

4300375 - Física moderna I

Aula 1 – Introdução ao curso

Introdução à mecânica quântica

"If you think you understand quantum mechanics, you don't understand quantum mechanics"

[Se você pensa que entende a mecânica quântica, você não entende a mecânica quântica]

Richard Feynman, The Character of Physical Law

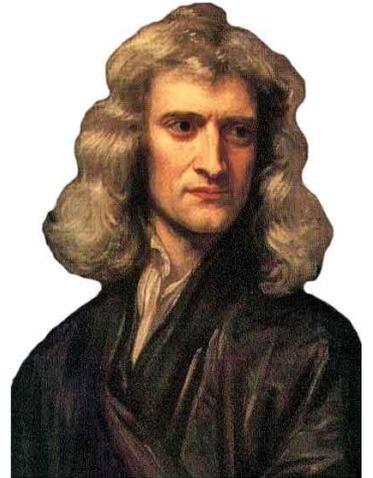
Introdução à mecânica quântica

- A mecânica quântica representa uma **quebra de paradigma** com a **física clássica**;
 - **Rompimento** também ocorreu na forma de se “**fazer física**” até o fim do século XIX;
- A **dualidade onda-partícula** é o rompimento mais drástico de toda a história da física;
- **Para ilustrar** essa quebra de paradigma, nesta aula apresentarei, em linhas bem gerais, **o status da física do ao final do século XIX**, marcadamente, a **influência de Newton** no contexto científico **pré mecânica quântica**;

As leis de Newton e a gravitação universal

Newton viveu durante os séculos XVII e XVIII, mas o seu trabalho **influenciou profundamente a física do século XIX!**

As três leis de Newton eram consideradas como as fundações de toda a física (qualquer teoria nova deveria incluir, ou ao menos ser consistente com as leis de Newton).



As leis de Newton e a gravitação universal

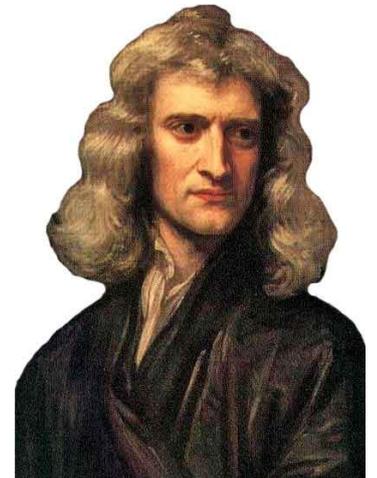
Newton viveu durante os séculos XVII e XVIII, mas o seu trabalho **influenciou profundamente a física do século XIX!**

Lei I: Todo corpo continua em seu estado de repouso ou de movimento uniforme em uma linha reta, a menos que seja forçado a mudar aquele estado por forças aplicadas sobre ele.

Lei II: A mudança de movimento é proporcional à força motora imprimida, e é produzida na direção de linha reta na qual aquela força é aplicada.

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = m\vec{a}$$

Lei III: A toda ação há sempre uma reação oposta e de igual intensidade: as ações mútuas de dois corpos um sobre o outro são sempre iguais e dirigidas em sentidos opostos.



As leis de Newton e a gravitação universal

Newton viveu durante os séculos XVII e XVIII, mas o seu trabalho **influenciou profundamente a física do século XIX!**

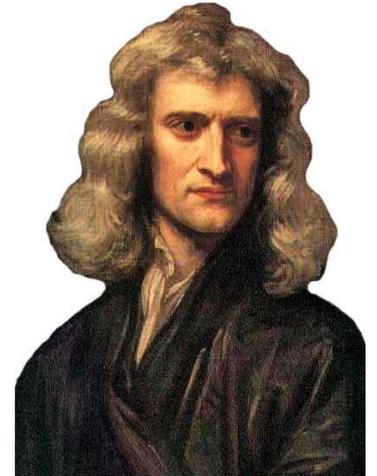
Lei I: Todo corpo continua em seu estado uniforme em uma linha reta, a menos que estado por forças aplicadas sobre ele.

Você sempre conhece a posição e o momento do corpo em questão!

Lei II: A mudança de movimento é proporcional à força motora imprimida, e é produzida na direção de linha reta na qual aquela força é aplicada.

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = m\vec{a}$$

Lei III: A toda ação há sempre uma reação oposta e de igual intensidade: as ações mútuas de dois corpos um sobre o outro são sempre iguais e dirigidas em sentidos opostos.



As leis de Newton e a gravitação universal

Newton viveu durante os séculos XVII e XVIII, mas o seu trabalho **influenciou profundamente a física do século XIX!**

Lei I: Todo corpo continua em seu estado uniforme em uma linha reta, a menos que estado por forças aplicadas sobre ele.

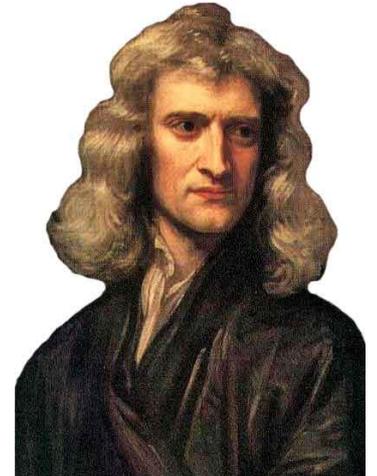
Você sempre conhece a posição e o momento do corpo em questão!

Lei II: A mudança de movimento é proporcional à força motora imprimida, e é produzida na direção de linha reta

Você sabe exatamente o que acontece em cada ponto da trajetória do corpo!

