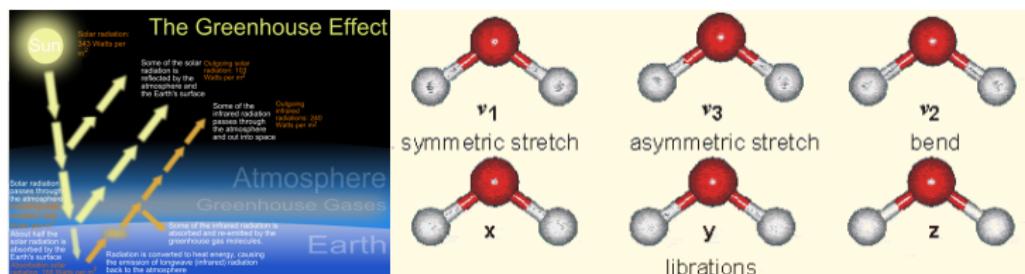
Il ruolo del foglio di alluminio che, riflettendo la radiazione infrarossa, mantiene l'acqua nella bottiglia calda più a lungo è simile a quello dell'**atmosfera** che, **assorbendo la radiazione infrarossa emessa dalla superficie terrestre, mantiene la Terra a una temperatura più calda di quella che si avrebbe in sua assenza.** Descriveremo in modo più quantitativo il fenomeno.



La radiazione termica infrarossa emessa dalla Terra ha la frequenza giusta (come spingere un'altalena alla sua frequenza propria) per **eccitare le vibrazioni di molecole triatomiche** presenti nell'atmosfera (CO_2 , H_2O , O_3) che la assorbono impendendo che si disperda direttamente nello spazio. La radiazione assorbita è poi riemessa in tutte le direzioni.

L'effetto serra

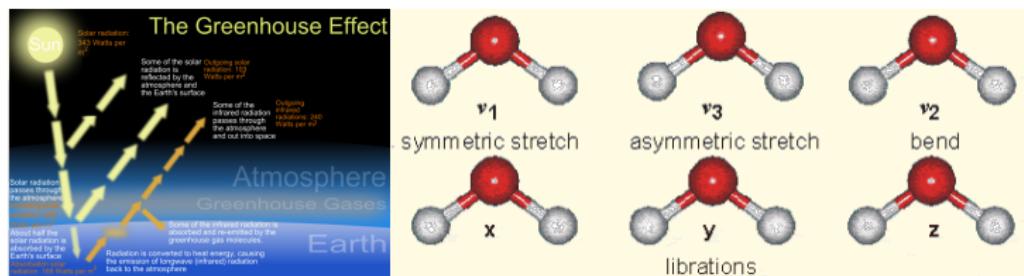
Il ruolo del foglio di alluminio che, riflettendo la radiazione infrarossa, mantiene l'acqua nella bottiglia calda più a lungo è simile a quello dell'**atmosfera** che, **assorbendo la radiazione infrarossa emessa dalla superficie terrestre**, mantiene la Terra a una temperatura più calda di quella che si avrebbe in sua assenza. Descriveremo in modo più quantitativo il fenomeno.



La radiazione termica infrarossa emessa dalla Terra ha la frequenza giusta (come spingere un'altalena alla sua frequenza propria) per **eccitare le vibrazioni di molecole triatomiche** presenti nell'atmosfera (CO_2 , H_2O , O_3) che la assorbono impendendo che si disperda direttamente nello spazio. La radiazione assorbita è poi riemessa in tutte le direzioni.

