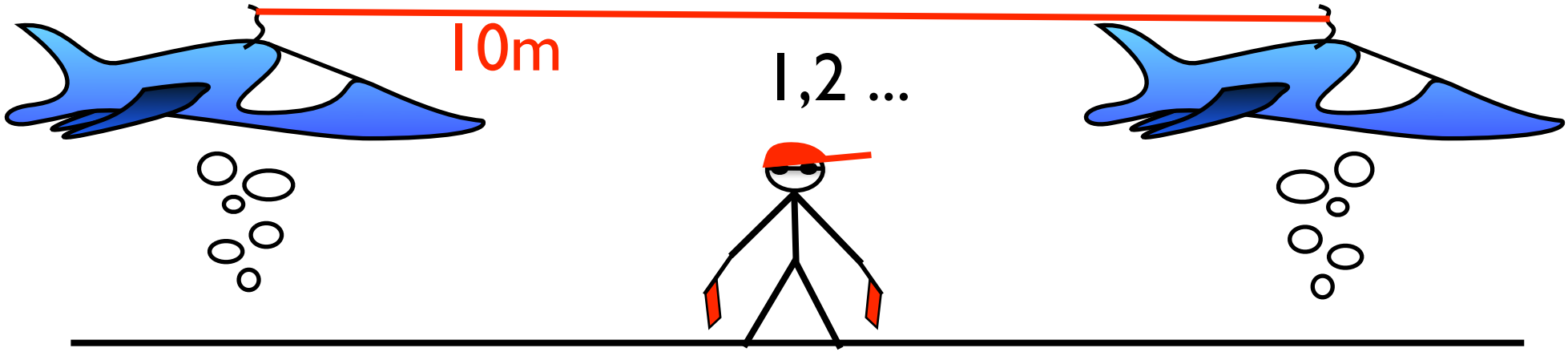
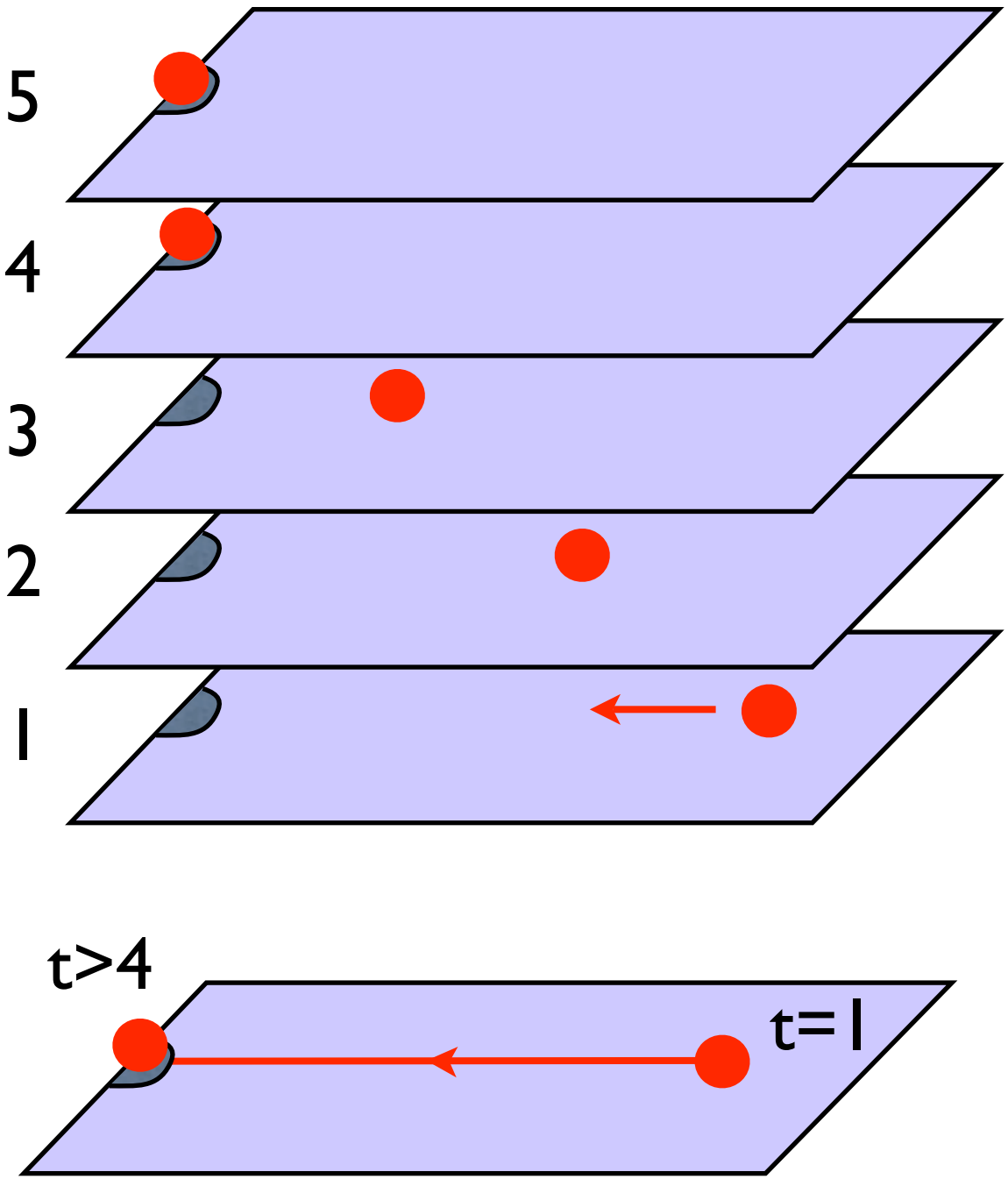
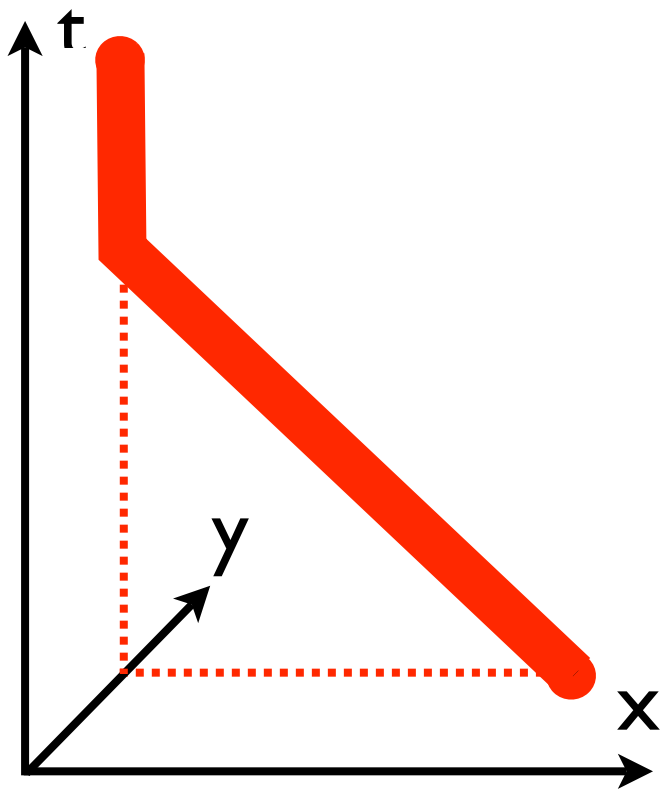
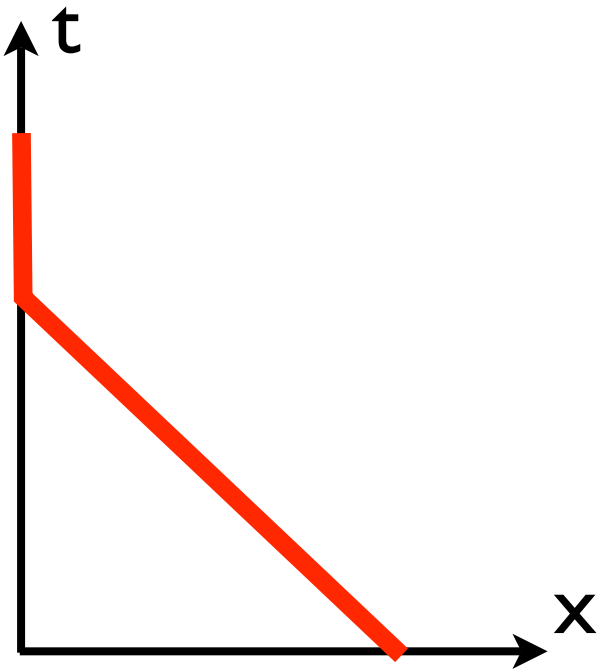

Escola de Física IV
Departamento de Física, Universidade do Porto

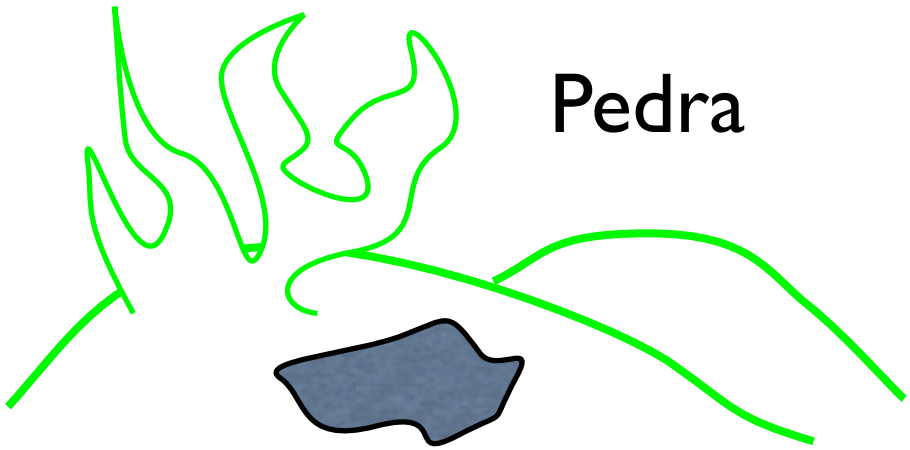

10m
1,2 ...

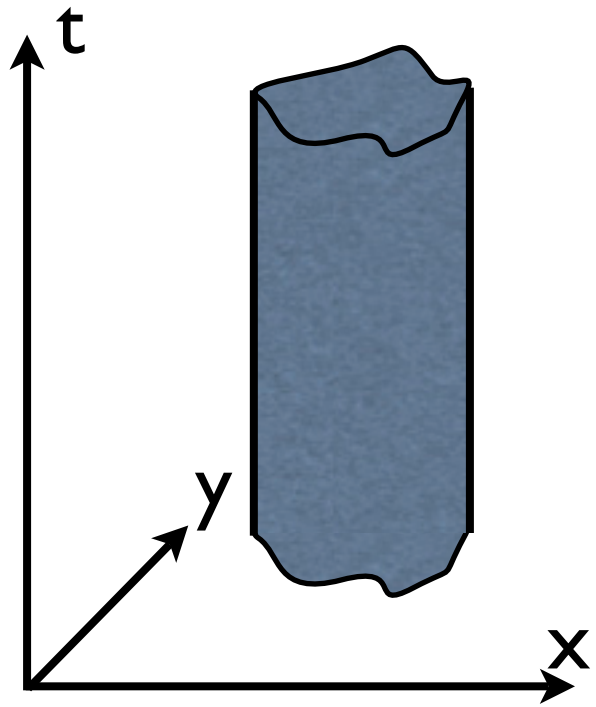
Diagramas de Espaço-Tempo


5
4
3
2
1
t>4
t=1

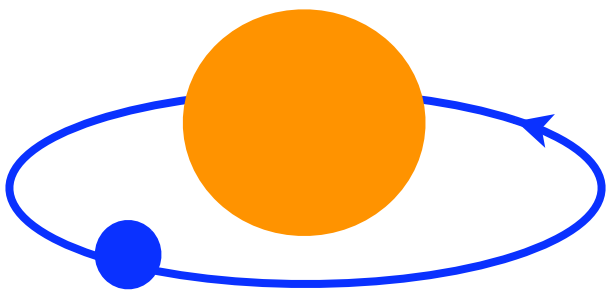

t
y
x

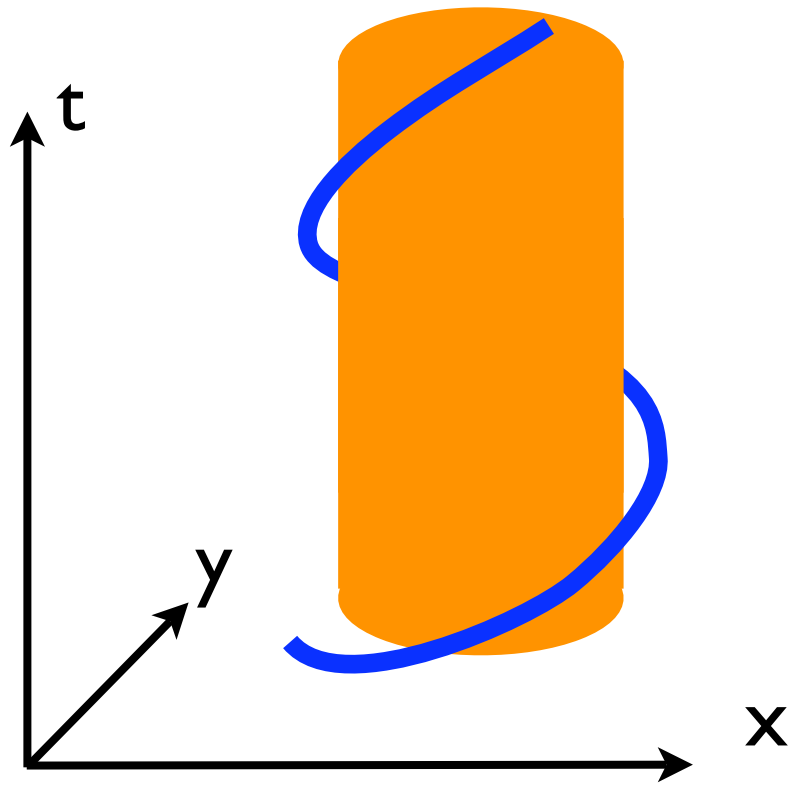

t
x





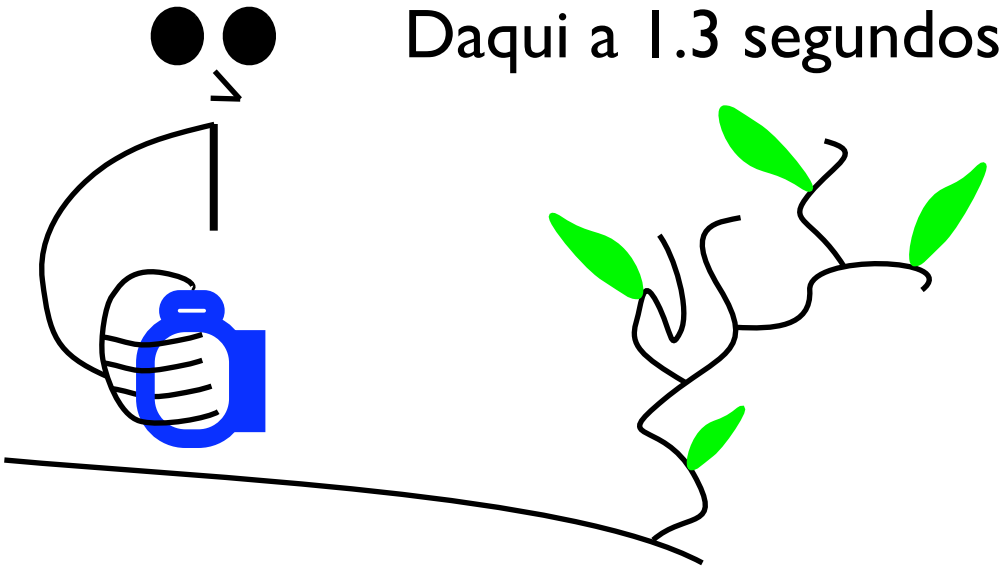
Planeta à volta de um Sol

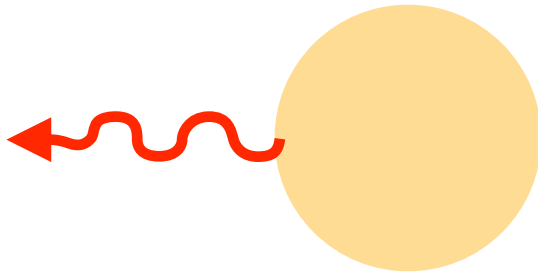




Velocidade da Luz

Daqui a 1.3 segundos vou tirar uma fotografia...

