

1º Semestre 2003/2004
Instituto Superior Técnico



Experiência de Difraccção e Interferências de ondas electromagnéticas

Licenciatura em Engenharia Física Tecnológica

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

LFX4
Professor Bernardo Brotas de Carvalho

Lisboa, 27 de Novembro de 2003

Introdução

Objectivos:

A luz pode mostrar-se como um fenómeno por vezes complexo devido às ambiguidades que aparentemente apresenta. Uma destas é o seu carácter dual, que nos permite atribuir-lhe simultaneamente um comportamento ondulatório e corpuscular. Visto que já demonstramos anteriormente a sua faceta corpuscular através da realização da experiência de Rutherford que consistiu essencialmente em provocar o efeito fotoeléctrico, pretendemos agora provar através deste procedimento experimental, que o comportamento da luz não é linear e que lhe pode ser atribuído comportamento ondulatório. O cerne do procedimento experimental irá consistir no estudo de dois fenómenos associados ao comportamento ondulatório: difracção e interferência.

Com base nestes dois fenómenos iremos medir a largura de uma fenda rectilínea, a espessura de um fio de cabelo, o comprimento de onda de um raio *laser* e a banda passante de dois filtros e assim verificar que a luz possui um comportamento ondulatório.

- Determinação da largura de uma fenda rectilínea ou de um fio de cabelo

Ao conhecermos a distância dos mínimos da figura de difracção ao máximo central e a distância do alvo à fenda ou ao fio de cabelo temos que:

$$\sin \theta_m = m \frac{\lambda}{s} = \frac{x_m}{\sqrt{d^2 + x_m^2}}, \text{ onde}$$

x_m → Distância do mínimo, de ordem m , na figura de difracção, ao máximo central.

d → Distância do alvo à fenda ou ao fio de cabelo.

θ_m → Ângulo entre o mínimo, de ordem m , e o máximo central.

s → Largura da fenda ou espessura do cabelo considerados.

λ → Comprimento de onda da radiação usada.

m → Ordem m .

- Determinação do comprimento de onda de um raio *laser*

Para determinar o comprimento de onda de um raio *laser*, iremos utilizar a seguinte relação:

$$\sin \theta_m = m \frac{\lambda_l}{a} = \frac{x_m}{\sqrt{d^2 + x_m^2}}, \text{ onde}$$

x_m → Distância do máximo, de ordem m , na figura de difracção, ao máximo central.

d → Distância do alvo à fenda ou ao fio de cabelo.

θ_m → Ângulo entre o máximo, de ordem m , e o máximo central.

a → Constante de rede (espaçamento das fendas na rede de difracção).

λ_l → Comprimento de onda do *laser* usado.

m → Ordem m .

Logo iremos medir a distância x_m e d , e visto que todas as as outras variáveis são conhecidas obteremos o comprimento de onda do *laser*.

- Determinação da banda passante de três filtros

Por fim, a banda passante é o intervalo de comprimentos de onda, que irão ser medidos como foi descrito anteriormente na medição do comprimento de onda do *laser*, que atravessam os filtros, neste caso verde, vermelho ou azul aparecendo assim no alvo.

Concluí-se o procedimento com o estimar dos erros associados.

Esquema de Ligações

Resultados Experimentais

Parte 1: Determinação do comprimento de onda da radiação monocromática emitida por um laser de Hélio/Neon

Tabela 1: Por Difrração por uma rede

m	x (m)	$x_{\text{médio}}$ (m)	Δx (m)	D (m)	ΔD (m)	a (m)	λ (m)	$\Delta\lambda$ (m)
1	0.0305	0.0307	0.0002	0.6	0.005	0.0000125	6.3958E-07	9.5E-09
-1	0.0309							
2	0.061	0.06125	0.00025				6.3802E-07	7.9E-09
-2	0.0615							
3	0.0921	0.09215	5E-05					
-3	0.0922							

