

Instituto de Física USP

Física Moderna I Aula 03

Professora: Mazé Bechara

Aula 03 – AVISOS

1. Na página da disciplina há uma programação aula a aula até a 1ª prova em 11 de abril.
2. Alguns dos alunos matriculados na disciplina ainda não estão inscritos na página da disciplina. **Inscriva-se com urgência!**
3. Senti falta de vocês no atendimento personalizado de ontem. Apareçam!
4. **Forme sua dupla** para trabalhar no projeto para o ensino médio. **Dia 9/3 é o prazo final.**

Situe-se, se organize e use os mecanismos de apoio para o seu bom desenvolvimento na disciplina.

Aula 03 – Modelos de estrutura da matéria e a mecânica estatística clássica

1. Uma representação da matéria
 - i. A sua hoje
 - ii. A do Feynman – com base nos modelos mecânicos (cinéticos), científicos no contexto da física clássica.
2. Uma teoria para a dinâmica de um sistema de muitas partículas idênticas: **a mecânica estatística clássica (de Maxwell-Boltzmann):**
 - i. **As bases estatísticas (matemática) da mecânica estatística clássica.**
 - ii. **O conceito de distribuição normalizada de grandezas discretas e de grandezas contínuas.**
 - iii. **O teorema de Boltzmann para a distribuição de grandezas físicas contínuas e discretas (que decorre dessas bases).**
 - iv. **A distribuição de velocidades (gaussiana) e do módulo de velocidades (maxwelliana) no equilíbrio termodinâmico.**
 - v. **Conceituação e determinação, a partir das distribuições, de grandezas estatisticamente relevantes:** valor mais provável e valor menos provável, valor médio e a média do quadrado.

Como vocês representariam,
com base nas ciências
naturais, a matéria: gasosa,
líquida e sólida, “**por
dentro**”, *prezados alunos de
Física Moderna I do 1º semestre
de 2012, no IFUSP?!*

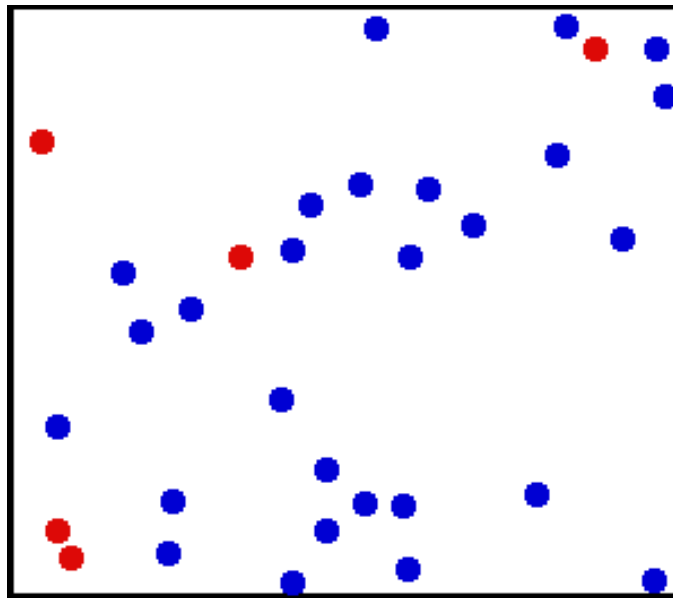
- **ARRISQUEM-SE!!!**

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 contras as outras**"*

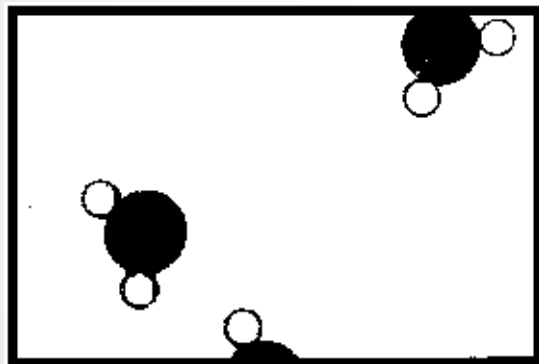
“... átomos... em movimento perpétuo”



Modelo de um gás monoatômico: total
liberdade de movimento no espaço
tridimensional - (nossa! quanto vazio!)