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = m\vec{a}$$

Lei III: A toda ação há sempre uma reação oposta e de igual intensidade: as ações mútuas de dois corpos um sobre o outro são sempre iguais e dirigidas em sentidos opostos.



As leis de Newton e a gravitação universal

Newton viveu durante os séculos XVII e XVIII, mas o seu trabalho **influenciou profundamente a física do século XIX!**

Lei I: Todo corpo continua em seu estado de repouso ou movimento uniforme em uma linha reta, a menos que seja alterado por forças aplicadas sobre ele.

Você sempre conhece a posição e o momento do corpo em questão!

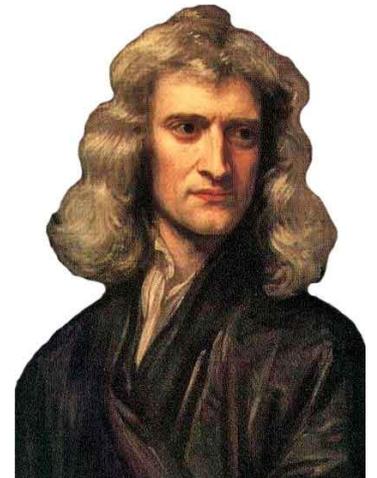
Lei II: A mudança de movimento é proporcional à força motora imprimida, e é produzida na direção de linha reta da força impressa.

Você sabe exatamente o que acontece em cada ponto da trajetória do corpo!

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = m\vec{a}$$

Lei III: A toda ação há sempre uma reação igual e oposta; as ações mútuas de dois corpos são dirigidas em sentidos opostos.

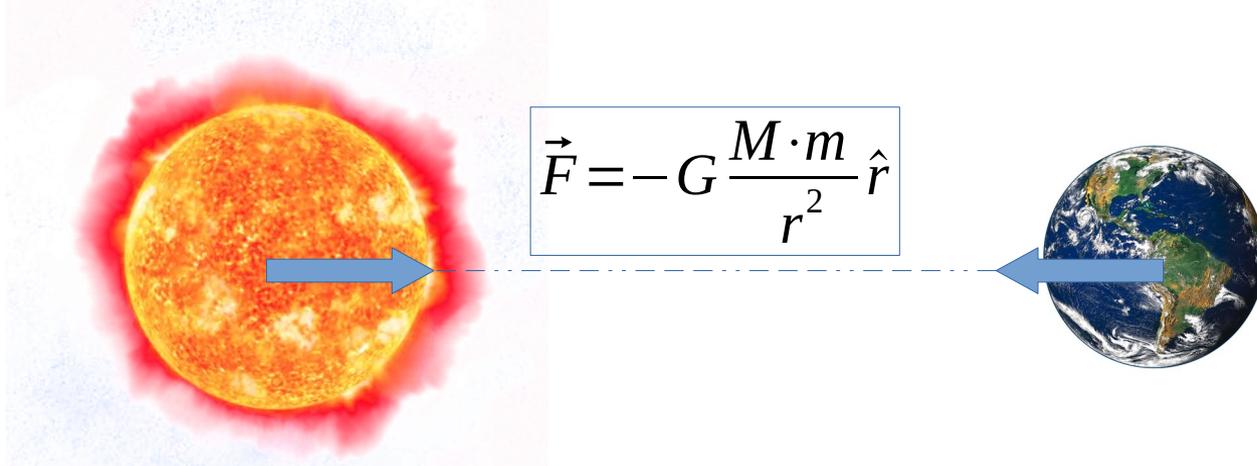
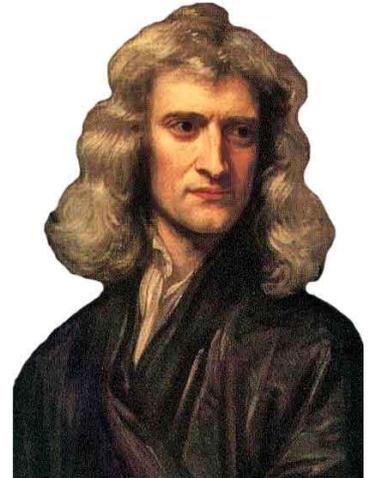
Você identifica e distingue os dois corpos envolvidos, quaisquer que eles sejam!



