



Introdução

Medir a  
velocidade da  
luz

Equações de  
Maxwell

Do it Yourself

A experiência  
de Michelson-  
Morley

Simultaneidade

# Relatividade - Módulo 2: Problemas com a luz

João Seixas

Instituto Superior Técnico

Ano lectivo 2022/2023



# Problemas com a luz

## Introdução

Medir a velocidade da luz

Equações de Maxwell

Do it Yourself

A experiência de Michelson-Morley

Simultaneidade

## Objectivos:

- Medindo a velocidade da luz: primeiras tentativas
- Electromagnetismo, Equações de Maxwell e a transformação de Galileu
- A experiência Michelson-Morley
- A questão da simultaneidade



# Onde se propaga a luz?

Introdução

Medir a  
velocidade da  
luz

Equações de  
Maxwell

Do it Yourself

A experiência  
de Michelson-  
Morley

Simultaneidade

O som, como sabemos, é produzido e transmitido através de compressões e descompressões de um meio. O mesmo não podemos dizer da luz uma vez que, contrariamente ao som, se propaga mesmo no vazio. Este simples facto leva a uma pergunta natural: **onde se propaga a luz?**

A natureza dos fenómenos luminosos foi de facto um factor de discórdia entre os físicos ao longo de séculos, separando-se os contendores em dois campos, o corpuscular e o ondulatório. O primeiro, iniciado por Newton, sustentava que a luz era constituída por minúsculos corpúsculos, usando como argumento experimental os fenómenos de reflexão, refacção de dispersão da luz.



## Onde se propaga a luz?

Introdução

Medir a  
velocidade da  
luz

Equações de  
Maxwell

Do it Yourself

A experiência  
de Michelson-  
Morley

Simultaneidade

Contrariamente, o partido ondulatório, iniciado entre outros por Hooke e Huygens, sustentava que a luz seria um fenómeno ondulatório, usando como argumentos os fenómenos de difracção e iridiscência. Huygens, em particular, conseguiu explicar todos os fenómenos ópticos conhecidos no seu tempo unicamente com recurso à hipótese de que a luz seria uma onda propagando-se muito rapidamente. O campo ondulatório acabou por prevalecer, mas na forma da vibração conjunta do campo eléctrico e magnético.

Mas a pergunta continua a mesma: **qual é o meio que sustenta a vibração dos campos?**



# Medindo a velocidade da luz: primeiras tentativas

Introdução

Medir a  
velocidade da  
luz

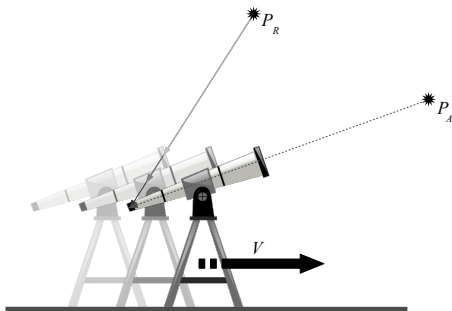
Equações de  
Maxwell

Do it Yourself

A experiência  
de Michelson-  
Morley

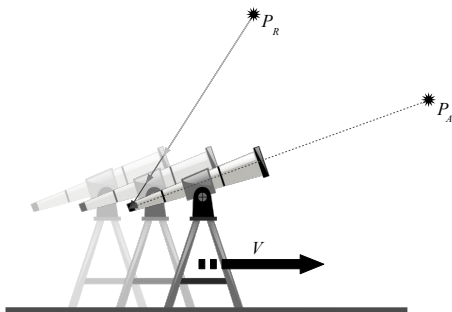
Simultaneidade

Na ausência de uma melhor solução fez-se a hipótese da existência de um meio material, designado por **éter**, onde a luz se propagaria. Mas dentro do conceito de velocidade relativa, a pergunta passaria a ser qual a velocidade do éter **relativamente ao observador** e por isso qual a velocidade da luz relativamente a cada observador. Essa questão levou a uma série de experiências para medir a velocidade da luz que se foram tornando cada vez mais sofisticadas desde o séc. XVII.



Uma das primeiras tentativas (para além da de Ole Römer) usou o fenómeno de aberração da luz de uma estrela, fenómeno conhecido desde o séc. XVII.

