

Instituto de Física
USP

Física V - Aula 03

Professora: Mazé Bechara

Aula 03 – AVISOS

1. Na Xerox:

(a) Cap. I: “Teoria Cinética dos Gases” do livro *Física Atômica* de Max Born (outro clássico).

(b) Cap. I “The Atomic View of Matter” do livro *Introduction to Atomic Physics* de Enge, Wehr e Richards.

2. Marcar o horário do meu atendimento aos estudantes

Colóquios do IFUSP

- Assistam aos colóquios do IFUSP nas quintas-feiras, 16h.
- Conhecer de forma abrangente é preciso! Seguir “gurus”, “mestres”, “ideólogos” e similares, não é preciso...
- Os bons colóquios agregam conhecimento também aos alunos de 2ª metade da graduação. Mas para reconhecer os bons é preciso estar lá, assistir alguns menos bons, usando sempre o próprio cérebro e judicioso julgamento.

Aula 03 - Modelos Cinéticos da Matéria. As bases da Mecânica Estatística Clássica (Maxwell-Boltzmann)

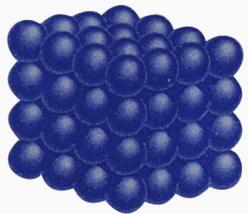
- 1. Sua** representação qualitativa da matéria sólida, líquida e gasosa: **Constituintes; Distribuição espacial dos constituintes; Movimentos dos constituintes.**
- 2. Uma representação da matéria:** a visão pictórica de Feynman (com base no conhecimento das ciências naturais) – **os constituintes e de como se organizam na matéria** gasosa, líquida e sólida.
- 3. Modelos mecânicos (cinéticos) da matéria.**
 - i. Da **termodinâmica dos gases aos modelos mecânicos** de matéria gasosa, líquida e sólida. A relação entre as variáveis do estado termodinâmico: pressão, volume, **temperatura e energia interna** e grandezas da dinâmica dos constituintes da matéria no modelo mecânico (cinético) mais básico.
 - ii. A medida da **energia interna (termodinâmica)** da matéria: **o calor específico molar a volume constante.**

- **ARRISQUEM-SE!!!**

Como **vocês** representariam de forma comparativa a matéria gasosa, líquida e sólida, “por dentro”, ou seja, seus constituintes, sua distribuição espacial (estática) e seus movimentos (dinâmica)?

Representações (estáticas) de gás, líquido e sólido – modelos mecânicos clássicos clássicos

Nestas figuras todos os constituintes estão representados por bolinhas idênticas – o centro de massa das moléculas, nos casos de gás e líquido.



