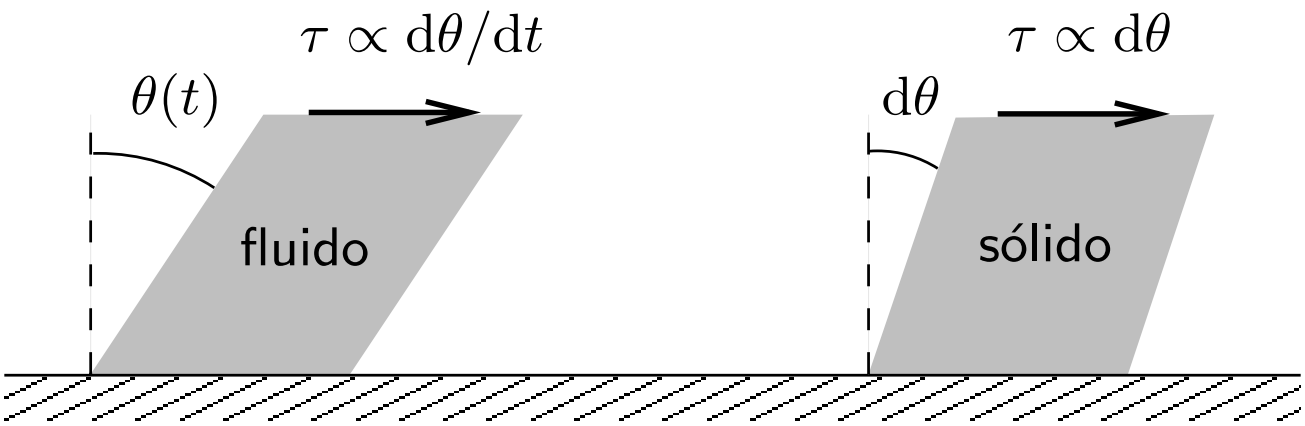
Tema 1

Introducción

Sólidos, líquidos y gases

Sólidos:
- se deforman poco bajo la acción de una fuerza pequeña
- presentan resistencia proporcional a la deformación
- tienen forma fija

Fluidos:
- se deforman con facilidad bajo la acción de una fuerza adecuada
- presentan resistencia proporcional a la velocidad a la que se produce la deformación
- adoptan la forma del recipiente que los contiene



Líquidos: tienen volumen fijo (compresibilidad muy pequeña)

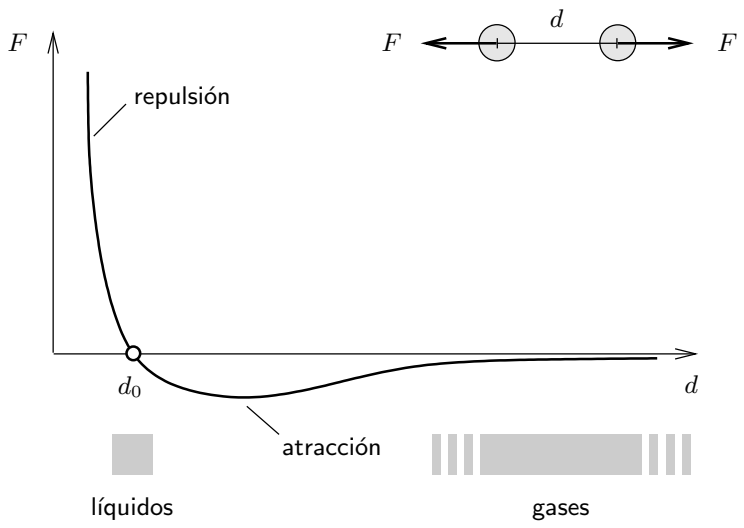
Gases: ocupan todo el volumen disponible (compresibilidad alta)

Compresibilidad:

$$\left(\frac{\partial \rho}{\partial p}\right)_{T,\text{líquido}} \ll \left(\frac{\partial \rho}{\partial p}\right)_{T,\text{gas}}$$

Sólidos, líquidos y gases

La distinta compresibilidad entre líquidos y gases es resultado de la distinta estructura microscópica.



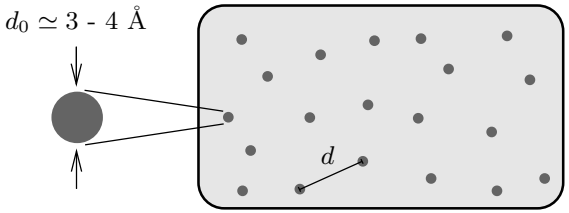
- F fuerza intermolecular
- d distancia intermolecular
- d_0 distancia crítica $\sim 3\,10^{-10}\,\mathrm{m}$
- ρ densidad
- N_A número de Avogadro, $6{,}023\,10^{23}$ moléculas/mol
- W masa molar

La distancia intermolecular d puede estimarse como

$$\rho = \frac{W/N_A}{d^3} \equiv \frac{\text{masa de 1 molécula}}{\text{volumen ocupado por 1 molécula}} \quad \rightarrow \quad d = \left(\frac{W}{\rho N_A}\right)^{1/3}$$

Gases ($d \simeq 10\,d_0$)

- Baja densidad
- Alta compresibilidad
- Ocupan todo el espacio disponible



Aire:

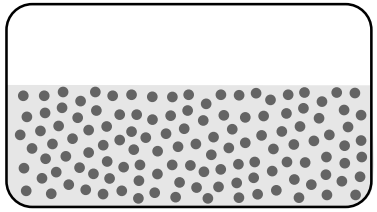
$\rho = 1{,}2\,\mathrm{kg/m^3} \quad W = 28{,}96\,\mathrm{g/mol}$