# Medindo a velocidade da luz: primeiras tentativas

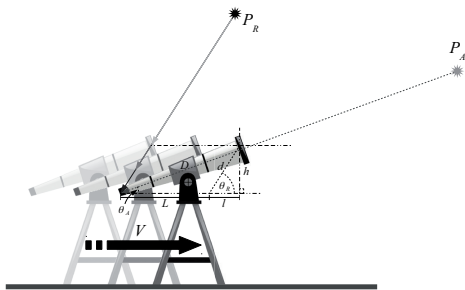


A aberração consiste no movimento aparente de uma estrela em torno da sua posição real devido ao movimento do observador. A aberração faz com que a estrela, relativamente à posição que tem quando o observador está parado, apareça desviada na direcção do movimento do observador.

# Medindo a velocidade da luz: primeiras tentativas

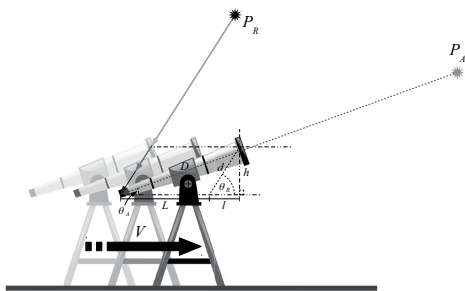
Tendo por base esse fenómeno James Bradley e Samuel Molyneux realizaram por volta de 1725 uma série de observações da estrela  $\gamma$  Draconis na constelação do Dragão e verificaram que esta

estrela se movia  $40''$  de arco para sul entre Setembro e Março e invertia o seu percurso entre Março e Setembro. Este movimento não podia ser explicado por efeitos de paralaxe resultante do movimento orbital da Terra em torno do Sol já que a estrela estava demasiadamente longe para que isso pudesse ser possível.



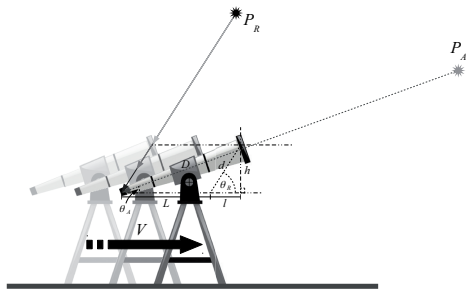


Como o telescópio se move com velocidade  $V$  e a luz se propaga em linha recta a estrela aparenta encontrar-se numa declinação diferente da que verdadeiramente tem. Para se ter uma ideia da magnitude do efeito, a estrela  $\gamma$  Draconis na constelação do Dragão percorre no céu uma elipse com um diâmetro angular de  $40.4''$ .



# Medindo a velocidade da luz: primeiras tentativas

Para estabelecer a relação (aproximada) entre os ângulos real  $\theta_R$  e aparente  $\theta_A$  basta reparar que se  $d$  for a distância percorrida pela luz desde a entrada do telescópio até ao ponto de observação, então a distância  $L$  percorrida pelo telescópio durante esse percurso é



$$L = V \left( \frac{d}{c} \right) .$$

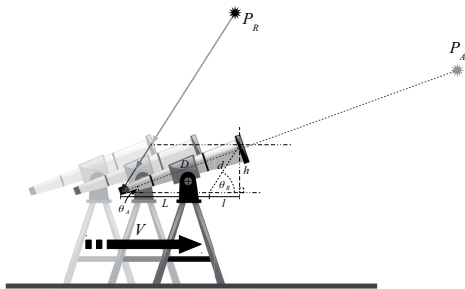
# Medindo a velocidade da luz: primeiras tentativas

Por outro lado

$$h = d \sin \theta_R = D \sin \theta_A .$$

Mas,

$$D \cos \theta_A = L + l = \frac{Vd}{c} + d \cos \theta_R .$$



Portanto

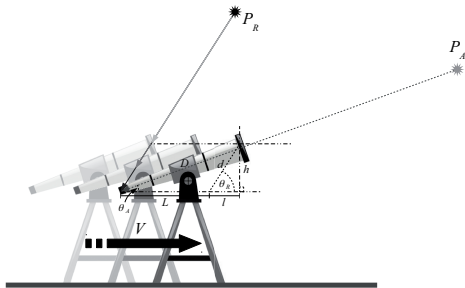
$$\tan \theta_A \approx \frac{c \sin \theta_R}{V + c \cos \theta_R} ,$$

o que permite, para  $\theta_R = \pi/2$  obter uma medida da velocidade da luz relativamente à velocidade da Terra. De facto Bradley estimou a velocidade da luz em 295000 km/s com este método.

