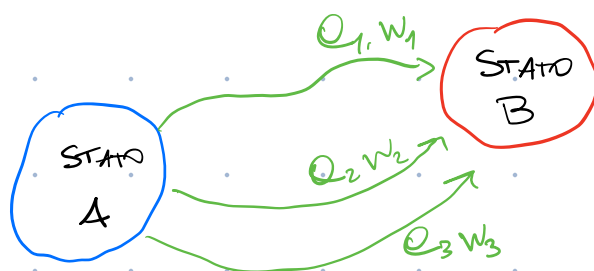


PRIMO PRINCIPIO DELLA TERMODINAMICA

IN UNA TRASFORMAZIONE, W E Q DIPENDONO DALLA NATURA DELLA TRASFORMAZIONE
SPERIMENTALMENTE PERÒ SI OSSERVA CHE $Q - W$ È LA STESSA PER TUTTE LE
TRASFORMAZIONI, DIPENDO SOLO DALLO STATO INIZIALE E FINALE, MA NON DALLA
CURVA DELLA TRASFORMAZIONE



$$Q_1 - W_1 = Q_2 - W_2 = Q_3 - W_3$$

$\Rightarrow Q - W$ DEVE RAPPRESENTARE IL CAMBIAMENTO DI QUALCHE PROPRIETÀ INTRINSECA
DEL SISTEMA $\rightarrow$ ENERGIA INTERNA U

$$Q_1 - W_1 = Q_2 - W_2 = Q_3 - W_3 = U_B - U_A$$

$$\Delta U = Q - W$$

$U_f - U_i$

PRIMO PRINCIPIO DELLA TERMODINAMICA

$W > 0$ SE COMPIUTO DAL SISTEMA

$Q > 0$ SE ASSORBITO DAL SISTEMA

SE IL SISTEMA SUBISCE UN CAMBIAMENTO INFINITESIMO

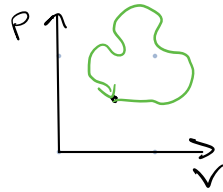
$$\Rightarrow dU = dQ - dW$$

CASI PARTICOLARI

TRASFORMAZIONI CICLICHE: IL SISTEMA TORNA IN SE STESSO. $\Rightarrow U_f = U_i$

$$\Rightarrow \Delta U = 0 \Rightarrow Q = W$$

SUL DIAGRAMMA P-V LE TRASF. CICLICHE HANNO UNA CORVA CHIUSA



TRASFORMAZIONE ADIABATICA : AVVIENE SENZA TRASFERIMENTO DI CALORE $Q=0$

$$\Rightarrow \Delta U = -W$$

$\Rightarrow \Delta U > 0$ SE IL SISTEMA SUBISCE LAVORO ($W < 0$)

TRASFORMAZIONE ISO CORA $V = \text{costante} \Rightarrow W = 0$

$$\Rightarrow \Delta U = Q$$

$\Delta U > 0$ SE IL SISTEMA ASSORBE CALORE ($Q > 0$)

ESPANSIONE LIBERA $Q=0, W=0$

$$\Rightarrow \Delta U = 0$$

$W=0$ POICHÉ IL GAS SI ESPANDE NEL VUOTO

$\Rightarrow$ NON È CONTRASTATO DA NESSUNA PRESSIONE (ES. PISTONE)

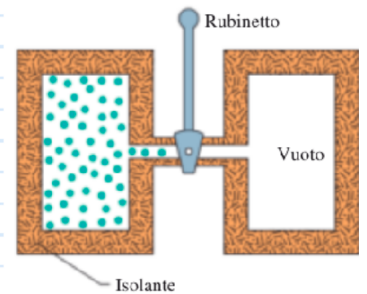
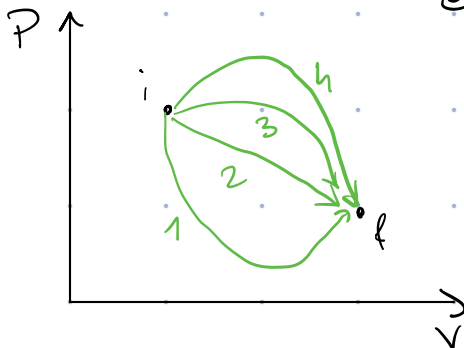


Figura 18.16 Lo stato iniziale di un processo di espansione libera. Una volta aperto il rubinetto, il gas dopo un po' raggiunge uno stato finale di equilibrio, riempiendo entrambe le camere.

