

สรุปอาทิตย์ที่แล้ว

อาทิตย์ที่แล้ว เรานิยามความดัน และ อุณหภูมิของก๊าซในอุดมคติ โดยเราพบว่า ความดันของก๊าซขึ้นอยู่กับค่าเฉลี่ยของพลังงานจลน์จากการเคลื่อนที่ของก๊าซ

$$p = \frac{2}{3} \frac{N}{V} \langle KE \rangle$$

นอกจากนี้เรายังนิยามอุณหภูมิ ว่าเป็นสิ่งที่แปรผันตรงกับพลังงานจลน์เฉลี่ยของอนุภาคในก๊าซนั้น

ความเร็วสามทิศทาง

$$\langle KE \rangle = \text{constant} \times T = \frac{3}{2} kT$$

ตัวอย่าง

(ตัวอย่าง 9.2 ในหนังสือ) จงหาพลังงานจลน์ของโมเลกุลก๊าซนีออน (Ne) มวล 1 กรัม ที่ 30 องศาเซลเซียส

วิธีทำ พลังงานจลน์เฉลี่ยของก๊าซนีออนหนึ่ง โมเลกุลมีค่าเท่ากับ

$$\langle KE \rangle = \frac{3}{2} kT$$

โจทย์กำหนดอุณหภูมิเท่ากับ $T = 30 + 273 = 303\text{K}$

$$\text{และ } k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$$

$$\text{จะได้ว่า } \langle KE \rangle = \frac{3}{2} \times (1.38 \times 10^{-23}) \times (303) = 6.27 \times 10^{-21} \text{ J}$$

ที่เราคำนวณได้เป็นพลังงานจลน์เฉลี่ยของก๊าซนีออนหนึ่งโมเลกุล แต่ก๊าซ 1 กรัม ไม่ได้มีหนึ่งโมเลกุล จำนวนโมเลกุลของก๊าซสามารถหาได้จาก

นีออนเป็นก๊าซเฉื่อย 1 โมเลกุลมี 1 อะตอม มีมวล 20.2 หน่วย

หรือ $20.2 \times 1.66 \times 10^{-27}$ กิโลกรัม

ดังนั้นใน 1 กรัมจะมีจำนวนโมเลกุลเท่ากับ $\frac{10^{-3}}{20.2 \times 1.66 \times 10^{-27}}$ โมเลกุล

ดังนั้นพลังงานจลน์รวมของระบบคือ

$$\begin{aligned} \langle \text{KE} \rangle_{\text{total}} &= \frac{10^{-3}}{20.2 \times 1.66 \times 10^{-27}} \times 6.27 \times 10^{-21} \\ &\simeq 187 \text{ J} \end{aligned}$$

ตอบ

ความร้อนจำเพาะ

จากตัวอย่างเมื่อคืน ถ้าเราคำนวณพลังงานจลน์ของก๊าซนีออนที่อุณหภูมิ 31 องศาเซลเซียส หรือ 304 เคลวิน เราคำนวณได้ว่า $\langle KE \rangle_{total} \approx 188 \text{ J}$ ซึ่งถ้าคำนวณอย่างละเอียดจะพบว่าส่วนต่างของพลังงานจลน์จะมีค่าเท่ากับ

$$\Delta \langle KE \rangle = \frac{3}{2} \times \frac{(1.38 \times 10^{-23}) \times (304 - 303)}{20.2 \times 1.66 \times 10^{-24}} = 0.617 \text{ J}$$

ปริมาณพลังงาน 0.617 J คือ ค่าพลังงานจากภายนอกที่เราจะต้องใส่เข้าไปในระบบ เพื่อให้ก๊าซ 1 กรัม มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 เคลวิน เราเรียกปริมาณพลังงานนี้ว่า “ความร้อนจำเพาะของก๊าซ” เช่นในตัวอย่างที่กล่าวมา เราจะพบว่าก๊าซนีออนมีความจุความร้อนจำเพาะเท่ากับ 0.617 J/g

ความร้อนจำเพาะ และ พลังงานภายในของระบบก๊าซ

เนื่องจากอุณหภูมิแปรผันกับพลังงานของระบบ พลังงานที่ใส่เข้าไปในระบบ เพื่อที่จะให้ระบบมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น จึงไปเพิ่ม “พลังงานภายในของระบบ” (U) ในกรณีของก๊าซที่มีเพียงอะตอมเดี่ยวหรือ monoatomic พลังงานภายในส่วนใหญ่จะเป็นพลังงานจลน์ของระบบ ซึ่งเกิดจากการเลื่อนตำแหน่งของ โมเลกุลก๊าซ

$$U = \langle \text{KE} \rangle = \frac{3}{2} NkT$$

เราอาจนิยามความร้อนจำเพาะของก๊าซเมื่อมีปริมาตรคงที่ได้เป็น

$$C_V = \frac{1}{M} \frac{\partial U}{\partial T}$$

ซึ่งในกรณีของก๊าซอะตอมเดี่ยว (เช่น He, Ne, Hg)

$$C_V = \frac{1}{M} \frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{3}{2} NkT \right) = \frac{3}{2} \frac{Nk}{M} = \frac{3k}{2m}$$