$\rightsquigarrow d \simeq 3{,}4\,10^{-9}\,\mathrm{m}$

$\rightsquigarrow 10^{16}$ moléculas en $1\,\mathrm{mm}^3$

Líquidos ($d \simeq d_0$)

- Alta densidad
- Baja compresibilidad
- Forman superficies libres



Agua:

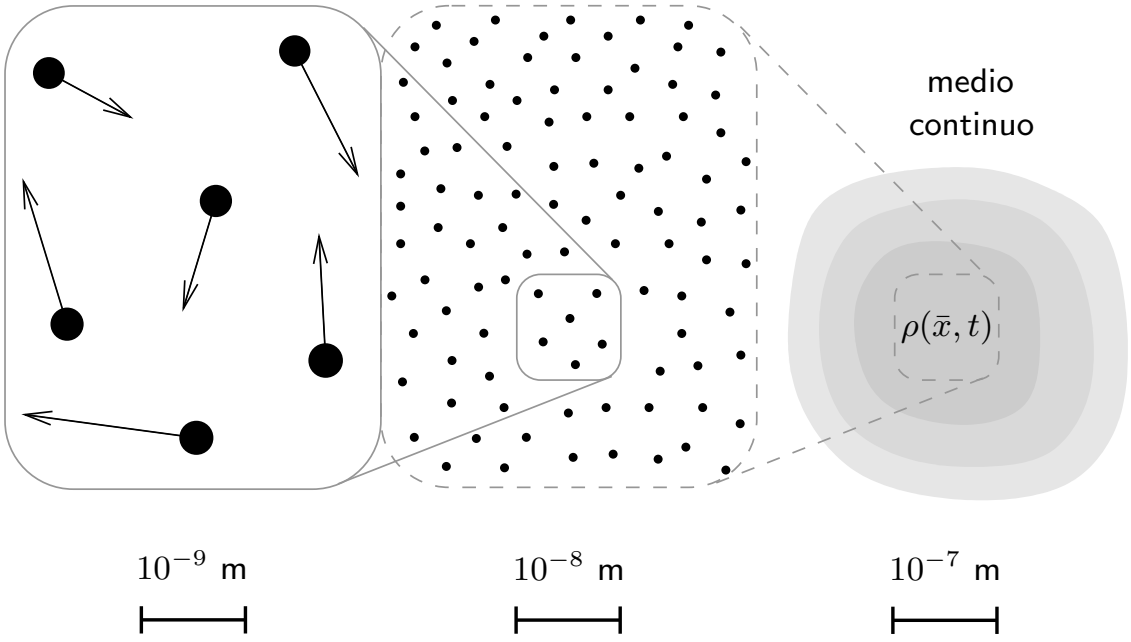
$\rho = 10^3\,\mathrm{kg/m^3} \quad W = 18{,}02\,\mathrm{g/mol}$

$\rightsquigarrow d \simeq 3{,}1\,10^{-10}\,\mathrm{m}$

$\rightsquigarrow 10^{19}$ moléculas en $1\,\mathrm{mm}^3$

Hipótesis de medio continuo: partícula fluida

La hipótesis de medio continuo permite definir un rango de escalas donde las propiedades del fluido se pueden describir como funciones continuas de la posición y del tiempo.



Partícula fluida: pequeño volumen de fluido δV con respecto al cual definimos los conceptos de velocidad, densidad, etc. Cada partícula está centrada en una posición $\bar{x}$ y su tamaño ha de ser:

- suficientemente grande para poder promediar el valor de las propiedades fluidas en ella y
- suficientemente pequeño para poder representar un punto material de coordenadas $\bar{x}$.

El conocimiento de las propiedades de cada partícula fluida en un cierto instante será suficiente para una descripción precisa del campo fluido (velocidad, densidad, etc.) en función de la posición, $\bar{x}$, y del tiempo, t.

