



INSTITUTO DE FÍSICA
Universidade Federal Fluminense

Disciplina: Física IV – Física Moderna

Instrutor: Prof. Carlos Eduardo Souza - Cadu

Sala: A2-15 (IF, andar 1P)

Email: carlooseduardosouza@id.uff.br

Site do curso: http://cursos.if.uff.br/fisicaIV_XXI_0216/



Panorama da Disciplina:

As duas nuvens de Lord Kelvin...

No clima de virada do século XIX para o século XX, em uma conferência em abril de 1900, Lord Kelvin, partidário da visão mecanicista, afirmou que no Céu Azul da Física Clássica só existiam duas nuvens: *o problema da não detecção do Éter* e *o problema da partição da Energia*.



Disciplina: Física IV – Física Moderna

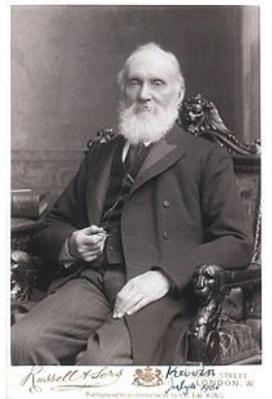
Panorama da Disciplina:

As duas nuvens de **Lord Kelvin**...

**William Thomson,
1º barão Kelvin**

A Escala Kelvin tem esse
nome em sua
homenagem...

créditos: wikipedia





Disciplina: Física IV – Física Moderna

Panorama da Disciplina:

As duas nuvens de Lord Kelvin...

No clima de virada do século XIX para o século XX, em uma conferência em abril de 1900, Lord Kelvin, partidário da visão mecanicista, afirmou que no Céu Azul da Física Clássica só existiam duas nuvens: *o problema da não detecção do Éter* e *o problema da partição da Energia*.

A dissipação dessas núvens foi o ponto de partida para a mudança radical de conceitos da Física, resultando na Criação das **Físicas Quântica e Relativísticas**, abrindo portas a uma nova era tecnológica que mudou radicalmente a sociedade.



Disciplina: Física IV – Física Moderna

Panorama da Disciplina:

Estudaremos, nesta sequência:

- **Teoria da Relatividade**
- **Mecânica Quântica**
- **Física Atômica, Nuclear e Sistemas Semicondutores**
(Este último podendo ser considerado como duas das aplicações dos dois tópicos anteriores)



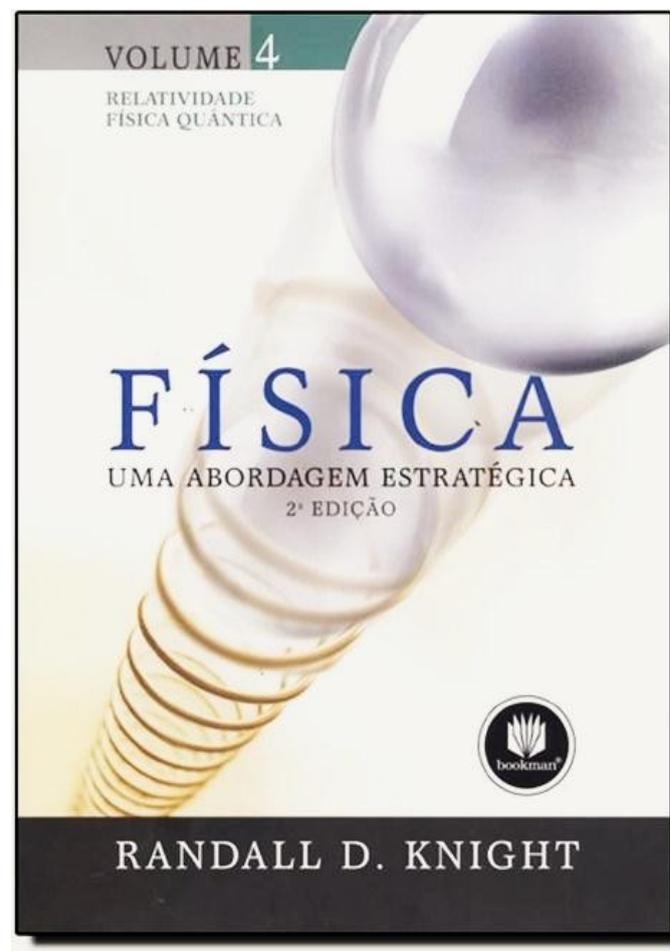
INSTITUTO DE FÍSICA
Universidade Federal Fluminense

Disciplina: Física IV – Física Moderna

Livro-texto principal:

“Física, uma abordagem estratégica”, vol. 4
Randall L. Knight

Caps. 37 – 43



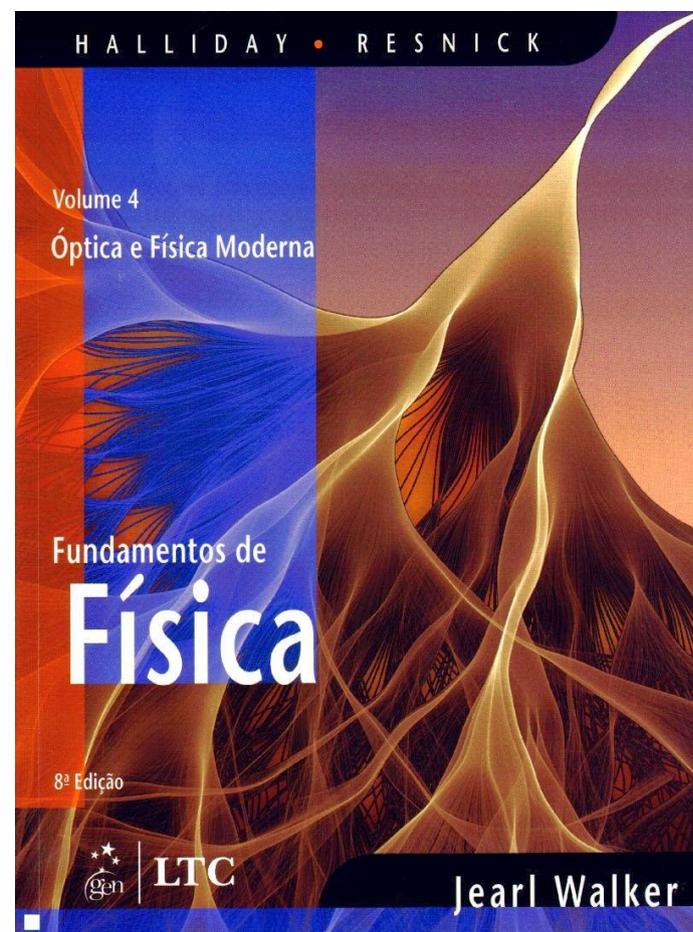


Disciplina: Física IV – Física Moderna

Livro-texto Secundário: (Bibliografia base para última parte desta disciplina)

“Fundamentos de Física, vol. 4”, 8a ed.
Halliday, Resnick e Walker

caps. 41 e 43





Avaliação:

- **Provas (3)** – 15 questões de Múltipla Escolha*
- **Minitestes (??)** - Problema a ser resolvido em 20min, durante a aula
- **Testes Online (??)** - Teste de Leitura Prévia, realizado antes da aula.

$$\begin{aligned} \text{Nota Final} = & \{\text{MédiaProvas}\} \cdot 0,85 + \\ & + \{\text{MédiaMinitestes}\} \cdot 0,10 + \\ & + \{\text{MédiaTestesOnline}\} \cdot 0,05 \end{aligned}$$

* Haverá questões de caráter numérico que deverão ser adequadamente resolvidas. A solução inadequada implicará em anulação das mesmas.



Disciplina: Física IV – Física Moderna

Cronograma:

Legenda:

	-> Não haverá aula
	-> Provas
	-> Miniteste

Atenção:

VR* -> 09/01/2017 às 14h

	Seg.	Ter.	Qua.	Qui	Sex	Sab.
Setembro	29	30	31	1	2	3
	5	6	7	8	9	10
	12	13	14	15	16	17
	19	20	21	22	23	24
	26	27	28	29	30	1
Outubro	3	4	5	6	7	8
	10	11	12	13	14	15
	17	18	19	20	21	22
	24	25	26	27	28	29
Novembro	31	1	2	3	4	5
	7	8	9	10	11	12
	14	15	16	17	18	19
	21	22	23	24	25	26
Dezembro	28	29	30	1	2	3
	5	6	7	8	9	10
	12	13	14	15	16	17
	19	20	21	22	23	24
	26	27	28	29	30	31
Janeiro	2	3	4	5	6	7
	9 (VR*)	10	11	12	13	14 (VS)

Tópicos

Feriado

P1 (08/10)

Relatividade
O fim da física clássica
Quantização

Feriado

Recesso

P2 (26/11)

Funções de onda e incerteza
Mecânica Quântica Unidimensional
Física atômica

Feriado

Feriado

P3 (07/01)

Física nuclear
Condução elétrica nos sólidos (Halliday)

Recesso

Recesso

Recesso



Disciplina: Física IV – Física Moderna

Cronograma:

	Seg.	Ter.	Qua.	Qui	Sex	Sab.
Setembro	29	30	31	1	2	3
	5	6	7	8	9	10
	12	13	14	15	16	17
	19	20	21	22	23	24
	26	27	28	29	30	1
Outubro	3	4	5	6	7	8
	10	11	12	13	14	15
	17	18	19	20	21	22
	24	25	26	27	28	29
Novembro	31	1	2	3	4	5
	7	8	9	10	11	12
	14	15	16	17	18	19
	21	22	23	24	25	26
Dezembro	28	29	30	1	2	3
	5	6	7	8	9	10
	12	13	14	15	16	17
	19	20	21	22	23	24
	26	27	28	29	30	31
Janeiro	2	3	4	5	6	7
	9 (VR*)	10	11	12	13	14 (VS)

Tópicos

Feriado

P1 (08/10)

(às 8h)

Feriado

P2 (26/11)

Recesso

(às 8h)

Feriado

P3 (07/01)

Feriado

(às 8h)

Recesso

Recesso

Recesso

Atenção:

VR* -> 09/01/2017 às 14h



Panorama da Disciplina:

- **Teoria da Relatividade**
- **Mecânica Quântica**
- **Física Atômica, Nuclear e Sistemas Semicondutores**
(Este último podendo ser considerado como duas das aplicações dos dois tópicos anteriores)



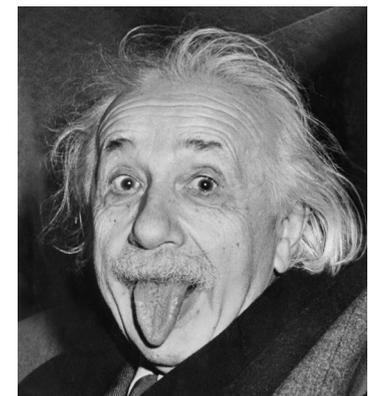
Teoria da Relatividade

Principais aplicações tecnológicas:

- GPS
- Energia Nuclear
- Tomografia por emissão de pósitrons

A. Einstein
(1879 – 1955)

créditos: wikipedia





Teoria da Relatividade

A Relatividade Especial vem pra rediscutir os conceitos de **Espaço e Tempo**, até então, bem estabelecidos e estruturadores de toda a *Física Newtoniana*...

O conteúdo discutido em classe em aula expositiva...



Relatividade de Galileu, versão Newton



1a Lei: existem *referenciais inerciais*, nos quais um corpo que não está sujeito a nenhuma força resultante se move com vel. constante

2a Lei: Em relação a um ref. inercial, vale que

$$\vec{F}_{result} = m\vec{a}$$

O Princípio da Relatividade de Galileu,
versão de Newton:

“As leis da mecânica são iguais em relação a qualquer referencial inercial”



Relatividade de Galileu, versão Newton



1a Lei: existem *referenciais inerciais*, nos quais um corpo que não está sujeito a nenhuma força resultante se move com vel. constante

2a Lei: Em relação a um ref. inercial, vale que

$$\vec{F}_{result} = m\vec{a}$$

O Princípio da Relatividade de Galileu,
versão de Newton:

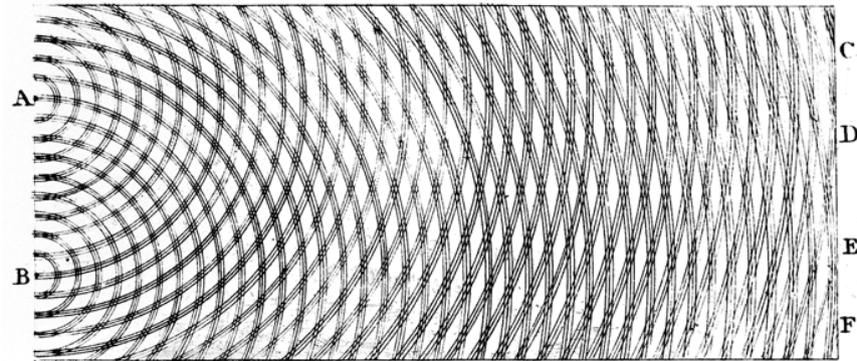
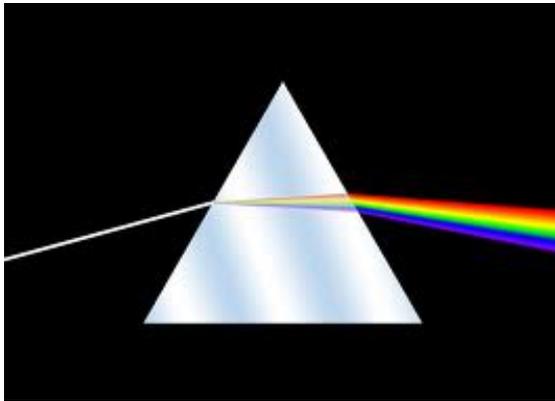
“As leis da mecânica são iguais em relação a qualquer referencial inercial”



E a luz?

Newton: acreditava que a luz era feita de *partículas*.

No início do séc XIX: descobre-se que a luz é uma *onda*, pois sofre refração, difração, interferência etc.



Meados do séc XIX: eqs de Maxwell descrevem todos os fenômenos elétricos, magnéticos e ópticos (unificação).

Prevêem que a luz é de fato uma onda que se desloca com velocidade

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = 3,0 \times 10^8 m/s = 300m/\mu s$$

A pergunta porém é: com relação a que?



O Drama da Física Clássica

Problema com a versão ondulatória: uma onda precisaria de um meio para se propagar. Surge a hipótese do ÉTER...

Propriedades estranhas:

- rígido (para que a luz tenha a velocidade altíssima que tem)
- mas passa por dentro de materiais transparentes !