โดยที่ $M = mN =$ มวลทั้งหมดของก๊าซ

แต่สำหรับก๊าซทั่วไปที่หนึ่งโมเลกุลไม่ได้มีเพียงหนึ่งอะตอม พลังงานภายในของระบบไม่ได้มีเฉพาะพลังงานจลน์ที่เกิดจากการเลื่อนตำแหน่ง แต่ยังมีพลังงานภายในที่เกิดจากการหมุน และ การสั่นของโมเลกุลอีกด้วย ดังนั้นค่าความร้อนจำเพาะของก๊าซเหล่านั้นจึงมีสูตรคำนวณที่แตกต่างออกไป

ก่อนที่จะพิจารณาความร้อนจำเพาะ เราจะมาพิจารณาพลังงานภายในของระบบก๊าซต่างๆ โดยอาศัยทฤษฎีที่เรียกว่า Equipartition theorem

Classical Equipartition of Energy

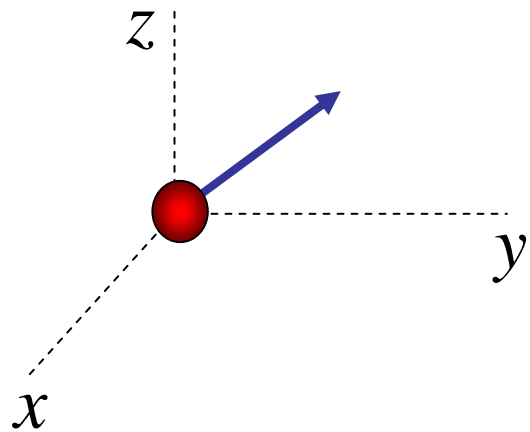
ในคราวที่แล้วเราได้คำนวณพลังงานจลน์เฉลี่ยของโมเลกุลก๊าซโดย ตั้งสมมุติฐานว่า พลังงานจลน์เฉลี่ยในทุกๆทิศทางมีค่าเท่ากัน (เนื่องจากความดันที่ผนังแต่ละด้านมีค่าเท่ากันหมด)

$$\begin{aligned}\langle KE \rangle &= \frac{1}{2} m \left\{ \langle v_x^2 \rangle + \langle v_y^2 \rangle + \langle v_z^2 \rangle \right\} \\ &= \frac{3}{2} m \langle v_x^2 \rangle\end{aligned}$$

เราอาจขยายสมมุติฐานนี้ให้กว้างขึ้น โดยถือว่าทุกองศาอิสระของการเคลื่อนที่จะมีพลังงานเท่ากัน ซึ่งเรียกว่าหลักการเท่ากันของพลังงาน หรือ Classical Equipartition of Energy โดยทุกองศาอิสระของการเคลื่อนที่จะมี พลังงานเท่ากับ $\frac{1}{2} kT$ ยกตัวอย่างเช่น

Internal Energy ของก๊าซ โมเลกุลเดี่ยว

ก๊าซ โมเลกุลเดี่ยวเช่น He มีองศาอิสระในการเคลื่อนที่ (degrees of freedom) เท่ากับ 3 คือ โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระทั้งทิศทาง x, y และ z (เราถือว่าขนาดของอะตอมมีค่าเล็กมาก จึงไม่คิดการหมุนของ โมเลกุล)



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

$$U = \left\langle \frac{1}{2} m v_x^2 \right\rangle + \left\langle \frac{1}{2} m v_y^2 \right\rangle + \left\langle \frac{1}{2} m v_z^2 \right\rangle$$
$$= \frac{1}{2} kT + \frac{1}{2} kT + \frac{1}{2} kT = \frac{3}{2} kT$$

พลังงานภายในของก๊าซ N โมเลกุลคือ

$$U = \frac{3}{2} NkT$$

Internal Energy ของก๊าซ โมเลกุลคู่

เราสามารถแยกพิจารณาการเคลื่อนที่ของก๊าซ โมเลกุลคู่ ออกเป็นสองส่วนคือ

1) การเคลื่อนที่ของศูนย์กลางมวล

ซึ่งจะมีจำนวน D.O.F = 3 เพราะสามารถเคลื่อนที่ได้ 3 ทิศทาง

2) การหมุนของโมเลกุล

โมเลกุลของก๊าซมีอิสระที่จะหมุนรอบแกนทั้งสามได้

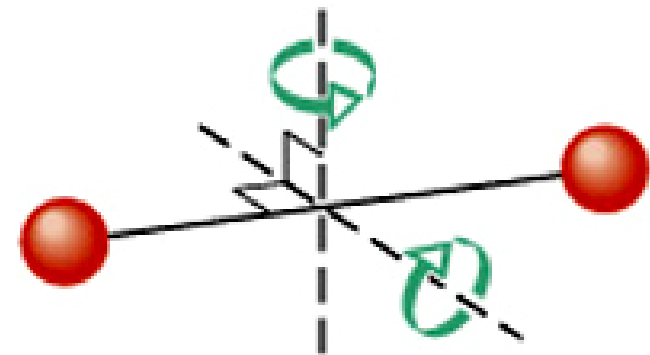
โดยพลังงานเนื่องจากการหมุนรอบแกนใดๆ (สมมติว่าเป็นแกน x)

