

Phần 2: Nhiệt học

Chương 7. THUYẾT ĐỘNG HỌC PHÂN TỬ CÁC CHẤT KHÍ VÀ ĐỊNH LUẬT PHÂN BỐ

7.1. Các đặc trưng cơ bản của chất khí

7.2. Phương trình trạng thái khí lý tưởng

7.3. Thuyết động học phân tử

7.4. Số bậc tự do. Nội năng của khí lý tưởng

7.5. Định luật phân bố hạt theo vận tốc Maxwell

7.6. Công thức khí áp. Định luật phân bố hạt theo thế năng của Boltzmann

7.1. Các đặc trưng cơ bản của chất khí

1. Hệ nhiệt động

+ Là một hệ vật lý bao gồm một số lớn các hạt (các nguyên tử, phân tử, ion...). Các hạt luôn luôn chuyển động nhiệt hỗn loạn và trao đổi năng lượng với nhau khi tương tác.

+ Phân loại:

Hệ cô lập: Không trao đổi năng lượng với môi trường bên ngoài.

Hệ không cô lập: Có trao đổi năng lượng với môi trường bên ngoài.

7.1. Các đặc trưng cơ bản của chất khí

2. Thông số trạng thái

a. Thông số trạng thái và phương trình trạng thái

+ Trạng thái của hệ được xác định bởi một tập hợp các đại lượng vật lý đặc trưng cho hệ: **khối lượng, thể tích, áp suất, nhiệt độ, nội năng, entrôpi...** gọi là các *thông số trạng thái* của hệ.

+ *Phương trình trạng thái của hệ*: Phương trình biểu diễn mối liên hệ giữa các thông số trạng thái.

Phương trình trạng thái tổng quát: $f(p, V, T) = 0$

7.1. Các đặc trưng cơ bản của chất khí

b. Áp suất

* Áp suất là đại lượng vật lý có giá trị bằng lực nén vuông góc lên một đơn vị diện tích

$$p = \frac{F}{S} \xrightarrow{\text{SI}} \text{N/m}^2$$

* Đơn vị:

- Pascal: $1\text{Pa} = 1\text{N/m}^2$;
- Atmosphere kỹ thuật: $1\text{at} = 9,81 \cdot 10^4 \text{ Pa} = 736 \text{ mmHg}$;
- Atmosphere vật lý: $1\text{atm} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa} = 760 \text{ mmHg}$;
- $1\text{mmHg} = 1 \text{ tor} = 133,3 \text{ Pa}$; $1\text{Pa} = 10^{-5} \text{ Bar}$

7.1. Các đặc trưng cơ bản của chất khí

c. Nhiệt độ

* Nhiệt độ là đại lượng vật lý đặc trưng cho mức độ chuyển động hỗn loạn của các phân tử của hệ

* Đơn vị:

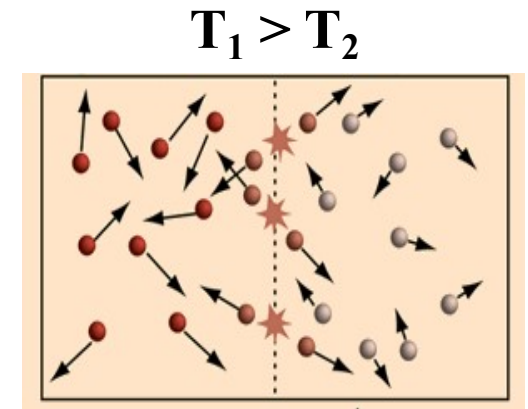
- Thang nhiệt độ bách phân (Celsius): $t(^{\circ}\text{C})$

- Thang nhiệt độ tuyệt đối (Kevin): $T (\text{K})$

$$T_K = 273 + t_c$$

- Thang nhiệt độ Farenhai $T (\text{F})$

$$T_F = \frac{9}{5} t_c + 32$$



7.2. Phương trình trạng thái của khí lý tưởng

1. Khí lý tưởng:

- Các phân tử, nguyên tử được coi là chất điểm.
- Các phân tử, nguyên tử chỉ tương tác với nhau khi va chạm.
- Va chạm giữa các hạt tuân theo quy luật va chạm đàn hồi.
- Ở điều kiện tiêu chuẩn: $T_0 = 273,16\text{K}$ (0°C),

$$p_0 = 1\text{atm} = 1,033\text{at} = 1,013 \cdot 10^5\text{Pa},$$

$$V_0 = 22,4\text{ l}$$

7.2. Phương trình trạng thái của khí lý tưởng

1. Khí lý tưởng:

* Định nghĩa: Khí lý tưởng là khí tuân theo hoàn toàn chính xác hai định luật Bôilơ – Mariôt (Boyle – Mariotte) và Gay – Luytxăc (Gay – Lussac).

