Adriano António da Luz Sampaio e Sousa

Experiências Demonstrativas de Óptica

Volume I

Departamento de Física
Faculdade de Ciências da Universidade do Porto
Junho de 1999

ol.

Adriano António da Luz Sampaio e Sousa

Experiências Demonstrativas de Óptica

Volume I

Dissertação submetida à Faculdade de Ciências da Universidade do Porto para obtenção do grau de Mestre em Física para o Ensino

Departamento de Física
Faculdade de Ciências da Universidade do Porto
Junho de 1999

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Doutor Manuel Joaquim Marques, que orientou este trabalho, agradeço todo o apoio e atenção dispensados.

À colega Eduarda Carona agradeço a amável colaboração na testagem de algumas experiências.

RESUMO

A finalidade deste trabalho consistiu na organização de um projecto de ensino experimental da Óptica para os níveis básico e secundário.

Ao longo da 1ª parte, é discutido o papel da experimentação no ensino da Física, e abordam-se os principais tópicos da Óptica, numa perspectiva de renovação. Fornecem-se indicações didácticas para utilização das experiências, levando em conta dados relevantes da investigação sobre dificuldades e ideias dos alunos acerca da luz, visão e fenómenos luminosos. Atribui-se ainda alguma ênfase aos aspectos históricos, de modo a pôr em destaque os métodos da Ciência e a relação entre as dificuldades encontradas pelos cientistas e aquelas que são experimentadas pelos alunos.

Na 2ª parte apresentam-se os protocolos experimentais para as actividades sugeridas.

ABSTRACT

The aim of this writing was the development of an experimental teaching project for the compulsive and secondary levels.

The role of experimentation in Physics teaching is discussed along part 1, and the most important contents in Optics are introduced with a renewed approach.
Didactical tips are offered for the implementation of experiments, taking into account significant data from research on difficulties and misconceptions of students about light, vision and luminous phenomena. Some highlight is also given to historical facts, in order to emphatize the methods of Science and the relationship between the difficulties felt by the scientists and those that are experienced by the students.

In part 2, detailed instructions for the suggested activities are made available.

RÉSUMÉ

La finalité de ce travail était l'organisation d'un projet d'enseignement expérimental de l'Optique pour les niveaux élémentaire et sécondaire.

Le rôle de l'expérimentation dans l'enseignement de la Physique est discuté le long de la 1.ière partie, et on introduit les contenus principaux de l'Optique, selon une perspective de renouvellement. On fourni des renseignements didactiques pour l'application des expériences, avec l'appui d'importantes données de la recherche au sujet des difficultés et conceptions des élèves sur la lumière, la vision et les phénomènes lumineux. On donne aussi du relief aux faits historiques avec l'intention de faire ressortir les méthodes de la Science et la relation entre les difficultés éprouvées par les savants et celles qui sont ressenties par les élèves.

Dans la 2.ième partie on présente des instructions précises pour les activités sugérées.

ÍNDICE GERAL

Agradecimentos 2
Resumos 3
Índice geral 6

1ª parte

Introdução 15

1. Justificação do trabalho 16
2. Estrutura da dissertação 16

1. A experimentação no ensino da Física 19

1. Introdução 20
2. O carácter da Ciência 20
3. Modelos em Ciência 21
4. O "programa" da Física enquanto Ciência 22
5. Educação científica 23
6. O papel da experimentação na educação científica 25
7. Tipos de experiências 30

2. O que é a luz 32

1. Introdução 33
2. Natureza da luz 33
   2.1. O modelo corpuscular 35
   2.2. O modelo ondulatório 35
   2.3. A luz como radiação electromagnética 36
   2.4. A dualidade onda-corpúsculo 37
3. Algumas ideias dos alunos acerca da natureza da luz 39
4. Indicações didácticas 40

3. Produção de luz 43

1. Introdução 44
2. Em busca da luz 44
3. Fontes de luz 45
   3.1. Fontes incandescentes 45
   3.2. Fontes luminescentes 46
   3.3. Díodos emissores de luz (LED) 47
   3.4. Lasers 47
4. Algumas ideias dos alunos acerca das fontes de luz 50
5. Indicações didácticas 51

4. Propagação da luz 52

1. Introdução 53
2. Propagação rectilínea da luz 53
3. Velocidade de propagação da luz 54
4. Algumas ideias dos alunos acerca da propagação da luz 56
5. Indicações didácticas 57