มีค่าเท่ากับ

$$\langle \text{KE} \rangle = \frac{1}{2} I_x \omega_x^2$$

เมื่อ I_x และ ω_x คือ โมเมนต์ความเฉื่อยและ

อัตราเร็วเชิงมุมของการหมุนรอบแกน x ตามลำดับ



Internal Energy ของก๊าซ โมเลกุลคู่ (ต่อ)

เนื่องจากขนาดของอะตอมมีค่าเล็กมากๆ ดังนั้น โมเมนต์ของความเฉื่อยรอบแกนที่ขนานกับแกนของโมเลกุลก๊าซอะตอมคู่จึงมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นเราจึงคิดการหมุนเฉพาะการหมุนรอบแกนที่ตั้งฉากกับแกนของโมเลกุลเท่านั้น นั่นคือ D.O.F เนื่องจากการหมุนเท่ากับ 2

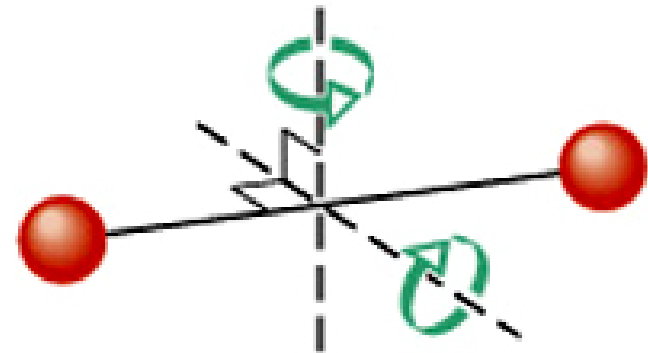
พลังงานภายในของก๊าซ โมเลกุลคู่หนึ่ง โมเลกุลสามารถหาได้จาก

$$U = \frac{1}{2}mv_x^2 + \frac{1}{2}mv_y^2 + \frac{1}{2}mv_z^2 + \frac{1}{2}I_x\omega_x^2 + \frac{1}{2}I_y\omega_y^2$$
$$= \frac{5}{2}kT$$

พลังงานภายในเนื่องจากก๊าซ N โมเลกุล

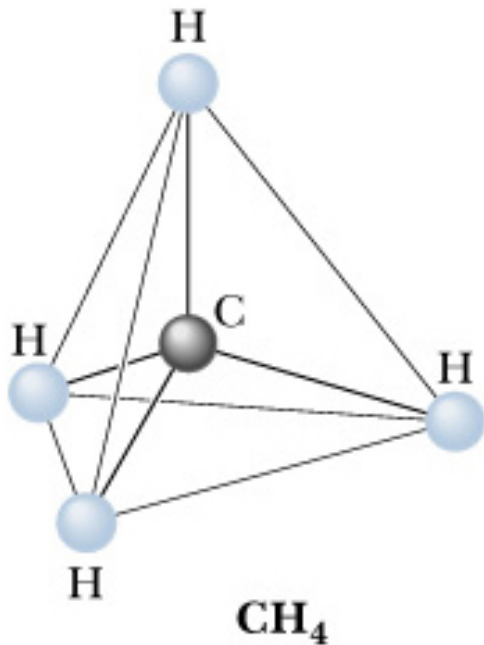
มีค่าเท่ากับ

$$U = \frac{5}{2}NkT$$



พลังงานภายในของก๊าซ Polyatomic

ในกรณีของก๊าซที่มีหลายอะตอม เช่น ก๊าซมีเทนซึ่งมีโครงสร้างดังรูปข้างล่าง โมเลกุลของก๊าซมีอิสระที่จะเคลื่อนที่ในสามทิศทาง (การเคลื่อนที่ของศูนย์กลางมวล) และยังมีอิสระที่จะหมุนรอบแกนทั้งสาม โดยในกรณีนี้โมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกนทั้งสามมีค่าไม่เป็นศูนย์ ดังนั้นจำนวน D.O.F ของระบบคือ