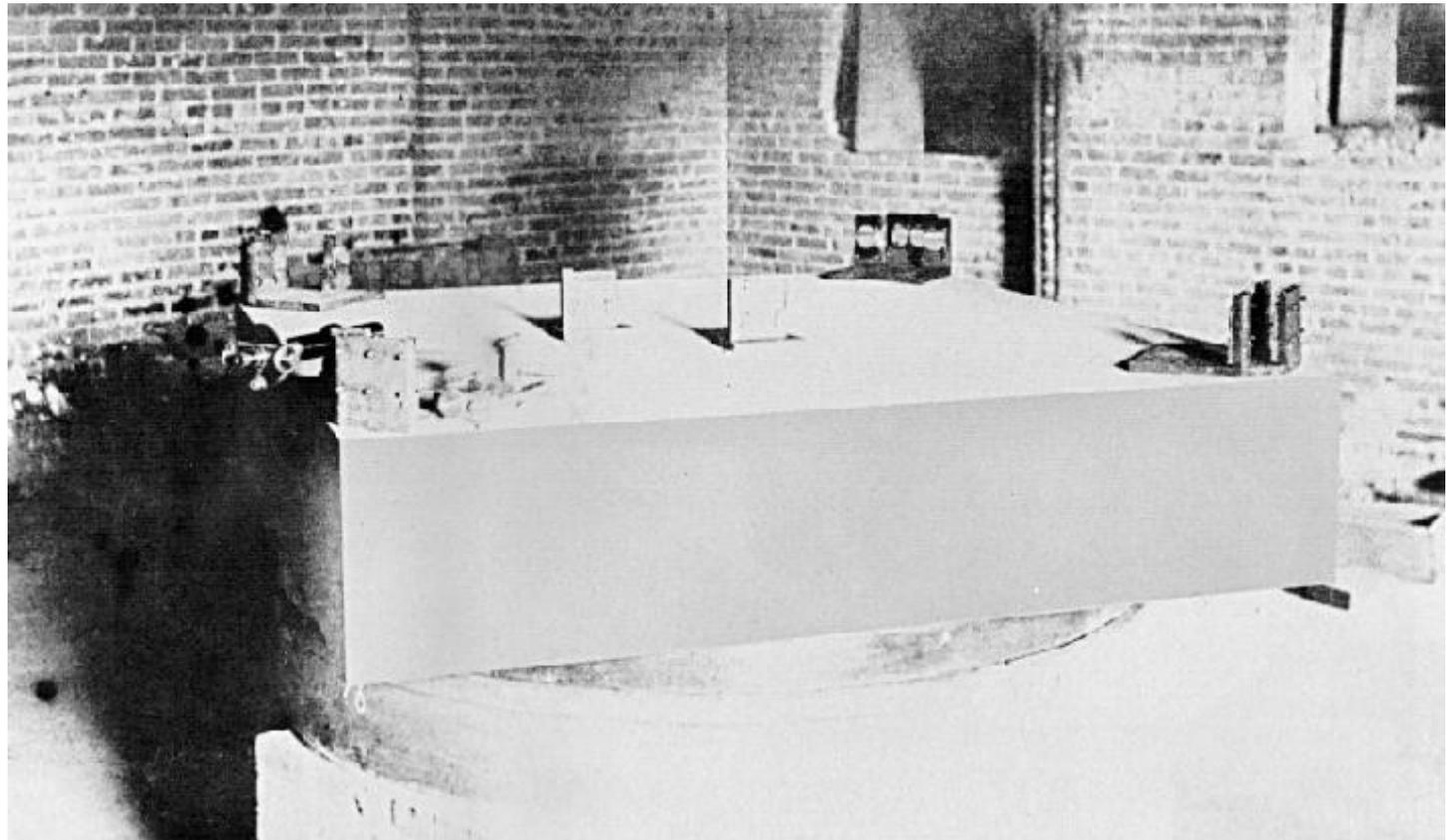
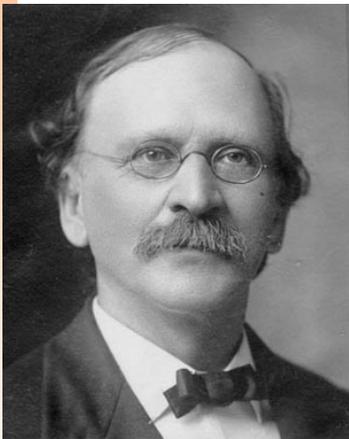
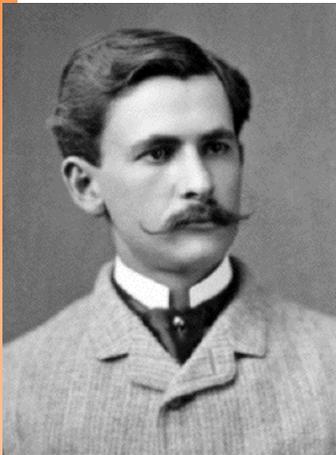
Ideia para testar a hipótese do éter: Caso ele existisse, o movimento da Terra em relação a ele provocaria um “vento”, o que mudaria a velocidade da luz na direção do movimento da Terra, com respeito àquela na direção transversal.



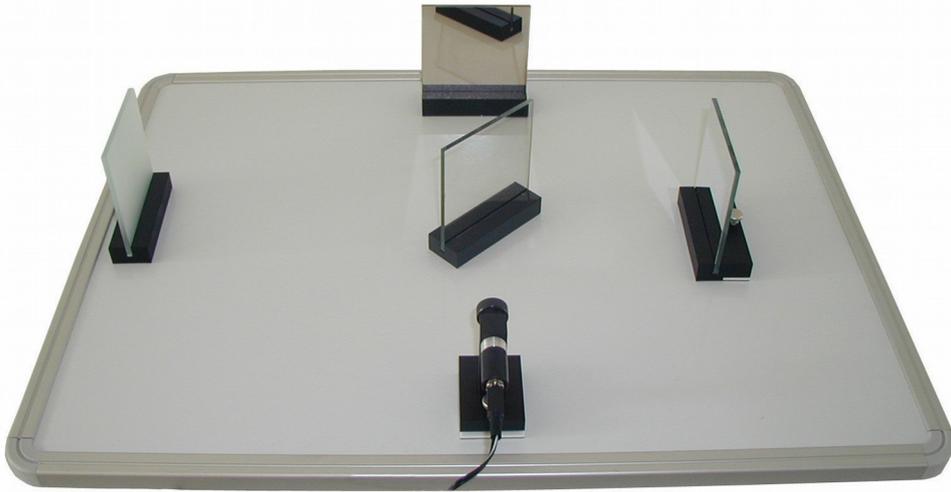
INSTITUTO DE FÍSICA
Universidade Federal Fluminense

Experimento de Michelson e Morley (1887)

Teste experimental feito usando um *interferômetro*:



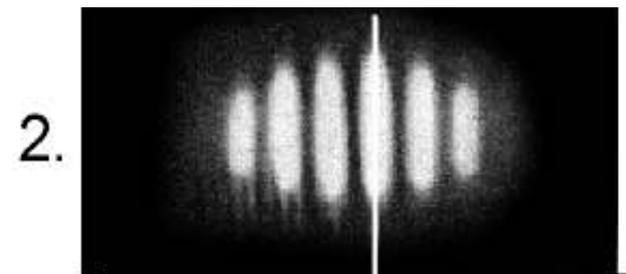
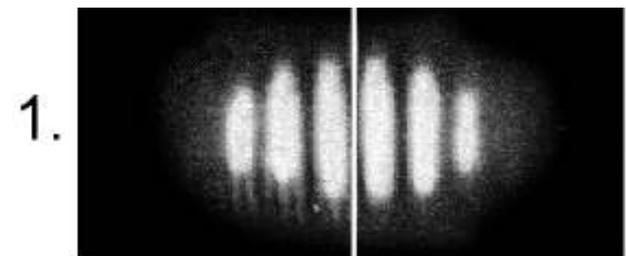
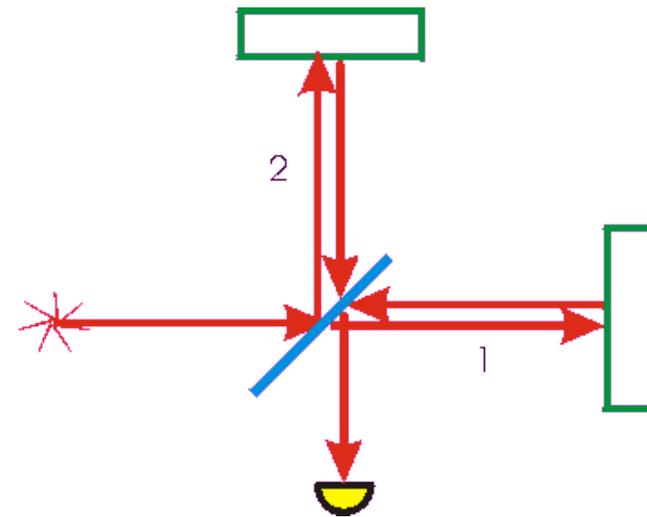
Versão moderna do interferômetro de M & M.



Interferência construtiva ou destrutiva dos dois feixes leva a aparecerem zonas claras e escuras ('franjas') no detector

Caso existisse um éter, as franjas de interferência mudariam de posição ao longo do ano.

Esquema simplificado



Resultado experimental: nenhuma alteração



Einstein entra em cena (1905)

**“Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento”
Annalen der Physik. 1905 v. 17**



Publicado junto a dois outros artigos, um sobre o Movimento Browniano e outro sobre o Efeito Fotoelétrico (por este último Einstein ganhou o Nobel)

*3. Zur Elektrodynamik bewegter Körper;
von A. Einstein.*

Daß die Elektrodynamik Maxwells — wie dieselbe gegenwärtig aufgefaßt zu werden pflegt — in ihrer Anwendung auf bewegte Körper zu Asymmetrien führt, welche den Phänomenen nicht anzuhaften scheinen, ist bekannt. Man denke z. B. an die elektrodynamische Wechselwirkung zwischen einem Magneten und einem Leiter. Das beobachtbare Phänomen hängt hier nur ab von der Relativbewegung von Leiter und Magnet, während nach der üblichen Auffassung die beiden Fälle, daß der eine oder der andere dieser Körper der bewegte sei, streng voneinander zu trennen sind. Bewegt sich nämlich der Magnet und ruht der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten ein elektrisches Feld von gewissem Energiewerte, welches an den Orten, wo sich Teile des Leiters befinden, einen Strom erzeugt. Ruht aber der Magnet und bewegt sich der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten kein elektrisches Feld, dagegen im Leiter eine elektromotorische Kraft, welcher an sich keine Energie entspricht, die aber — Gleichheit der Relativbewegung bei den beiden ins Auge gefaßten Fällen vorausgesetzt — zu elektrischen Strömen von derselben Größe und demselben Verlaufe Veranlassung gibt, wie im ersten Falle die elektrischen Kräfte.

Beispiele ähnlicher Art, sowie die mißlungenen Versuche, eine Bewegung der Erde relativ zum „Lichtmedium“ zu konstatieren, führen zu der Vermutung, daß dem Begriffe der absoluten Ruhe nicht nur in der Mechanik, sondern auch in der Elektrodynamik keine Eigenschaften der Erscheinungen entsprechen, sondern daß vielmehr für alle Koordinatensysteme, für welche die mechanischen Gleichungen gelten, auch die gleichen elektrodynamischen und optischen Gesetze gelten, wie dies für die Größen erster Ordnung bereits erwiesen ist. Wir wollen diese Vermutung (deren Inhalt im folgenden „Prinzip der Relativität“ genannt werden wird) zur Voraussetzung erheben und außerdem die mit ihm nur scheinbar unverträgliche



A Relatividade de Einstein

Solução proposta por Einstein (simples à primeira vista): estender o princípio de Galileu para *todos* os fenômenos físicos, ie, não apenas os mecânicos mas também os eletromagnéticos



O Princípio da Relatividade de Einstein:

“Todas as leis da Física são iguais em relação a qualquer referencial inercial”

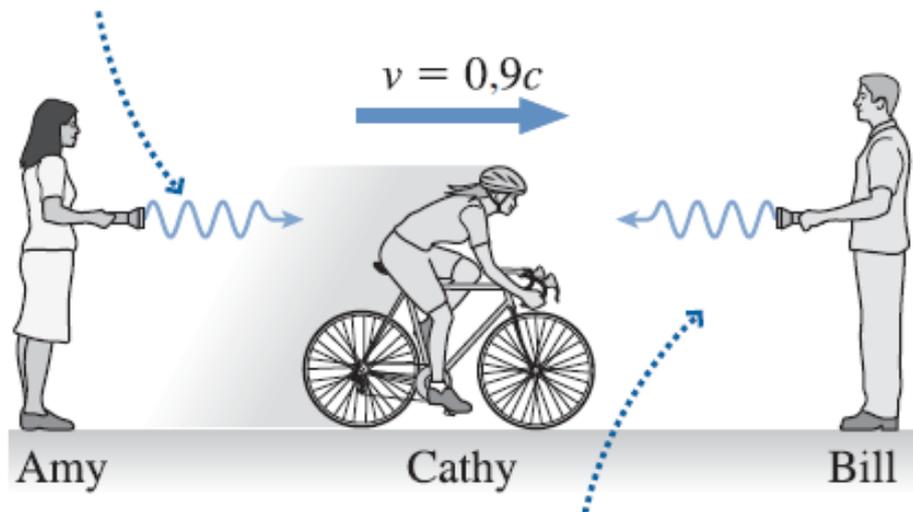


A constância da velocidade da Luz

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = 3,0 \times 10^8 m/s = 300m/\mu s$$

1. Pelo Princípio da Relatividade, as equações de Maxwell valem em todos os referenciais inerciais.
2. As equações de Maxwell preveem que as ondas eletromagnéticas, inclusive a luz, se propagam com velocidade c
3. **Portanto, a luz se propaga com velocidade c em relação a todos os referenciais inerciais!!**

Teste Conceitual

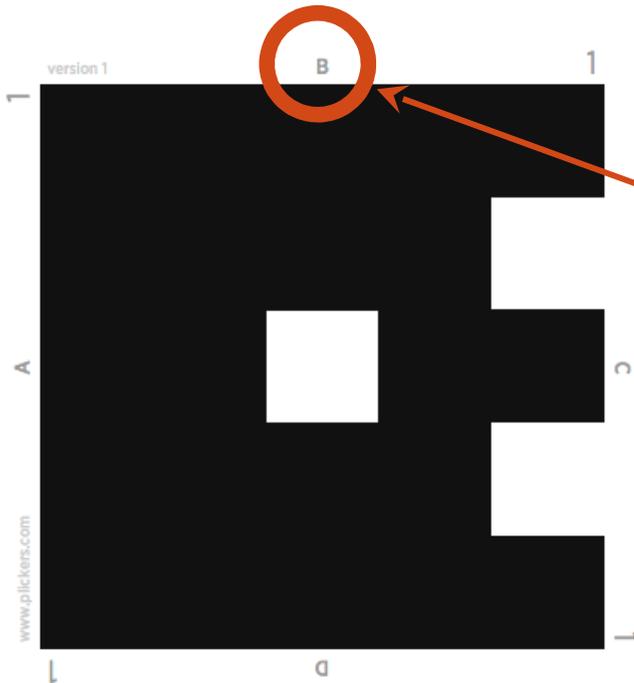


$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = 3,0 \times 10^8 \text{ m/s} = 300 \text{ m}/\mu\text{s}$$

No referencial de Cathy, os feixes de luz provenientes de Amy e Bill se aproximam de Cathy, respectivamente com velocidades

- A) $0,1c$ e $1,9c$
- B) c e c
- C) $1,9c$ e $0,1c$
- D) $1,9c$ e c

Plickers – resposta em tempo real...