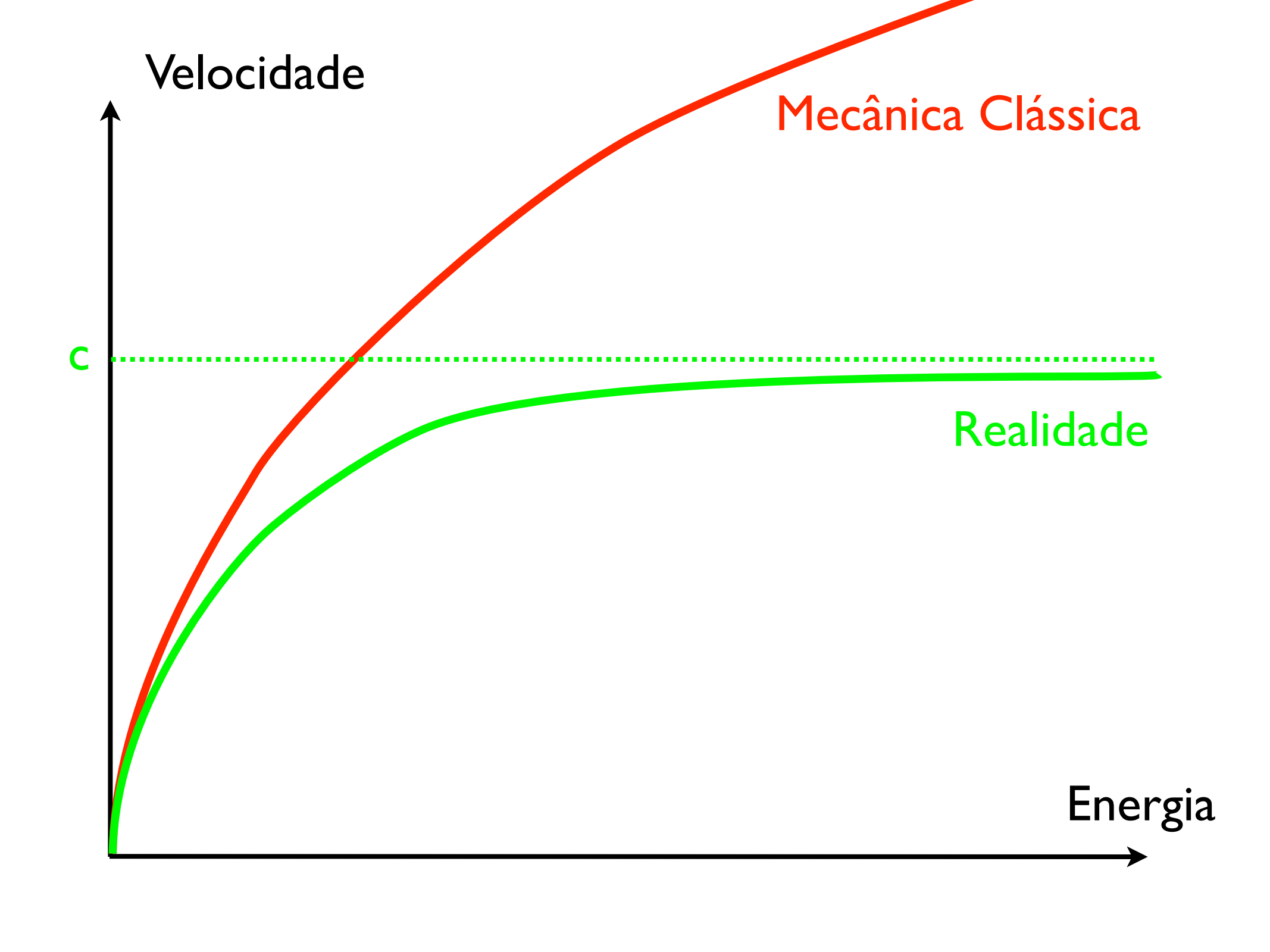




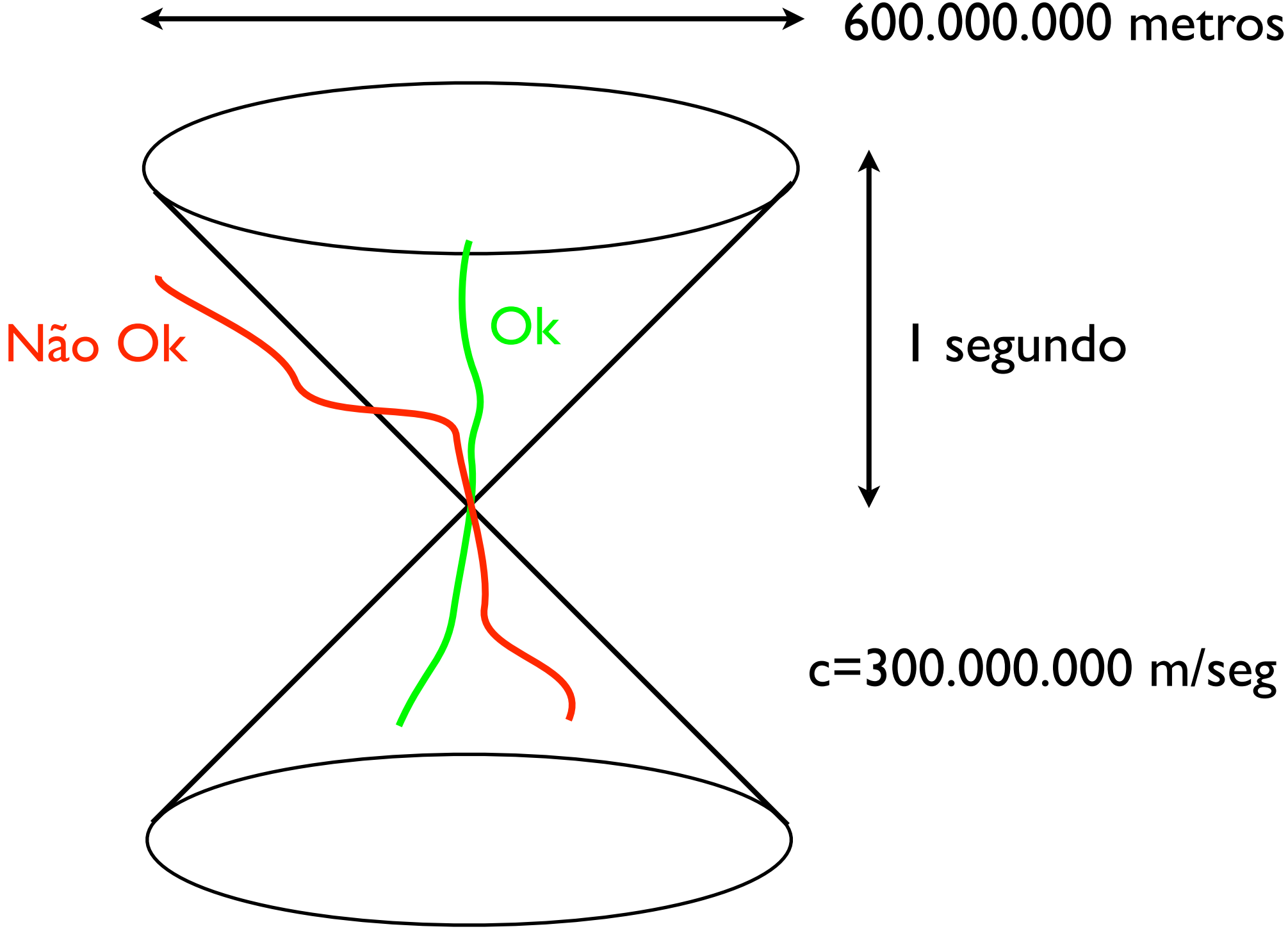
Fotografia

Lua há 1.3 segundos atrás

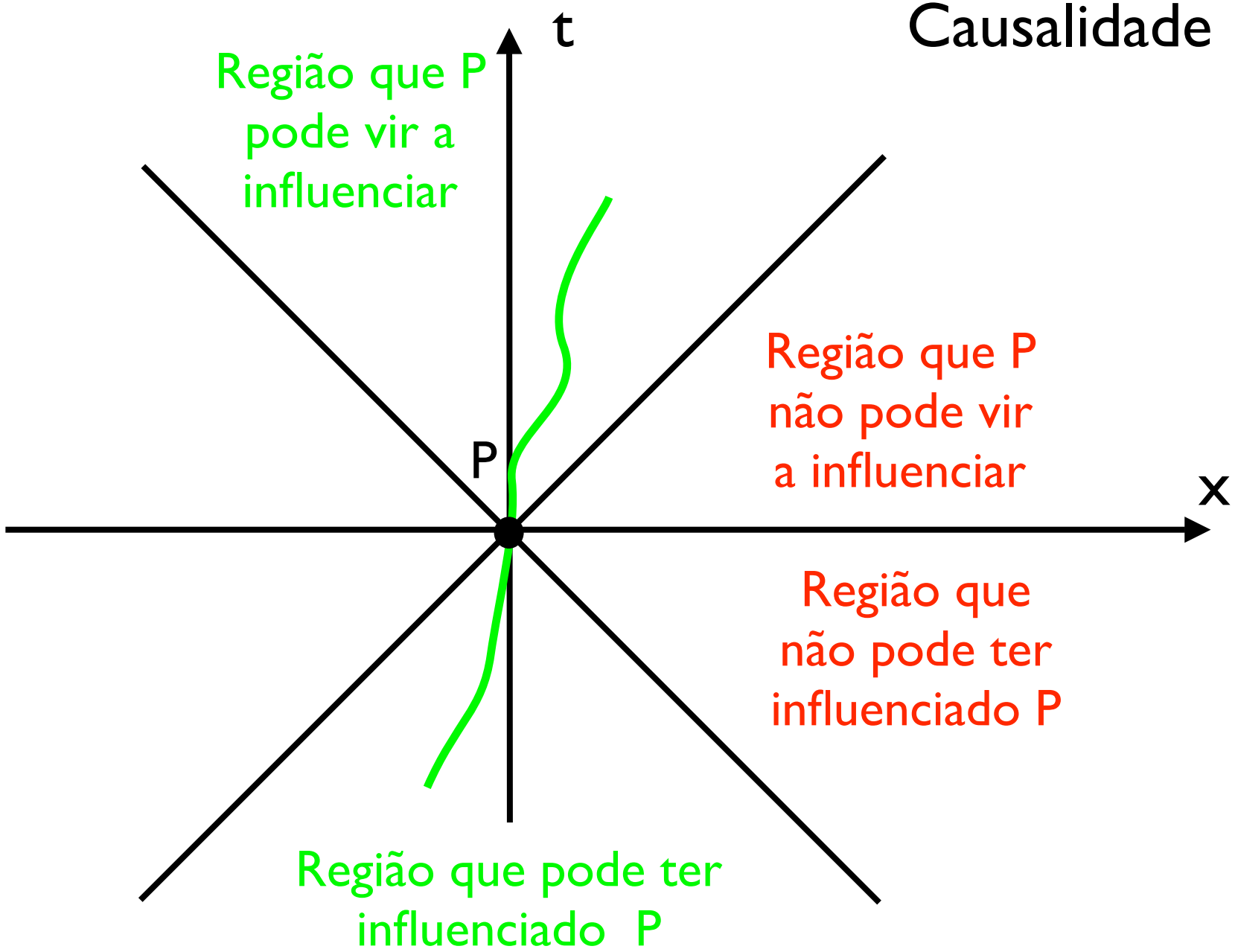
Planta há milionésimos de segundos

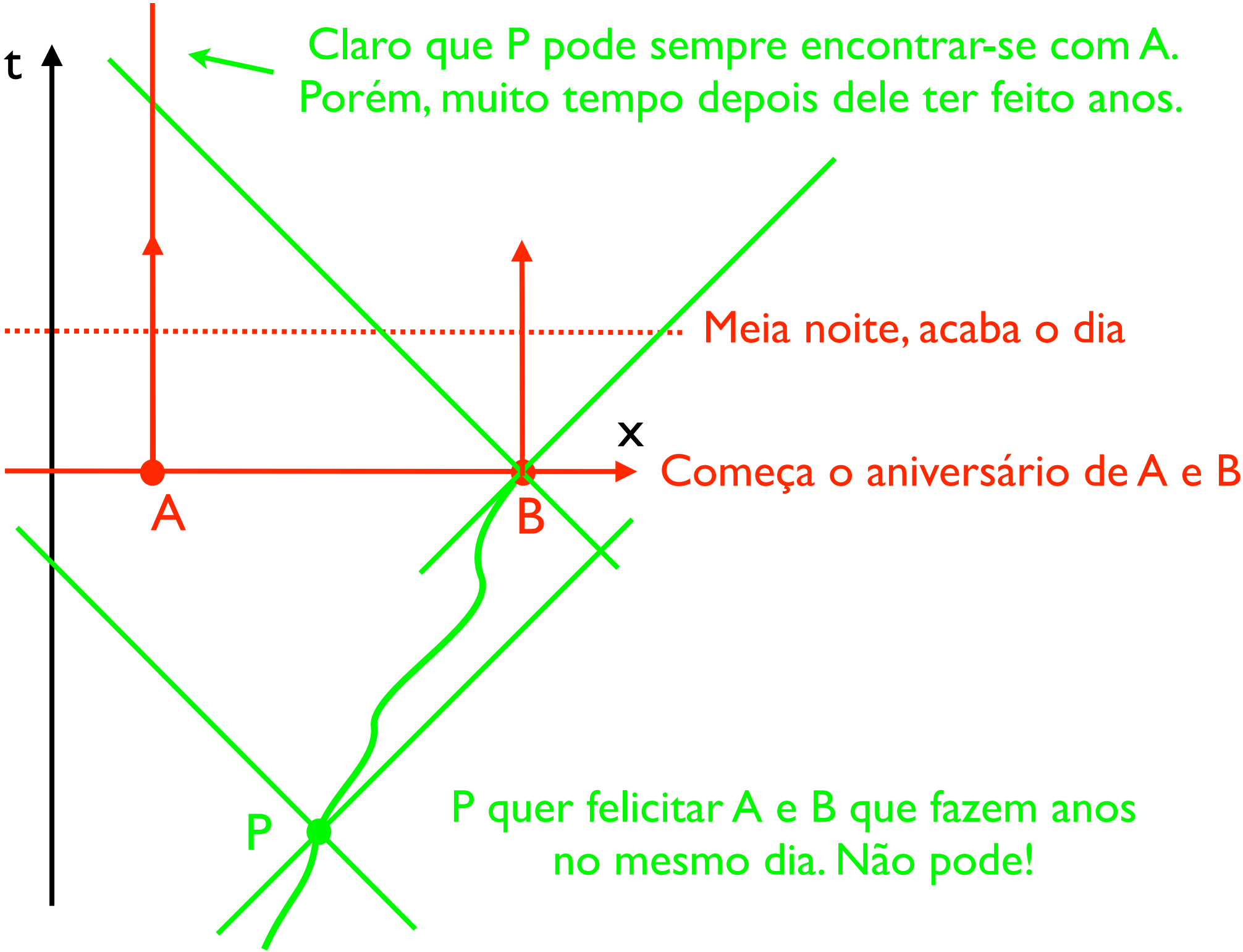

Velocidade
Mecânica Clássica
c
Realidade
Energia

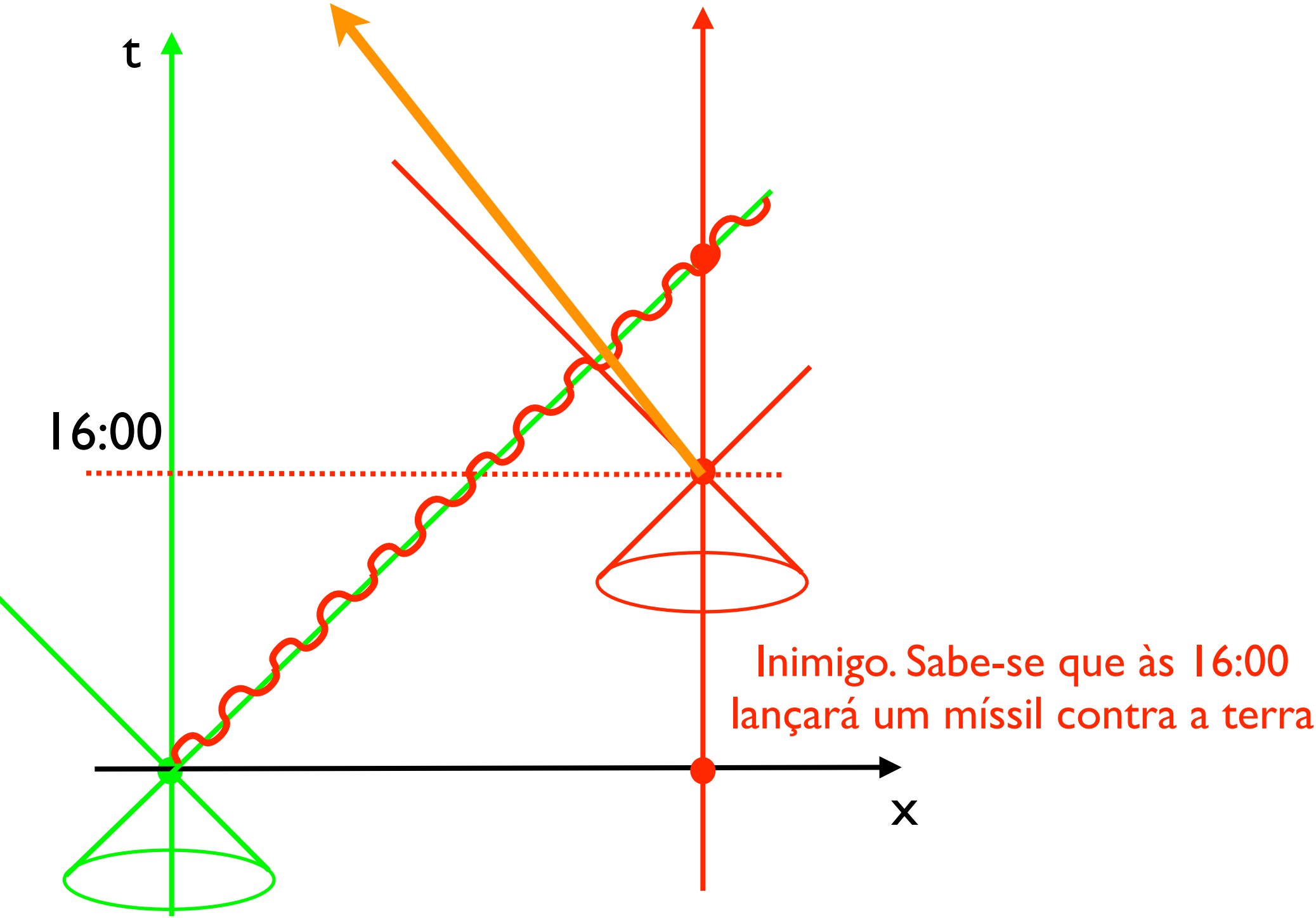
Cone de Luz


600.000.000 metros
Não Ok
Ok
1 segundo
c=300.000.000 m/seg

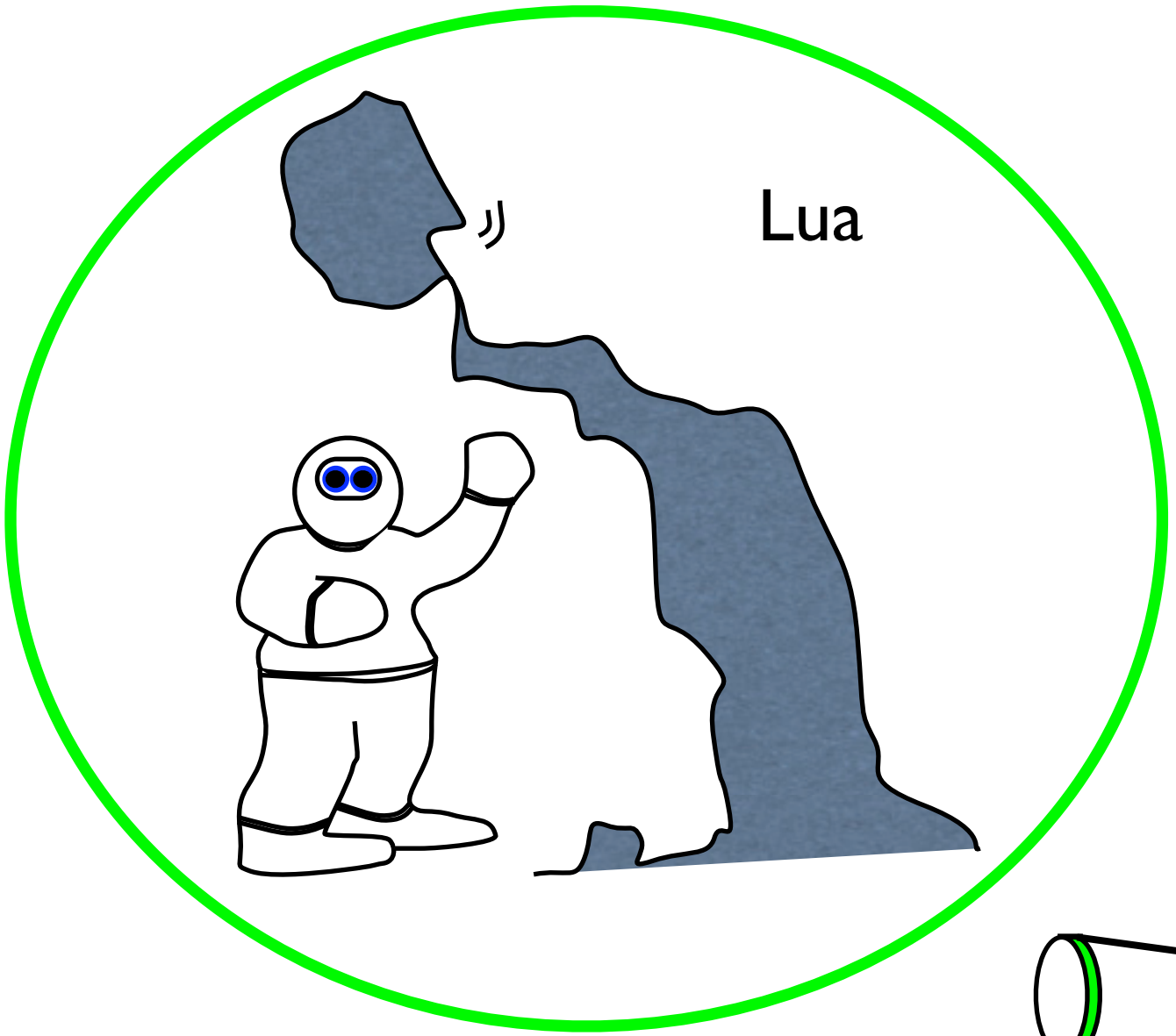
Causalidade




t
x
A
B
P
Claro que P pode sempre encontrar-se com A.
Porém, muito tempo depois dele ter feito anos.
Meia noite, acaba o dia
Começa o aniversário de A e B
P quer felicitar A e B que fazem anos
no mesmo dia. Não pode!

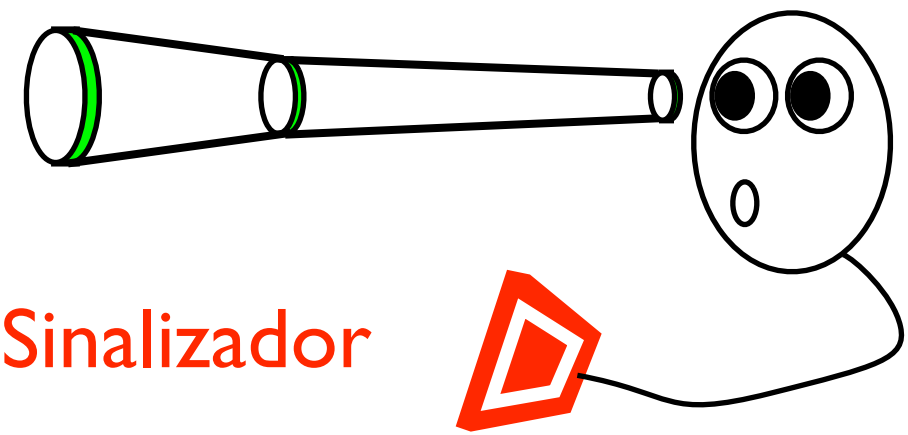


Inimigo. Sabe-se que às 16:00 lançará um míssil contra a terra

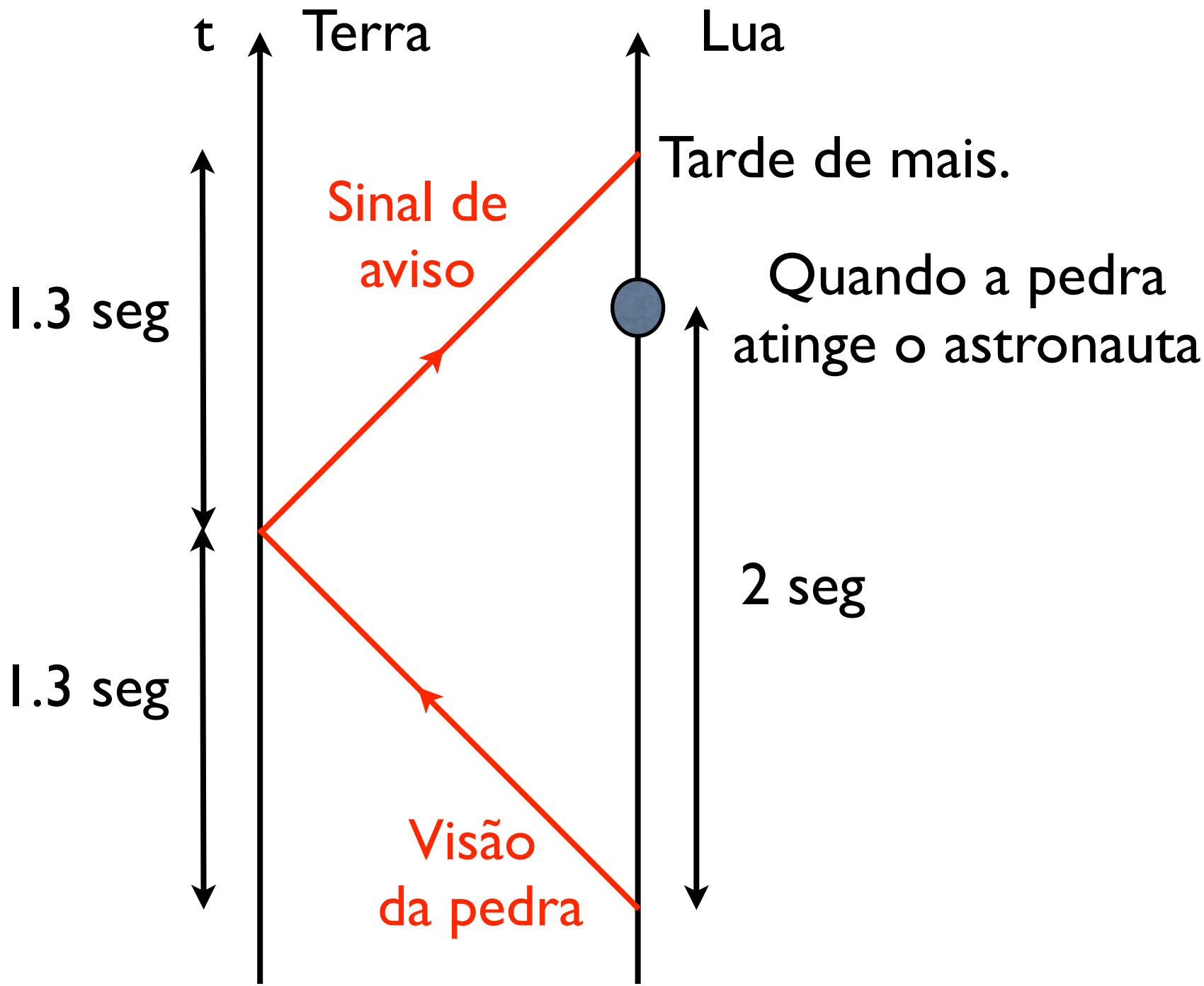


Terra

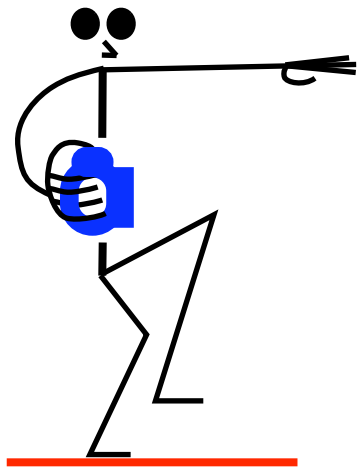
A pedra demorará 2 segundos a cair-lhe em cima mas como eu vejo o passado...

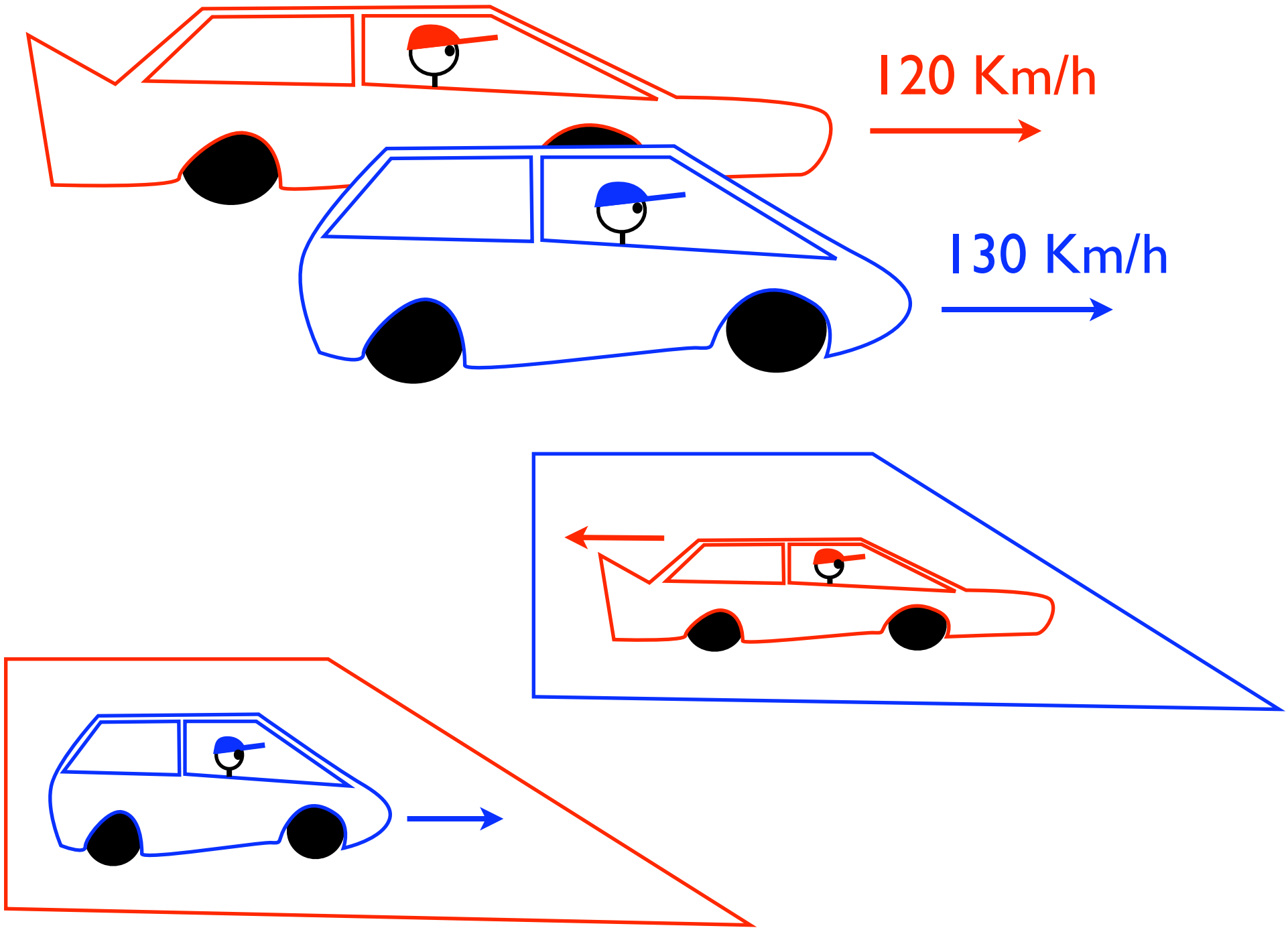


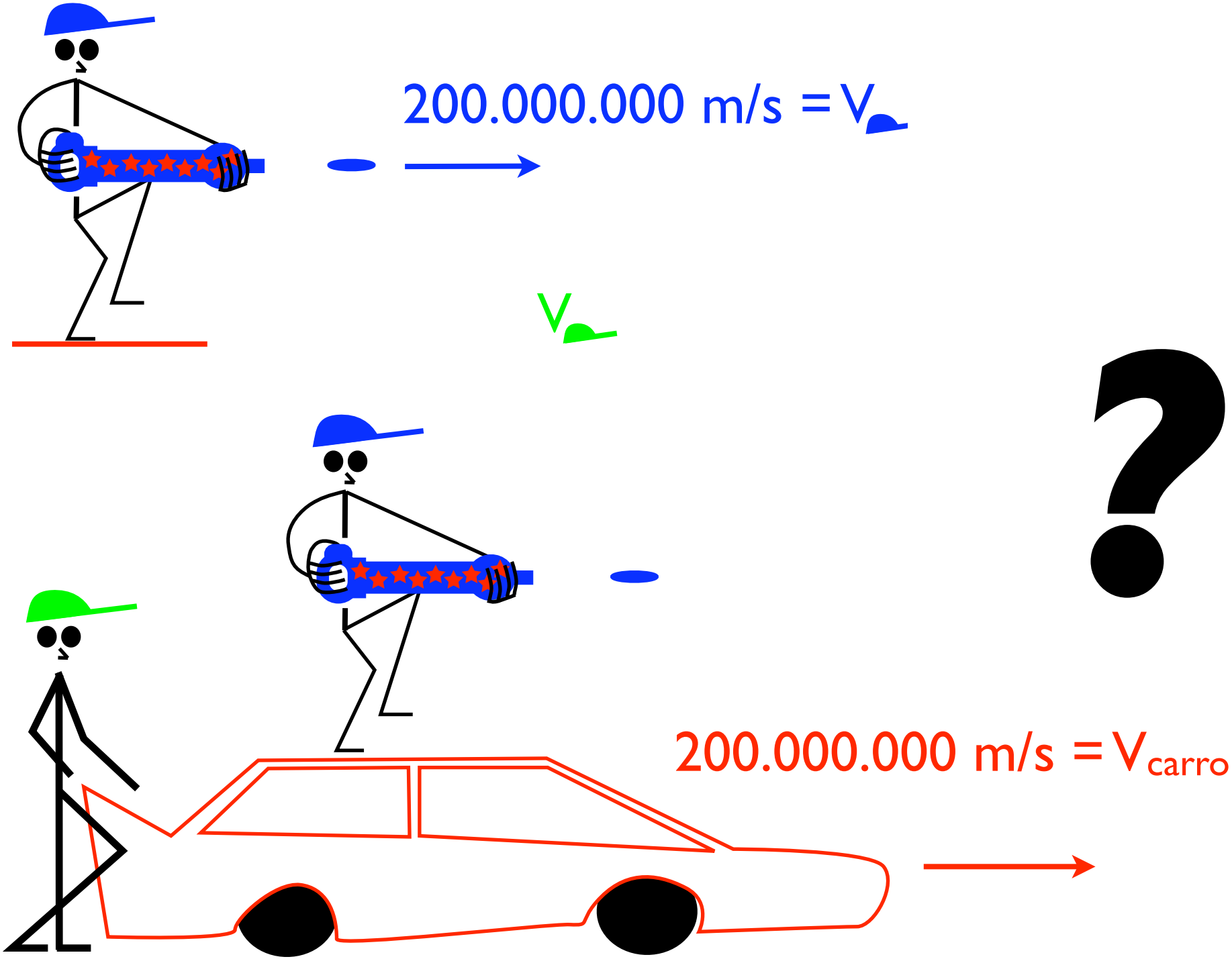
Sinalizador


t
Terra
Lua
Tarde de mais.
Sinal de
aviso
1.3 seg
Quando a pedra
atinge o astronauta
2 seg
1.3 seg
Visão
da pedra

Adição de velocidades




120 Km/h
130 Km/h


200.000.000 m/s = V
V
?
200.000.000 m/s = V carro

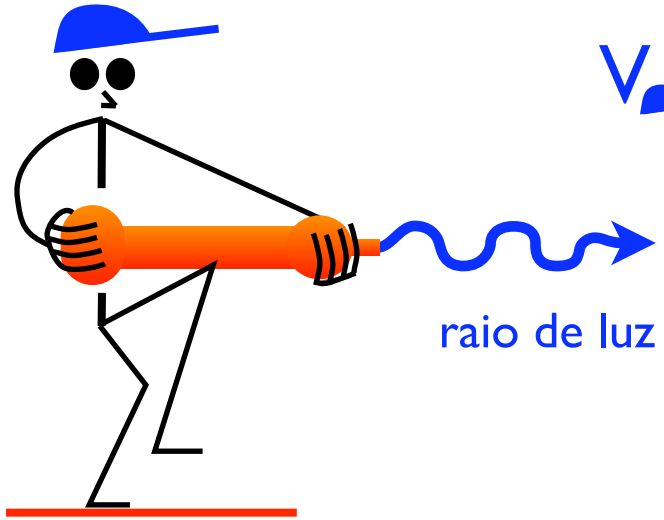
Não!