Usando a definição do índice de refração  $n = c/V$ , temos

$$\tan \theta_A = \frac{n \sin \theta_R}{1 + n \cos \theta_R} .$$

Em 1810, usando esta expressão, François Arago demonstrou experimentalmente que a velocidade da luz não dependia do índice de refração em que o telescópio se encontrava.





# As Equações de Maxwell e o Grupo de Galileu

Durante o século XIX o carácter ondulatório da luz ficou estabelecido de forma definitiva tanto do lado experimental, como do lado teórico, culminando com as demonstrações de Maxwell e de Hertz de que a luz é uma onda resultante da **oscilação conjunta de um campo eléctrico e de um campo magnético**. As lei que regem esses campos são as Equações de Maxwell:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad \text{Lei de Gauss}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{Lei de Faraday}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad \text{Lei de Ampère (corrigida)}$$

Introdução

Medir a  
velocidade da  
luz

Equações de  
Maxwell

Do it Yourself

A experiência  
de Michelson-  
Morley

Simultaneidade



# Do it yourself



## Exercício (opcional):

Se já tiver feito Electromagnetismo e Óptica, verifique que as equações de Maxwell **não mantêm** a sua forma quando se passa de um referencial **inercial** para outro através das transformações de Galileu. Isso significa que a física é diferente para esses dois observadores perante essa transformação.

Introdução

Medir a  
velocidade da  
luz

Equações de  
Maxwell

Do it Yourself

A experiência  
de Michelson-  
Morley

Simultaneidade



Introdução

Medir a  
velocidade da  
luz

Equações de  
Maxwell

Do it Yourself

A experiência  
de Michelson-  
Morley

Simultaneidade

## Exercício:

Decorre das equações anteriores que o campo eléctrico e magnético no vazio obedecem à **equação das ondas**:

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

Mostre que a equação das ondas não mantém a sua forma perante uma transformação de Galileu.

# A experiência de Michelson-Morley: conceito

Introdução

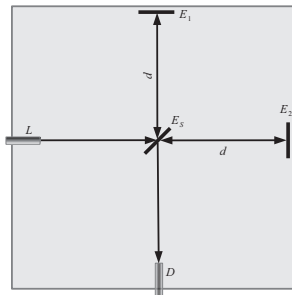
Medir a  
velocidade da  
luz

Equações de  
Maxwell

Do it Yourself

A experiência  
de Michelson-  
Morley

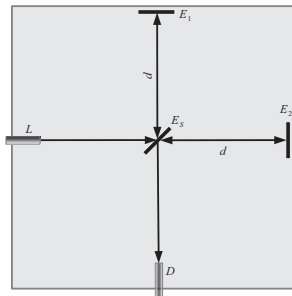
Simultaneidade



Suponhamos que dois raios luminosos são emitidos em fase perpendicularmente um ao outro segundo os eixos dos  $xx$  e  $yy$ . Depois de reflectidos nos espelhos  $E_1$  e  $E_2$  colocados no seu caminho observa-se a sua interferência no ponto de observação  $D$ . Se tiverem demorado o mesmo tempo a chegar aí devem continuar em fase.

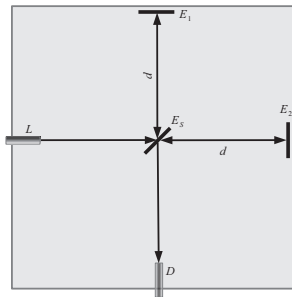


# A experiência de Michelson-Morley: conceito



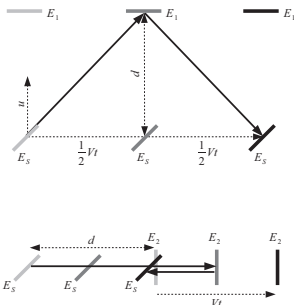
Caso contrário a figura de interferência observada permitir-nos-á determinar qual é a diferença de fase e portanto a diferença de caminho óptico entre os dois. Eventuais contribuições do éter para a velocidade da luz devem ser observáveis e as diferenças de fase encontradas só podem ser atribuídas a velocidades de propagação da luz nas duas direcções.

# A experiência de Michelson-Morley: conceito



Caso contrário a figura de interferência observada permitir-nos-á determinar qual é a diferença de fase e portanto a diferença de caminho óptico entre os dois. Eventuais contribuições do éter para a velocidade da luz no ar devem ser observáveis e as diferenças de fase encontradas só podem ser atribuídas a velocidades de propagação da luz nas duas direcções.