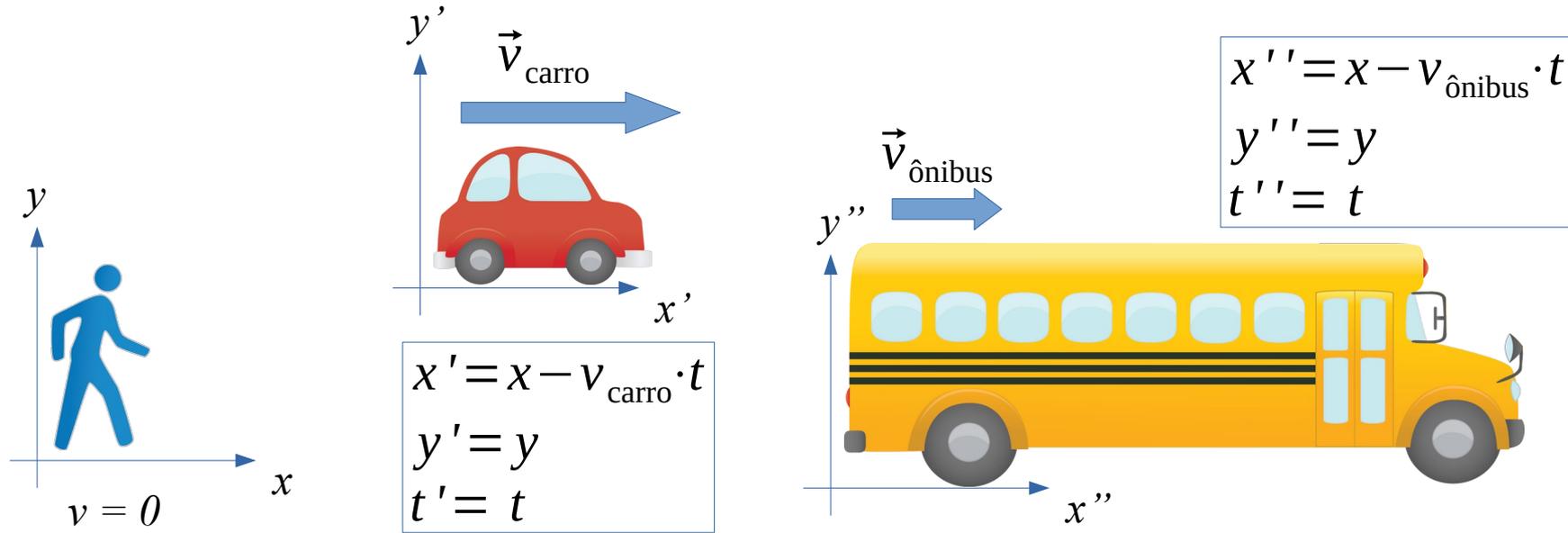
As leis de Newton e a gravitação universal

Newton viveu durante os séculos XVII e XVIII, mas o seu trabalho **influenciou profundamente a física do século XIX!**

A demonstração da **força gravitacional**, baseado no trabalhos de **Kepler**, além de elegante, “**unificou**” a física na Terra e no cosmo.



Relatividade Galileana



As leis fundamentais da Física são as mesmas em todos os sistemas de referência inerciais, isto é, a forma das equações físicas não podem depender do estado de movimento de um observador, uma vez que o movimento é relativo.

Mecânica estatística

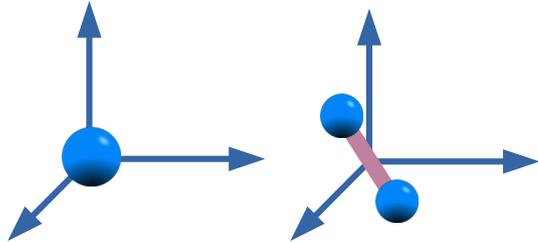
Um dos grandes triunfos da física clássica foi a descrição microscópica da termodinâmica em termos da mecânica Newtoniana!

$$\text{Moléculas a atingirem a parede} = \frac{1}{2} \frac{N}{V} v_x \Delta t A$$

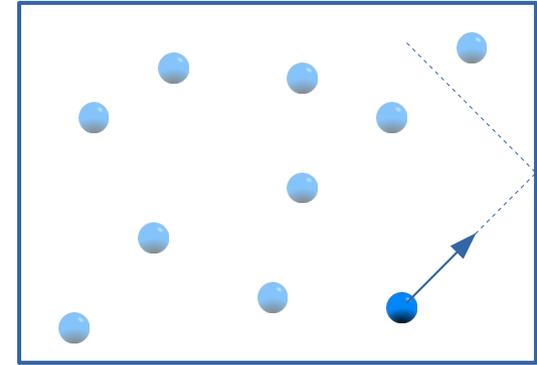
$$|\Delta \vec{p}| = 2 m v_x \times \left(\frac{1}{2} \frac{N}{V} v_x \Delta t A \right) = \frac{N}{V} m v_x^2 \Delta t A$$

$$P = \frac{|\Delta \vec{p}|}{A \Delta t} = \frac{N}{V} m v_x^2$$

$$PV = 2 N \left(\frac{1}{2} m v_x^2 \right)_{\text{médio}} = NkT$$



Calorífico → energia cinética



$$\left\langle \frac{1}{2} m v_x^2 \right\rangle = \frac{1}{2} kT$$

$\frac{1}{2} kT$ = energia média por grau de liberdade...

$$C_V = \frac{3}{2} nR \rightarrow \text{para gases monoatômicos...}$$

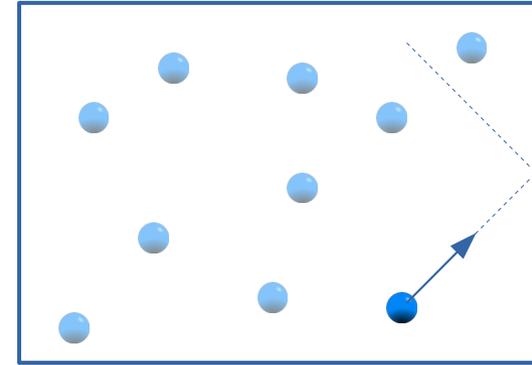
$$C_V = \frac{5}{2} nR \rightarrow \text{para gases diatômicos...}$$

Mecânica estatística

Um dos grandes triunfos da física clássica foi a descrição microscópica da termodinâmica em termos da mecânica Newtoniana!