400.000.000 m/s > 300.000.000 m/s = c

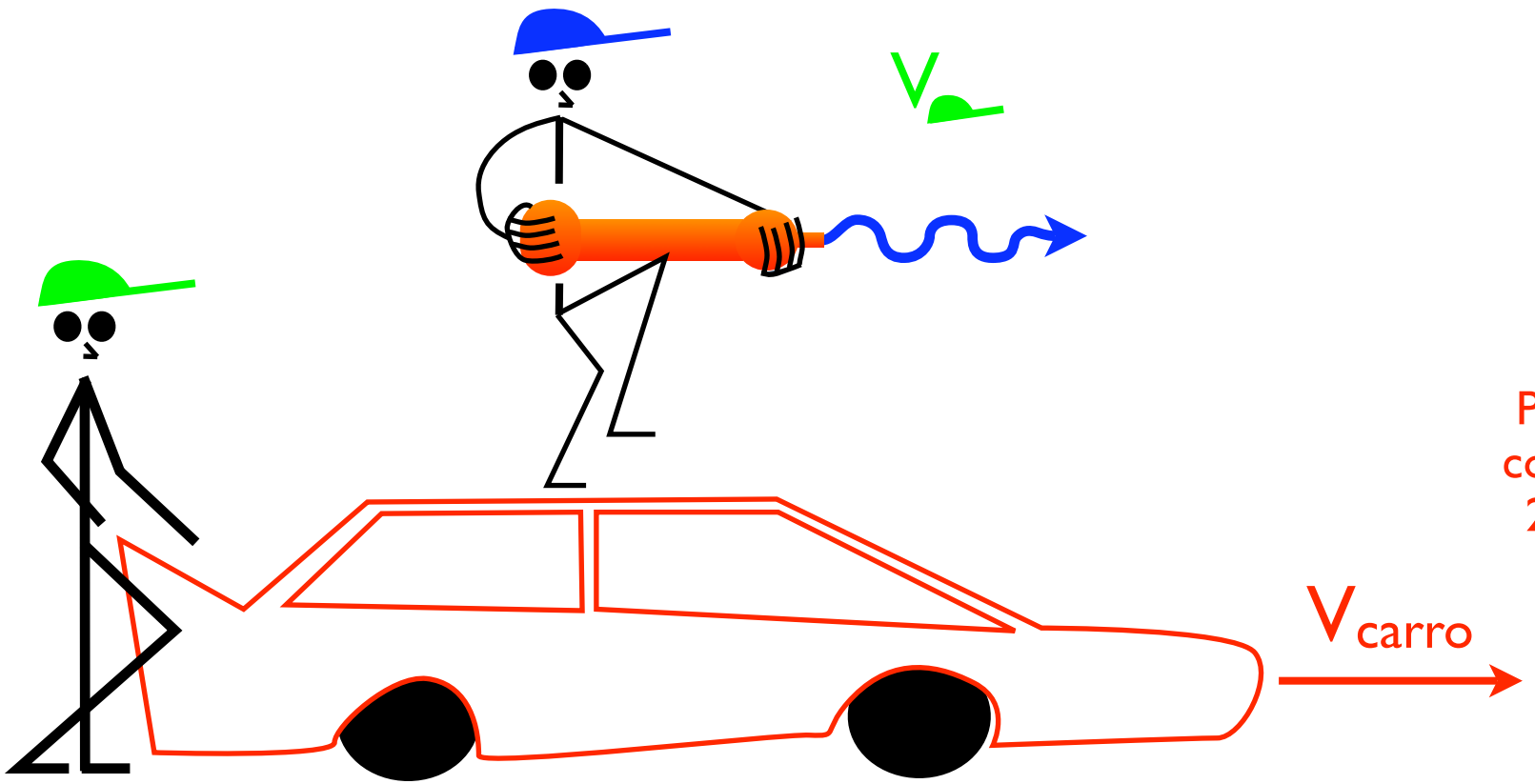
O cálculo que parecia normal tem um erro de pelo menos 100.000.000 m/s !

O Postulado

$V_{\text{luz}} = 300.000.000 \text{ m/s} = c$

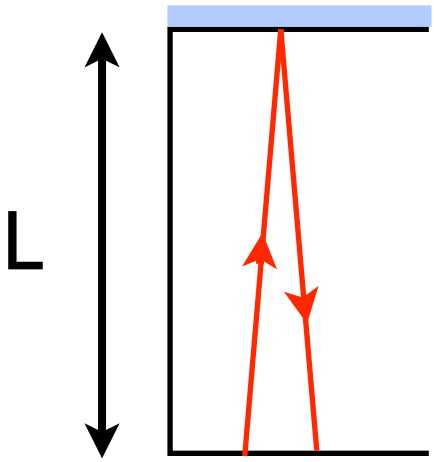


raio de luz



Pode ser qualquer coisa, (por exemplo 200.000.000 m/s)

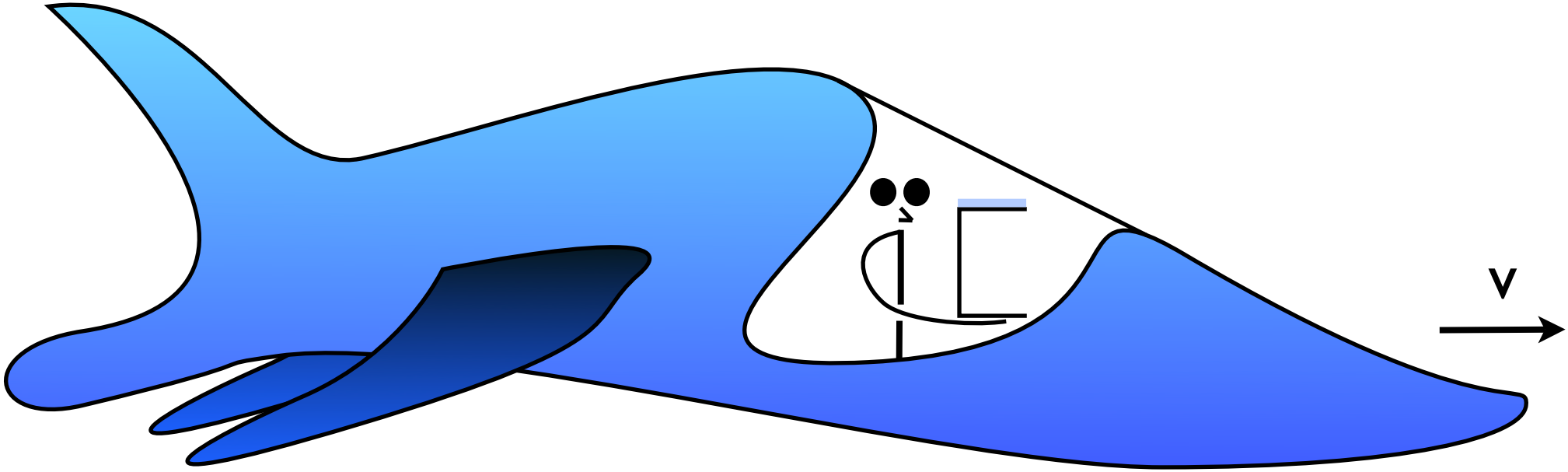
Dilatação do Tempo



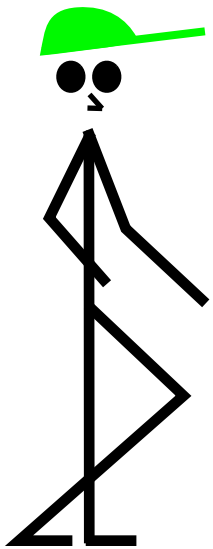
Relógio de luz

$$t = \frac{2L}{c}$$

velocidade = $\frac{\text{distância}}{\text{tempo}}$

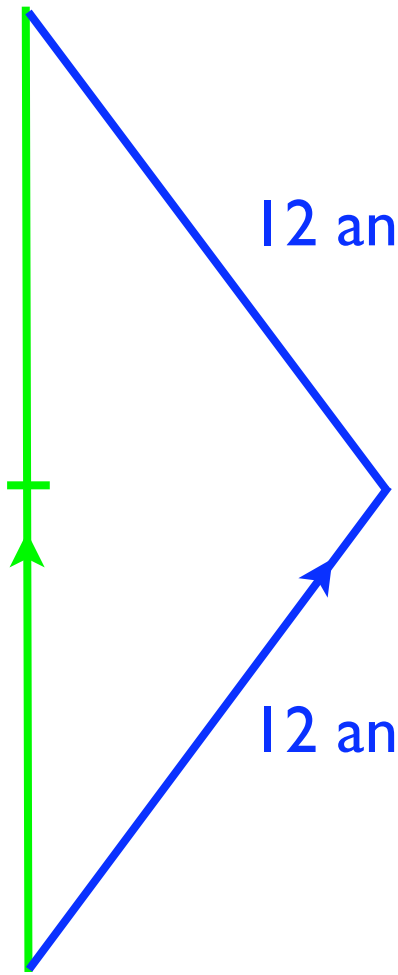


t' , o tempo medido por alguém em **terra**,
é **maior** do que
t , o tempo medido por alguém na **nave**



$$t' = \frac{t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Se eu, na nave, a 240.000.000 m/s (0.8c), jogar um jogo de xadrez de 120 minutos, um espectador, na terra, dirá que o jogo demorou 200 minutos.



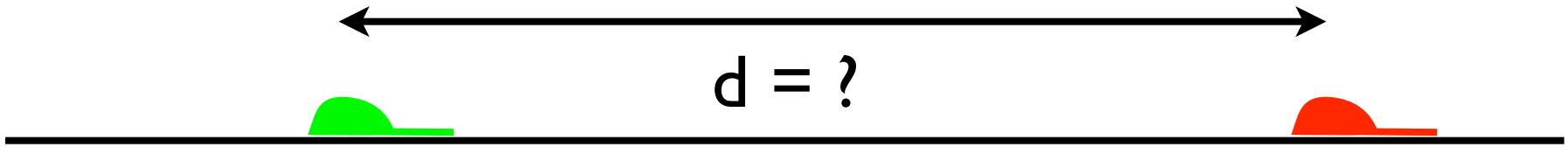
V = 0.8c

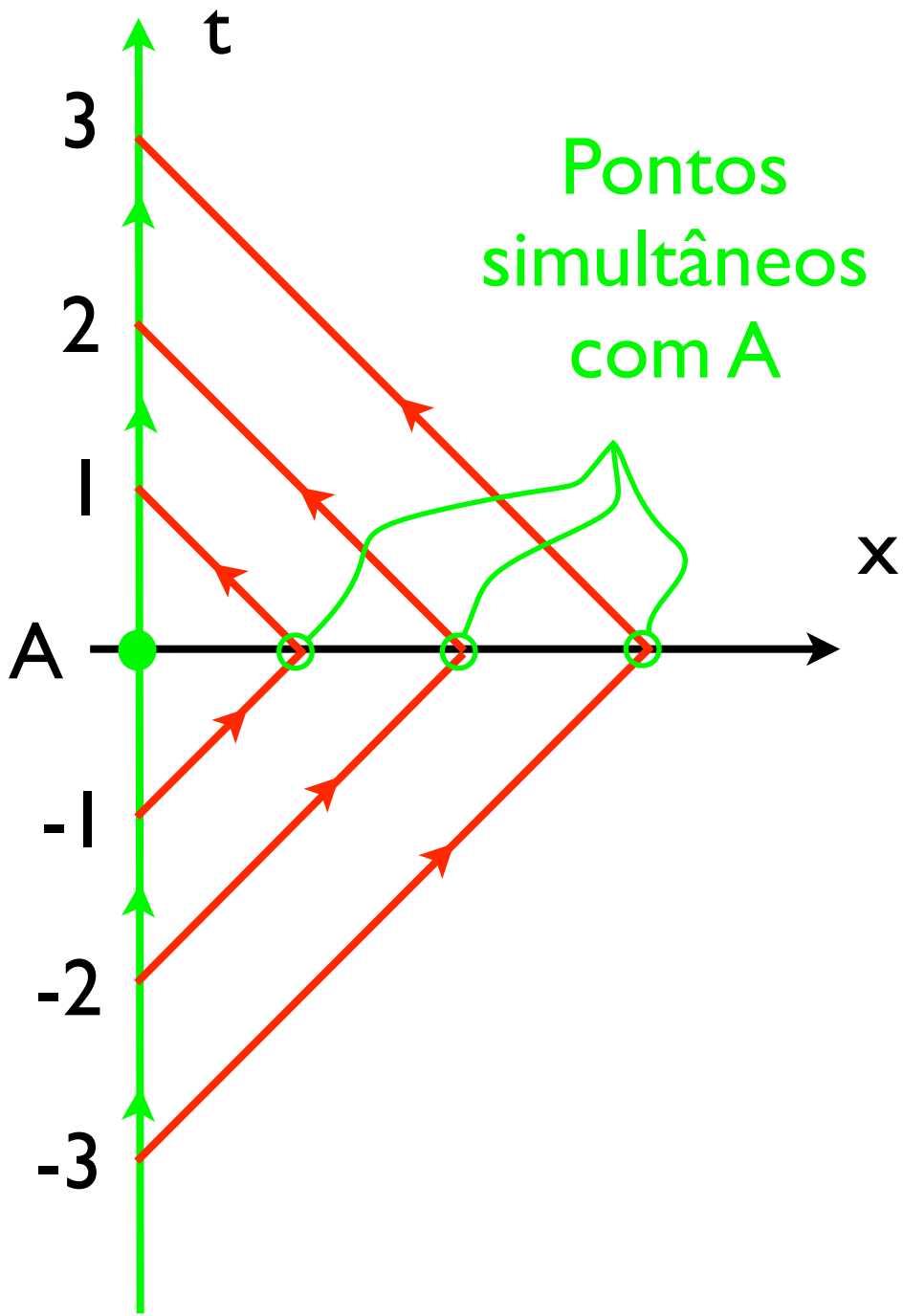
12 anos a afastar e
12 anos a aproximar

Palavras chave

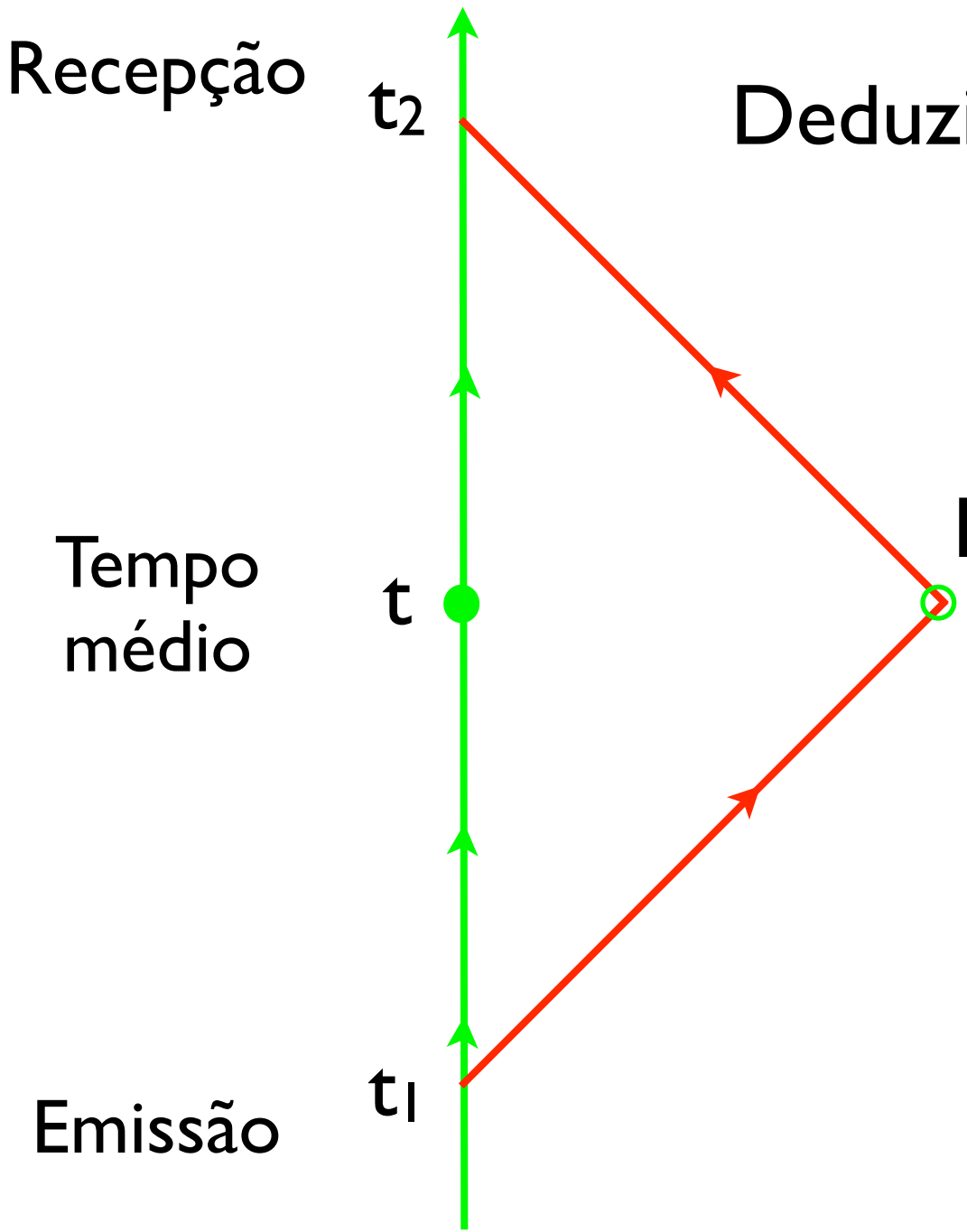
- Diagramas de Espaço-Tempo
- Velocidade da Luz
- Cone de Luz
- Adição de velocidades
- Postulado
- Dilatação do Tempo

Distâncias e Simultaneidade


d = ?


t
3
2
1
A
-1
-2
-3
x
Pontos
simultâneos
com A

Limite não relativista
Paradoxo Gémeos
Simultaneidade



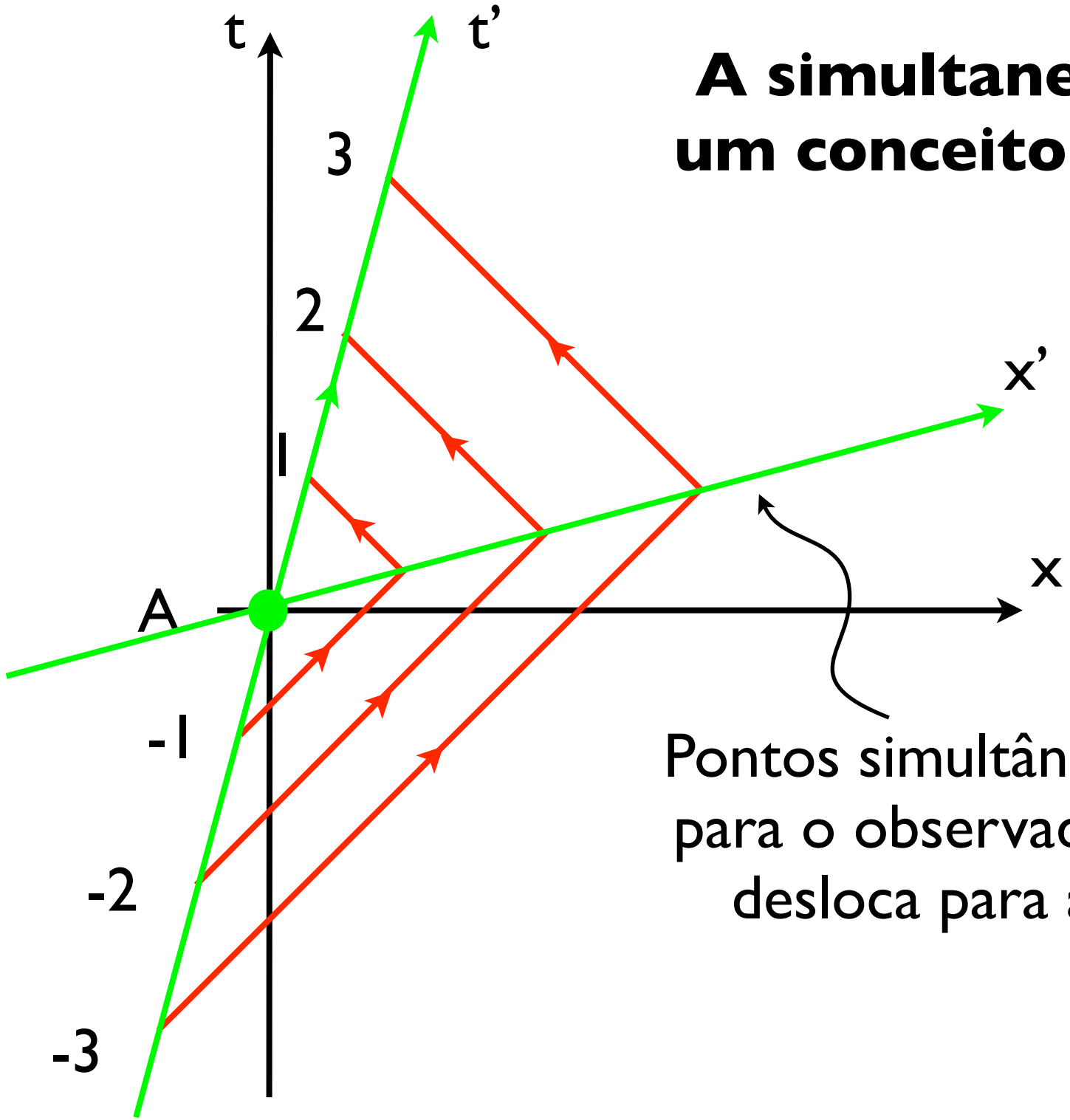
Deduzimos que P ocorreu no instante de tempo

$$t = t_1 + \frac{t_2 - t_1}{2} = \frac{t_1 + t_2}{2}$$

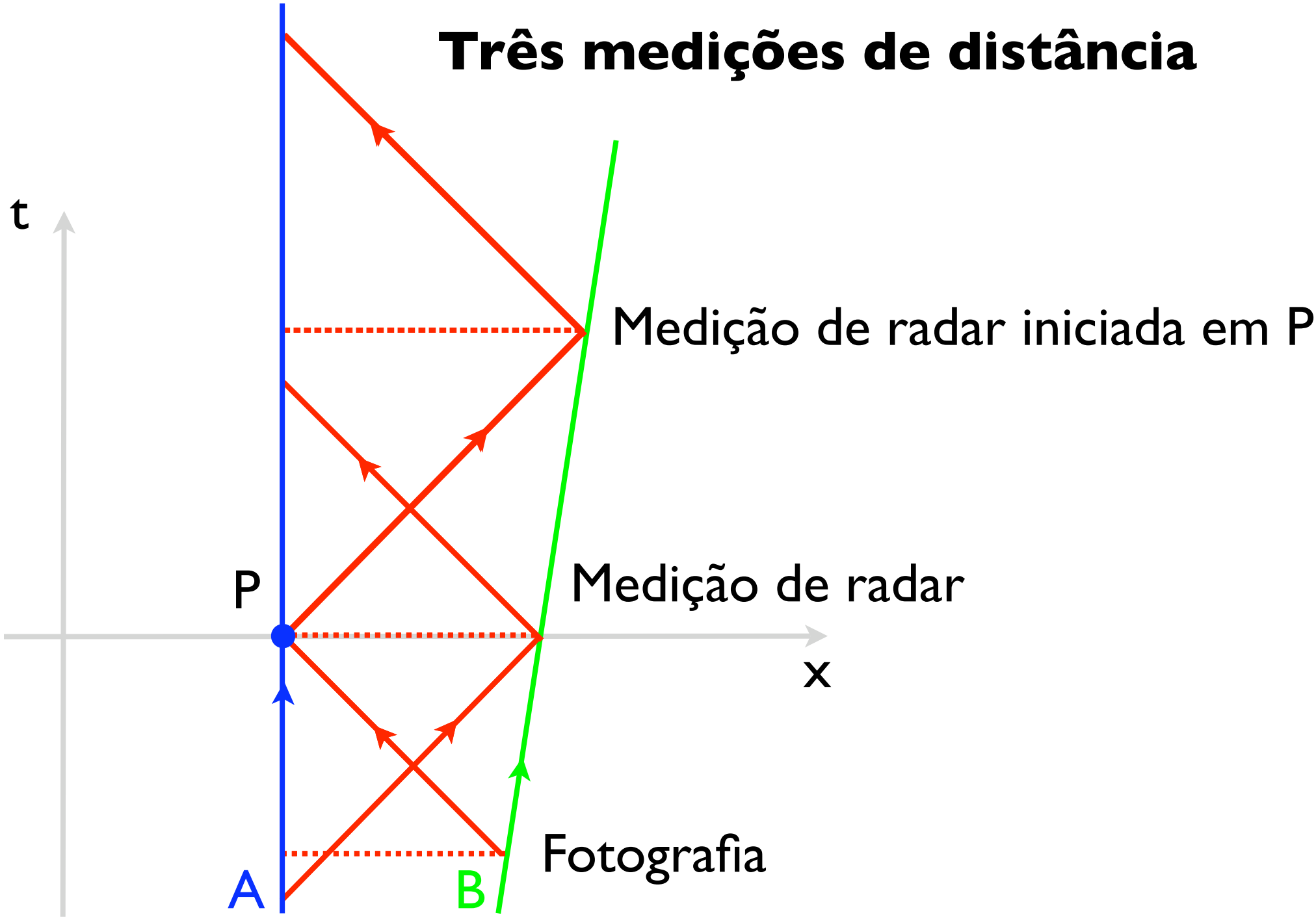
na posição

$$x = \frac{t_2 - t_1}{2}\, c$$

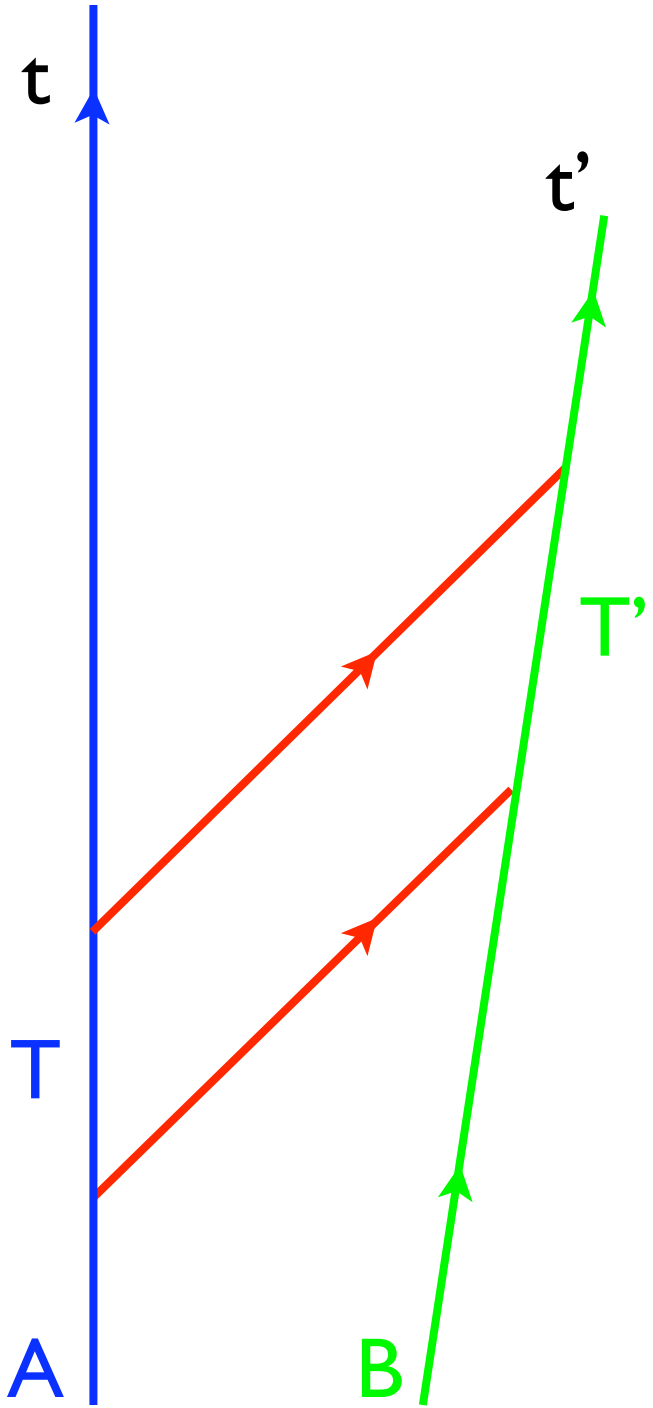
A simultaneidade é um conceito relativo



Pontos simultâneos com A para o observador que se desloca para a direita


Três medições de distância
t
x
P
A
B
Medição de radar iniciada em P
Medição de radar
Fotografia