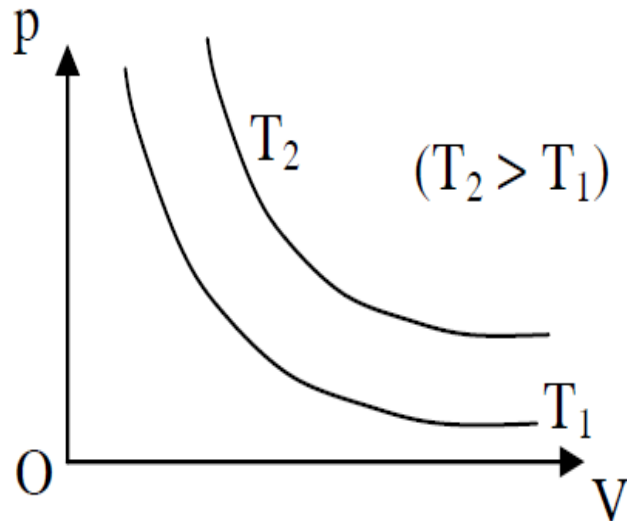
7.2. Phương trình trạng thái của khí lý tưởng

Các định luật thực nghiệm về chất khí

Định luật Boyle-Mariotte

$$T = \text{const}$$

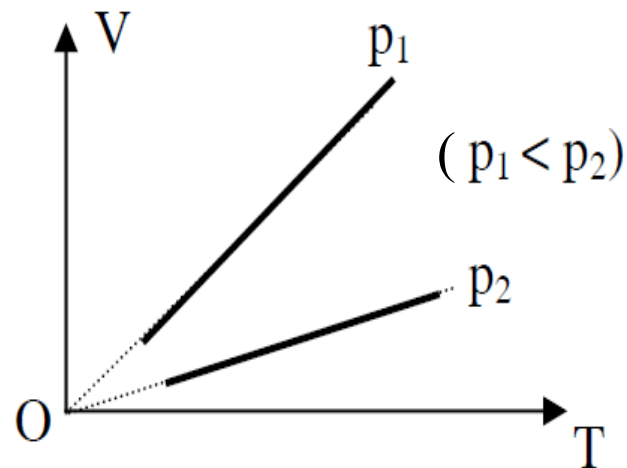
$$\Rightarrow pV = \text{const}$$



Định luật Gay-Lussac

$$p = \text{const}$$

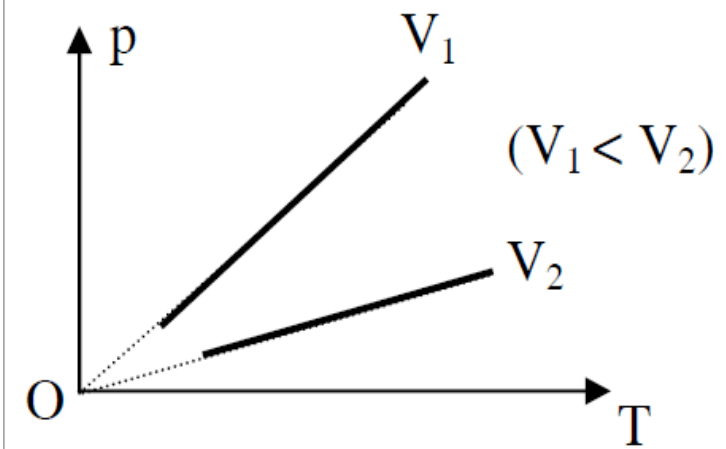
$$\Rightarrow \frac{V}{T} = \text{const}$$



Định luật Charles

$$V = \text{const}$$

$$\Rightarrow \frac{p}{T} = \text{const}$$



7.2. Phương trình trạng thái của khí lý tưởng

2. Phương trình trạng thái của khí lý tưởng (Clapayron-Mendeleep)

❖ *Thiết lập phương trình trạng thái*

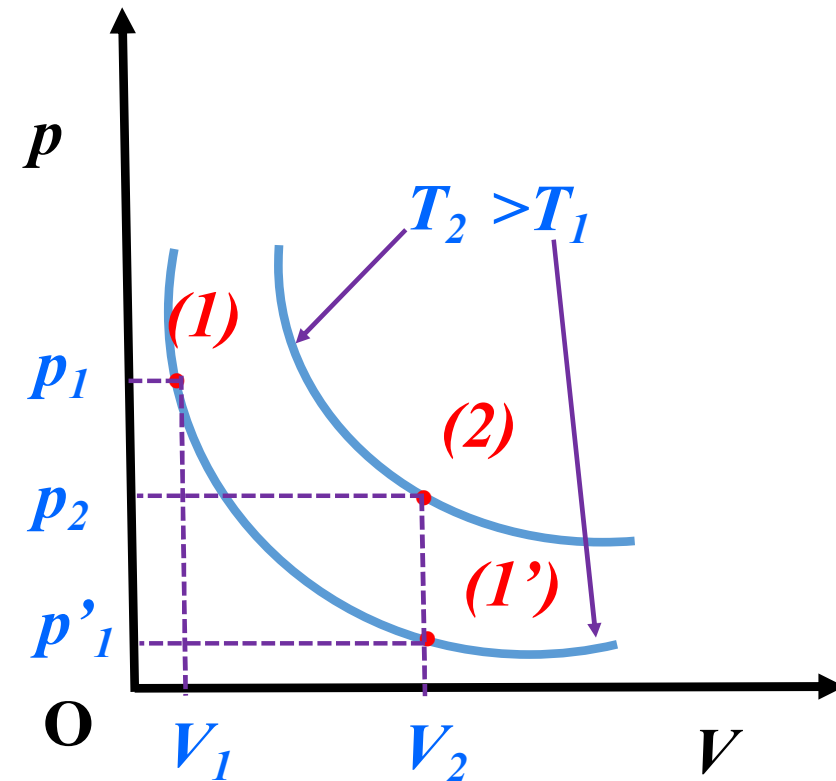
- Xét **1 mol** khí lý tưởng:

TT (1) \rightarrow TT (2)

