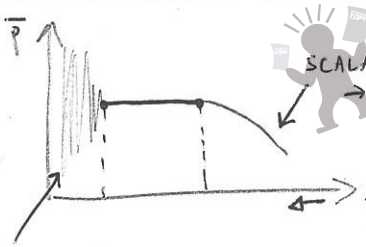
FLUIDO

STATO DELLA MATERIA CHE PARTENDO DA UNO STATO DI QUIETE, SE SOTTOPOSTO A UNO SFORZO DI TAGLIO / SCORRIMENTO, INIZIA A MUOVERSI SENZA OPPORRE RESISTENZA ($\forall$ SFORZO), QUINDI NON SI HA UN "ATTRITO DI PRIMO DISTACCO". UNA VOLTA IN MOTO SI GENERANO GRADIENTI TRASVERSALI DI VELOCITÀ E QUINDI SFORZI RESISTIVI / VISCOSI IN OPPOSIZIONE AL MOTO. (SOSTANZA INDEFORMABILE INTESO CONTINUO E INDEFINITAMENTE SE SOTTOPOSTO A UNO SFORZO DI TAGLIO TF)

IPOTESI DEL CONTINUO → IL FLUIDO È CONSIDERATO COME UN CONTINUO, QUINDI PROPRIETÀ INTENSIVE DEL FLUIDO (TITIZIE) POSSONO ESSERE DEFINITE A QUALSIASI SCALA DI LUNGHEZZA E QUINDI VARIARNO CON CONTINUITÀ DA UN PUNTO ALL'ALTRO, VIENE IGNORATA LA NATURA MOLECOLARE (DISCRETA) DEL FLUIDO.

VORREI NON TENER CONTO DEL MOTO DELLE SINGOLE MOLECOLE NELLA DEFINIZIONE DEL FLUIDO (IN OGNI MOL SI HANNO $6 \cdot 10^{23}$ PARTICELLE E DI OGNUNA DOVREI CONOSCERE LE CONDIZIONI INIZIALI PER DESCRIVERNE LA DINAMICA → IMPOSSIBILE!)



COMPORTAMENTO NON STATISTICAMENTE STAZIONARIO (ORDINE DEL LIBERO CAMMINO MEDIO)
→ V COSÌ PICCOLO CHE IN 2 ISTANTI DIVERSI POTREI, CON 2 MISURAZIONI DIVERSE, TROVARE UN DIVERSO N° DI PARTICELLE (ADDIRITTURA NESSUNA) E QUINDI UNA DENSITÀ CASUALE! → VARIAZIONI DOVUTE ALLE FLUTTUAZIONI MOLECOLARI

QUESTA ZONA NON ESISTE SE:
- GAS RAREFATTI (A SX) → QUESTA ZONA SI SPOSTA SEMPRE PIÙ VERSO DX
- URTI (A DX) E IN PARTICOLARE ALL'INTERNO DI ESSI → SI SPOSTA VERSO SX

← NELLA ZONA CENTRALE $\bar{\rho}$ NON VARIA AL RIDURSI DI V POICHÉ IL FENOMENO FISICO CHE DOMINA ρ AVVIENE SU SCALE MAGGIORI

⇓

PER DEFINIRE L'IPOTESI DEL CONTINUO DEVO QUINDI SCEGLIERE UNA SCALA ADEGUATA, QUINDI UN VOLUMETTO PICCOLO MA COMUNQUE SUFFICIENTEMENTE GRANDE DA CONTENERE UN N° DI PARTICELLE TALE DA RENDERE STATISTICAMENTE SIGNIFICATIVA LA GRANDEZZA CHE STO MISURANDO

N° DI KNUDSEN $(Kn) = \dfrac{\text{CAMMINO LIBERO MEDIO (GAS)}}{\text{DISTANZA INTERMOLECOLARE (LIQ. SOL.)}} = \dfrac{l}{L_{CAR}}$