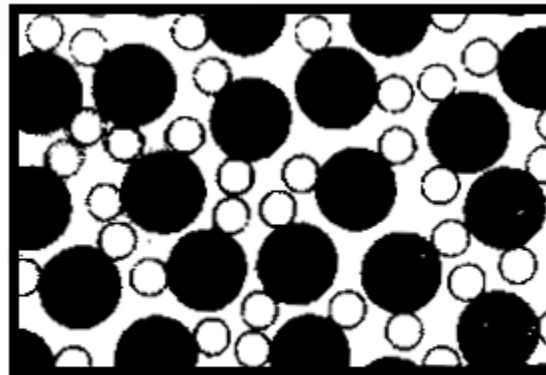
"Todas as coisas compõe-se de átomos – pequenas partículas que se deslocam em movimento perpétuo"

Feynman em *"Física em seis lições"*



Vapor (H_2O)

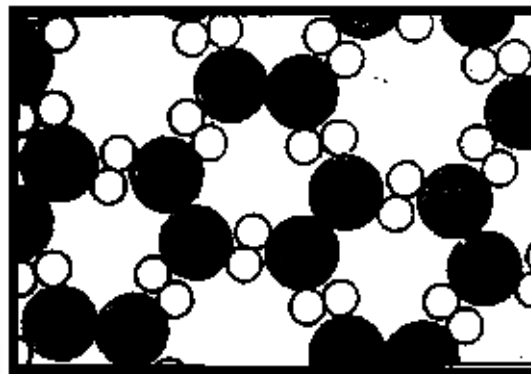
"Física em seis lições"
Richard P. Feynman
Ediouro (1999) 3ª Edição



Água ampliada um bilhão de vezes

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

Modelos de matéria!
Nossa, há vazios em todos os estados!

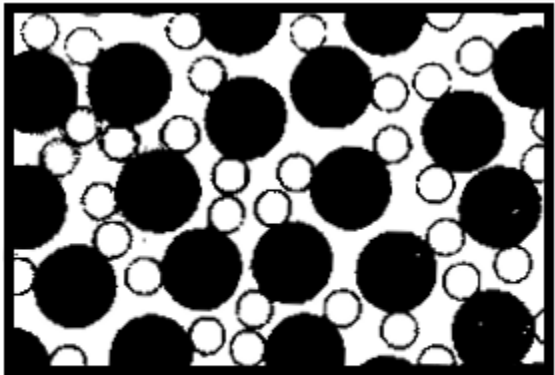


Gelo Física Moderna I - Professora: Mazé Bechara

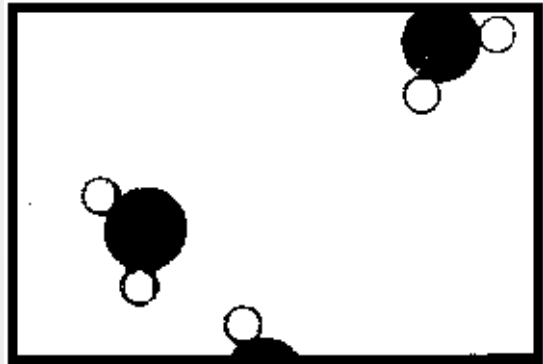
- Distância "média" entre os átomos.
- Átomos no espaço com distribuição "não organizada".
- Interação "fracamente" entre si

- Átomos "próximos" e distribuição "organizada".
- Interação "fortemente" entre si

Cuidado com a água!



Água ampliada um bilhão de vezes



Vapor (H_2O)

- Ela é comum mas tem muitas anomalias!!!

Compare o vazio do líquido com o do sólido!

