



Università Federico II di Napoli

**Facoltà di Scienze Matematiche Fisiche e
Naturali**

Corso di laurea in Informatica

**Fisica Sperimentale I
Gruppo 1**

Docente Prof. Leopoldo Milano

Anno accademico 2003-2004



SINTESI TERMODINAMICA

- TEMPERATURA : La temperatura è una nuova grandezza fondamentale
- Essa deriva dal senso di caldo e freddo. Naturalmente il senso non è sufficiente ai fini scientifici.
- Se mettiamo la mano destra in acqua fredda e la sinistra in acqua calda, messe poi in acqua tiepida sentono temperature differenti.
- Per poter definire una grandezza chiamata “temperatura” occorre postulare il **Principio Zero** della Termodinamica: due corpi posti in contatto tra di loro raggiungono dopo un certo tempo l’equilibrio termico. Due corpi in equilibrio termico con un terzo (il termometro) sono in equilibrio termico anche tra di loro.

- Molte proprietà di un corpo variano con la temperatura e possono venire sfruttate per costruire varie specie di termometri.
- 1) **Termometri a liquido**: basati sul fenomeno della dilatazione termica
- 2) **Termometri a gas**: basati sulle variazioni di volume o di pressione di un gas con la temperatura.
- 3) **Termometri a vapore**: analoghi a quelli a gas.
- 4) **Termometri metallici** : basati sulla dilatazione termica dei metalli
- 5) **Termometri a resistenza o bolometri**: sfruttano la dipendenza della resistenza elettrica dalla temperatura.
- 6) **Coppie Termoelettriche**: sfruttano la produzione di una forza elettromotrice se si scalda una saldatura tra due metalli diversi.



Punti Fissi e Scale Termometriche

- **Scala centigrada**
- Si definiscono: $T_c = 0$ ghiaccio fondente
- $T_c = 100$ acqua bollente ad una atmosfera

- **Scala Fahrenheit**
- Si definiscono: $T_F = 0$ → una opportuna miscela di acqua e sale
- Su questa scala il ghiaccio fondente ha temperatura di 32 °F e il vapore d'acqua 212 °F.

- Le relazioni che legano la temperatura espressa in gradi centigradi alla temperatura espressa in Fahrenheit sono:
 - $T_c = 5/9(T_F - 32)$
 - $T_F = 9/5 T_c + 32$



SCALA ASSOLUTA E GRADO KELVIN

- Poiché sperimentalmente si osserva che non si possono avere temperature inferiori a -273.15 gradi centigradi si è chiamata zero assoluto quella temperatura e si definisce la scala Kelvin:

$$TK = Tc + 273.15$$



IL CALORE

- IL CALORE E' L'ENERGIA CHE FLUISCE DA UN CORPO ALL'ALTRO PER EFFETTO DELLA VARIAZIONE DI TEMPERATURA
- **ESSO NON E' UNA GRANDEZZA FONDAMENTALE**
- Sappiamo che l'energia nel sistema SI e' espressa in Joule. Tuttavia, per ragioni storiche, si chiama CALORIA l'unità di misura del calore e la si definisce come la QUANTITA' DI CALORE CHE DEVE ESSERE CEDUTA AD 1 g DI ACQUA PER FAR AUMENTARE LA TEMPERATURA DI 1 °C A PARTIRE DALLA TEMPERATURA INIZIALE DI 14.5 °C ED ALLA PRESSIONE COSTANTE DI 1 atm



CALORI SPECIFICI

- Se non ci sono cambiamenti di stato, la variazione di temperatura di un corpo è data da:

$$\Delta T = \Delta Q / mc$$

Dove m = massa del corpo c = calore specifico, espresso in cal/(g °C). Riscrivendo la stessa equazione vediamo che

$$\Delta Q = mc\Delta T$$

- $C = mc$ è detta capacità termica del corpo.
-
- Il calore specifico varia sia con la temperatura che con la pressione. Per questo nella definizione di caloria si è specificato non solo la massa (1 g) ma anche la temperatura iniziale (14.5 °C) e la pressione (1 atm), costante.