$p_1, V_1, T_1 \rightarrow p_2, V_2, T_2$

- Giả sử: TT (1) \rightarrow **TT (1')** \rightarrow TT (2)

\downarrow
 p'_1, V_2, T_1



7.2. Phương trình trạng thái của khí lý tưởng

❖ *Thiết lập phương trình trạng thái*

- Xét quá trình:

Biến đổi đẳng nhiệt từ TT (1) \rightarrow TT (1'),

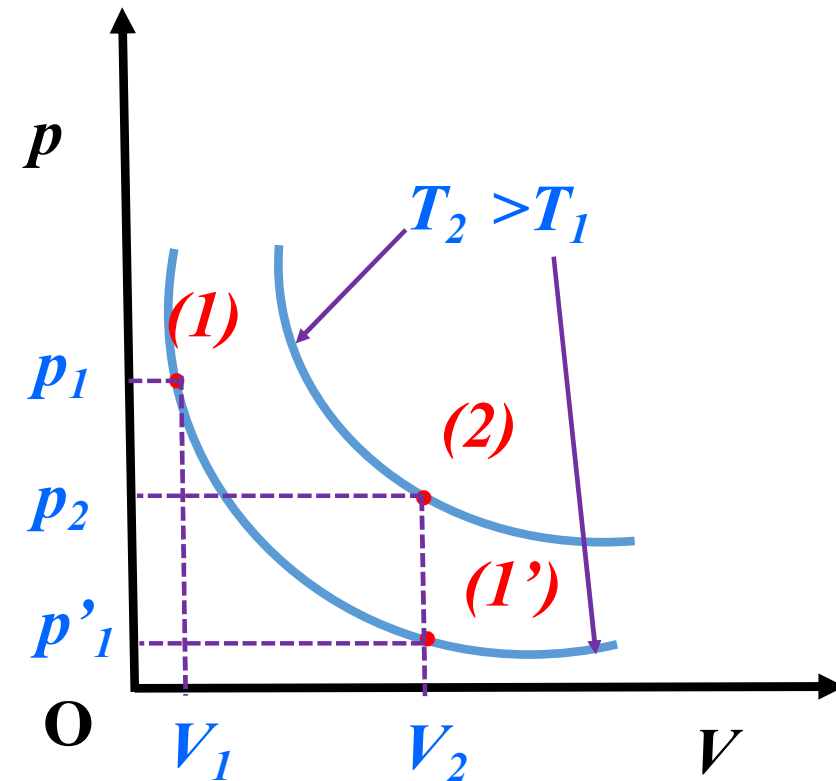
áp dụng *định luật Boyle – Mariotte*

$$p_1 V_1 = p'_1 V_2 \quad (*)$$

- Xét quá trình:

Biến đổi đẳng tích từ TT (1') \rightarrow TT (2),

áp dụng *định luật Gay – Lussac*



7.2. Phương trình trạng thái của khí lý tưởng

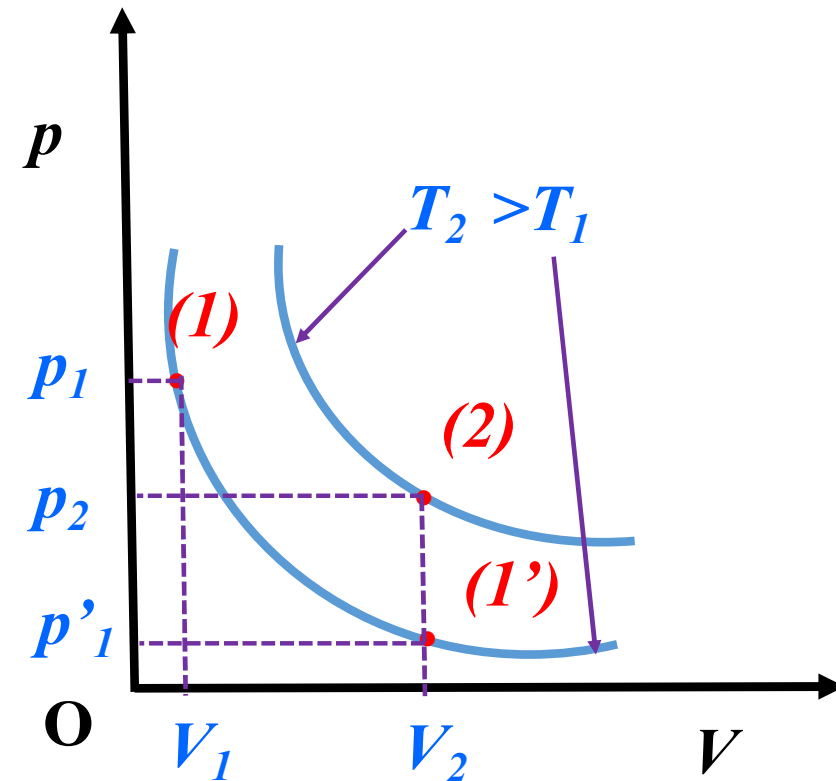
❖ *Thiết lập phương trình trạng thái*

$$\frac{p_1'}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \rightarrow p_1' = \frac{T_1 p_2}{T_2} (**)$$

+ Từ (*) và (**) ta có

$$p_1' = \frac{T_1 p_2}{T_2} = \frac{p_1 V_1}{V_2}$$

$$\Rightarrow \frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$$



7.2. Phương trình trạng thái của khí lý tưởng

2. Phương trình trạng thái của khí lý tưởng (Clapayron-Mendeleep)

→ Với 1 mol khí:

$$\frac{pV}{T} = \text{const}$$

Đặt $\frac{pV}{T} = R$ ($R = 8,31 \text{ (J/molK)}$ – Hằng số khí lý tưởng)