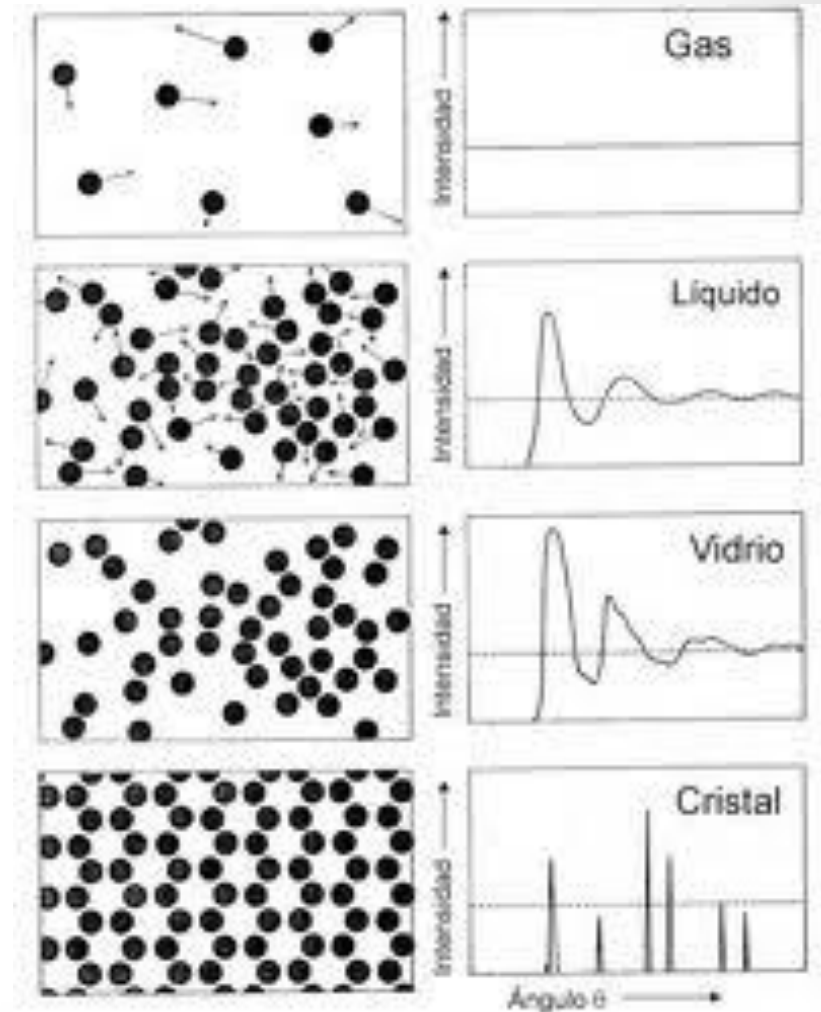
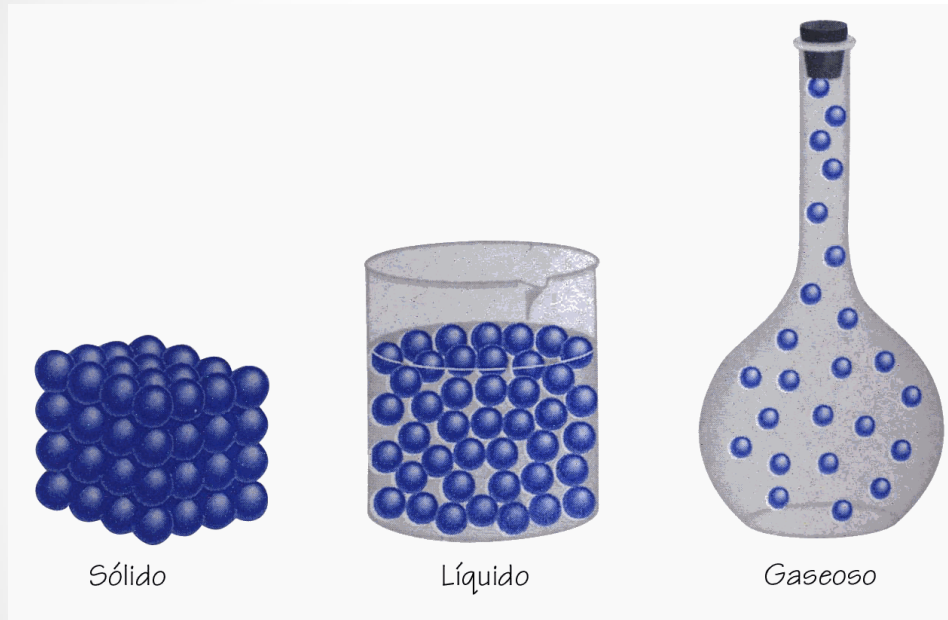


