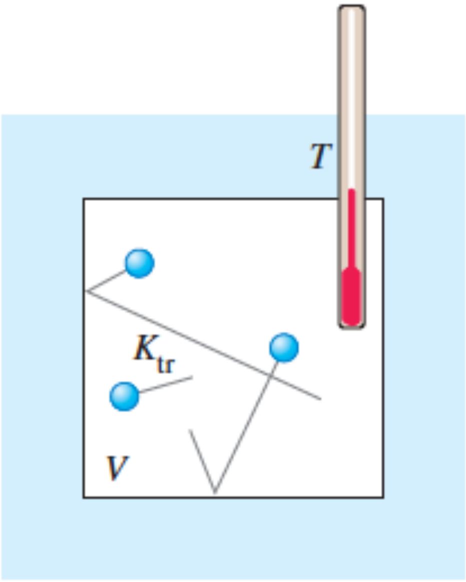
4300159 – Física do Calor

Processos Termodinâmicos
Quase Estáticos

Gás Ideal Monoatômico

Energia Interna: $U(T) = \frac{3}{2} N k_B T = \frac{3}{2} nRT$

Calor específico molar a volume constante (C_V):



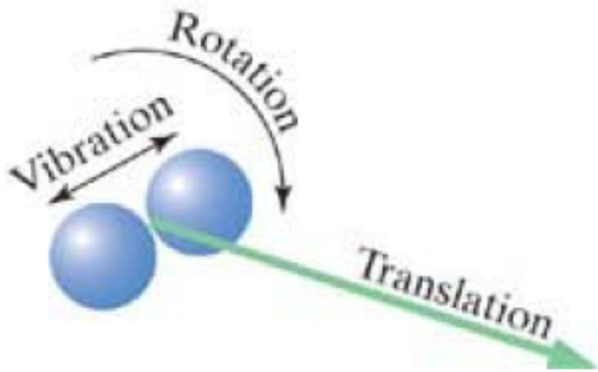
$$dQ = dU \Rightarrow nC_V dT = \frac{3}{2} nRdT$$

$$\boxed{C_V = \frac{3}{2} R}$$

Calor específico por molécula a volume constante (c_V):

$$Nc_V dT = \frac{3}{2} N k_B dT \Rightarrow \boxed{c_V = \frac{3}{2} k_B}$$

Moléculas Diatômicas



– A energia interna do gás diatômico (U) se relaciona à energia média por molécula (ε) que resulta dos três movimentos:

$$U = N\langle\epsilon\rangle = N\left(\underbrace{\langle K_{\text{trans}}\rangle}_{(3/2)k_B T} + \underbrace{\langle\epsilon_{\text{rot}}\rangle + \langle\epsilon_{\text{vib}}\rangle}_{??} \right)$$