→ Phương trình trạng thái của 1 mol khí lý tưởng:

(chứa $N_A = 6,023 \cdot 10^{23}$ phân tử, nguyên tử)

$$pV = RT$$

7.2. Phương trình trạng thái của khí lý tưởng

2. Phương trình trạng thái của khí lý tưởng (Clapayron-Mendeleep)

→ Phương trình trạng thái của n mol khí lý tưởng, khối lượng M

$$pV = \frac{M}{\mu} RT$$

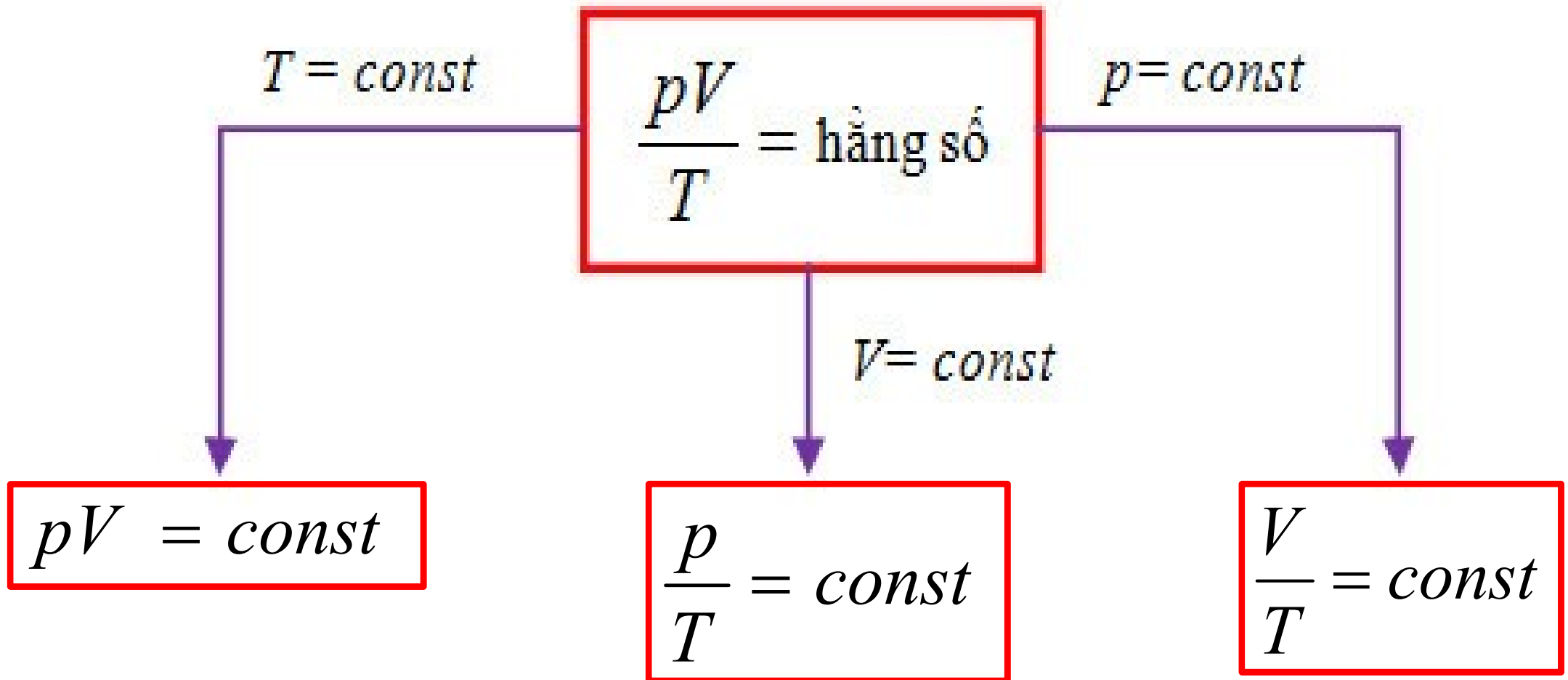
Hoặc

$$pV = nRT$$

$$(n = M/\mu)$$

$R = 8,31 \text{ (J/mol.K)}$ - *Hằng số khí lý tưởng*
($R = 0,0848 \text{ (lit.at/mol.K)}$)

7.2. Phương trình trạng thái của khí lý tưởng



7.3. Thuyết động học phân tử

1. Nội dung cơ bản của thuyết động học phân tử

1/ Các chất **cấu tạo** gián đoạn, gồm một **số rất lớn** các **phân tử**.

2/ Các phân tử **chuyển động hỗn loạn không ngừng**. **Động năng trung bình** của phân tử **biểu hiện nhiệt độ** của hệ. **Động năng trung bình** càng lớn thì **nhiệt độ** của hệ càng cao.

3/ Kích thước của các phân tử rất nhỏ so với khoảng cách giữa chúng. Có thể coi **phân tử là chất điểm**.

7.3. Thuyết động học phân tử

1. Nội dung cơ bản của thuyết động học phân tử

4/ Các phân tử **không tương tác** với nhau trừ lúc va chạm. **Sự va chạm** giữa các phân tử và giữa các phân tử với thành bình **tuân theo các định luật va chạm đàn hồi.**

Nhận xét: 1 và 2 đúng với mọi chất khí; 3 và 4 đúng với khí lý tưởng.