LM CALORI SPECIFICI IN SOLIDI E LIQUIDI ALLA
TEMPERATURA ($T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) E PRESSIONE (1atm)
ORDINARIE.

solidi	c cal/(g °C)	liquidi	c cal/(g °C)
Alluminio	0.217	Mercurio	0.033
Oro	0.032	Alcool etilico	0.581
Rame	0.093	Olio d'oliva	0.474
Vetro	0.190	Cloroformio	0.226
Ferro	0.114	Petrolio	0.498



CALORI LATENTI NEI CAMBIAMENTI DI STATO

- 1) EVAPORAZIONE \longrightarrow LIQUEFAZIONE T_e
- 2) FUSIONE \longrightarrow SOLIDIFICAZIONE T_f
- DURANTE UN CAMBIAMENTO DI STATO DI UNA SOSTANZA LA TEMPERATURA RESTA COSTANTE. LA QUANTITA' DI CALORE CEDUTA O ASSORBITA DA UN CORPO NEL CAMBIAMENTO DI STATO E' PROPORZIONALE ALLA MASSA DEL CORPO.

$$Q = m\lambda$$

λ_f = CALORE LATENTE DI FUSIONE

λ_e = CALORE LATENTE DI EVAPORAZIONE

- (DEVONO ESSERE SEMPRE SPECIFICATE LE TEMPERATURE E PRESSIONI A CUI AVVIENE IL CAMBIAMENTO DI STATO)



ALCUNI CALORI LATENTI ALLA PRESSIONE DI 1atm.

sostanza	Tf (°C)	λ_f (cal/g)	Te (°C)	λ_e (cal/g)
Idrogeno	-259	13.8	-253	106.7
Mercurio	-39	2.7	357	71
Acqua	0	79.8	100	539.2
Alluminio	660	93	2056	2000
Ferro	1539	65	2740	1620



SISTEMI TERMODINAMICI

- PUNTO DI VISTA MICROSCOPICO
- PUNTO DI VISTA MACROSCOPICO
-
- EQUILIBRIO TERMODINAMICO
-
- VARIABILI TERMODINAMICHE (pressione, volume, temperatura.....) DEFINISCONO COMPLETAMENTE IL SISTEMA
- SONO LEGATE DA UNA EQUAZIONE DI STATO
- NEI GAS PERFETTI LE TRE VARIABILI TERMODINAMICHE CON LE QUALI SI DESCRIVE IL SISTEMA (PRESSIONE, VOLUME, TEMPERATURA) SONO LEGATE DALLA EQUAZIONE DI STATO DEI GAS PERFETTI:

$$PV = nRT$$



TRASFORMAZIONI DI UN SISTEMA TERMODINAMICO

TRASFORMAZIONI REVERSIBILI

- **UNA TRASFORMAZIONE SI DICE REVERSIBILE SE IL SISTEMA PASSA ATTRAVERSO STATI INFINITAMENTE VICINI A STATI DI EQUILIBRIO**

QUESTA CONDIZIONE IMPLICA CHE:

- - LE CAUSE SONO INFINITAMENTE PICCOLE
- - LA TRASFORMAZIONE PUO' CONSIDERARSI COME UNA SUCCESSIONE DI STATI DI EQUILIBRIO E QUINDI INFINITAMENTE LENTA
- - IL VERSO DELLA TRASFORMAZIONE PUO' ESSERE INVERTITO CAMBIANDO DI INFINITAMENTE POCO I FATTORI CHE DETERMINANO LA TRASFORMAZIONE



LE TRASFORMAZIONI REVERSIBILI SONO UN LIMITE DELLE TRASFORMAZIONI REALI

- ISOCORA: VOLUME COSTANTE
- ISOBARA: PRESSIONE COSTANTE
- ISOTERMA: TEMPERATURA COSTANTE
- ADIABATICA: SENZA SCAMBIO DI CALORE CON L'AMBIENTE



I GAS PERFETTI

GRAMMOMOLECOLA (MOLE) : **MASSA ESPRESSA IN GRAMMI NUMERICAMENTE UGUALE AL PESO MOLECOLARE DELLA SOSTANZA MISURATO IN UNITA' ATOMICHE.** Esempio : 1 mole $^{12}\text{C} = 12 \text{ g}$.