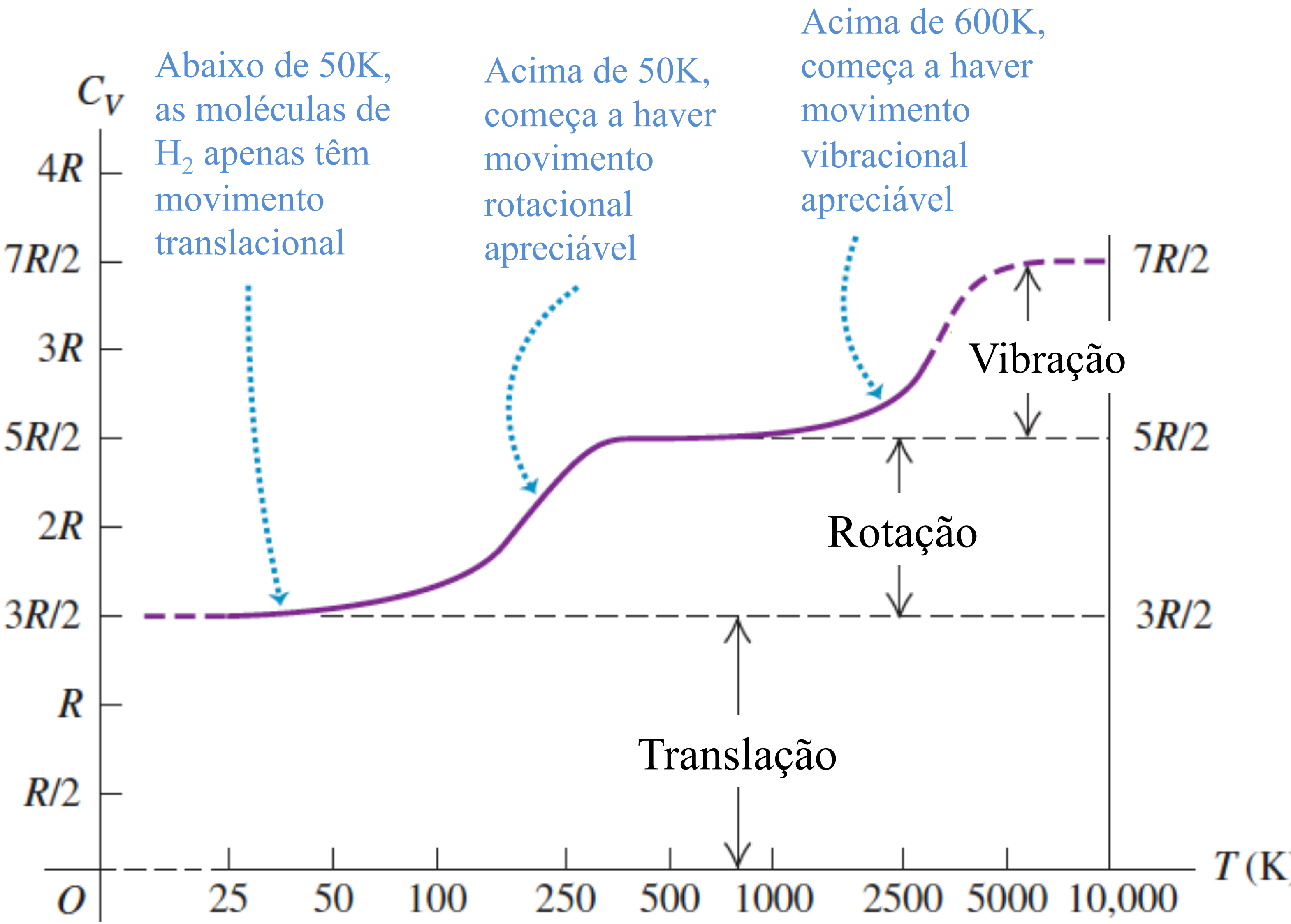
– Para muitos gases diatômicos, para temperaturas $T \sim 10^2$ K:

$$U = \frac{5}{2}Nk_BT = \frac{5}{2}nRT$$ (energia interna)

$$C_V = \frac{5}{2}R$$ (calor específico molar a volume constante)

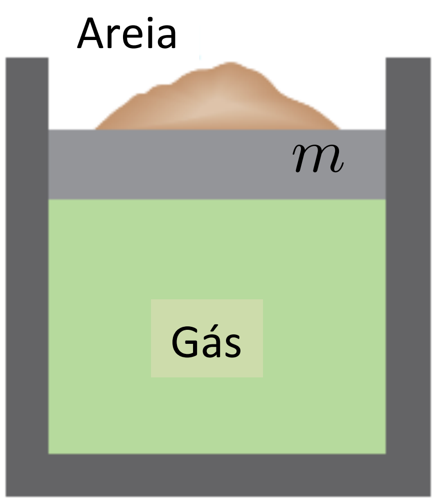
$$c_V = \frac{5}{2}k_B$$ (calor específico por molécula a volume constante)

Exemplo: Hidrogênio (H_2)



1) Na figura abaixo, o pistão pode deslizar verticalmente sem atrito. O sistema encontra-se em equilíbrio mecânico na situação indicada, com a massa m de areia depositada sobre a superfície do pistão.

Suponha que a quantidade de areia seja dobrada ($2m$) de duas formas diferentes: (i) rapidamente (adicionando toda a areia de uma só vez), e (ii) dobrando a quantidade de areia lentamente (adicionando a areia grão por grão).