ESERCIZIO



c) METTERE IN ORDINE CRESCENTE I 4 PERCORSI IN BASE A ΔU

$\Delta U_1 = \Delta U_2 = \Delta U_3 = \Delta U_4$ POICHÉ i ED f SONO GLI STESSI

b) IN ORDINE CRESCENTE PER LAVORO COMPIUTO DAL GAS W

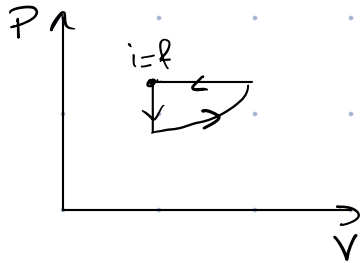
$W_4 > W_3 > W_2 > W_1$ (AREA SOTTESA ALLE CURVE)

c) IN ORDINE DI CALORE ASSORBITO DAL SISTEMA Q

$$\Delta U = Q - W \Rightarrow Q = \Delta U + \underbrace{W}_{\substack{\text{LAVORO} \\ \text{COMPILATO} \\ \text{DAL SISTEMA}}}$$

$$Q_4 > Q_3 > Q_2 > Q_1$$

ESERCIZIO



a) $\Delta U = ?$

TRASFORMAZIONE CICLICA $\Rightarrow \Delta U = 0$

b) IL LAVORO TOTALE?

$W_{\text{tot}} < 0$ (POICHÉ VA IN SENSO ANTI-ORARIO)

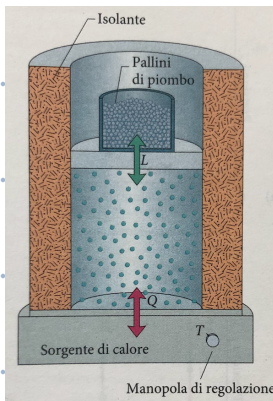
c) $Q_{\text{tot}} = ?$

$$\Delta U = Q - W \Rightarrow \Delta U = 0$$

$$\Rightarrow Q = W \Rightarrow Q < 0$$

ESERCIZIO

SCHLIDATO DEL VAPORE A PRESSIONE ATMOSFERICA. IL VOLUME AUMENTA DA 1 m^3 A 1.671 m^3 . IN QUESTO PROCESSO $Q = 2260 \text{ kJ}$



a) $W_{\text{tot}} = ?$

IL SISTEMA COMPIE LAVORO PERCHÉ SI ESPANDE $\Rightarrow W_{\text{tot}} > 0$

$$W = \int_{V_i}^{V_f} P dV = P \int_{V_i}^{V_f} dV = P(V_f - V_i) = 169 \text{ kJ}$$

$\uparrow$ IN QUESTO
CASO $P = \text{CONSTANTE}$

b) QUANTO VALE ΔU ? $\Delta U = Q - W \approx 2090 \text{ kJ}$

CALORIMETRIA

CAPACITÀ TERMICA C : COSTANTE DI PROPORZIONALITÀ TRA IL CALORE Q E LA VARIAZIONE DI TEMPERATURA ΔT

$$\Rightarrow Q = C \Delta T = C (T_f - T_i) \quad \text{U.D.M. } [J/K]$$

QUESTA CAPACITÀ DIPENDE SIA DALLA SOSTANZA MA ANCHE DALLA SUA MASSA

$\Rightarrow$ CONVIENE DEFINIRE LA CAPACITÀ TERMICA PER UNITÀ DI MASSA = CALORE SPECIFICO

$$\Rightarrow Q = \underset{\substack{\uparrow \\ \text{CALORE} \\ \text{SPECIFICO}}}{c} \underset{\substack{\uparrow \\ \text{MASSA}}}{m} \Delta T \quad \text{U.D.M. } [J/Kg]$$

CALORE SPECIFICO MOLARE

PER ALCUNE SOSTANZE È CONVENIENTE USARE LA MOLE AL POSTO CHE LA MASSA

$$1 \text{ mol} = 6.02 \cdot 10^{23} \text{ ATOMI O MOLECOLE DI SOSTANZA}$$

$$Q = \underset{\substack{\uparrow \\ \text{CAL. SPEC.} \\ \text{MOLARE}}}{c} \underset{\substack{\uparrow \\ \text{NUMERO DI MOLE}}}{n} \Delta T \quad n = \frac{m}{M} \quad \begin{matrix} \leftarrow \text{MASSA} \\ \leftarrow \text{MASSA MOLARE} \end{matrix}$$