L'effetto serra

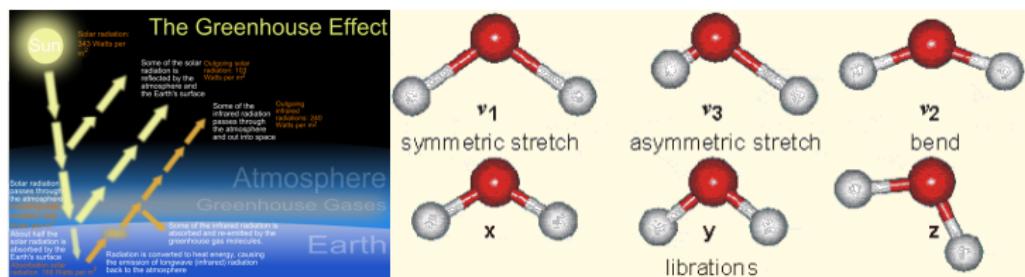
Il ruolo del foglio di alluminio che, riflettendo la radiazione infrarossa, mantiene l'acqua nella bottiglia calda più a lungo è simile a quello dell'**atmosfera** che, **assorbendo la radiazione infrarossa emessa dalla superficie terrestre**, mantiene la Terra a una temperatura più calda di quella che si avrebbe in sua assenza. Descriveremo in modo più quantitativo il fenomeno.



La radiazione termica infrarossa emessa dalla Terra ha la frequenza giusta (come spingere un'altalena alla sua frequenza propria) per **eccitare le vibrazioni di molecole triatomiche** presenti nell'atmosfera (CO_2 , H_2O , O_3) che la assorbono impendendo che si disperda direttamente nello spazio. La radiazione assorbita è poi riemessa in tutte le direzioni.

L'effetto serra

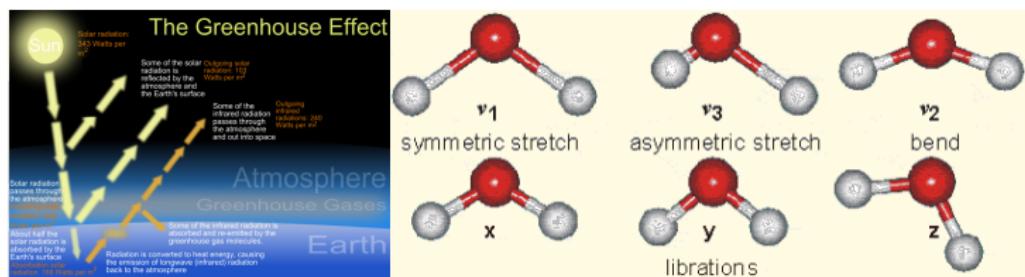
Il ruolo del foglio di alluminio che, riflettendo la radiazione infrarossa, mantiene l'acqua nella bottiglia calda più a lungo è simile a quello dell'**atmosfera** che, **assorbendo la radiazione infrarossa emessa dalla superficie terrestre**, mantiene la Terra a una temperatura più calda di quella che si avrebbe in sua assenza. Descriveremo in modo più quantitativo il fenomeno.



La radiazione termica infrarossa emessa dalla Terra ha la frequenza giusta (come spingere un'altalena alla sua frequenza propria) per **eccitare le vibrazioni di molecole triatomiche** presenti nell'atmosfera (CO_2 , H_2O , O_3) che la assorbono impendendo che si disperda direttamente nello spazio. La radiazione assorbita è poi riemessa in tutte le direzioni.

L'effetto serra

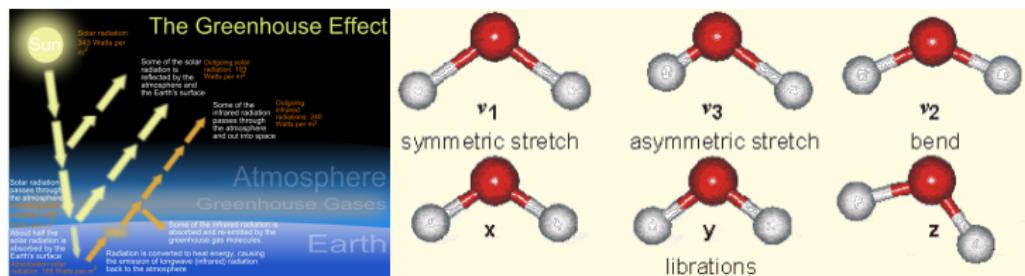
Il ruolo del foglio di alluminio che, riflettendo la radiazione infrarossa, mantiene l'acqua nella bottiglia calda più a lungo è simile a quello dell'**atmosfera** che, **assorbendo la radiazione infrarossa emessa dalla superficie terrestre**, mantiene la Terra a una temperatura più calda di quella che si avrebbe in sua assenza. Descriveremo in modo più quantitativo il fenomeno.