การเคลื่อนที่ของศูนย์กลางมวล	การหมุน	D.O.F รวม
3	3	6

พลังงานภายในของมีเทน N โมเลกุลคือ

$$U = N \times 6 \times \frac{1}{2} kT = 3NkT$$

สรุปพลังงานภายในของก๊าซในอุดมคติ

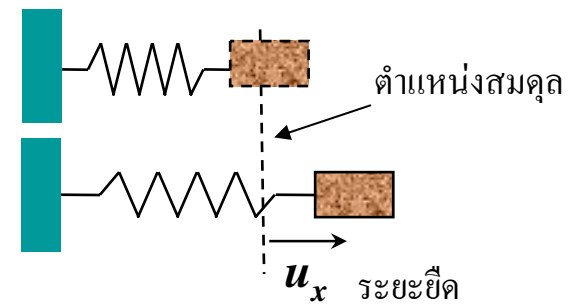
ในระดับนี้เราถือว่าสามารถใช้หลักการ Equipartition ได้ - ในสมดุลความร้อน ทุกๆโมเลกุลจะมีพลังงานเฉลี่ย $\frac{1}{2} kT$ ต่อหนึ่ง Degrees of freedom

ก๊าซ	Degrees of freedom	พลังงานภายใน
Monatomic gas (He, Ne, Ar, ...)	- การเคลื่อนที่ของ C.M. ในทิศทาง (x, y, z) - จำนวน D.O.F รวมเท่ากับ 3	$U = \frac{3}{2} NkT$
Diatomic molecules (N ₂ , O ₂ , CO, ...)	- การเคลื่อนที่ของ C.M. ในทิศทาง (x, y, z) - การหมุนรอบแกนสองแกน (ω_x, ω_y) - จำนวน D.O.F รวมเท่ากับ 5	$U = \frac{5}{2} NkT$
non-linear molecules (H ₂ O, NH ₃ , ...)	- การเคลื่อนที่ของ C.M. ในทิศทาง (x, y, z) - การหมุนรอบแกนสามแกน ($\omega_x, \omega_y, \omega_z$) - จำนวน D.O.F รวมเท่ากับ 6	$U = 3NkT$

Thermal Energy เนื่องจากการสั่นของโมเลกุล

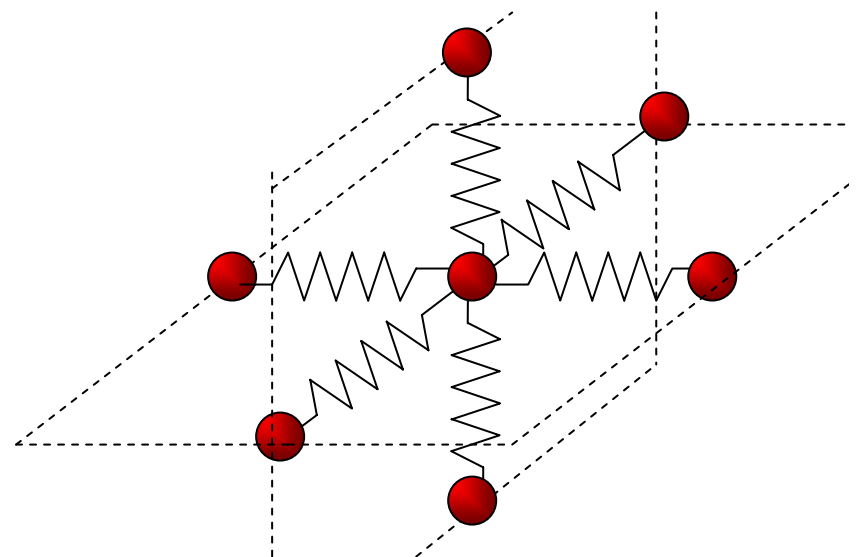
- **มวลติดปลายสปริง** พลังงานรวมของการสั่นคือ พลังงานศักย์ + พลังงานจลน์

$$\langle \frac{1}{2} k u_x^2 \rangle + \langle \frac{1}{2} m v_x^2 \rangle = kT$$

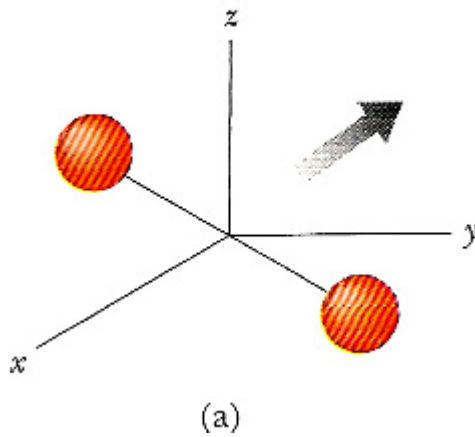


- **การสั่นในโครงผลึกของแข็ง** พลังงานจลน์ และ พลังงานศักย์ เนื่องจากการสั่นในสามทิศทาง

$$\begin{aligned} & \text{พลังงานเฉลี่ยต่อหนึ่งโมเลกุลเท่ากับ} \\ & \langle \frac{1}{2} k u_x^2 \rangle + \langle \frac{1}{2} m v_x^2 \rangle \\ & + \langle \frac{1}{2} k u_y^2 \rangle + \langle \frac{1}{2} m v_y^2 \rangle \\ & + \langle \frac{1}{2} k u_z^2 \rangle + \langle \frac{1}{2} m v_z^2 \rangle = 3kT \end{aligned}$$