5. Detecção e medição da luz 59

1. Introdução 60
2. Radiometria e fotometria 60
3. Detectores de luz 62
   3.1. Olho humano 62
   3.2. Método fotográfico 64
   3.3. Células fotoeléctricas 65
   3.4. Transductores de luz mais utilizados 66
4. Indicações didácticas 68

6. Dispersão da luz. Espectros 69

1. Introdução 70
2. Arco-íris, balões com água e prismas 70
3. Dispersão da luz 73
4. Espectros 74
5. Espalhamento da luz 75
6. Indicações didácticas 77

7. Cor 78

1. Introdução 79
2. O carácter da cor 79
3. Aspectos fisiológicos e psicológicos da cor 80
4. Aspectos físicos da cor 81
   4.1. Coloração aditiva 81
   4.2. Coloração subtractiva 82
   4.3. Atributos da cor 83
4. Algumas ideias dos alunos acerca da cor 83
5. Indicações didácticas 84

8. Reflexão da luz 86

1. Introdução 87
2. O fenómeno da reflexão 87
3. Reflexão em metais 88
4. Reflexão especular e reflexão difusa 89
5. Algumas ideias dos alunos acerca da reflexão 89
6. Indicações didácticas 90

9. Espelhos 91

1. Introdução 92
2. Origem dos espelhos 92
3. Tipos de espelhos 93
4. Aproximação paraxial 94
5. Imagens dadas pelos espelhos 95
   5.1. Espelho plano 95
   5.2. Espelhos esféricos 95
6. Algumas ideias dos alunos acerca dos espelhos 97
7. Indicações didácticas 98

10. Refracção da luz 100

1. Introdução 101
2. O fenómeno da refracção 101
3. Leis da refracção 102
4. Fenómenos atmosféricos 104
5. Índice de refracção relativo 105
6. Algumas ideias dos alunos acerca da refracção 106
7. Indicações didácticas 106

11. Reflexão interna total 108

1. Introdução 109
2. Reflexão interna total 109
3. Aplicações da reflexão total 110
4. Reflexão interna total frustrada 111
5. Indicações didácticas 112

12. Lentes 114

1. Introdução 115
2. Lentes 115
3. Tipos de lentes 117
4. Equações das lentes 118
5. Características das imagens dadas pelas lentes 120
6. Algumas ideias dos alunos acerca das lentes 121
7. Indicações didácticas 122

13. Instrumentos ópticos compostos 125

1. Introdução 126
2. Instrumentos ópticos compostos 126
3. Microscópio e telescópio ópticos 127
4. Poder de resolução 131
5. Indicações didácticas 131

14. Visão 132

1. Introdução 133
2. Visão 133
3. Estrutura do olho humano 134
4. Ametropias 136
   - 4.1. Miopia 136
   - 4.2. Hipermetropia 136
   - 4.3. Presbitia 136
   - 4.4. Astigmatismo 137
5. Potência focal de uma lente 137
6. Algumas ideias dos alunos acerca da visão 138
7. Indicações didácticas 140

15. Polarização da luz 141

1. Introdução 142
2. Polarização 142
3. Interpretação electromagnética da polarização 144
4. Formas de obtenção de luz polarizada 146
   4.1. Polarização por absorção 146
   4.2. Polarização por reflexão 147
   4.3. Polarização por dupla refracção 148
   4.4. Polarização por dispersão 149
5. Actividade óptica 149
6. Indicações didácticas 150

16. Interferência e difracção 152

1. Introdução 153
2. Difracção e interferência 153
3. Interpretação electromagnética 156
4. Experiência de Young 158
5. Interferência em filmes finos 159
6. Interferómetro de Michelson 160
7. Difracção por uma fenda simples 161
8. Princípio de Babinet 162
9. Interferência e difracção combinadas 162
10. Indicações didácticas 163

Bibliografia 165

2ª parte

Índice de experiências 174

EXP. 2A - A luz prenche o espaço ? 178
EXP. 2B - Interacção de dois feixes luminosos 179
EXP. 2C - Interacção da luz com a matéria 180

EXP. 3A - Variação da intensidade luminosa de uma fonte de luz com a tensão aplicada 182
EXP. 3B - Comparação de uma fonte de luz pontual com uma fonte extensa 184

EXP. 4A - Propagação da luz num meio óptico 186
EXP. 4B - Propagação da luz de um meio óptico para outro 188
EXP. 4C - Sombra e penumbra 190
EXP. 4D - Determinação da velocidade de propagação da luz 191