Cálculo K



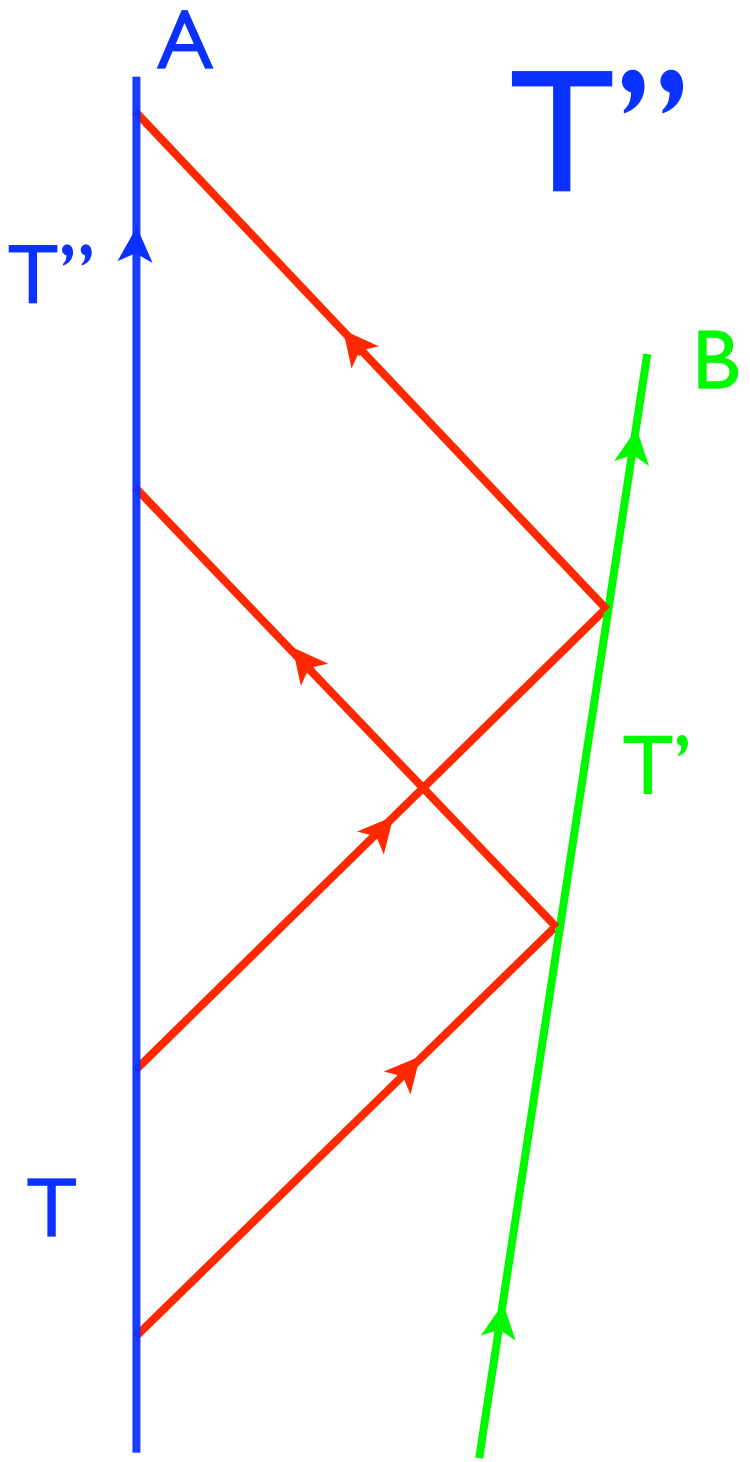
$$T' = K\,T$$

ou, melhor,

$$T_B = K_{BA}\,T_A$$

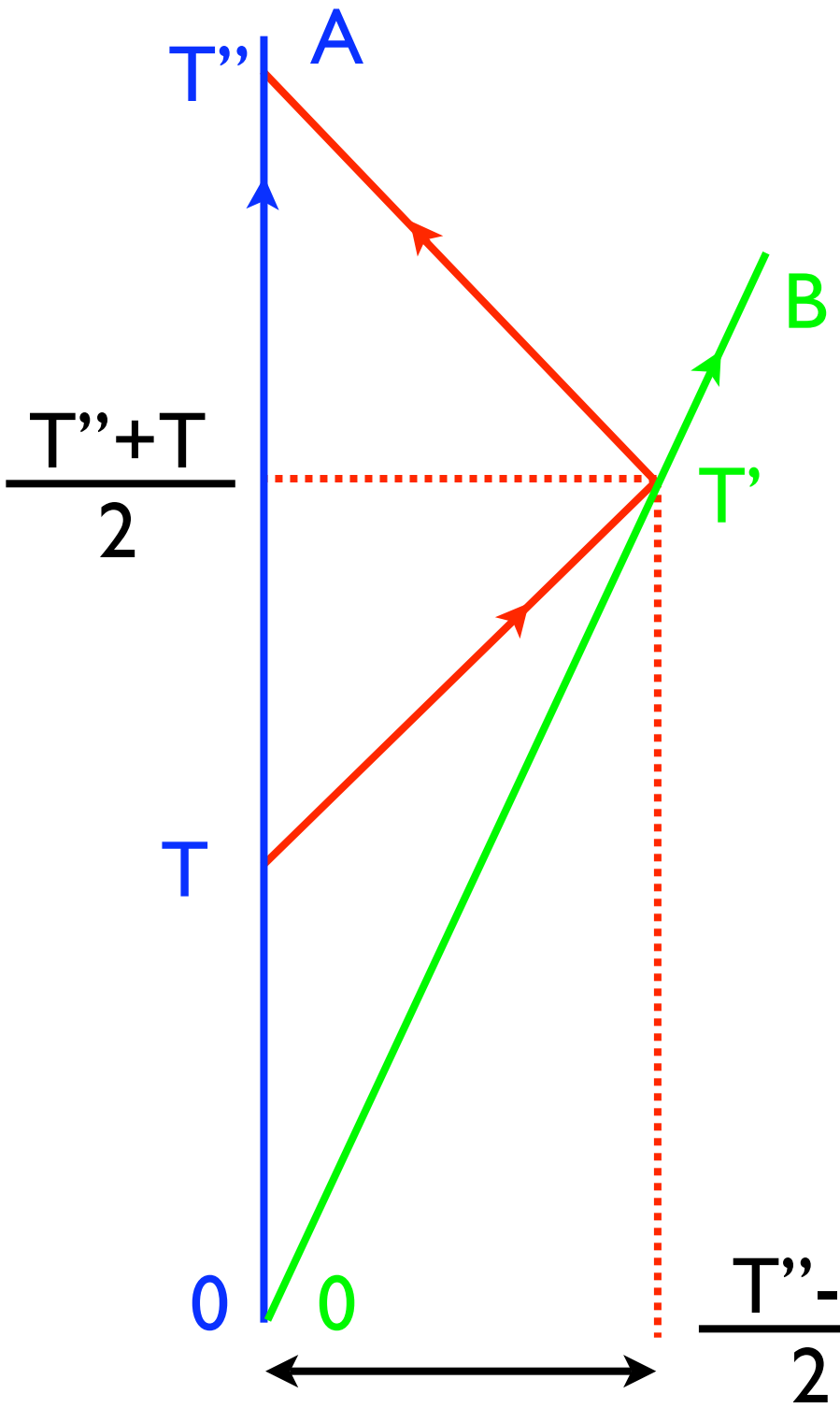
Princípio da Relatividade:

$$K_{AB} = K_{BA} = K$$



$$T'' = KT' = K(K\,T)$$

$$T'' = K^2\,T$$

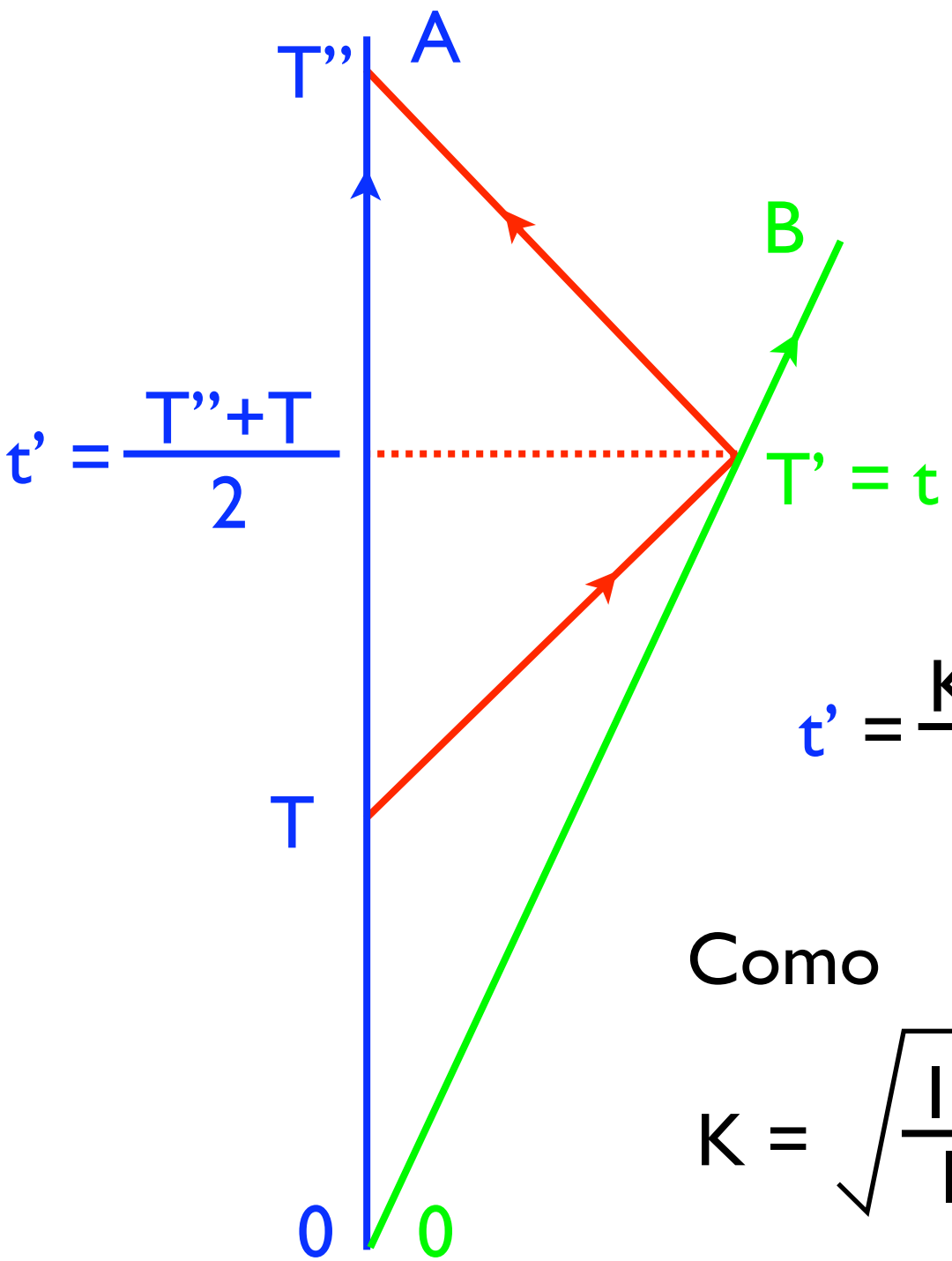


$$V = \frac{\frac{T''-T}{2}}{\frac{T''+T}{2}} c = \frac{K^2 T - T}{K^2 T + T} c$$

$$\frac{V}{c} = \frac{K^2 - 1}{K^2 + 1}$$

$$K = \sqrt{\frac{1+V/c}{1-V/c}}$$

Dilatação do Tempo



$T' = KT$ OK

$T'' = KT'$ OK

$t' = \frac{K^2 + 1}{2} T$ OK

$t' = \frac{K^2 + 1}{2K} t$ nada normal

Como

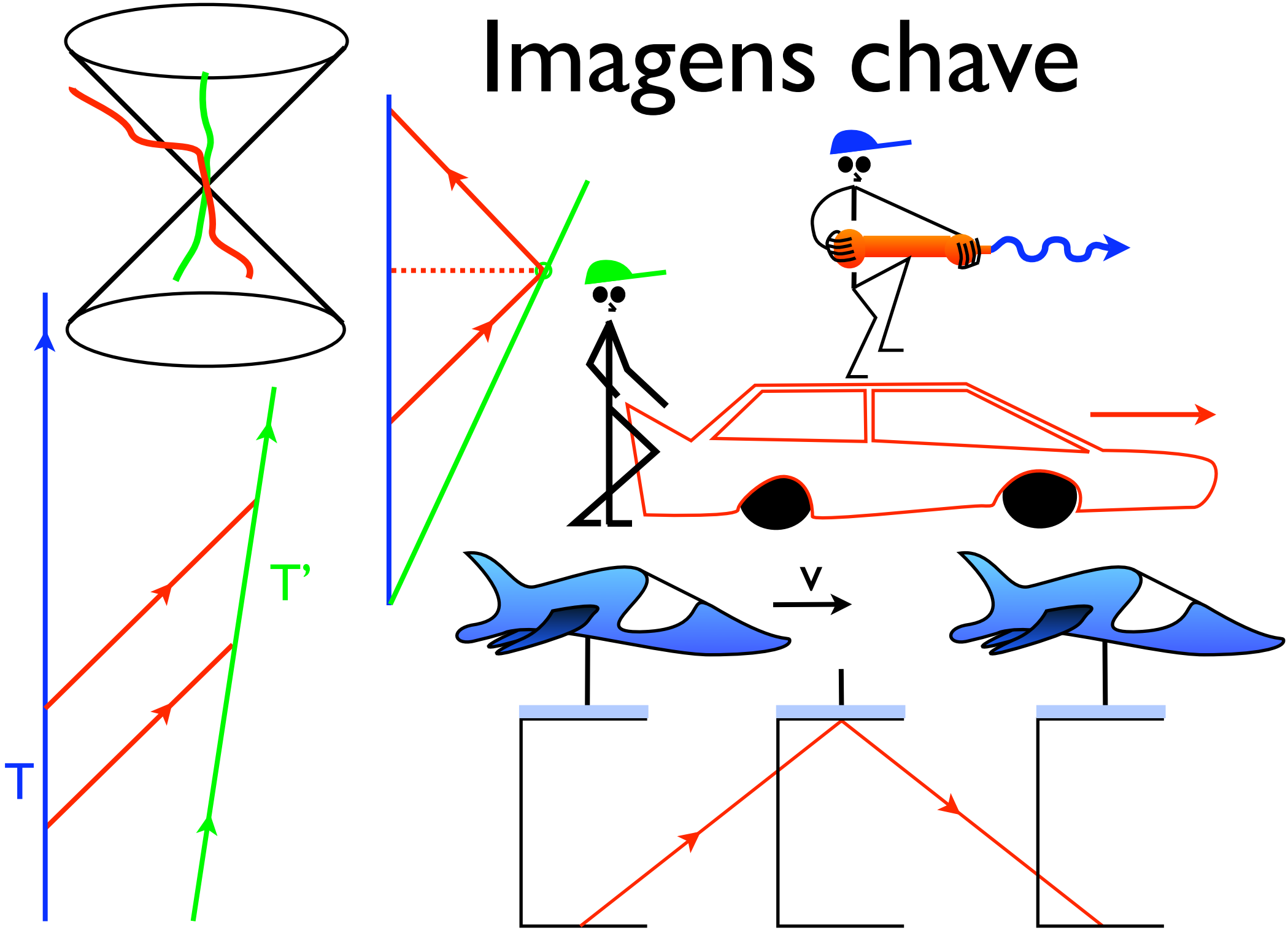
$K = \sqrt{\frac{1+V/c}{1-V/c}}$,

$$t' = \frac{t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

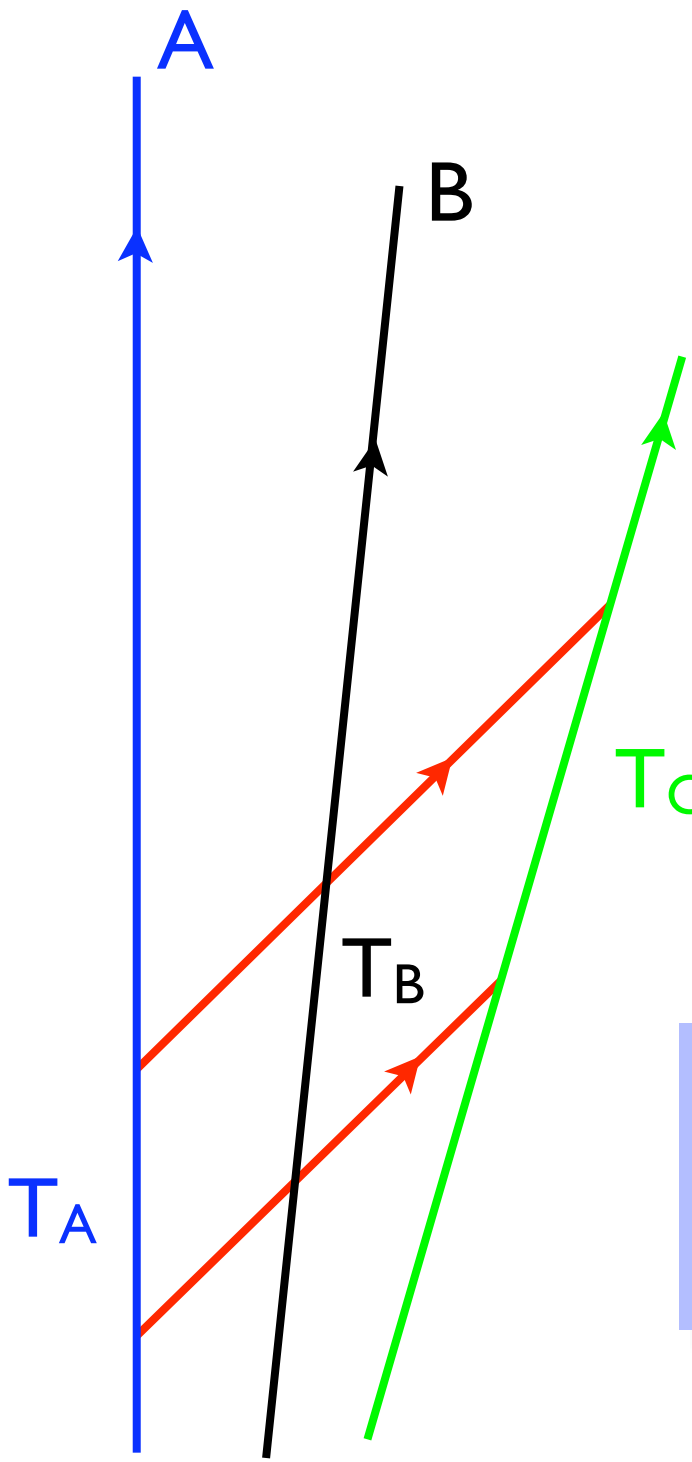
Palavras chave

- Diagramas de Espaço-Tempo
- Velocidade da Luz
- Cone de Luz
- Adição de velocidades
- Postulado
- Dilatação do Tempo
- Distâncias e Simultaneidade
- Cálculo K
- Dilatação do Tempo

Imagens chave



Adição de velocidades



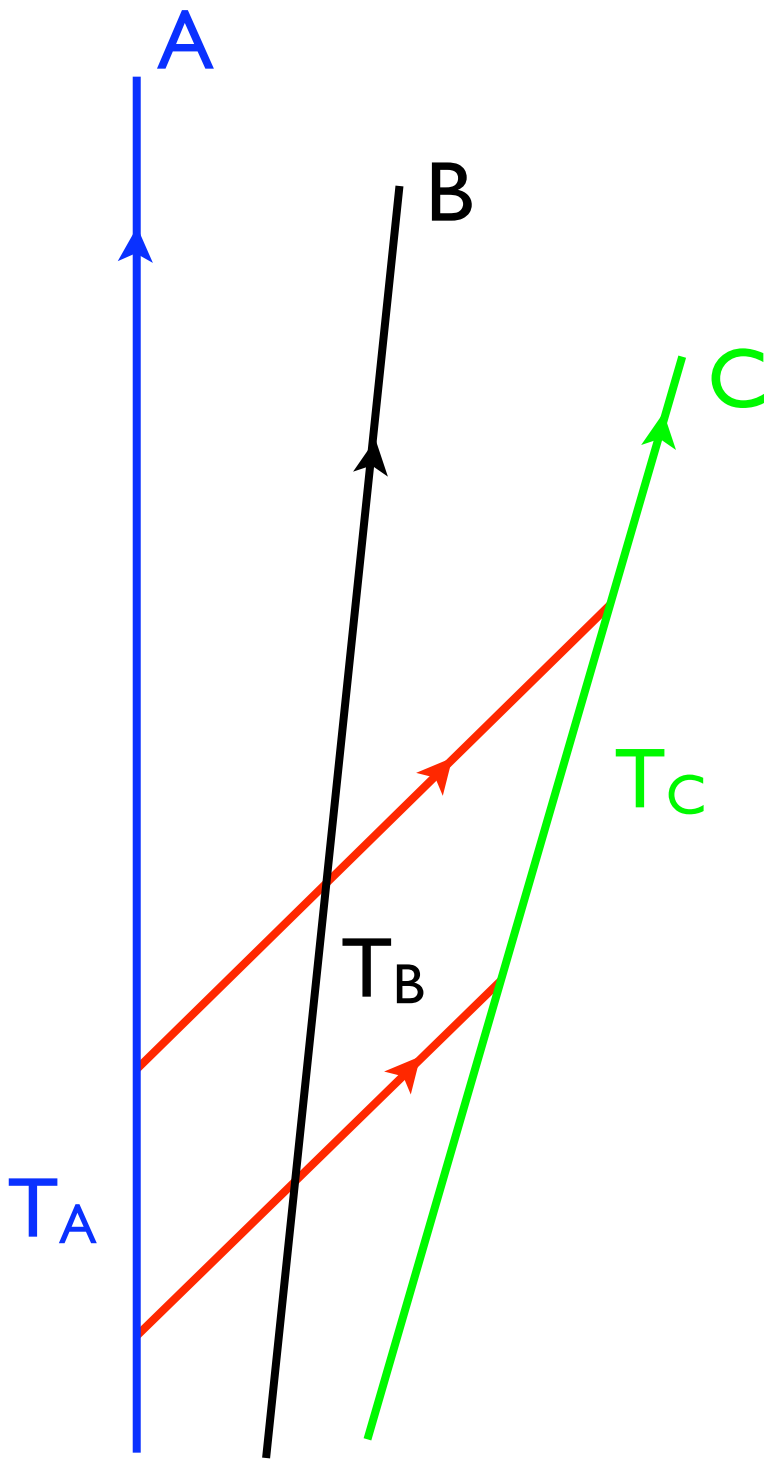
$$T_B = K_{BA}\, T_A$$

$$T_C = K_{CA}\, T_A$$

$$= K_{CB}\, T_B$$

$$= K_{CB}\, K_{BA}\, T_A$$

$$K_{CA} = K_{CB}\, K_{BA}$$



$$(K_{CA})^2=(K_{CB})^2(K_{BA})^2$$

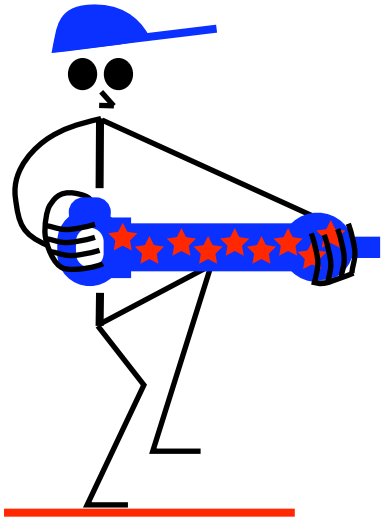
V_{CA} = Velocidade de C vista por A

V_{CB} = Velocidade de C vista por B

V_{BA} = Velocidade de B vista por A

$$\frac{1+V_{CA}/c}{1-V_{CA}/c} = \frac{1+V_{CB}/c}{1-V_{CB}/c}\,\frac{1+V_{BA}/c}{1-V_{BA}/c}$$

$$V_{CA} = \frac{V_{CB}+V_{BA}}{1+\dfrac{V_{CB}V_{BA}}{c^2}}$$



200.000.000 m/s

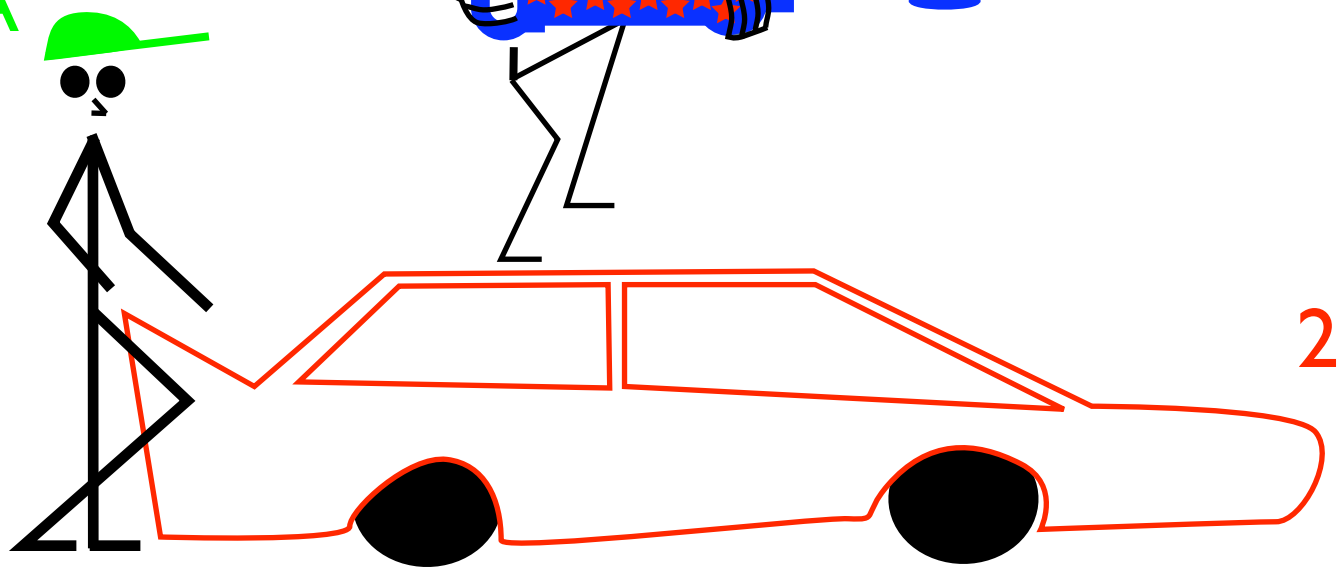
$$V_{CA} = \frac{V_{CB} + V_{BA}}{1 + \frac{V_{CB}\,V_{BA}}{c^2}}$$