Gás	C_v / nR
<i>Monoatômico</i>	
He	1,51
Ne	1,52
Ar	1,50
Kr	1,50
Xe	1,51
<i>Diatômico</i>	
N ₂	2,50
H ₂	2,46
O ₂	2,52
CO	2,49

Calorífico → energia cinética



$$\left\langle \frac{1}{2} m v_x^2 \right\rangle = \frac{1}{2} kT$$

$\frac{1}{2} kT$ = energia média por grau de liberdade...

$C_v = \frac{3}{2} nR \rightarrow$ para gases monoatômicos...

$C_v = \frac{5}{2} nR \rightarrow$ para gases diatômicos...

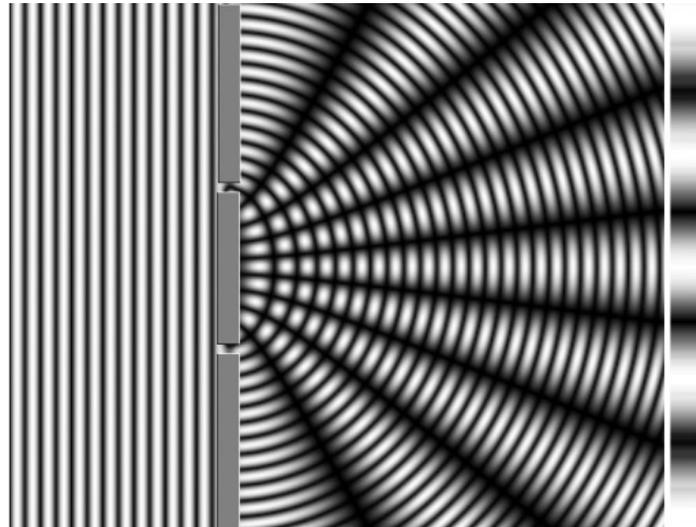
Luz

- Por mais de 100 anos, o conhecimento sobre a luz era sintetizado pelo Optics de Newton.
- Os **trabalhos de Newton foram muito importantes** na área da óptica, principalmente os relacionados à **constituição da luz branca** (Newton demonstrou que a luz branca é uma composição de várias cores);
- Apesar de rigoroso em seus experimentos, **a opção por uma descrição corpuscular foi um tanto arbitrária**, e provavelmente, uma forma de polarizar com Huygens;



Luz

- Em 1801, Young mostrou que a **luz é uma onda** com o experimento de **difração e interferência em fenda dupla**;
- Neste experimento, cada fenda funciona como uma **fonte coerente**;
- Young **resgatou** diversos **conceitos** da teoria de **Huygens**;



alanzucconi.com

Equações de Maxwell

- Maxwell unificou a eletricidade e o magnetismo;
- Das suas equações, previu a **existências das ondas eletromagnéticas**;
 - Heinrich Hertz não só **confirmou a sua existência experimentalmente**, como também **demonstrou que estas ondas tinham as mesmas propriedades da luz** (refração, difração, polarização e interferência);

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \vec{E} &= \frac{\rho}{\epsilon_0} \\ \nabla \cdot \vec{B} &= 0 \\ \nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{B} &= \mu_0 \left(\vec{J} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right)\end{aligned}$$

No vácuo:

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \vec{E} &= 0 \\ \nabla \cdot \vec{B} &= 0 \\ \nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{B} &= \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\nabla^2 \vec{E} &= \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \\ \nabla^2 \vec{B} &= \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2}\end{aligned}$$

$$\nabla^2 u = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$$

Velocidade da luz

A física no fim do século XIX

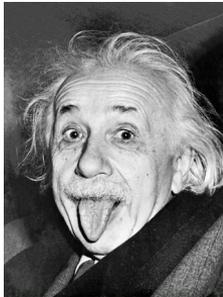
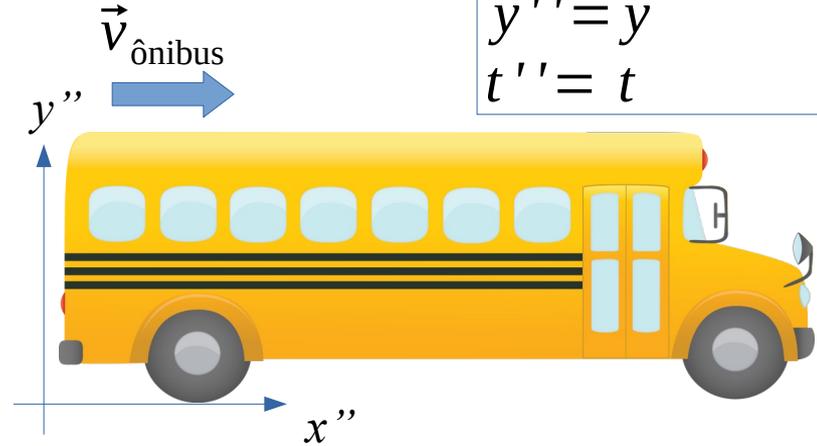
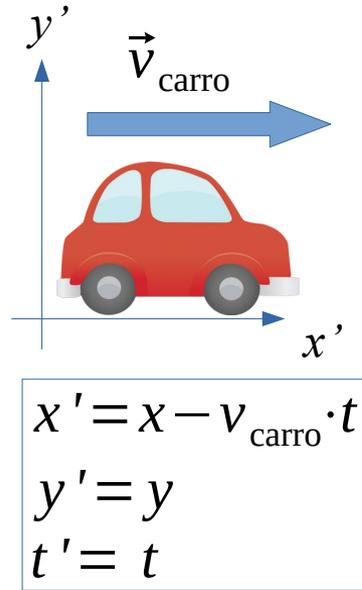
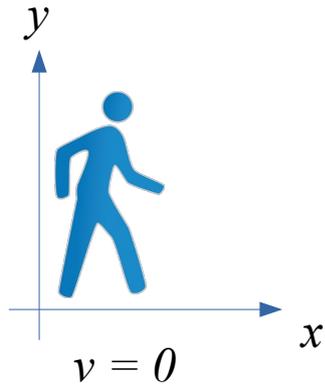
"There is nothing new to be discovered in physics now. All that remains is more and more precise measurements"

[Não há nada novo a ser descoberto em física agora. Todo o que sobrou são medidas mais e mais precisas]

Lord Kelvin, em discurso na British Association for the advancement of Science em 1900.