- 64 cartões, todos diferentes
- Resposta levantando o cartão com sua resposta virada pra cima
- Letras pequenas de propósito (p/ seu colega não ver sua resposta!)

Eu escaneio a turma usando um aplicativo no celular

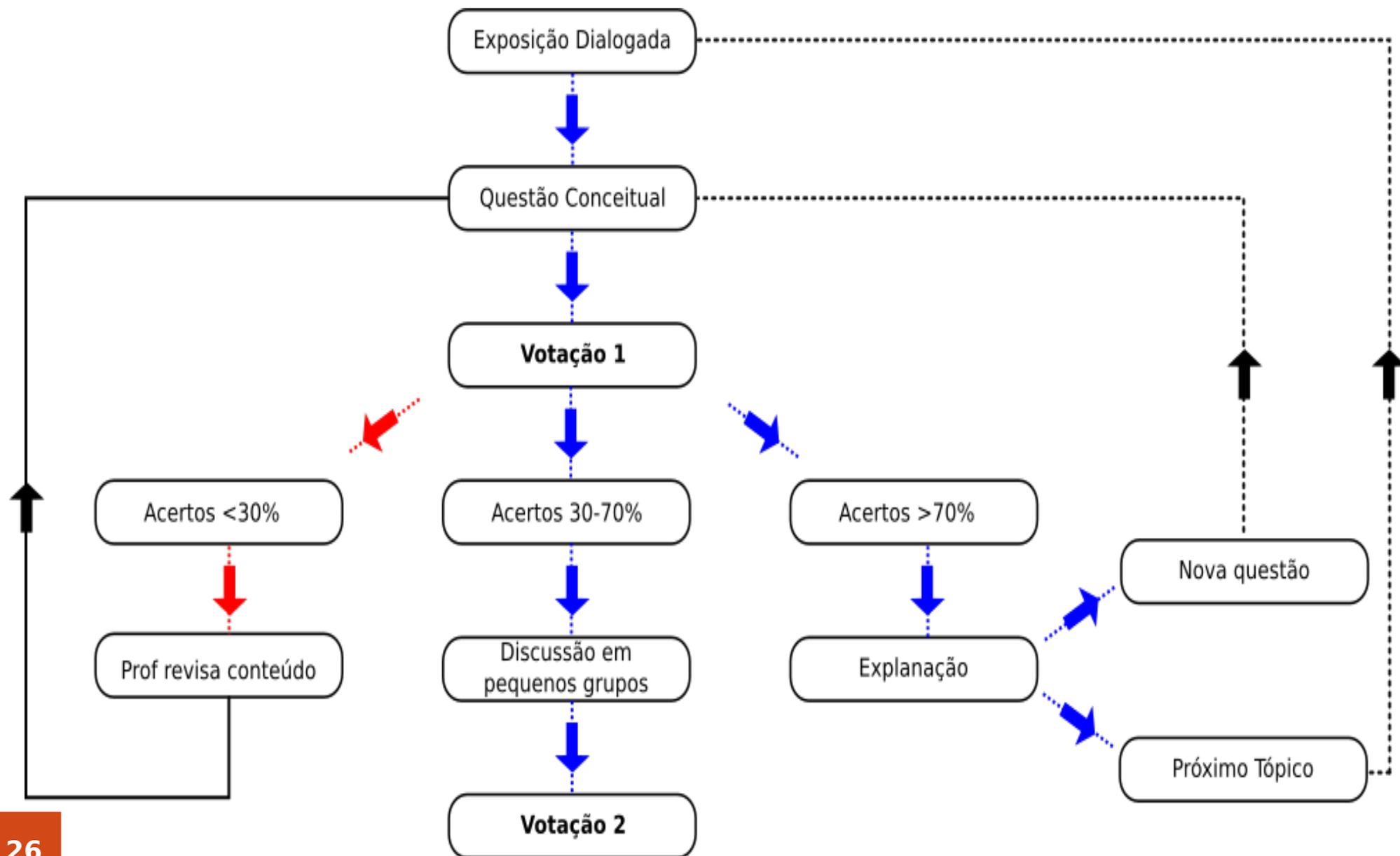


Método do curso: *peer instruction* (*instrução pelos colegas*)

Funcionam assim:

- i) **Eu apresento um problema**, você tem um tempo para pensar, e depois uma votação é feita usando cartões-resposta especiais
- ii) **Você discute com um colega**, cada um tenta convencer o outro de que a sua resposta é a correta
- iii) **Fazemos uma segunda votação**. Se agora a maioria acertar, passamos para o próximo tópico. Se a maioria erra discutimos a resposta correta, e se possível, eu apresento outra questão conceitual sobre o mesmo tema.

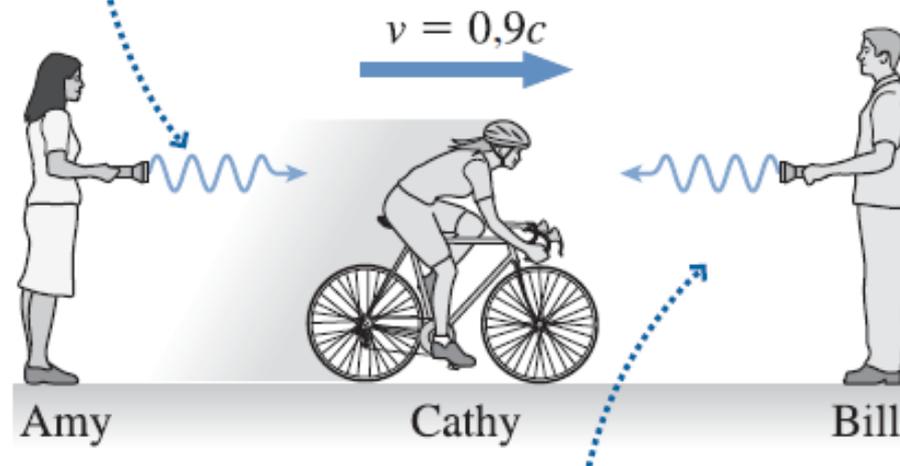
Como faremos:





A constância da velocidade da Luz

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = 3,0 \times 10^8 \text{ m/s} = 300 \text{ m}/\mu\text{s}$$



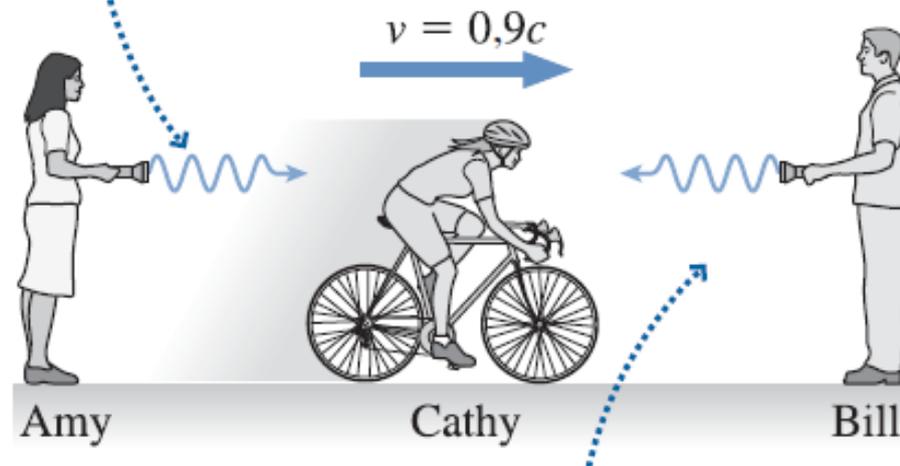
No referencial de Cathy, os feixes de luz provenientes de Amy e Bill se aproximam de Cathy, respectivamente com velocidades

- A) $0,1c$ e $1,9c$
- B) c e c
- C) $1,9c$ e $0,1c$
- D) $1,9c$ e c



A constância da velocidade da Luz

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = 3,0 \times 10^8 \text{ m/s} = 300 \text{ m}/\mu\text{s}$$

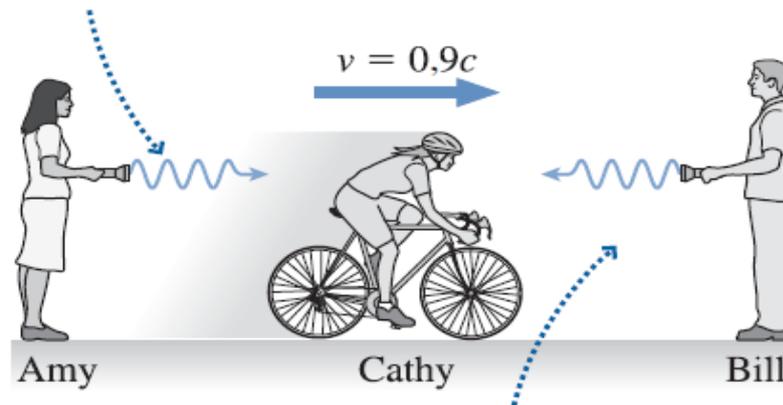


No referencial de Cathy, os feixes de luz provenientes de Amy e Bill se aproximam de Cathy, respectivamente com velocidades

- A) $0,1c$ e $1,9c$
- B) c e c
- C) $1,9c$ e $0,1c$
- D) $1,9c$ e c

A constância da velocidade da Luz

Teste Conceitual 1

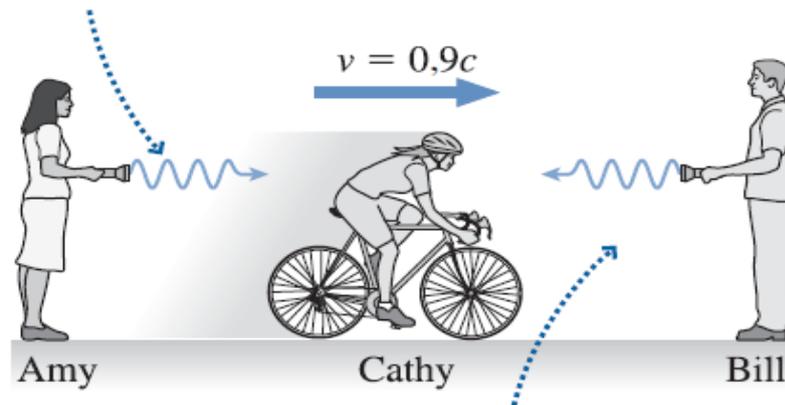


No referencial de Amy (e Bill), o feixe de luz proveniente de Amy se aproxima de Cathy, com velocidade

- A) $0,1c$
- B) c
- C) $1,9c$
- D) $0,9c$

A constância da velocidade da Luz

Teste Conceitual 1



No referencial de Amy (e Bill), o feixe de luz proveniente de Amy se aproxima de Cathy, com velocidade

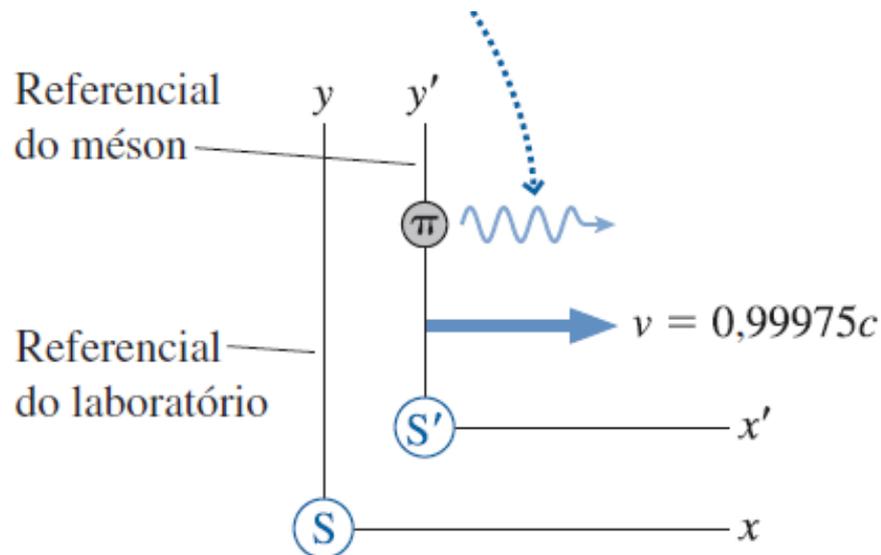
- A) $0,1c$
- B) c
- C) $1,9c$
- D) $0,9c$



Evidência experimental

Um tipo de partícula chamada méson π pode ser gerado em um acelerador de partículas viajando a velocidades altíssimas, p/ ex. $v = 0.99975c$.

Essas partículas decaem naturalmente, emitindo um fóton de alta energia. No referencial do méson, o fóton viaja com velocidade c .



Pelo senso comum, deveríamos medir a velocidade do fóton no ref. do laboratório como

$$u = 1,99975 c.$$

Mas as medidas mostram que ela continua igual a

$$u = 3 \times 10^8 \text{ m/s} = c \quad !!$$



Como explicar $v_{\text{luz}} = c$?

Conteúdo discutido em classe em aula expositiva...



Eventos e Medições

Evento → ocorrência física em um dado ponto do espaço num dado instante.

Isso nos permite construir a ideia de coordenadas espaço-temporais...

