



Velocidade da luz

em diferentes materiais homogéneos e isotrópicos

Gonçalo Figueira — goncalo.figueira@tecnico.ulisboa.pt
Complexo Interdisciplinar, ext. 3375
Tel. 218 419 375
1.º semestre 2019/20

Objectivos

Método de medição

Modulação em amplitude

Detecção heteródina óptica

Osciloscópio em modo XY – figuras de Lissajous

Montagem experimental

Medição da velocidade da luz: objectivos

- Determinação experimental do valor de c no ar
- Medição do índice de refração de materiais transparentes, homogéneos e isotrópicos

Valor **exacto** para a velocidade da luz no vácuo:

$$c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$$

Desafio: a velocidade da luz é muito elevada!

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

No vácuo:

$$\begin{aligned} c &= 3 \times 10^8 \text{ m/s} \\ &= 300 \text{ m}/\mu\text{s} \\ &= 0,3 \text{ m/ns} \end{aligned}$$



Exemplo:

Um osciloscópio tem uma capacidade de resolução de $\sim 10 \text{ ns}$

Supondo que esta é a incerteza, e apontando para um valor de 1%:

é preciso medir um intervalo de $1000 \text{ ns} \equiv 300 \text{ m}$!

Princípio do método de medição

Utilizar um LED pulsado

Comparar a fase do sinal enviado e a do sinal recebido

Variar o percurso da luz e comparar a variação de fase correspondente

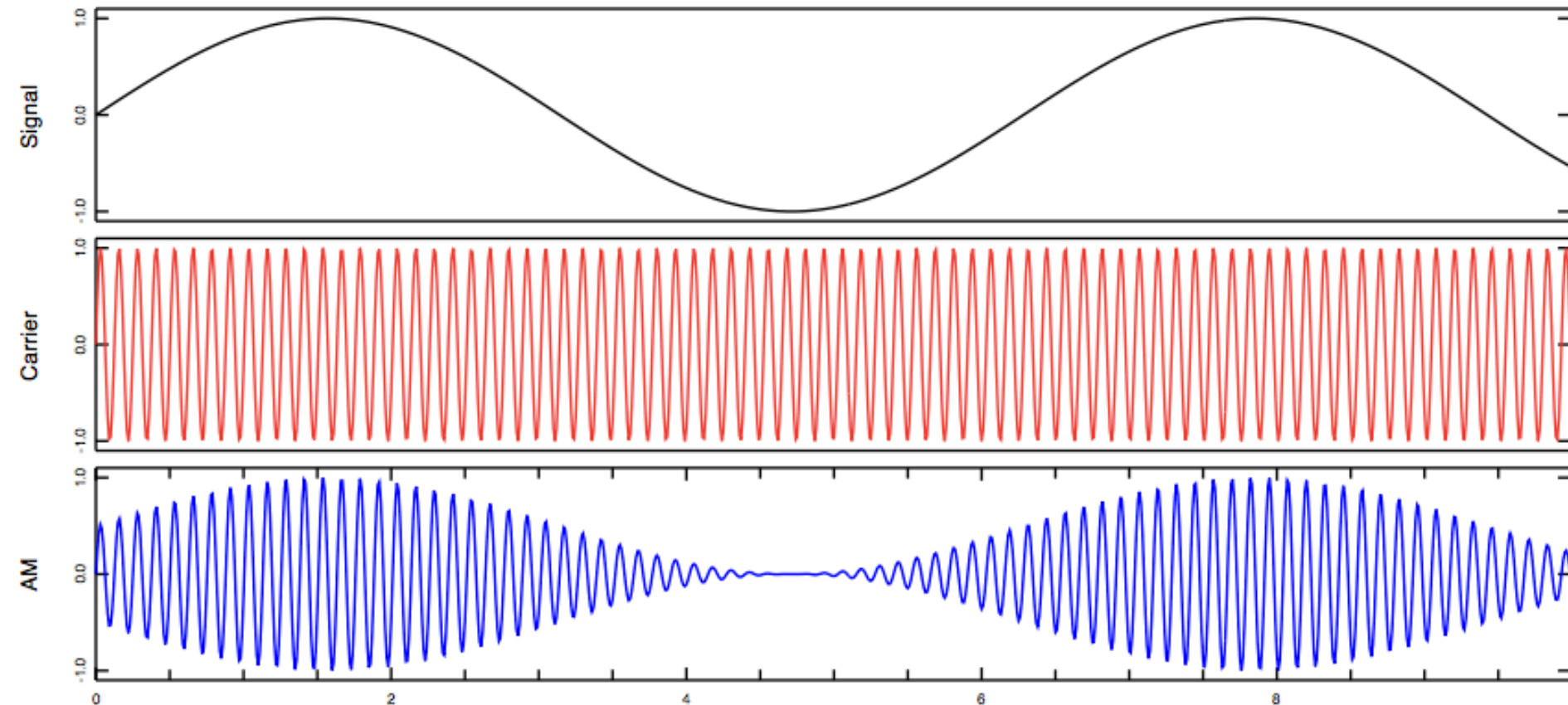
Modulação de amplitude

Deteção heteródina

Osciloscópio em modo XY

1. Modulação em amplitude

A amplitude de um sinal que varia rapidamente é modulada no tempo por outro sinal mais lento.