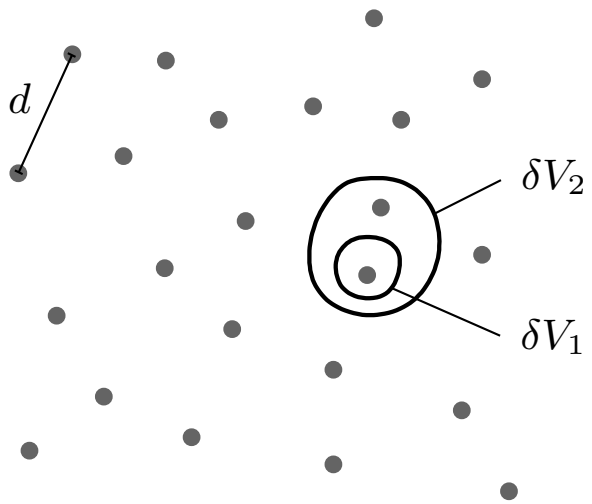
Partícula fluida

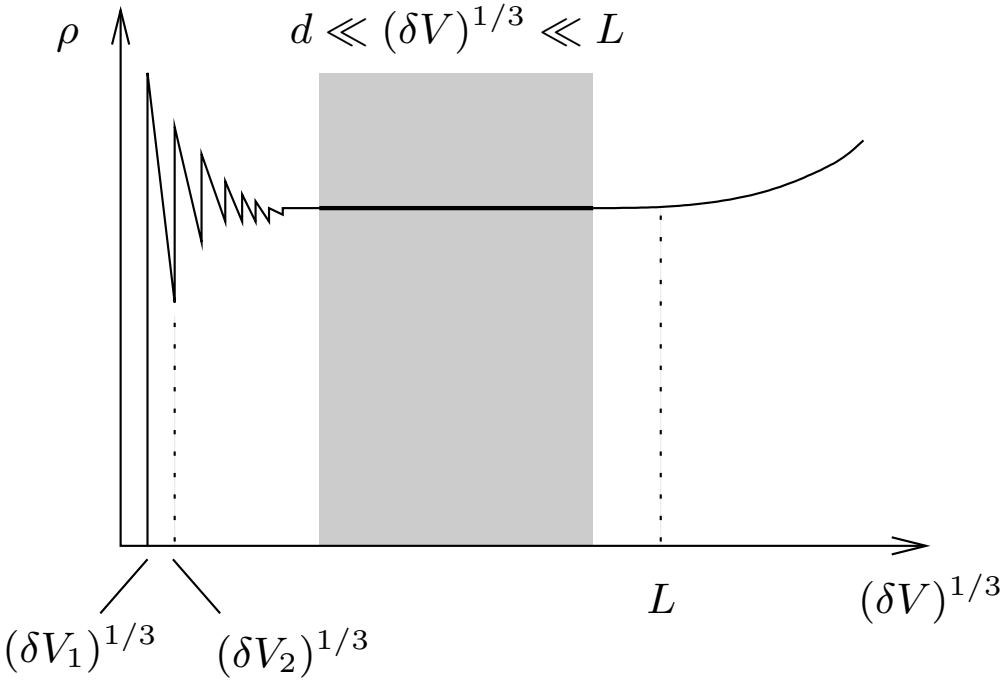
- d distancia intermolecular, $d \simeq 3{,}4\ 10^{-9}$ m para el aire en cn y $d \simeq 3{,}1\ 10^{-10}$ m para el agua
- L longitud macroscópica característica

Calculemos la densidad de una partícula fluida de volumen δV de acuerdo a

$$\rho = \frac{\Sigma m_i}{\delta V},$$

donde Σm_i es la masa de todas las moléculas situadas en el interior de la partícula fluida considerada:





Partícula fluida: volumen de fluido δV centrado en $\bar{x}$ en el instante t, $\boxed{d \ll (\delta V)^{1/3} \ll L}$

Densidad, velocidad y energía interna

- d distancia intermolecular, $d \simeq 3{,}4\,10^{-9}$ m para el aire en cn y $d \simeq 3{,}1\,10^{-10}$ m para el agua
- L longitud macroscópica característica
- m_i masa de la molécula i
- $\bar{v}_i$ velocidad de la molécula i
- E_i energía total de la molécula i

Partícula fluida: volumen de fluido δV centrado en $\bar{x}$ en el instante t, $\boxed{d \ll (\delta V)^{1/3} \ll L}$

Densidad: $$\rho(\bar{x}, t) = \lim_{\delta V \to 0} \frac{\Sigma m_i}{\delta V}$$

Velocidad: $$\bar{v}(\bar{x}, t) = \lim_{\delta V \to 0} \frac{\Sigma m_i \bar{v}_i}{\Sigma m_i}$$

Energía interna p.u. masa: $$e(\bar{x}, t) = \lim_{\delta V \to 0} \frac{\Sigma E_i}{\Sigma m_i} - \frac{|\bar{v}|^2}{2}$$

Equilibrio termodinámico local

Termodinámica Clásica
Sistema homogéneo en equilibrio térmico y mecánico, con propiedades uniformes en $\bar{x}$ y t: con dos variables de estado se caracteriza el sistema, cualquier otra variable es función de estas dos a través de las ecuaciones de estado.

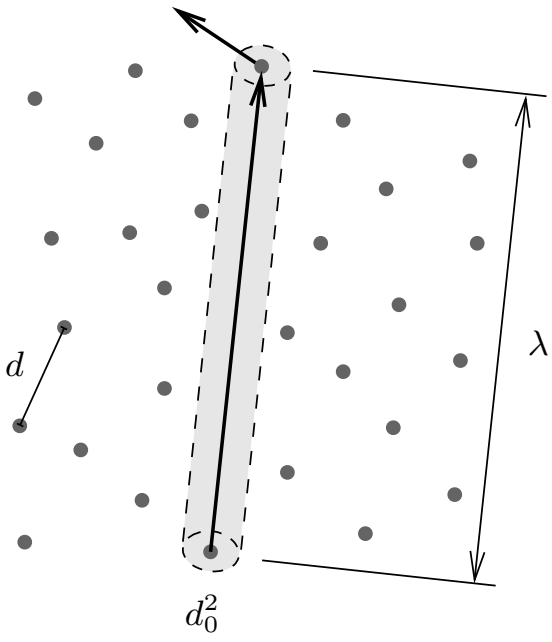
Estrictamente, los resultados de la Termodinámica no son aplicables en Mecánica de fluidos, pero en la práctica (afortunadamente) sí.

Por la hipótesis de equilibrio termodinámico local, un observador moviéndose con la velocidad del fluido puede definir su estado mediante las ecuaciones de estado que se aplican a estados de equilibrio termodinámico. En todo momento es como si el fluido se encontrara en cada punto muy cerca del equilibrio termodinámico correspondiente a los valores locales de densidad y energía interna.

- Justificación teórica rigurosa para gases
- Amplia evidencia experimental para líquidos

Equilibrio termodinámico local

El mecanismo que garantiza el ETL en los gases radica en las colisiones intermoleculares, en las que se produce intercambio de cm y energía. Siempre y cuando la distancia media entre choques λ, también llamada *recorrido libre medio*, sea mucho más pequeña que la longitud característica macroscópica L, cada molécula sufrirá un número muy elevado de choques antes de alcanzar regiones donde las propiedades macroscópicas cambian apreciablemente.