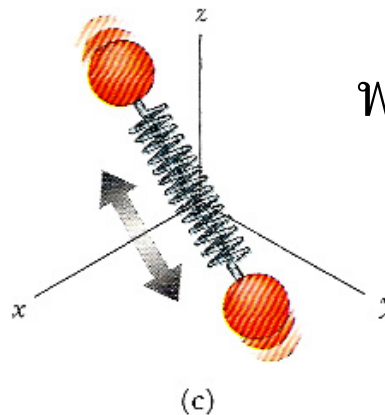
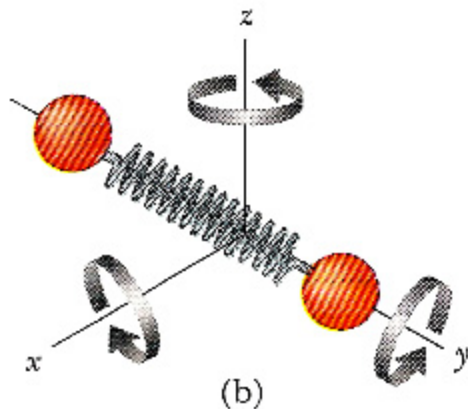
การสั่นของโมเลกุลก๊าซอะตอมคู่



ก๊าซอะตอมคู่ที่อยู่ในสถานะซึ่งมีอุณหภูมิสูงๆ อาจเกิดการสั่นในทิศทางขนานกับแกนโมเลกุลได้ ดังนั้นจึงต้องบวก D.O.F เนื่องจากการสั่นของโมเลกุลเข้าไปด้วย ทำให้ D.O.F ของระบบเปลี่ยนไปเป็น $D.O.F = 5 + 2 = 7$

การเลื่อนตำแหน่งและการหมุน

D.O.F จากการสั่น



พลังงานภายในของระบบก๊าซนี้คือ

$$U = \frac{7}{2} NkT$$

พลังงานภายในและความร้อนจำเพาะ (อีกรอบ)

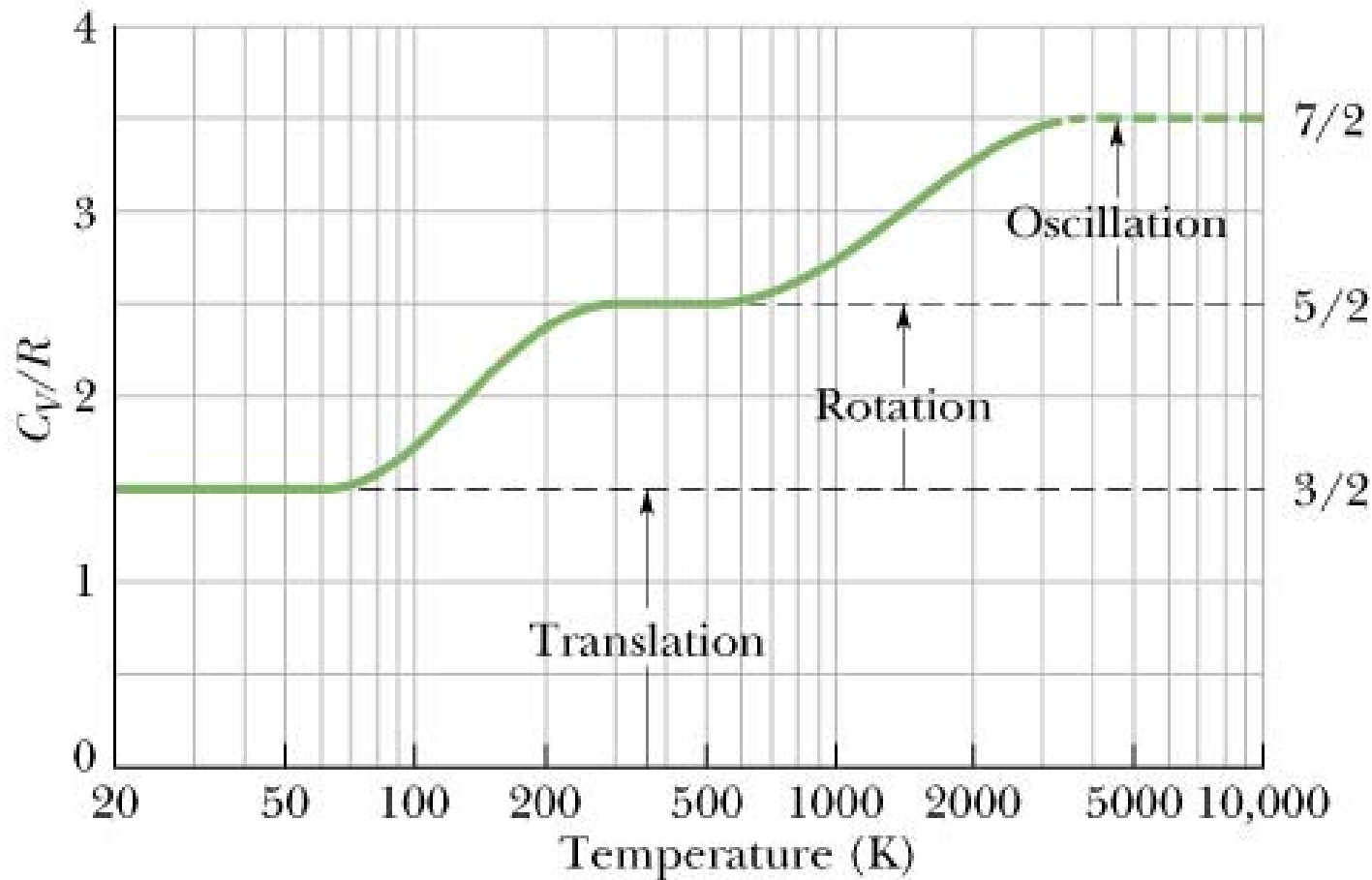
ความร้อนจำเพาะของก๊าซชนิดต่างๆคำนวณได้จาก