1. Modulação em amplitude

Nesta experiência, a onda **rápida** é a luz de um LED vermelho:

$$\lambda_{LED} = 633 \text{ nm} \qquad f_{LED} = \frac{c}{\lambda_{LED}} \approx 474 \times 10^{12} \text{ Hz} = 474 \text{ THz}$$

$$T_{LED} = \frac{1}{f_{LED}} \approx 2,11 \times 10^{-15} \text{ s} = 2,11 \text{ fs}$$



A onda **lenta** é uma modulação electrónica a 50 MHz:

$$f_{\text{mod}} = 50 \text{ MHz}$$

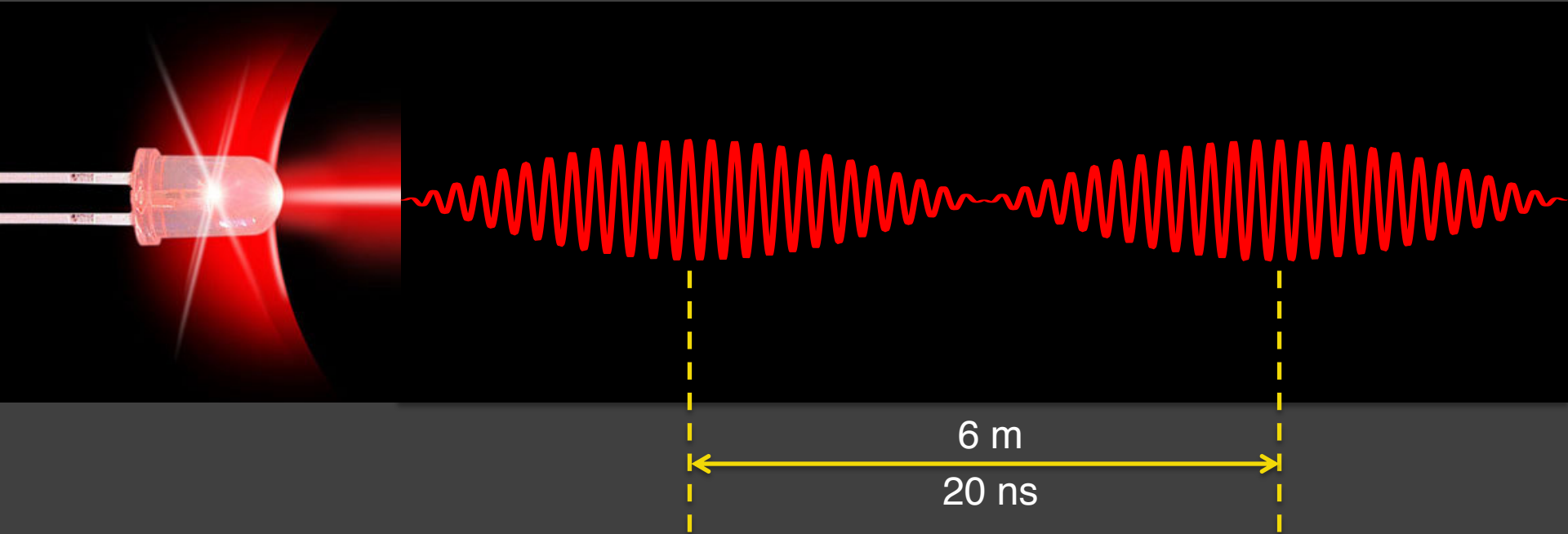
$$T_{\text{mod}} = \frac{1}{f_{\text{mod}}} = 20 \text{ ns} \qquad \lambda_{\text{mod}} = \frac{c}{f_{\text{mod}}} = 6 \text{ m}$$