EXP. 5A - A luz transporta energia ? 193
EXP. 5B - Lei do inverso do quadrado das distâncias 194
EXP. 5C - Comparação de intensidades luminosas 196
EXP. 5D - Fracção da luz incidente transmitida por uma placa de um material transparente 199

EXP. 6A - Arco-íris 201
EXP. 6B - Dispersão da luz por um prisma 202
EXP. 6C - Variação com a temperatura de um espectro de emissão por incandescência 204
EXP. 6D - Espectros de emissão obtidos por descargas eléctricas em gases rarefeitos 206
EXP. 6E - Espalhamento de Rayleigh 208

EXP. 7A - Adição de cores 210
EXP. 7B - Subtracção de cores 212

EXP. 8A - Leis da reflexão 214
EXP. 8B - Reflexão especular e difusa 216

EXP. 9A - Tipos de espelhos 217
EXP. 9B - Localização da imagem dada por um espelho 218
EXP. 9C - Construção de imagens num espelho plano 219
EXP. 9D - Multiplicidade de imagens dadas por dois espelhos planos 221
EXP. 9E - Características das imagens dadas pelos espelhos curvos 223
EXP. 9F - Determinação da distância focal de um espelho côncavo, localizando o foco 225
EXP. 9G - Determinação da distância focal de um espelho côncavo com o esferómetro 226
EXP. 9H - Determinação da distância focal de um espelho côncavo, pelo método de coincidência da imagem e objecto 228
EXP. 9I - Determinação da distância focal de um espelho côncavo, pelo método dos focos conjugados 231
EXP. 9J - Verificação da equação de Newton para um espelho côncavo 235
EXP. 9K - Determinação da distância focal de um espelho convexo com o esferómetro 237
EXP. 9L - Determinação da distância focal de um espelho convexo usando uma lente convexa 239
EXP. 9M - Determinação da distância focal de um espelho convexo usando um espelho plano 241

EXP. 10A - Leis da refracção 243
EXP. 10B - Visibilidade e invisibilidade 245
EXP. 10C - Determinação do índice de refracção de um líquido transparente, usando um espelho côncavo 246
EXP. 10D - Determinação do índice de refracção de um meio transparente, pelo método da profundidade aparente 248
EXP. 10E - Determinação do índice de refracção de um líquido transparente, pelo método da lente líquida 251
EXP. 10F - Determinação do índice de refracção do vidro de uma lâmina de faces paralelas 253
EXP. 10G - Determinação do índice de refracção do vidro de um prisma pelo método do desvio mínimo 255

EXP. 10H - Determinação do índice de refracção de um líquido transparente, pelo método de Searle 257
EXP. 10I - Determinação do índice de refracção de um material transparente, com o refractómetro de Abbe 259

EXP. 11A - Estudo da reflexão interna total com o tanque de refracção de Nakamura 262
EXP. 11B - Reflexão interna total num prisma 264
EXP. 11C - Reflexão interna total com objectos do quotidiano 266

EXP. 12A - Tipos de lentes 268
EXP. 12B - Características das imagens produzidas pelas lentes 269
EXP. 12C - Determinação da distância focal de uma lente convexa, por localização directa do foco principal 271
EXP. 12D - Determinação da distância focal de uma lente convexa, usando um espelho plano 272
EXP. 12E - Determinação da distância focal de uma lente convexa, pelo método dos focos conjugados 275
EXP. 12F - Determinação da distância focal de uma lente convexa, pelo método do deslocamento (ou de Bessel) 279
EXP. 12G - Determinação da distância focal de uma lente convexa, através do gráfico da distância objecto-imagem em função da distãncia do objecto à lente 282
EXP. 12H - Determinação da distância focal de uma lente convexa, pelo método da ampliação 285
EXP. 12I - Verificação da equação de Newton para uma lente convexa 287
EXP. 12J - Estudo da relação entre a distância focal de uma associação de duas lentes delgadas em contacto, e as respectivas distâncias focais 289
EXP. 12K - Determinação da distância focal de uma lente côncava, usando uma lente convexa (método das lentes coladas) 290
EXP. 12L - Determinação da distância focal de uma lente côncava, usando um espelho côncavo 292
EXP. 12M - Determinação do raio de curvatura das faces de uma lente (método de Boys) 294
EXP. 12N - Estudo do efeito da abertura na luminosidade da imagem e na profundidade de campo 297
EXP. 12O - Estudo das aberrações de uma lente esférica 299

