

1º Semestre 2003/2004
Instituto Superior Técnico



Experiência da determinação da velocidade da luz

Licenciatura em Engenharia Física Tecnológica

Ricardo Figueira nº53755
André Cunha nº53757
Tiago Marques nº53775
Segunda-feira / Grupos

LFX4
Professor Bernardo Brotas de Carvalho

Lisboa, 24 de Novembro de 2003

Introdução

- Objectivos

Nesta experiência vamos determinar, experimentalmente, a velocidade da luz em três meios de propagação distintos: no ar, num vidro acrílico e na água, iremos também proceder à comparação das velocidades da luz no ar e no vácuo e proceder ao cálculo dos valores dos índices de refração da radiação considerada, no vidro acrílico e na água a partir dos valores de velocidade obtidos experimentalmente, e estabeleceremos então, uma base comparativa entre os índices obtidos experimentalmente e os valores tabelados.

- Determinação experimental do valor da velocidade da luz em três meios distintos e respectivos índices de refração

Irão ser usados, durante o procedimento experimental, um feixe de luz coerente, cujo comprimento de onda se situa no espectro da radiação visível, na zona do vermelho e um sistema de dois espelhos, móvel ao longo de uma calha graduada.

Iremos começar por medir a velocidade da luz no ar através da seguinte relação:

$$c_1 = 4x_1f, \text{ onde}$$

$c_1 \rightarrow$ Velocidade da luz no ar

$x_1 \rightarrow$ Deslocamento do sistema de espelhos, que irá ser igual a metade do comprimento de onda da radiação utilizada no procedimento experimental

$f \rightarrow$ Frequência da tensão aplicada ao gerador de sinais = 50MHz

Procederemos então à comparação de c_1 com o valor de c tabelado = $299792458 \text{ m.s}^{-1}$ (velocidade da luz no vácuo).

De seguida, iniciaremos o processo de medição experimental da velocidade da luz num vidro acrílico, que irá ser calculada através da seguinte relação:

$$c_2 = \frac{4x_1fB}{2x_1 - 2x_2 + B}, \text{ onde}$$

$c_1 \rightarrow$ Velocidade da luz no ar

$x_1 \rightarrow$ Deslocamento do sistema de espelhos, que irá ser igual a metade do comprimento de onda da radiação utilizada no procedimento experimental

$f \rightarrow$ Frequência da tensão aplicada ao gerador de sinais = 50MHz

$x_2 \rightarrow$ Deslocamento do sistema de espelhos, que irá ser igual a metade do comprimento de onda (com vidro) da radiação utilizada no procedimento experimental

$B \rightarrow$ Comprimento do bloco de vidro de acrílico

A determinação de c_2 vai permitir comparar o índice de refração do vidro acrílico, obtido experimentalmente, com o respectivo valor “tabelado” (calculado através do valor tabelado da velocidade da luz no vácuo).

Por fim, a velocidade da luz na água irá ser determinada através de:

$$c_4 = \frac{4x_1 f H}{2x_3 - 2x_4 + H}, \text{ onde}$$

- $c_4 \rightarrow$ Velocidade da luz na água
- $x_1 \rightarrow$ Deslocamento do sistema de espelhos, que irá ser igual a metade do comprimento de onda da radiação utilizada no procedimento experimental
- $f \rightarrow$ Frequência da tensão aplicada ao gerador de sinais = 50MHz
- $x_3 \rightarrow$ Deslocamento do sistema de espelhos, com o recipiente vazio, que irá ser igual a metade do comprimento de onda da radiação utilizada no procedimento experimental
- $x_4 \rightarrow$ Deslocamento do sistema de espelhos, com o recipiente repleto de água, que irá ser igual a metade do comprimento de onda da radiação utilizada no procedimento experimental
- $H \rightarrow$ Comprimento do recipiente que contém a água

Com o valor da velocidade da luz na água, vamos então estar aptos a comparar, o índice de refração da água, obtido experimentalmente, com o respectivo valor “tabelado” (calculado através do valor tabelado da velocidade da luz no vácuo).

Irão ser assim atingidos, os objectivos que determinamos para este procedimento experimental.

Esquema de Ligações

Resultados Experimentais

Tabela 1: Determinação da velocidade da luz no ar

Medida	x1 (m)	Δ x1 (m)	f (x10 ⁶ Hz)	C _{ar} (m/s)	Δ C _{ar} (m/s)	C _{ar} médio (m/s)	Δ C _{ar} médio (m/s)
1	1.495	0.01	50	299000000	2000000	297530000	2400000
2	1.49	0.015		298000000	3000000		
3	1.495	0.0135		299000000	2700000		
4	1.487	0.011		297400000	2200000		
5	1.4915	0.0105		298300000	2100000		
6	1.477	0.012		295400000	2400000		
7	1.4855	0.0105		297100000	2100000		
8	1.4845	0.0135		296900000	2700000		
9	1.485	0.011		297000000	2200000		
10	1.486	0.013		297200000	2600000		