$$I(t) = \frac{I_0}{2} [1 + \sin(2\pi f_{\text{mod}} t)]$$

LED modulado em amplitude

Amplitude modulada
Distância *ou* tempo

$$\frac{f_{LED}}{f_{mod}} \approx 10^6$$

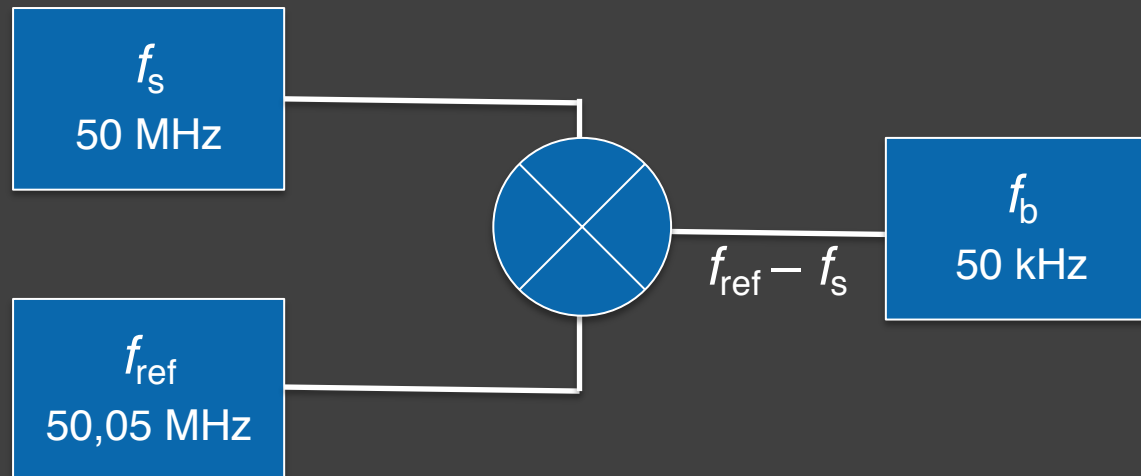


(agora, uma incerteza de 1% corresponde a 6 cm)

2. Detecção heteródina óptica

Consiste em misturar um sinal de uma dada frequência com outro de uma frequência ligeiramente diferente; resulta um **batimento**

Objectivo: detectar **pequenas alterações** no percurso do sinal



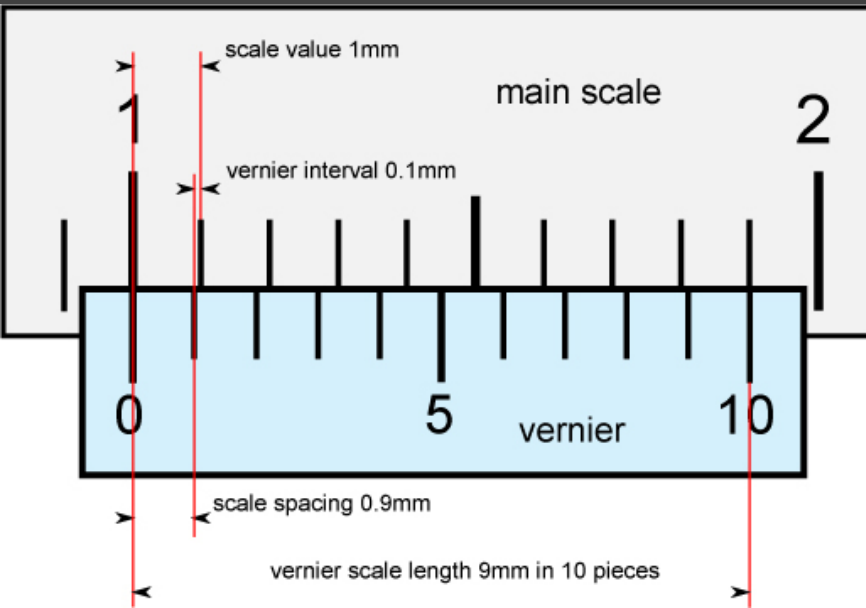
(*heteródina* = mais que uma frequência)

O nónio: um exemplo de *detecção heteródina no espaço*

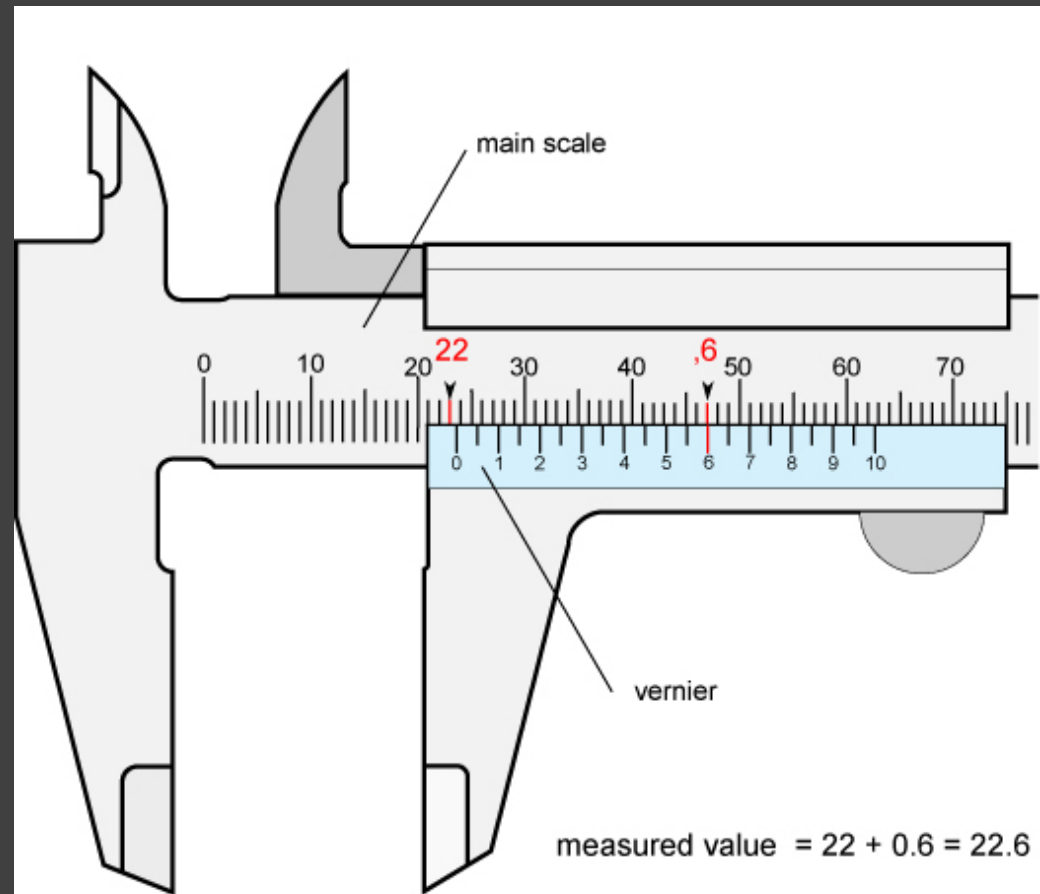
Duas escalas de
“frequências” diferentes