L_{CAR} ← L IN CUI AVVENGONO GRADIENTI SIGNIFICATIVI

→ PER $Kn \ll 1$ VALE L'IP. DEL CONTINUO

L_{CAR} MOLTO BASSA NEGLI URTI

NUMERATORE MOLTO ALTO NEI GAS RAREFATTI

⇒ QUESTO VOLUMETTO, NELL'IP. DEL CONTINUO, LO SI PUÒ CONSIDERARE COME UN PUNTO

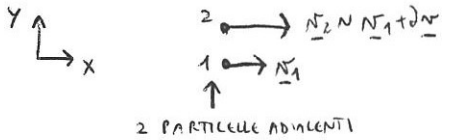
→ **PARTICELLA FLUIDA**: SUFFICIENTEMENTE PICCOLO DA POTER ESSERE CONSIDERATO INFINITESIMO RISPETTO ALLE VARIAZIONI SPAZIALI DELLE GRANDEZZE CONSIDERATE, MA ABBASTANZA GRANDE DA CONTENERE UN N° DI MOLECOLE SUFFICIENTE A RENDERE TALI GRANDEZZE STATISTICAMENTE STAZIONARIE

N° DI DEBORAH $(De) = \dfrac{t \text{ DI RILASSAMENTO DEL MEZZO IN TERMINI DI EQUILIBRIO LOCALE TERMODINAMICO}}{t_{CAR}}$

→ PER $De \ll 1$ VALE L'IP. DEL CONTINUO IN AMBITO TEMPORALE (NON VALE PER ONDE ACUSTICHE O MECCANICHE AD ALTISSIMA FREQUENZA)

→ NON POSSO COMUNQUE DIMENTICARMI DI CIÒ CHE SUCCEDE A LIVELLO MICROSCOPICO POICHÉ COMPORTA CONSEGUENTE A LIVELLO MACROSCOPICO (μ, V, dT)

VISCOSITA'



$\partial\underline{N}$ → PROVOCA L'INSORGENZA DI UNO <u>SFORZO VISCOSO</u> τ [N/m^2] CHE FRENA LO STRATO PIÙ VELOCE E ACCELERA IL PIÙ LENTO (IL PIÙ VELOCE "TRASCINA" IL PIÙ LENTO)

EQ. DI NEWTON

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y}$$

DERIV. TRASVERSALE DELLA VELOCITÀ

$\underline{N} = \left[\frac{\mu}{W}\right]$

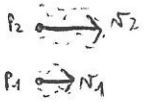
→ MODELLO MACROSCOPICO PER DESCRIVERE FENOMENI MICROSCOPICI

COEFF. DI VISCOSITÀ DINAMICA ("DIFFICOLTÀ DEGLI STRATI DI FLUIDO A SCORRERE L'UNO SULL'ALTRO")

$[Pa \cdot s = \frac{N}{m^2} s = \frac{kg}{ms}]$

A LIVELLO MICROSCOPICO DOVE SORGE QUESTO τ?

- **GAS**



SCAMBIO CONTINUO DI PARTICELLE TRA I DUE STRATI ADIACENTI E QUINDI I DUE STRATI SUBISCONO UNA MODIFICA DELLA VELOCITÀ MEDIA, POICHÈ LE PARTICELLE SI PORTANO CON SÈ LA LORO QUANTITÀ DI MOTO, SI FORMA QUINDI UNO SFORZO VISCOSO FRENANTE SUL PIÙ VELOCE E ACCELERANTE SUL PIÙ LENTO → <u>DIFFUSIONE DELLA Q. DI MOTO</u> CON LA CONSEGUENTA CUI LA VELOCITÀ TENDE A UNIFORMARSI

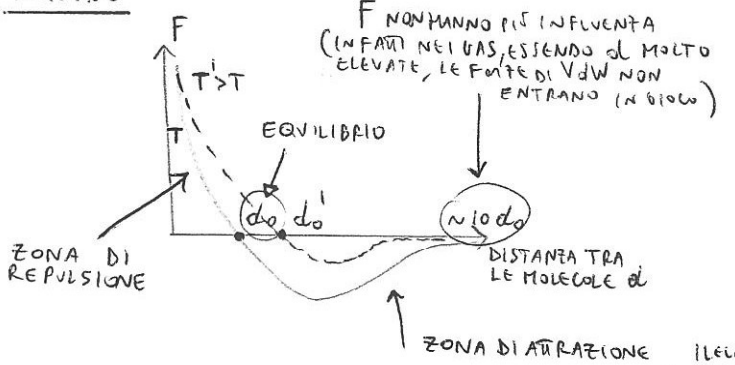
SE AUMENTA LA T AUMENTA IL MOTO CAOTICO E QUINDI LO SCAMBIO DELLA Q. DI MOTO E QUINDI μ

