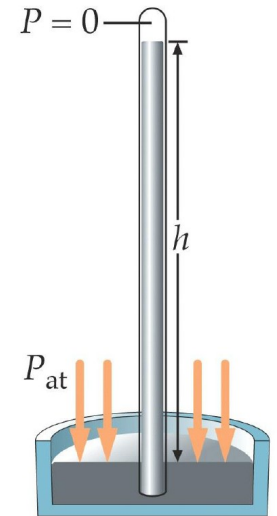


Repaso

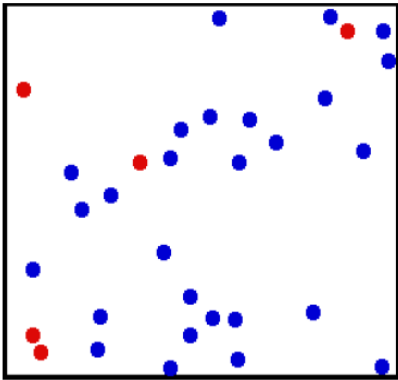
VACIO Cuánto es un buen vacío?

Bajo vacío (Rough vacuum) Torr	1 atm a 0.1
Vacío medio	0.1 a 10^{-3} Torr
Alto vacío	10^{-3} a 10^{-8} Torr
Ultra alto vacío	10^{-8} a 10^{-12} Torr

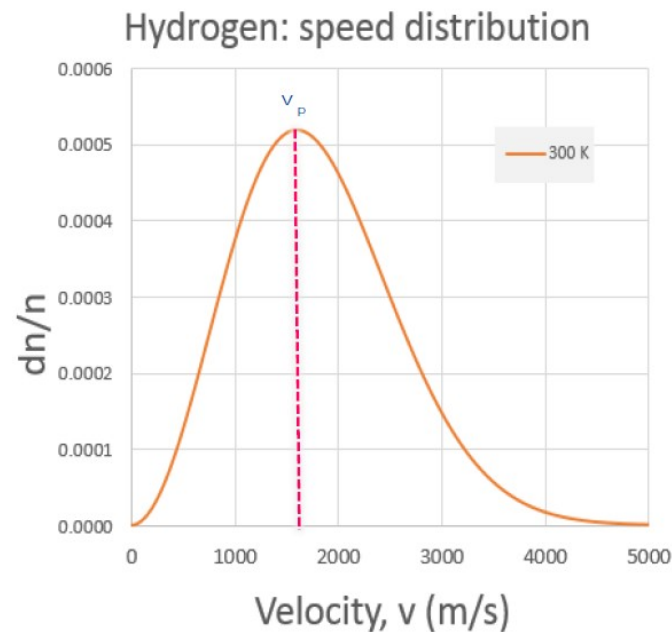


$$P = \rho_m h g$$

Teoría cinética de los gases - Distribución Maxwell Boltzmann



$$\frac{dn}{n} = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{m}{2kT} \right)^{3/2} v^2 e^{-\frac{mv^2}{2kT}} dv$$



$$v_p = \sqrt{\frac{2kT}{m}}$$

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \int_0^{\infty} v \frac{dn}{dv} dv = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}$$