Gelo Física Moderna I - Professora: Mazé Bechara

- 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

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



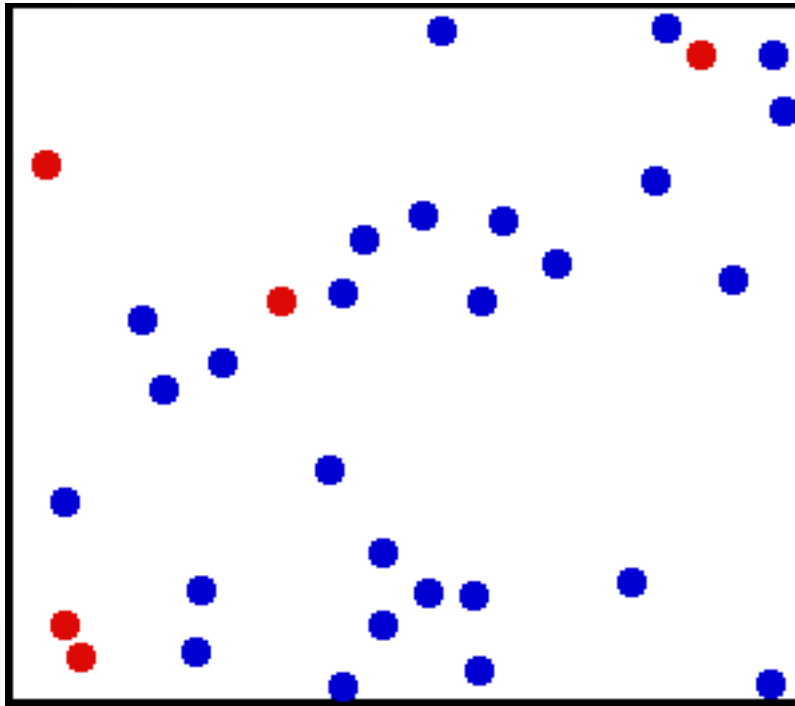
A termodinâmica e o mensurável

- **Variáveis do estado 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**
- **U não é diretamente observável.** O observável é **o calor específico molar a volume constante – c_v** que é igual à **variação da energia interna por unidade de temperatura** quando o volume é constante

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



Mais choques com as
paredes do recipiente e
poucos entre eles.

(*) Gás de baixa pressão.

A termodinâmica e os modelos mecânicos (cinéticos) - revisão

- 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 (dependendo dos constituintes e do estado da matéria).
- A média da energia cinética dos constituintes está associada à temperatura (Maxwell).

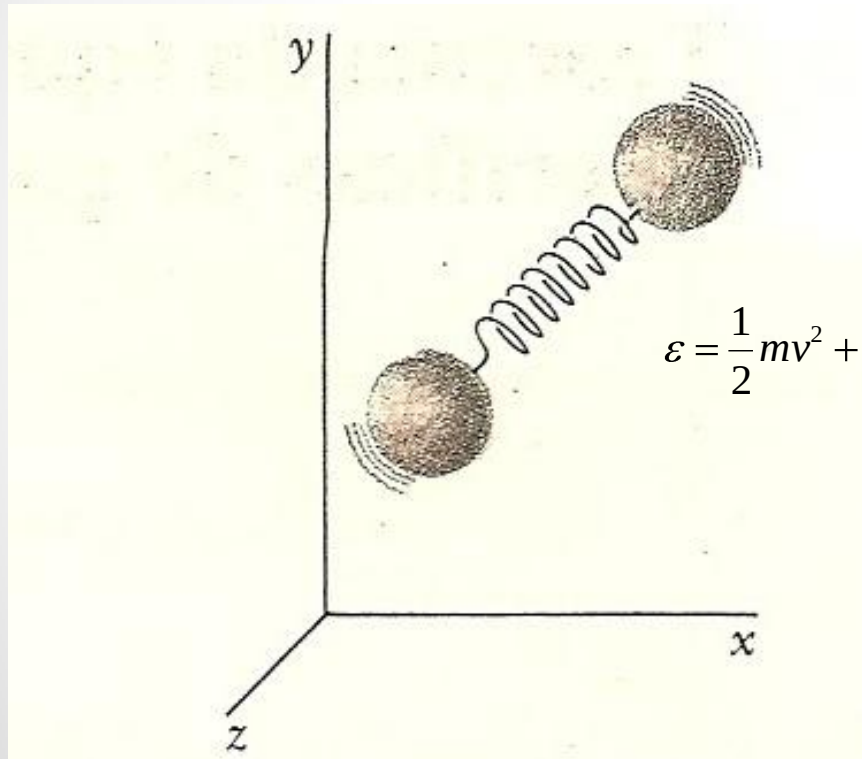
$$\langle \varepsilon_c \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} m v_{cmi}^2 = \frac{3}{2} kT$$