7.3. Thuyết động học phân tử

2. Phương trình cơ bản của thuyết động học phân tử

a) Phương trình cơ bản của thuyết động học phân tử

$$p = \frac{2}{3} n_0 \overline{W}_{đtt}$$

Trong đó:

+ $n_0 = \frac{N}{V}$: mật độ phân tử

+ $\overline{W}_{đtt} = \frac{1}{2} m \overline{v^2}$: động năng tịnh tiến trung bình của 1 phân tử (J)

(m là khối lượng một phân tử khí, $\overline{v^2}$ là vận tốc bình phương trung bình của phân tử)

7.3. Thuyết động học phân tử

2. Phương trình cơ bản của thuyết động học phân tử

b) Hệ quả:

** Động năng tịnh tiến trung bình và ý nghĩa của nhiệt độ tuyệt đối*

+ Xét 1 mol khí lý tưởng $pV = RT \rightarrow p = \frac{RT}{V}$

+ Mà $p = \frac{2}{3} n_0 \overline{W}_{\text{đtt}}$

$$\Rightarrow \overline{W}_{\text{đtt}} = \frac{3}{2} \frac{p}{n_0} = \frac{3}{2} \frac{RT}{n_0 V} = \frac{3}{2} \frac{RT}{N_A}$$

7.3. Thuyết động học phân tử

b) Hệ quả:

$$\overline{W}_{\text{đtt}} = \frac{3}{2} \frac{RT}{N_A}$$

+ $R = 8,31 \text{ (J/molK)}$ - Hằng số khí lý tưởng

+ Đặt $k = \frac{R}{N_A} = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ - Hằng số Boltzmann

→ Động năng tịnh tiến trung bình của một phân tử:

$$\Rightarrow \overline{W}_{\text{đtt}} = \frac{3}{2} kT$$

7.3. Thuyết động học phân tử

** Động năng tịnh tiến trung bình và ý nghĩa của nhiệt độ tuyệt đối*

- Ý nghĩa của nhiệt độ tuyệt đối:

- + T là số đo mức hỗn loạn của chuyển động của các phân tử.
- + T càng cao thì chuyển động của các phân tử càng mạnh và ngược lại \Rightarrow chuyển động nhiệt.
- + Các phân tử chuyển động không ngừng $\Rightarrow \overline{W}_d \neq 0 \Rightarrow T \neq 0$
 \Rightarrow Không tồn tại độ không tuyệt đối.

7.3. Thuyết động học phân tử

b) Hệ quả:

* Vận tốc căn quân phương (vận tốc toàn phương trung bình)

$$v_c = \sqrt{\overline{v^2}}$$

$$+ \text{ Ta có: } \overline{W}_{\text{đtt}} = \frac{3}{2}kT = \frac{1}{2}m\overline{v^2} \quad \square \quad v_c = \sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$$

$$+ \text{ Mà } k = \frac{R}{N_A} \quad \square \quad v_c = \sqrt{\frac{3RT}{mN_A}} = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}}$$

$$\underline{\text{Vậy:}} \quad v_c = \sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}} \quad \begin{array}{l} (R = 8,31 \text{ (J/molK)} \\ k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K)} \end{array}$$

7.3. Thuyết động học phân tử

b) Hệ quả:

* Mật độ phân tử n_0 :

$$p = \frac{2}{3} n_0 \overline{W}_{đtt}$$

$$\text{mà } \overline{W}_{đtt} = \frac{3}{2} kT$$

$$\Rightarrow n_0 = \frac{p}{kT} \quad (\text{Phương trình liên hệ giữa áp suất và nhiệt độ})$$

7.4. Số bậc tự do. Nội năng của khí lý tưởng

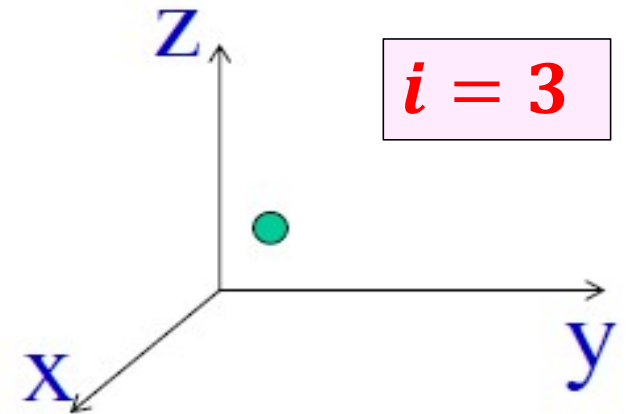
1. Bậc tự do

* Khái niệm: Bậc tự do của một vật là số tọa độ độc lập cần thiết để xác định vị trí của vật đó trong không gian. Kí hiệu: i

- *Phân tử đơn nguyên tử*:

Chỉ chuyển động tịnh tiến

→ Cần 3 tọa độ x, y, z để xác định vị trí



7.4. Số bậc tự do. Nội năng của khí lý tưởng

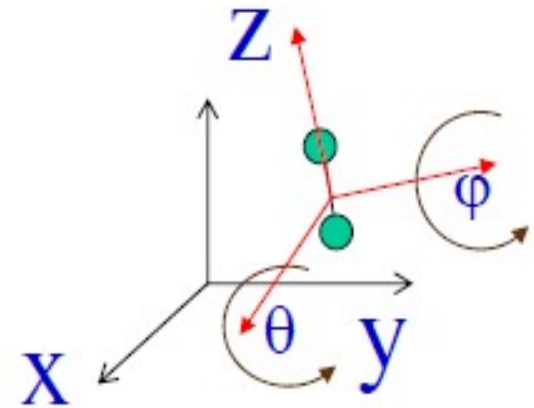
1. Bậc tự do

- Phân tử lưỡng nguyên tử

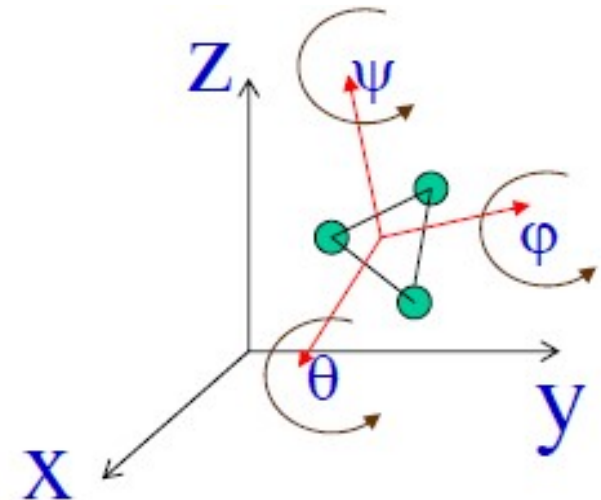
- 3 bậc chuyển động tịnh tiến x, y, z
- 2 bậc chuyển động quay φ, θ

- Phân tử đa nguyên tử:

- 3 bậc chuyển động tịnh tiến x, y, z
- 3 bậc chuyển động quay φ, θ, ψ



$$i = 5$$



$$i = 6$$

7.4. Số bậc tự do. Nội năng của khí lý tưởng

2. Nội năng của khí lý tưởng. Định luật phân bố đều năng lượng theo số bậc tự do

- Định nghĩa: Nội năng là phần năng lượng ứng với vận động bên trong của vật bao gồm tổng động năng của các phân tử và thế năng tương tác giữa chúng. $U = \sum W_{đ} + \sum W_t$

Nội năng của khí lý tưởng:

$$\rightarrow U_{KLT} = \sum W_{đ} = \sum w_{đtt} + \sum w_{đq}$$

7.4. Số bậc tự do. Nội năng của khí lý tưởng

Ta có: Động năng tịnh tiến trung bình của một phân tử khí là

$$\overline{W}_{\text{đtt}} = \frac{3}{2}kT$$

*** Định luật phân bố đều năng lượng theo bậc tự do: Động năng trung bình của một phân tử được phân bố đều theo các bậc tự do.**

→ Năng lượng ứng với mỗi bậc tự do là:

$$\frac{1}{2}kT$$

→ **Động năng trung bình của một phân tử khí:**

$$\overline{W}_{\text{đ}} = \frac{i}{2}kT = \overline{W}_{\text{đtt}} + \overline{W}_{\text{đq}}$$

7.4. Số bậc tự do. Nội năng của khí lý tưởng

* *Biểu thức nội năng của khí lý tưởng:*

• Xét 1 phân tử khí:

$$U_1 = \overline{W}_{đ} = \overline{W}_{đtt} + \overline{W}_{đq} = \frac{i}{2} kT$$

• Xét khối khí khối lượng M gồm N phân tử khí

$$U = \sum \mathbf{W}_{đ} = N \cdot \overline{W}_{đ} = N \frac{i}{2} kT = \frac{i}{2} \frac{M}{\mu} RT$$

7.4. Số bậc tự do. Nội năng của khí lý tưởng

** Biểu thức nội năng của khí lý tưởng:*

⇒ Nội năng của khối khí khối lượng M:

$$U = \frac{i}{2} \frac{M}{\mu} RT$$

⇒ Nội năng của khí lý tưởng là một hàm trạng thái chỉ phụ thuộc vào nhiệt độ của khối khí.

⇒ Độ biến thiên nội năng của khí lý tưởng:

$$\Delta U = U_2 - U_1 = \frac{i}{2} \frac{M}{\mu} R(T_2 - T_1)$$

7.5. Định luật phân bố hạt theo vận tốc của Maxwell

* Hàm phân bố theo tốc độ (vận tốc)

Xét hệ gồm n hạt, ở nhiệt độ T

+ Vận tốc của các phân tử v : $0 \rightarrow \infty$

+ dn : số phân tử có vận tốc nằm trong khoảng $(v, v + dv)$

$$dn = nF(v)dv$$

$F(v)$: Hàm phân bố theo tốc độ

7.5. Định luật phân bố hạt theo vận tốc của Maxwell

+ Tỉ số $\frac{dn}{n}$ là xác suất để tìm thấy một phân tử có vận tốc nằm trong khoảng $(v, v + dv)$.

$$\Rightarrow \int_0^{\infty} \frac{dn}{n} = 1 \quad \rightarrow \quad \int_0^{\infty} \frac{nF(v)dv}{n} = 1$$

$\rightarrow F(v)$ thỏa mãn điều kiện:

$$\int_0^{\infty} F(v)dv = 1$$

7.5. Định luật phân bố hạt theo vận tốc của Maxwell

* Hàm phân bố theo tốc độ (vận tốc) Maxwell

$$F(v) = \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{3/2} 4\pi v^2 e^{-\frac{mv^2}{2kT}} = \left(\frac{\mu}{2\pi RT}\right)^{3/2} 4\pi v^2 e^{-\frac{\mu v^2}{2RT}}$$