Igualando el volumen que le corresponde a cada molécula, d^3, con el volumen barrido por la molécula en su movimiento entre colisiones, $d_0^2\lambda$, se puede estimar el camino libre medio entre colisiones,

$$\lambda/d = (d/d_0)^2.$$

Para el aire en cn, $\lambda \sim 4\,10^{-7}\mathrm{m} \sim 128d$.

Equilibrio termodinámico local $\boxed{\dfrac{\lambda}{L} \ll 1}$ Medio continuo $\boxed{\dfrac{d}{L} \ll 1}$

El criterio más restrictivo es el correspondiente al equilibrio termodinámico local, por tanto definimos la partícula fluida con la condición

$$\boxed{\lambda \ll (\delta V)^{1/3} \ll L}$$

La hipótesis de equilibrio termodinámico local permite aplicar localmente las relaciones y leyes termodinámicas.

Variables y relaciones termodinámicas de interés

Con $\bar{v}(\bar{x}, t)$ y dos variables termodinámicas, pej. $\rho(\bar{x}, t)$ y $e(\bar{x}, t)$ (ya definidas), podemos definir el estado local del fluido. Las demás variables termodinámicas quedan automáticamente definidas a través de las ecuaciones de estado correspondientes.

Entropía

$$s = s(e, \rho) \quad \text{o} \quad e = e(s, \rho)$$

$$\mathrm{d}e = T\mathrm{d}s - p\mathrm{d}(1/\rho)$$

Entalpía

$$h = e + \frac{p}{\rho}$$

Temperatura

$$T = \left(\frac{\partial e}{\partial s}\right)_\rho$$

Presión

$$p = -\left(\frac{\partial e}{\partial \rho^{-1}}\right)_s$$

c	calor específico de un líquido
$R_g = R^{\circ}/W$	constante del gas
$R^{\circ} = 8{,}314$ J/(mol K)	constante universal de los gases
W	peso molecular medio del gas
c_v	calor específico de un gas a volumen constante
$c_p = c_v + R_g$	calor específico de un gas a presión constante
$\gamma = c_p/c_v$	relación de calores específicos de un gas

Líquido caloríficamente perfecto (ρ, c constantes)

$$\rho = \rho_0$$

$$e = cT + e_0$$

$$h = cT + e_0 + \frac{p}{\rho_0}$$

$$s = c\ln(T) + s_0$$

Gas caloríficamente perfecto (c_v, c_p constantes)

$$p = \rho R_g T$$

$$e = c_v T + e_0$$

$$h = c_p T + e_0$$

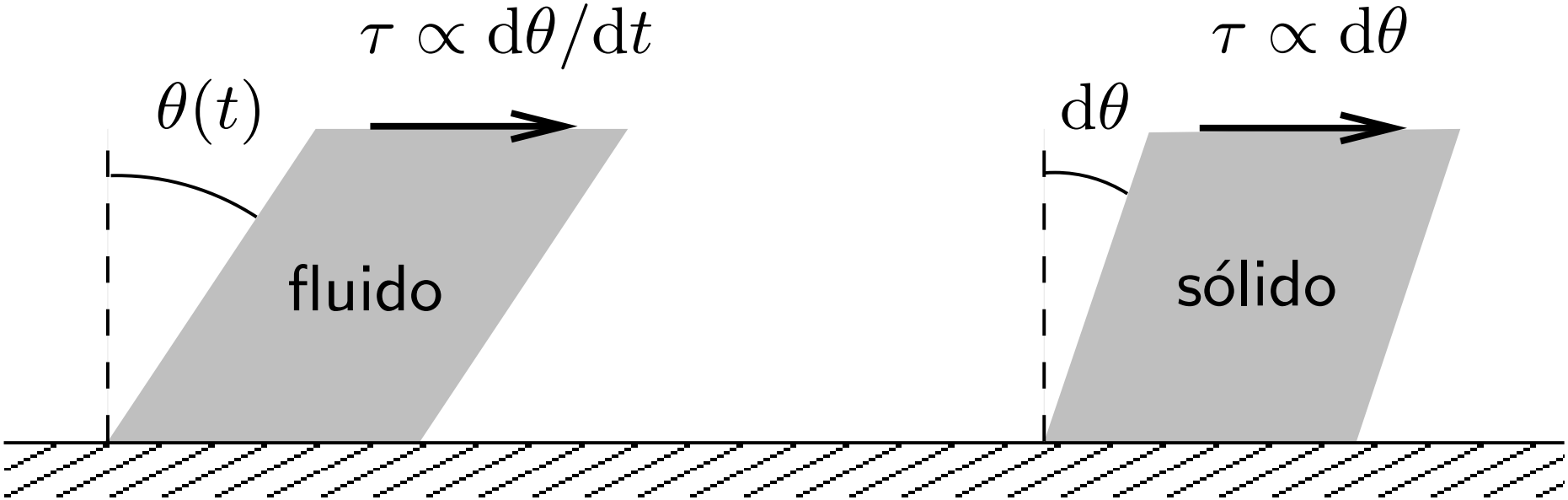
$$s = c_v \ln\left(\frac{p}{\rho^\gamma}\right) + s_0$$

Agua

$\rho_0 = 10^3$ kg/m^3
$c = 4180$ J/(kg K)