ESEMPIO CORPO CALDO IN ACQUA

MASSA SOLIDO $m_s = 0.378 \text{ Kg}$

T SOLIDO $T_s = 85^\circ C$

VOLUME ACQUA $V_{H_2O} = 2 \text{ l}$ $T_{H_2O} = 20^\circ C$

LA TEMPERATURA DI EQUILIBRIO È $T_{eq} = 21.3^\circ C$

$$\Delta U_{H_2O} = -\Delta U_s \Rightarrow Q_{H_2O} = -Q_s \quad \begin{matrix} \text{IL SASSO PERDE CALORE} \\ \Rightarrow Q_s < 0 \end{matrix}$$



$$\Rightarrow m_{H_2O} c_{H_2O} (T_{eq} - T_{H_2O}) = -m c_s (T_{eq} - T_s)$$

$$\Rightarrow c_s = \frac{m_{H_2O}}{m_s} c_{H_2O} \frac{(T_{eq} - T_{H_2O})}{T_{eq} - T_s} \approx 380 \frac{J}{kg K}$$

$\swarrow$
 $4187 \frac{J}{kg K}$

CAMBIAMENTO DI FASE

QUANDO UN SOLIDO O UN LIQUIDO ASSORBE ENERGIA NON SEMPRE LA TEMPERATURA AUMENTA

→ IL CAMPIONE PUÒ PASSARE DA UNO STATO AD UN ALTRO

→ I CAMBIAMENTI DI FASE SONO ISOTERMICI $\Rightarrow T$ COSTANTE

LA QUANTITÀ DI ENERGIA PER UNITÀ DI MASSA TRASFERITA SOTTO FORMA DI CALORE PER AVERE

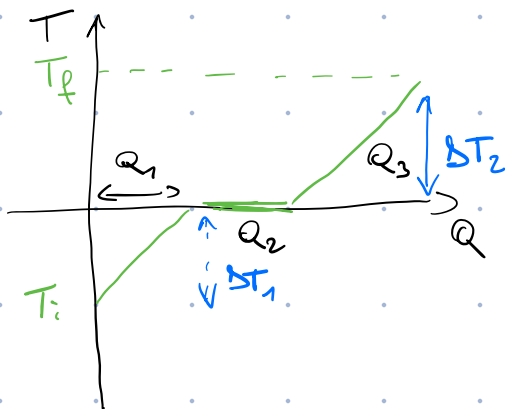
UN PASSAGGIO DI STATO COMPLETO SI CHIAMA **CALORE LATENTE** L

$$Q = L m \quad \text{OD} \quad L \left[\frac{J}{kg} \right]$$

ESEMPIO 1

CALCOLARE IL CALORE NECESSARIO PER FAR PASSARE UNA MASSA D'ACQUA DA

$$T_i = -10^\circ C \quad \text{A} \quad T_f = 15^\circ C$$



$$Q_{tot} = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

$$Q_1 = m c_s^{ice} \Delta T_1$$

$\nwarrow$
CALORE SPECIFICO GHIACCIO

$$Q_2 = m L$$

$$Q_3 = m c_s^{H_2O} \Delta T_2$$

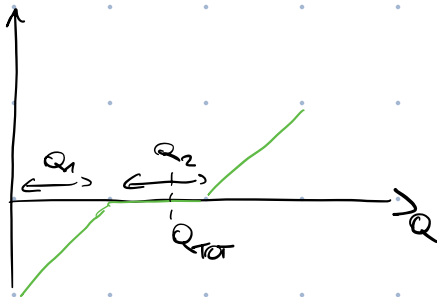
$\nwarrow$
CALORE SPECIFICO H_2O LIQUIDA

ESEMPIO 2.:

SI CONSIDERI LO SCENARIO PRECEDENTE $\Rightarrow T_i = -10^\circ\text{C}$. SUPPONENDO DI FORNIRE UNA QUANTITÀ TOTALE DI CALORE Q_{TOT} TALE CHE

$$Q_1 < Q_{\text{TOT}} < Q_1 + Q_2$$

QUALE SARÀ LA TEMPERATURA FINALE DELL'ACQUA?