O modelo de matéria no estado gasoso constituintes (pouco) interagem uns com os outros com choques elásticos – velocidades constantes

- **Constituintes dos Gases** – moléculas: mono ou poliatômicas
-
- **Modelos de Moléculas:**
 - Monoatômicas – partículas puntiformes.
 - Diatômicas – duas partículas puntiformes.
- **Energias de N moléculas = energia interna (termodinâmica):**
 - Monoatômicas :
$$U = \sum_{i=1}^N \varepsilon_i = \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} m v_i^2 = N \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} m v_i^2 \right\} = N \langle \varepsilon \rangle$$
 - Diatômicas:
$$U = \sum_{i=1}^N \varepsilon_i = \sum_{i=1}^N \left[\frac{1}{2} m v_i^2 + \left[\frac{1}{2} I_y \omega_{y'}^2 + \frac{1}{2} I_z \omega_{z'}^2 \right] + \left\{ \frac{1}{2} \mu \Delta \dot{x}^2 + \frac{1}{2} k \Delta x^2 \right\} \right] = N \langle \varepsilon \rangle$$
- m é a massa do constituinte (átomo ou molécula)

O modelo de molécula diatômica

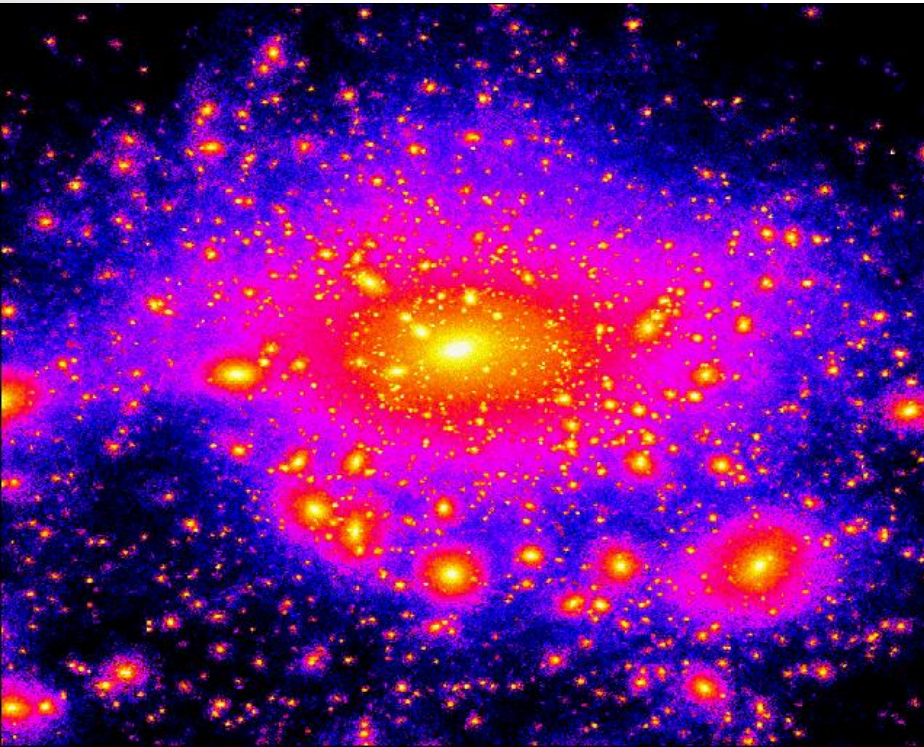
Além da translação, rotação e vibração entre átomos (algumas não vibram)



Energia de uma molécula

$$\varepsilon = \frac{1}{2}mv^2 + E_{rot} + E_{vibr} = \frac{1}{2}mv^2 + \left[\frac{1}{2}I_y\omega_y + \frac{1}{2}I_z\omega_z\right] + \left\{\frac{1}{2}\mu\dot{\Delta x}^2 + \frac{1}{2}C\Delta x^2\right\}$$

Matéria gasosa sob ação de forças gravitacionais (não trataremos!)