Relatividade Especial de Einstein

No início do século XX
a relatividade
Galileana foi revista!

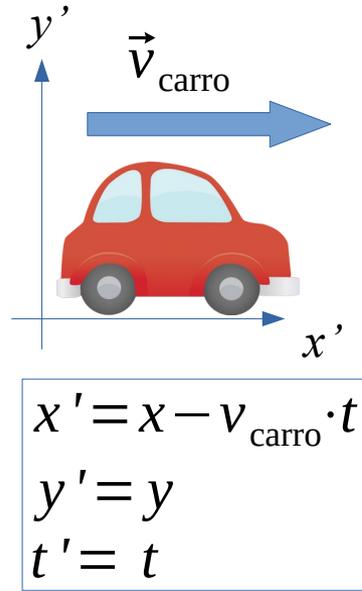
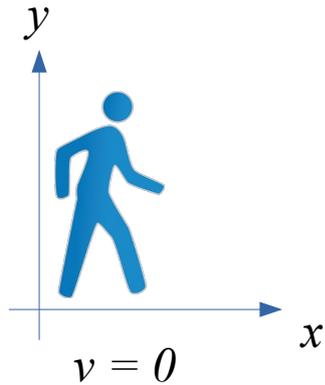


As equações de Maxwell não são as mesmas para todos os referenciais inerciais!

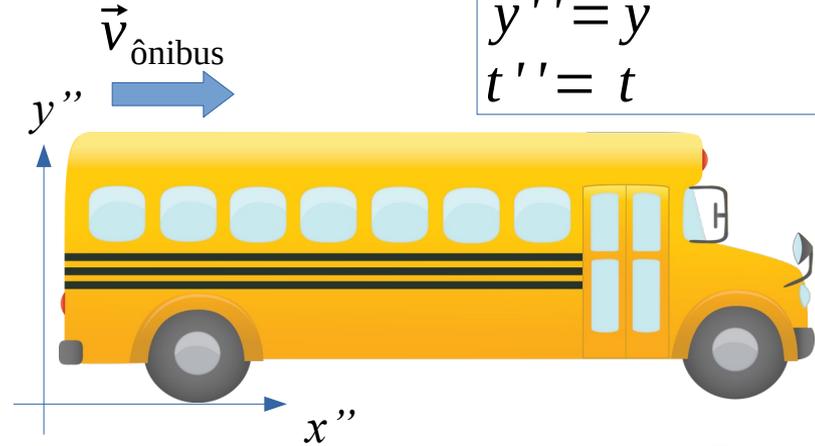
- A própria definição de corrente elétrica envolve o conceito de velocidade que depende do referencial!

Relatividade Especial de Einstein

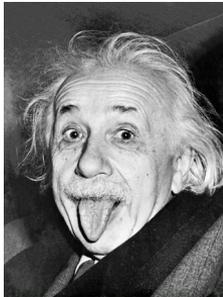
No início do século XX
a relatividade
Galileana foi revista!



$$\begin{aligned}x' &= x - v_{\text{carro}} \cdot t \\y' &= y \\t' &= t\end{aligned}$$



$$\begin{aligned}x'' &= x - v_{\text{ônibus}} \cdot t \\y'' &= y \\t'' &= t\end{aligned}$$



As equações de Maxwell não são as mesmas para todos os referenciais inerciais!

- A equação de onda define uma velocidade única para as ondas eletromagnéticas, mas em que referencial?

Eq. de onda

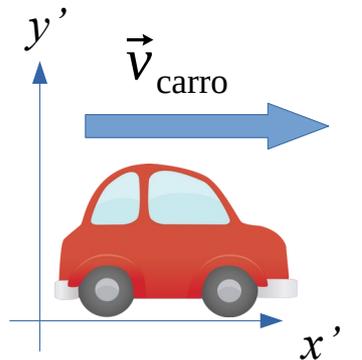
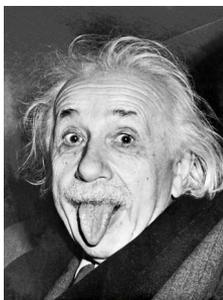
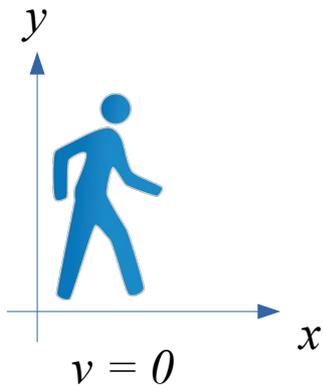
$$\nabla^2 u = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2}$$