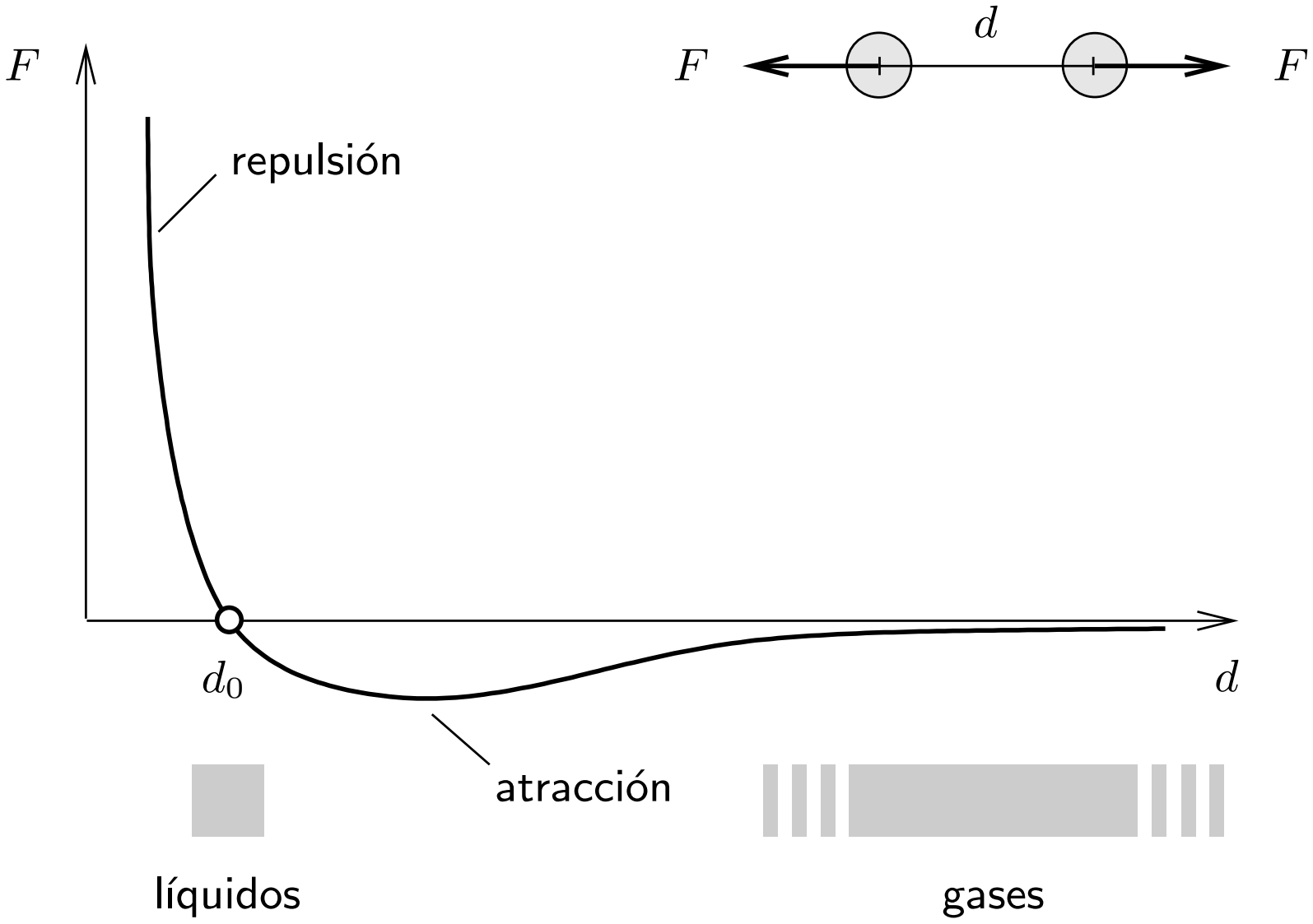
Aire en condiciones normales

$R_g = 287$ J/(kg K)
$c_v = 717$ J/(kg K), $c_p = 1004$ J/(kg K), $\gamma = 1{,}4$



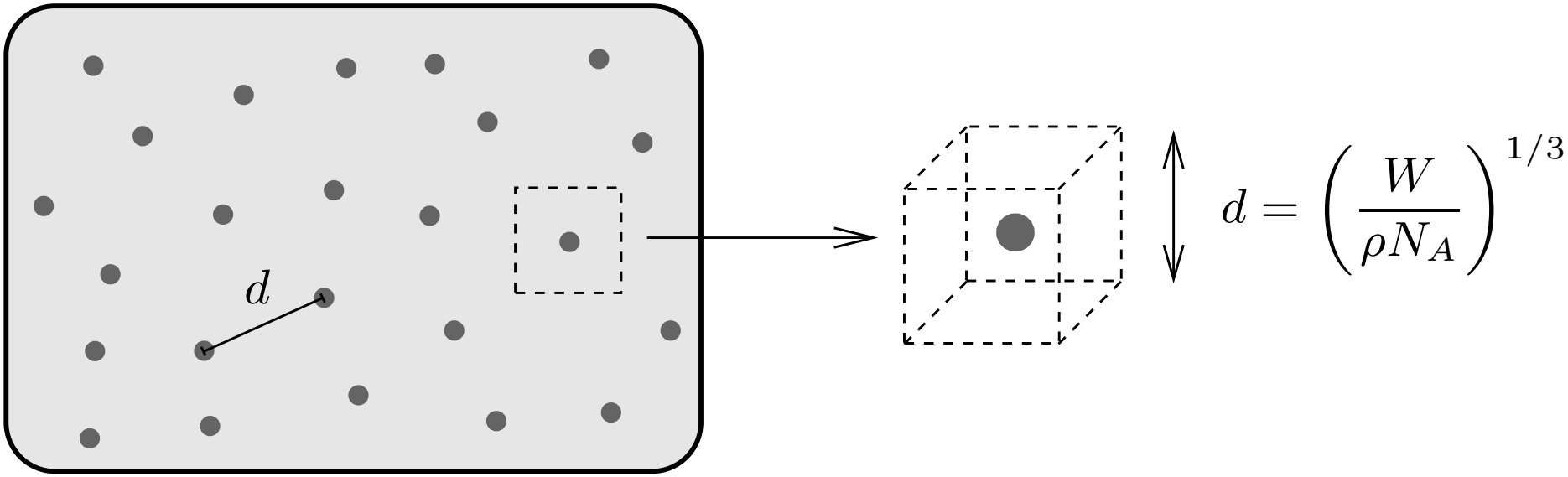
Ante la aplicación de una fuerza exterior, los sólidos responden con una deformación estática proporcional a la fuerza aplicada, mientras que los fluidos se deforman de forma indefinida, con una fuerza de resistencia proporcional a la velocidad a la que se produce la deformación.