La radiazione termica infrarossa emessa dalla Terra ha la frequenza giusta (come spingere un'altalena alla sua frequenza propria) per **eccitare le vibrazioni di molecole triatomiche** presenti nell'atmosfera (CO_2 , H_2O , O_3) che la assorbono impendendo che si disperda direttamente nello spazio. La radiazione assorbita è poi riemessa in tutte le direzioni.

L'effetto serra

Il ruolo del foglio di alluminio che, riflettendo la radiazione infrarossa, mantiene l'acqua nella bottiglia calda più a lungo è simile a quello dell'**atmosfera** che, **assorbendo la radiazione infrarossa emessa dalla superficie terrestre**, mantiene la Terra a una temperatura più calda di quella che si avrebbe in sua assenza. Descriveremo in modo più quantitativo il fenomeno.



La radiazione termica infrarossa emessa dalla Terra ha la frequenza giusta (come spingere un'altalena alla sua frequenza propria) per **eccitare le vibrazioni di molecole triatomiche** presenti nell'atmosfera (CO_2 , H_2O , O_3) che la assorbono impendendo che si disperda direttamente nello spazio. La radiazione assorbita è poi riemessa in tutte le direzioni.

L'effetto serra: modello matematico

La Terra viene investita da un **flusso di energia proveniente dal sole**, nella forma di onde elettromagnetiche in un intervallo di lunghezze d'onda concentrato attorno alla **luce visibile** (400 – 700 nm), corrispondente alla **radiazione termica della superficie solare**, a una temperatura $T_{\text{sun}} \approx 5800$ K (all'interno del sole la temperatura deve essere invece di milioni di gradi per innescare le reazioni termonucleari). Tale flusso di energia è quantificato dalla **costante solare** $S_0 = 1366 \text{ W/m}^2$, corrispondente all'energia per unità di tempo che attraversa la superficie unitaria posta ortogonalmente alla direzione dei raggi. Poichè la **sezione trasversa** della Terra ortogonale al sole è πR^2 , ma la **superficie terrestre** è $4\pi R^2$, per calcolare il flusso incidente sulla superficie terrestre tale numero va diviso per un fattore 4. Inoltre una frazione $\alpha \approx 0.3$ di tale radiazione visibile è **riflessa verso lo spazio** (atmosfera è trasparente alla luce visibile e la lascia scappare!) da nuvole, ghiacci, superficie chiare... e pertanto solo una frazione $(1 - \alpha) \approx 0.7$ può contribuire al **riscaldamento del pianeta**.

L'effetto serra: modello matematico

La radiazione termica emessa dalla **superficie terrestre** può essere descritta con buona approssimazione come quella di un **corpo nero** con un flusso $F_{\text{surf}} = \sigma T_{\text{surf}}^4$.

Iniziamo a considerare cosa succederebbe nel caso la **Terra** fosse priva di **atmosfera**. Perchè la Terra resti a una temperatura costante si deve raggiungere una situazione di equilibrio tra il **flusso di energia** in arrivo dal sole e la **radiazione termica riemessa dalla Terra**. Possiamo così identificare una **temperatura efficace** T_{eff} : quella che avrebbe la Terra in assenza di atmosfera:

$$\frac{1}{4}S_0(1 - \alpha) - \sigma T_{\text{eff}}^4 = 0 \quad \rightarrow \quad T_{\text{eff}} = \left(\frac{S_0(1 - \alpha)}{4\sigma} \right)^{1/4} \approx 255 \text{ K} \approx -18^\circ\text{C}$$

In assenza di atmosfera, che assorbe parte della radiazione termica emessa dalla superficie terrestre, **la temperatura media della Terra sarebbe bassissima**, tale da non consentire la vita.