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$$

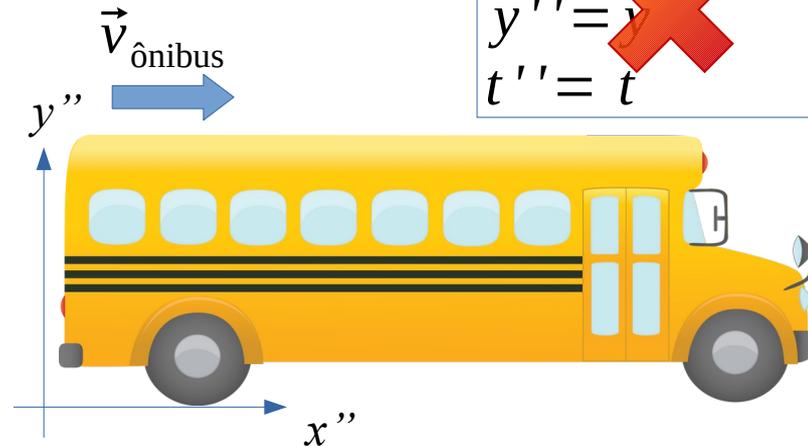
Relatividade Especial de Einstein

No início do século XX
a relatividade
Galileana foi revista!



$$\begin{aligned} x' &= x - v_{\text{carro}} \cdot t \\ y' &= y \\ t' &= t \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x' &= \gamma(x - v_{\text{carro}} t) \\ y' &= y \\ t' &= \gamma(t - v_{\text{carro}} \cdot x/c^2) \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} x'' &= x - v_{\text{ônibus}} \cdot t \\ y'' &= y \\ t'' &= t \end{aligned}$$

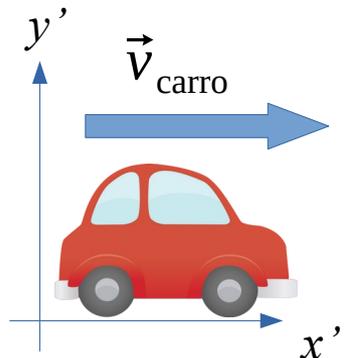
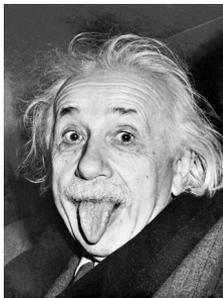
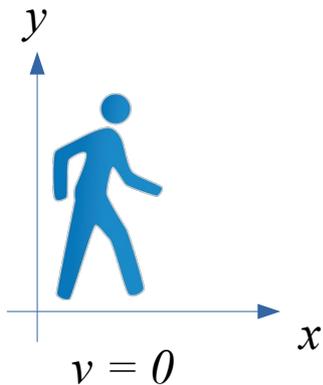
$$\begin{aligned} x'' &= \gamma(x - v_{\text{ônibus}} t) \\ y'' &= y \\ t'' &= \gamma(t - v_{\text{ônibus}} \cdot x/c^2) \end{aligned}$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

As transformações de Lorentz são tais que as Equações de Maxwell seja independentes do referencial inercial!

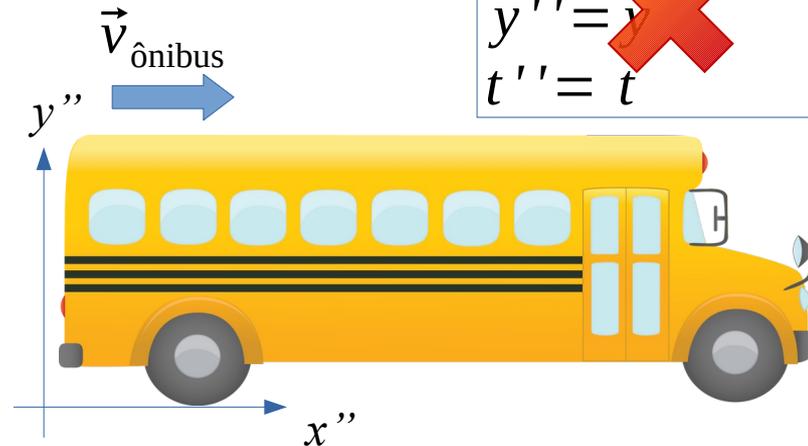
Relatividade Especial de Einstein

No início do século XX
a relatividade
Galileana foi revista!



$$\begin{aligned} x' &= x - v_{\text{carro}} \cdot t \\ y' &= y \\ t' &= t \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x' &= \gamma(x - v_{\text{carro}} t) \\ y' &= y \\ t' &= \gamma(t - v_{\text{carro}} \cdot x/c^2) \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} x'' &= x - v_{\text{ônibus}} \cdot t \\ y'' &= y \\ t'' &= t \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x'' &= \gamma(x - v_{\text{ônibus}} t) \\ y'' &= y \\ t'' &= \gamma(t - v_{\text{ônibus}} \cdot x/c^2) \end{aligned}$$