$V_{\_\_} =$

B

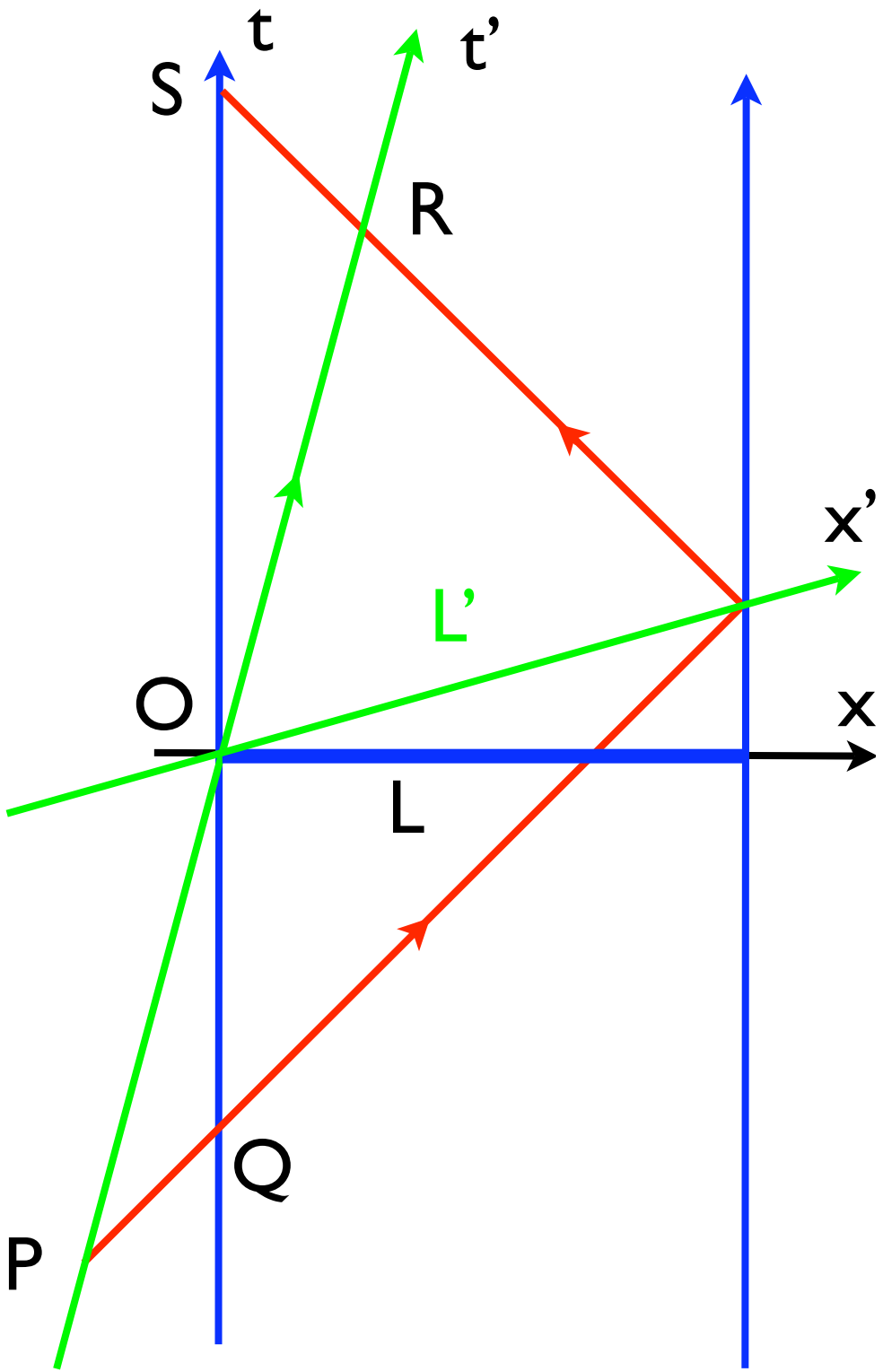
C

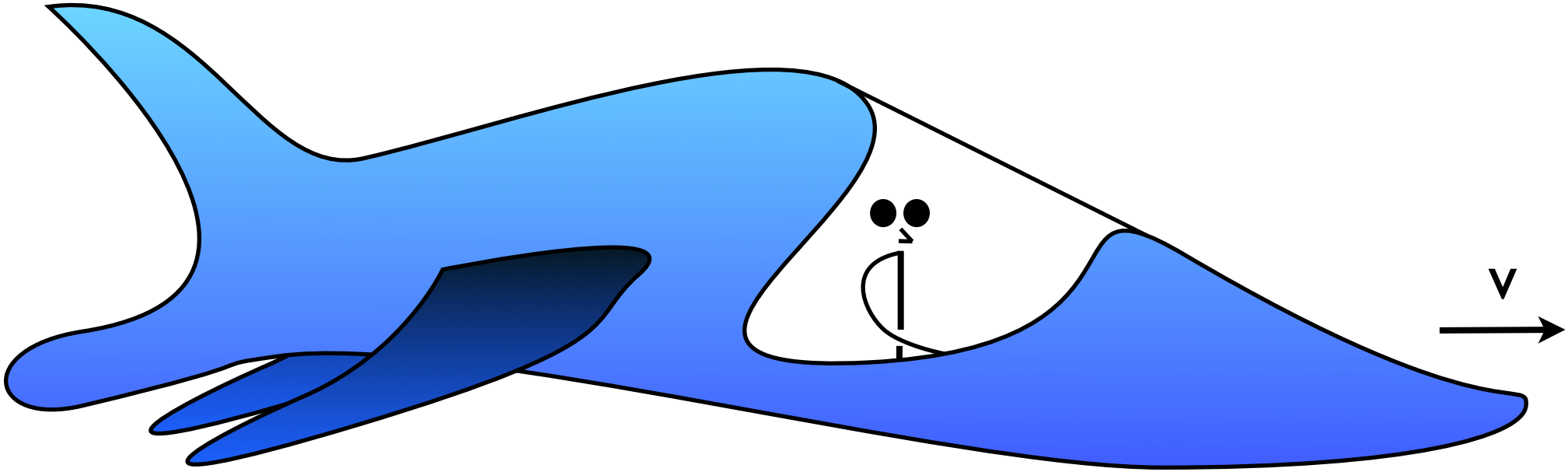
A



200.000.000 m/s

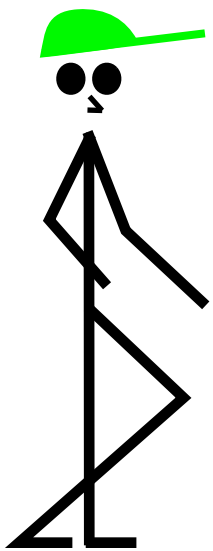
Contracção do Espaço


t
t’
S
R
x’
L’
O
x
L
Q
P

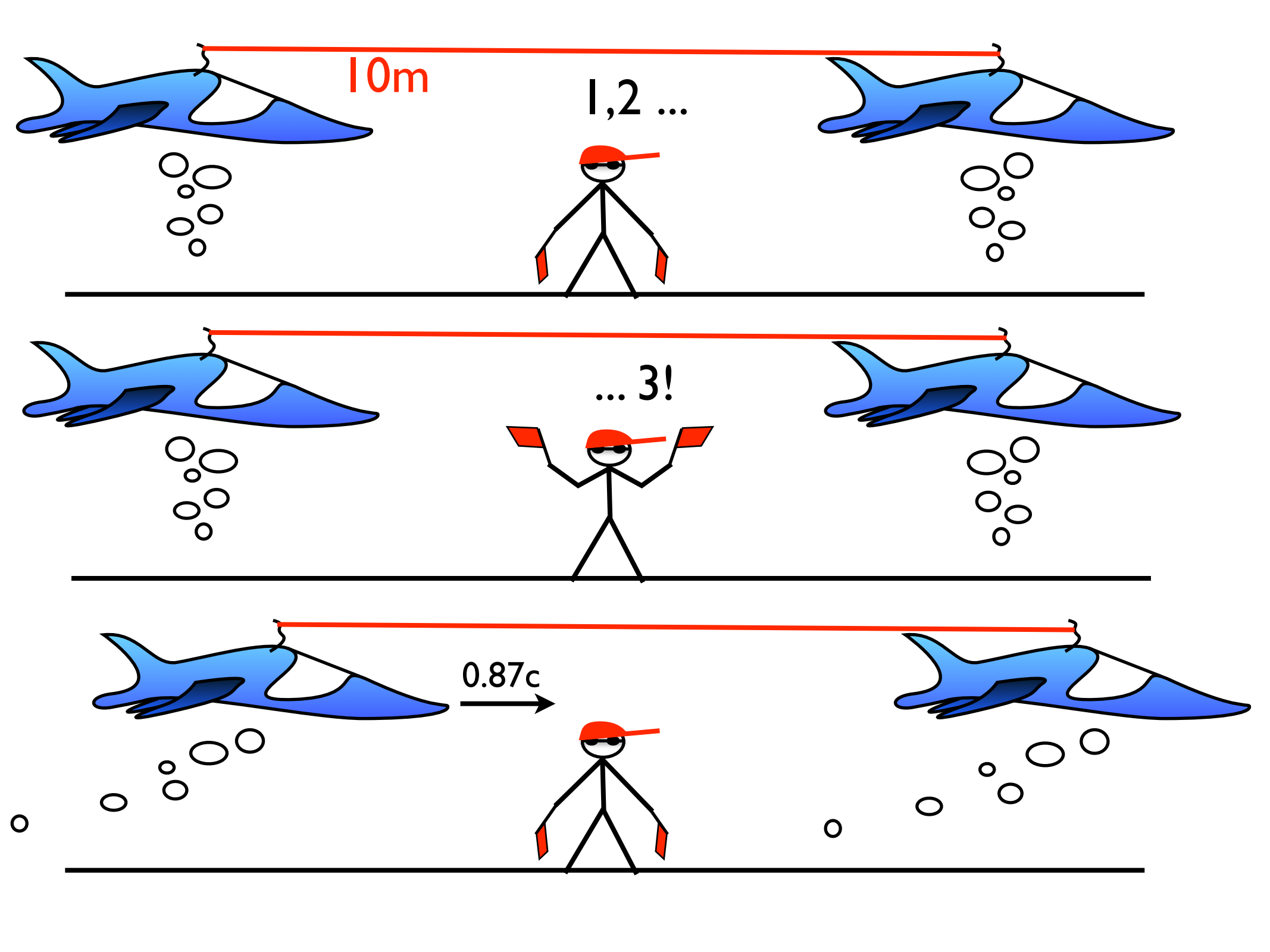


t' , o tempo medido em **terra**, é **maior** do que t , o tempo medido na **nave.**

L' , o comprimento medido em **terra**, é **menor** do que L , o comprimento medido na **nave.**

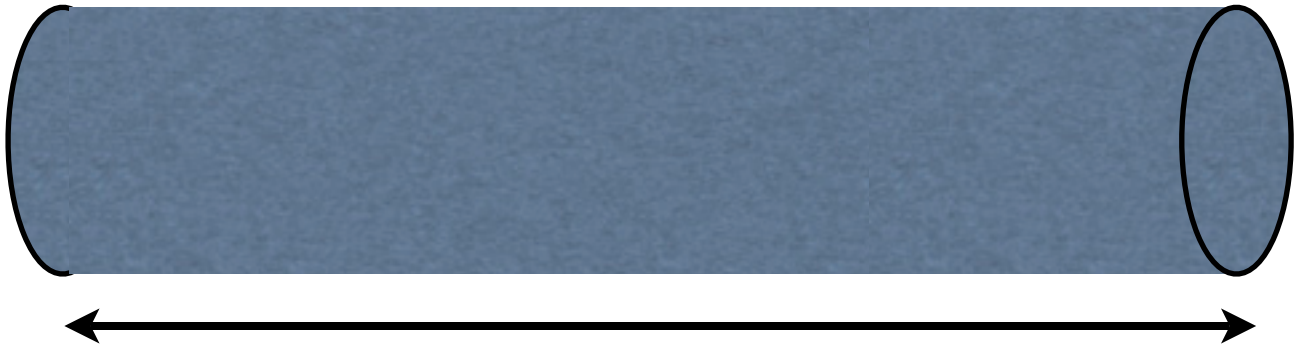


$$L' = L\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad , \quad t' = \frac{t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$


10m
1,2 ...
... 3!
0.87c


Sim

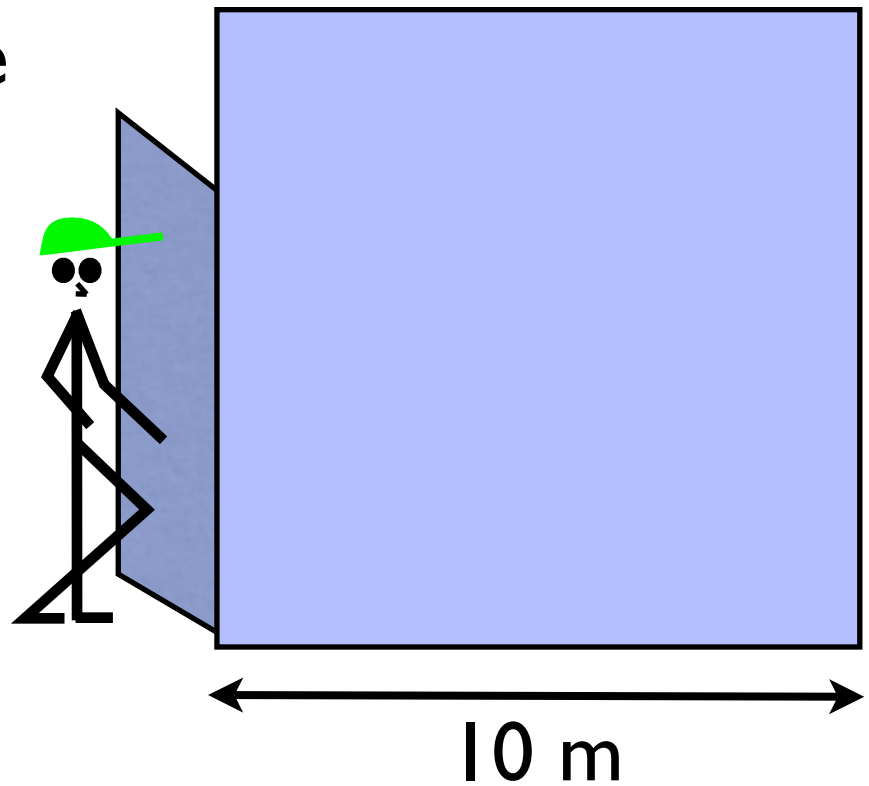
Queremos colocar



20 m

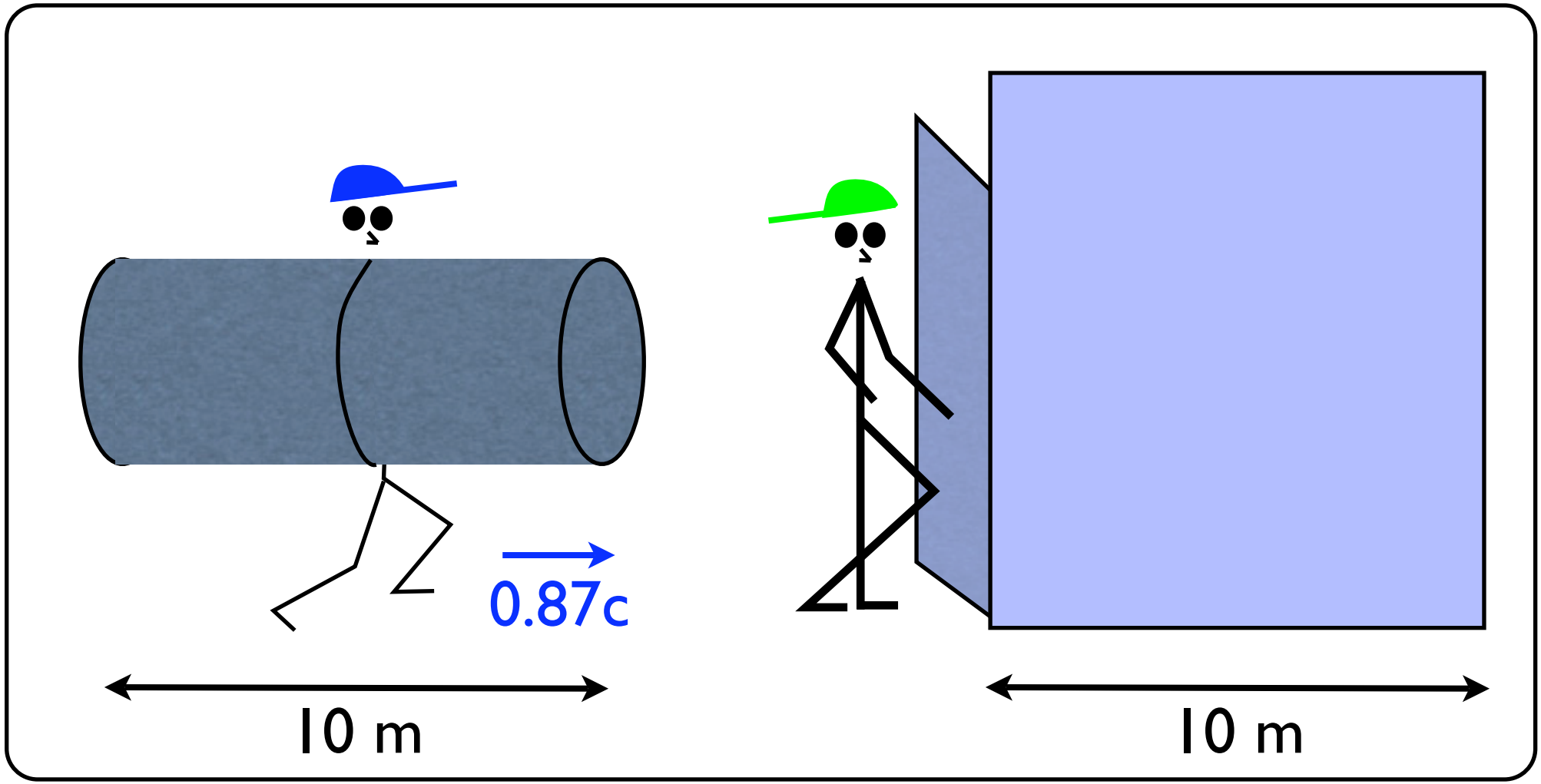
Barra de borracha

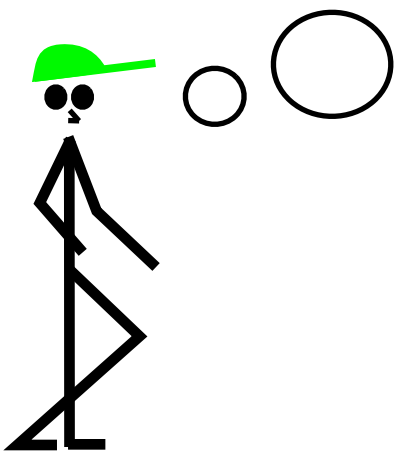
dentro de



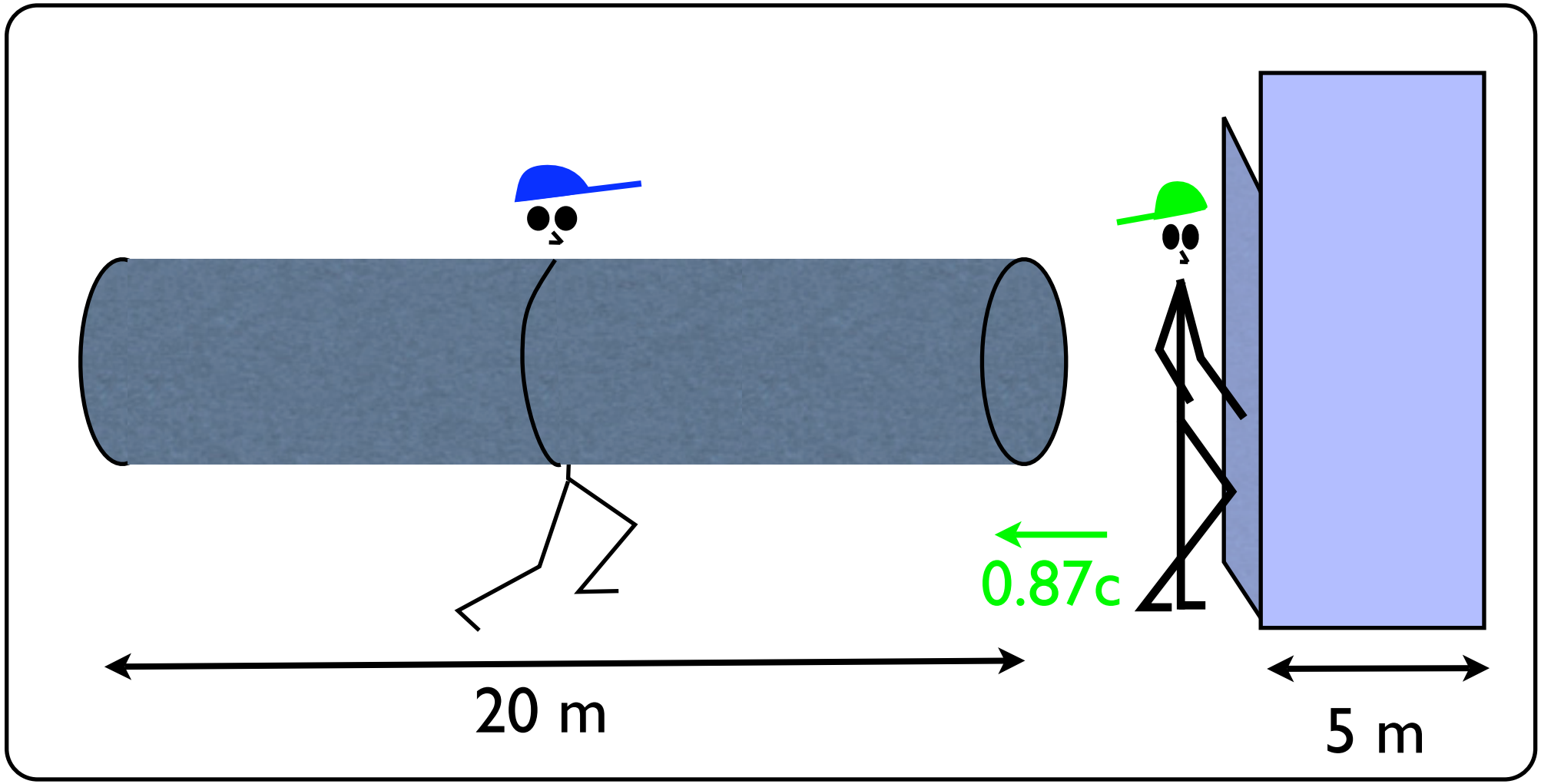
10 m

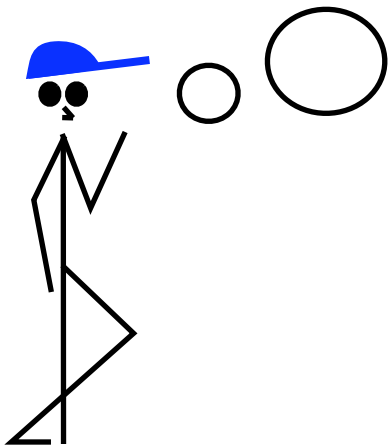
Garagem





Facil, basta correres a 260.000.000 m/s para a barra ficar com 10 metros. Depois, assim que entrares na garagem, eu fecho a porta.





Calma!, para mim é a garagem que vem em minha direcção a 260.000.000 m/s por isso ela é que fica mais pequena, com apenas 5 metros!

Conseguimos colocar a barra na garagem?