DATO CHE $Q_{\text{TOT}} > Q_1$ TUTTO IL GHIACCIO

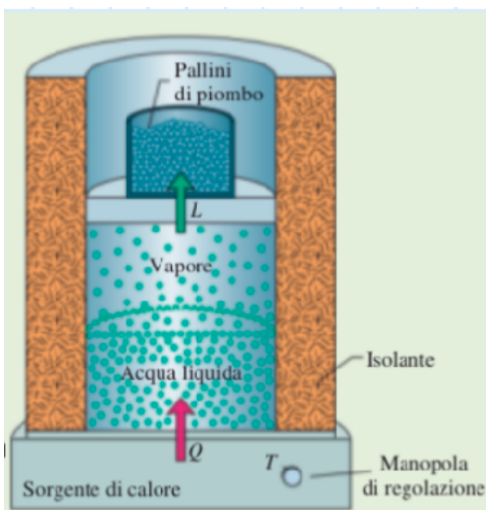
RAGGIUNGE LA TEMPERATURA DI FUSIONE

PERÒ $Q_{\text{TOT}} < Q_1 + Q_2 \Rightarrow$ NON TUTTO IL GHIACCIO SI FONDE $\Rightarrow T_f = 0^\circ\text{C}$

$Q_{\text{RES}} = Q_{\text{TOT}} - Q_1 \leftarrow$ CALORE RESIDUO CHE HA SCIOLTO PARTE DEL GHIACCIO

$$m_{\text{LIQUIDO}} = \frac{Q_{\text{RES}}}{L} < m_{\text{TOT}}$$

ESERCIZIO: ENERGIA, LAVORO E CAMBIO DI FASE



LASCIARE 1 Kg DI ACQUA LIQUIDA A 100°C SI

TRASFORMI IN VAPORE A 100°C , BOLLENDO A $P_0 = 1 \text{ ATM}$

COME IN FIGURA

IL VOLUME PASSA DA $V_{\text{IN}} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ COME LIQUIDO

A 1.671 m^3 COME VAPORE

a) QUANTO LAVORO VIENE COMPILATO DAL SISTEMA?

b) QUANTA ENERGIA VIENE TRASFERITA SOTTO FORMA DI CALORE?

c) ΔU ?

e) IL VOLUME AUMENTA $\Rightarrow W > 0$ $W = \int_{V_i}^{V_f} P dV \stackrel{P=\text{cost}}{\downarrow} = P \int_{V_i}^{V_f} dV = P(V_f - V_i) = 168 \text{ kJ}$

b) È SOLO UN CAMBIO NELLO STATO DI FASE

$\Rightarrow Q = L m = 2256 \text{ kJ}$
 $\uparrow$
 $L = 2256 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

c) $\Delta U = Q - W = 2256 \text{ kJ} - 168 \text{ kJ} \approx 2088 \text{ kJ}$

TRASMISSIONE DEL CALORE

ESISTONO TRE MECCANISMI

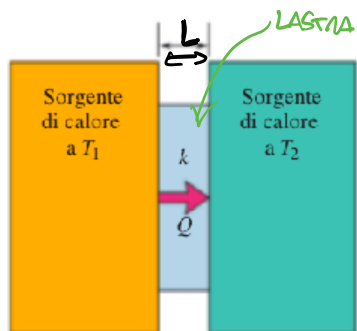
CONDIZIONE
CONVEZIONE
IRRAZZIAMENTO

OPERANO SOLO SE C'È UNA DIFFERENZA DI TEMPERATURA

CONDIZIONE

ESEMPIO: ATTIZZATORE SUL FUOCO. LA PASTA È MOLTO CALDA $\Rightarrow$ GLI ATOMI SI MUOVONO MOLTO

$\rightarrow$ TRASFERISCONO ENERGIA AGLI ALTRI ATOMI ATTRAVERSO URTI $\Rightarrow$ PROPAGAZIONE DEL CALORE



CONSIDERIAMO UNA LASTRA DI AREA A E SPESORE L .