principal: $10 \text{ div} = 10 \text{ mm}$

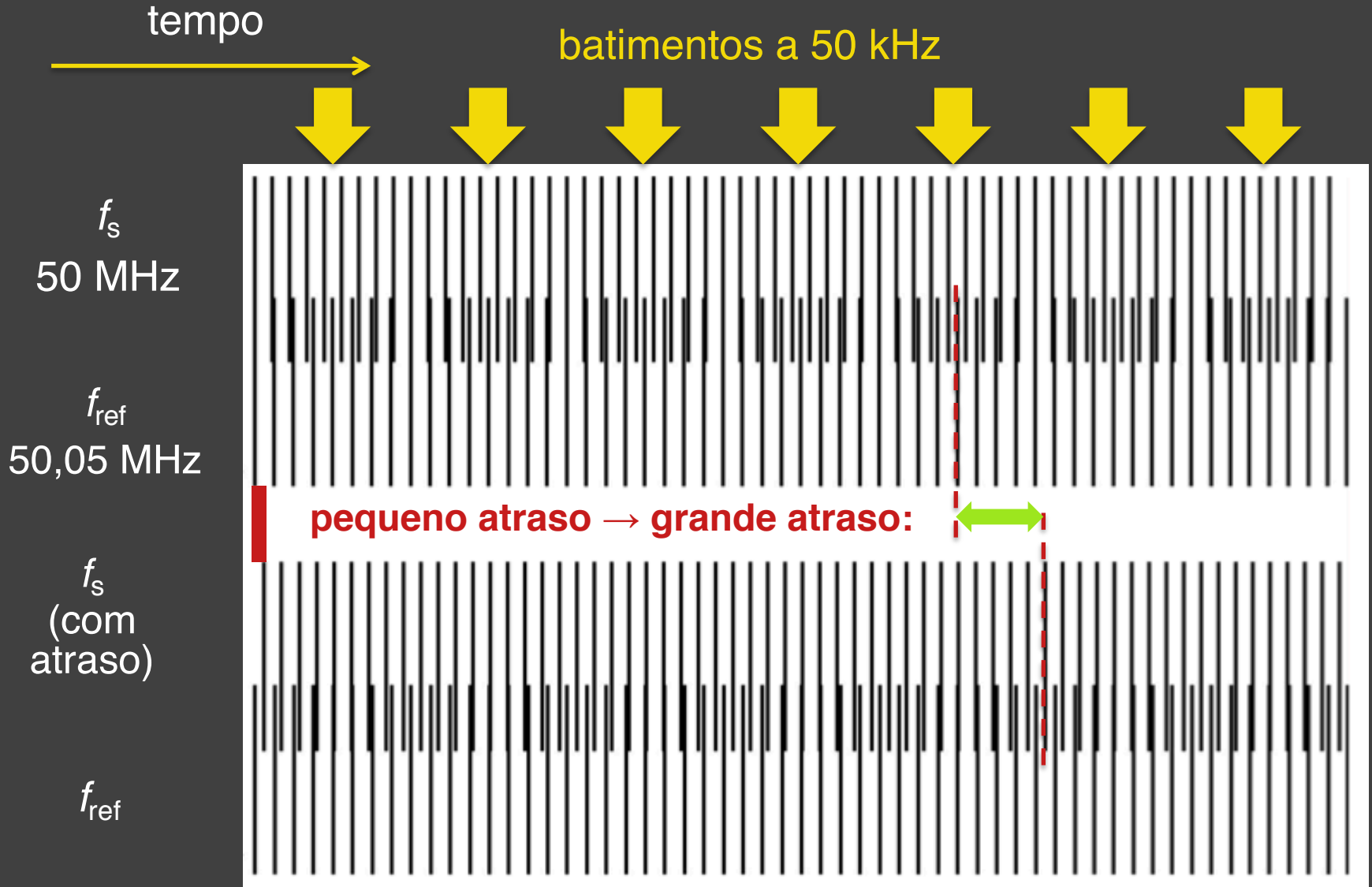
nónio: $10 \text{ div} = 9 \text{ mm}$



Pequenos desvios na escala principal:
“batimentos” entre as duas escalas



Detecção heteródina óptica



3. Osciloscópio em modo XY: Figuras de Lissajous

As duas ondas – luz recebida e sinal de referência – dão origem a padrões diferentes, conforme a sua **fase relativa**