# A experiência de Michelson-Morley: conceito



Para simplificar vamos admitir que os dois braços da experiência segundo  $x$  e  $y$  têm um comprimento  $d$  idêntico. Segundo o eixo dos  $yy$ , do ponto de vista do referencial do éter em que o aparelho se move com uma velocidade  $V \sim 30 \text{ km.s}^{-1}$  (velocidade de translação da Terra), a luz percorre a trajetória triangular  $E_S E_1 E_S$  com uma velocidade vertical  $u$ .

Introdução

Medir a  
velocidade da  
luz

Equações de  
Maxwell

Do it Yourself

A experiência  
de Michelson-  
Morley

Simultaneidade

# A experiência de Michelson-Morley: conceito

Introdução

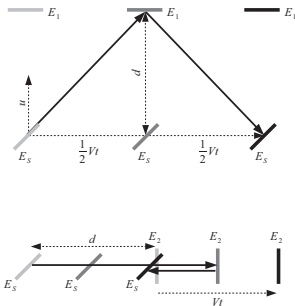
Medir a  
velocidade da  
luz

Equações de  
Maxwell

Do it Yourself

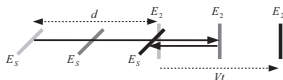
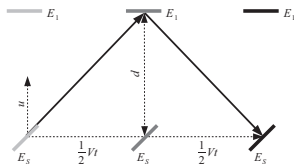
A experiência  
de Michelson-  
Morley

Simultaneidade



Quanto ao raio de luz enviado segundo o eixo dos  $xx$ , ele segue o percurso rectilíneo  $E_S E_2 E_S$ .

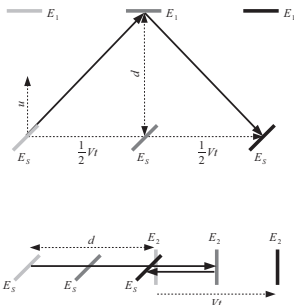
# A experiência de Michelson-Morley: conceito



O tempo de percurso de cada um dos raios de luz, segundo a mecânica de Galileu, é

$$\begin{aligned}
 E_S E_1 E_S : \quad \frac{2d}{u} &= \frac{2d}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \\
 E_S E_2 E_S : \quad \frac{d}{c - V} + \frac{d}{c + V} &= \frac{2dc}{c^2 - V^2} = \frac{2d}{c} \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}}.
 \end{aligned} \tag{1}$$

# A experiência de Michelson-Morley: conceito



Portanto  $E_S E_1 E_S \neq E_S E_2 E_S$  e logo os dois raios de luz, que partiram ao mesmo tempo de  $L$ , **não vão chegar ao ponto de observação  $D$  no mesmo instante, com o consequente aparecimento de fenômenos de interferência por os dois raios de luz apresentarem uma diferença de fase resultante do atraso.**

Introdução

Medir a  
velocidade da  
luz

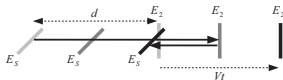
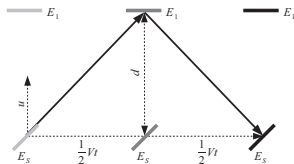
Equações de  
Maxwell

Do it Yourself

A experiência  
de Michelson-  
Morley

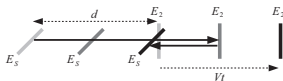
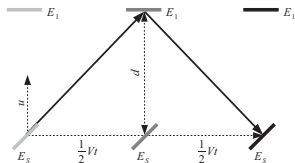
Simultaneidade

# A experiência de Michelson-Morley: conceito



Todavia nenhuma alteração foi detectada. Michelson e Morley repetiram a experiência em diferentes alturas do dia e em diferentes alturas do ano mas o resultado foi sempre negativo. E apesar de ter sido repetida desde então muitas vezes e em diferentes versões o resultado foi sempre negativo.

# A experiência de Michelson-Morley: conceito



A experiência de Michelson e Morley leva a mais uma descoberta perturbadora. Se os padrões de interferência não se alteram, isso significa que a velocidade da luz não se altera para observadores movendo-se com uma velocidade relativa não nula.