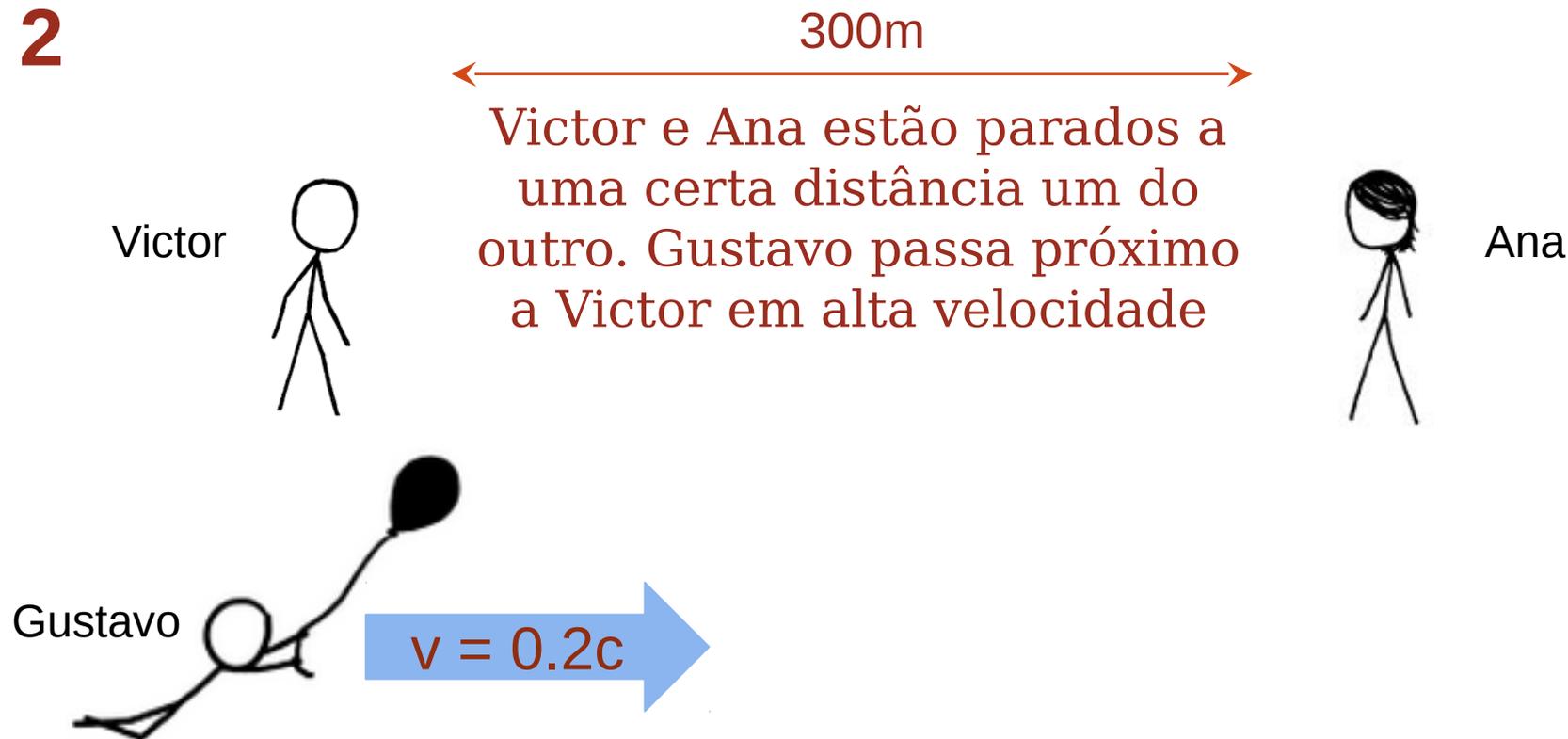
$$(x, y, z, t)$$

Medição → determinação das coordenadas espaço-temporais de um evento.



Um pouco mais sobre Referenciais...

TC 2



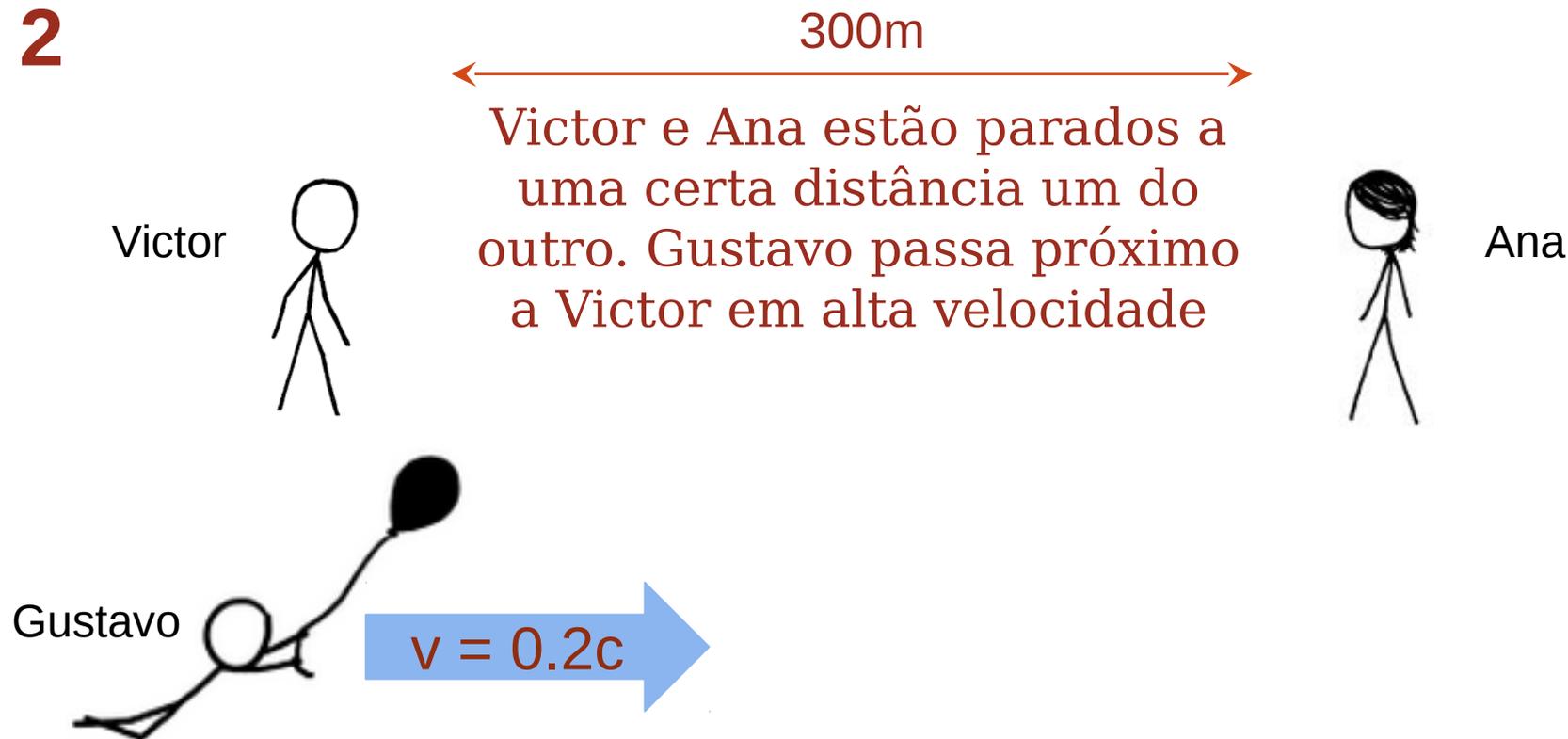
Quantos referenciais diferentes são representados por Victor, Ana e Gustavo?

- A) Um
- B) Dois: (Victor - Ana , e Gustavo)
- C) Dois: (Victor - Gustavo, e Ana)
- D) Três



Um pouco mais sobre Referenciais...

TC 2



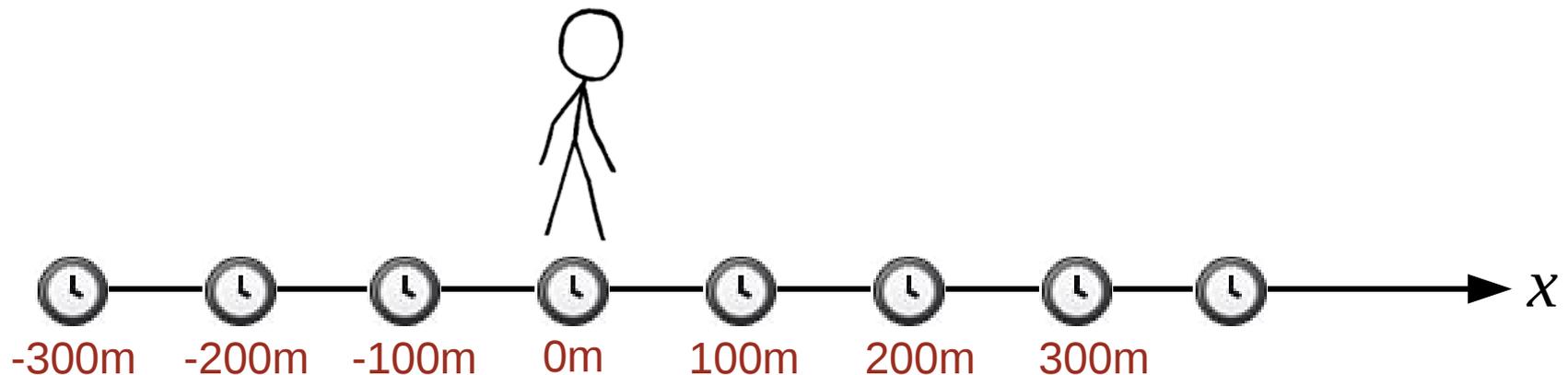
Quantos referenciais diferentes são representados por Victor, Ana e Gustavo?

- A) Um
- B) Dois: (Victor - Ana , e Gustavo)
- C) Dois: (Victor - Gustavo, e Ana)
- D) Três



Sincronização de relógios

Significa que em um dado instante todos os relógios em um mesmo referencial registram a mesma leitura...



“Somente com relógios sincronizados podemos saber se dois eventos simultâneos ocorreram, em lugares diferentes do espaço, ocorreram de verdade.”



Sincronização de relógios

Teste Conceitual 3

Victor e Ana estão parados a uma certa distância **desconhecida** L um do outro. Cada um tem um relógio. Eles desejam *sincronizar* seus relógios, sem saírem do lugar. É possível fazer isso?



- A) Sim, e não é necessário determinar L
- B) Sim, mas primeiro eles precisam determinar L
- C) Não, eles precisariam saber de antemão o valor de L
- D) Não, eles precisariam se encontrar para sincronizar os relógios



Sincronização de relógios

Teste Conceitual 3

Victor e Ana estão parados a uma certa distância **desconhecida** L um do outro. Cada um tem um relógio. Eles desejam *sincronizar* seus relógios, sem saírem do lugar. É possível fazer isso?



- A) Sim, e não é necessário determinar L
- B) Sim, mas primeiro eles precisam determinar L
- C) Não, eles precisariam saber de antemão o valor de L
- D) Não, eles precisariam se encontrar para sincronizar os relógios



Sincronização de relógios

Teste Conceitual 3



Para determinar L : Victor envia luz até Ana, observa o tempo t para o reflexo retornar. Determina $L = c t / 2$

Suponha p.ex. $L = 300\text{m}$. **Para sincronizar relógios:** Victor envia um sinal luminoso com a hora certa (digamos, 13h). Assim que Ana recebe o sinal, ela acerta o seu relógio p/ 13h ***mais*** 10^{-6}s

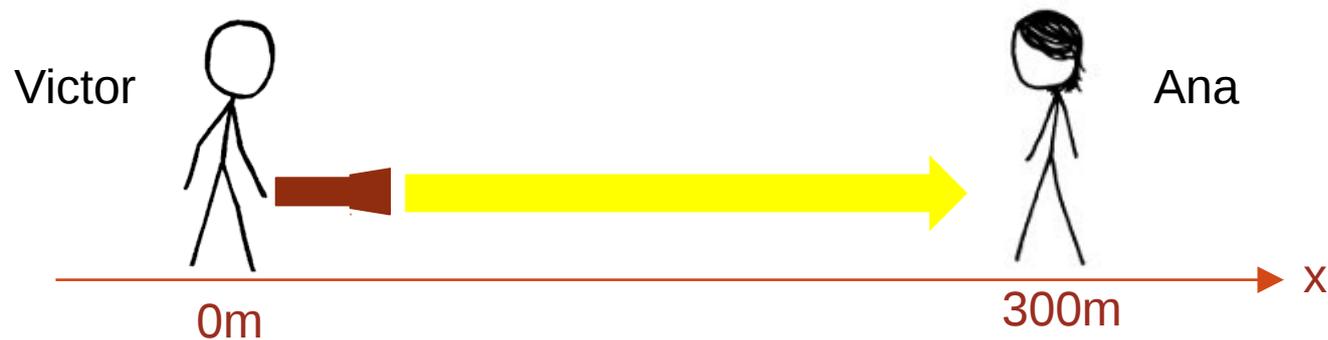


Sincronização de relógios

Teste Conceitual 4

Evento: uma ocorrência física em um ponto específico no espaço e no tempo. Este ponto pode ser descrito em um dado referencial por coordenadas (x, y, z, t) .

Ex: Evento 1: Victor acende uma lanterna



Se as coordenadas do Evento 1 são $(x=0\text{m}, t=0\text{s})$, no referencial de Victor, quais as coordenadas (x,t) **deste mesmo evento** no referencial de Ana?

- A) $0\text{m}, 0\text{s}$ B) $-300\text{m}, 0\text{s}$ C) $300\text{m}, 10^{-6}\text{s}$ D) $0\text{m}, 10^{-6}\text{s}$



Sincronização de relógios

Teste Conceitual 4

Evento: uma ocorrência física em um ponto específico no espaço e no tempo. Este ponto pode ser descrito em um dado referencial por coordenadas (x, y, z, t) .

Ex: Evento 1: Victor acende uma lanterna



Se as coordenadas do Evento 1 são $(x=0\text{m}, t=0\text{s})$, no referencial de Victor, quais as coordenadas (x,t) ***deste mesmo evento*** no referencial de Ana?

- A) $0\text{m}, 0\text{s}$ B) $-300\text{m}, 0\text{s}$ C) $300\text{m}, 10^{-6}\text{s}$ D) $0\text{m}, 10^{-6}\text{s}$



Sincronização de relógios

Teste Conceitual 4

Evento: uma ocorrência física em um ponto específico no espaço e no tempo. Este ponto pode ser descrito em um dado referencial por coordenadas (x, y, z, t) .

Ex: Evento 1: Victor acende uma lanterna



Se as coordenadas do Evento 1 são $(x=0\text{m}, t=0\text{s})$, no referencial de Victor, quais as coordenadas (x,t) ***deste mesmo evento*** no referencial de Ana?

- A) $0\text{m}, 0\text{s}$ B) $-300\text{m}, 0\text{s}$ C) $300\text{m}, 10^{-6}\text{s}$ D) $0\text{m}, 10^{-6}\text{s}$



Sincronização de relógios

Teste Conceitual 4

Ex: Evento 1: Victor acende uma lanterna



Conclusão: a posição e instante em que um evento *realmente ocorre*, de acordo com um determinado observador ***não são*** em geral iguais à posição e instante em que este observador *percebe* o evento. Essa percepção é um ***outro evento***.