El fluido se deforma continuamente bajo la acción de una fuerza exterior tangencial:



Representación esquemática de la fuerza que se ejerce entre dos moléculas eléctricamente neutras que no forman enlace químico, como función de la distancia entre sus centros.

(volver)



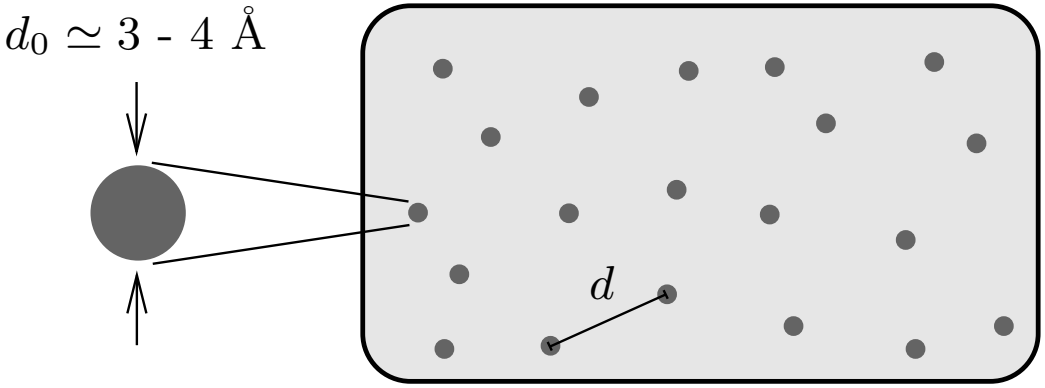
En promedio, el volumen ocupado por una molécula es un cubo de lado $\boldsymbol{d}$, donde $\boldsymbol{d}$ representa la distancia intermolecular media. Conocida la densidad del fluido, $\boldsymbol{\rho}$, y su masa molecular, $\boldsymbol{W}$, es fácil estimar el valor de $\boldsymbol{d}$.
La distancia intermolecular $\boldsymbol{d}$ puede estimarse como

$$\boldsymbol{\rho = \frac{W/N_A}{d^3}} \equiv \frac{\text{masa de 1 molécula}}{\text{volumen ocupado por 1 molécula}} \quad \rightarrow \quad \boldsymbol{d = \left(\frac{W}{\rho N_A}\right)^{1/3}}$$

(volver)

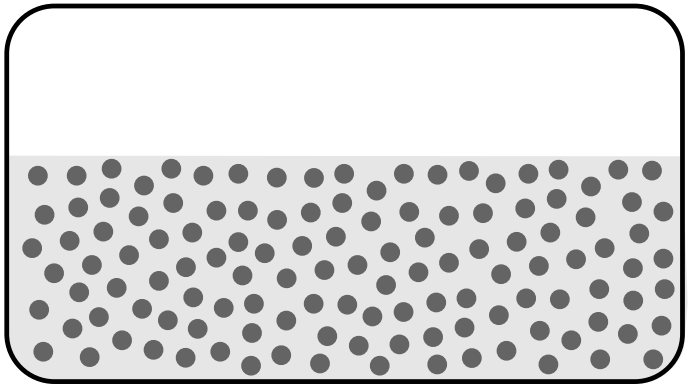
Gases ($d \simeq 10\, d_0$)

- Baja densidad
- Alta compresibilidad
- Ocupan todo el espacio disponible



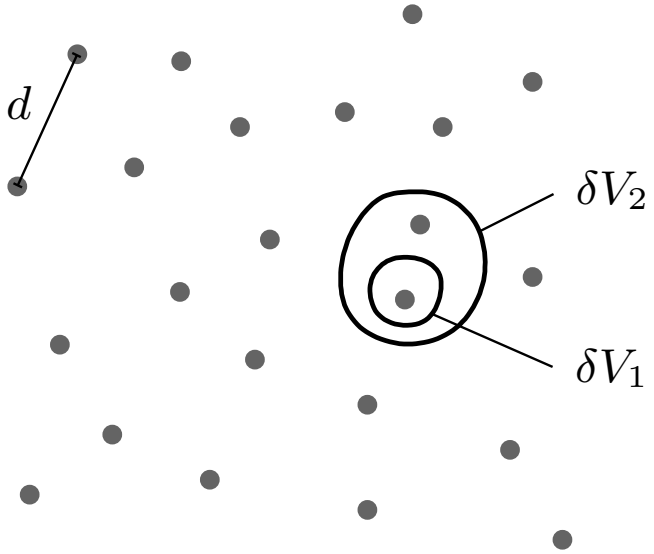
Líquidos ($d \simeq d_0$)