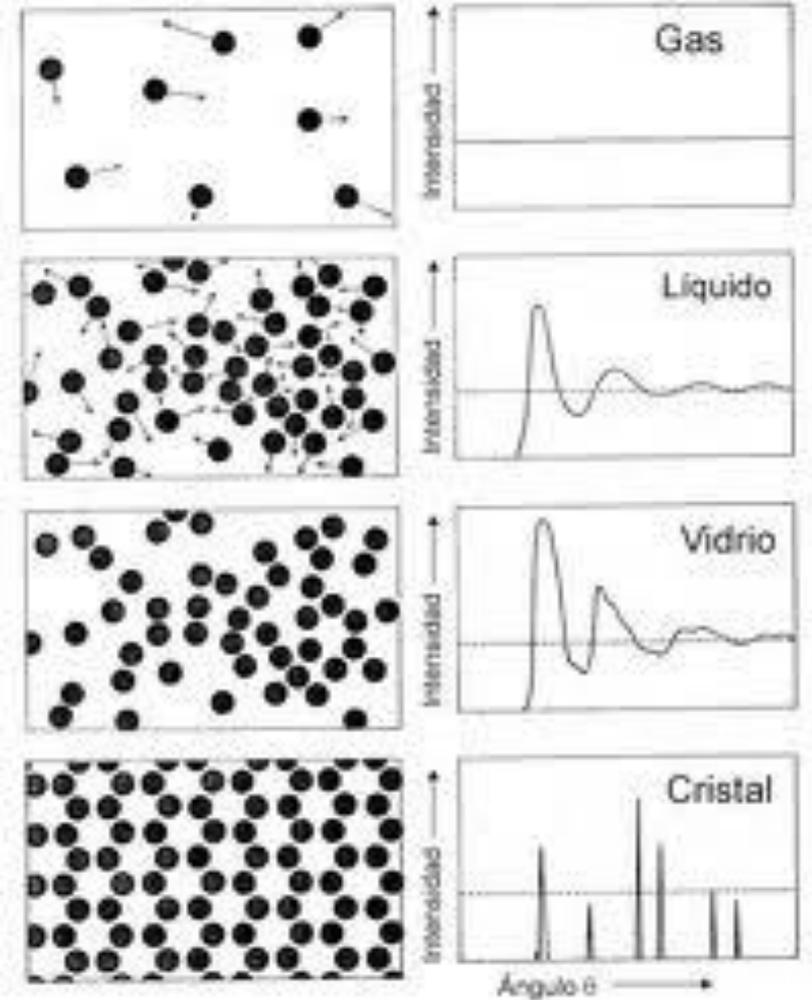
Sólido



Líquido



Gaseoso



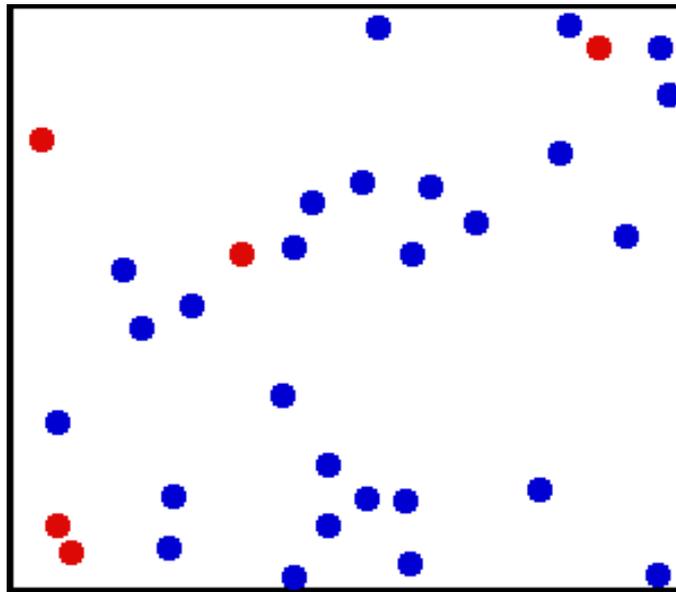
Vidro é sólido amorfo. Cristal é sólido cristalino

Richard Feynman em FÍSICA Em Seis Lições

- **FÍSICA Em Seis Lições** – tradução de Ivo Korytowski; Editora Ediouro, Rio de Janeiro (1999)
- **(cópia do primeiro capítulo na Xerox do IFUSP)**

*"Se, em algum cataclismo, todo o conhecimento científico fosse destruído e apenas uma sentença fosse passada adiante para as próximas gerações de criaturas, que enunciado conteria mais informações em menos palavras? Acredito que seja a **Hipótese Atômica** (ou o fato atômico, ou como quiser chamá-lo) de que **todas as coisas compõem-se de átomos – pequenas partículas que se deslocam em movimento perpétuo, atraindo umas às outras quando estão a certa distância, mas repelindo-se quando comprimidas umas contra as outras**"*

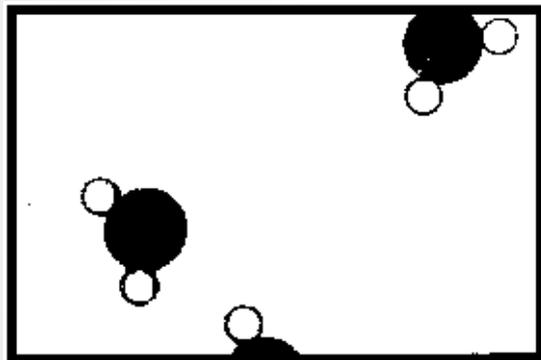
“... átomos... em movimento perpétuo”