C_{ar} (valor tabelado) = 299792458 m/s

Desvio à precisão (C_{ar}) = 0.806661 %

Desvio à exactidão (C_{ar}) = 0.754675 %

Legenda:

x1: Posição em que o sinal recebido se encontra em oposição de fase

f : Frequência do sinal

C_{ar} : Velocidade da luz no ar

Cálculos:

$$C_{ar} = 4x_1f$$

$$\Delta C_{ar} = \left| \frac{\delta C_{ar}}{\delta x_1} \right| \Delta x_1 = 4f \Delta x_1$$

Observações:

- Para os cálculos do erros não se considerou o erro de f já que este é praticamente desprezável
- Para o cálculo do erro de x1 (e também de x2, x3 e x4 nas próximas experiências) viu-se a diferença entre o menor e o maior ponto em que a recta é visível no modo XY do osciloscópio.

Tabela 2: Determinação da velocidade da luz no vidro acrílico

Medida	x2 (m)	Δ x2 (m)	f (x10 ⁶ Hz)	B (m)	Δ B (m)	C ₂ (m/s)	Δ C ₂ (m/s)	n2	Δ n2
1	1.394	0.008	50	0,289	0,002	180529435	15349697.25	1.6481	0.129053
2	1.392	0.007				179025963	18699043.19	1.6619	0.15683
3	1.394	0.006				180529435	16911503.47	1.6481	0.139433
4	1.39	0.005				177547326	13539706.34	1.6758	0.115403
5	1.389	0.007				176817129	14470337.79	1.6827	0.125832
6	1.393	0.006				179774556	15473541.49	1.655	0.1291
7	1.394	0.008				180529435	15789397.93	1.6481	0.132513
8	1.381	0.009				171184890	17392614.47	1.7381	0.160817
9	1.392	0.007				179025963	15235775.02	1.6619	0.129148
10	1.394	0.006				180529435	16471802.79	1.6481	0.135973

$C_{2 \text{ médio}} = 178549357 \text{ m/s}$
 $C_2 \text{ (valor tabelado)} = 187000000 \text{ m/s}$
 Desvio à precisão (C_2) = 8.9273%
 Desvio à exactidão (C_2) = 4.519061%
 $n_2 \text{ (valor tabelado)} = 1,597$
 Desvio à precisão (n_2) = 8.120657%
 Desvio à exactidão (n_2) = 4.369568%

Legenda:

x_2 : Posição em que o sinal recebido se encontra em oposição de fase (com o vidro acrílico)
 B : Comprimento do vidro acrílico
 C_2 : Velocidade da luz no vidro acrílico
 n_2 : Índice de refração do ar para o vidro

Cálculos:

$$C_2 = \frac{4x_1 f B}{2x_1 - 2x_2 + B}$$

$$n_2 = \frac{C_{ar}}{C_2} = \frac{2x_1 - 2x_2 + B}{B}$$

$$\Delta n_2 = \left| \frac{\delta n_2}{\delta x_1} \right| \Delta x_1 + \left| \frac{\delta n_2}{\delta x_2} \right| \Delta x_2 + \left| \frac{\delta n_2}{\delta B} \right| \Delta B = \frac{2}{B} \Delta x_1 + \frac{2}{B} \Delta x_2 + \left| \frac{2x_1 - 2x_2}{B^2} \right| \Delta B$$

$$\Delta C_2 = \left| \frac{\delta C_2}{\delta n_2} \right| \Delta n_2 + \left| \frac{\delta C_2}{\delta C_{ar}} \right| \Delta C_{ar} = \frac{1}{n_2} \Delta C_{ar} + \frac{C_{ar}}{n_2^2} \Delta n_2$$

Observações:

- Para se realizar o cálculo do erro de C_2 calculou-se primeiro o n_2 e de seguida o seu erro. Desta forma simplificou-se muito o cálculo do erro de C_2 já que o cálculo directo deste era muito trabalhoso.
- Como x_1 e C_{ar} utilizaram-se os valores médios obtidos na experiência anterior

Tabela 3 (auxiliar): Determinação das posições médias para o recipiente vazio

Medida	x3 (m)	x3 _{médio} (m)	Δ x3 (m)	Δ x3 _{médio} (m)
1	1.4705	1.4697	0.004	0.0042
2	1.476		0.005	
3	1.467		0.004	
4	1.469		0.003	
5	1.472		0.004	
6	1.469		0.006	
7	1.4705		0.0055	
8	1.468		0.002	
9	1.4685		0.0055	
10	1.4665		0.0025	