No espaço interplanetário



Pouco acima da superfície
do planeta Terra

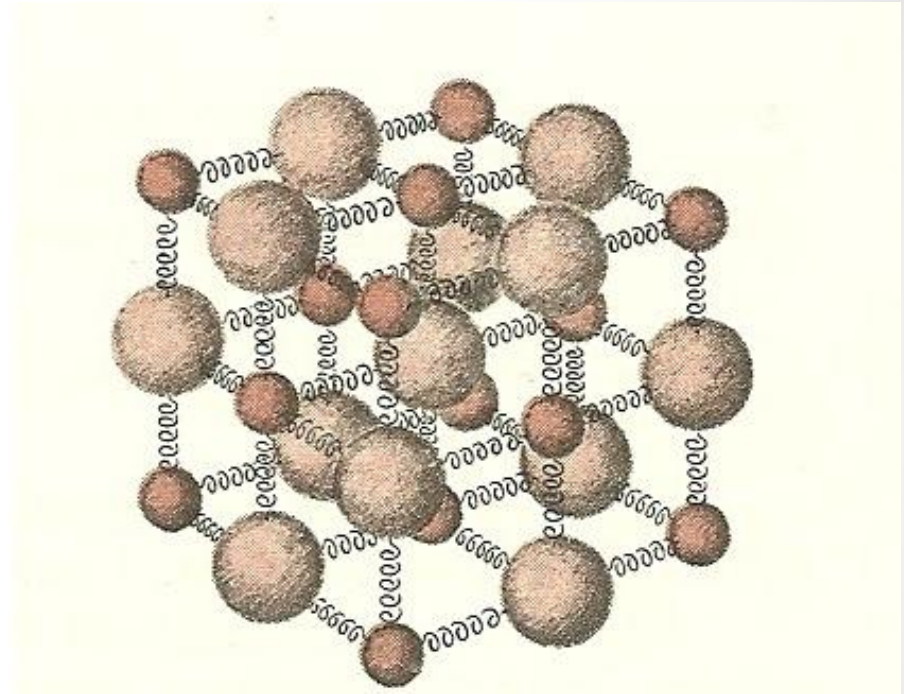
Um modelo de matéria sólida cristalina

os constituintes interagem com os vizinhos mais próximos com interação elástica

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

Energias de cada constituinte dos sólidos:

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



Ludwig Eduard Boltzmann

(1844 - 1906)- físico austríaco

Criador da teoria da
Mecânica Estatística



Ludwig Eduard Boltzmann

(1844 - 1906) - físico austríaco



Hipóteses e Bases da teoria: Mecânica Estatística Clássica (Maxwell e Boltzmann)

1. Um sistema de muitas (N) partículas (ou conjunto de partículas) com energias mecânicas ε tem uma distribuição no **espaço de fase** (coordenada espacial versus sua derivada) muito mais provável do que as demais no equilíbrio termodinâmico (T). Essa distribuição mais provável define um estado termodinâmico.
2. Cada constituinte do sistema está em um **estado físico bem definido permitido pelas leis de Newton no espaço de fase**, ou seja, **tem solução determinística**, embora o número de partículas impeça essa determinação. **O uso da mecânica estatística visa trazer informações sobre o sistema físico de muitas partículas em movimentos determinísticos.**