→ $T\uparrow \Rightarrow \mu\uparrow$

<u>VISCOSITÀ CINEMATICA</u> (COEFF. DI DIFF. DELLA Q. DI MOTO)

$$\nu = \mu/\rho \quad [m^2/s]$$

- **LIQUIDO**



IL FENOMENO SI BASA SULLE RELAZIONI INTERMOLECOLARI, OVVERO LE FORZE DI VAN DER WAALS. SE APPLICO UNO SCORRIMENTO TRA DUE STRATI DI UN LIQUIDO LA DISTANZA TRA MOLECOLE TENDE AD AUMENTARE E CIÒ ATTIVA UNA FORZA ATTRATTIVA CHE TENDE A RIPORTARE LE MOLECOLE NELLA LORO POSIZIONE DI EQUILIBRIO (d_0).

I LEGAMI TRA LE MOLECOLE SI FANNO PIÙ LABILI E QUINDI STRATI DI FLUIDO RIESCONO A SCORRERE L'UNO SULL'ALTRO

SE AUMENTA LA T AUMENTA IL VOLUME SPECIFICO E QUINDI d_0; CIÒ COMPORTA UNA MINOR ATTRAZIONE E MINORI FORZE E DI CONSEGUENZA DIMINUISCE μ DI MOLTO → $T\uparrow \Rightarrow \mu\downarrow\downarrow$

master COPY COPISTERIA

DIFFUSIVITÀ TERMICA

$\alpha_T = \frac{\lambda}{\rho c}$ $[m^2/s]$ → LEGGE DI FOURIER $\underline{q} = -\lambda \nabla T$ → EQ. DELLA DIFFUSIONE $\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_T \nabla^2 T$

(λ: CONDUCIBILITÀ $[W/mK]$)

PERCHÈ DIFFUSIONE DI ENERGIA SOTTO FORMA DI CALORE DA ZONE A T MAGGIORE A ZONE A T MINORE PER UN FENOMENO LOCALMENTE DETTA CONDUZIONE

- GAS

LE PARTICELLE, NEL LORO MOTO CAOTICO, OLTRE A SCAMBIARSI Q. DI MOTO SI SCAMBIANO ENERGIA SOTTO FORMA DI CALORE TRA STRATI ADIACENTI; MOLECOLE DALLA ZONA PIÙ CALDA VANNO VERSO LA ZONA PIÙ FREDDA INNALZANDONE LA T E VICEVERSA. SE AUMENTA LA T, LA MAGGIOR AGITAZIONE MOLECOLARE SI TRADUCE IN UN MAGGIOR SCAMBIO E QUINDI IN UN AUMENTO ELEVATO DI α_T → $T\uparrow \Rightarrow \alpha_T\uparrow\uparrow$

- LIQUIDO

SE AUMENTA T SI HANNO MAGGIORI VIBRAZIONI DELLE MOLECOLE LIQUIDE E QUINDI UNA CONDUZIONE MIGLIORE.
→ $T\uparrow \Rightarrow \alpha_T\uparrow$ (NON MOLTO)

master COPY

N° DI PRANDTL

$Pr = \frac{\nu}{\alpha_T}$ MI DICE QUAL È IL FENOMENO DI DIFFUSIONE PREDOMINANTE

master COPY COPISTERIA

- GAS → MI ASPETTO UN Pr_N UNITARIO E INDIPENDENTE DALLA T, POICHÈ IL MECCANISMO DI DIFFUSIONE È LO STESSO → $T\uparrow \Rightarrow Pr_N$

$Pr_{AIR} = 0,71 \div 0,72$

- LIQUIDO → MI ASPETTO CHE SE T AUMENTA ALLORA Pr SI RIDUCE, POICHÈ $\nu\downarrow$ E $\alpha_T\uparrow$ → $T\uparrow \Rightarrow Pr\downarrow$,
INOLTRE $\nu > \alpha_T$ E QUINDI $Pr > 1$

- $Pr_{H_2O} \simeq 10$
- LIQ. MOLTO VISCOSI $\simeq 100/1000/10000$
- LIQ. FRIGORIFERI $\simeq 2 \div 4$
- MET. LIQUIDI α_T ELEVATO E QUINDI $Pr < 1 \simeq 0,1 \div 0,01$