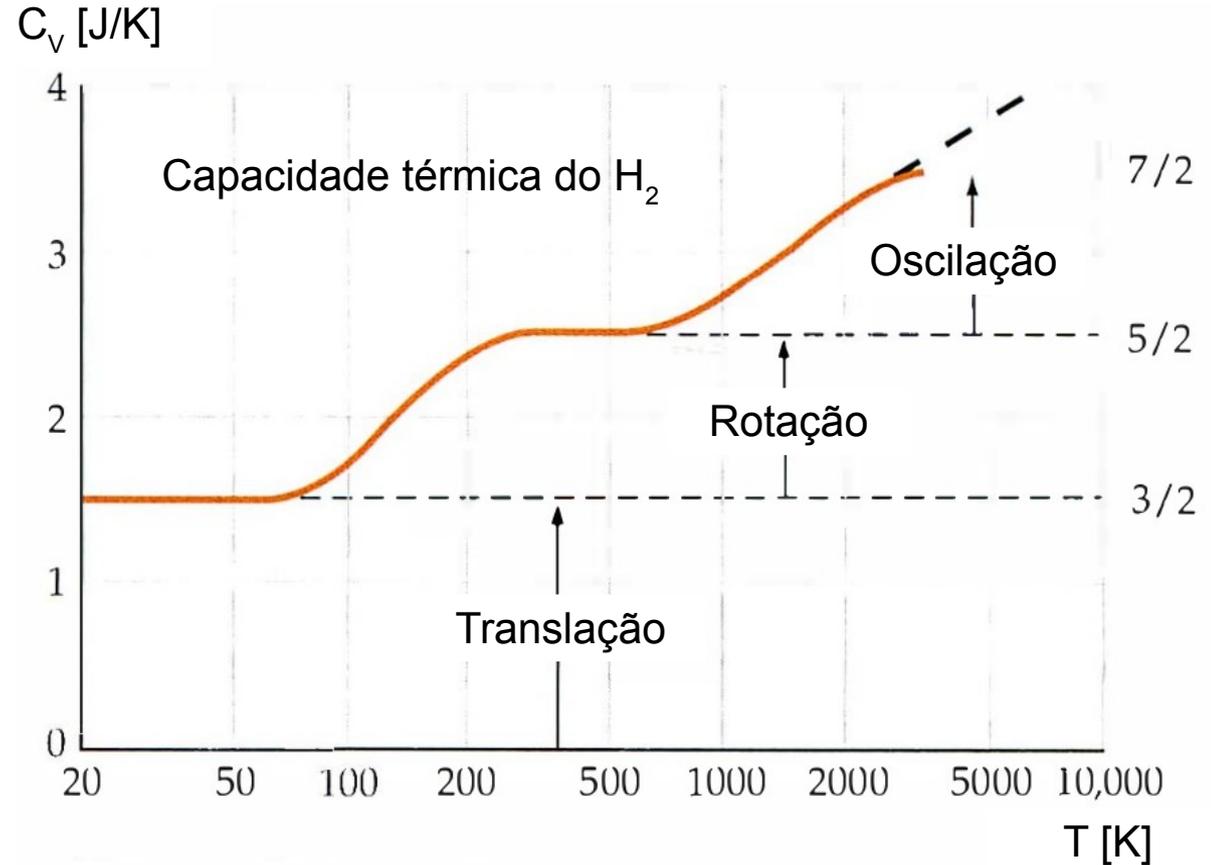
$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Um subproduto muito importante da relatividade especial de Einstein é a equivalência massa-energia:

$$E = mc^2$$

Mecânica estatística

- O **sucesso da mecânica clássica** para explicar microscopicamente os fenômenos termodinâmicos se mostrou **limitado**;
- Efeitos da **quantização da energia** não podiam ser explicados pela mecânica Newtoniana!



Espectros de emissão de radiação

- Espectros de emissão e de absorção de radiação por materiais;
- Espectro de emissão discreto, e absorção em raias específicas não pode ser explicado com a física clássica;

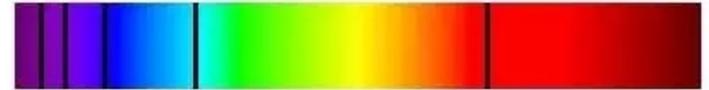
Fórmula empírica de Rydberg:

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

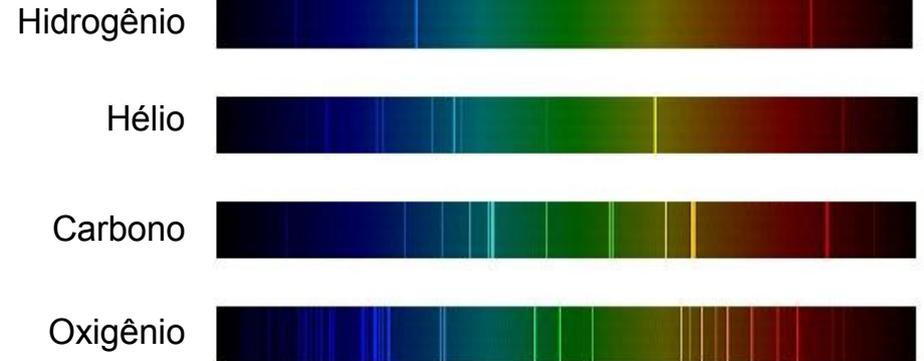
$$R_H = 1,1 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$$

n1	n2	Nome
1	2 → ∞	Série de Lyman
2	3 → ∞	Série de Balmer
3	4 → ∞	Série de Paschen