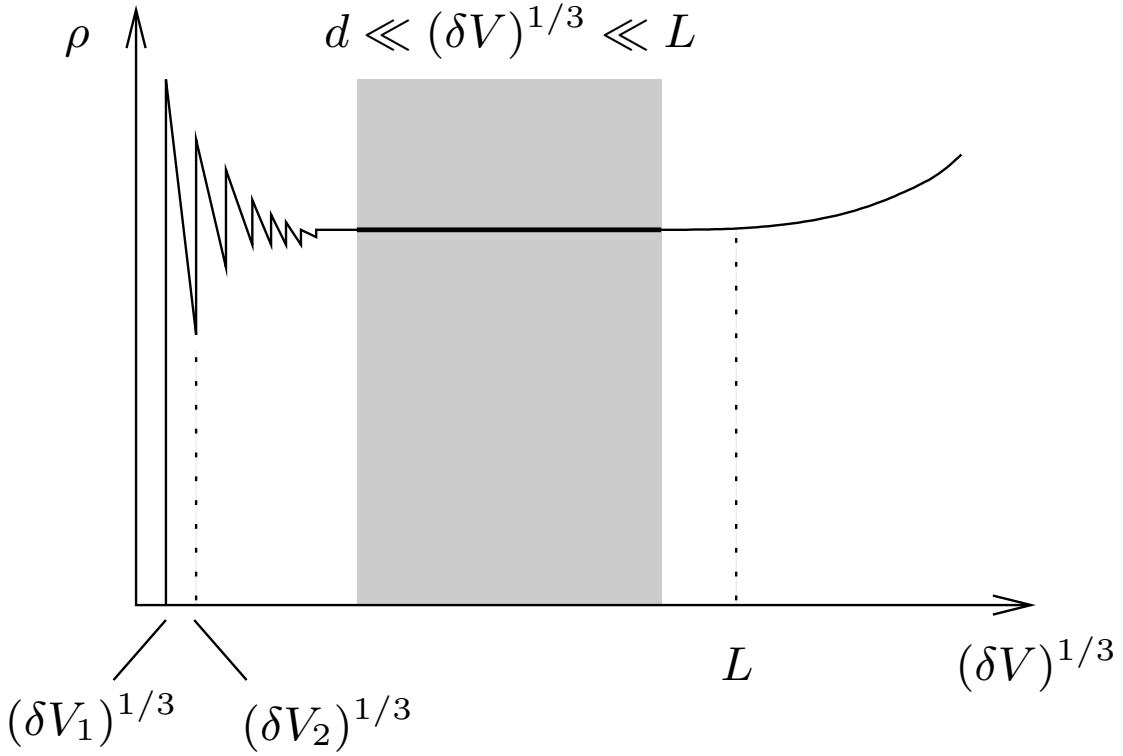
- Alta densidad
- Baja compresibilidad
- Forman superficies libres



Las diferencias en las propiedades macroscópicas de líquidos y gases son resultado de la distinta estructura microscópica que presentan ambos.

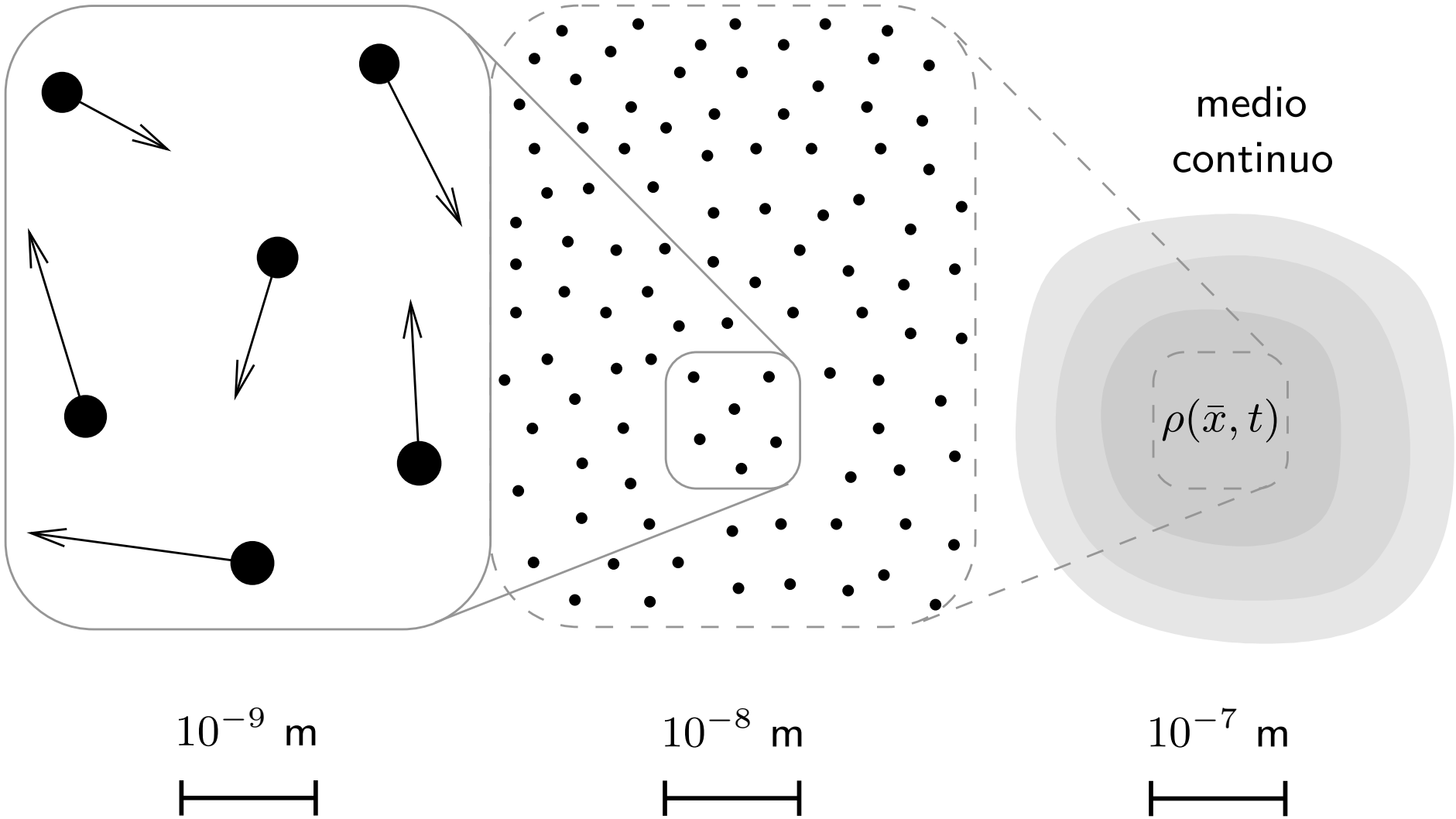
(volver)