Hipóteses e Bases da teoria: Mecânica Estatística Clássica

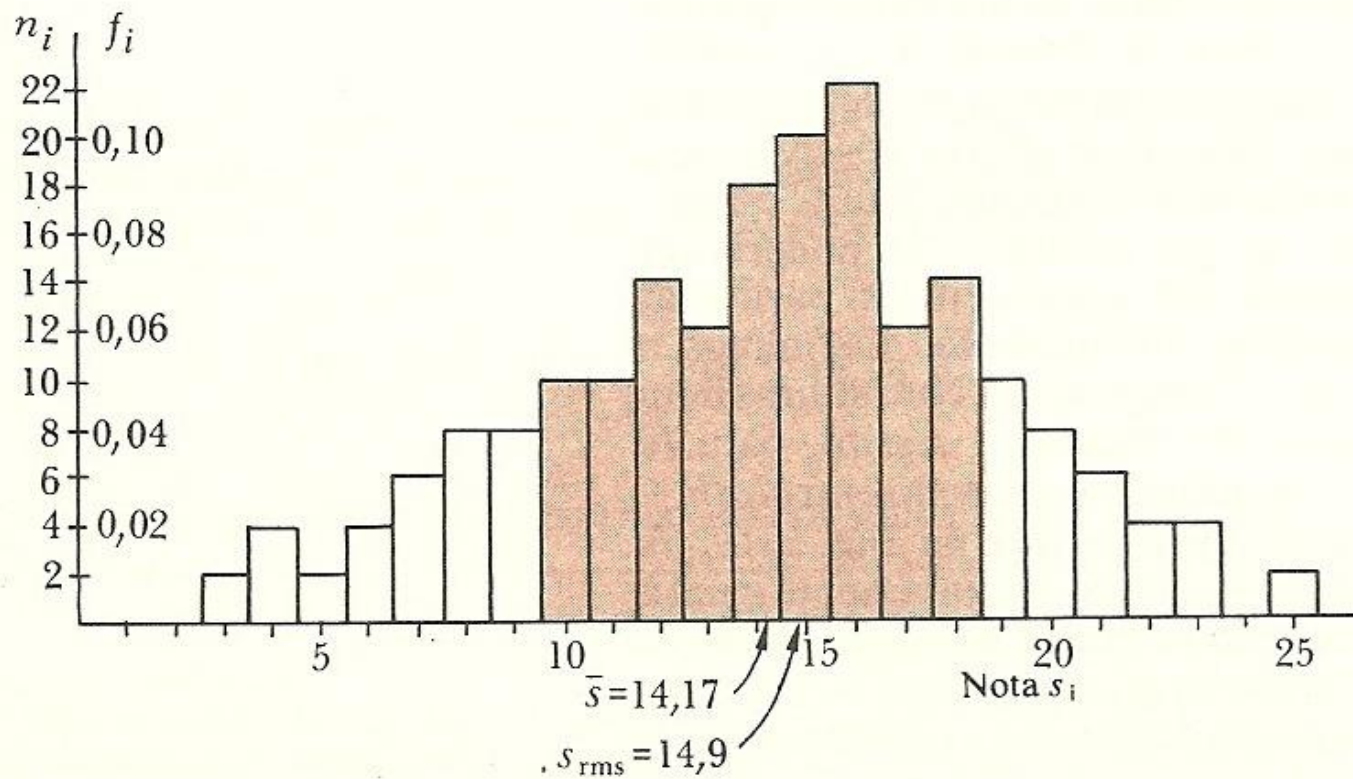
- **3.** Todos os estados físicos permitidos são igualmente prováveis, ou seja, o fato de haver um constituinte em um dado estado físico não inibe e nem facilita a existência de outro em estado idêntico ou “infinitesimamente” próximo.
- **4. A energia termodinâmica é a soma de todas as formas de energia dos constituintes.**