$$v_q = \sqrt{\frac{3kT}{m}} \quad \frac{1}{2} m v_q^2 = \frac{3}{2} kT$$

$$\sim \sqrt{(T/m)}$$

El promedio de las velocidades

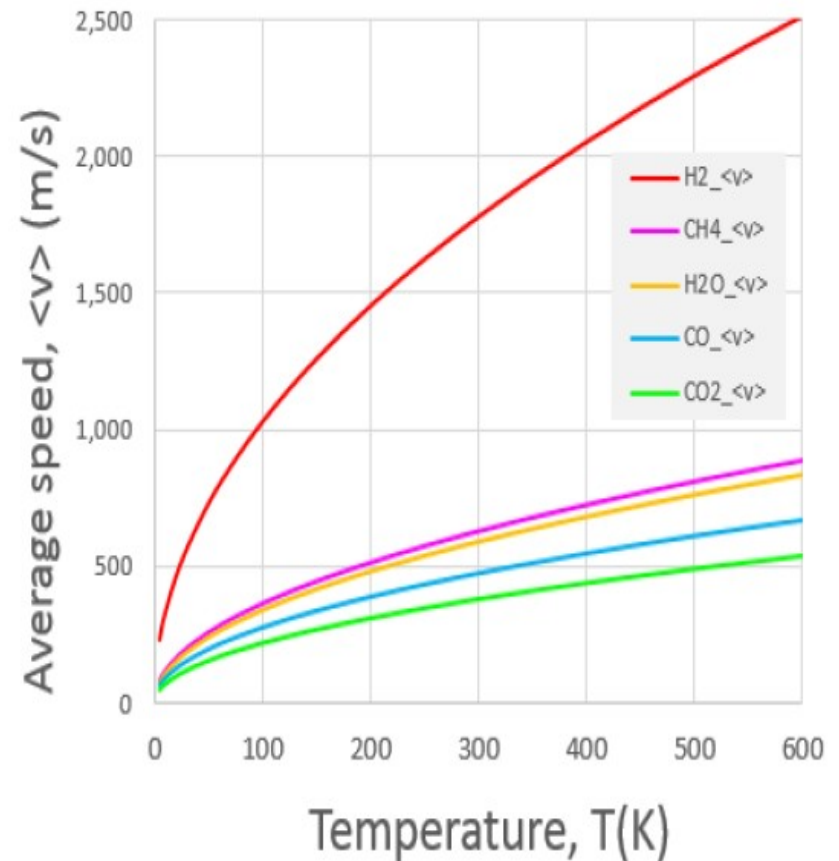
Estimación:

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} = 145 \sqrt{\frac{T}{M}}$$

$$\sim \sqrt{T/m}$$

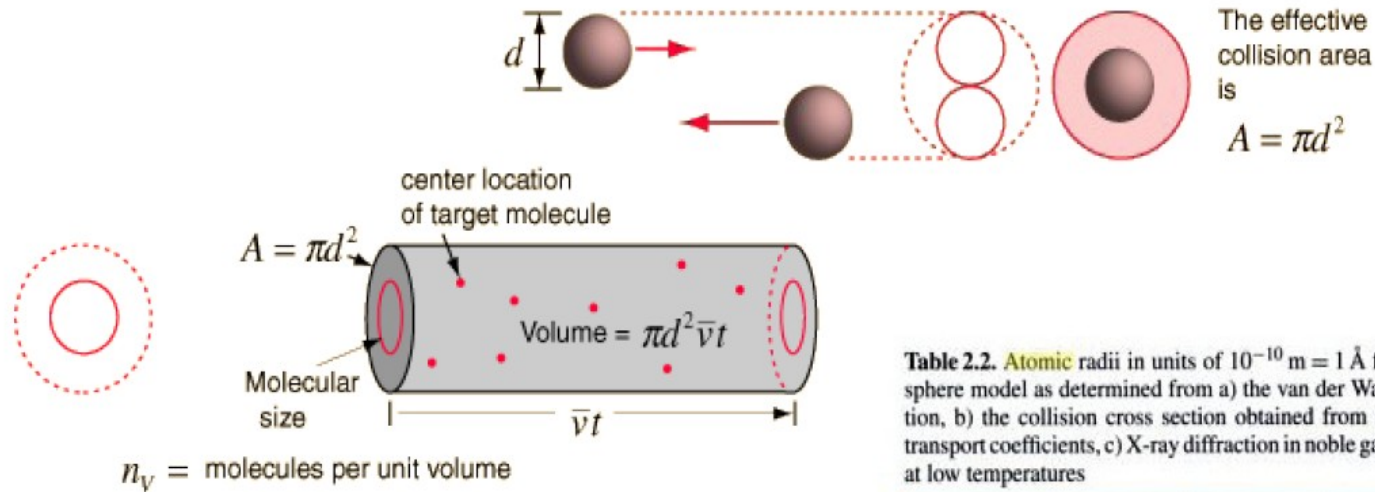
Valores experimentales:

T (K)	He	Air	Ar
4.2	150	55	50
300	1300	470	400
600	1800	660	560



Valores numéricos para gas a baja presión

Camino libre medio



$$\lambda = \frac{k_B T}{\sqrt{2} \pi d^2 P}$$

Aire a
T ambiente

$$\lambda(cm) = \frac{5 \times 10^{-3}}{P(Torr)}$$

Table 2.2. Atomic radii in units of $10^{-10} \text{ m} = 1 \text{ \AA}$ for a hard sphere model as determined from a) the van der Waals equation, b) the collision cross section obtained from measured transport coefficients, c) X-ray diffraction in noble gas crystals at low temperatures