Modelo de um **gás monoatômico**: movimento livre no espaço tridimensional com choques elásticos com paredes e outros constituintes - *(nossa! quanto vazio!)*

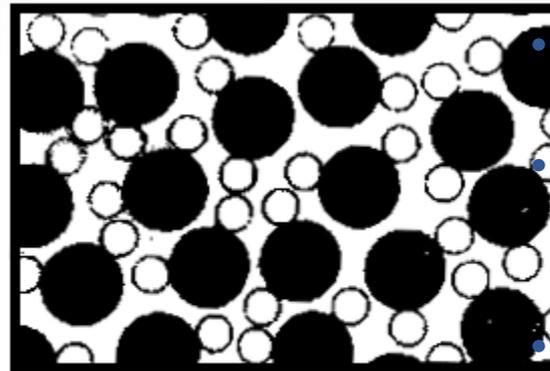
“Todas as coisas compõe-se de átomos – pequenas partículas que se deslocam em movimento perpétuo”

Feynman em *“Física em seis lições”*



Vapor (H₂O)

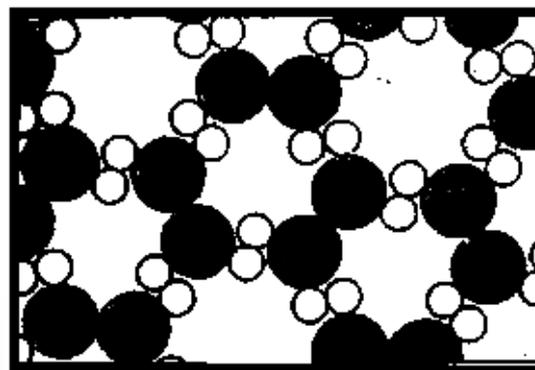
- Átomos em movimento livre com interação (choques elásticos) eventual entre eles.
- Distância “grande” entre eles.



Água ampliada um bilhão de vezes

- Distância “média” entre os átomos.
- Átomos no espaço com distribuição “não organizada”.
- Interação “fracamente” entre si

**Modelos de matéria e de seus constituintes!
Nossa! Há vazios em todos os estados!**

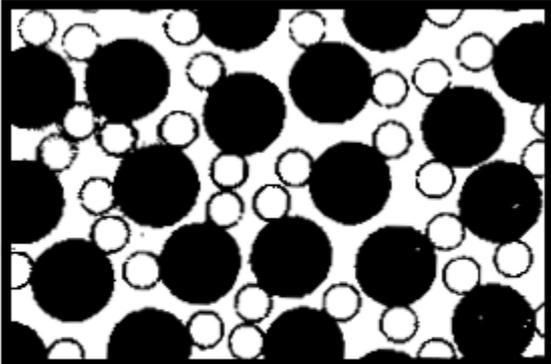


Gelo

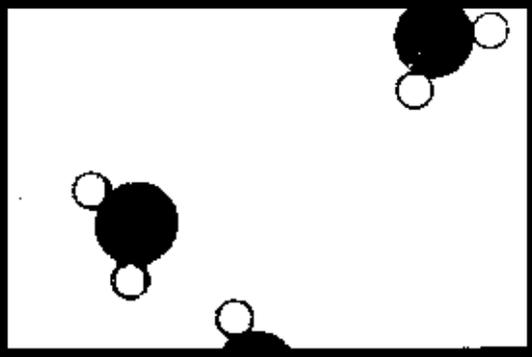
- Átomos “próximos” distribuição “organizada”.
- Interação “fortemente” entre si

“Física em seis lições”
Richard P. Feynman
Ediouro (1999) 3ª Edição

Cuidado com a água!