CONDIZIONI AL CONTORNO

AL CONTORNO SI RAGGIUNGE L'EQUILIBRIO TERMODINAMICO.

master COPY

- CAMPO DI VELOCITÀ → $\underline{v} = \underline{v}_{WALL}$ "NO-SLIP CONDITION"
- CAMPO DI T → $T = T_{WALL}$ VALE FINCHÈ È VALIDA L'IPOTESI DEL CONTINUO

COMPRIMIBILITA'

CAPACITA' DI UN FLUIDO DI VARIARE LA SUA DENSITA' A CAUSA DELLA VARIAZIONE DI ALTRE GRANDEZZE; È ANCHE LEGATA ALLE CONDIZIONI DI MOTO DEL FLUIDO RISPETTO ALLA VELOCITA' DEL SUONO.

$$\rho \frac{\partial \rho}{\partial p} = -\nu \frac{\partial \rho}{\partial \nu}$$

$-\uparrow\uparrow \Rightarrow \rho\uparrow \Rightarrow +$

$-\uparrow\uparrow \Rightarrow \nu\downarrow \Rightarrow -$

PIÙ IL VALORE È ALTA MINORI SONO LE $\partial\rho$ E $\partial\nu$ E QUINDI IL FLUIDO È MAGGIORMENTE INCOMPRIMIBILE.

↑ SPESSO SI STUDIA A T COSTANTE

COEFFICIENTE DI COMPRIMIBILITA'

- ALLO SFORZO DI ρ $\quad K_\rho = \frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial \rho}{\partial \rho}\right)_T = -\frac{1}{\nu}\left(\frac{\partial \nu}{\partial \rho}\right)_T$ ALTO SE IL FLUIDO È COMPRIMIBILE; ESPRIME LA VARIAZIONE % DI ρ O ν A FRONTE DI UNA VARIAZIONE DI ρ A T COSTANTE

  - GAS → $\rho/\rho = R_{GAS} T \rightarrow K_\rho = \frac{1}{\rho}\cdot\frac{1}{R_{GAS}T} = \frac{1}{\rho}$ $[Pa^{-1}]$
  - LIQUIDO → $K_\rho \simeq 0$ (10^{-11})

- ALLA VARIAZIONE DI T (COEFF. DI DILATAZIONE (VOLUMETRICA) TERMICA) $\quad K_T = \beta = \ominus \frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_\rho = \frac{1}{\nu}\left(\frac{\partial \nu}{\partial T}\right)_\rho$

  (ρ DIMINUISCE SE AUMENTA T)

  - GAS → $\beta = -\frac{1}{\rho}\left(-\frac{\rho}{R_{GAS}T^2}\right) = \frac{1}{T}$ $[K^{-1}]$
  - LIQUIDO → $\beta = 10^{-4} \div 10^{-3}$ $\quad (\beta_{H_2O} \simeq 5\cdot 10^{-4} K^{-1})$

QUALI SONO GLI EFFETTI SU ρ PER UN FLUIDO CHE SI MUOVE CON UNA CERTA VELOCITA'?

→ UNA STIMA DEL $\Delta\rho$ CHE INDUCE LA VELOCITÀ LA SI PUÒ FARE CON BERNOULLI $\Delta\rho \simeq \frac{1}{2}\rho u^2$ A VOLER VEDERE GLI EFFETTI CHE HANNO SULLA COMPRIMIBILITÀ DEL FLUIDO...

VELOCITA' DEL SUONO $\quad a^2 = \left(\frac{\partial \rho}{\partial \rho}\right)_S$ → PER ORDINI DI GRANDEZZA $a^2 \simeq \frac{\Delta\rho}{\Delta\rho} \simeq \frac{\frac{1}{2}\rho u^2}{\Delta\rho} \rightarrow \frac{\Delta\rho}{\rho} \simeq \frac{1}{2}\left(\frac{u}{a}\right)^2 = \frac{1}{2}Ma^2$

→ $\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{1}{2}Ma^2$ PIÙ IL N' DI MACH È PICCOLO PIÙ IL FLUIDO PRESENTA UN COMPORTAMENTO INCOMPRIMIBILE (QUINDI PIÙ IL FLUIDO SI ALLONTANA DALLA VELOCITÀ DEL SUONO)

→ $Ma < 0{,}2 \div 0{,}3$ PER L'INCOMPRIMIBILITA'

master COPY

LINEE DI FLUSSO: DESCRIVONO UN CAMPO VETTORIALE E SONO PUNTO PER PUNTO TANGENTI AL VETTORE CONSIDERATO. MI DANNO QUINDI DIREZIONE E VERSO DEL CAMPO, SENZA INFO SULL'INTENSITÀ. SI DEFINISCONO ISTANTE PER ISTANTE.