L'effetto serra: modello matematico

L'atmosfera assorbe parte della radiazione termica emessa (nell'infrarosso) dalla superficie terrestre, si riscalda, e a sua volta riemette radiazione termica in tutte le direzioni (verso l'alto e verso il basso), in principio a una temperatura differente. Essendo $\epsilon \approx 0.78$ la frazione di energia assorbita dall'atmosfera, uguagliando il flussi entranti e uscenti abbiamo

- sopra l'atmosfera:

$$\frac{1}{4}S_0(1 - \alpha) - \epsilon\sigma T_{\text{atm}}^4 - (1 - \epsilon)\sigma T_{\text{surf}}^4 = 0$$

- a livello del suolo (atmosfera dà un contributo positivo!):

$$\frac{1}{4}S_0(1 - \alpha) + \epsilon\sigma T_{\text{atm}}^4 - \sigma T_{\text{surf}}^4 = 0$$

Risolvendo il sistema si ottiene:

$$T_{\text{atm}} = \frac{T_{\text{surf}}}{2^{1/4}} \approx \frac{T_{\text{surf}}}{1.189}, \quad T_{\text{surf}} = T_{\text{eff}} \left(\frac{1}{1 - \epsilon/2} \right)^{1/4} \approx 288 \text{ K} \approx 15^\circ \text{C}$$

L'atmosfera fa sì che la temperatura della Terra sia una trentina di gradi superiore rispetto al caso di un pianeta puramente roccioso. Nel limite di atmosfera totalmente assorbente $\epsilon \rightarrow 1$ avremmo $T_{\text{surf}}^{\max} \approx 303 \text{ K} \approx 30^\circ \text{ C}$.

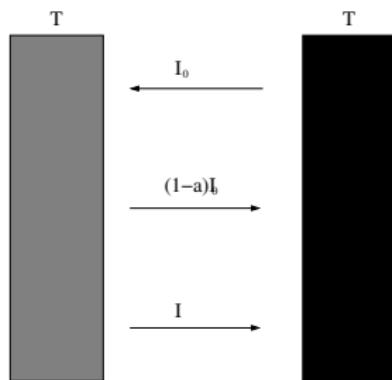
Emissione e assorbimento della radiazione

Perché nell'emissione termica dell'atmosfera compare il fattore ϵ ?

La frazione di energia "luminosa" che arriva su un corpo e viene assorbita, trasmessa o riflessa è descritta dai coefficienti a , t ed r . Per un corpo abbastanza spesso l'energia trasmessa è trascurabile, per cui abbiamo

$$a + r = 1 \longrightarrow r = 1 - a.$$

Se $a = 1$ abbiamo un **corpo nero**, se $a < 1$ ed ha un valore costante per tutte le lunghezze d'onda abbiamo un **corpo grigio**. Vogliamo ora calcolare la **radiazione termica emessa da un corpo grigio all'equilibrio**.