A equação de estado $pV = Nk_{\rm B}T$ é válida *durante* a compressão em ambos os processos (rápido e lento)?

(a) Sim.
(b) Não.

Processos Quase-Estáticos

– Não. Caso a tampa se mova rapidamente, como na situação (i), a pressão na parte superior do gás será maior que na parte inferior, *durante* o movimento da tampa. A densidade do gás também deverá ser maior na parte superior, *durante* o movimento da tampa.

– Portanto, *durante* o processo de compressão rápida do gás, seu estado não poderá ser caracterizado por valores bem definidos das variáveis termodinâmicas (P, V, T), por estar *fora do equilíbrio termodinâmico*.

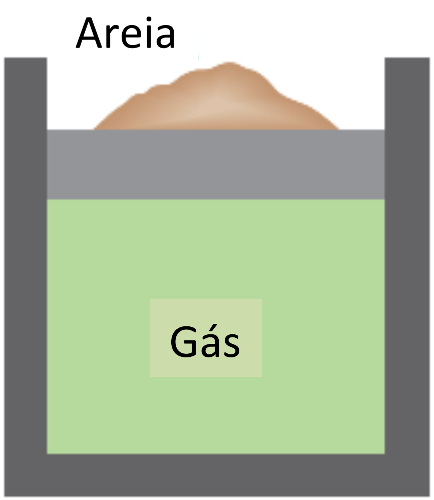
– Por outro lado, se a compressão ocorre *muito lentamente*, como na situação (ii), o gás estará sempre *muito próximo à condição de equilíbrio*, sendo razoável admitir a validade da equação de estado *durante* o processo de compressão.

– Um processo termodinâmico (transformação que leve o sistema de um estado de equilíbrio a outro), durante o qual o sistema sempre se encontre arbitrariamente próximo ao equilíbrio, é dito *quase-estático*.

2) Na figura abaixo, o pistão pode deslizar verticalmente sem atrito. O sistema encontra-se em equilíbrio mecânico na situação indicada, com uma massa *m* de areia depositada sobre a superfície do pistão.

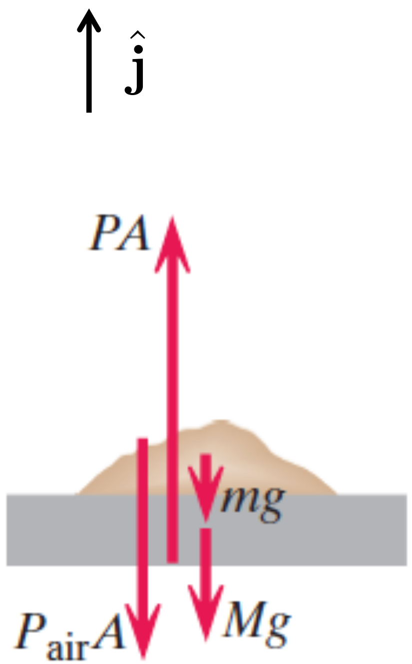
a) Faça diagrama de corpo livre para o pistão.

b) Expresse a pressão que o gás exerce sobre o pistão em função das demais forças que agem sobre o pistão.



c) Considere que uma *pequena* massa de areia (*dm*) seja adicionada *lentamente*, de forma que a superfície do pistão sofra um pequeno deslocamento (*ds*), praticamente sem alterar a pressão do gás. Calcule o trabalho realizado *sobre* o gás, expressando o resultado em termos da variação de volume.

d) Faça o mesmo para o trabalho realizado *pelo* gás.



2.a) Força exercida pelo ar: $\mathbf{F}_{ar} = -P_{ar} A\,\mathbf{j}$, onde A é a área do pistão, e P_{ar} a pressão do ar.

Força exercida pela areia: $\mathbf{f}_{areia} = -mg\,\mathbf{j}$, onde m é a massa de areia sobre o pistão.