EXP. 13A - Demonstração do funcionamento do microscópio 301
EXP. 13B - Demonstração do funcionamento do telescópio 305
EXP. 13C - Estudo do poder resolvente de um telescópio 309

EXP. 14A - Modelo do olho humano 311
EXP. 14B - Ponto cego 313
EXP. 14C - Características da imagem formada na retina 314
EXP. 14D - Demonstração do poder resolvente do olho 316
EXP. 14E - Demonstração do efeito de persistência de visão com o disco de Newton 317

EXP. 14F - Demonstração do efeito de ilusão de cor com o disco de Benham 318
EXP. 14G - Demonstração do efeito de Purkinge 320
EXP. 14H - Demonstração do efeito de Pulfrich 321

EXP. 15A - Demonstração da polarização por absorção 323
EXP. 15B - Verificação da Lei de Malus 325
EXP. 15C - Demonstração da polarização por reflexão 327
EXP. 15D - Demonstração da polarização por dupla refracção 328
EXP. 15E - Determinação do poder rotatório específico de uma substância opticamente activa 329

EXP. 16A - Observação de padrões de difracção 332
EXP. 16B - Determinação do comprimento de onda de um laser usando uma fenda de abertura conhecida 334
EXP. 16C - Determinação da espessura de um cabelo e do diâmetro de uma célula de sangue, conhecido o comprimento de onda do laser 336
EXP. 16D - Estudo da interferência e difracção usando uma fenda dupla 339
EXP. 16E - Comparação dos padrões de difracção e interferência para fendas múltiplas 342
EXP. 16F - Influência da frequência da luz na interferência 344
EXP. 16G - Interferómetro de Michelson 345

1ª PARTE

INTRODUÇÃO

1. Justificação do trabalho

O ensino da Óptica tem estado afastado da prática lectiva e mesmo dos programas dos níveis básico e secundário. A necessidade de reduzir a extensão programática tem vindo a sacrificar esta área da Física, em favor de outras, "mais clássicas", como a Mecânica; a sua abordagem, quando é, apesar de tudo, efectuada, não contempla normalmente muitos aspectos importantes, quer ao nível conceptual, quer ao nível metodológico.

Este critério é, no mínimo, contestável, já que a Óptica é a ciência da luz e da visão, sem as quais nenhuma actividade humana seria possível. Por outro lado a sua actualidade é incontestável, já que é uma das áreas mais florescentes, quer em Física Teórica, quer em Física Aplicada.

Além disso, a experiência demonstra que a Óptica é uma área extremamente motivadora para os alunos: desde actividades realizadas em Técnicas Laboratoriais de Física, até projectos concretizados em muitas escolas, no âmbito do Programa Ciência Viva, passando pelas Olimpíadas de Física, todos revelaram uma forte apetência pelo seu estudo experimental.

Da constatação desta realidade nasceu a ideia de um projecto de renovação do ensino da Óptica, que constitui o tema da presente dissertação de Mestrado em Física para o Ensino.

2. Estrutura da dissertação

A dissertação foi dividida em duas partes, tendo a primeira a estrutura de um guião para professores dos níveis básico e secundário, e a segunda a de um manual de actividades experimentais.

2.1. 1ª parte

Para iniciar a 1ª parte foi considerado importante incluir um primeiro capítulo acerca da experimentação no ensino da Física.

Num momento em que a investigação em didáctica procura definir o seu verdadeiro papel, sendo os resultados muitas vezes mal interpretados, efectua-se uma revisão, o mais objectiva possível, das principais conclusões.

Os restantes capítulos são dedicados aos diversos tópicos de Óptica cuja abordagem é considerada possível e desejável no ensino básico e/ou no ensino secundário. A respectiva sequência tem uma lógica própria, que não coincide, forçosamente, com a sequência dos actuais programas.

Em cada capítulo, surge uma breve introdução histórica, que não deve ser interpretada como uma defesa de que o ensino da Física deve refazer a sua história. Pretende-se apenas pôr em destaque os métodos da Ciência, e confrontar as dificuldades experimentadas pelos primeiros cientistas com as que são sentidas pelos alunos de hoje.

Segue-se uma abordagem dos principais conceitos envolvidos, despidos de um excessivo formalismo matemático, embora mantendo a necessária correcção científica. É dado especial relevo aos aspectos com os quais a maior parte dos professores se encontram menos familiarizados; justificam-se assim algumas assimetrias no tratamento de diferentes tópicos.