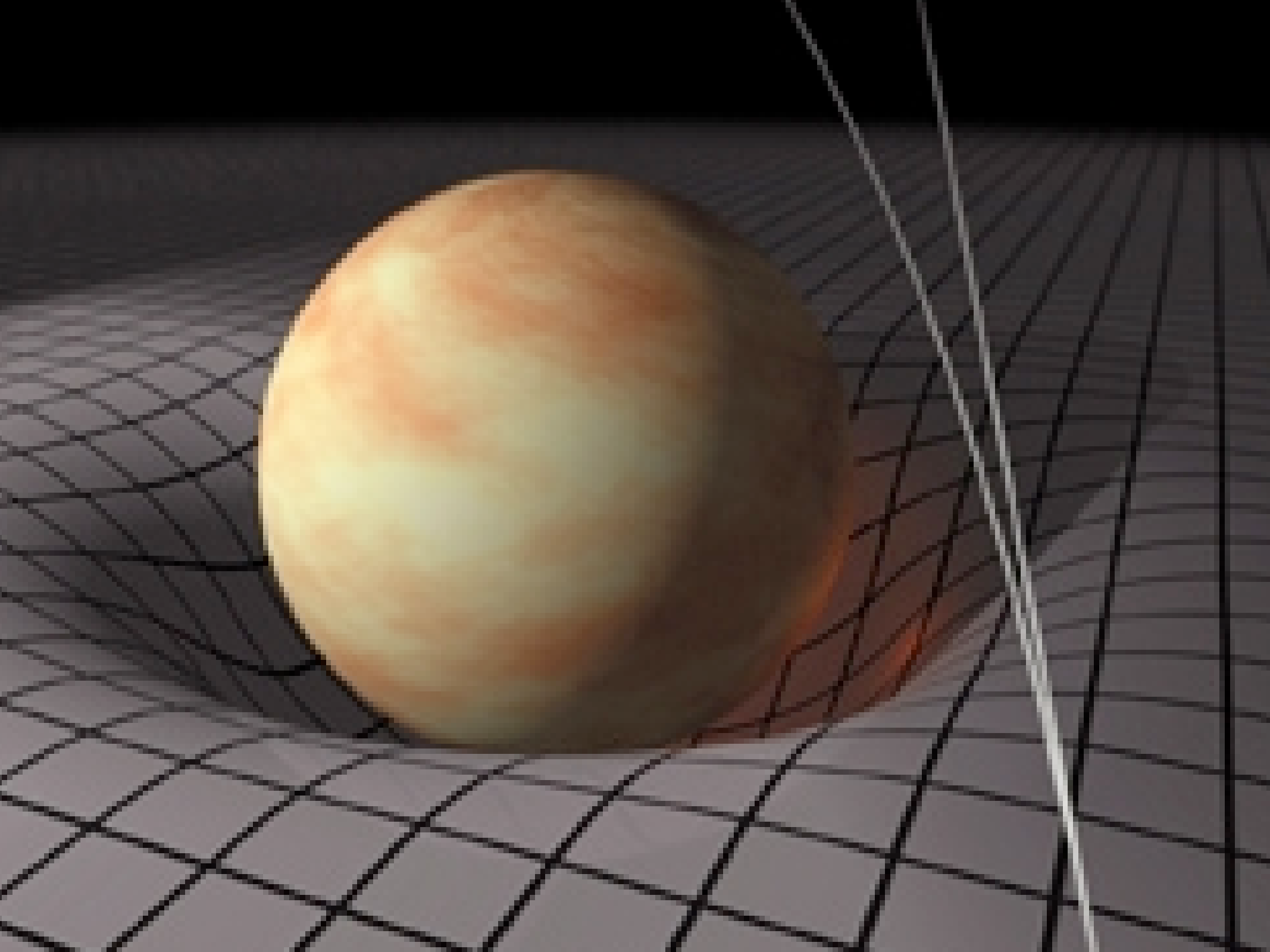

Sim

Intermezzo


PAPÁ, EXPLICAS-ME A TEORIA DA RELATIVIDADE? NÃO PERCEBO POR QUE É QUE O TEMPO PASSA MAIS DEVAGAR QUANDO ANDAMOS A GRANDE VELOCIDADE.
5-21
ISSO É PORQUE SE ESTÁ SEMPRE A MUDAR DE FUSOS HORÁRIOS. SE VOARES PARA A CALIFÓRNIA, GANHAS TRÊS HORAS NUM VÔO DE CINCO HORAS, CERTO?
© 1990 Universal Press Syndicate
POR ISSO, SE ANDARES À VELOCIDADE DA LUZ, GANHAS MAIS TEMPO PORQUE CHEGAR LÁ NÃO DEMORA ASSIM TANTO. É CLARO, A TEORIA DA RELATIVIDADE SÓ FUNCIONA SE FORES PARA OESTE.
LIVRA, A MAMÃ NÃO ME DISSE NADA DISSO! DEVE TER-SE PASSADO DOS CARRETOS.
BEM, NÓS OS HOMENS SOMOS MELHORES NO RACIOCÍNIO ABSTRACTO. VAI DIZER-LHE ISSO.
WATTERSON

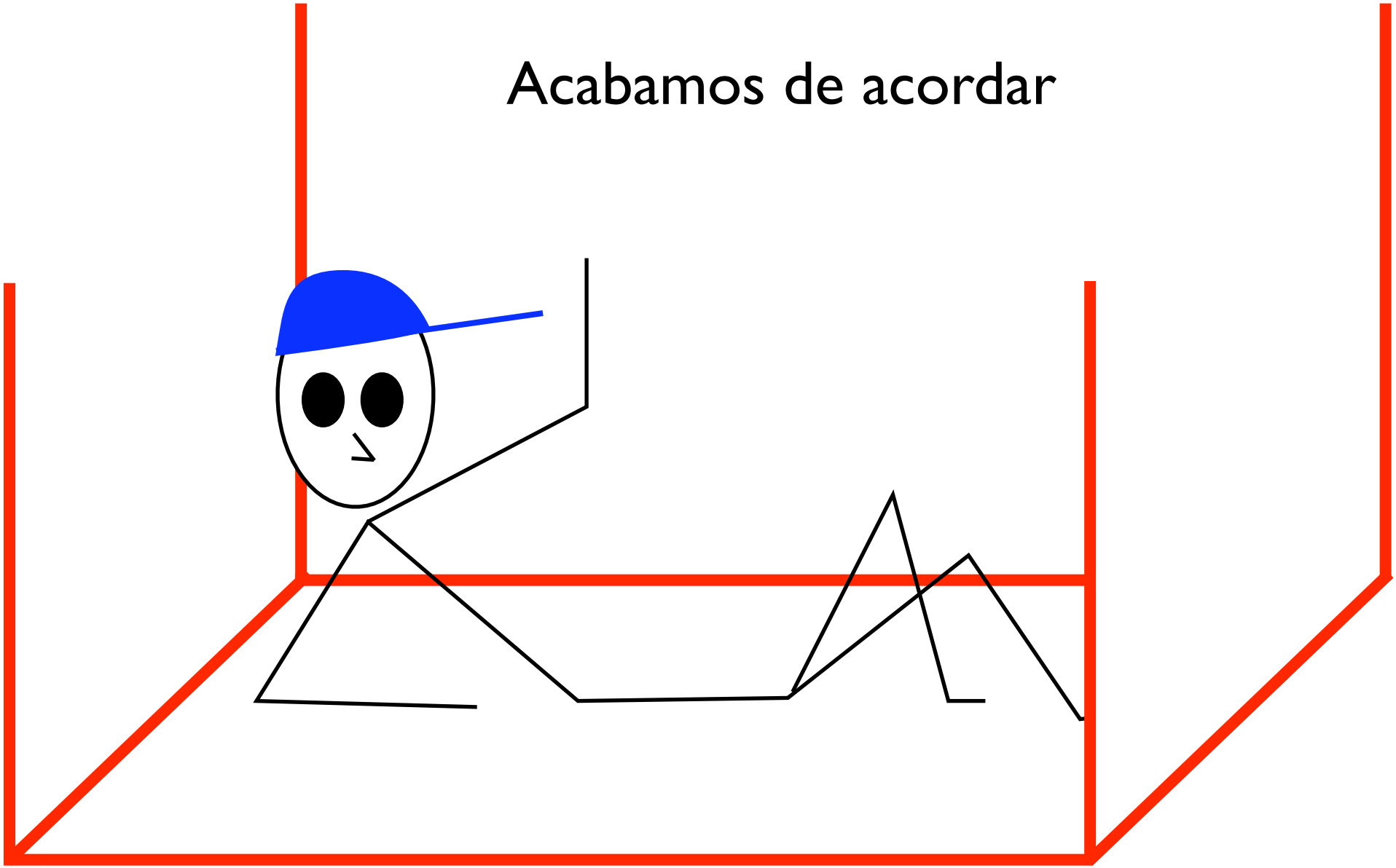

I JUST HEARD THAT LIGHT TRAVELS FASTER THAN SOUND.
ADAMS © 1992 United Feature Syndicate, Inc.
I'M WONDERING IF I SHOULD SHOUT WHEN I SPEAK, JUST SO MY LIPS APPEAR TO SYNC-UP WITH MY WORDS.
9-10
A LITTLE KNOWLEDGE CAN BE A RIDICULOUS THING.
HE PROBABLY HASN'T HEARD ME YET.

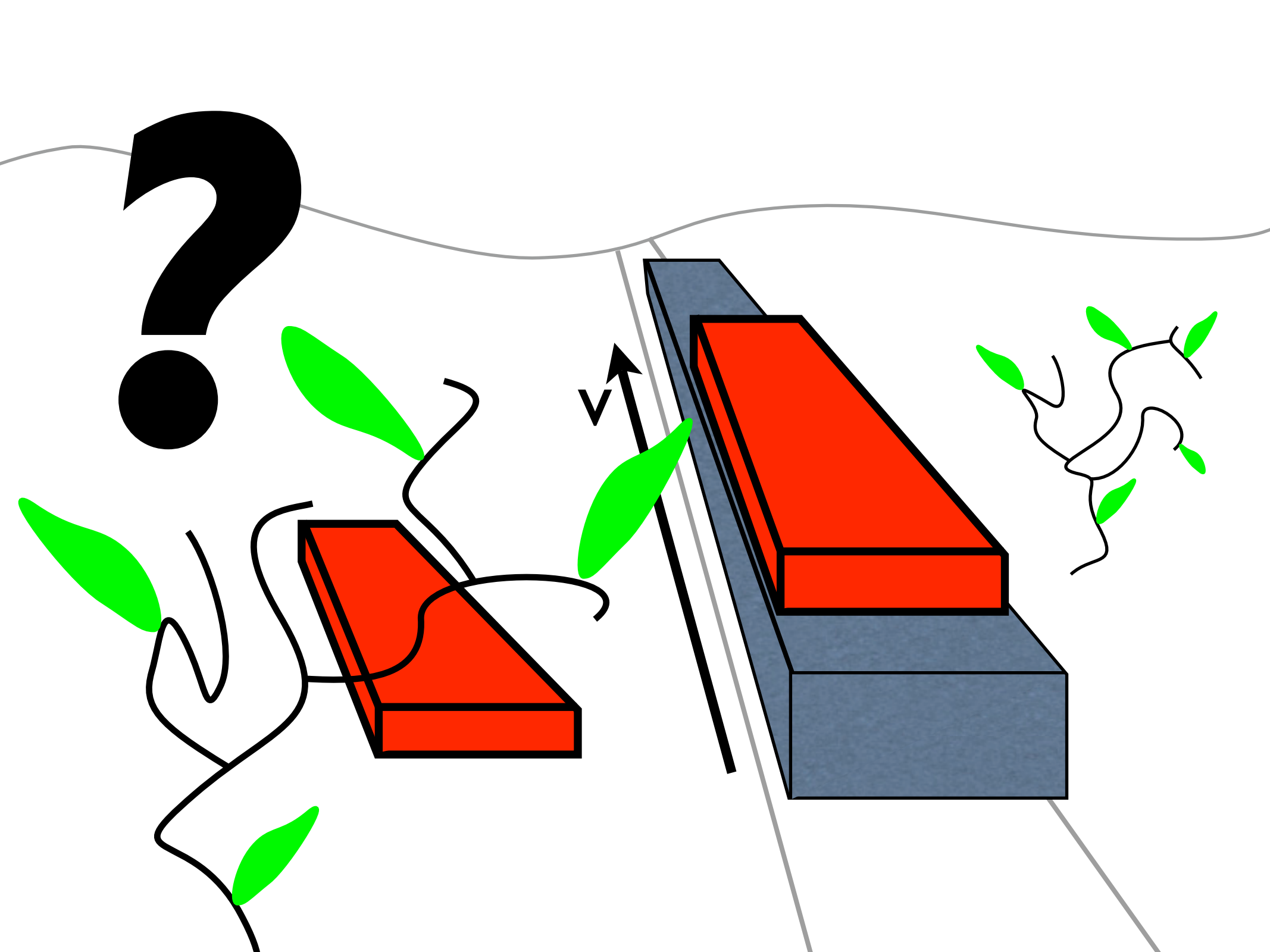
Relatividade Geral

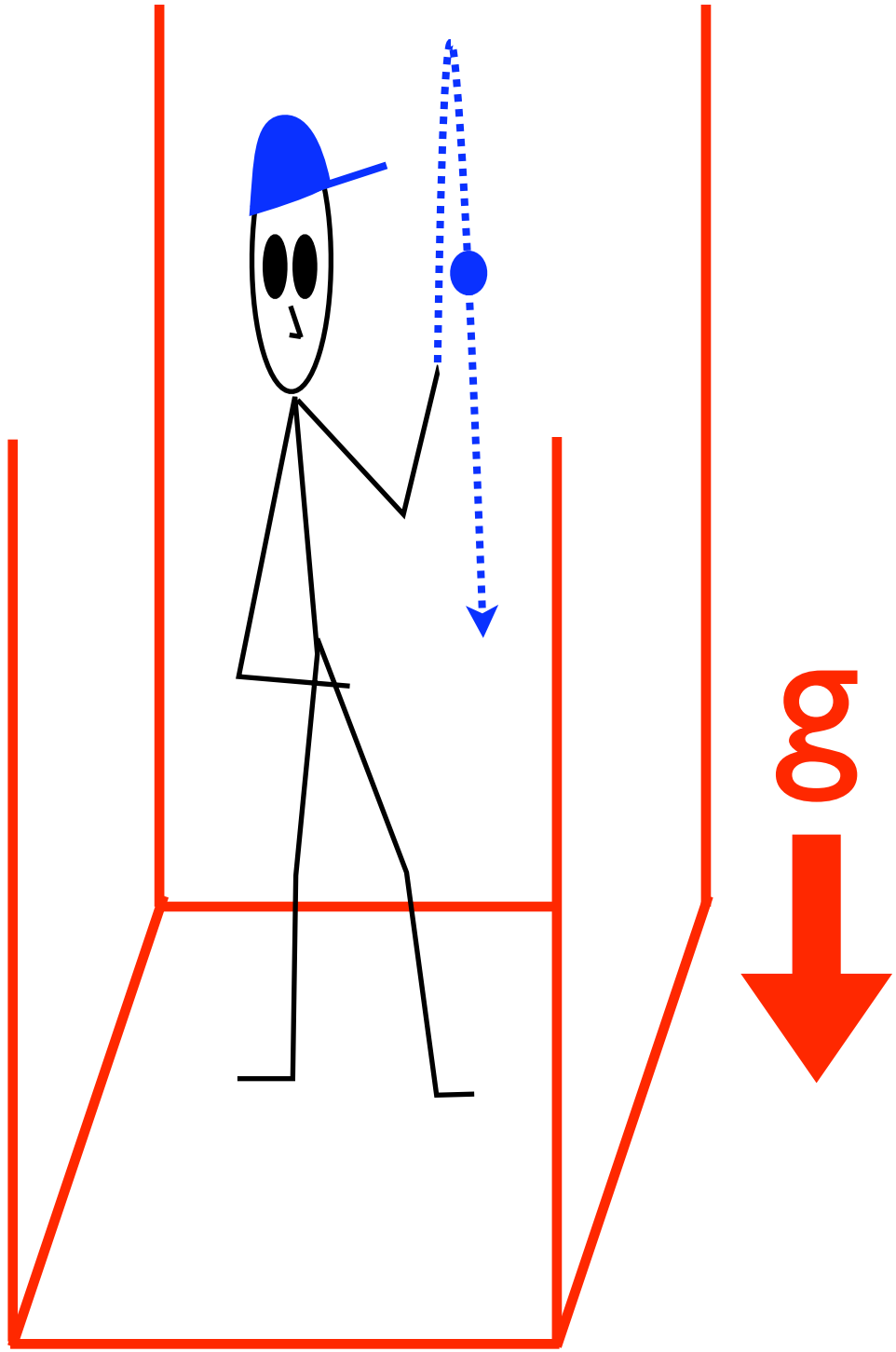


Princípio da equivalência

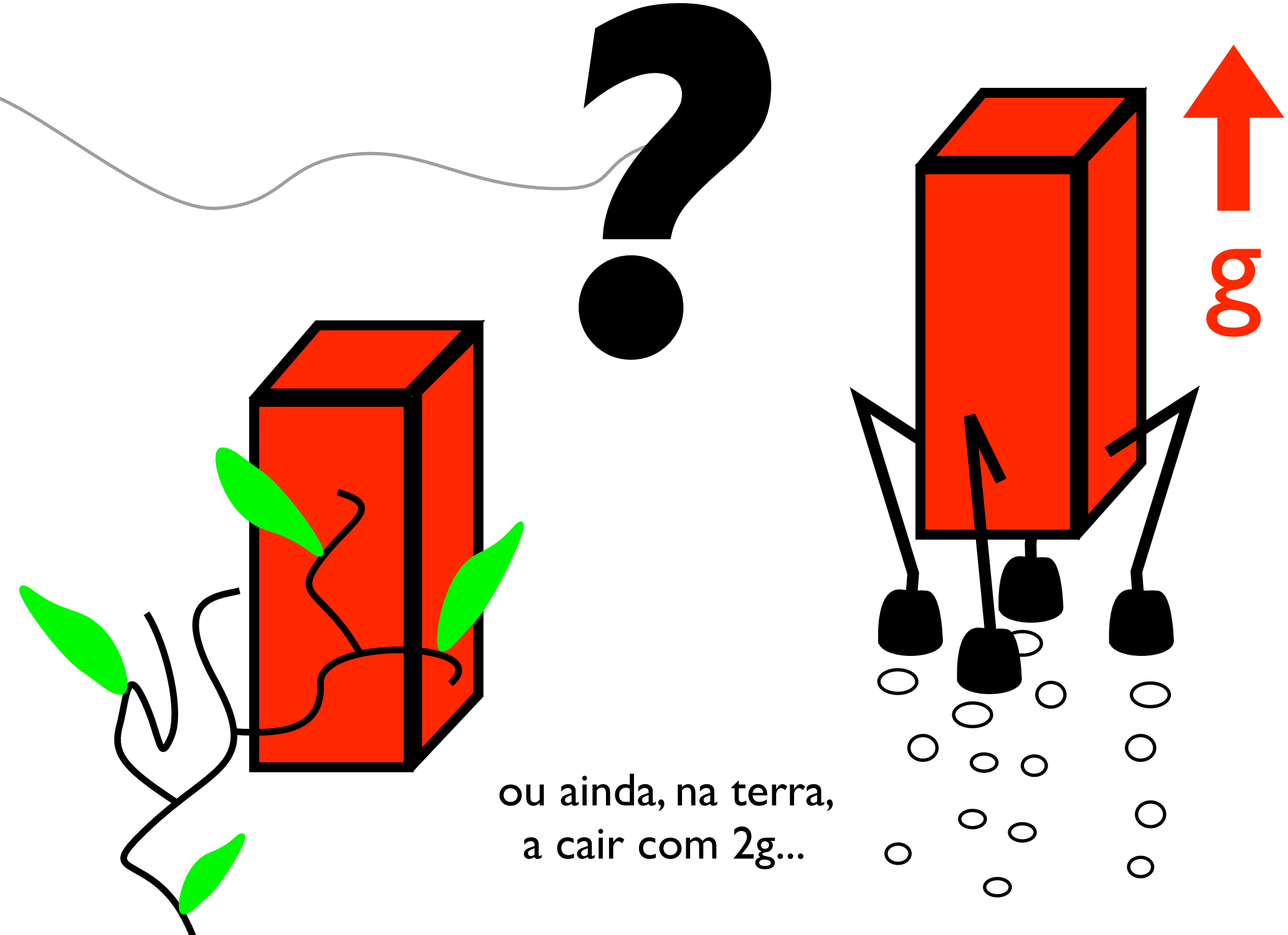
Acabamos de acordar



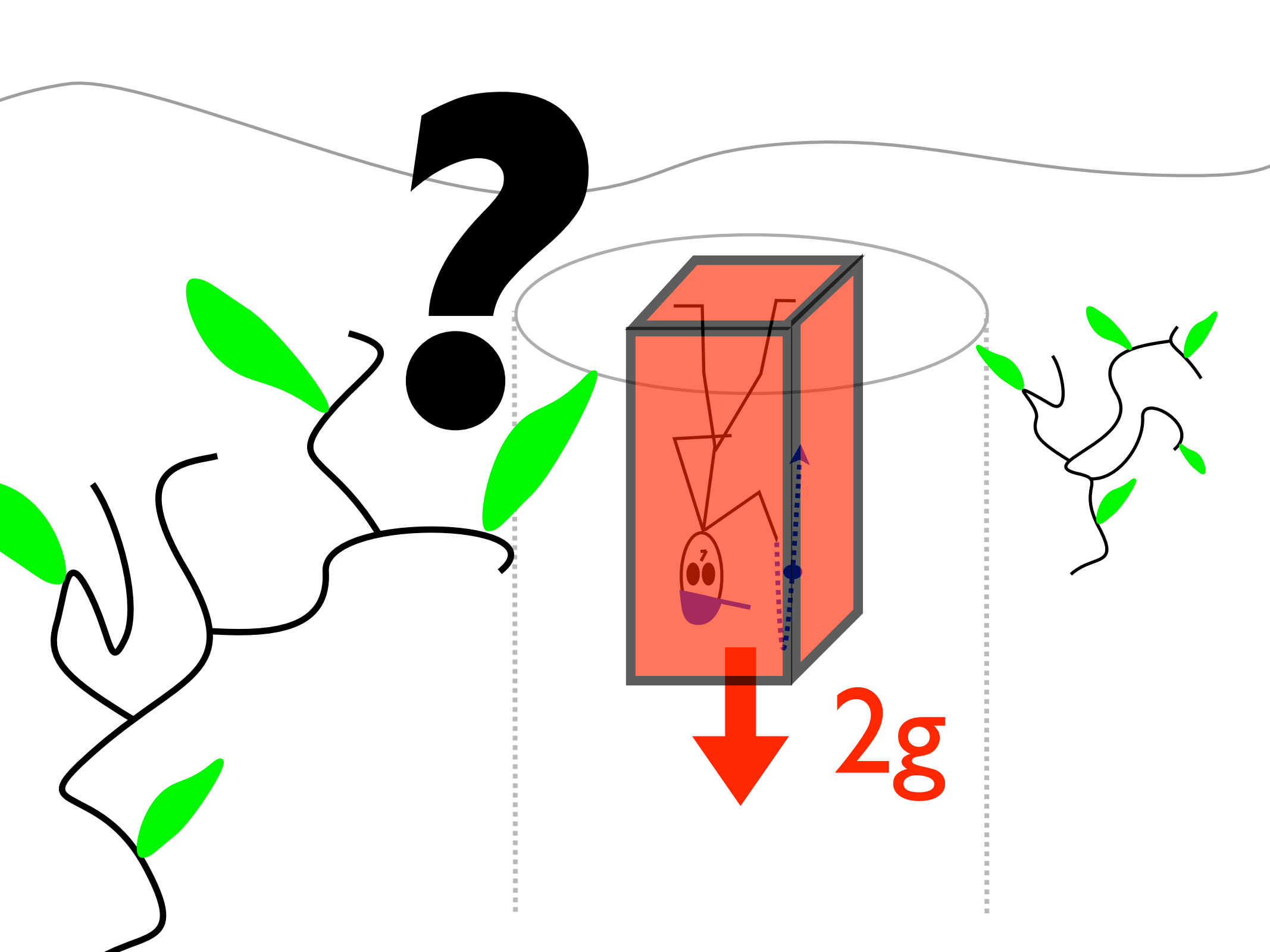

?
v



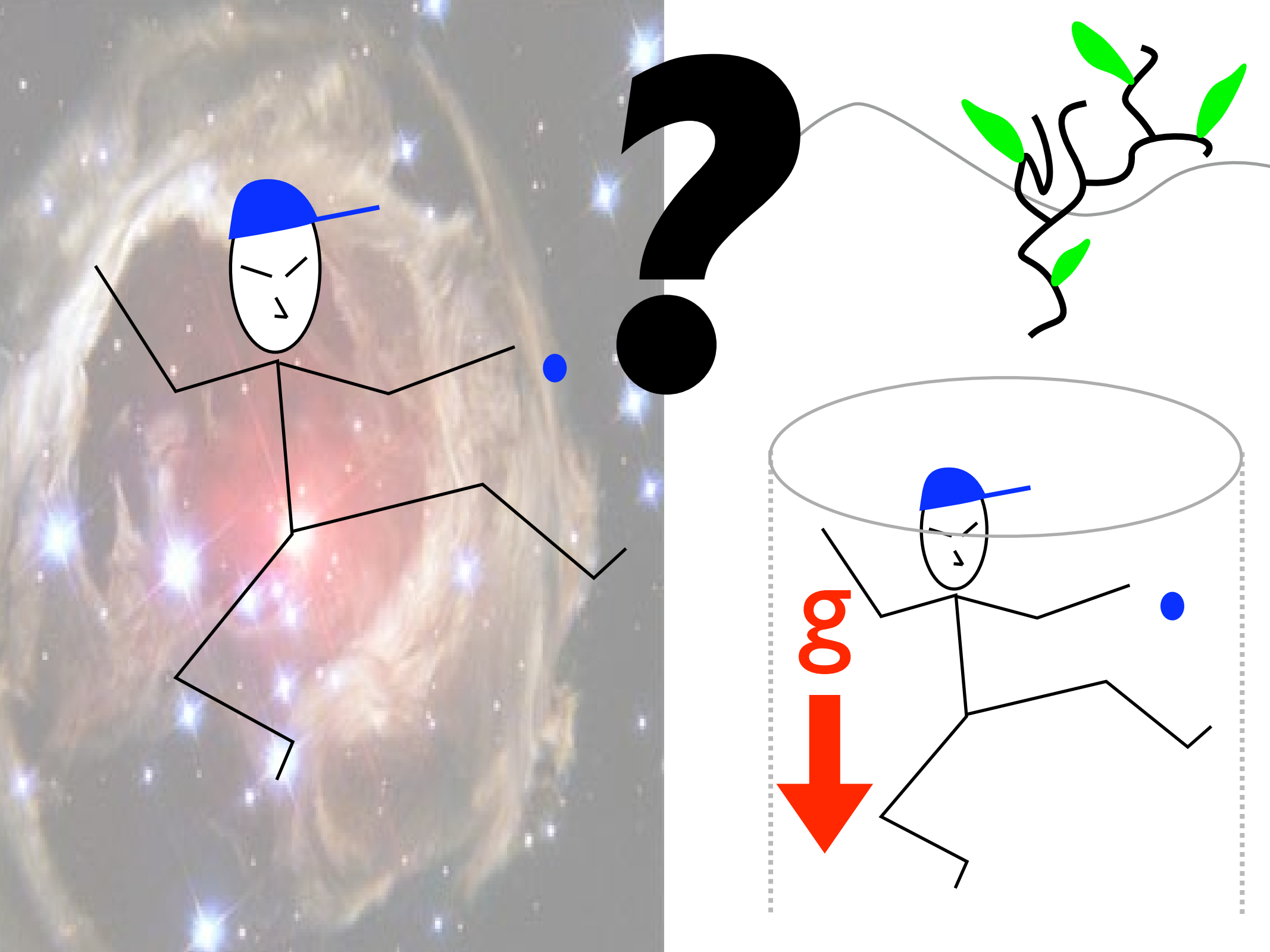
Acabamos de
acordar outra vez



ou ainda, na terra,
a cair com 2g...