$$\lambda_{\text{médio}} = 664,7 \text{ nm}$$

$$\Delta\lambda_{\text{médio}} = 7,7 \text{ nm}$$

Tabela 2: Por Difrração por uma rede

m	x (m)	$x_{\text{médio}}$ (m)	Δx (m)	D (m)	ΔD (m)	a (m)	λ (m)	$\Delta\lambda$ (m)
1	0.021	0.02075	0.00025	0.4	0.005	0.0000125	6.4844E-07	1.6E-08
-1	0.0205							
2	0.0419	0.0417	0.0002				6.5156E-07	1.1E-08
-2	0.0415							
3	0.064	0.06375	0.00025					
-3	0.0635							

$$\lambda_{\text{médio}} = 654,7 \text{ nm}$$

$$\Delta\lambda_{\text{médio}} = 12,7 \text{ nm}$$

Legenda:

x : Distância do máximo central aos mínimos de ordem m

D : Distância entre a fenda e o alvo

a : Distância entre as fendas na rede

λ : Comprimento de onda da radiação incidente

Cálculos:

Parte 2: Determinação da banda passante de um filtro

Tabela 3: Por Difraccção por uma rede (filtro vermelho)

Fronteira da banda	x (m)	Δx (m)	D (m)	ΔD (m)	a (m)	λ (m)	$\Delta \lambda$ (m)	Banda passante ($\times 10^{-9}m$)
Inicial	0.018	0.0005	0.4	0.005	1.25E-05	5.63E-07	2.26563E-08	563 - 719
final	0.023					7.19E-07	2.46094E-08	

Tabela 4: Por Difraccção por uma rede (filtro vermelho)

Fronteira da banda	x (m)	Δx (m)	D (m)	ΔD (m)	a (m)	λ (m)	$\Delta \lambda$ (m)	Banda passante ($\times 10^{-9}m$)
Inicial	0.0275	0.0005	0.6	0.005	1.25E-05	5.73E-07	1.5191E-08	573 - 708
final	0.034					7.08E-07	1.63194E-08	

Tabela 5: Por Difraccção por uma rede (filtro verde)

Fronteira da banda	x (m)	Δx (m)	D (m)	ΔD (m)	a (m)	λ (m)	$\Delta \lambda$ (m)	Banda passante ($\times 10^{-9}m$)
Inicial	0.014	0.0005	0.4	0.005	1.25E-05	4.38E-07	2.10938E-08	438 - 641
final	0.0205					6.41E-07	2.36328E-08	

Tabela 6: Por Difraccção por uma rede (filtro verde)

Fronteira da banda	x (m)	Δx (m)	D (m)	ΔD (m)	a (m)	λ (m)	$\Delta \lambda$ (m)	Banda passante ($\times 10^{-9}m$)
Inicial	0.0225	0.0005	0.6	0.005	1.25E-05	4.69E-07	1.43229E-08	469 - 604
final	0.029					6.04E-07	1.54514E-08	

Parte 2: Determinação da banda passante de um filtro

Tabela 7: Por Difraccão por uma rede (filtro azul)

Fronteira da banda	X (m)	Δx (m)	D (m)	ΔD (m)	a (m)	λ (m)	$\Delta \lambda$ (m)	Banda passante ($\times 10^{-9} \text{m}$)
Inicial	0.013	0.0005	0.4	0.005	1.25E-05	4.06E-07	2.07031E-08	406 - 625
final	0.02					6.25E-07	2.34375E-08	

Tabela 8: Por Difraccão por uma rede (filtro azul)

Fronteira da banda	x (m)	Δx (m)	D (m)	ΔD (m)	a (m)	λ (m)	$\Delta \lambda$ (m)	Banda passante ($\times 10^{-9} \text{m}$)
Inicial	0.0205	0.0005	0.6	0.005	1.25E-05	4.27E-07	1.39757E-08	427 - 594
final	0.0285					5.94E-07	1.53646E-08	

Legenda:

x : Distância do máximo central aos mínimos de ordem m

D : Distância entre a fenda e o alvo

a : Distância entre as fendas na rede

λ : Comprimento de onda da radiação incidente

Cálculos:

Parte 3: Difraccão por uma fenda

Tabela 9: Determinação da espessura da primeira fenda

m	x (x10 ⁻³ m)	x _{médio} (x10 ⁻³ m)	Δx (x10 ⁻³ m)	D (x10 ⁻² m)	ΔD (x10 ⁻² m)	λ (x10 ⁻⁹ m)	s (x10 ⁻⁹ m)	Δs (x10 ⁻⁹ m)
1	0.007	0.0075	0.0005	0.4	0.005	6.39E-07	3.4069E-05	8.7E-06
-1	0.008							
2	0.014	0.0145	0.0005					
-2	0.015							
3	0.022	0.0215	0.0005					
-3	0.021							

$$s_{1\text{médio}} = 3,499 \times 10^{-5} \text{ m}$$

$$\Delta s_{1\text{médio}} = 1,43 \times 10^{-5} \text{ m}$$

Tabela 10: Determinação da espessura da primeira fenda

m	x (x10 ⁻³ m)	x _{médio} (x10 ⁻³ m)	Δx (x10 ⁻³ m)	D (x10 ⁻² m)	ΔD (x10 ⁻² m)	λ (x10 ⁻⁹ m)	s (x10 ⁻⁹ m)	Δs (x10 ⁻⁹ m)
1	0.011	0.01225	0.00125	0.6	0.005	6.39E-07	3.1288E-05	5.7E-06
-1	0.0135							
2	0.022	0.02325	0.00125					
-2	0.0245							
3	0.0325	0.03325	0.00075					
-3	0.034							

$$s_{1\text{médio}} = 3,295 \times 10^{-5} \text{ m}$$

$$\Delta s_{1\text{médio}} = 8,89 \times 10^{-6} \text{ m}$$

Tabela 11: Determinação da espessura da primeira fenda

m	x (m)	x _{médio} (m)	Δx (m)	D (m)	ΔD (m)	λ (m)	s (m)	Δs (m)
1	0.016	0.015	0.001	0.8	0.005	6.39E-07	3.4069E-05	5.5E-06
-1	0.014							
2	0.033	0.031	0.002					
-2	0.029							
3	0.045	0.043	0.002					
-3	0.041							

$$s_{1\text{médio}} = 3,423 \times 10^{-5} \text{ m}$$

$$\Delta s_{1\text{médio}} = 5,73 \times 10^{-6} \text{ m}$$

Parte 3: Difraccção por uma fenda

Tabela 12: Determinação da espessura da segunda fenda

m	x (m)	$x_{\text{médio}}$ (m)	Δx (m)	D (m)	ΔD (m)	λ (m)	s (m)	Δs (m)
1	0.004	0.00425	0.00025	0.4	0.005	6.39E-07	6.0122E-05	1.6E-05
-1	0.0045							
2	0.0075	0.00725	0.00025					
-2	0.007							
3	0.011	0.01125	0.00025				6.8139E-05	2.8E-05
-3	0.0115							

$$s_{2\text{médio}} = 6,625 \times 10^{-5} \text{ m}$$

$$\Delta s_{2\text{médio}} = 2,8 \times 10^{-5} \text{ m}$$

Tabela 13: Determinação da espessura da segunda fenda

m	x (m)	$x_{\text{médio}}$ (m)	Δx (m)	D (m)	ΔD (m)	λ (m)	s (m)	Δs (m)
1	0.0055	0.00575	0.00025	0.6	0.005	6.39E-07	6.6657E-05	1.6E-05
-1	0.006							
2	0.011	0.01125	0.00025				6.8139E-05	2.7E-05
-2	0.0115							
3	0.016	0.01625	0.00025				7.0759E-05	3.9E-05
-3	0.0165							

$$s_{2\text{médio}} = 6,85 \times 10^{-5} \text{ m}$$

$$\Delta s_{2\text{médio}} = 2,733 \times 10^{-5} \text{ m}$$

Tabela 14: Determinação da espessura da segunda fenda

m	x (m)	$x_{\text{médio}}$ (m)	Δx (m)	D (m)	ΔD (m)	λ (m)	s (m)	Δs (m)
1	0.0075	0.00725	0.00025	0.8	0.005	6.39E-07	7.0488E-05	1.5E-05
-1	0.007							
2	0.0155	0.015	0.0005				6.8139E-05	1.5E-05
-2	0.0145							
3	0.023	0.02225	0.00075				6.8904E-05	1.5E-05
-3	0.0215							