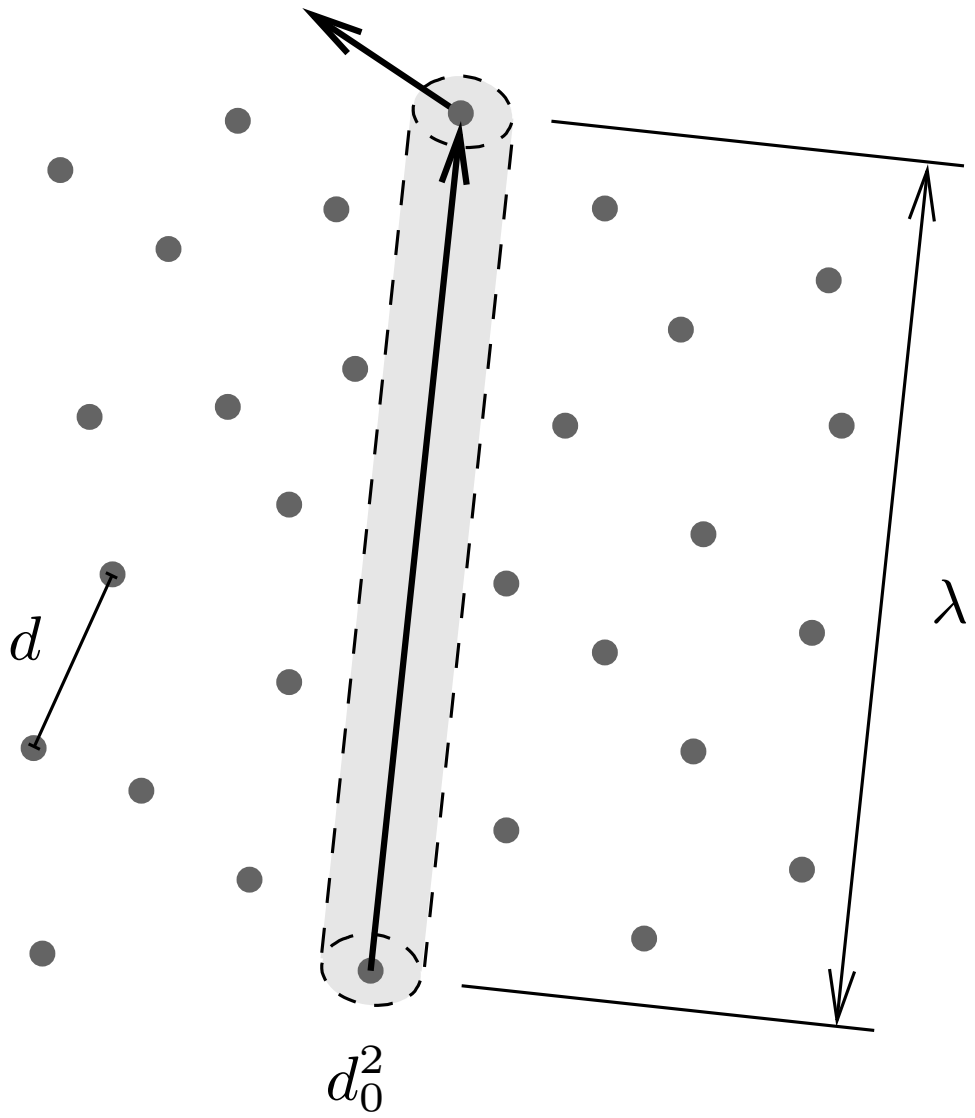
Concepto de partícula fluida.

(volver)



La hipótesis de medio continuo, $d/L \ll 1$, permite definir un rango de escalas entre la escala característica microscópica, d, y la escala característica macroscópica, L, donde las propiedades del fluido se pueden describir como funciones continuas de la posición y del tiempo.

(volver)



Igualando el volumen que le corresponde a cada molécula, d^3, con el volumen barrido por la molécula en su movimiento entre colisiones, $d_0^2\lambda$, se puede estimar el camino libre medio entre colisiones, $\lambda/d = (d/d_0)^2$.

(volver)