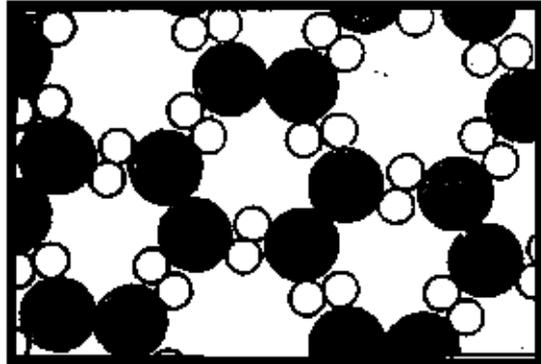
Água ampliada um bilhão de vezes



Vapor (H₂O)

- Ela é comum mas tem muitas anomalias!!!

Compare o vazio do líquido com o do sólido!



Gelo

É a única substância no qual o sólido é menos denso que o líquido: o gelo flutua na água!!!

Figuras de "Física em seis lições" Richard P. Feynman Ediouro (1999) 3ª Edição

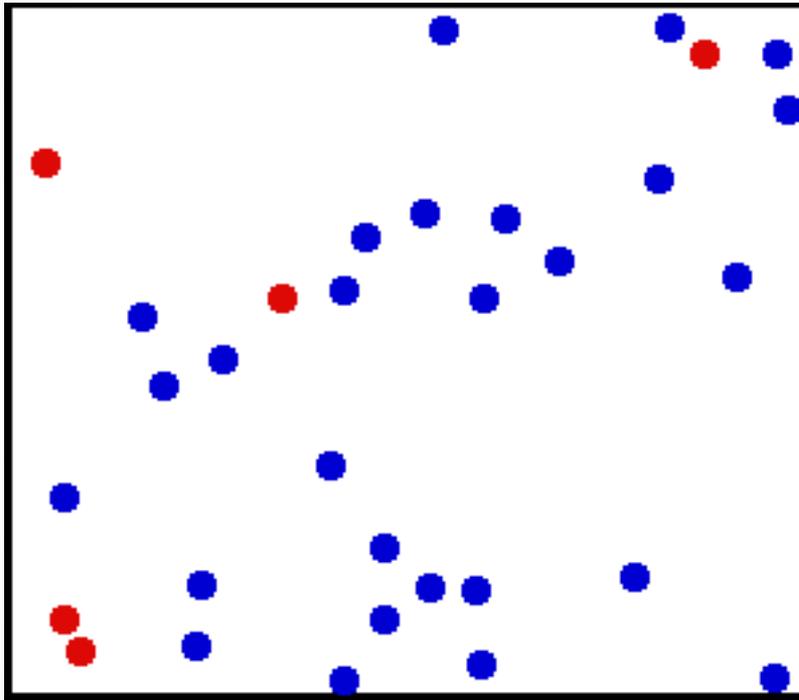
Termodinâmica no equilíbrio térmodinâmico – variáveis e leis

- **Variáveis dos estados no equilíbrio termodinâmico:**
Temperatura (T), Pressão (P), Volume (V), **Energia interna (U)**, Entropia (S), Entalpia (E)...
- **1ª Lei da Termodinâmica (conservação de energia):**

$$dU = dQ + dW = dU - PdV$$

- **U é a energia interna (termodinâmica)**
- **Cuidado com a definição de trabalho positivo e negativo**

Gás() de moléculas monoatômicas (movimentos translacionais com interações representadas por choques elásticos)*



Interações: choques elásticos entre elas e as paredes.

Mais choques com as paredes do recipiente e poucos entre eles nos gases de baixa densidade (ideias).