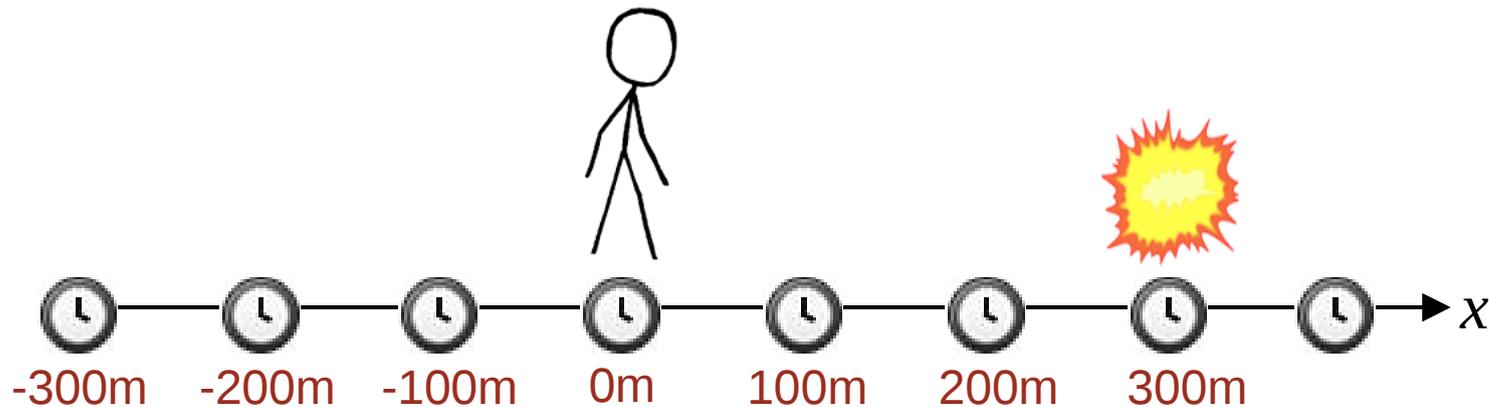
Ex: Evento 2: Ana enxerga a luz da lanterna de Victor:

$$x = 300\text{m}, t = 10^{-6}\text{s}$$



Sincronização de relógios

Em conclusão: quando falamos em um *referencial*, podemos imaginar uma série de relógios sincronizados espalhados ao longo do espaço, todos parados em relação uns aos outros.



Um observador pode assim determinar o instante em que qualquer evento de fato ocorreu, mesmo que demore um pouco até ele obter essa informação (devido à velocidade finita da luz).



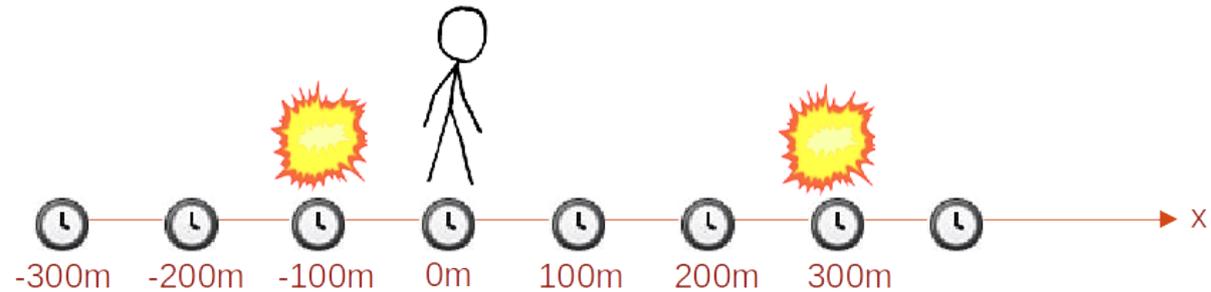
A Relatividade da Simultaneidade...

O que são eventos simultâneos?



A Relatividade da Simultaneidade...

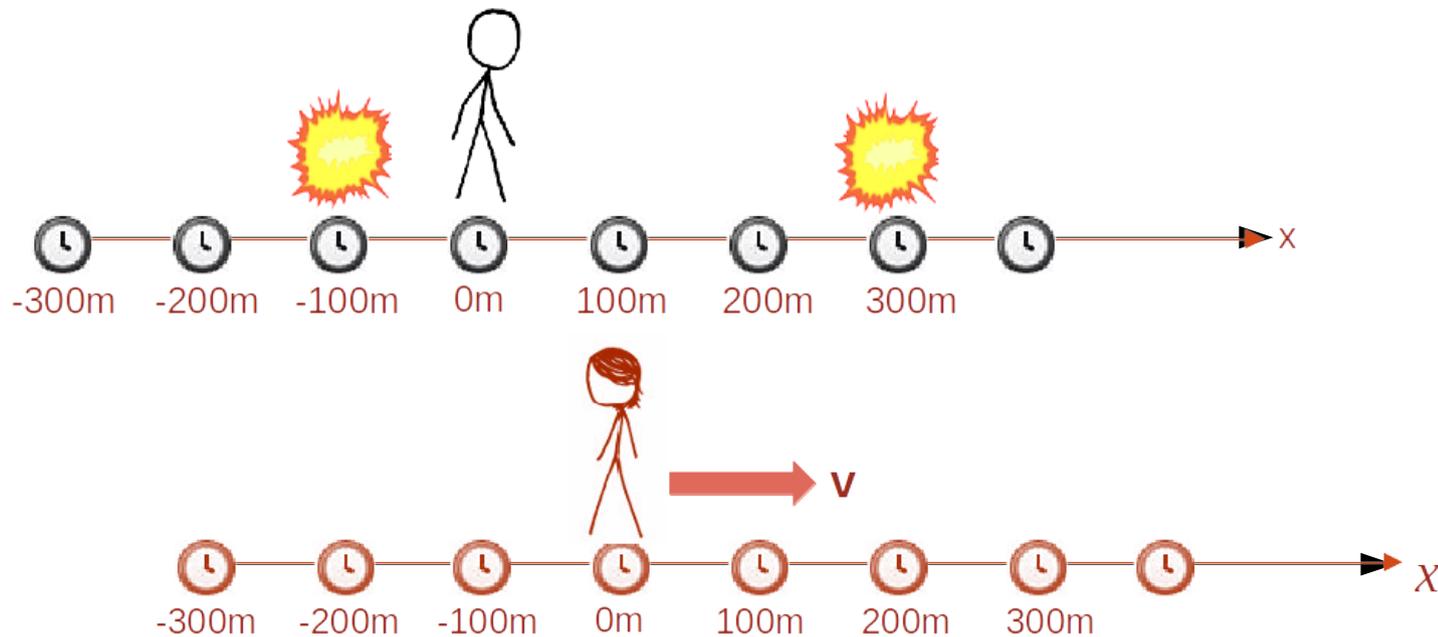
Dois eventos são **simultâneos** com respeito a um referencial se ocorrem no mesmo instante, mesmo que em pontos diferentes do espaço





A Relatividade da Simultaneidade...

Dois eventos são **simultâneos** com respeito a um referencial se ocorrem no mesmo instante, mesmo que em pontos diferentes do espaço

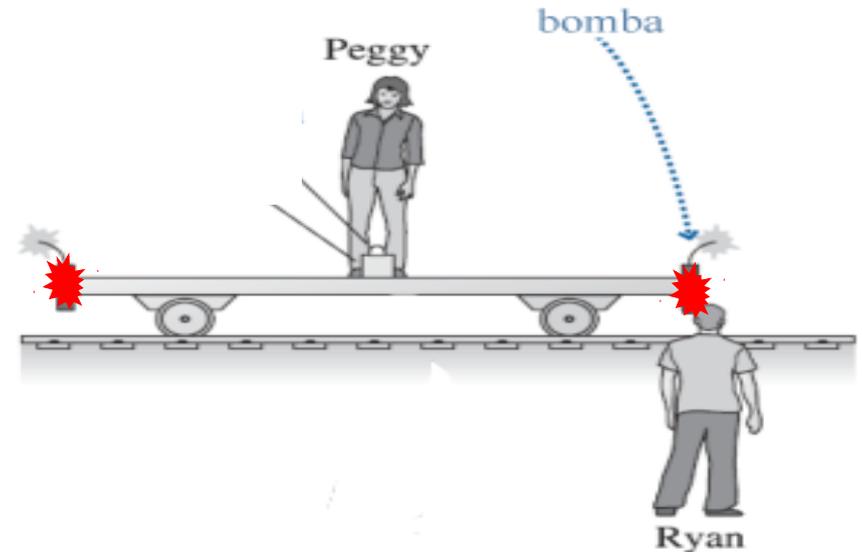


A questão é: como esses eventos são descritos num segundo referencial, se movendo com velocidade v com respeito ao 1º?



A Relatividade da Simultaneidade...

Peggy está no centro de um vagão **parado**. Ela enxerga duas bombas explodindo simultaneamente em cada ponta do vagão.



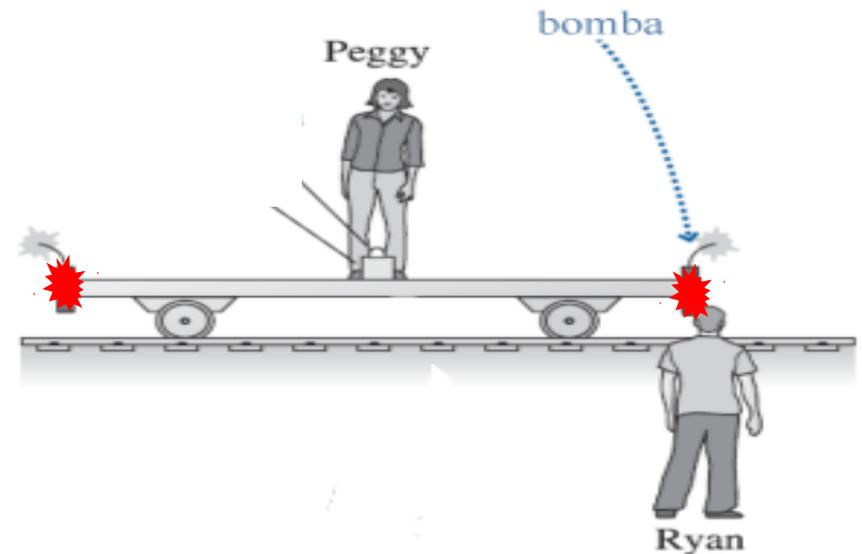
Ryan está junto a uma das pontas do vagão. Para ele, o que realmente ocorre é que

- A) A bomba da esquerda explode primeiro
- B) A bomba da direita explode primeiro
- C) As duas bombas explodem simultaneamente
- D) Impossível Ryan determinar sem a info da distância até Peggy



A Relatividade da Simultaneidade...

Peggy está no centro de um vagão **parado**. Ela enxerga duas bombas explodindo simultaneamente em cada ponta do vagão.



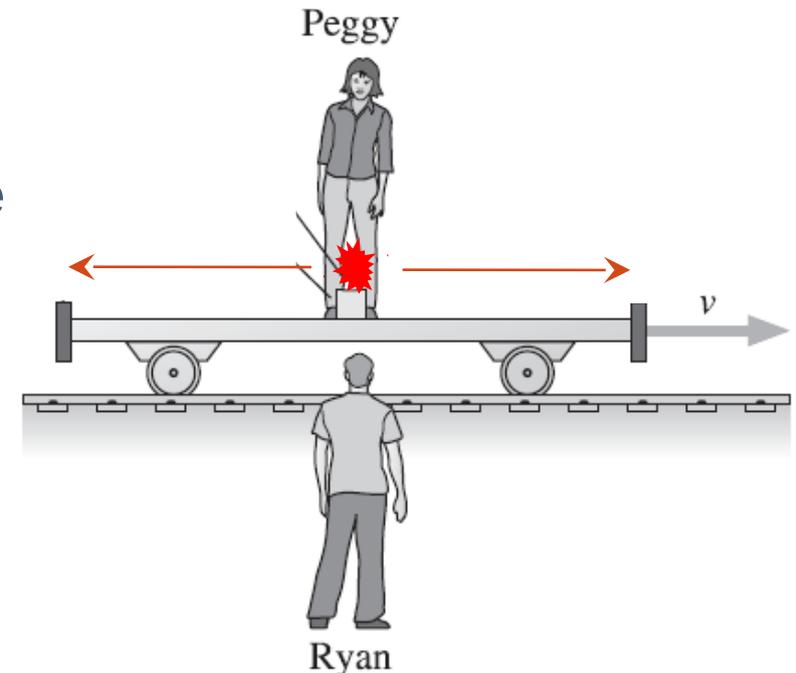
Ryan está junto a uma das pontas do vagão. Para ele, o que realmente ocorre é que

- A) A bomba da esquerda explode primeiro
- B) A bomba da direita explode primeiro
- C) As duas bombas explodem simultaneamente
- D) Impossível Ryan determinar sem a info da distância até Peggy



A Relatividade da Simultaneidade...

- Agora o vagão está em movimento com velocidade v em relação ao chão
- Peggy solta uma bombinha bem à sua frente
- A luz da explosão se propaga até atingir as pontas do vagão. Chamemos de Evento 1 (E1) a chegada da luz na ponta esquerda, e Evento 2 (E2) a chegada da luz na ponta direita.

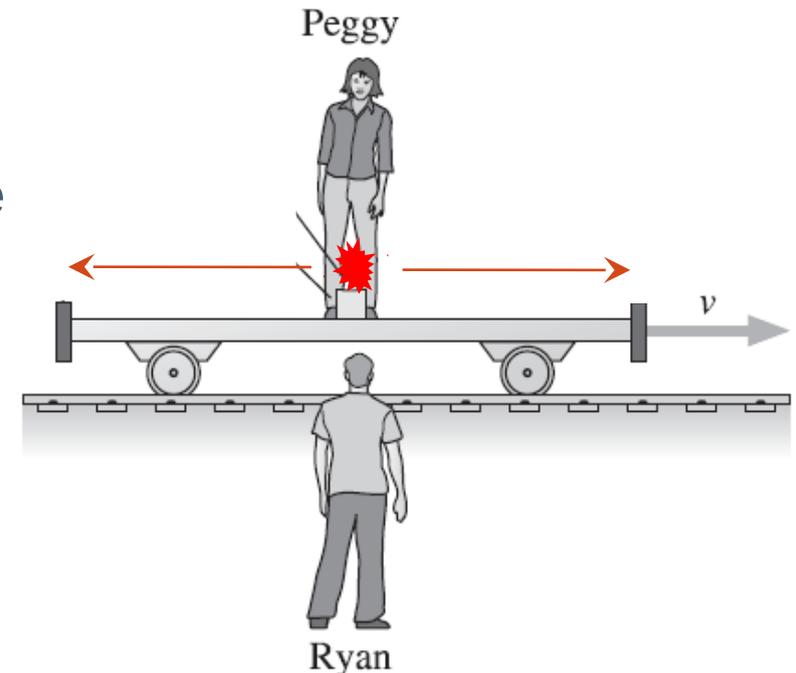


- A) E1 ocorre antes de E2 para Ryan e para Peggy
- B) E1 e E2 ocorrem simultaneamente para Peggy, mas para Ryan E1 ocorre antes de E2
- C) E1 e E2 ocorrem simultaneamente para Ryan e para Peggy, e Ryan também enxerga esses eventos simultaneamente
- D) E1 e E2 ocorrem simultaneamente tanto para Ryan como para Peggy, mas Ryan enxerga E1 ocorrendo antes de E2



A Relatividade da Simultaneidade...

- Agora o vagão está em movimento com velocidade v em relação ao chão
- Peggy solta uma bombinha bem à sua frente
- A luz da explosão se propaga até atingir as pontas do vagão. Chamemos de Evento 1 (E1) a chegada da luz na ponta esquerda, e Evento 2 (E2) a chegada da luz na ponta direita.