- **LEGGE DI AVOGADRO: VOLUMI UGUALI DI GAS NELLE STESSE CONDIZIONI DI PRESSIONE E TEMPERATURA CONTENGONO UN UGUALE NUMERO DI MOLECOLE.**
- 1 MOLE CONTIENE UN NUMERO DI AVOGADRO DI MOLECOLE $\rightarrow N_0 = 6.02 \cdot 10^{23}$
- **EQUAZIONE DI STATO DEI GAS PERFETTI**

$$PV = nRT \rightarrow n = \text{NUMERO DI MOLI}$$

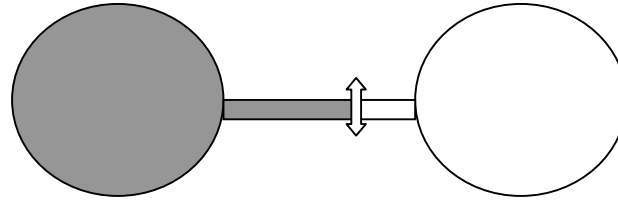
NEL SISTEMA S.I. $R = 8.314 \text{ J}/(^{\circ}\text{K mole})$

SE ESPRIMIAMO LA PRESSIONE IN ATMOSFERE E IL VOLUME IN LITRI $R = 0.08205 \text{ Litri-Atmosfere}/(^{\circ}\text{K mole})$

$$1 \text{ atm} = 101.325 \text{ N/m}^2 \quad 1 \text{ N/m}^2 = 1 \text{ PASCAL}$$

ENERGIA INTERNA

ESPERIENZA DI JOULE



TEMPER. INIZIALE $T_0 \rightarrow$ TEMPERATURA FINALE $T_0 - dT$

$dT \rightarrow 0$ SE IL GAS “TENDE” ALLE CONDIZIONI DI GAS PERFETTO



SE UN GAS PERFETTO ESEGUE UNA ESPANSIONE ADIABATICA NEL VUOTO LA TEMPERATURA DELLO STATO FINALE E' UGUALE A QUELLA DELLO STATO INIZIALE \rightarrow QUANTO VALGONO $L, Q, \Delta U$?



QUANTO VALGONO L, Q, ΔU ?



- IN UNA ESPANSIONE ADIABATICA NEL VUOTO LA VARIAZIONE DI ENERGIA INTERNA E' NULLA. QUESTO E' VERO ANCHE SE IL GAS NON E' PERFETTO PERO' LA TEMPERATURA FINALE E' DIVERSA DA QUELLA INIZIALE.



POICHE' L'ENERGIA INTERNA NON VARIA QUALUNQUE SIANO V_1 E V_2



L'ENERGIA INTERNA DI UN GAS PERFETTO DIPENDE SOLO DALLA TEMPERATURA DEL GAS



CALCOLO DELL'ENERGIA DI UN GAS PERFETTO

- **TRASFORMAZIONE ISOCORA REVERSIBILE**

$$dQ = dU + dL = dU \quad (dL = 0)$$



$$dU/dT = dQ/dT \quad \text{A VOLUME COSTANTE}$$

$$\text{ORA } (dQ/dT)_{(v=\text{COST.})} = C_v \rightarrow \text{CAPACITA' TERMICA}$$



$$\Delta U = n \int_{T_A}^{T_B} C_v dT \quad \text{Nel caso che } C_v \text{ sia costante: } \Delta U = n C_v \Delta T$$

NEI GAS PERFETTI C_v E' COSTANTE

GAS MONOATOMICO $C_v = 3/2 R$

GAS BIATOMICO $C_v = 5/2 R$

PER SEMPLICITA'

$U(0) = 0$ CON T

ESPRESSA IN °K

$$U = n C_v T$$



TRASFORMAZIONI PARTICOLARI – PIANO PV

ISOCORA: VOLUME COSTANTE

ISOTERMA: TEMPERATURA COSTANTE

ISOBARA: PRESSIONE COSTANTE

ADIABATICA: SENZA SCAMBIO DI CALORE CON
L'AMBIENTE

PER OTTENERE LA RELAZIONE TRA LA PRESSIONE
ED IL VOLUME IN UNA TRASFORMAZIONE
ADIABATICA REVERSIBILE POSSIAMO SCRIVERE:

$$dQ = 0 \rightarrow nC_v dT + PdV = 0$$

$$\text{POICHE' } d(PV) = PdV + VdP \rightarrow ndT = (PdV + VdP)/R$$

DA QUESTE RELAZIONI OTTENIAMO:

$$(C_v/R + 1) PdV + C_v/R VdP = 0 \rightarrow [(C_v + R)/C_v] PdV = - VdP$$

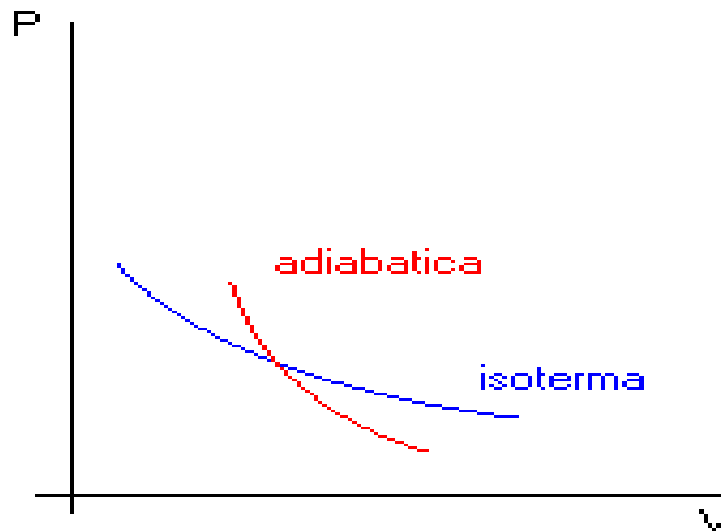
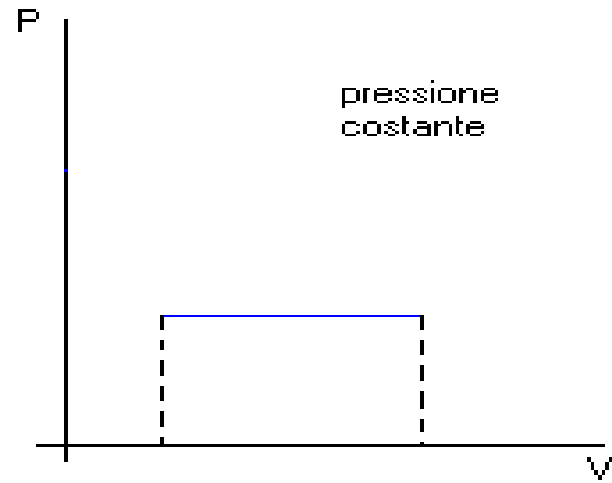
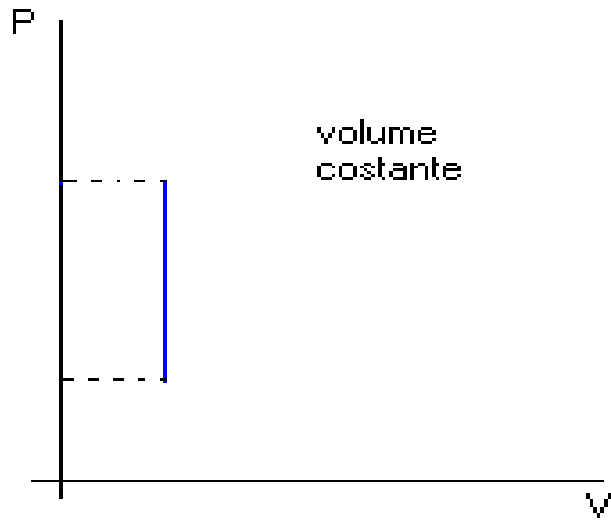
IL COEFFICIENTE $(C_v + R)/C_v$ E' DETTO γ

$$\gamma (1/V) dV/dP = -1/P$$



• QUESTA EQUAZIONE DIFFERENZIALE HA COME SOLUZIONE:

$$PV^\gamma = \text{COSTANTE}$$





EQUIVALENTE MECCANICO DELLA CALORIA

- **PRINCIPIO DI EQUIVALENZA: SE UN SISTEMA TERMODINAMICO ESEGUE UNA TRASFORMAZIONE CICLICA DURANTE LA QUALE IL SISTEMA SCAMBIA CON L'ESTERNO UN LAVORO L ED UNA CERTA QUANTITA' DI CALORE Q ESISTE UN RAPPORTO COSTANTE TRA I VALORI L E Q . QUESTO RAPPORTO HA VALORE UNIVERSALE INDIPENDENTE DAL PARTICOLARE SISTEMA E DAL TIPO DI TRASFORMAZIONE**

$$L/Q = J \quad J = 4.184 \text{ J/cal}$$

PRIMO PRINCIPIO DELLA TERMODINAMICA.