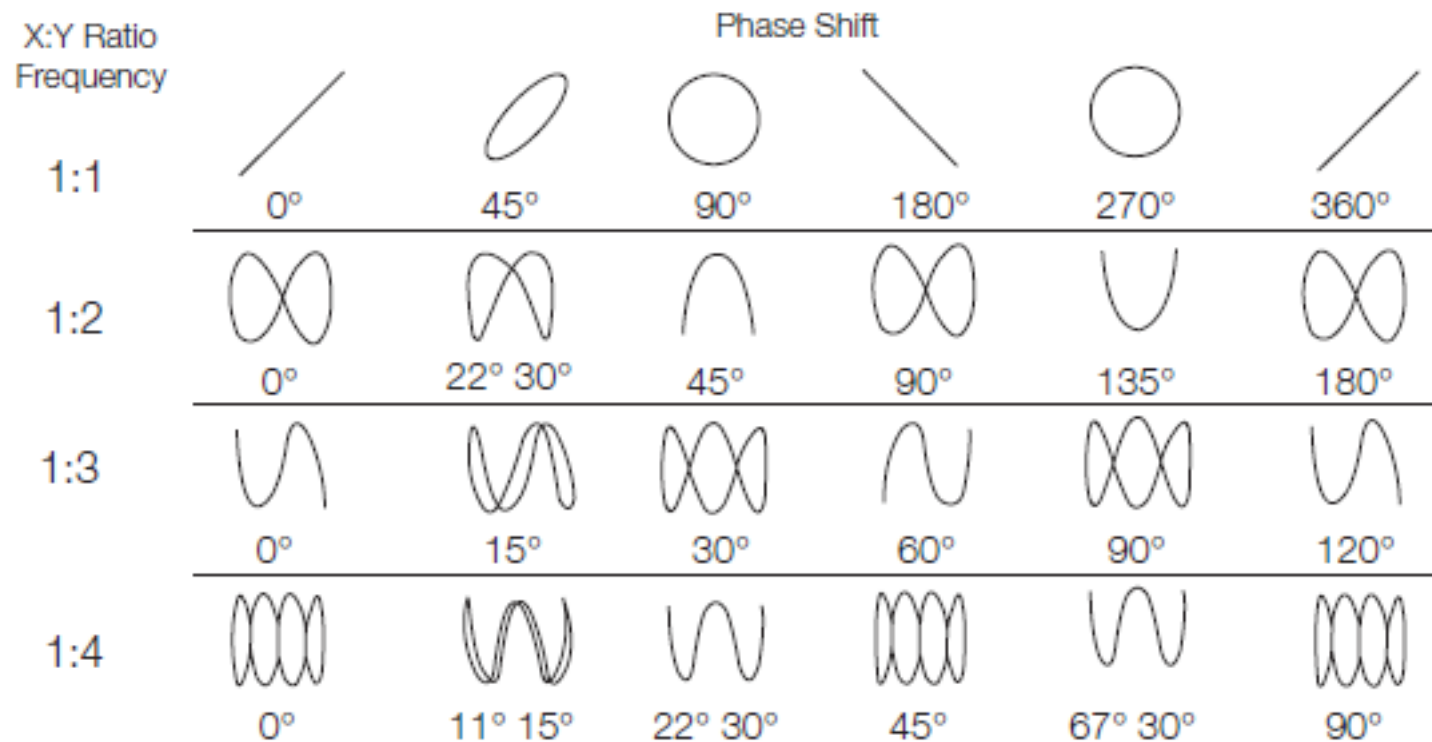
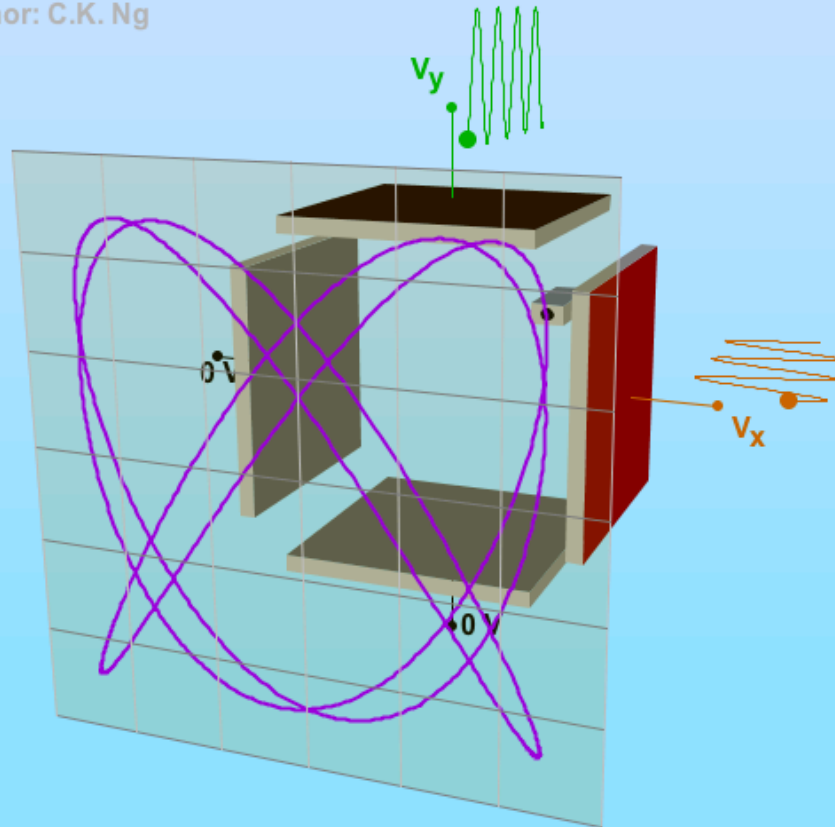