Tabela 4: Determinação da velocidade da luz na água

Medida	x4 (m)	Δ x4 (m)	f (x10 ⁶ Hz)	H (m)	Δ H (m)	C ₄ (x10 ⁸ m/s)	Δ C ₄ (x10 ⁸ m/s)	n4	Δ n4
1	1.296	0.006	50	0,99	0,01	220244280	5371111.4	1.3509	0.023746556
2	1.3	0.005				221569655	6145025.3	1.3428	0.023664932
3	1.292	0.0055				218934666	5680947.8	1.359	0.02281808
4	1.294	0.004				219587521	4495278.3	1.3549	0.017726763
5	1.296	0.007				220244280	5766241.4	1.3509	0.025766758
6	1.298	0.0065				220904980	6464566.5	1.3469	0.028756249
7	1.295	0.005				219915410	5573819.2	1.3529	0.024777064
8	1.297	0.006				220574135	5213900.3	1.3489	0.019685746
9	1.294	0.004				219587521	5308459.3	1.3549	0.022777268
10	1.296	0.007				220244280	5627336.6	1.3509	0.022736455

$$C_{4 \text{ médio}} = 220180673 \text{ m/s}$$

$$C_4 \text{ (valor tabelado)} = 224800000 \text{ m/s}$$

$$\text{Desvio à precisão } (C_4) = 2.5269\%$$

$$\text{Desvio à exactidão } (C_4) = 2.05486\%$$

$$n_4 \text{ (valor tabelado)} = 1,333$$

$$\text{Desvio à precisão } (n_4) = 1.72048\%$$

$$\text{Desvio à exactidão } (n_4) = 1.37383\%$$

Legenda:

x3 : Posição em que o sinal recebido se encontra em oposição de fase (com o tubo com ar)

x2 : Posição em que o sinal recebido se encontra em oposição de fase (com o tubo com água)

B : Comprimento do tubo (só a parte com água)

C₄ : Velocidade da luz na água

n₂ : índice de refração do ar para a água

Cálculos:

$$C_4 = \frac{4x_1 fH}{2x_3 - 2x_4 + H}$$

$$n_4 = \frac{C_{ar}}{C_4} = \frac{2x_3 - 2x_4 + H}{H}$$

$$\Delta n_4 = \left| \frac{\delta n_4}{\delta x_3} \right| \Delta x_3 + \left| \frac{\delta n_4}{\delta x_4} \right| \Delta x_4 + \left| \frac{\delta n_4}{\delta H} \right| \Delta H = \frac{2}{H} \Delta x_3 + \frac{2}{H} \Delta x_4 + \left| \frac{2x_3 - 2x_4}{H^2} \right| \Delta H$$

$$\Delta C_4 = \left| \frac{\delta C_4}{\delta n_4} \right| \Delta n_4 + \left| \frac{\delta C_4}{\delta C_{ar}} \right| \Delta C_{ar} = \frac{C_{ar}}{n_4^2} \Delta n_4 + \frac{1}{n_4} \Delta C_{ar}$$

Observações:

- Como x1 e x3 utilizaram-se os valores médios. O de x1 obtido na primeira experiência e o de x3 da tabela 3.
- Para o cálculo do erro de C₄ utilizou-se o mesmo método que tínhamos utilizado para o cálculo do erro de C₂.

Conclusões

Esta experiência visou a medição da velocidade da luz no ar (C_{ar}), num vidro acrílico (C_2) e na água (C_4). O objectivo referido foi atingido com erros de precisão de ordem baixa pelo que não assumem relevância, mas, no entanto, estes podiam ser ainda mais reduzidos caso se conseguisse evitar alguns erros de leitura das escalas. No entanto, a principal fonte de erro resulta do facto de no osciloscópio não ser possível observar exactamente quando é que se dá a oposição de fases, porque, para um determinado intervalo, é sempre observável a recta que atravessa os quadrantes pares no osciloscópio e indica a oposição das fases. Assim toma-se como valor referência, o valor médio do intervalo em questão.

A velocidade da luz quando atravessa as paredes do recipiente que continha a água (C_3) não foi medida, já que este valor é matematicamente desnecessário para o cálculo de C_4 .

A exactidão das medições de C_{ar} é de 0.754675 % da velocidade $C_{v\u00e1cuo}$. No vidro acrílico e na água foram obtidos desvios à exactidão de 4.519061% e 2.05486% respectivamente para as velocidades da luz nos meios. Estes valores têm maior ordem que os do cálculo de C_{ar} porque a um procedimento experimental um pouco mais complicado que implica o aumento das fontes de erro (por exemplo o facto de a luz não incidir perpendicularmente no vidro acrílico e na água). Ainda foi possível calcular o índice de refração do vidro (n_{vidro}) e da água ($n_{\u00e1gua}$), com desvios à exactidão e precisão de também consideravelmente baixos.

\u00c9 ainda de referir que tanto a precis\u00e3o como a exactid\u00e3o da experi\u00eancia podiam ser melhoradas caso fossem utilizadas tanto na medi\u00e7\u00e3o de X_1 como nas de B e H escalas mais exactas.

Apêndice

Bibliografia:

- Contribuição para o desenvolvimento do ensino da Física Experimental no IST, António C. Ribeiro, Pedro Sebastião e Francisco Tomé
- Apontamentos das aulas práticas e teóricas e protocolos, professor Bernardo Brotas e Isabel Cabaço