$$C_V = \frac{1}{M} \frac{\partial U}{\partial T}$$

ก๊าซ	พลังงานภายใน	ความร้อนจำเพาะ
Monatomic gas (He, Ne, Ar, ...)	$U = \frac{3}{2} NkT$	$\frac{3k}{2m}$
Diatomic molecules (N ₂ , O ₂ , CO, ...)	$U = \frac{5}{2} NkT$	$\frac{5k}{2m}$
non-linear molecules (H ₂ O, NH ₃ , ...)	$U = 3NkT$	$\frac{3k}{m}$

ไม่คำนึงถึงการสั่นของโมเลกุล

ในระบบที่มีอุณหภูมิต่ำ พลังงานภายในของก๊าซจะขึ้นอยู่กับ การเคลื่อนที่ตำแหน่ง เสียเป็นส่วนใหญ่ ในกรณีที่อุณหภูมิมีก่าสูงมาก ๆ ข้อมูลจากการทดลองบอกว่า เราจะต้องคำนึงถึงการหมุน และการสั่นของโมเลกุลด้วย



กราฟแสดงค่าความร้อนจำเพาะของก๊าซไฮโดรเจนที่อุณหภูมิต่างๆ

กฎของก๊าซอุดมคติ

จากการพิจารณาแบบจำลองของก๊าซในอุดมคติเราพบว่า

- The Pressure-Energy relation:

$$p = \frac{2}{3} \frac{N}{V} \langle KE \rangle$$

- The Equipartition Principle:

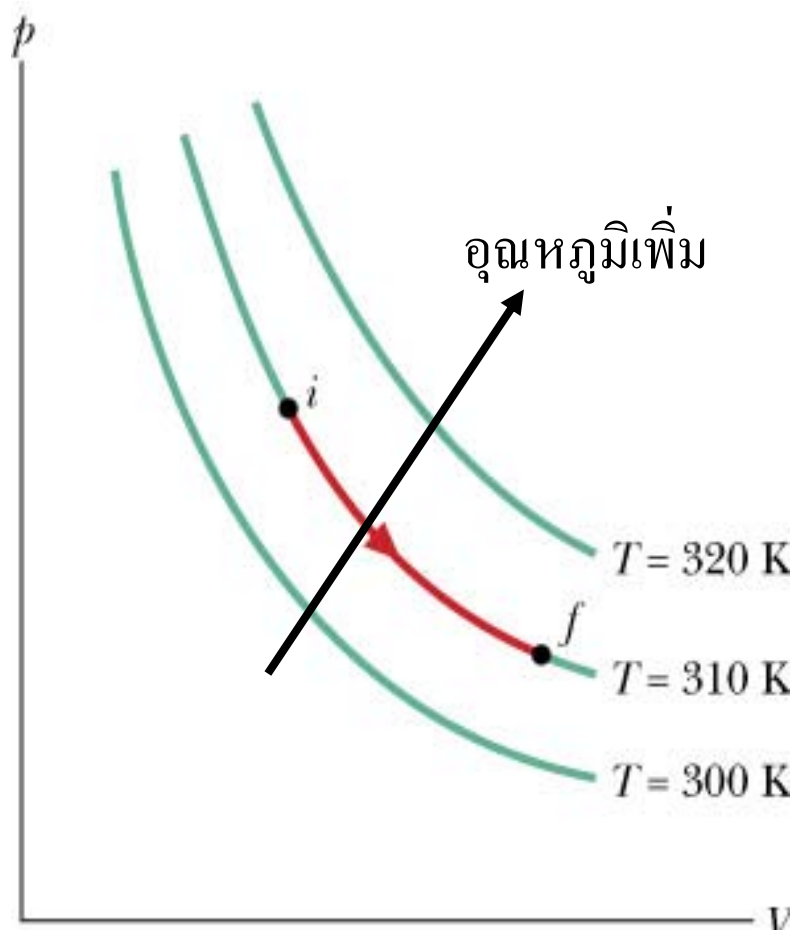
$$\langle KE \rangle = \frac{1}{2} m \left\{ \langle v_x^2 \rangle + \langle v_y^2 \rangle + \langle v_z^2 \rangle \right\} = \frac{3}{2} kT$$