LE DUE SUPERFICI SONO ATTACCHATE AD UNA SORGENTE CALDA T_1 E

FREDDA T_2 ($T_1 > T_2$)

IN UN TEMPO t , LA LASTRA TRASFERISCE CALORE DALLA

SORGENTE CALDA A QUELLA FREDDA.

$$Q = K \frac{T_1 - T_2}{L} A t$$

$\uparrow$ SPESORE
 $\uparrow$ SUPERFICIE
 $\leftarrow$ TEMPO

CONDUCEBILITÀ
TERMICA

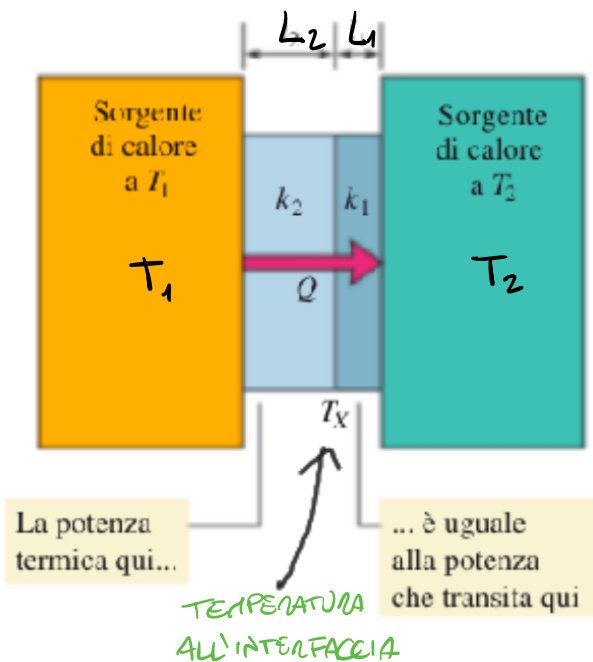
DIPENDE DAL MATERIALE

$$\left[\frac{J}{m \cdot s \cdot K} \right]$$

LA RAPIDITÀ CON CUI VIENE TRASFERITO CALORE È

$$P \equiv \frac{Q}{t} = K \frac{T_1 - T_2}{L} A$$

CONDIZIONI ALL'INTERFACCIA



LASTRA COMPOSITA DI DUE MATERIALI DIVERSI CON

SPESORE L_1 ED L_2 , CONDUCEBILITÀ TERMICHE K_1, K_2

COME PRIMA ASSUMIAMO LA STESSA AREA A PER LE LASTRE

ASSUMIAMO CHE IL TRASFERIMENTO DI CALORE SIA

UNO STATO STAZIONARIO $\leftarrow$ RAPIDITÀ DI PASSAGGIO DI CALORE

COSTANTE NEL TEMPO, TEMPERATURA IN OGNI PUNTO COSTANTE

SE RAPIDITÀ DI SCAMBIO È COSTANTE $\frac{Q}{t}$ NELLA LASTRA 1 DEVE ESSERE UGUALE A $\frac{\Delta Q}{t}$

NELLA LASTRA 2. SE COSÌ NON FOSSO NON AVREMO UNO STATO STAZIONARIO.

$$\frac{Q}{t} = K_2 A \frac{T_1 - T_x}{L_2} = K_1 A \frac{(T_x - T_2)}{L_1}$$

$$\Rightarrow T_x (K_2 L_1 + K_1 L_2) = K_1 L_2 T_2 + K_2 L_1 T_1$$

$$\Rightarrow T_x = \frac{K_1 L_2 T_2 + K_2 L_1 T_1}{K_1 L_2 + K_2 L_1}$$

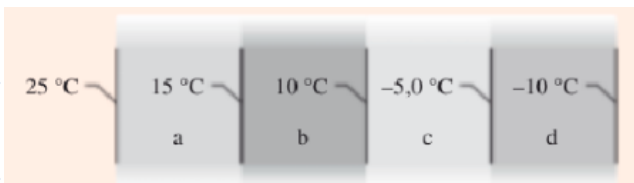
SOSTITUENDO T_x DENTRO L'ESPRESSIONE DI SOPRA