Atom	a)	b)	c)
He	1.33	0.91	1.76
Ne	1.19	1.13	1.59
Ar	1.48	1.49	1.91
Kr	1.59	1.61	2.01
Xe	1.73	1.77	2.20
Hg	2.1	1.4	—

Camino libre medio

$$\lambda = \frac{\mu}{p} \sqrt{\frac{\pi k T}{2m}}$$

λ = camino libre medio

μ = viscosidad

p = presión

T = temperatura

m = masa molecular

Presión (Pa)	10^{-6}	10^{-3}	1	10^3	10^5
Camino libre medio	km	m	mm	μm	nm
Aire	6.8	6.8	6.8	6.8	68
Argón	7.2	7.2	7.2	7.2	72
CO ₂	4.5	4.5	4.5	4.5	45
Hidrógeno	12.5	12.5	12.5	12.5	125
Vapor de agua	4.2	4.2	4.2	4.2	42
Helio	19.6	19.6	19.6	19.6	196
Nitrógeno	6.7	6.7	6.7	6.7	67
Néon	14.0	14.0	14.0	14.0	140
Oxígeno	7.2	7.2	7.2	7.2	72
Presión (mbar)	10^{-8}	10^{-5}	10^{-2}	10	1000

$$\lambda_{air} [cm] = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{P [Torr]}$$

(en aire y a temperatura ambiente)

Frecuencia de colisión de un gas sobre una pared

$$Z = n \int_0^{\infty} v_z f(v_z) dv_z$$

donde:

$$f(v_z) = \left(\frac{m}{2\pi k_B T} \right)^{1/2} \exp \left(-\frac{mv_z^2}{2k_B T} \right)$$

$$Z = n \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{\frac{k_B T}{m}}$$

Ahora usamos la ecuación del gas ideal:

$$P = nk_B T$$

$$n = \frac{P}{k_B T}$$

Sustituyendo:

$$Z = \frac{P}{k_B T} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{\frac{k_B T}{m}}$$

Reordenando:

$$\boxed{Z = \frac{P}{\sqrt{2\pi m k_B T}}}$$

1 Flujo de moléculas que inciden sobre la superficie

De la teoría cinética de gases, el flujo molecular Z (moléculas que chocan por unidad de área y tiempo) es:

$$Z = \frac{P}{\sqrt{2\pi m k_B T}}$$

En forma práctica (muy usada en vacío), se escribe como:

$$Z \approx 3.5 \times 10^{22} \frac{P}{\sqrt{MT}} \left[\frac{\text{moléculas}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}} \right]$$

donde:

- P = presión en **mbar**
- M = masa molecular en g/mol
- T = temperatura en K

2 Número de moléculas en una monocapa

Una monocapa típica tiene del orden de:

$$N_s \approx 10^{15} \text{ moléculas/cm}^2$$

(depende del tamaño molecular, pero es un buen orden de magnitud).

3 Tiempo de formación de monocapa

Si suponemos coeficiente de sticking $S = 1$ (peor caso), el tiempo es:

$$t = \frac{N_s}{Z}$$

Combinando:

$$t \approx \frac{10^{15}}{3.5 \times 10^{22}} \frac{\sqrt{MT}}{P}$$

$$t \approx 3 \times 10^{-8} \frac{\sqrt{MT}}{P}$$

con P en mbar y t en segundos.

4 Fórmula simplificada (muy usada en UHV)

Para aire ($M \approx 29$ g/mol) a 300 K:

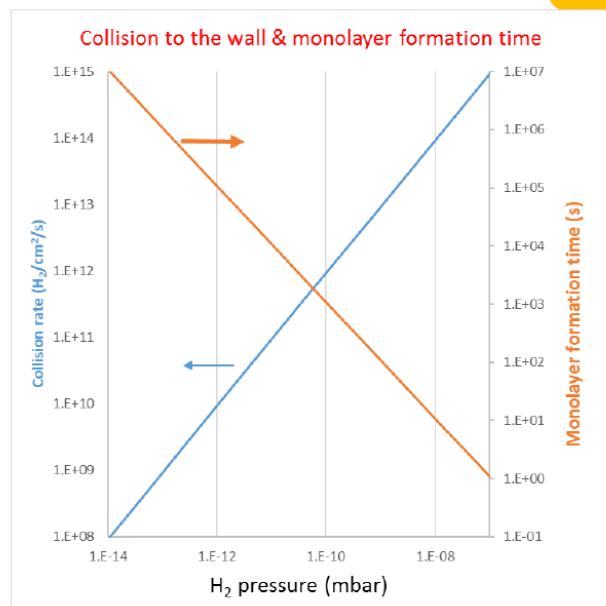
$$t(s) \approx \frac{10^{-6}}{P(\text{mbar})}$$