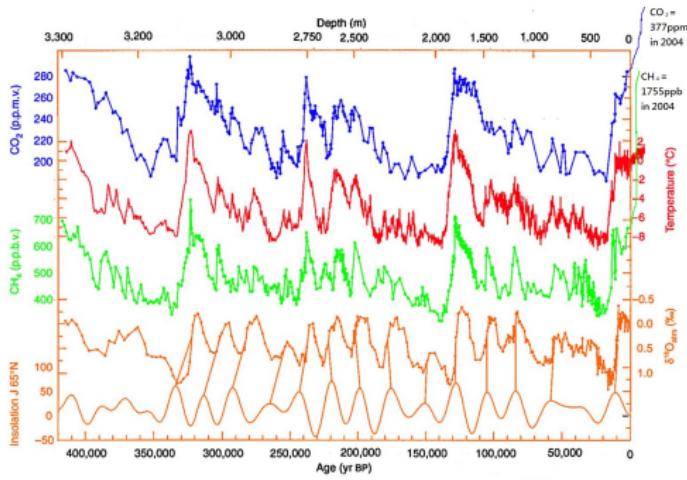


Il corpo nero a temperatura T emette radiazione elettromagnetica con intensità $I_0 = \sigma T^4$. Il corpo grigio, che all'equilibrio avrà la stessa temperatura, emette radiazione con intensità I ; inoltre riflette una frazione $1 - a$ della radiazione in ingresso dal corpo nero. All'equilibrio l'energia per unità di tempo e di superficie in ingresso è uguale a quella in uscita, per cui abbiamo (**legge di Kirchhoff**)

$$I + (1 - a)I_0 = I_0 \longrightarrow I = aI_0$$

Pertanto $\epsilon = a$, con a coefficiente di assorbimento.

Global warming: il ruolo dell'uomo



L'analisi dei dati dei **carotaggi in Antartide** (qui sono mostrati quelli raccolti dal progetto Project for Ice Coring in Antarctica presso la base di Vostok), che **consentono di ricostruire il clima degli ultimi 800mila anni**, mostra chiaramente come le variazioni degli indicatori avvenuta nell'ultimo secolo è totalmente al di fuori dei normali cicli di oscillazione naturale ed è **da attribuire alla massiccia immissione di gas serra in atmosfera frutto delle attività umane.**

Le nuvole e i passaggi di stato dell'acqua

Vi siete mai chiesti di cosa sono fatte e **come si formano le nuvole?**



- Prendete una padella e riempitela con cubetti di ghiaccio, *in modo da tenerla a una temperatura molto bassa*;
- Mettete una pentola sul fuoco;

Le nuvole e i passaggi di stato dell'acqua

Vi siete mai chiesti di cosa sono fatte e **come si formano le nuvole?**



- Prendete una padella e riempitela con cubetti di ghiaccio, *in modo da tenerla a una temperatura molto bassa*;
- Mettete una pentola sul fuoco;
- Portate quindi la padella con il ghiaccio sopra la pentola calda
- Osservate dopo qualche minuto: sul fondo della padella si saranno formate delle gocce d'acqua!

Il vapore acqueo evaporato dalla pentola sale e, *incontrando una superficie fredda* (il fondo della padella), **condensa** formando di nuovo delle gocce d'acqua, come le nuvole negli strati più freddi dell'atmosfera!

Ricorda: l'aria calda, salendo, si espande adiabaticamente e quindi si raffredda!

Perchè il fondo delle nuvole è piatto



La pressione dell'aria varia in funzione dell'altitudine, $P = P(z)$. L'aria calda e umida sale espandendosi (e quindi raffreddandosi) adiabaticamente, $pT^{-\gamma/(\gamma-1)} = \text{Const}$. La quantità di molecole d'acqua nell'aria non cambia, ma a una quota ben precisa si raggiungerà quindi il *punto di rugiada* in cui, in presenza di nuclei di condensazione, il tasso di condensazione eguaglia quello di evaporazione: si iniziano a formare le prime gocce d'acqua

Perché le nuvole non cadono?