Inclui-se ainda uma síntese de ideias frequentes dos alunos acerca de cada conceito, sempre que existem investigações conhecidas; em vários casos não se encontraram informações.

Finalmente são apresentadas indicações didácticas, que procuram levar em conta as ideias dos alunos, e nas quais se enquadram as actividades experimentais recomendadas.

2.2. 2ª parte

As experiências surgem compiladas, sob a forma de protocolos experimentais, na 2ª parte do trabalho.

Tais indicações pretendem ser uma ajuda para os professores, muitos deles afastados do laboratório durante vários anos. Não devem ser interpretadas apenas como "receitas" prontas a usar pelos alunos, mas como fonte de inspiração para a concepção de actividades diversificadas, que podem ir da simples demonstração feita pelo professor, até à experiência investigativa conduzida pelo aluno.

1. A EXPERIMENTAÇÃO NO ENSINO DA FÍSICA

"In the matter of physics, the first lessons should contain nothing but what is experimental and interesting to see. A pretty experiment is in itself often more valuable than twenty formulae extracted from our minds."

- Albert Einstein

(In **Moszkovski, A.**, *Conversations with Einstein*)

1. Introdução

Neste primeiro capítulo, pretende-se caracterizar a Física enquanto ciência, e, em particular, enquanto ciência experimental.

Procura-se ainda definir os objectivos da educação científica, e enquadrar de forma adequada o papel da experimentação na consecução dos mesmos. Para isso, é feita uma breve revisão das investigações efectuadas nesta área, incluindo uma classificação dos vários tipos de experiências.

2. O carácter da Ciência

A palavra "ciência" tem a sua origem semântica no vocábulo latino *scire*, o qual significa, genericamente, saber.

Hoje, contudo, considera-se que a ciência não é a única fonte de conhecimento, enumerando-se um conjunto de quatro categorias da aprendizagem humana (Cooke, C., 1996):[1]

- Ciência experimental (a Física e a Química são importantes exemplos)
- Ciência observacional (a Astronomia é um caso típico)
- Quase-ciência (onde se incluem a Sociologia, a Economia, ...)
- Não-ciência (como a Arte, a Música e a Literatura)

O carácter da ciência encontra-se sempre associado ao facto de lidar com teorias quantitativas, confrontadas permanentemente com os resultados da observação.

A principal característica que distingue uma ciência experimental é a possibilidade de controlar as condições em que as observações são feitas. O desenvolvimento tecnológico, que permitiu melhorar o controlo dessas condições, é uma das razões apontadas para o extraordinário avanço das ciências experimentais nas últimas décadas.

[1] Este autor não refere a Matemática como uma ciência. No quadro da ciência moderna, ela é vista como uma linguagem (formação de conceitos e modelos) e uma ferramenta (cálculo, computação).

Actualmente reconhecem-se três métodos para investigar a natureza, já que a modelação computacional veio juntar-se à experimentação e à análise teórica.

3. Modelos em Ciência

Os problemas, em ciência, tornam-se frequentemente demasiado complexos para que se possa prestar uma atenção simultânea a todos os detalhes. Surgem assim os modelos teóricos. Estes, não devem ser tão simples que representem uma interpretação demasiado pobre da realidade, nem tão complexos que impossibilitem a sua utilização prática.

Os modelos, que podem ser geométricos ou algébricos, representam simplificações da realidade, com a qual não devem ser confundidos; este aspecto é particularmente importante no ensino das ciências.

A Física Clássica desenvolveu-se à custa de modelos baseados essencialmente em experiências sensoriais ao nível macroscópico, bem patentes nas designações dos diversos ramos que a constituem (mecânica, calor, acústica, óptica, ...). As noções de "localização" e "extensão" e os conceitos de "partícula", "campo" ou "onda" permitiram explicar de modo satisfatório o funcionamento do nosso mundo macroscópico.

O advento da Física Moderna trouxe, contudo, uma revolução conceptual: a impossibilidade de transferir para o mundo submicroscópico os modelos da Física macroscópica obrigou ao uso de modelos algébricos sem qualquer tipo de correspondência com a nossa experiência sensorial, ou nos quais conceitos anteriormente exclusivos surgem aqui de forma estranhamente complementar (onda-partícula).