+ $k = 1,38 \cdot 10^{-23} J/K$: hằng số Boltzaman

+ $R = 8,31 J/molK$: hằng số khí lý tưởng

+ m : khối lượng một phân tử khí (kg)

+ μ : khối lượng một mol khí (kg/mol)

7.5. Định luật phân bố hạt theo vận tốc của Maxwell

* Khảo sát hàm $F(v)$ theo v :

- $v = 0 \rightarrow F(v) = 0$

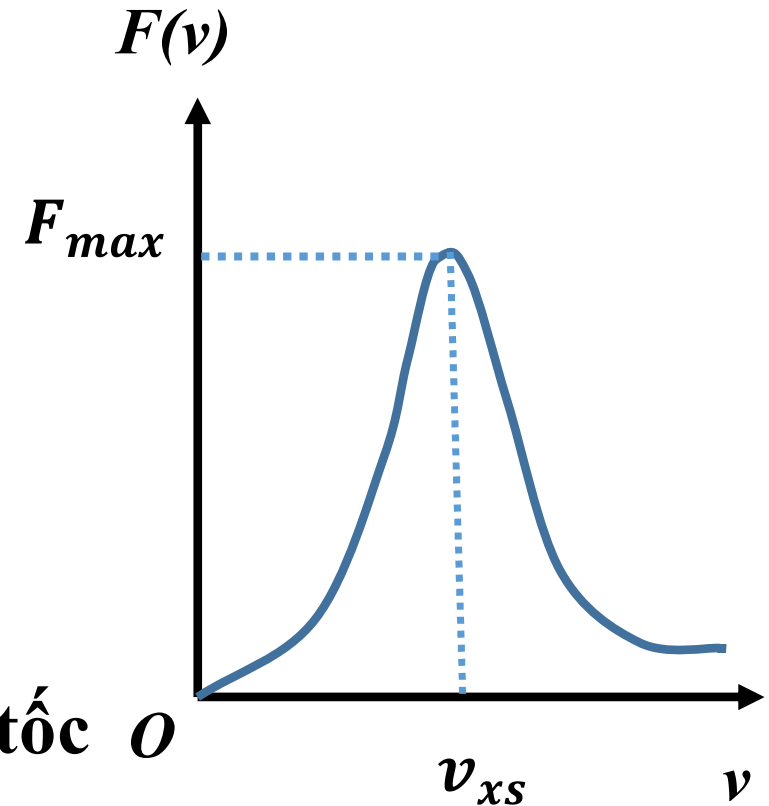
- $\frac{dF(v)}{dv} = 0$

$\rightarrow F(v)$ max khi

$$v = v_{xs} = \sqrt{\frac{2kT}{m}} = \sqrt{\frac{2RT}{\mu}}$$

v_{xs} : vận tốc có xác suất cực đại – vận tốc O

mà đa số các phân tử khí có được.



7.5. Định luật phân bố hạt theo vận tốc của Maxwell

+ **Tốc độ trung bình:**

$$\bar{v} = \int_0^{\infty} v F(v) dv = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi \mu}}$$

+ **Vận tốc căn quân phương:**

$$\overline{v^2} = \int_0^{\infty} v^2 F(v) dv$$

$$\rightarrow v_c = \sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}}$$

7.5. Định luật phân bố hạt theo vận tốc của Maxwell

Nhận xét:

$$v_{xs} < \bar{v} < v_c$$

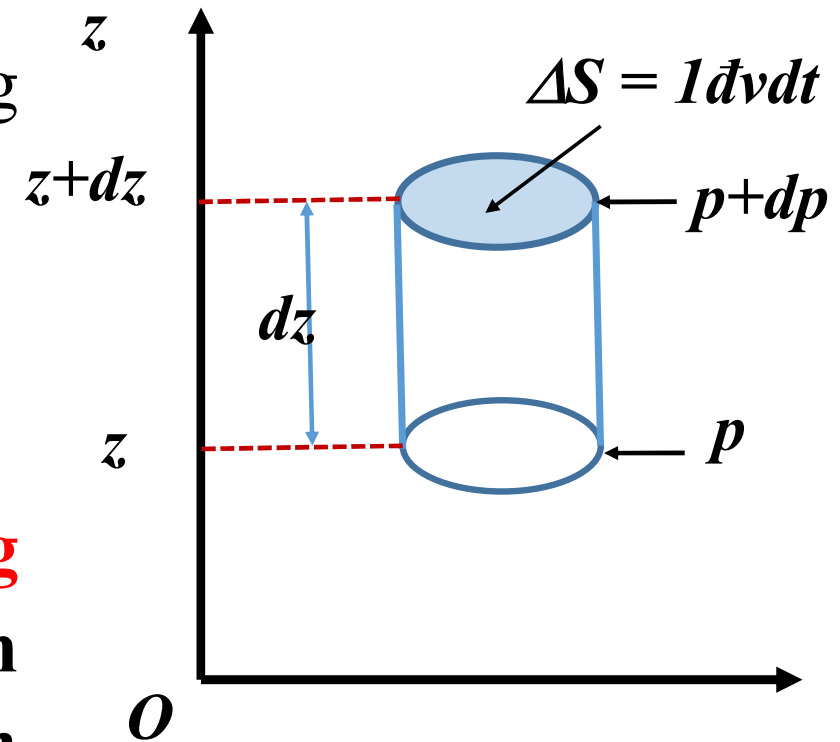
- + v_{xs} : vận tốc mà đa số các phân tử có được.
- + \bar{v} : giá trị trung bình của vận tốc của các phân tử trong cả hệ.
- + v_c : vận tốc ứng với động năng trung bình của các phân tử.