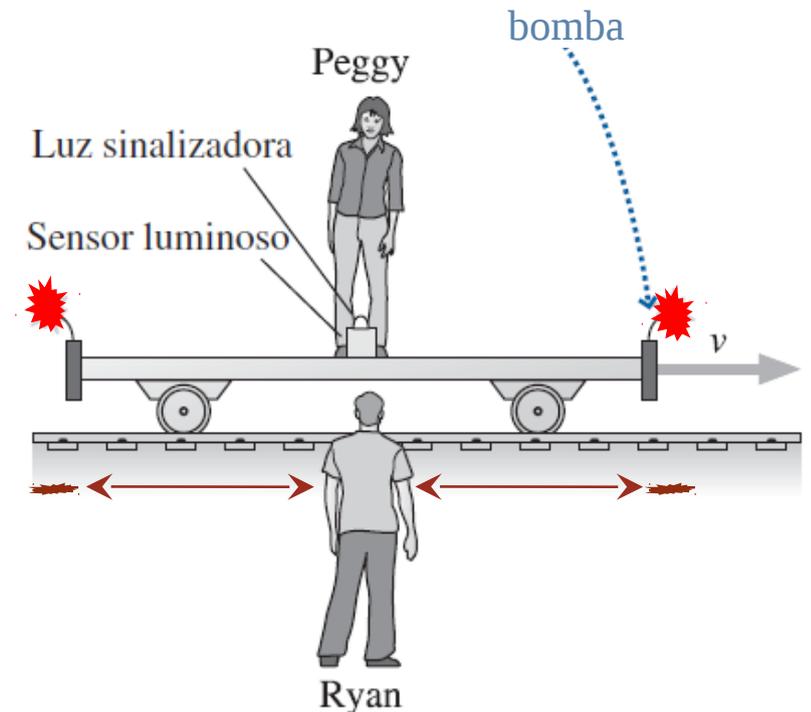


- A) E1 ocorre antes de E2 para Ryan e para Peggy
- B) E1 e E2 ocorrem simultaneamente para Peggy, mas para Ryan E1 ocorre antes de E2
- C) E1 e E2 ocorrem simultaneamente para Ryan e para Peggy, e Ryan também enxerga esses eventos simultaneamente
- D) E1 e E2 ocorrem simultaneamente tanto para Ryan como para Peggy, mas Ryan enxerga E1 ocorrendo antes de E2



A Relatividade da Simultaneidade...

- Novamente, o vagão está em movimento com velocidade v .
- Bombas explodem em cada ponta
- Dessa vez, Ryan vê *simultaneamente* a luz das duas explosões. Ele também observa que as marcas deixadas no solo pelas explosões estão à mesma distância dele.



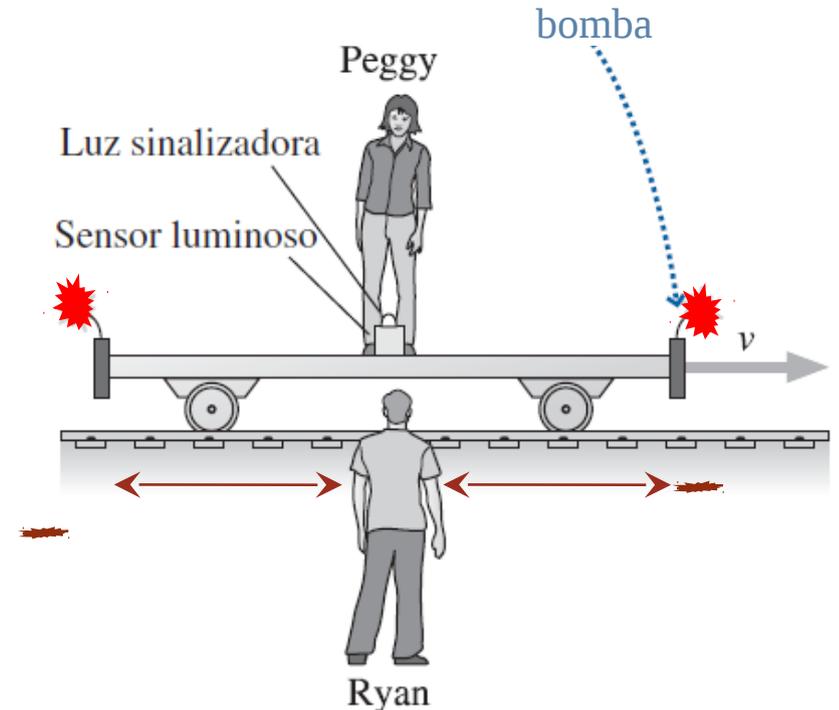
Peggy possui um sensor ligado a uma luz sinalizadora

1. Se o sensor detecta o flash vindo da direita antes do vindo da esquerda: **LUZ VERDE**
2. Se o sensor detecta o flash vindo da esquerda antes do vindo da direita ou se chegarem simultaneamente: **LUZ VERMELHA**



A Relatividade da Simultaneidade...

- Novamente, o vagão está em movimento com velocidade v .
- Bombas explodem em cada ponta
- Dessa vez, Ryan vê simultaneamente a luz das duas explosões. Ele também observa que as marcas deixadas no solo pelas explosões estão à mesma distância dele.

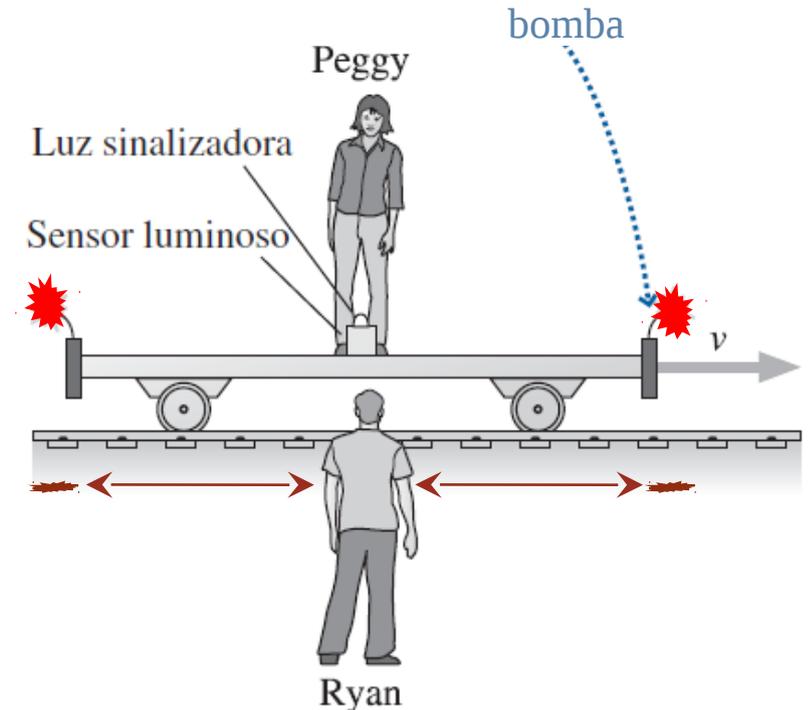


- Como Peggy descreve a ordem das explosões?
- Qual luz acende?



A Relatividade da Simultaneidade...

- Novamente, o vagão está em movimento com velocidade v .
- Bombas explodem em cada ponta
- Dessa vez, Ryan vê simultaneamente a luz das duas explosões. Ele também observa que as marcas deixadas no solo pelas explosões estão à mesma distância dele. Portanto, para Peggy:

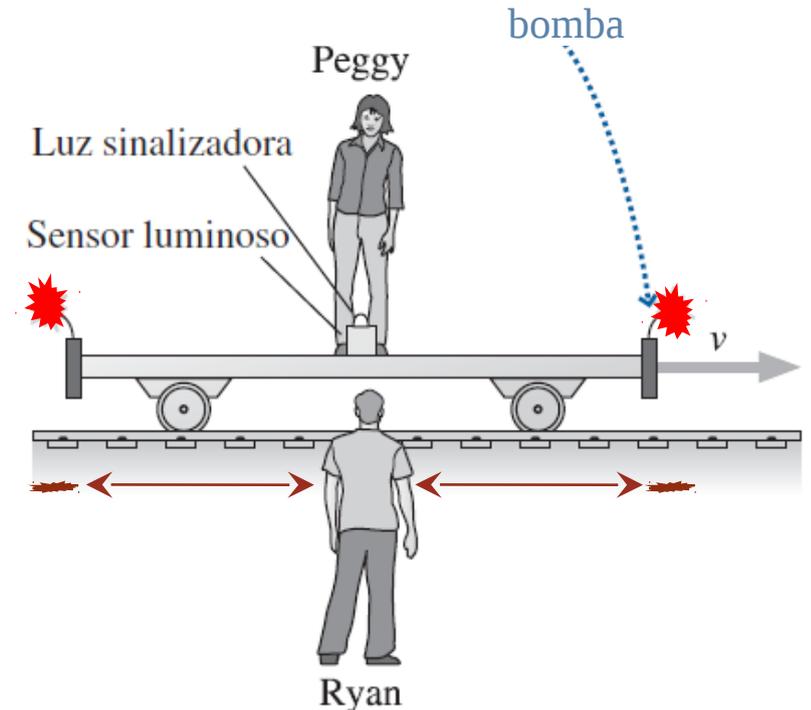


- A) A bomba direita explode primeiro, e a luz **VERDE** acende
- B) A bomba direita explode primeiro, e a luz **VERMELHA** acende
- C) As duas bombas explodem simultaneamente, e a luz **VERDE** acende
- D) As duas bombas explodem simultaneamente, e a luz **VERMELHA** acende



A Relatividade da Simultaneidade...

- Novamente, o vagão está em movimento com velocidade v .
- Bombas explodem em cada ponta
- Dessa vez, Ryan vê simultaneamente a luz das duas explosões. Ele também observa que as marcas deixadas no solo pelas explosões estão à mesma distância dele. Portanto, para Peggy:

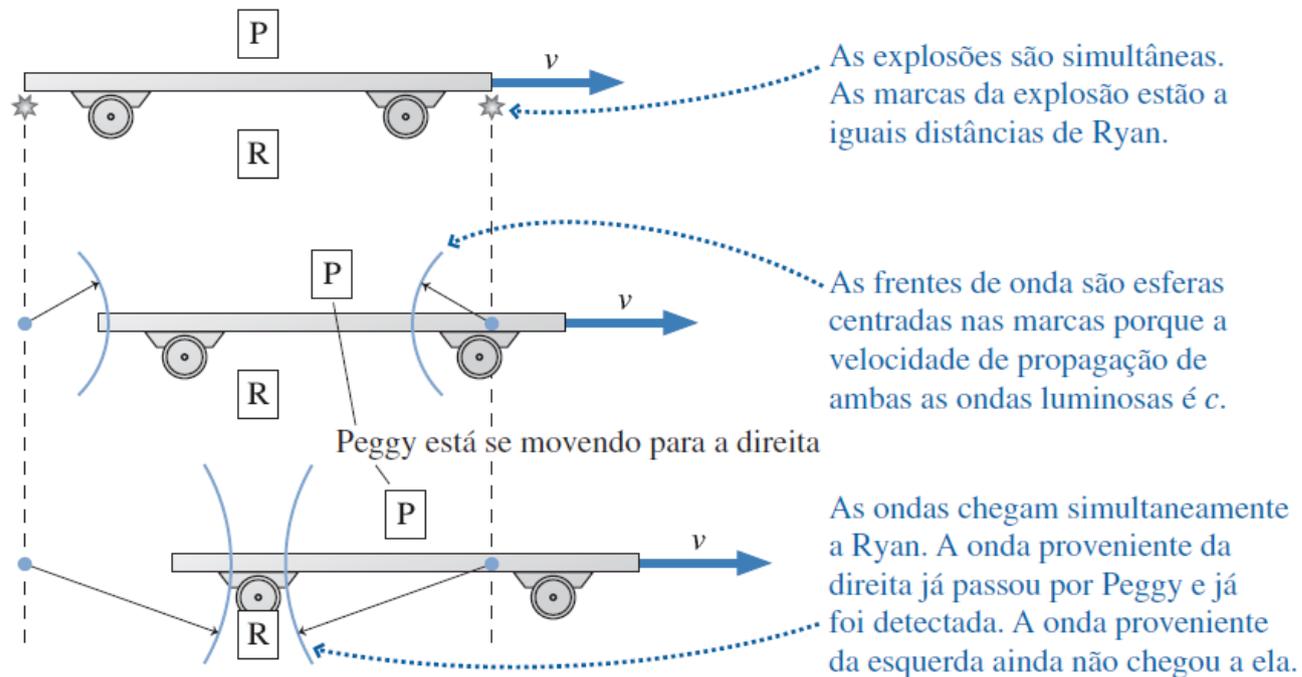


- A) A bomba direita explode primeiro, e a luz VERDE acende
- B) A bomba direita explode primeiro, e a luz VERMELHA acende
- C) As duas bombas explodem simultaneamente, e a luz VERDE acende
- D) As duas bombas explodem simultaneamente, e a luz VERMELHA acende



A Relatividade da Simultaneidade...