$$s_{2\text{médio}} = 6,9177 \times 10^{-5} \text{ m}$$

$$\Delta s_{2\text{médio}} = 1,5 \times 10^{-5} \text{ m}$$

Parte 2: Difraccção por uma fenda

Tabela 15: Determinação da espessura da terceira fenda

m	x (m)	$x_{\text{médio}}$ (m)	Δx (m)	D (m)	ΔD (m)	λ (m)	s (m)	Δs (m)
1	0.0021	0.002	1E-04	0.4	0.005	6.39E-07	0.00012776	3.8E-05
-1	0.0019							
2	0.0039	0.0036	0.0003				0.00014196	3.3E-05
-2	0.0033							
3	0.0056	0.00535	0.00025					
-3	0.0051							

$$s_{3\text{médio}} = 0,00013766 \text{ m}$$

$$\Delta s_{3\text{médio}} = 3,87 \times 10^{-5} \text{ m}$$

Tabela 16: Determinação da espessura da terceira fenda

m	x (m)	$x_{\text{médio}}$ (m)	Δx (m)	D (m)	ΔD (m)	λ (m)	s (m)	Δs (m)
1	0.003	0.00295	5E-05	0.6	0.005	6.39E-07	0.00012993	6.6E-05
-1	0.0029							
2	0.0052	0.00505	0.00015				0.00015179	4.7E-05
-2	0.0049							
3	0.0075	0.0076	0.0001					
-3	0.0077							

$$s_{3\text{médio}} = 0,00014433 \text{ m}$$

$$\Delta s_{3\text{médio}} = 7.03 \times 10^{-5} \text{ m}$$

Tabela 17: Determinação da espessura da terceira fenda

m	x (m)	$x_{\text{médio}}$ (m)	Δx (m)	D (m)	ΔD (m)	λ (m)	s (m)	Δs (m)
1	0.0032	0.00335	0.00015	0.8	0.005	6.39E-07	0.00015255	2.8E-05
-1	0.0035							
2	0.0065	0.0067	0.0002				0.00015255	3.6E-05
-2	0.0069							
3	0.01	0.0101	0.0001					
-3	0.0102							

$$s_{3\text{médio}} = 0,0001529 \text{ m}$$

$$\Delta s_{3\text{médio}} = 5,37 \times 10^{-5} \text{ m}$$

Legenda:

m : Ordem dos mínimos

x : Distância do máximo central aos mínimos de ordem m

D : Distância entre a fenda e o alvo

λ : Comprimento de onda da radiação incidente

s : Espessura da fenda

Cálculos:

Parte 4: Difraccão por um cabelo

Tabela 18: Determinação da espessura de um cabelo

m	x (m)	$x_{\text{médio}}$ (m)	Δx (m)	D (m)	ΔD (m)	λ (m)	sc (m)	Δsc (m)
1	0.0045	0.00425	0.00025	0.4	0.005	6.39E-07	6.0122E-05	1.6E-05
-1	0.004							
2	0.009	0.0085	0.0005					
-2	0.008							
3	0.0135	0.0125	0.001				6.1325E-05	1.4E-05
-3	0.0115							

$$sc_{\text{médio}} = 6,0523 \times 10^{-5} \text{ m}$$

$$\Delta sc_{\text{médio}} = 1,533 \times 10^{-5} \text{ m}$$

Tabela 19: Determinação da espessura de um cabelo

m	x (m)	$x_{\text{médio}}$ (m)	Δx (m)	D (m)	ΔD (m)	λ (m)	s (m)	Δs (m)
1	0.0055	0.00575	0.00025	0.6	0.005	6.39E-07	6.6657E-05	1.6E-05
-1	0.006							
2	0.0105	0.01125	0.00075					
-2	0.012							
3	0.017	0.0169	0.0001				6.8038E-05	9.6E-05
-3	0.0168							