Dal momento che le nuvole sono costituite da goccioline d'acqua (più densa dell'aria!) verrebbe da chiedersi perché restano sospese in aria e non cadono al suolo sotto l'azione della gravità. La ragione è che le goccioline d'acqua che formano le nuvole sono molto piccole. Vediamo nel dettaglio. Su una goccia agiscono la forza peso, la spinta di Archimede (trascurabile) e la resistenza viscosa dell'aria. Quest'ultima è descritta dalla legge di Stokes

$$\vec{F}_{\text{visc}} = -6\pi R\eta \vec{v},$$

dove $\eta \approx 1.7 \cdot 10^{-5}$ Pa·s è il coefficiente di viscosità dell'aria. L'equazione del moto è data da ($V = 4\pi R^3/3$ è il volume della goccia)

$$(\rho_{\text{water}} - \rho_{\text{air}})V\vec{g} - 6\pi R\eta \vec{v} = \rho_{\text{water}} V\vec{a}$$

A causa della viscosità la goccia raggiungerà la velocità stazionaria

$$v = \frac{(\rho_{\text{water}} - \rho_{\text{air}})4\pi R^3/3g}{6\pi R\eta} = \frac{2}{9} \frac{(\rho_{\text{water}} - \rho_{\text{air}})gR^2}{\eta}$$

Il tipico raggio di una gocciolina è $R \approx 10 \mu\text{m}$ per cui si trova per la velocità limite un valore di $v \approx \# \text{ cm/s}$, del tutto trascurabile rispetto alla spina delle correnti ascensionali.

Le nuvole e la luce



- Scalda un po' d'acqua e versala in un becher
- Copri il becher con un recipiente molto freddo: tra la superficie dell'acqua e il coperchio si formerà una nuvola
- Prova ad illuminare la nuvola con un **raggio laser**: il raggio, *non visibile in aria*, diventa visibile nell'attraversare la nuvola

Il raggio di luce del **laser** viene **diffuso dalle minuscole goccioline d'acqua** che formano la nuvola. Allo stesso modo la luce del sole viene diffusa dalle nuvole nell'atmosfera: le **nuvole** ci appaiono **bianche** perché questa diffusione avviene molto volte (**diffusione multipla**) in tutte le direzioni e per tutti i colori, che quindi si mescolano a dare un bianco indistinto, come per il latte.

Le nuvole e la luce



- Scalda un po' d'acqua e versala in un becher
- Copri il becher con un recipiente molto freddo: tra la superficie dell'acqua e il coperchio si formerà una nuvola
- Prova ad illuminare la nuvola con un **raggio laser**: il raggio, *non visibile in aria*, diventa visibile nell'attraversare la nuvola

Il raggio di luce del **laser** viene **diffuso dalle minuscole goccioline d'acqua** che formano la nuvola. Allo stesso modo la luce del sole viene diffusa dalle nuvole nell'atmosfera: le **nuvole** ci appaiono **bianche** perché questa diffusione avviene molto volte (**diffusione multipla**) in tutte le direzioni e per tutti i colori, che quindi si mescolano a dare un bianco indistinto, come per il latte.

Il ciclo dell'acqua



- Prendi dell'acqua molto calda e versala in un recipiente, mescolata a del sale e del colorante alimentare, mettendo un piattino sopra il suo livello;

Il ciclo dell'acqua



- Prendi dell'acqua molto calda e versala in un recipiente, mescolata a del sale e del colorante alimentare, mettendo un piattino sopra il suo livello;
- copri il recipiente con un coperchio tenuto freddo con del ghiaccio;

Il ciclo dell'acqua



- Prendi dell'acqua molto calda e versala in un recipiente, mescolata a del sale e del colorante alimentare, mettendo un piattino sopra il suo livello;
- copri il recipiente con un coperchio tenuto freddo con del ghiaccio;
- aspetta un po' di tempo, dà qualche colpo al coperchio e sollevalo: nel piattino si è depositata dell'acqua *dolce* e senza colorante.

L'**acqua del mare evapora** (**ma il sale no!**) e sale come vapore in atmosfera, fino a **condensare** negli strati più freddi, in presenza di *nuclei di condensazione*, in **nuvole** fatte da tante goccioline, che danno poi luogo alla **pioggia**.