$$\frac{Q}{T} = \frac{A (T_1 - T_2)}{(L_1/K_1) + (L_2/K_2)}$$

QUESTA EQUAZIONE È GENERALIZZABILE AD N LASTRE

$$\frac{Q}{T} = \frac{A (T_1 - T_2)}{\sum_i^N \frac{L_i}{K_i}}$$

ESEMPIO



METTERE IN ORDINE DECRESCENTE RISPETTO ALLA

CONDUCEBILITÀ TERMICA. ASSUMENDO A, L UGUALE

PER OGNI LASTRA, $A = A_1 = A_2 = A_3 = A_4$, $L = L_1 = L_2 = L_3 = L_4$

PER OGNI LASTRA

$$P_i \equiv \frac{Q}{t} = \frac{K_i}{L_i} A (T_{sx} - T_{dx})$$

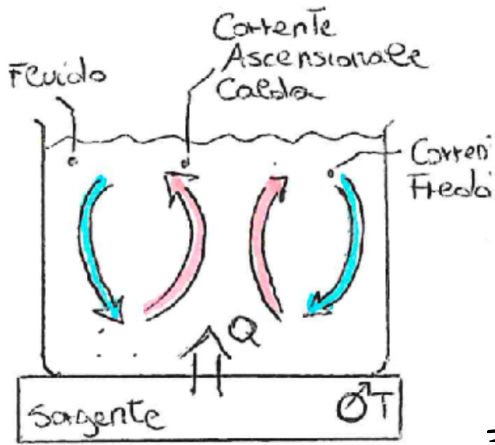
$\uparrow$ $T_{FACCIA\ SINISTRA}$ $\uparrow$ $T_{FACCIA\ DESTRA}$

$\Rightarrow$ ASSUMENDO REGIME STAZIONARIO $P_A = P_B = P_C = P_D$,

$$\Rightarrow \frac{K_A}{L} A \underbrace{\Delta T_A}_{10^\circ C} = K_B \frac{A}{L} \underbrace{\Delta T_B}_{5^\circ C} = K_C \frac{A}{L} \underbrace{\Delta T_C}_{15^\circ C} = K_D \frac{A}{L} \underbrace{\Delta T_D}_{5^\circ C}$$

$$\Rightarrow K_B = K_D > K_A > K_C$$

CONVEZIONE



LA CONVEZIONE SI HA QUANDO UN FLUIDO È A CONTATTO CON UNA SORGENTE PIÙ CALDA (ES. PENTOLA D'ACQUA SUL FUOCO)

→ LA MASSA A CONTATTO CON LA SORGENTE DI CALORE SI RISCALDA

⇒ SI ESPANDE. ESPANDENDOSI DIMINUISCE LA DENSITÀ ⇒ RISALE

A CAUSA DELLA SPINTA D'ARCHIMEDE MENTRE IL FLUIDO SOVRASTANTE PIÙ FREDDO (⇒ PIÙ DENSO)

CADE VERSO IL BASSO

ESEMPI DI CONVEZIONI: MANTELLO TERRESTRE → MOVIMENTI TETTONICI

ATMOSFERA → VARIAZIONI METEOROLOGICHE GIORNALIERE, SCHEMI CLIMATICI GLOBALI

SOLE → MOTI CONVETTIVI CHE RISALGONO DAL NUCLEO FINO ALLA SUPERFICIE

IRRAGGIAMENTO

IL TERZO MODO DI CONDUZIONE DEL CALORE È ATTRATTO L'IRRAGGIAMENTO

SISTEMA E AMBIENTE SI SCAMBIANO ENERGIA ATTRAVERSO ONDE ELETTROMAGNETICHE

→ RADIAZIONE TERMICA

LA RAPIDITÀ P_{irr} CON CUI UN OGGETTO EMETTE ENERGIA DIPENDE DALLA SUPERFICIE

E DALLA TEMPERATURA

$$P_{irr} = \underset{\substack{\uparrow \\ \text{CONSTANTE DI BOLZMANN} \\ \sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^2 / \text{K}^4}}{\sigma} \overset{\substack{\uparrow \\ \text{EMISSIVITÀ}}}{\epsilon} A T^4 \quad 0 < \epsilon < 1$$

$\epsilon = 1 \rightarrow$ CORPO NERO

$\Rightarrow$ QUALSIASI CORPO CON $T \neq 0$ EMETTE RADIAZIONI

ANALOGAMENTE LA RAPIDITÀ CON CUI UN OGGETTO ASSORBE ENERGIA DALL'AMBIENTE (T_{AMB})

$$\Rightarrow P_{ASS} = \sigma \epsilon A T_{AMB}^4$$

$\Rightarrow$ UN CORPO NERO ($\epsilon = 1$) ASSORBE TUTTA L'ENERGIA ENTRANTE

DATO CHE UN CORPO ASSORBE ED EMETTE RADIAZIONI TERMICA

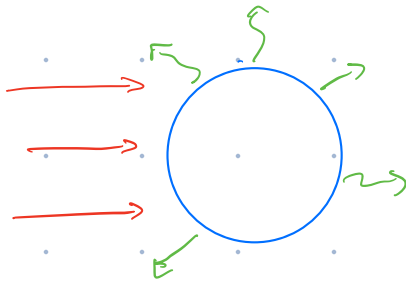
$$P_{TOT} = P_{ASS} - P_{IRR} = \sigma \epsilon A (T_{AMB}^4 - T^4)$$

ESERCIZIO:

CALCOLARE LA TEMPERATURA DELLA SUPERFICIE TERRESTRE SE NON CI FOSSA ATMOSFERA.