() Gás de baixa pressão.*

A termodinâmica e os modelos mecânicos (cinéticos) - revisão

- **A média da energia cinética, que todos os tipos de constituintes têm, define a temperatura (*proposta de Maxwell*) que leva à equação de estado do gás de baixa densidade ou gás ideal.**

$$\langle \varepsilon_c \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} m v_{cmi}^2 = \frac{3}{2} kT$$

- **A Energia interna (termodinâmica) = soma da energia de cada constituinte.**

$$U = \sum_{i=1}^N \varepsilon_i = N \langle \varepsilon \rangle$$

- **A energia de um constituinte = energia cinética + energias internas do constituinte + energia de interação com os outros constituintes (depende dos constituintes e do estado da matéria).**

Como medir a energia interna termodinâmica?

Física não é matemática, é ciência da natureza!

A energia interna termodinâmica

- **U não é diretamente observável.** O observável é, por exemplo, **o calor específico molar a volume constante – c_v** que é igual à variação do calor de um mol por unidade de temperatura que é igual à variação da energia interna de 1 mol por unidade de temperatura quando o volume é constante.
- O calor específico molar a volume constante é uma forma de medir a energia interna de um sistema em equilíbrio térmico.

Calor específico molar a volume constante *uma maneira de se medir a energia interna* *(termodinâmica)*

- **Definição e igualdades na termodinâmica usando modelos mecânicos da matéria:**

$$c_V = \left[\frac{\partial Q^{1mol}}{\partial T} \right]_{V=cte} = \frac{\partial U^{1mol}}{\partial T} = \frac{\partial}{\partial T} \left[\sum_{i=1}^{N_o} \varepsilon_i \right] = N_o \frac{\partial}{\partial T} \left[\frac{1}{N_o} \sum_{i=1}^{N_o} \varepsilon_i \right] = N_o \frac{\partial \langle \varepsilon \rangle}{\partial T}$$

- ε_i é a energia de cada constituinte da matéria, e tais energias não precisam ser iguais. $\langle \varepsilon \rangle$ é a média da energia destes muitos constituintes.

*Qual **o seu** modelo mecânico de
moléculas monoatômicas?*

E das diatômicas?

*Quais os movimentos
possíveis das moléculas
monoatômicas **no seu modelo?***

E das diatômicas?

*Quais as energias das
moléculas monoatômicas **no
seu modelo?***

E das diatômicas?

Moléculas monoatômicas

dinâmica: só podem ter energia cinética (translacional)