Espectro de absorção do Hidrogênio

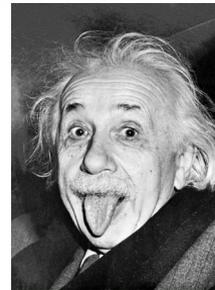
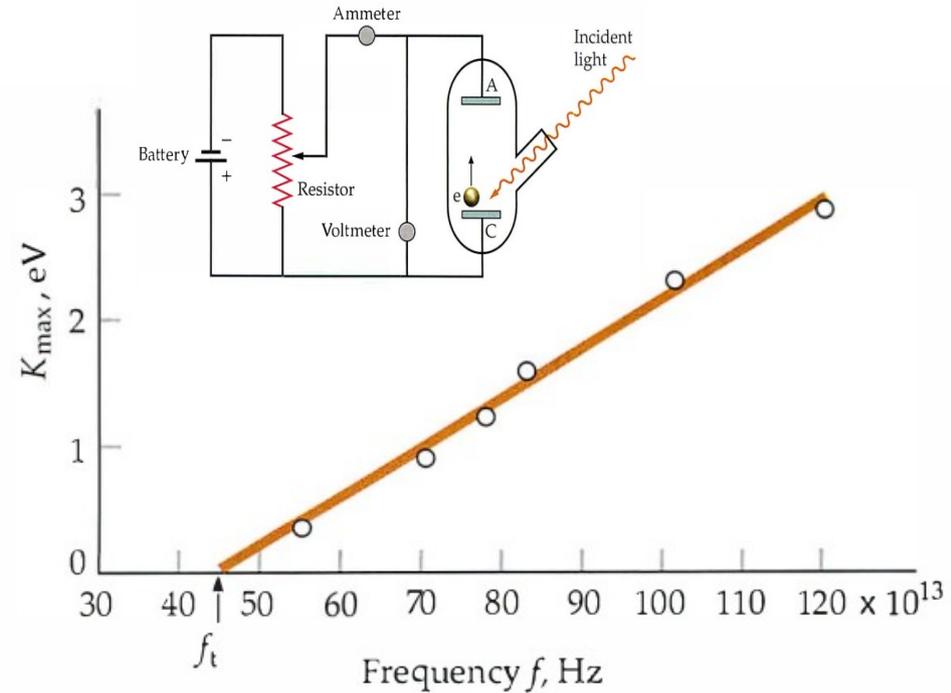


Espectro de emissão do Hidrogênio



O efeito fotoelétrico

- Era conhecido, porém inexplicado, o **efeito de emissão de elétrons pela incidência de luz na superfície de metais**;
- O problema não era a emissão em si, mas a forma como ela ocorre:
 - Existência de uma **frequência de corte**;
 - A emissão ou não depende da frequência, e **não da intensidade**;
 - A **energia cinética** dos elétrons ejetados **depende da frequência, não da intensidade**;

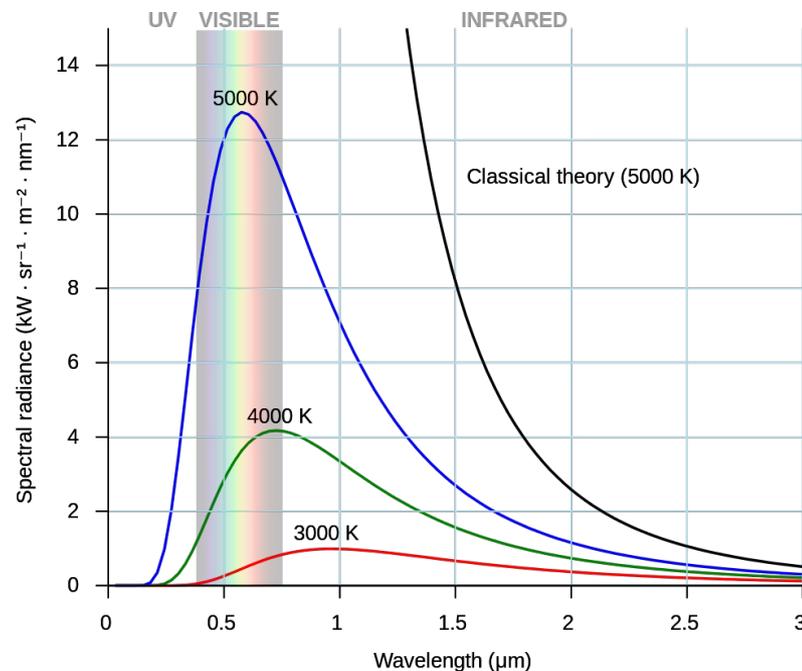


Einstein choca a comunidade científica propondo uma explicação que supõem um **caráter corpuscular para a luz**.

A radiação de corpo negro

- Um **evento chave** para o início da mecânica quântica foi a **tentativa de explicar** o espectro de emissão de radiação térmica, conhecida como **radiação de corpo negro**;
- Neste caso, a **física clássica falha miseravelmente**;
- **Max Planck** foi o físico que tentou explicar o espectro de emissão utilizando um **artifício matemático**, que mudou a história da humanidade:

$$E = h \nu$$



Sumário

- Ao fim do século XIX, físicos eram bem confiantes do conhecimento acumulado até então;
- No **começo do século XX** ocorreu uma **revolução na física**, liderada por figuras como Einstein, Planck, Bohr, Heisenberg, Schrödinger, Rutherford, etc.
- Novos fenômenos (radiação do corpo negro, efeito fotoelétrico, efeito Compton, etc.) lançaram **suspeitas sobre a física clássica e sua capacidade de descrever estes fenômenos**;
- **Este curso é sobre uma introdução a uma mecânica dual onda-corpúsculo, onde vamos estudar as consequências do postulado de de Broglie (dualidade onda-partícula) e algumas soluções da equação de Schrödinger**;

Próxima aula...

- Radiação de corpo negro:
 - Definição de radiação de corpo negro;
 - A física clássica e a catástrofe do ultravioleta;
 - A suposição de Planck;
 - Uma nova perspectiva sobre a radiação de corpo negro;