Descrição no referencial parado na terra (Ryan)

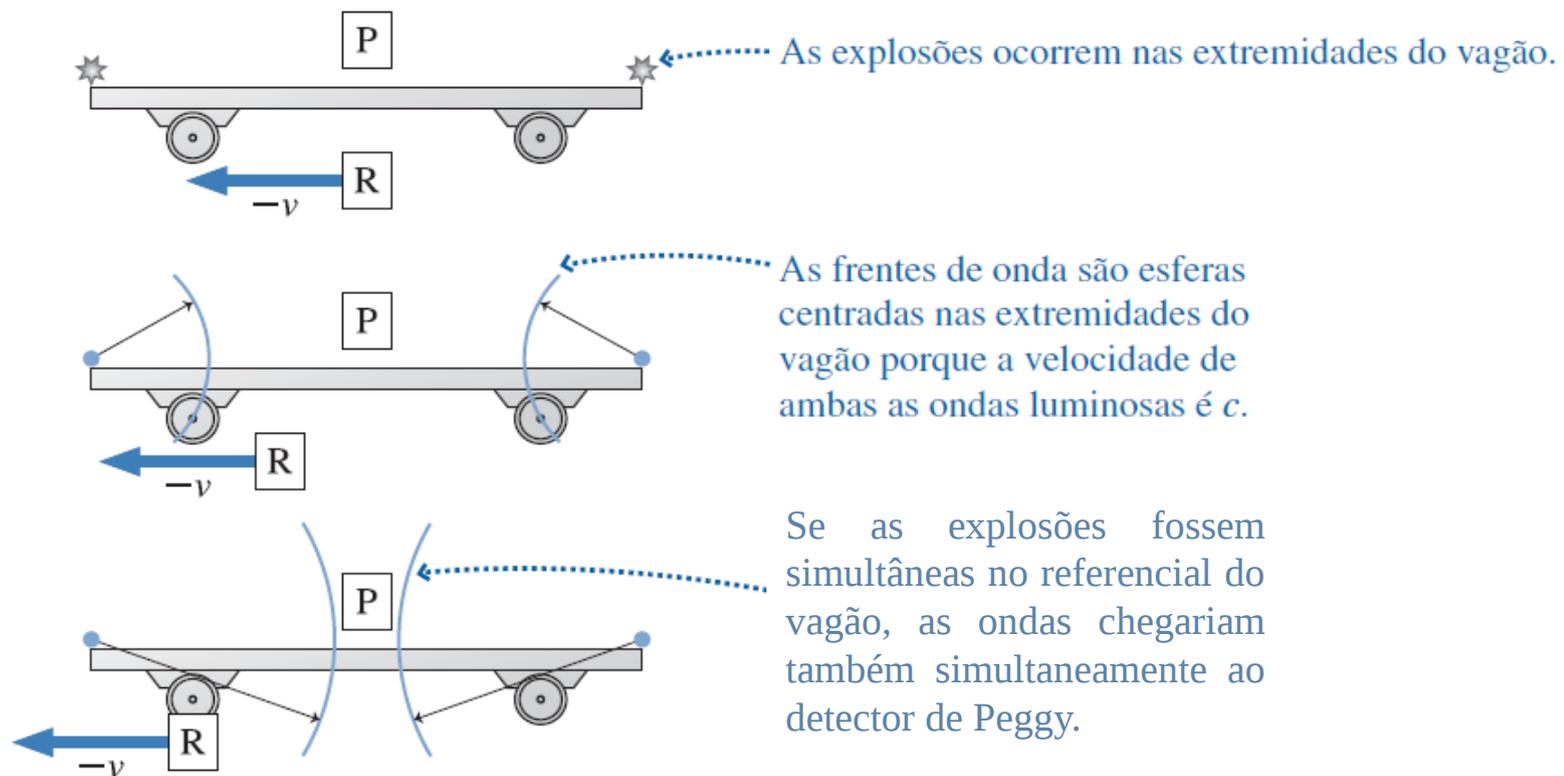


Ryan conclui que a luz VERDE acenderá – que é o que ocorre.



A Relatividade da Simultaneidade...

E se as explosões fossem simultâneas para Peggy?



Se as explosões fossem simultâneas para Peggy, a luz **VERMELHA** acenderia. Mas não é isso que ocorre!



A Relatividade da Simultaneidade...

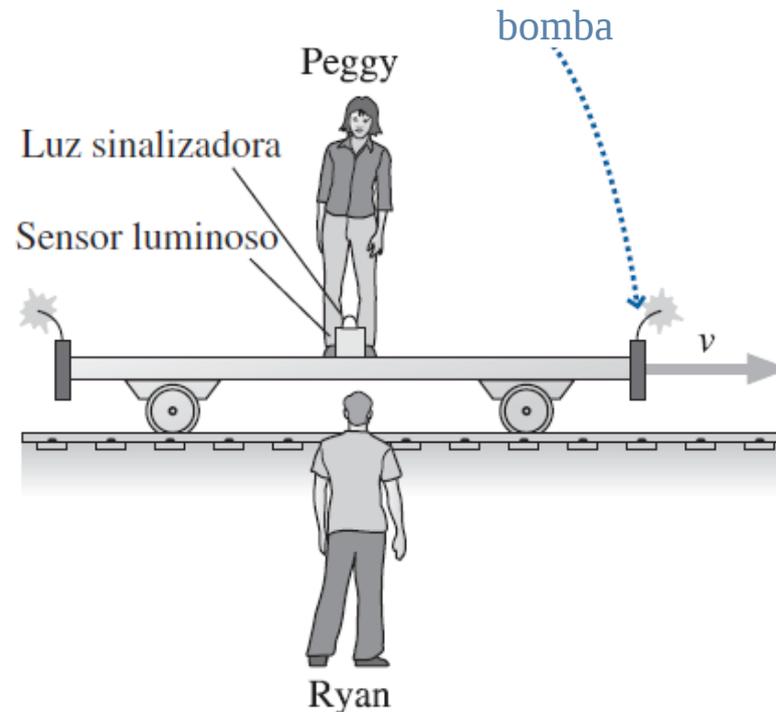
“Dois eventos que ocorrem simultaneamente em um referencial S NÃO são simultâneos em qualquer outro referencial S' em movimento relativo a S .”



Aula 3



O exemplo de Ryan e Peggy indica que o tempo “passa” diferente em referenciais em movimento relativo...





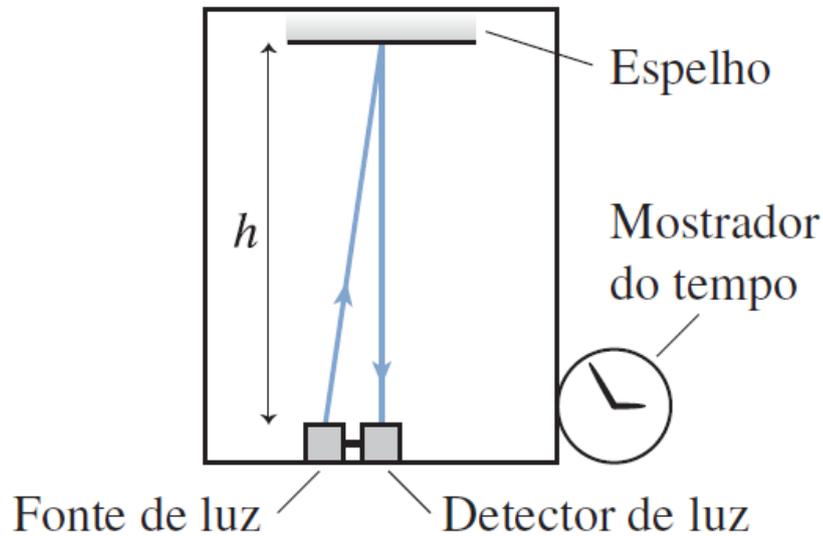
Por falar em tempo: O que é um relógio?

R: qualquer processo físico que se repete a intervalos regulares de tempo





Protótipo: Relógio de luz



Considere 2 eventos:

- i) um pulso de luz é emitido
- e
- ii) o pulso retorna e é detectado.

o tempo entre esses dois eventos corresponde a um 'tique' do relógio

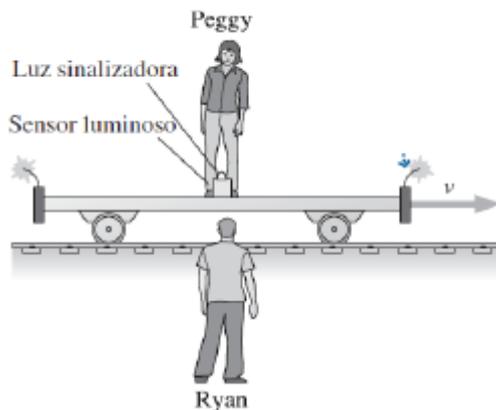
No referencial S' onde o relógio está em repouso, esse tempo vale:

$$\Delta t' = \frac{2h}{c}$$



Comparando o tempo em 2 referenciais

Podemos usar o relógio de luz para calcular quanto vale essa diferença de tempo entre os refs de Peggy e Ryan...



Teste conceitual - 1

No ref. S (de Ryan), chamemos de:

- L : a distância percorrida pela luz entre o evento 1 e o evento 2
- Δt : tempo decorrido entre esses dois eventos

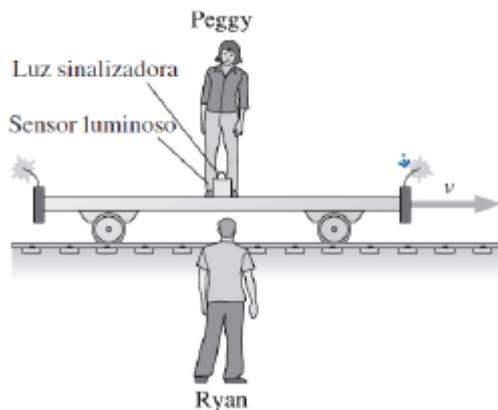
Podemos concluir que

- A) $L = 2h$, $\Delta t = \Delta t'$
- B) $L > 2h$, $\Delta t = \Delta t'$
- C) $L > 2h$, $\Delta t > \Delta t'$
- D) $L > 2h$, $\Delta t < \Delta t'$



Comparando o tempo em 2 referenciais

Podemos usar o relógio de luz para calcular quanto vale essa diferença de tempo entre os refs de Peggy e Ryan...



Teste conceitual - 1

No ref. S (de Ryan), chamemos de:

- L : a distância percorrida pela luz entre o evento 1 e o evento 2
- Δt : tempo decorrido entre esses dois eventos

Podemos concluir que

- A) $L = 2h$, $\Delta t = \Delta t'$
- B) $L > 2h$, $\Delta t = \Delta t'$
- C) $L > 2h$, $\Delta t > \Delta t'$
- D) $L > 2h$, $\Delta t < \Delta t'$



A Dilatação temporal

Conteúdo discutido em classe em aula expositiva...



A Dilatação temporal

Em resumo: o tempo Δt entre os dois eventos, conforme medido no referencial S em que o relógio se move, é *maior* do que o tempo $\Delta t'$ registrado no referencial S' onde o relógio está em repouso. Chamamos esse efeito de

DILATAÇÃO TEMPORAL



A Dilatação temporal

Def: **tempo próprio** $\Delta\tau$ = tempo medido por um relógio entre dois eventos que ocorrem **no mesmo ponto do espaço, no referencial de repouso do próprio relógio**. No exemplo acima: o tempo próprio entre dois 'tiques' é $\Delta\tau = \Delta t'$ (tempo medido no referencial de Peggy).

Em qualquer outro referencial inercial (em movimento com respeito ao relógio), o tempo entre esses eventos será **maior que o tempo próprio**, por um fator $\gamma > 1$.



A Dilatação temporal

Enquete: Na sua opinião, a dilatação temporal

- A) Nunca foi observada no mundo real, e portanto essa teoria tem de estar errada!
- B) É um efeito da percepção do Ryan. O tempo real entre os eventos é o medido por Peggy (tempo próprio).
- C) É real, mas se aplica apenas ao relógio de luz. Relógios comuns, com componentes mecânicos/eletrônicos, não indicam dilatação apreciável.
- D) É real e se aplica igualmente a qualquer tipo de relógio.



A Dilatação temporal

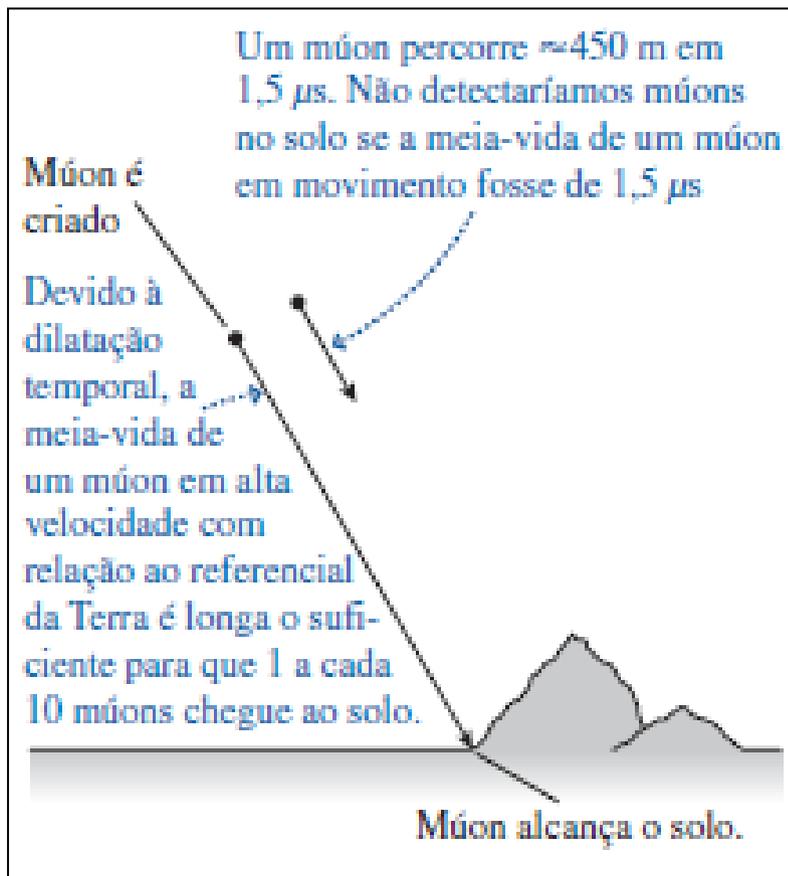
Enquete: Na sua opinião, a dilatação temporal

- A) Nunca foi observada no mundo real, e portanto essa teoria tem de estar errada!
- B) É um efeito da percepção do Ryan. O tempo real entre os eventos é o medido por Peggy (tempo próprio).
- C) É real, mas se aplica apenas ao relógio de luz. Relógios comuns, com componentes mecânicos/eletrônicos, não indicam dilatação apreciável.
- D) É real e se aplica igualmente a qualquer tipo de relógio.



Evidência experimental direta

Múons são partículas subatômicas instáveis, que são criados constantemente na alta atmosfera (60km). Cerca de 10% deles são observados chegando ao solo, com velocidade $v = 0,99969 c$



Problema: sabemos que o tempo de meia-vida de um múon é de apenas $1,5\mu\text{s}$, correspondendo a percorrer apenas 450m. Após isso ele já tem 50% de chance de ter se desintegrado!!