Figure 70. Lissajous patterns.

Figuras de Lissajous

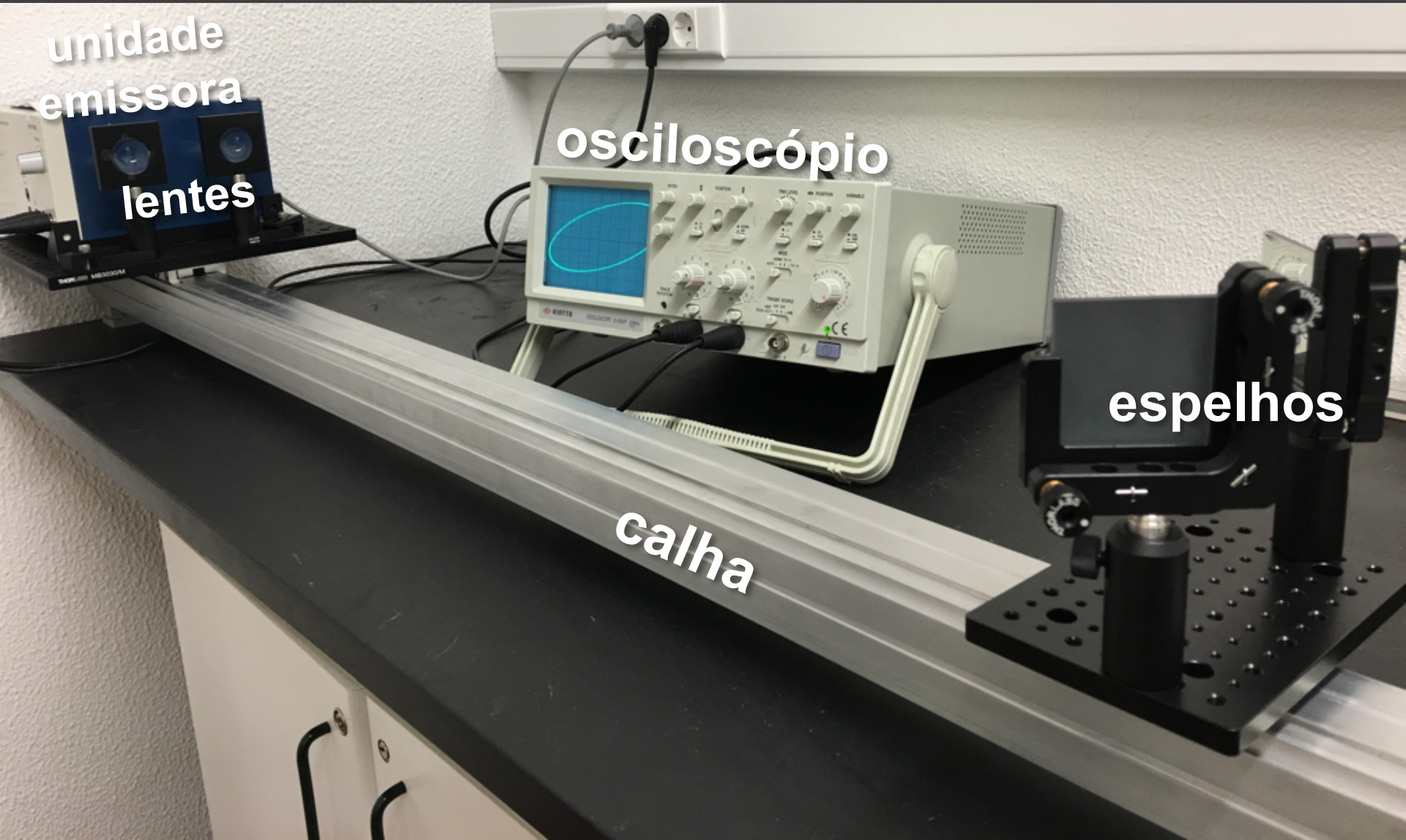
<https://ngsir.netfirms.com/englishhtm/Lissajous.htm>