He

Ne

Ar

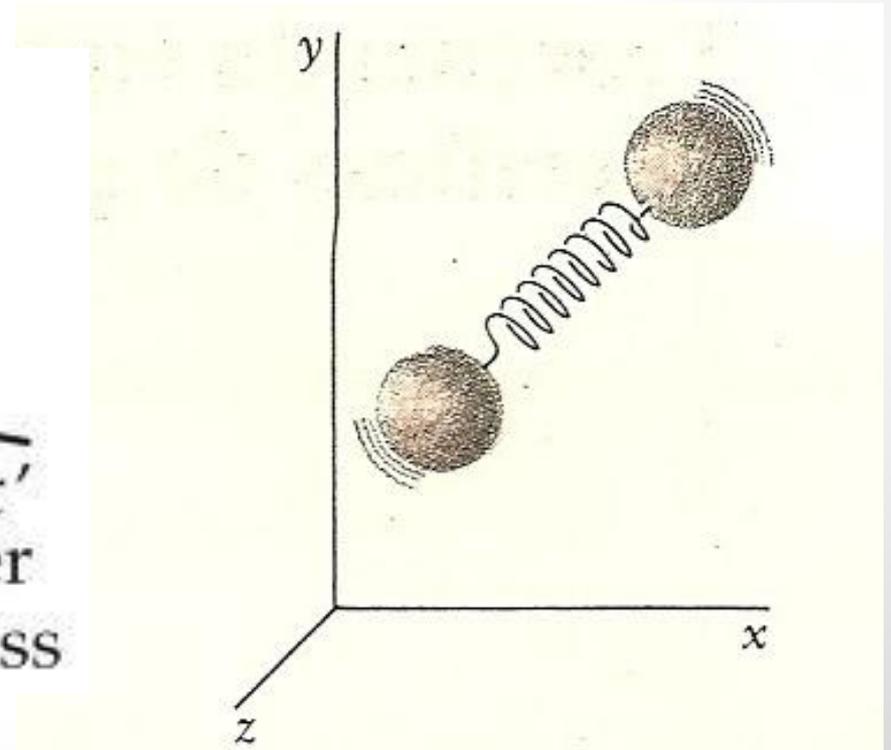
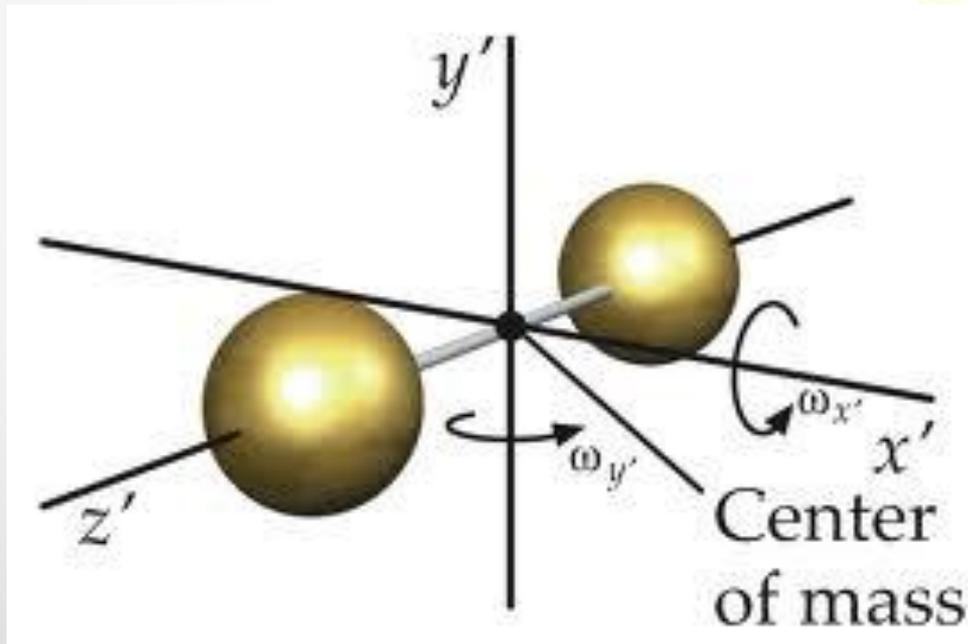
Kr

Xe

Rn

Modelos de molécula diatômica

Dinâmica: translação (do centro de massa)
+ rotação em torno de dois eixos que
passam no CM (todas); em algumas +
vibração na linha que une os dois átomos



Modelos de matéria no estado gasoso

- **Constituintes dos Gases – moléculas: mono ou poliatômicas.**
- *Interação: choques elásticos entre constituintes e com as paredes.*
- **A soma da energia de N moléculas = energia interna (termodinâmica)**

A energia interna nos modelos mecânicos dos constituintes e da matéria no estado gasoso

A soma da energia de N moléculas = energia interna (termodinâmica):

- **Monoatômicas** (energia cinética de translação no espaço tridimensional):