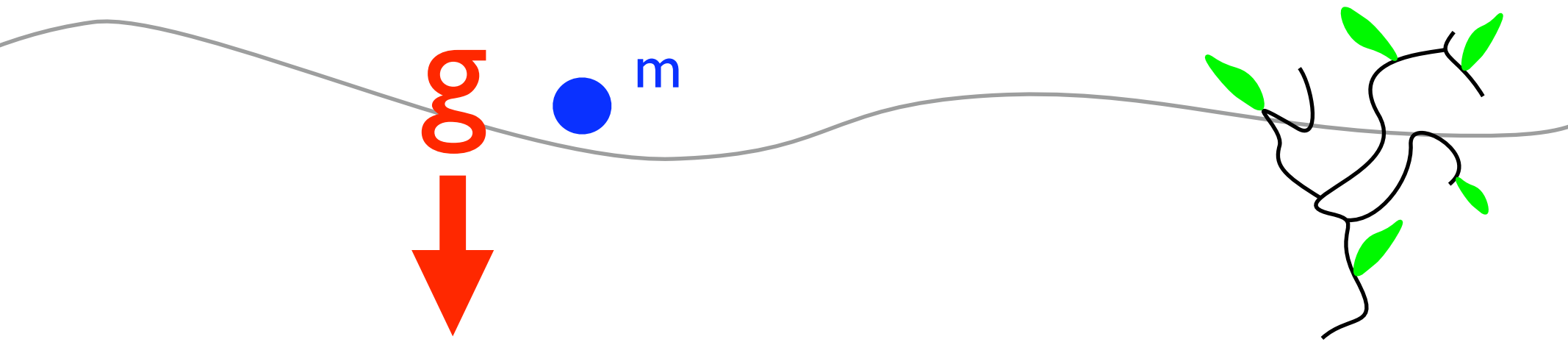

?
2g

Acordamos mais uma vez


?
g

O ponto crucial está na bolinha azul, sempre ao nosso lado.

Vamos (re)ver como ela cai no campo gravítico da terra



A força que ela sente é o seu peso,

$$m\,g$$

A aceleração com que ela cai é dada igualando a força que ela sente à massa vezes a aceleração

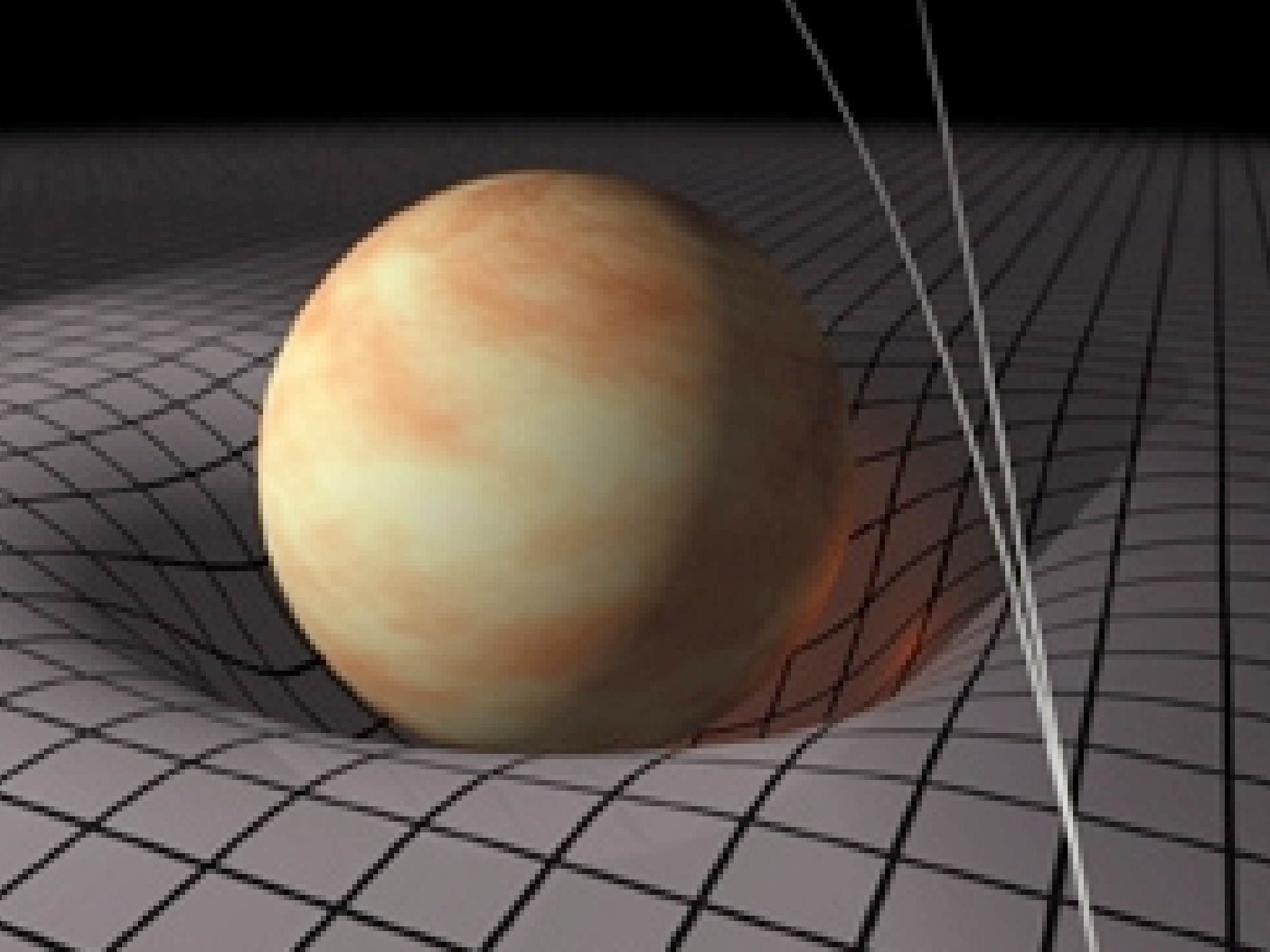
$$m\,a$$

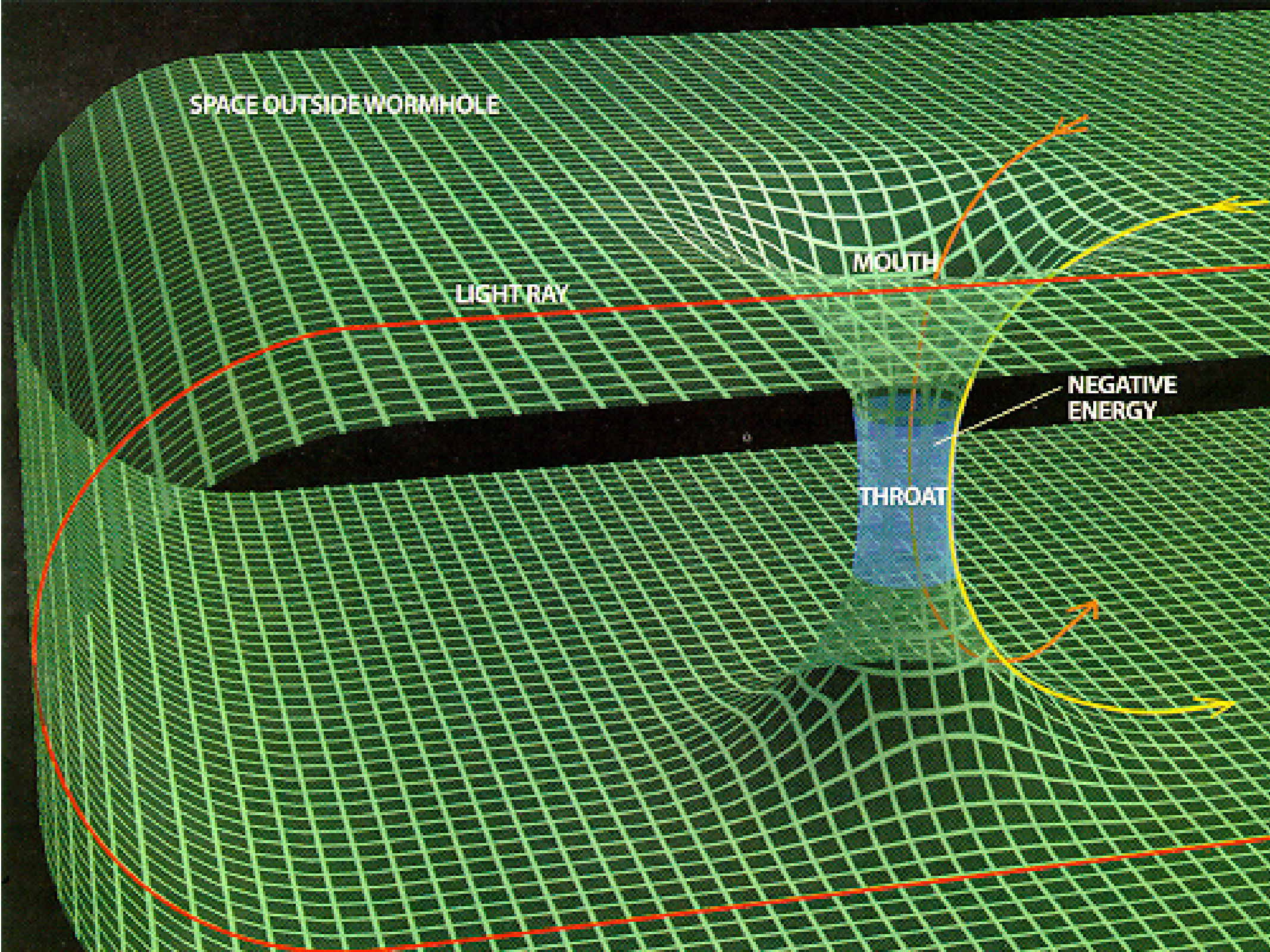
Obtemos então

$$\cancel{m}\, a = \cancel{m}\, g$$

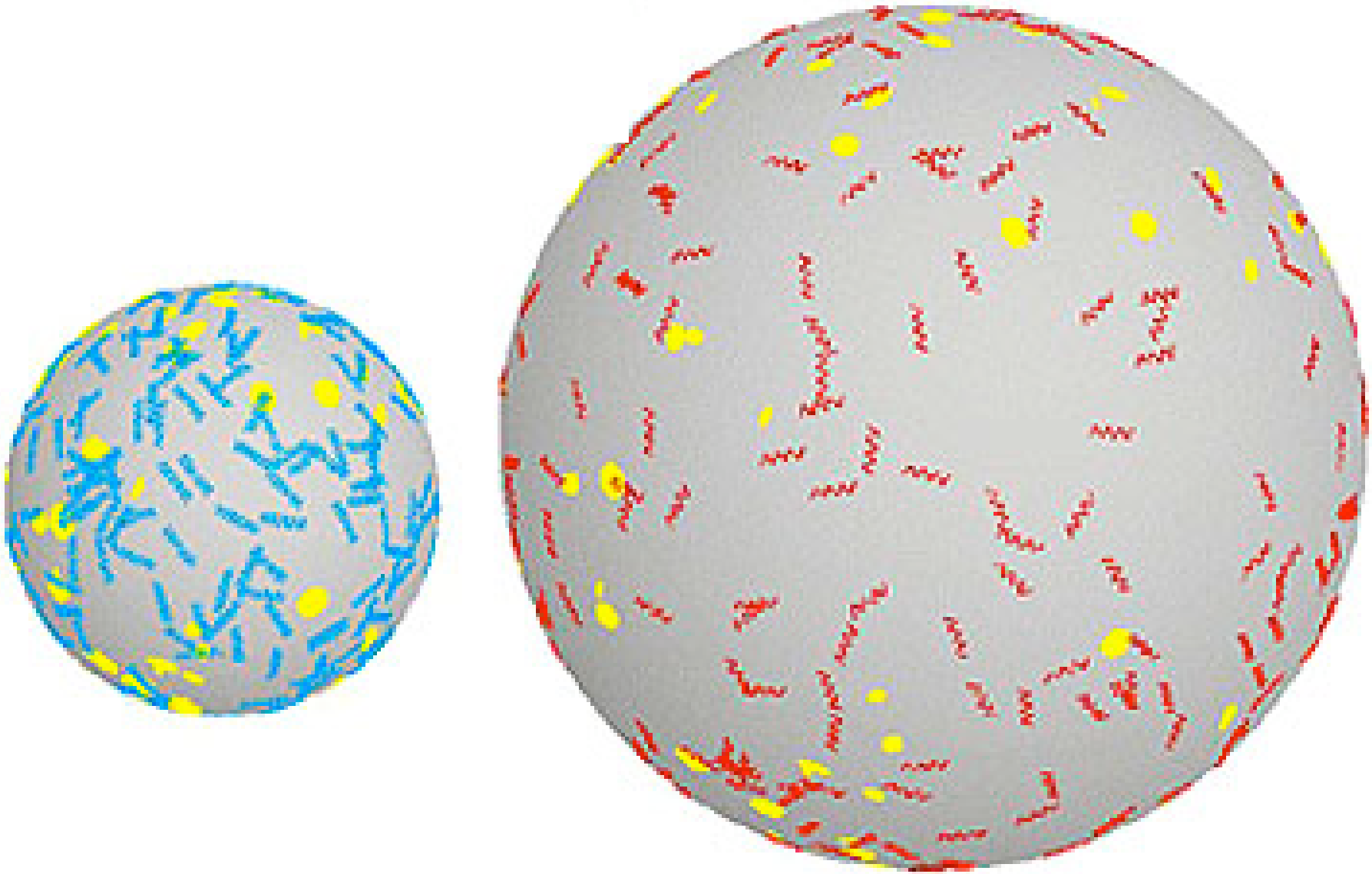
Por isso todos os corpos (localmente) caem da mesma forma, com a mesma aceleração.

A gravidade pode por isso ser geometrizada

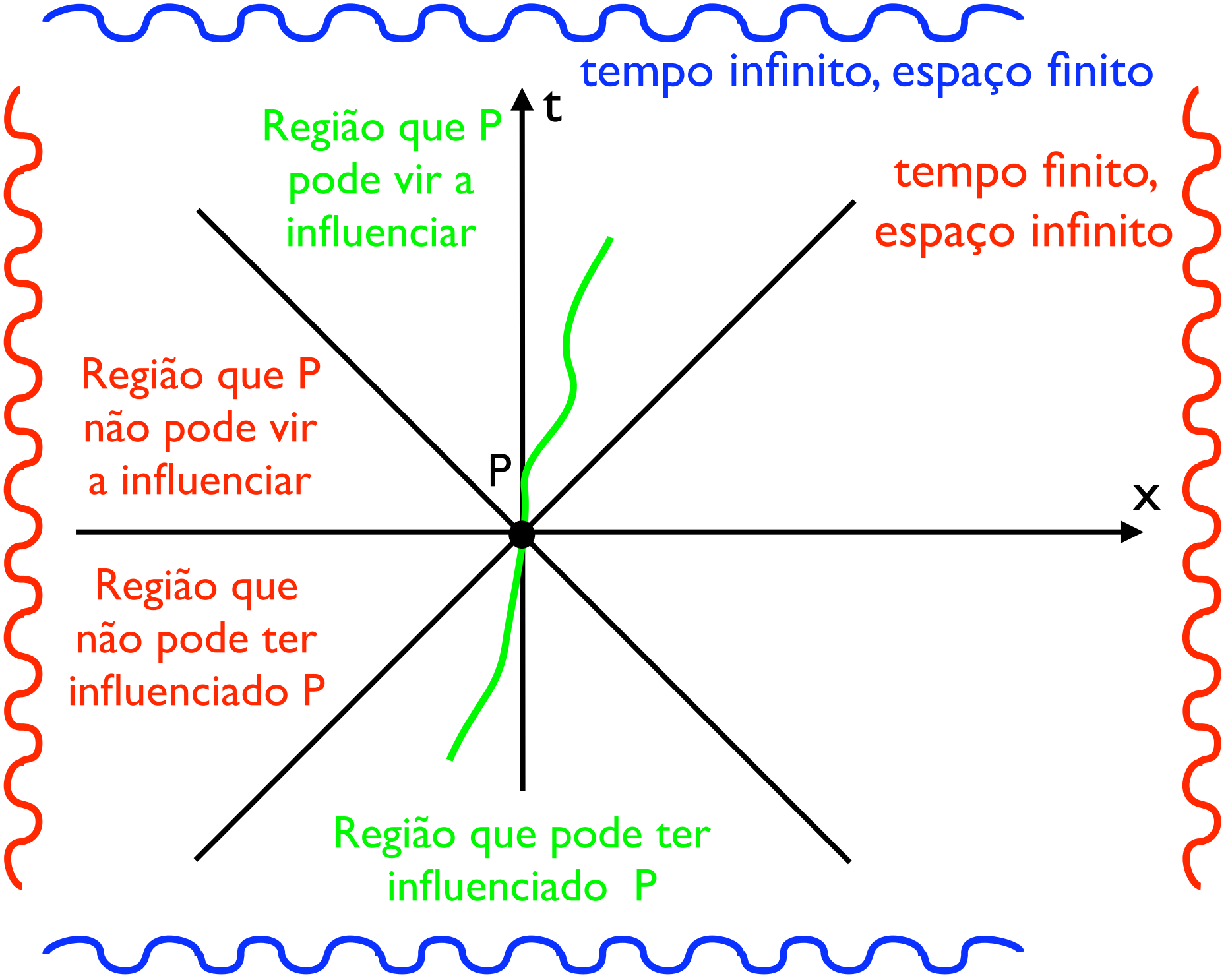



SPACE OUTSIDE WORMHOLE
MOUTH
LIGHT RAY
NEGATIVE ENERGY
THROAT

Universo em Expansão



Causalidade

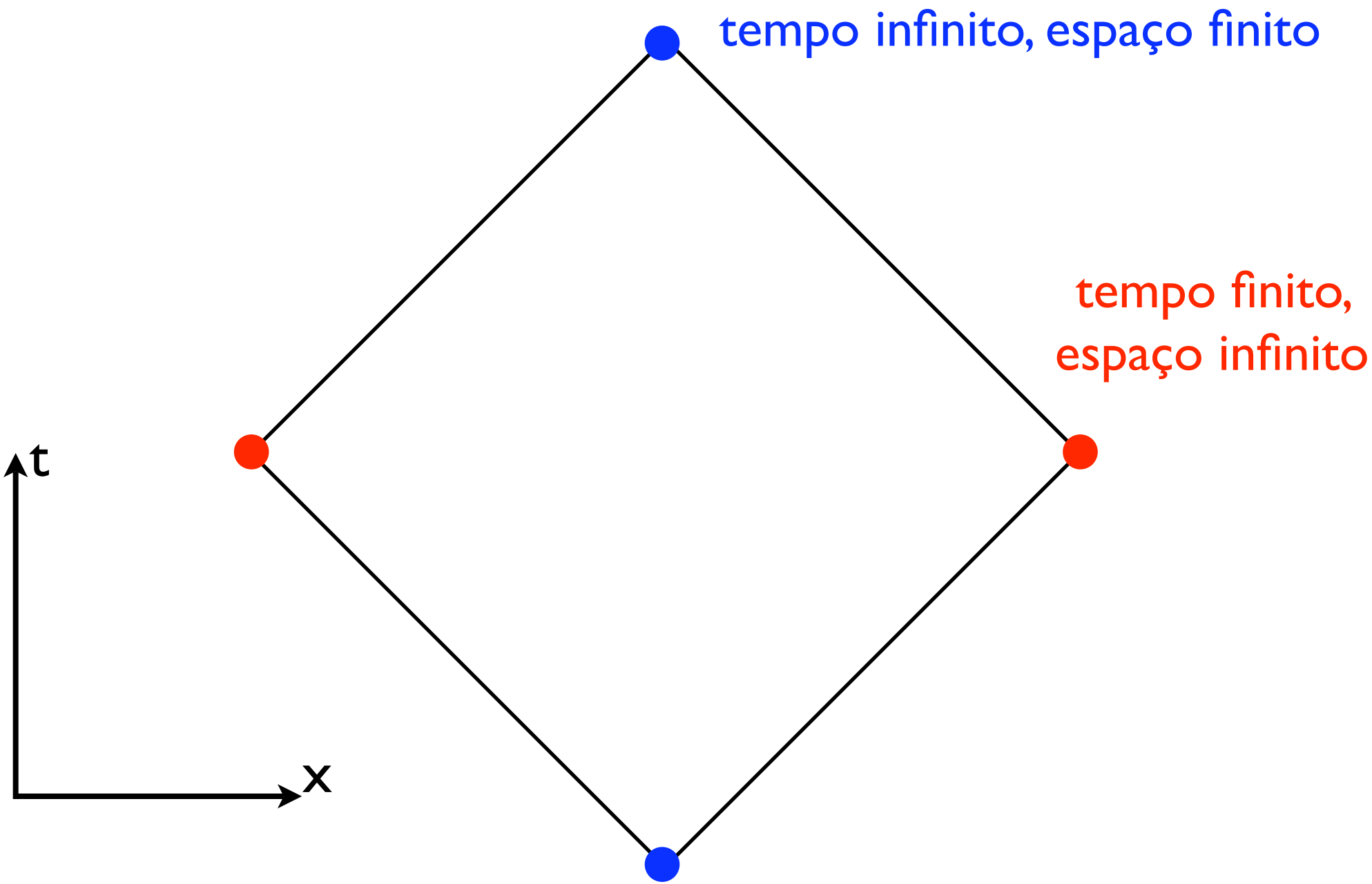

tempo infinito, espaço finito
t
Região que P
pode vir a
influenciar
tempo finito,
espaço infinito
Região que P
não pode vir
a influenciar
P
x
Região que
não pode ter
influenciado P
Região que pode ter
influenciado P

Diagramas de Carter-Penrose

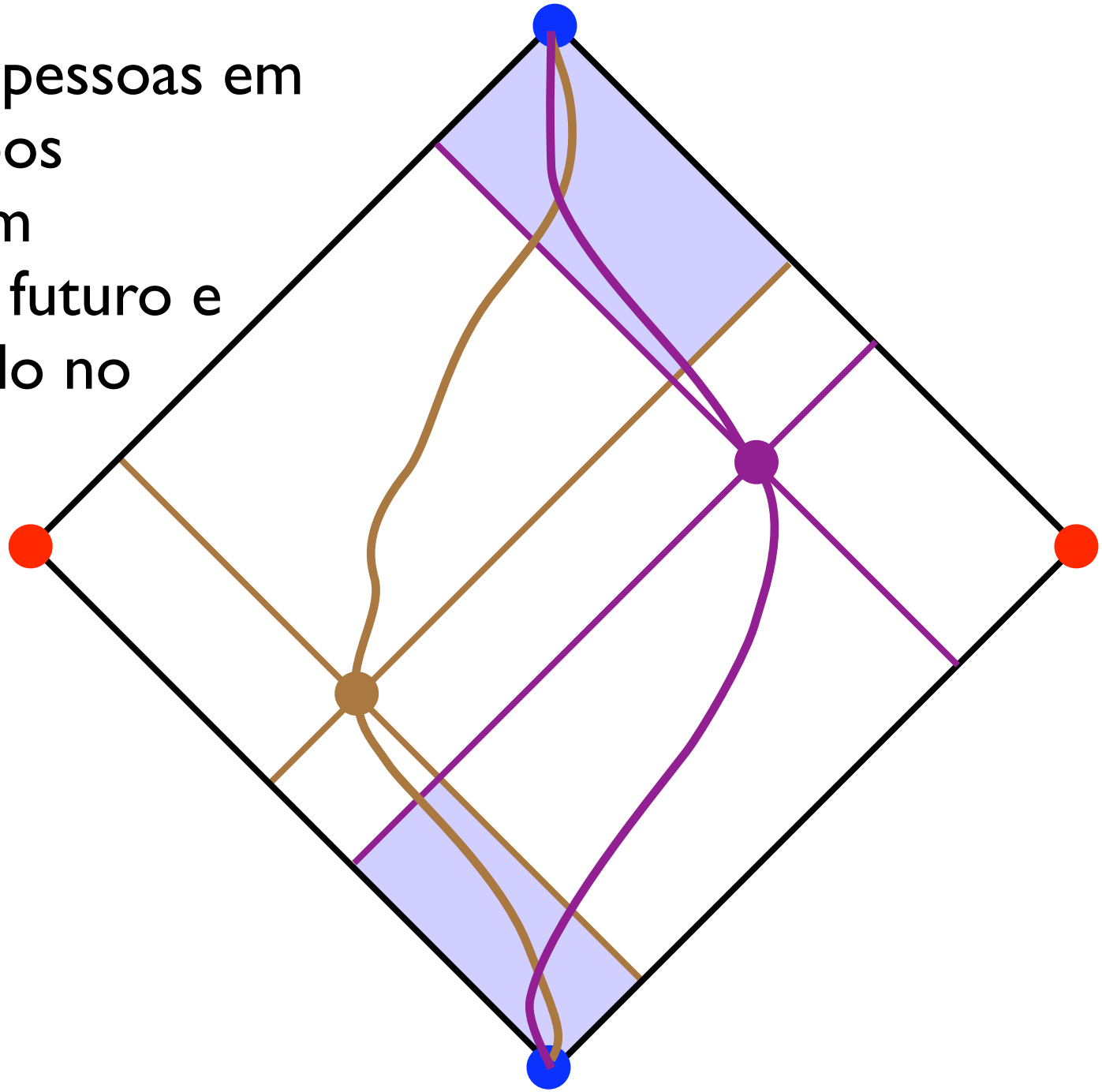
Queremos representar, num diagrama compacto, a causalidade de Espaços-Tempo

Exigimos então (e apenas) um diagrama compacto com raios de luz a 45º (para ser simples analisar a causalidade)