7.5. Công thức khí áp. Định luật phân bố hạt theo thế năng của Boltzmann

1. Công thức khí áp

- Xét khối khí lý tưởng, nhiệt độ T , trong trọng trường đều.
- Xét 2 điểm có độ cao z và $z + dz$
có áp suất p và $p + dp$

Độ chênh lệch áp suất bằng trọng lượng cột khí hình trụ có diện tích đáy $\Delta S = 1$, chiều cao dz chứa dn phân tử.



7.5. Công thức khí áp. Định luật phân bố hạt theo thế năng của Boltzmann

1. Công thức khí áp

Hiệu áp suất giữa đáy trên và đáy dưới: $p - (p + dp) = -dp$

Nên $-dp = dP$;

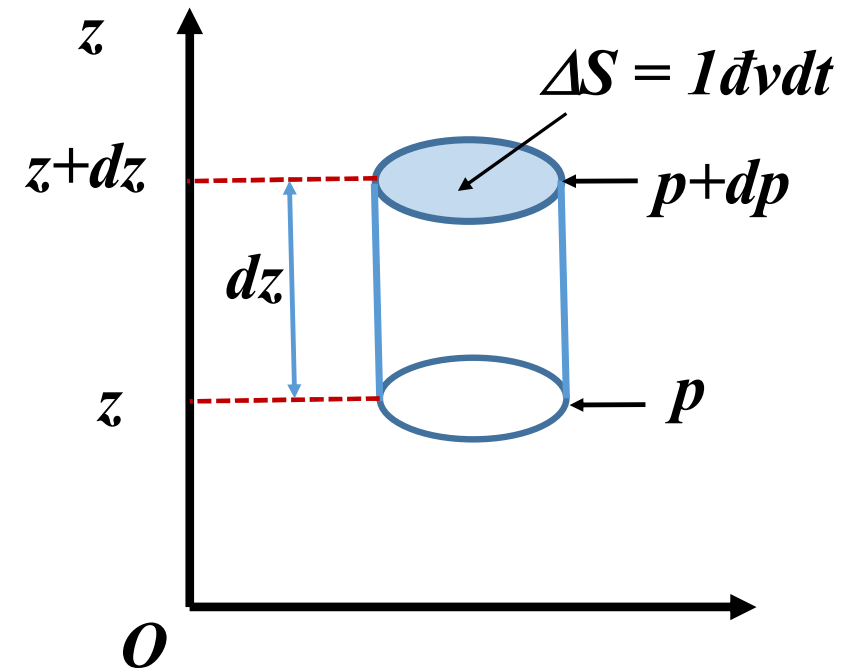
$$dp = -mgn_0 \cdot \Delta S \cdot dz = -mgn_0 dz$$

với n_0 : mật độ phân tử khí

m : khối lượng một phân tử khí

$$\text{Mà: } n_0 = \frac{p}{kT}$$

$$\rightarrow dp = -mg \frac{p}{kT} dz$$



7.5. Công thức khí áp. Định luật phân bố hạt theo thế năng của Boltzmann

1. Công thức khí áp

$$\Rightarrow \frac{dp}{p} = -\frac{mg}{kT} dz$$

$$\square \int_{p(0)}^{p(z)} \frac{dp}{p} = \int_0^z -\frac{mg}{kT} dz$$

$$\Rightarrow \ln \frac{p(z)}{p(0)} = -\frac{mgz}{kT}$$

→ Công thức khí áp $p(z) = p(0) \cdot e^{\frac{-mgz}{kT}} = p(0) \cdot e^{\frac{-\mu gz}{RT}}$

7.5. Công thức khí áp. Định luật phân bố hạt theo thế năng của Boltzmann

1. Công thức khí áp

Với $p(z)$: áp suất khí quyển ở độ cao z ; $p(0)$: áp suất khí quyển trên mặt đất

→ *Áp suất khí quyển trong trọng trường giảm theo hàm e mũ của độ cao z .*

7.5. Công thức khí áp. Định luật phân bố hạt theo thế năng của Boltzmann

2. Định luật phân bố hạt theo thế năng của Boltzmann

* Ta có: $n_0 = \frac{p}{kT} \xrightarrow{T=const} n_0 \sim p$

+ $n(z)$: mật độ phân tử khí ứng với áp suất $p(z)$ ở độ cao z

+ $n(0)$: mật độ phân tử khí ứng với áp suất $p(0)$ ở mặt đất.

$$\Rightarrow n(z) = n(0) \cdot e^{\frac{-mgz}{kT}} = n(0) \cdot e^{\frac{-\mu gz}{RT}}$$

7.5. Công thức khí áp. Định luật phân bố hạt theo thế năng của Boltzmann

2. Định luật phân bố hạt theo thế năng của Boltzmann

+ Nhận thấy: $mgz = W_t$ là thế năng của một phân tử khí có khối lượng m , ở độ cao z , trong trọng trường.

⇒ Định luật phân bố Boltzmann (trong trường lực thế bất kỳ):

$$n(W_t) = n(0) \cdot e^{\frac{-W_t}{kT}}$$

(thế năng càng nhỏ, mật độ phân tử càng lớn)