Author: C.K. Ng

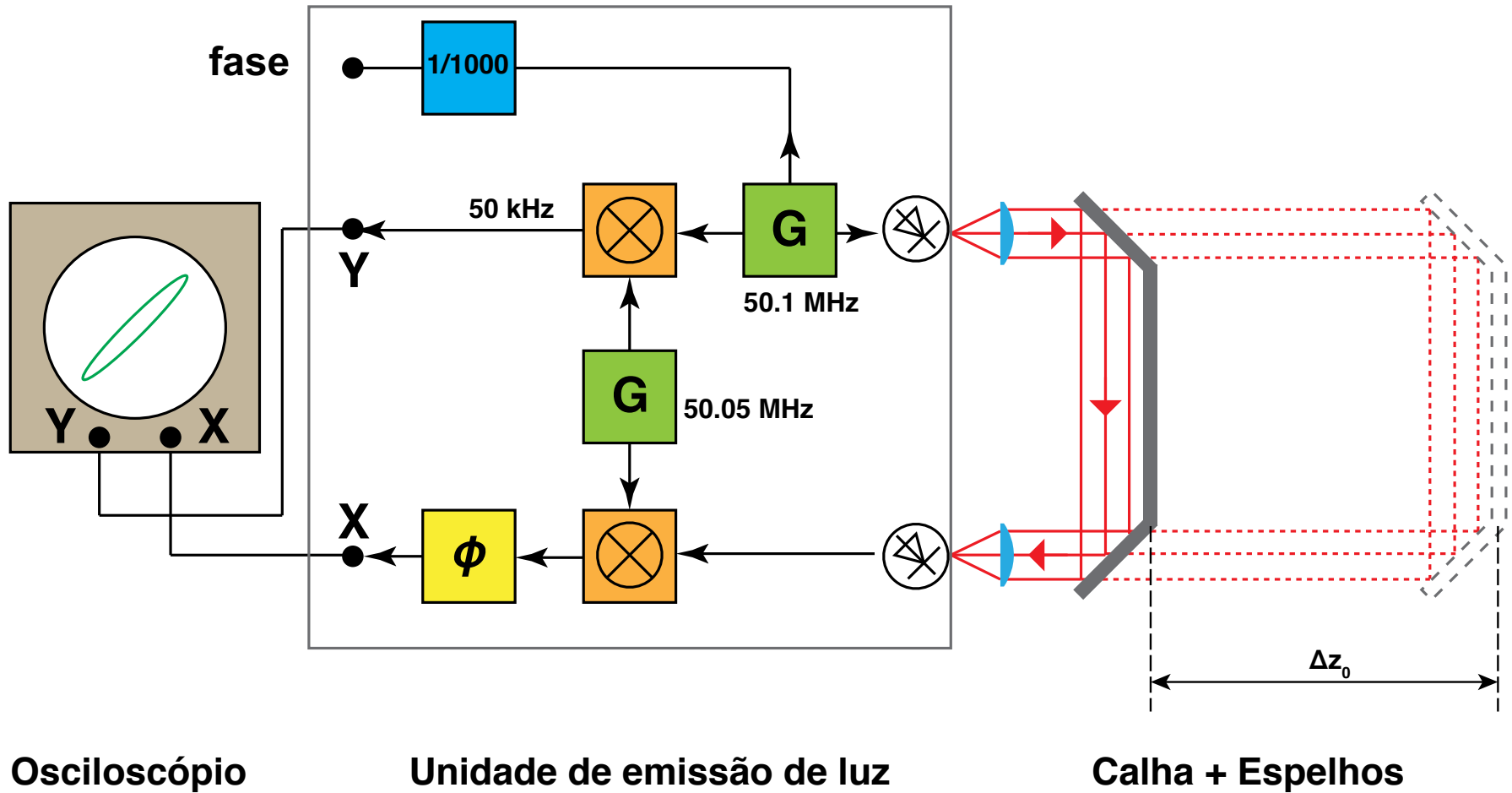


<input type="button" value="Start"/>		<input type="button" value="Stop"/>		<input type="checkbox"/> Front	Zoom <input type="button" value="Zoom"/>
fx = 3 Hz <input type="button" value="fx"/>	x-initial phase =	30 deg	<input type="button" value="x-phase"/>	x-Amp	<input type="button" value="x-amp"/>
fy = 4 Hz <input type="button" value="fy"/>	y-initial phase =	-60 deg	<input type="button" value="y-phase"/>	y-Amp	<input type="button" value="y-amp"/>