Espaço-Tempo Vazio ou Espaço-Tempo de Minkowski

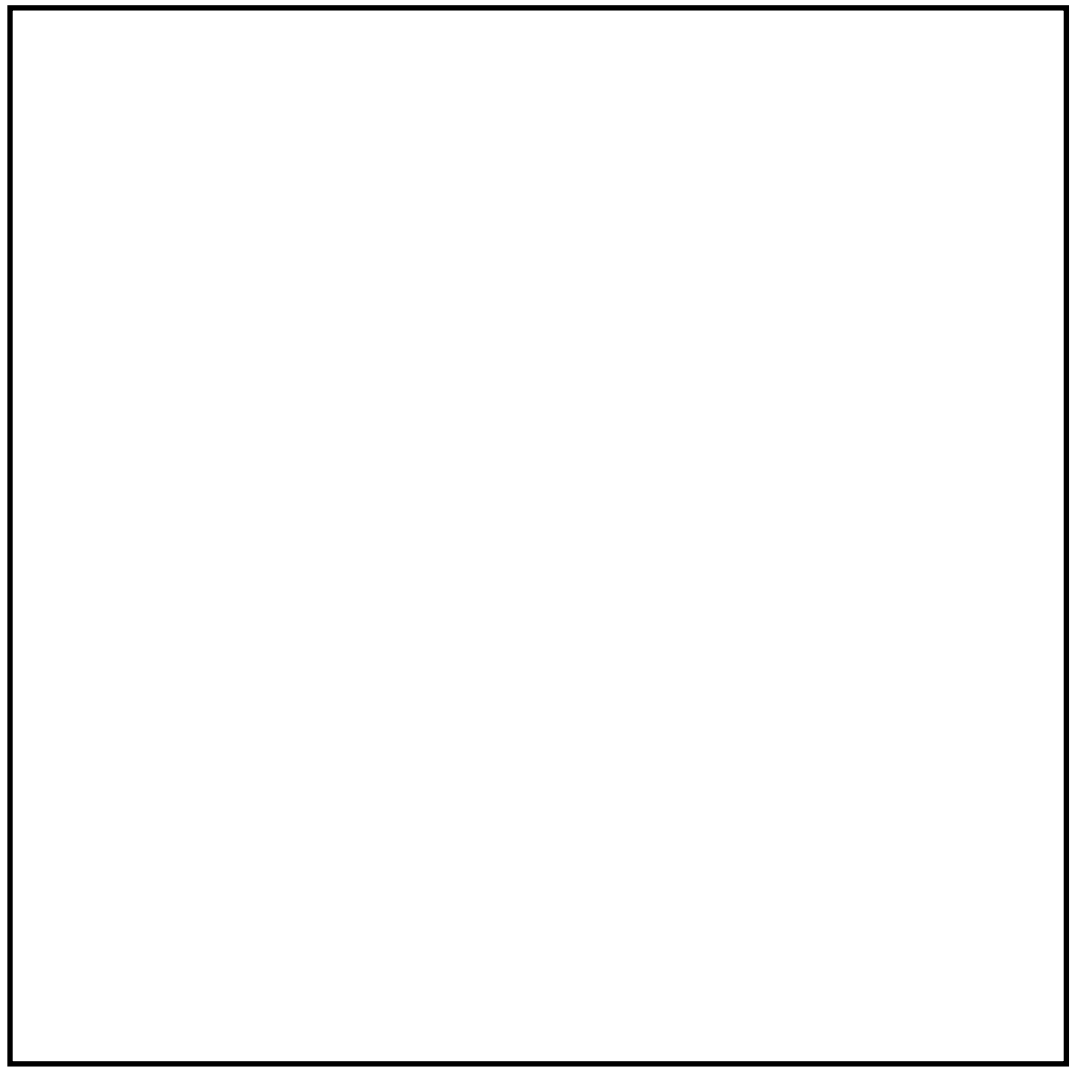


Quaisquer duas pessoas em posições e tempos diferentes podem encontrar-se no futuro e ter-se encontrado no passado



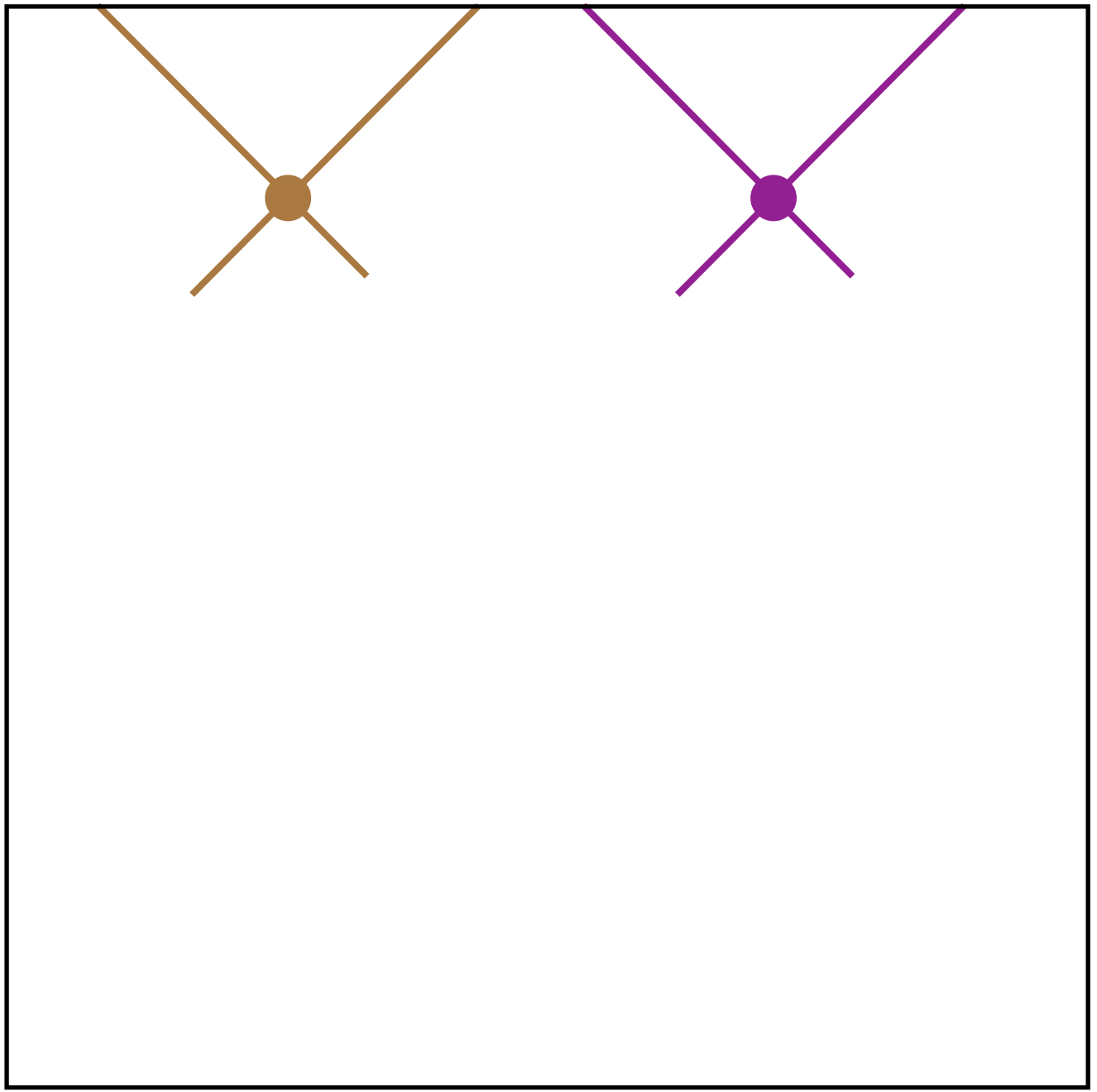
Causalidade em Espaços-Tempo Curvos

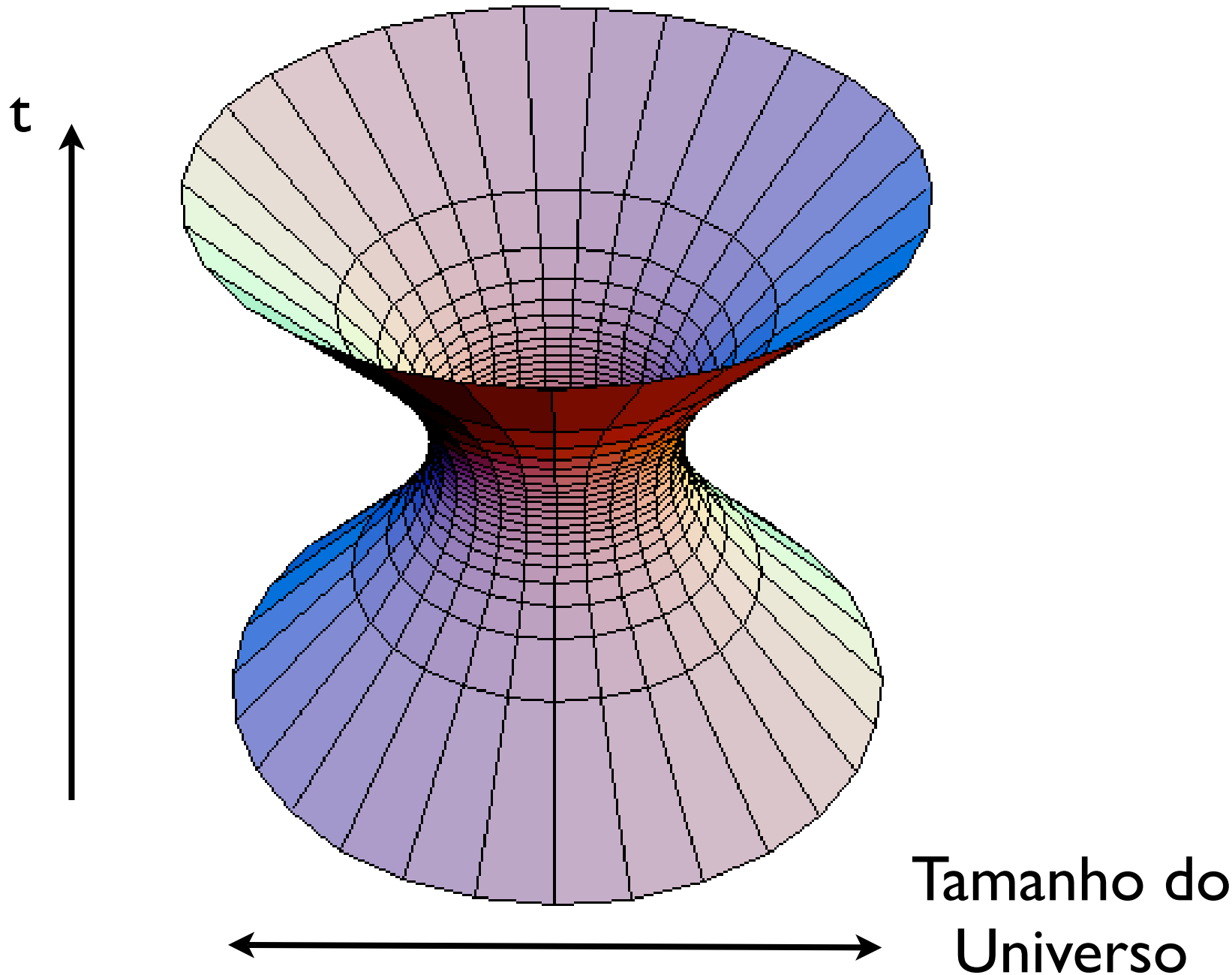
Que tipo de Espaço-Tempo?



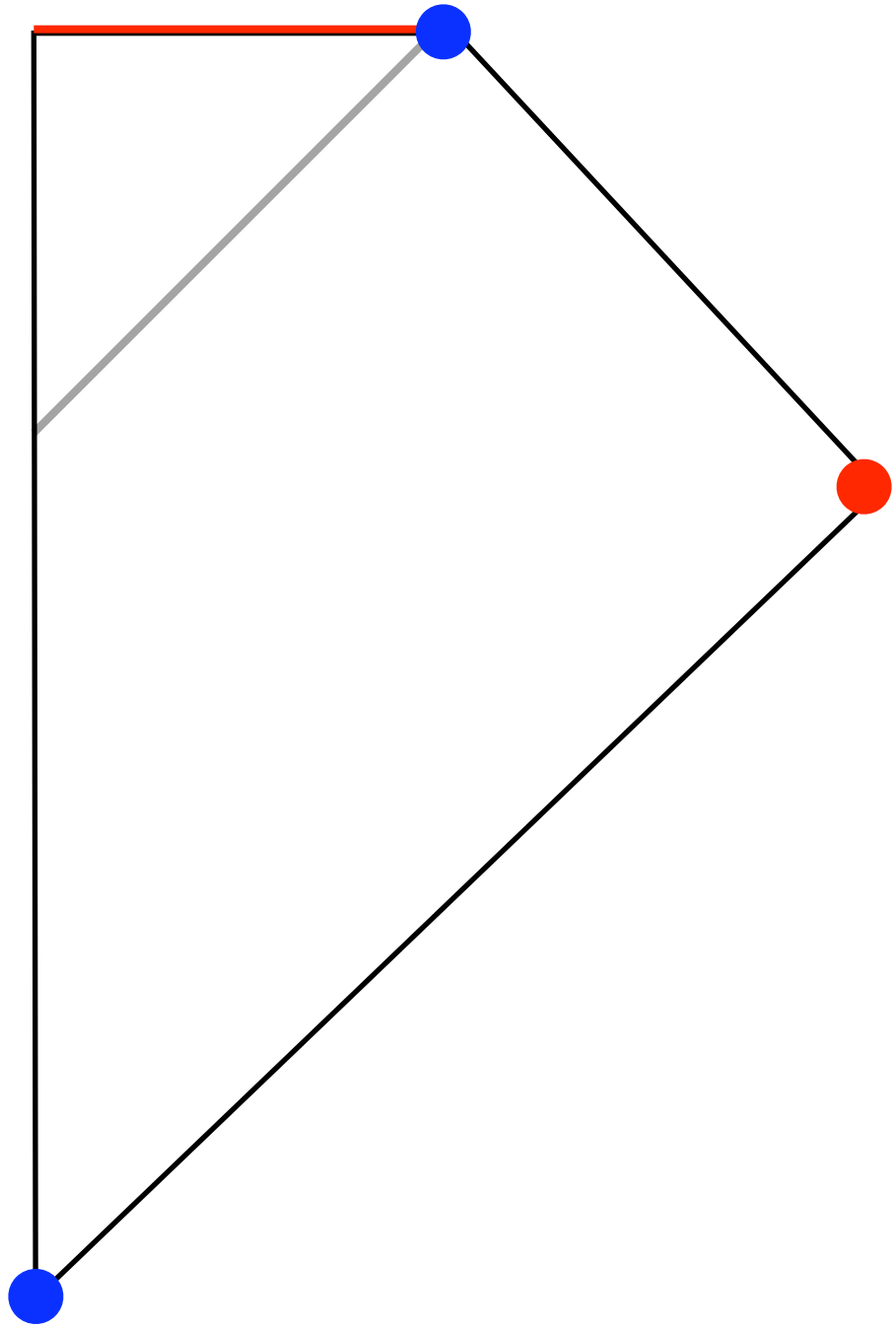
Consideremos duas pessoas bastante separadas

Podem ter-se encontrado no passado mas não se vão poder encontrar mais.




t
Tamanho do
Universo

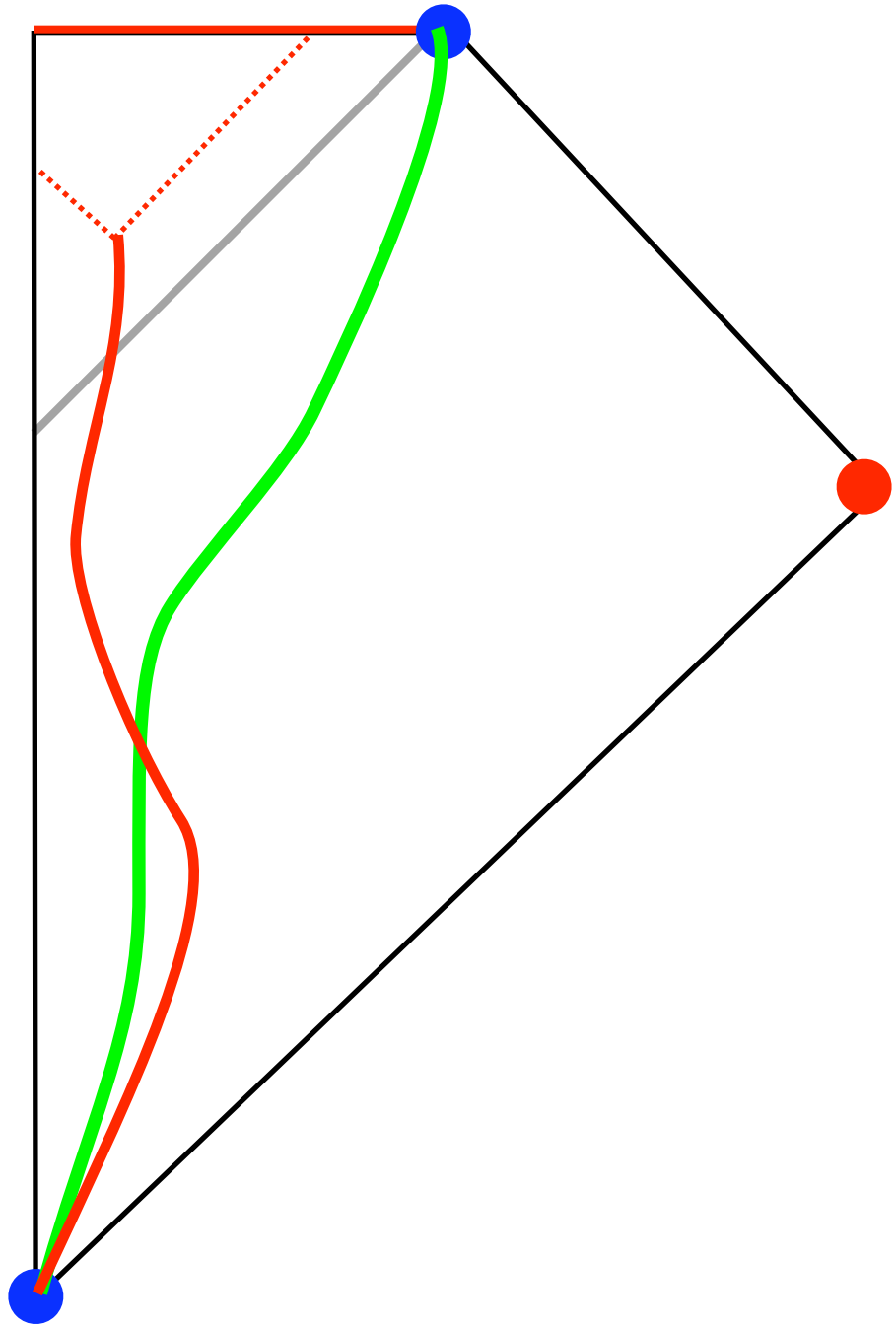
Que espaço Tempo?



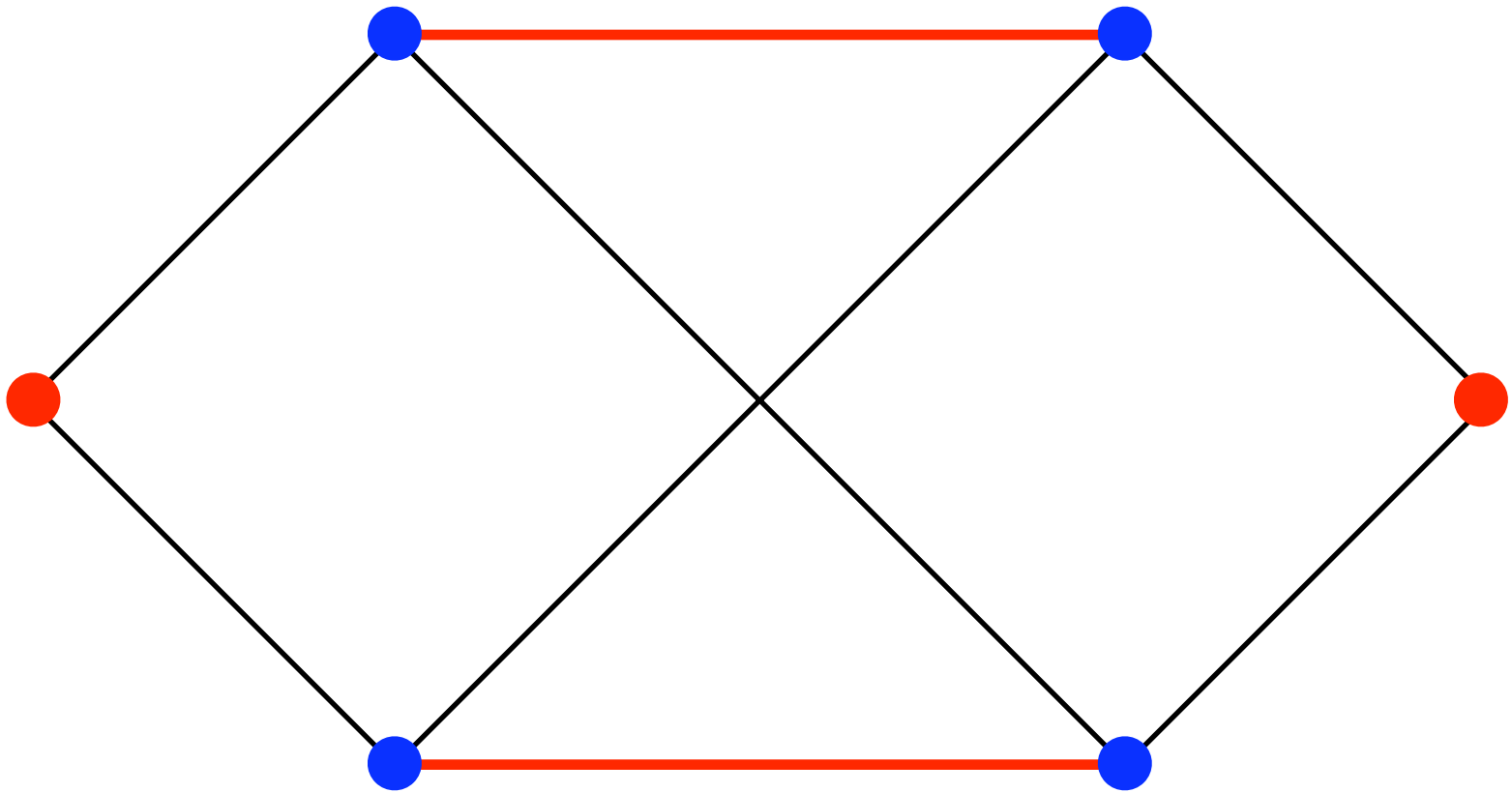
Nota: Triangulo
também representa
Minkowski

Podemos viver uma
vida eterna tranquila...

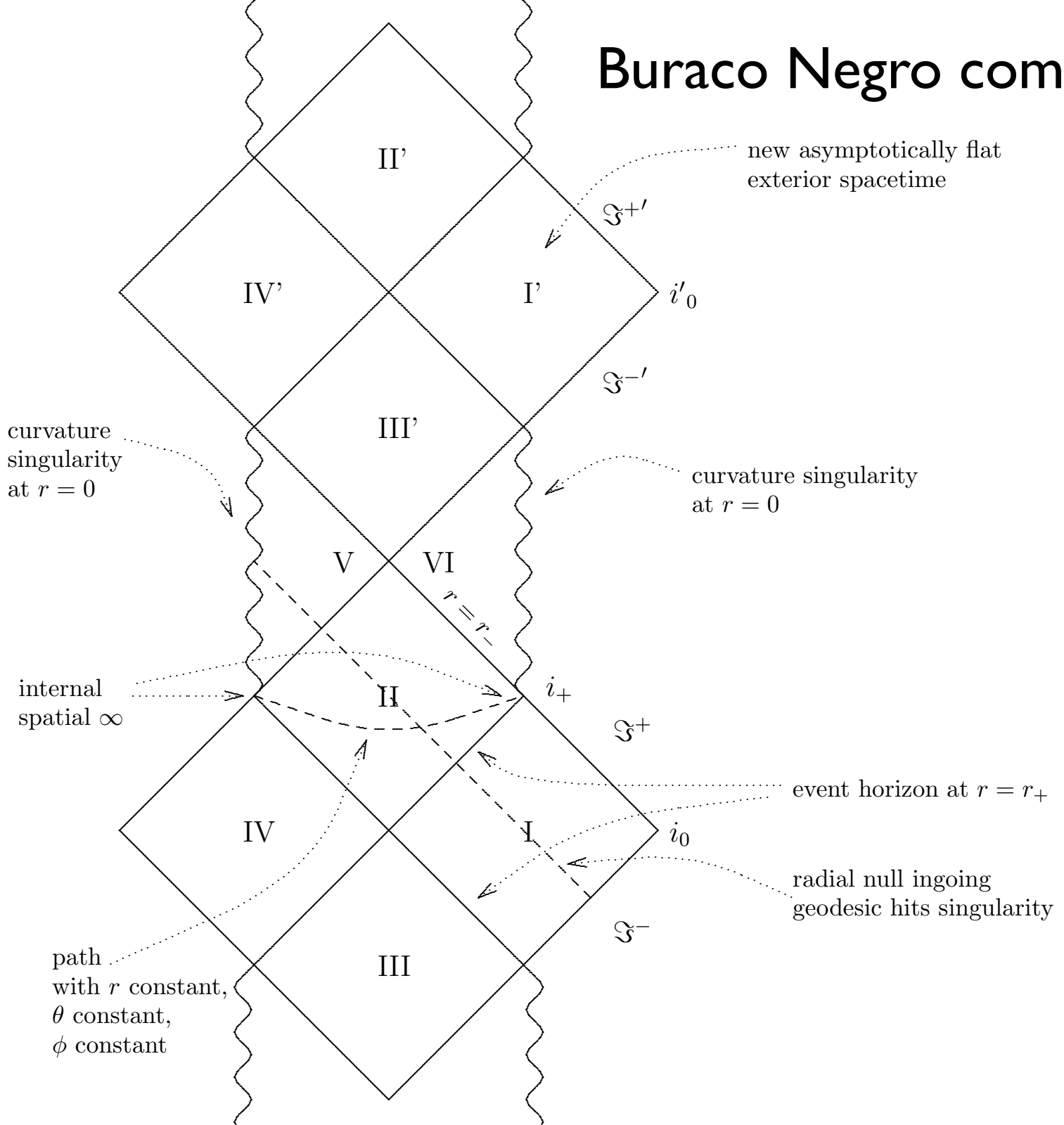
... desde que não se
passe a linha cinzenta!
Se se passar não se
sai mais.



Buraco Negro Eterno de Schwarzschild



Buraco Negro com Carga



Muito obrigado Álvaro, Ana Cláudia, Ana Cristina, Ana Helena, Ana Mafalda, Ana Margarida, Ana Rita, Ana Sofia de Cintra, Ana Sofia Ferreira, Ana Tedim, André, Ângela, António Diamantino, António Vaz, Bruno Aires, Bruno Alexandre, Bruno Tiago, Carlos, Catarina, Cátia, César, Cláudio, Cristiana, Cristiane, Daniel Matias, Daniel Lito, Daniela, David, Diana Filipa, Diana Maria, Diogo Filipe, Diogo Miguel, Édi, Fábio, Filipa, Filipe Manuel, Filipe Máximo, Francisca, Francisco, Gilberto, Gonçalo Pereira, Gonçalo Sérgio, Guilherme Horta, Guilherme Magalhães, Helder, Inês Cristóvão, Inês Figueiredo, Inês Marques, Inês Raquel, Ivandra, Javier, Joana Catarina, Joana Daniela, Joana Margarida, Joana Rita, João Gomes, João Manuel, João Pedro Alves, João Pedro Pinto, Joel, Jorge, José Benedito, José Carlos, José Miguel, José Diogo, José Tiago, Lavínia, Lígia, Lin Qi, Luís, Manuel, Maria Inês, Mariana Alves, Mariana Sucena, Mário Mira, Mário Jorge, Mário José, Marta Cristina Morais, Marta Cristina Neves, Marta Duque, Marta Ribeiro, Marvin, Miguel, Mónica, Natália, Nelson, Nuno, Pedro Alpoim, Pedro Costa, Pedro Figueiredo, Pedro João, Pedro José, Pedro Manuel Sabino, Pedro Manuel Santos, Pedro Miguel, Rafaela, Raquel, Renato, Rodrigo, Rubén Azinheira, Rúben João, Ruben Simao, Rui Filipe, Rui Miguel, Sílvia Cavadas, Sílvia Cristiana, Sónia, Tânia, Tiago Malhão, Tiago Monteiro, Tiago Simões, Verónica, Vitor Carlos, Vítor Emanuel **!**