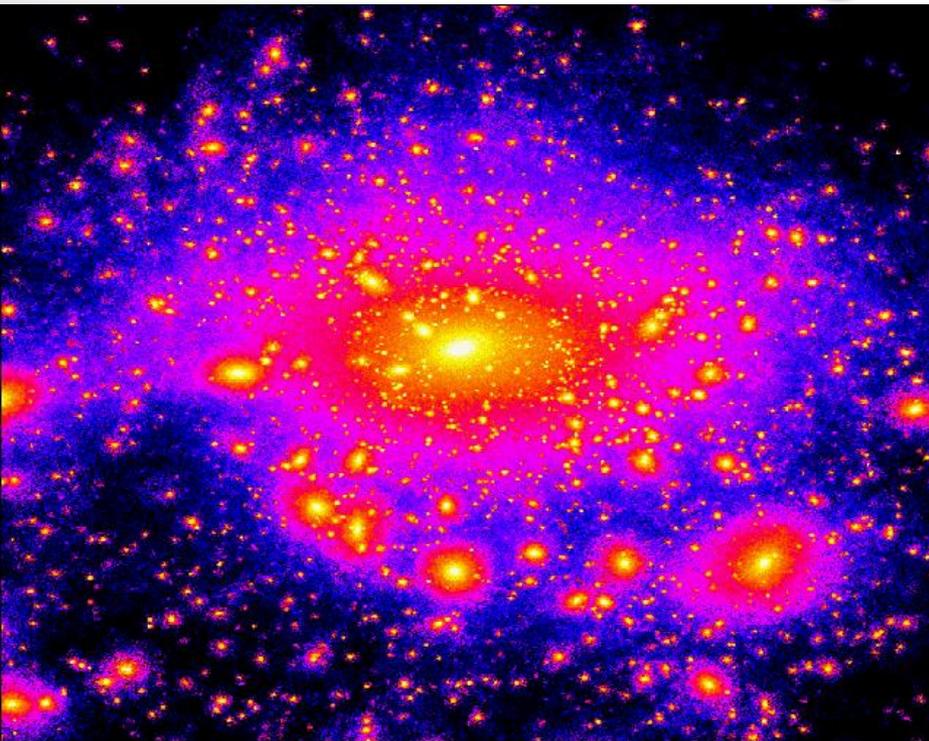
$$U = \sum_{i=1}^N \varepsilon_i = \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} m v_i^2 = N \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} m v_i^2 \right\} = N \langle \varepsilon \rangle$$

- **Diatômicas** (energia cinética de translação do cm + rotação em torno de dois eixos + oscilação em uma direção):

$$U = \sum_{i=1}^N \varepsilon_i = \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} m v_i^2 + \left[\frac{1}{2} I_{y'} \omega_{y'}^2 + \frac{1}{2} I_{x'} \omega_{x'}^2 \right] + \left\{ \frac{1}{2} \mu \left[\frac{d\Delta z'}{dt} \right]^2 + \frac{1}{2} k \Delta z'^2 \right\} = N \langle \varepsilon \rangle$$

- m é a massa do constituinte (átomo ou molécula), $I_{x'}$ é o momento de inércia em relação ao eixo x' , μ a massa reduzida do constituinte

*Sistemas reais de matéria gasosa sob ação de forças externas: **some-se a energia potencial de interação à energia interna***



No espaço interplanetário



**Pouco acima da superfície
do planeta Terra**

Qual **o seu** modelo de sólido cristalino: dos constituintes e da distribuição espacial deles?

Qual é a interação entre os constituintes dos sólidos cristalinos **no seu modelo?**