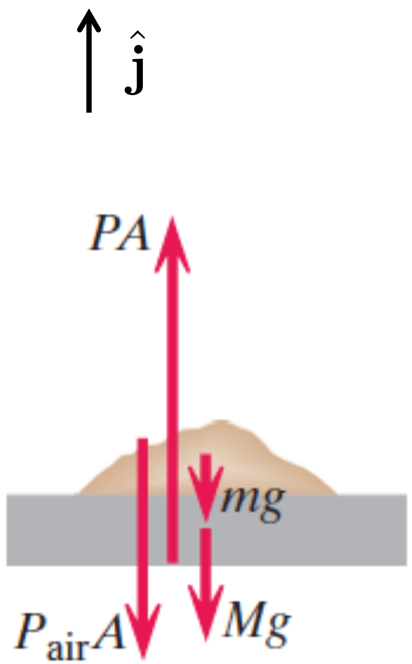
Força exercida pela Terra: $\mathbf{F}_{Terra} = -Mg\,\mathbf{j}$, onde M é a massa do pistão.

Força exercida pelo gás: $\mathbf{F}_{gas} = PA\,\mathbf{j}$, onde P é a pressão do gás.

2.b) Condição de equilíbrio:

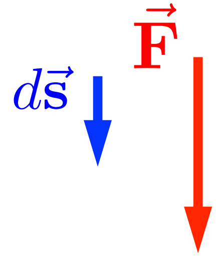
$$(PA - mg - Mg - P_{ar}A)\,\hat{\mathbf{j}} = 0$$

$$P = P_{ar} + \frac{(m+M)g}{A}$$



$$P = P_{\mathrm{ar}} + \frac{(m+M)g}{A}$$

2.c) Nas condições indicadas, o processo é quase-estático, de forma que o sistema praticamente não sai do equilíbrio:



Magnitude da força sobre o gás:
$F = PA$

$$dW = \vec{\mathbf{F}} \cdot d\vec{\mathbf{s}} = F ds = P(A ds) > 0$$

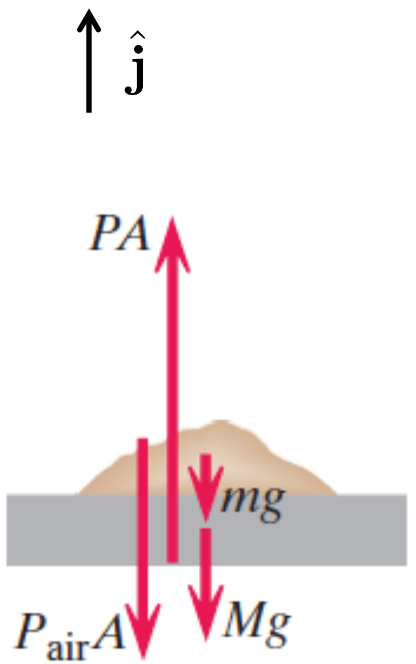
Variação de volume do gás:

$$dV = -A ds \qquad \text{(compressão)}$$

$$dV = +A ds \qquad \text{(expansão)}$$

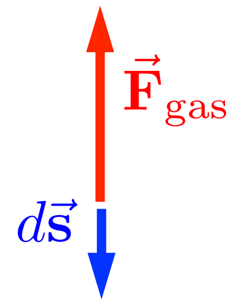
Portanto: $\boxed{dW = -P dV}$ (**sobre** o gás)

<u>OBS</u>: Caso houvesse expansão, retirando areia, $dW = -F ds$ (vetor $d\mathbf{s}$ mudaria o sentido). Sendo $dV = +A ds$, também teríamos $dW = -P dV$.



$$P = P_{\text{ar}} + \frac{(m+M)g}{A}$$

2.d) A força exercida pelo gás tem sentido inverso, mas (praticamente) a mesma magnitude:



Magnitude da exercida pelo gás:
$F_{\text{gas}} = PA$

$$dW = \vec{\mathbf{F}} \cdot d\vec{\mathbf{s}} = -F ds = -P(A ds) < 0$$

Variação de volume do gás:

$$dV = -A ds \qquad \text{(compressão)}$$

$$dV = +A ds \qquad \text{(expansão)}$$

Portanto: $\boxed{dW = P dV}$ (**pelo** gás)

<u>OBS</u>: Caso houvesse expansão, retirando areia, $dW = - F ds$ (vetor $d\mathbf{s}$ mudaria o sentido). Sendo $dV = + A ds$, também teríamos $dW = P dV$.