- IN UNA QUALSIASI TRASFORMAZIONE (REVERSIBILE O IRREVERSIBILE) LA QUANTITA' DI CALORE SCAMBIATA CON L'ESTERNO DAL SISTEMA E' UGUALE ALLA SOMMA DELLA VARIAZIONE DI ENERGIA INTERNA DEL SISTEMA COL LAVORO DA ESSO COMPIUTO.

$$Q = \Delta U + L$$



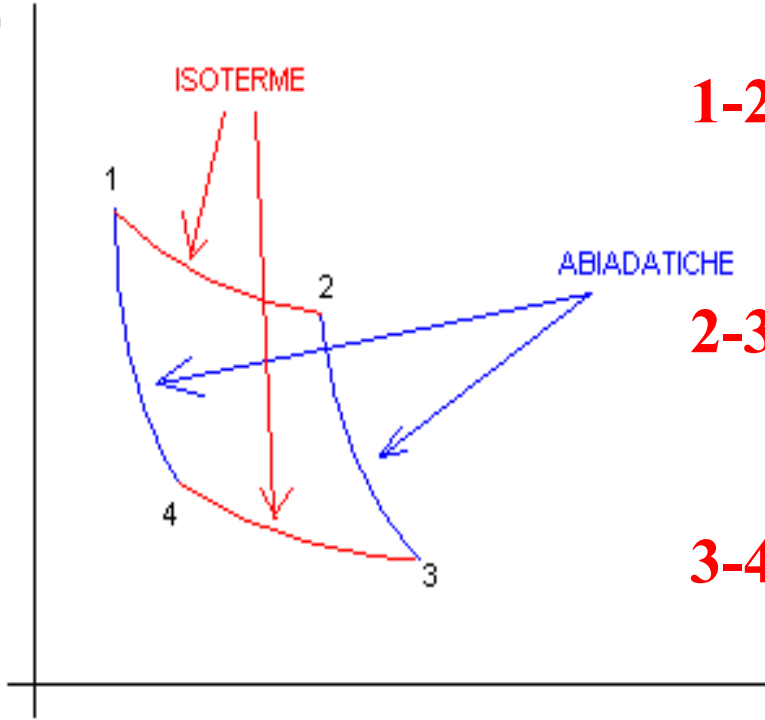
IL SECONDO PRINCIPIO DELLA TERMODINAMICA

ENUNCIATO DI CLAUSIUS: **IL PASSAGGIO DI CALORE DA UN CORPO FREDDO AD UNO CALDO NON AVVIENE MAI SPONTANEAMENTE.**

ENUNCIATO DI KELVIN: **E' IMPOSSIBILE REALIZZARE UNA MACCHINA CICLICA CHE FUNZIONI CON UNA SOLA SORGENTE DI CALORE E SIA CAPACE DI PRODURRE LAVORO**

I DUE ENUNCIATI SONO EQUIVALENTI

CICLO DI CARNOT



1-2 ESPANSIONE ISOTERMA

$$T = T_2 \quad Q_2 > 0 \quad L > 0 \quad DU > 0$$

2-3 ESPANSIONE ADIABATICA

$$T_i = T_2 \quad T_f = T_1 \quad Q = 0 \quad L > 0 \quad DU < 0$$

3-4 COMPRESSIONE ISOTERMA

$$T = T_1 \quad Q_1 < 0 \quad L < 0 \quad DU = 0$$

4-1 COMPRESSIONE ADIABATICA

$$T_i = T_1 \quad T_f = T_2 \quad Q = 0 \quad L < 0 \quad DU > 0$$

$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} \leq 0$$

**L'UGUAGLIANZA VALE SE LE TRASFORMAZIONI SONO
TUTTE REVERSIBILI**



GENERALIZZAZIONE AD UN NUMERO INFINITO DI SORGENTI

SE IL CICLO E' REVERSIBILE:

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = 0$$

SE IL CICLO NON E' REVERSIBILE

$$\oint \frac{\delta Q}{T} < 0$$



$$\int_A^B \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{REV}} = S(B) - S(A)$$

LA FUNZIONE S DEFINITA DALLA RELAZIONE PRECEDENTE PRENDE IL NOME DI ENTROPIA DEL SISTEMA



DALLE RELAZIONI PRECEDENTI SEGUE CHE:

$$\int_A^B \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{IRR}} < \int_A^B \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{REV}} = S(B) - S(A)$$

E' MOLTO INTERESSANTE CONSIDERARE QUESTA DISEGUAGLIANZA NEL CASO DI UNA TRASFORMAZIONE ADIABATICA IRREVERSIBILE. POICHE' LO SCAMBIO DI CALORE NELLA TRASFORMAZIONE E' NULLO, ABBIAMO:

$$0 = \int_A^B \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{IRR}} < S(B) - S(A)$$



IN UNA TRASFORMAZIONE ADIABATICA IRREVERSIBILE L'ENTROPIA AUMENTA. POICHE' UN SISTEMA ISOLATO (PER DEFINIZIONE) PUO' COMPIERE SOLAMENTE TRASFORMAZIONI ADIABATICHE E, NELLA REALTA', IRREVERSIBILI, ABBIAMO CHE L'ENTROPIA DI UN QUALUNQUE SISTEMA ISOLATO, DURANTE LA PROPRIA EVOLUZIONE, AUMENTA.

LA ENTROPIA DI UN SISTEMA E' LEGATA ALLO STATO MICROSCOPICO DEL SISTEMA ATTRAVERSO LA DEFINIZIONE STATISTICA DEL NUMERO W DI STATI ACCESSIBILI AL SISTEMA.

LEGGE DI BOLTZMAN

$$S = K \log W$$



IN GENERALE IL NUMERO DI STATI ACCESSIBILI DIPENDE DALLA TEMPERATURA DEL SISTEMA; NEL CASO PARTICOLARE DI $T=0$ IL SISTEMA TERMODINAMICO PUO' ASSUMERE UN SOLO STATO MICROSCOPICO, $W = 1$. IN TAL CASO, DALLA LEGGE DI BOLTZMAN ABBIAMO:

$$S(T=0) = 0.$$

RELAZIONE CHE PRENDE IL NOME DI
TERZO PRINCIPIO DELLA TERMODINAMICA.



PROBLEMI

- 1) Due corpi di massa M_1 ed M_2 e calori specifici c_1 e c_2 sono inizialmente a temperature T_1 e T_2 , rispettivamente. Se essi vengono messi in contatto, a quale temperatura viene raggiunto l'equilibrio?
- 2) Quante calorie ci vogliono per far aumentare di $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 10 g di olio d'oliva?
- 3) Quante calorie ci vogliono per sciogliere 1 g di ghiaccio (alla temperatura iniziale di $0\text{ }^{\circ}\text{C}$) e farlo evaporare completamente alla pressione costante di 1 atm ?



PROBLEMI Cont.

- 1) UNA CERTA QUANTITA' DI ELIO ALLA PRESSIONE DI 1 atm VIENE COMPRESSA ADIABATICAMENTE ED IN MODO REVERSIBILE FINCHE' IL VOLUME NON SI RIDUCE AD 1/5 DEL VOLUME INIZIALE. SI CALCOLI LA PRESSIONE FINALE DEL GAS.
- 2) UN GAS ESEGUE UNA TRASFORMAZIONE ISOTERMA REVERSIBILE. CALCOLARE IL LAVORO FATTO DAL GAS , IL CALORE SCAMBIATO E LA VARIAZIONE DI ENERGIA INTERNA
- 3) ESEGUIRE IL CALCOLO ANALOGO PER LE TRASFORMAZIONI ISOBARE, ISOCORE ED ADIABATICHE
- 4) QUAL E' L'ENERGIA INTERNA DI 40g DI He A TEMPERATURA $T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$?