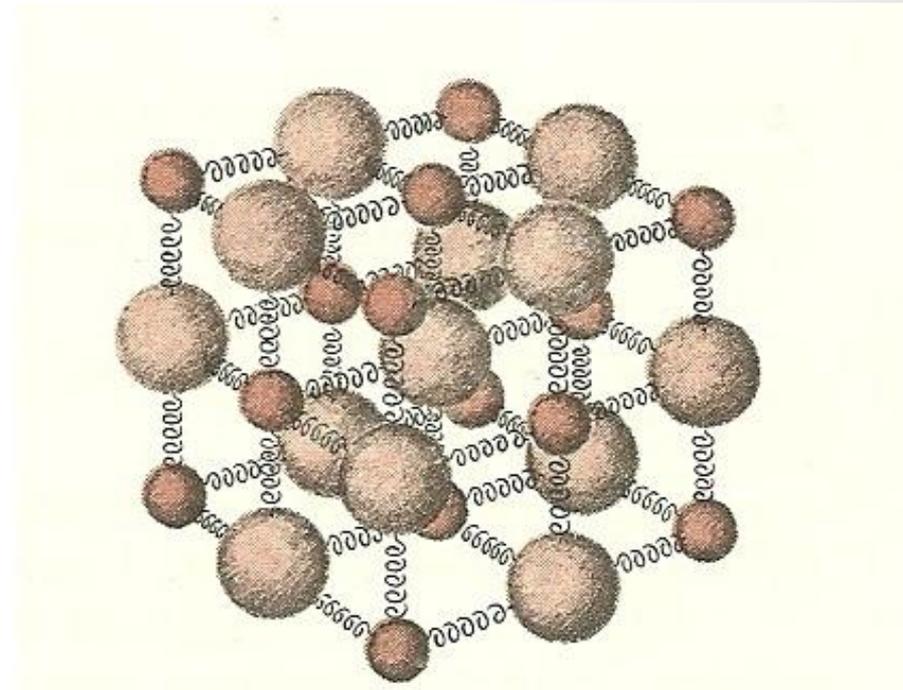
Qual a energia de um constituinte do sólido cristalino **no seu modelo?** E de N constituintes?

Um modelo de matéria sólida cristalina interação representada por oscilação elástica tridimensional entre átomos mais próximos

- **Constituintes dos Sólidos (não amorfos ou cristalinos)** átomos iguais ou diferentes interagindo com vizinhos como se fossem osciladores harmônicos tridimensionais.

Energia de cada constituinte dos sólidos (cada qual em relação à sua posição de equilíbrio(0,0,0,)):

$$\varepsilon = \frac{1}{2}mv^2 + E_{vibr} = \frac{1}{2}m(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2) + \frac{1}{2}k_x x^2 + \frac{1}{2}k_y y^2 + \frac{1}{2}k_z z^2$$



*O que você entende por
EQUIPARTIÇÃO DA
ENERGIA no modelo
cinético de Maxwell?*

A EQUIPARTIÇÃO DA ENERGIA

Demonstrado na teoria estatística de Maxwell-Boltzmann, depois de ter sido considerado um princípio

Cada grau de liberdade, entendido como uma coordenada de posição (x, y, z, θ, ϕ) ou sua derivada $(\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, \dot{\theta}, \dot{\phi})$, que apareça **QUADRATICAMENTE** na expressão da energia de uma molécula de um sistema de N partículas, contribui para a energia média do sistema com a mesma quantidade $\frac{1}{2}kT$.

Valores experimentais do c_v para gases

A Teoria Cinética da Matéria

Tabela 2.1 Capacidades caloríficas molares
de alguns gases a 15°C e 1atm

Gás	C_v (cal/mol-grau)	C_v/R
Ar	2,98	1,50
He	2,98	1,50
CO	4,94	2,49
H ₂	4,87	2,45
HCl	5,11	2,57
N ₂	4,93	2,49
NO	5,00	2,51
O ₂	5,04	2,54
Cl ₂	5,93	2,98
CO ₂	6,75	3,40
CS ₂	9,77	4,92
H ₂ S	6,08	3,06
N ₂ O	6,81	3,42
SO ₂	7,49	3,76

$R=1,987$ cal/mol-grau

Extraído de J. R. Partington e W. G. Shilling, *The specific Heats of Gases*. Ernest Benn. Ltd. 1924

São os resultados experimentais que validam os modelos e teorias!

Física V - Professora: Mazé Bechara

VALORES NUMÉRAICOS DE CONSTANTES RELEVANTES – ordens de grandeza são essenciais!

- constante k de Boltzmann:
- $k=R/N_o=1,381 \times 10^{-23} \text{J/K}=8,617 \times 10^{-5} \text{eV/K}$
- Constante R dos gases perfeitos:
- $R=8,315 \text{J/mol.K}= 1,987 \text{cal/mol.K}$
- Constante de Avogadro N_o :
- $N_o=6,023 \times 10^{23} \text{ part/mol}$