Esta es la regla práctica más conocida.

5 Tiempos para distintos rangos de vacío

Usando esa aproximación:

Presión (mbar)	Régimen	Tiempo monocapa
10^{-3}	vacío primario	1 ms
10^{-6}	alto vacío	1 s
10^{-9}	UHV	1000 s (~17 min)
10^{-11}	UHV extremo	~1 día



1 Definición del número de Reynolds

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu}$$

donde:

- ρ = densidad del gas
- v = velocidad característica
- L = longitud característica (diámetro del tubo, por ejemplo)
- μ = viscosidad dinámica

También puede escribirse como:

$$Re = \frac{vL}{\nu}$$

con $\nu = \mu/\rho$ (viscosidad cinemática).

2 Clasificación del flujo según Reynolds

Para flujo interno (por ejemplo en un tubo):

Régimen	Rango típico
Laminar	$Re < 2000$
Transicional	$2000 < Re < 4000$
Turbulento	$Re > 4000$

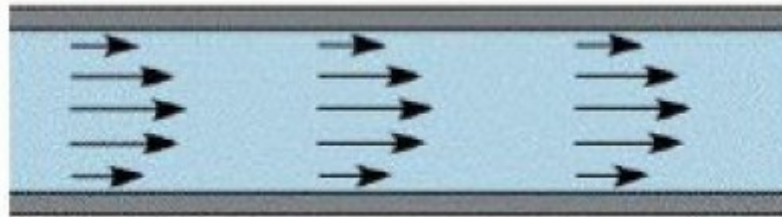
Estos valores son empíricos y dependen de la geometría.

3 Interpretación física

El número de Reynolds mide:

$$\frac{\text{Fuerzas inerciales}}{\text{Fuerzas viscosas}}$$

- Si Re es pequeño $\rightarrow$ domina la viscosidad $\rightarrow$ flujo ordenado (laminar)



- Si Re es grande $\rightarrow$ domina la inercia $\rightarrow$ aparecen inestabilidades $\rightarrow$ turbulencia



En sistemas de vacío el Reynolds **no es suficiente** para clasificar el flujo.

En vacío interesa más el **número de Knudsen**:

$$Kn = \frac{\lambda}{L}$$

donde λ es el camino libre medio.

Porque en presiones bajas el gas deja de comportarse como continuo.

Entonces aparecen tres regímenes distintos:

- Flujo viscoso (continuo)
- Flujo transicional
- Flujo molecular

Y ahí Reynolds deja de ser el parámetro dominante.

En presión atmosférica → Reynolds gobierna.

En alto vacío → Knudsen gobierna.

En tu tipo de experimentos (alto vacío o UHV), el flujo suele ser:

- Reynolds muy bajo
- Knudsen grande → régimen molecular

Se puede encontrar una relación entre los números de Reynolds y los de Knudsen

$$Re = 3 \frac{v}{\bar{v}} \frac{1}{Kn}$$

Kn	Régimen físico
Kn < 0.01	Flujo continuo (Navier–Stokes válido)
0.01 < Kn < 0.1	Deslizamiento
0.1 < Kn < 10	Transicional
Kn > 10	Molecular

En sistemas de vacío:

- Rough vacuum → continuo
- High vacuum → transicional
- UHV → molecular

Thermal Conductivity

Thermal conductivity of a gas is independent of the pressure when the pressure is well above the molecular flow regime.

In the transition regime, the heat transfer is proportional to the pressure and to the temperature difference. Principle of pressure measurement with a Pirani gauge.

$$10^{-3} \text{ Torr} < P < 10 \text{ Torr}$$

At very low pressures, the heat transfer by conduction is negligible :
vacuum for thermal insulation in cryogenics.