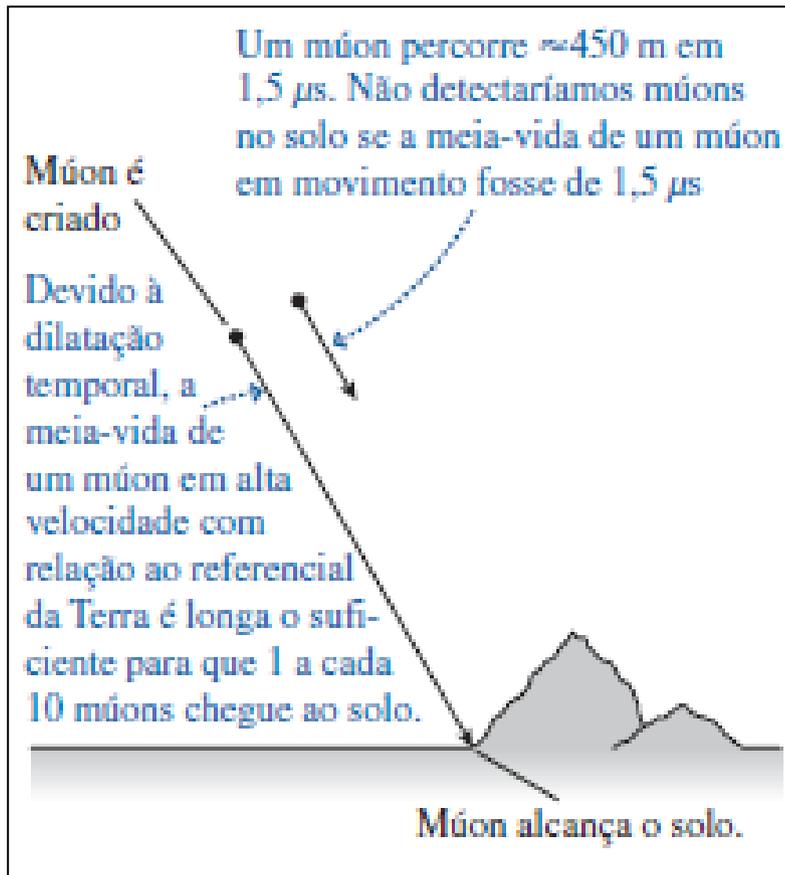
A fração dos múons capazes de percorrer $60\text{km} = 133 \times 450\text{m}$ seria apenas

$$(0,5)^{133} \sim 10^{-40} \text{ !!!!!}$$



Evidência experimental direta

Múons são partículas subatômicas instáveis, que são criados constantemente na alta atmosfera (60km). Cerca de 10% deles são observados chegando ao solo, com velocidade $v = 0,99969 c$



Solução: no referencial do solo, o tempo para a queda dos múons é

$$\Delta t = L / v = 200 \mu\text{s}$$

Porém, devido à dilatação temporal, isto corresponde a **apenas $\tau = 5 \mu\text{s}$ no referencial dos múons** (pois $\gamma \sim 40$). Assim, a fração dos múons que chega deve de fato ser

$$(0,5)^{(5 \mu\text{s} / 1,5 \mu\text{s})} \sim 0.1 \text{ !!!!!}$$



INSTITUTO DE FÍSICA
Universidade Federal Fluminense

A Contração espacial

Conteúdo discutido em classe em aula expositiva...



Contração Espacial

Em resumo: se dois objetos estão parados um em relação ao outro, a distância espacial L entre eles no referencial S onde ambos estão em repouso é *maior* do que a distância L' registrada em qualquer outro referencial inercial S' onde os objetos se movem. Chamamos esse efeito de

CONTRAÇÃO ESPACIAL

Mais geralmente, podemos medir a distância entre dois *eventos* quaisquer, e verificamos que ela também depende do referencial !



Distância própria

Def: **distância própria** l = distância medida por um régua entre dois eventos que ocorrem simultaneamente, ie, **no mesmo instante do tempo, no referencial inercial de repouso da régua.**

Em qualquer outro referencial inercial (em movimento com respeito à régua), a distância entre esses eventos será **menor que a distância própria**, por um fator $\gamma > 1$.



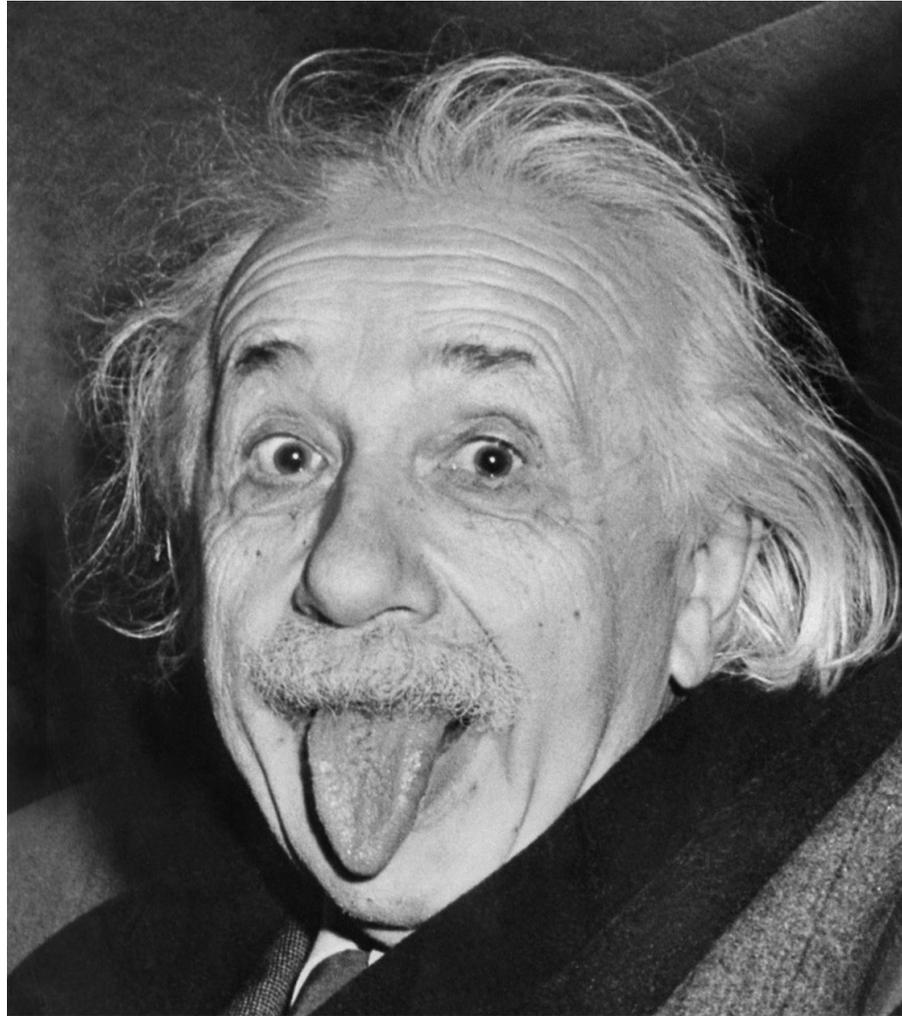
Relatividade

Uma espaçonave viaja para um planeta a 15 anos-luz de distância. Os exploradores lá permanecem por 4 anos, depois retornam a mesma velocidade de ida e chegam à Terra 40 anos após a saída. Admita que os tempos necessários para acelerar e desacelerar a espaçonave sejam desprezíveis.

- 1- Qual a velocidade da espaçonave?
- 2- Quanto tempo transcorre na viagem de ida nos cronômetros dos astronautas?
- 3- Quem mede o *tempo próprio*? Os astronautas ou os controladores na estação na Terra? Por que?
- 4- Quanto tempo transcorreu (em toda a viagem) de acordo com os cronômetros dos astronautas?

No meio do trajeto entre a Terra e o referido planeta existem dois satélites estacionários que estão separados por 1 ano-luz.

- 5- Qual o intervalo de tempo medido pelos astronautas na passagem entre os dois satélites?
- 6- Qual a distância entre satélites medida pelos astronautas?
- 7- A distância entre satélites medida pelos astronautas é o *comprimento próprio*? Por que?



Veja esse filme:

<https://www.youtube.com/watch?v=ZrAJN6tvHMs&feature=youtu.be>



Aula 4



INSTITUTO DE FÍSICA
Universidade Federal Fluminense

A Contração espacial

Conteúdo discutido em classe em aula expositiva...



Aula 5



INSTITUTO DE FÍSICA
Universidade Federal Fluminense

A Contração espacial

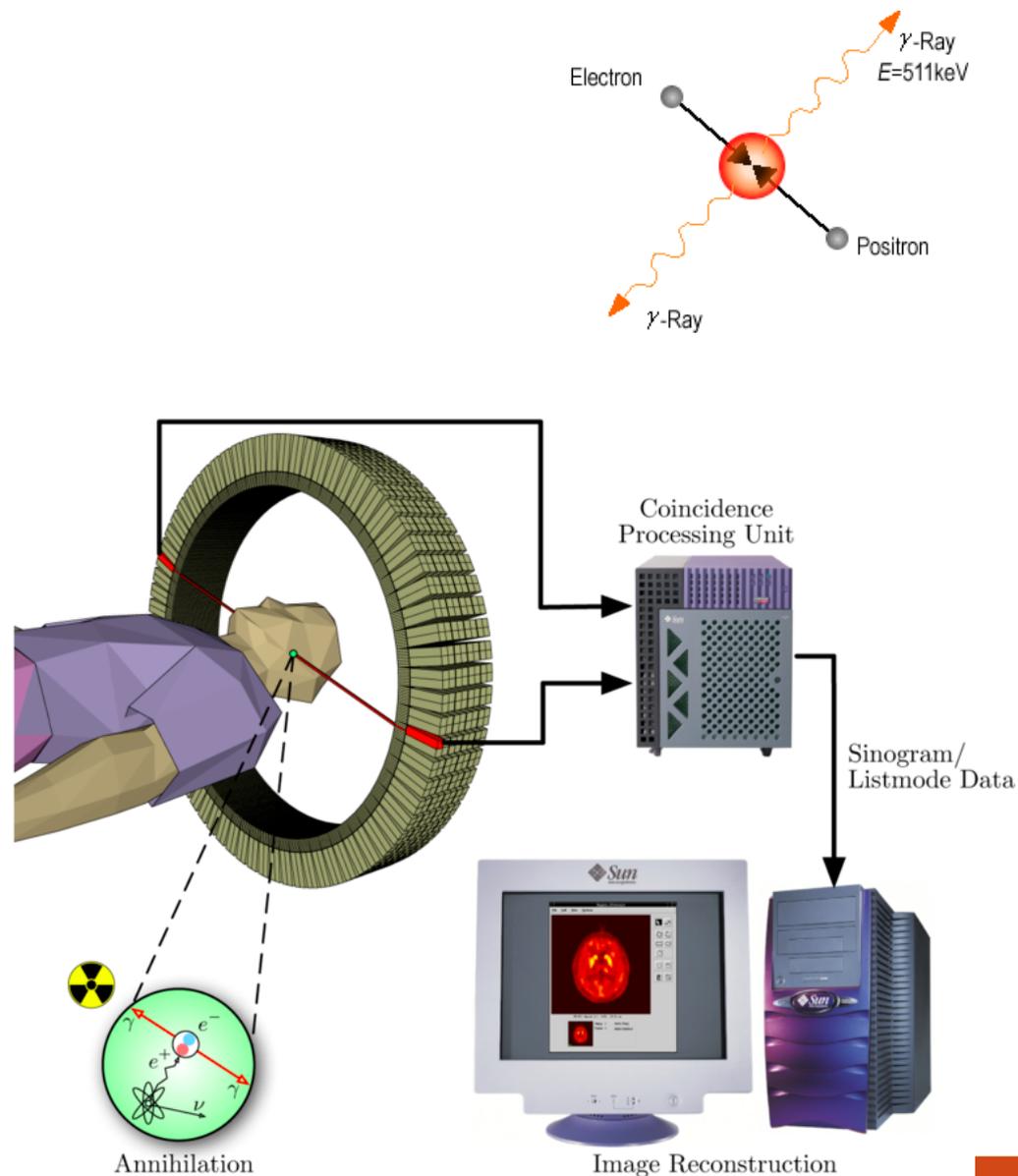
Conteúdo discutido em classe em aula expositiva...



Tomografia por emissão de pósitrons

- A pessoa ingere um composto radioativo ('traçador') que se acumula preferencialmente em certos tecidos, e decai emitindo um pósitron e^+ .
- Ao encontrar um elétron, ambos se aniquilam, produzindo um sinal característico de 2 raios- γ .

Detectando os raios em coincidência, determina-se o ponto de origem.

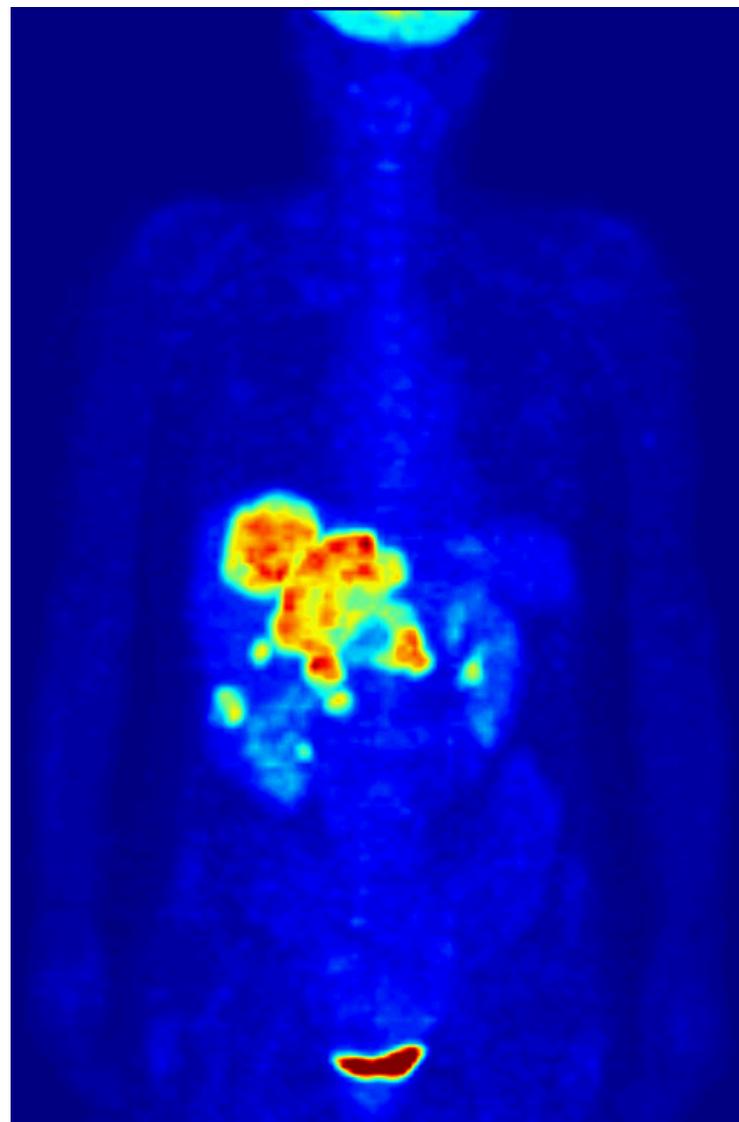




Tomografia por emissão de pósitrons

- A pessoa ingere um composto radioativo ('traçador') que se acumula preferencialmente em certos tecidos, e decai emitindo um pósitron e^+ .
- Ao encontrar um elétron, ambos se aniquilam, produzindo um sinal característico de 2 raios- γ .

Detectando os raios em coincidência, determina-se o ponto de origem.





Energia de repouso

Aplicação: Fissão Nuclear do ^{235}U



A massa dos produtos somados é menor do que a massa dos reagentes!

$$\Delta M = M_{\text{antes}} - M_{\text{depois}} = 3.07 \times 10^{-28} \text{ Kg.}$$

obs: $1 \text{ u} = 1/12$ (Massa do ^{12}C) = $1,66 \times 10^{-27} \text{ Kg.}$

Massa 'faltante': convertida em ENERGIA

$$E_0 = (\Delta M)c^2 = 2.8 \times 10^{-11} \text{ J liberados em cada reação.}$$