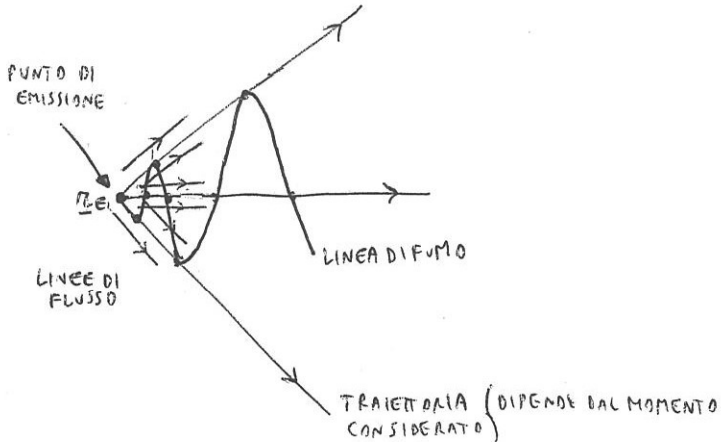


$$\begin{cases} \frac{d\underline{\xi}(\sigma)}{d\sigma} = \underline{N}(\underline{\xi}(\sigma), t) \\ \underline{\xi}(0) = \underline{\pi}_0 \end{cases}$$

CON σ VARIABILE CHE PARAMETRIZZA LA CURVA

TRAIETTORIA: È L'INSIEME DEI PUNTI OCCUPATI DA UNA PARTICELLA FLUIDA PER OGNI $t > t_0$, QUINDI È LA LINEA CHE EFFETTIVAMENTE PERCORRE. NON POSSONO INTERSECARSI NELLO STESSO t, MA SE IL PROBLEMA È STAZIONARIO LE TRAIETTORIE DI PARTICELLE CHE PASSANO IN ISTANTI DIVERSI IN UN PUNTO COINCIDONO E COSÌ LE LINEE DI FLUSSO.

LINEA DI FUMO: LINEA CHE A UN CERTO ISTANTE DI TEMPO CONGIUNGE TUTTI I PUNTI OCCUPATI DALLE PARTICELLE CHE SONO PASSATE DAL PUNTO $\underline{\pi}_E$ (DETTO DI EMISSIONE) NEGLI ISTANTI PRECEDENTI. IN STAZIONARIO COINCIDONO CON LE LINEE DI FLUSSO E LE TRAIETTORIE.



master COPY COPISTERIA

TUBO DI FLUSSO: È UN INSIEME DI LINEE DI FLUSSO



SULLA SUPERFICIE LATERALE SI HA SEMPRE TG AL VETTORE $\underline{w}$.

SE HO UN CAMPO SOLENOIDALE (OVVERO IN CUI IL FLUSSO ATTRAVERSO UNA QUALSIASI SUPERFICIE CHIUSA È NULLO, COME IL CAMPO DI $\underline{w}$) AVRÒ SU S_1 E S_2 LO STESSO FLUSSO, POICHÉ SULLE LINEE DI FLUSSO, MUOVENDOMI TG, NON HO FLUSSO.

→ $\boxed{\overline{w}_1 S_1 = \overline{w}_2 S_2}$

master COPY

FORZE DI VOLUME: AGISCONO ALL'INTERNO DEL VOLUME INFINITESIMO, TIPICAMENTE A SEGUITO DI UN'AZIONE A DISTANZA, COME IL PESO E FORZE ELETTROMAGNETICHE.

FORZE DI SUPERFICIE: ANCHE DETTE FORZE DI CONTATTO PERCHÉ IMPLICANO UNO SCAMBIO DI QUANTITÀ DI MOTO A LIVELLO MOLECOLARE ATTRAVERSO LA SUPERFICIE DEL VOLUMETTO.