คิดเฉพาะการเคลื่อนที่ของศูนย์กลางมวล เพราะการหมุนและการสั่นไม่มีผลต่อความดัน

- เมื่อรวมทั้งสองเข้าด้วยกันจะได้ กฎของก๊าซอุดมคติ หรือ Ideal Gas Law:

$$pV = NkT$$

P-V diagrams

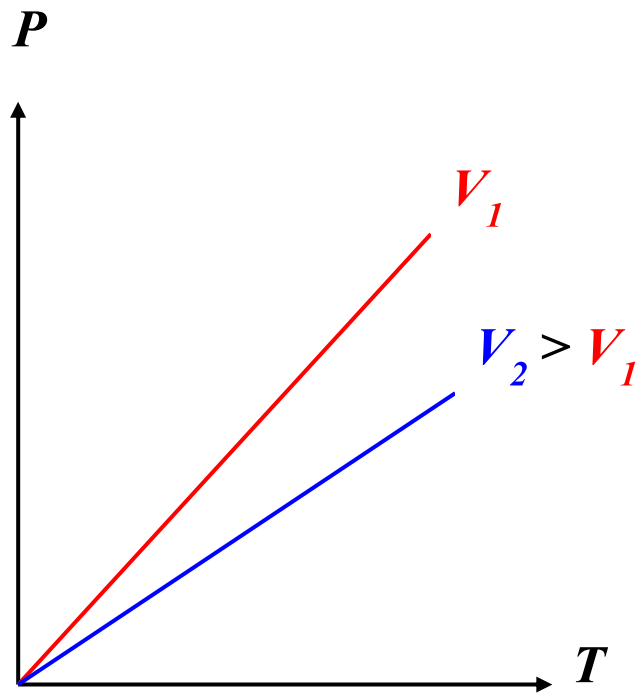


ถ้าให้อุณหภูมิมีค่าคงที่ เราจะสามารถเขียนกราฟระหว่าง P และ V ได้ดังรูป

$$P(V) = NkT \frac{1}{V}$$

เราเรียกการเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิคงที่ว่า “ Isothermal ”

P-T diagram



ถ้าเราพิจารณาระบบก๊าซที่มีปริมาตรคงที่
กราฟระหว่าง P และ T จะเป็นกราฟ
เส้นตรง

$$P(T) = \frac{Nk}{V} T$$

จะเห็นว่าความดันจะเป็นศูนย์เมื่ออุณหภูมิ
เข้าสู่ศูนย์เคลวิน

โมเลกุลของก๊าซไม่มีความเร็ว -> ไม่มีโมเลกุลวิ่งชนผนัง

Avogadro's constant และ ideal gas constant

ในบางครั้งเราจะบอกจำนวนอะตอมหรือโมเลกุลเป็น โมล (mole), “ n ”

ถ้าให้จำนวนโมเลกุลเป็น N จำนวนโมลนิยามโดย

$$n = \frac{N}{N_A}$$

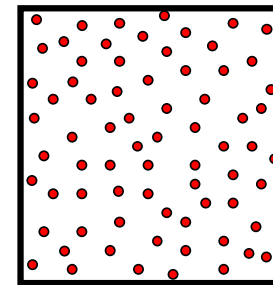
$$N_A = 6.023 \times 10^{23} \text{ molecules/mole} \\ = \text{Avogadro's constant}$$

- Ideal gas law: $pV = NkT = n(N_A k) T = n RT$

เราจะได้ว่า $R = N_A k$ คือค่าคงที่ของก๊าซ gas constant มีค่าเท่ากับ $8.314 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$

- ตัวอย่าง ลองพิจารณาปริมาตรของก๊าซ 1 โมล ที่อุณหภูมิและความดันมาตรฐาน หรือ **standard temperature and pressure (STP)**:

$$T = 0 \text{ }^\circ\text{C} = 273 \text{ K} \quad p = 1 \text{ atm} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$$



$$V = \frac{nRT}{p} = \frac{(1 \text{ mole})(8.31 \text{ J/mol}\cdot\text{K})(273 \text{ K})}{1.01 \times 10^5 \text{ Pa}} = 22.4 \times 10^{-3} \text{ m}^3 = 22.4 \text{ liters}$$

ก๊าซจริงและก๊าซอุดมคติ

กฎของก๊าซอุดมคติไม่สามารถที่จะนำมาใช้กับก๊าซจริงได้ทุกกรณี โดยเฉพาะในกรณีที่อุณหภูมิลดลงต่ำใกล้จุดกลั่นตัว หรือเมื่อความหนาแน่นของก๊าซมีค่ามากๆ คุณสมบัติของก๊าซจริงจะต่างกับก๊าซอุดมคติมาก