$$sc_{\text{médio}} = 6,7617 \times 10^{-5} \text{ m}$$

$$\Delta sc_{\text{médio}} = 4,166 \times 10^{-5} \text{ m}$$

Tabela 20: Determinação da espessura de um cabelo

m	x (m)	$x_{\text{médio}}$ (m)	Δx (m)	D (m)	ΔD (m)	λ (m)	s (m)	Δs (m)
1	0.0089	0.009	0.0001	0.8	0.005	6.39E-07	5.67822E-05	3.2571E-05
-1	0.0091							
2	0.0165	0.0167	0.0002					
-2	0.0169							
3	0.024	0.02425	0.00025				6.12024E-05	3.2673E-05
-3	0.0245							

$$sc_{\text{médio}} = 6,0402 \times 10^{-5} \text{ m}$$

$$\Delta sc_{\text{médio}} = 3,47 \times 10^{-5} \text{ m}$$

Legenda:

m : Ordem dos mínimos

x : Distância do máximo central aos mínimos de ordem m

D : Distância entre a fenda e o alvo

λ : Comprimento de onda da radiação incidente

sc : Espessura do cabelo

Cálculos:

Conclusões

Os objectivos do procedimento experimental foram atingidos, uma vez que foi possível observar a existência de fenómenos de difracção e interferência provocados por uma fenda, cabelo ou rede de difracção.

As eventuais fontes de erro do procedimento em causa residem no alinhamento do feixe, que tem de estar perfeitamente perpendicular ao alvo, na colocação dos objectos em relação ao feixe, que mais uma vez têm de ficar na perpendicular, e nas próprias medições que foi necessário efectuar, já que tanto a distância do obstáculo ao alvo como as várias medições efectuadas no alvo são de importância fulcral nos cálculos finais.

Da determinação do comprimento de onda do laser efectuada a partir das imagens de difracção provocadas pela rede de difracção de 80 linhas por milímetro resultou o valor 659,7 nm com um erro à exactidão de 3,27 % e um erro de precisão inferior a 1 %.

A difracção da luz causada por fendas permitiu-nos observar uma figura composta por várias bandas de luz cuja a intensidade é máxima na zona central e que vai diminuindo simetricamente à medida que a distância ao centro aumenta, cada uma destas bandas é separada por uma zona sem iluminação (mínimo). Para a fenda de 40 μm obteve-se um valor médio de $3,4056 \times 10^{-5}$ m que evidencia um erro de exactidão de 14,9% embora a precisão seja bastante elevada (3,25 %). De referir que o valor médio foi calculado a partir dos valores médios de cada cálculo da espessura para cada distância ao alvo. A baixa exactidão pode-se explicar pela difícil visualização dos mínimos das figuras de difracção. Quanto à fenda de 80 μm obteve-se o valor médio de $6,7976 \times 10^{-5}$ m que revela um erro à exactidão de 15,03 % embora a precisão seja de 2,54%. Em relação à terceira fenda (160 μm) o valor médio obtido foi de $1,4496 \times 10^{-4}$ m com um erro de exactidão de 9,398 % e uma precisão de 5,48 %. Como é possível verificar, a precisão desce à medida que se utilizam fendas maiores, o que é facilmente explicável dado que para as fendas maiores também a proximidade dos mínimos da imagem de difracção é maior, o que vai fazer com a medição dos mesmos seja mais difícil e desde logo mais imprecisa. Seguindo o mesmo método, calculou-se a espessura de um fio de cabelo humano. O valor a que chegámos, $6,2847 \times 10^{-5}$ m, é bastante credível embora não seja possível confirmar a exactidão do mesmo, dado que não existe um valor tabelado. No entanto, a precisão cifrou-se nos 3,89 %.

Finalmente, em relação às bandas passantes dos filtros de cor, foi possível observar-se que quando se aumentava a distância da rede de difracção ao alvo a banda passante respectiva de cada cor diminuía, isto é, o intervalo do espectro era menor. Ainda foi possível concluir que dos filtros disponíveis, aquele que admitia maior número de comprimentos de onda diferentes, era o azul. Nenhum dos filtros testados evidenciou uma exactidão credível o que nos leva a concluir que o método utilizado não é o mais indicado para os objectivos em causa.

É importante referir que tanto para a determinação da espessura das fendas como para a determinação do comprimento de onda do laser, embora o valor obtido pudesse não estar tão próximo do tabelado quanto o desejável, o erro atribuído às medições criava um intervalo de resultados que abrangia sempre o valor real.

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