SI ASSUMA UN'ORBITA CIRCOLARE, E SI ASSUMA UN'INTENSITÀ ENERGETICA DAL SOLE INCIDENTE SULLA TERRA

$$DI \quad I = 1,368 \text{ KW/m}^2$$



CI SONO DUE EFFETTI

① ASSORBIMENTO DELLA RADIAZIONE SOLARE

② EMISSIONE PER RAGGIAMENTO

① SOLO METÀ DELLA TERRA VIENE COLPITA DAI RAGGI DEL SOLE E NON TUTTI I RAGGI

SONO $\perp$ ALLA SUPERFICIE $\Rightarrow$ POTENZA TOTALE INCIDENTE SULLA TERRA

$$P_{IN} = \underbrace{4\pi R^2}_{\text{SUPERFICIE DELLA SFERA}} \left(\frac{1}{2}\right) \left(\frac{1}{2}\right) I = \pi R^2 I$$

$\uparrow$ METÀ TERRA ILLUMINATA
 $\nwarrow$ TANG. CONTRO DELL'ANGOLO DI INCIDENZA

LA TERRA NON ASSORBE TUTTA PERCHÉ PARZIALMENTE RIFLETTE $\Rightarrow \alpha = 0.7$

POSSIAMO ASSUMERE UN VALORE MEDIO

$$\Rightarrow P_{\text{ASSORBITA}} = \alpha P_{\text{IN}} = \alpha \pi R^2 I$$

② PER IRRAGGIAMENTO LA TERRA EMISSIONE

$$P_{\text{IRR}} = \sigma \underbrace{\epsilon}_{\approx 1} 4\pi R^2 T^4$$

ALL'EQUILIBRIO $P_{\text{ASSORBITA}} = P_{\text{IRR}}$

$$\Rightarrow \alpha \pi R^2 I = \sigma 4\pi R^2 T^4$$

$$\Rightarrow T = \left(\frac{\alpha I}{4\sigma} \right)^{1/4} = 255 \text{ K} = -18^\circ \text{C}$$

ESEMPIO 2:

SI CONSIDERI UNA BACINELLA D'ACQUA POSTA IN UN CONTENITORE E SI ASSUMA CHE POSSA SCAMBIARE

CALORE SOLO PER IRRAGGIAMENTO. CALCOLARE QUANTO TEMPO CI VUOLE A FARE CONGELARE

UNA MASSA m DI ACQUA A 6°C QUANDO LA TEMPERATURA ESTERNA È DI -23°C .

AREA SUPERFICIE ACQUA $A = 8 \text{ cm}^2$, $m = 4,5 \text{ g}$.

$$Q_{\text{TOT}} = Q_1 + Q_2$$

↑ ↑
CALORE CALORE
PERDUTO LATENTE
PER RISCALDARE
L'ACQUA A 0°C

$$Q_1 = c m (T_F - T_{\text{IN}}) \quad Q_2 = -m L_{\text{CONGELAMENTO}}$$

$\downarrow 0^\circ$ $\downarrow 6^\circ \text{C}$ CALORE LATENTE
DI CONGELAMENTO

$$\Rightarrow Q_{\text{TOT}} = m (c \Delta T - L_{\text{CONGELAMENTO}})$$

$$P_{\text{TOT}} = P_{\text{ASS}} - P_{\text{IRRASSA}} = \sigma \epsilon A (T_{\text{A1B}}^4 - T_{\text{H2O}}^4) < 0$$

↓
ASSUMIAMO
= 1

$$P_{\text{TOT}} = \frac{Q_{\text{TOT}}}{t}$$

$$\Rightarrow t = \frac{Q_{\text{TOT}}}{P_{\text{TOT}}} = \frac{Q_1 + Q_2}{P_{\text{TOT}}} = \frac{m(c \Delta T - L_{\text{evap}})}{\sigma A (T_{\text{A1B}}^4 - T_{\text{H2O}}^4)} \approx 5.8 \text{ h}$$