Montagem experimental



Medição da velocidade da luz



Medição da velocidade da luz no ar

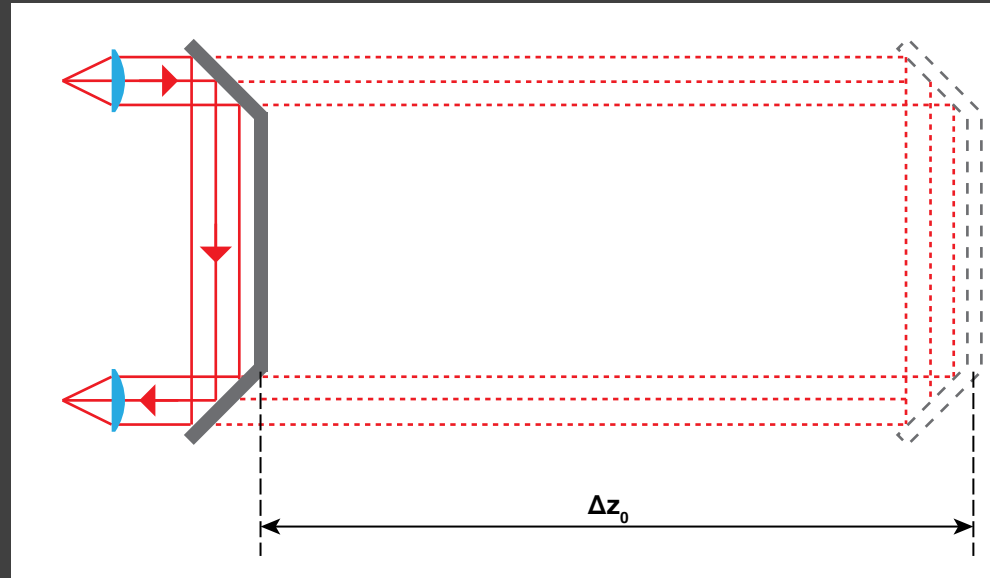
Colocar os espelhos na posição zero, ajustar fase.

Quando se desloca o par de espelhos de Δz_0 a luz percorre uma distância adicional

$$\Delta L = 2z_0$$

Procura-se a distância que corresponde a oposição de fase (180°)

A velocidade da luz é então dada por



$$\Delta t = \frac{T_{\text{mod}}}{2} = \frac{20 \text{ ns}}{2} = 10 \text{ ns}$$

$$c = \frac{\Delta L}{\Delta t} = \frac{2\Delta z_0}{T_{\text{mod}}/2}$$

Medição da velocidade da luz noutros meios

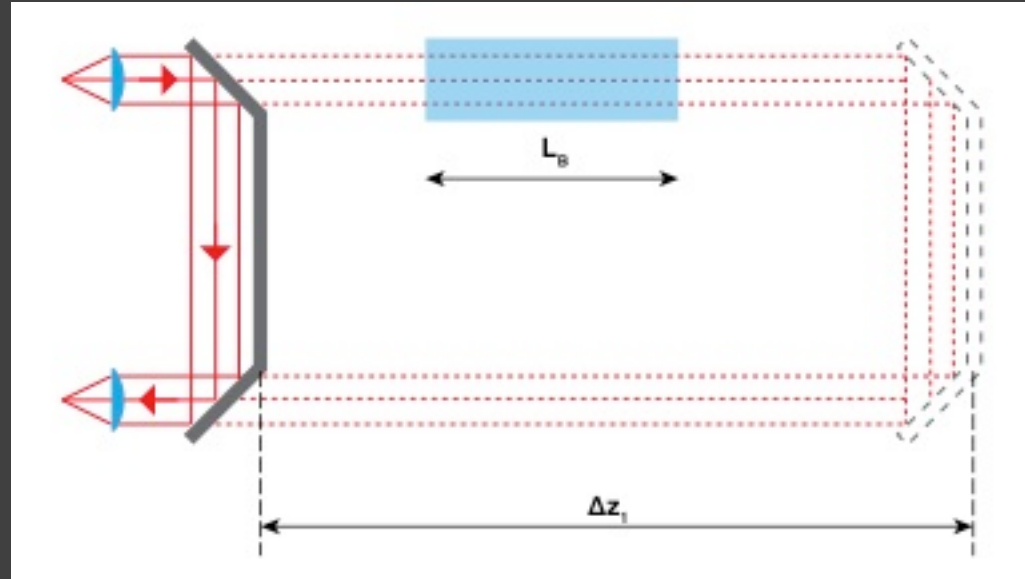
(Água e resina acrílica)

Um bloco de espessura L_B com índice de refração n_B vai alterar a distância percorrida:

$$\frac{T}{2} = \frac{L_{ar}}{c_{ar}} + \frac{L_B}{c_B} = \frac{2\Delta z_1 - L_B}{c} + \frac{L_B}{c_B}$$

Daqui pode obter-se o valor do índice de refração n_B :

$$n_B \equiv \frac{c}{c_B} = 1 + \frac{2(\Delta z_0 - \Delta z_1)}{L_B}$$



Algumas ideias e estimativas

- Estime o valor de ΔL , isto é, de quanto é preciso deslocar os espelhos para passar a oposição de fase
- Considere um material de espessura 20 cm e com um índice de refração de $n = 1,5$ e estime o valor de Δz_1
- Derive as expressões para as incertezas