Introdução

Medir a  
velocidade da  
luz

Equações de  
Maxwell

Do it Yourself

A experiência  
de Michelson-  
Morley

Simultaneidade



# A experiência de Michelson-Morley: conceito

Introdução

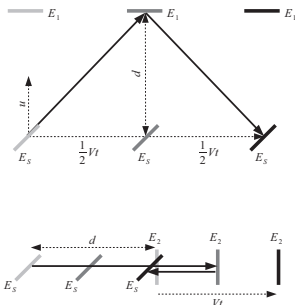
Medir a  
velocidade da  
luz

Equações de  
Maxwell

Do it Yourself

A experiência  
de Michelson-  
Morley

Simultaneidade



Isso significa que para a luz a lei de adição de velocidades – uma consequência imediata das leis de transformação de Galileu– não é válida e que, portanto, essas leis de transformação deixam de ser válidas! Desapareceu o éter e com ele esfumou-se igualmente todo o belo edifício da Mecânica Clássica.



# A questão da simultaneidade

Introdução

Medir a  
velocidade da  
luz

Equações de  
Maxwell

Do it Yourself

A experiência  
de Michelson-  
Morley

Simultaneidade

Imaginemos que anestesiemos um observador, colocamo-lo numa nave fechada e fazemos com que acorde já em imponderabilidade no espaço profundo. Ao acordar ele vai obviamente perguntar-se a si próprio onde está e para onde vai. A sua primeira pergunta será se está em movimento ou não. Contudo, com os elementos que tem essa pergunta não tem resposta, como já Newton havia reconhecido: não é possível determinar o estado de movimento de um corpo baseando-se unicamente no resultado de uma experiência que não saia do referencial em que ele está em repouso.



# A questão da simultaneidade

Introdução

Medir a  
velocidade da  
luz

Equações de  
Maxwell

Do it Yourself

A experiência  
de Michelson-  
Morley

Simultaneidade

Imaginemos agora que outra nave passa entretanto por perto e é detectada pelos sensores (até aí mudos) de movimento da nave do nosso observador. Ele agora sabe que existem outros corpos em movimento relativamente a ele mas, mais uma vez, não pode saber se **ele próprio** está em movimento. Isto mostra, como no caso newtoniano, que **só é possível detectar movimento relativo**; o movimento absoluto não tem sentido!



# A questão da simultaneidade

Introdução

Medir a  
velocidade da  
luz

Equações de  
Maxwell

Do it Yourself

A experiência  
de Michelson-  
Morley

Simultaneidade

Consideremos então um conjunto de referenciais  $\mathcal{K}_0, \mathcal{K}_1, \mathcal{K}_2 \dots$  movendo-se todos uns relativamente aos outros com um movimento rectilíneo e uniforme e imaginemos que eles não são todos equivalentes para a descrição das leis físicas. Nesse caso seria natural escolher de entre eles aquele em que as leis físicas assumiriam a forma mais simples para servir de referência para todos os outros. Suponhamos, sem perda de generalidade, que definimos  $\mathcal{K}_0$  como sendo esse referencial. Formalmente poderíamos considerá-lo como em "repouso absoluto" em relação ao qual todos os outros estariam em movimento. As leis físicas assumiriam em todos os outros referenciais formas mais complicadas (e dependente da velocidade) pelo simples facto de se moverem em relação a  $\mathcal{K}_0$ .



# A questão da simultaneidade

Introdução

Medir a  
velocidade da  
luz

Equações de  
Maxwell

Do it Yourself

A experiência  
de Michelson-  
Morley

Simultaneidade

Ora, a velocidade da Terra muda ao longo do ano devido ao seu movimento de rotação e translação em torno do Sol e os vários referenciais “instantâneos” poderiam fornecer-nos essa família de referenciais.

Por exemplo, a Terra não é, obviamente, um referencial de inércia embora para pequenos intervalos de tempos relativamente ao seu movimento de rotação intrínseco e de translação em torno do Sol possa muito aproximadamente ser considerada como tal. Desse ponto de vista a Terra é um referencial ideal para a experiência porque vai testando um conjunto de referenciais à medida que se move em torno de si própria e em torno do Sol.



# A questão da simultaneidade

Introdução

Medir a  
velocidade da  
luz

Equações de  
Maxwell

Do it Yourself

A experiência  
de Michelson-  
Morley

Simultaneidade

Em particular deveríamos esperar que a direcção e a magnitude da velocidade do movimento da Terra interviesse a todo o instante nas leis da Natureza medidas no seu referencial. Acontece que a experiência de Michelson e Morley mostra inequivocamente que uma tal influência não existe e que, portanto, as leis da Natureza são as mesmas em **todos** os referenciais inerciais