การกฎของก๊าซอุดมคติใช้ไม่ได้กับก๊าซจริงมีเหตุผลหลักๆอยู่สองส่วนคือ

- 1) ก๊าซอุดมคติไม่มีแรงกระทำระหว่างกัน แต่ก๊าซจริงมีแรงทางไฟฟ้ากระทำระหว่างกันซึ่งเรียกว่าแรงแวนเดอร์วาล
- 2) โมเลกุลของก๊าซมีขนาดทำให้ปริมาตรที่อยู่ในสูตรกฎของก๊าซไม่ใช่ปริมาตรจริงๆ แต่รวมเอาปริมาตรของโมเลกุลก๊าซเข้าไปด้วย

หนังสืออิเล็กทรอนิกส์	
ฟิสิกส์ 1(ภาคกลศาสตร์(ฟิสิกส์ 1 (ความร้อน)
ฟิสิกส์ 2	กลศาสตร์เวกเตอร์
โลหะวิทยาฟิสิกส์	เอกสารคำสอนฟิสิกส์ 1
ฟิสิกส์ 2 (บรรยาย(แก้ปัญหาฟิสิกส์ด้วยภาษา C
ฟิสิกส์พิศวง	สอนฟิสิกส์ผ่านทางอินเทอร์เน็ต
ทดสอบออนไลน์	วิดีโอการเรียนการสอน
หน้าแรกในอดีต	แผ่นใสการเรียนการสอน
เอกสารการสอน PDF	กิจกรรมการทดลองทางวิทยาศาสตร์
แบบฝึกหัดออนไลน์	สุดยอดสิ่งประดิษฐ์
การทดลองเสมือน	
บทความพิเศษ	ตารางธาตุไทย1) 2 (Eng)
พจนานุกรมฟิสิกส์	ลับสมองกับปัญหาฟิสิกส์
ธรรมชาติมหัศจรรย์	สูตรพื้นฐานฟิสิกส์
การทดลองมหัศจรรย์	ดาราศาสตร์ราชมงคล
แบบฝึกหัดกลาง	
แบบฝึกหัดโลหะวิทยา	แบบทดสอบ
ความรู้รอบตัวทั่วไป	อะไรเอ่ย ?
ทดสอบ)เกมเศรษฐี(คติปริศนา
ข้อสอบเอนทรานซ์	เฉลยกลศาสตร์เวกเตอร์
คำศัพท์ประจำสัปดาห์	
ความรู้รอบตัว	
การประดิษฐ์ของโลก	ผู้ได้รับโนเบลสาขาฟิสิกส์
นักวิทยาศาสตร์เทศ	นักวิทยาศาสตร์ไทย
ดาราศาสตร์พิศวง	การทำงานของอุปกรณ์ทางฟิสิกส์
การทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ	

 การเรียนรู้การสอนฟิสิกส์ 1 	
1. การวัด	2. เวกเตอร์
3. การเคลื่อนที่แบบหนึ่งมิติ	4. การเคลื่อนที่บนระนาบ
5. กฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน	6. การประยุกต์กฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน
7. งานและพลังงาน	8. การดลและโมเมนตัม
9. การหมุน	10. สมดุลของวัตถุแข็งเกร็ง
11. การเคลื่อนที่แบบคาบ	12. ความยืดหยุ่น
13. กลศาสตร์ของไหล	14. ปริมาณความร้อน และ กลไกการถ่ายโอนความร้อน
15. กฎข้อที่หนึ่งและสองของเทอร์โมไดนามิก	16. คุณสมบัติเชิงโมเลกุลของสสาร
17. คลื่น	18. การสั่น และคลื่นเสียง
 การเรียนรู้การสอนฟิสิกส์ 2 	
1. ไฟฟ้าสถิต	2. สนามไฟฟ้า
3. ความกว้างของสายฟ้า	4. ตัวเก็บประจุและการต่อตัวต้านทาน
5. ศักย์ไฟฟ้า	6. กระแสไฟฟ้า
7. สนามแม่เหล็ก	8. การเหนี่ยวนำ
9. ไฟฟ้ากระแสสลับ	10. ทรานซิสเตอร์
11. สนามแม่เหล็กไฟฟ้าและเสาอากาศ	12. แสงและการมองเห็น
13. ทฤษฎีสัมพัทธภาพ	14. กลศาสตร์ควอนตัม
15. โครงสร้างของอะตอม	16. นิวเคลียร์
 การเรียนรู้การสอนฟิสิกส์ทั่วไป 	
1. จลศาสตร์ (kinematic)	2. จลพลศาสตร์ (kinetics)
3. งานและโมเมนตัม	4. ซิมเปิลฮาร์โมนิก คลื่น และเสียง
5. ของไหลกับความร้อน	6. ไฟฟ้าสถิตกับกระแสไฟฟ้า
7. แม่เหล็กไฟฟ้า	8. คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับแสง
9. ทฤษฎีสัมพัทธภาพ อะตอม และนิวเคลียร์	