Interpretações da teoria: Mecânica Estatística Clássica – o experimento valida

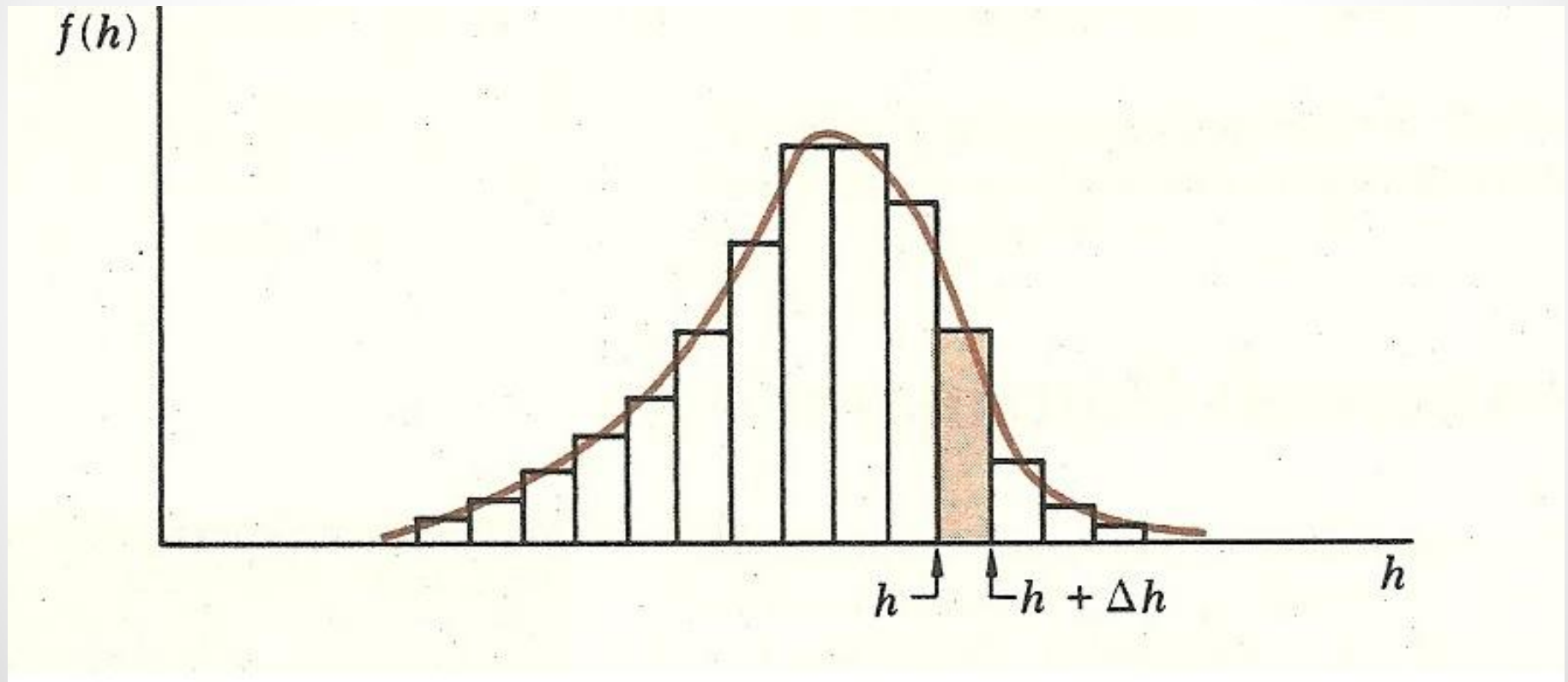
- 1. Como a energia possível para os constituintes puntiformes livre de forças, ou seja, gás de moléculas monoatômicas a baixas temperaturas é a energia cinética, o calor específico molar a volume constante desse gases é o menor possível. E como nos experimentos o valor é $3R/2$, isso implica que a energia de um mol deve ser $3kT/2$.
- 2. O fato acima é compatível com **a interpretação de que a temperatura é proporcional à média da energia cinética dos constituintes em qualquer material :**

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

Conceito matemático de distribuição de grandeza discreta (histograma) - nota de 200 alunos



Função distribuição normalizada da altura dos brasileiros (aproximada para contínua)



Distinga função matemática de distribuição matemática

Teorema de Boltzmann

Em palavras no caso de distribuição de partículas: a função distribuição é a fração de partículas na posição $\vec{r} = (x, y, z)$ dentro do volume $dV = dxdydz$ e com velocidade $\vec{v} = (v_x, v_y, v_z)$ dentro do volume de velocidades $d\vec{v} = dv_x dv_y dv_z$ por unidade de volume dV e de velocidade $d\vec{v}$.

Observação: As palavras valem para quaisquer coordenadas generalizadas e suas derivadas (espaço de configurações).

Demonstração do teorema: disciplina de mecânica estatística clássica.

Teorema de Boltzmann

Atente às variáveis contínuas da distribuição geral e ao significado físico dela

No caso particular de partículas sem estrutura, onde as coordenadas cartesianas são adotadas (espaço de fase):

$$f(x, y, z, v_x, v_y, v_z) \equiv \frac{1}{N} \frac{dN(x, y, z, v_x, v_y, v_z)}{dx dy dz dv_x dv_y dv_z}$$
$$= A \exp \left(\frac{-\varepsilon(x, y, z, v_x, v_y, v_z)}{kT} \right)$$

$$\iiint_{\substack{\text{todas} \\ \text{posições}}} \iiint_{\substack{\text{todas} \\ \text{velocidades}}} f(x, y, z, v_x, v_y, v_z) dx dy dz dv_x dv_y dv_z = 1$$