Esta não foi, no entanto, a única revolução: o espantoso desenvolvimento das técnicas experimentais, que, permitiu observar o mundo extra-sensorial, venceu barreiras anteriormente intransponíveis de distâncias, intervalos de tempo, temperaturas ou energias. As escalas de construção dos modelos foram, assim, radicalmente alteradas, revelando a sua grande dependência dos meios tecnológicos colocados à disposição dos investigadores.

Por vezes os modelos aumentam de complexidade, à medida que a compreensão dos problemas aumenta. Outras vezes tendem a simplificar-se, quando libertos de ideias erradas, previamente introduzidas.

4. O "programa" da Física enquanto Ciência

A classificação do conhecimento científico em categorias torna-se cada vez mais difícil de fazer. As ciências "tradicionais" desdobram-se sucessivamente em áreas transversais, numa busca constante de interdisciplinaridade. Simultaneamente, os objectivos de cada ciência são redefinidos e os seus métodos repensados.

No que respeita à Física, podemos resumir do seguinte modo o seu "programa" (Alonso, M.,1997):

- É uma ciência observacional e experimental.
- Os objectos do seu estudo são "sistemas": galáxias, estrelas, sólidos, gases, moléculas, átomos, núcleos, partículas fundamentais.
- Os físicos dissecam os "sistemas" nos seus componentes.
- Para sistematizarem as suas observações, os físicos formulam relações empíricas e leis gerais (que, estão, é claro, sujeitas a mudança) e formulam novos conceitos (momento, energia, etc.).
- Em seguida os físicos procuram "estruturas" nos sistemas analisados.
- Então os físicos procuram "interacções" entre os componentes para explicar as estruturas do sistema (construção de modelos).
- Os modelos evoluem e são refinados ou abandonados à medida que conseguimos mais informação acerca do sistema.

Por outro lado, um dos aspectos mais importantes dos métodos da Física Moderna está na relação entre observação/experimentação e teoria. Assim, é importante realçar (Brodin, G.,1978) que:

- Existem fenómenos e relações que não podem ser descritos satisfatoriamente por nenhuma teoria.
- Teorias que não sejam devidamente validadas pela experimentação podem levar a resultados absurdos ou erróneos.

Dois exemplos simples que confirmam estas afirmações, são os fenómenos de interferência eléctrica nos sistemas de medida, e a inaplicabilidade das leis de Ohm e Kirchhoff a altas frequências.

Inversamente, podemos afirmar que:

- Muitos fenómenos e relações não podem ser descritos satisfatoriamente sem uma teoria adequada.
- Experiências não conduzidas por teorias levam frequentemente a resultados absurdos ou erróneos.

A dualidade desta argumentação evidencia de modo claro a relação simbiótica existente entre observação/experimentação e teoria.

5. Educação científica

Entender o mundo que nos rodeia, de modo a melhor interagirmos com ele, poderia ser a principal finalidade da educação científica, essencial para a própria sobrevivência da espécie humana.

Esta grande finalidade subdivide-se em muitas outras, quando se consideram diferentes contextos sócio-económicos, diferentes políticas educativas ou diferentes níveis etários.

A educação científica pode ser encarada sob três aspectos essenciais (Hodson, D., 1992):

- *Aprender ciência* - adquirir um certo número de conceitos científicos e familiarizar-se com algumas das principais teorias científicas.
- *Aprender acerca da ciência* - desenvolver alguma compreensão acerca da natureza da ciência e da prática científica, e tomar consciência das complexas relações entre ciência, tecnologia e sociedade.
- *Fazer ciência* - adquirir o conhecimento e competências necessárias para realizar uma pesquisa científica, e usar essa capacidade para conduzir investigações "genuínas" - algumas vezes auto-dirigidas, outras vezes sob a orientação do professor.

É importante que a educação científica comece o mais cedo possível, a um nível inicialmente qualitativo, de modo a aproveitar a curiosidade natural das crianças e a sua procura de actividade com objectos concretos. A escola deve proporcionar-lhes experiências enriquecedoras, que contribuam para reduzir as assimetrias provocadas pelos diferentes meios sócio-culturais e económicos de que provêm.

Desde há alguns anos que existe uma tendência para dirigir a educação científica no ensino básico para os temas do quotidiano, numa perspectiva de "ciência para a cidadania". Este objectivo depara, muitas vezes, com um obstáculo motivacional, para muitos inesperado: os objectos e factos do quotidiano nem sempre despertam a atenção e a curiosidade do aluno, já que, pertencendo ao seu dia-a-dia, este se habituou a viver com eles.

Facto análogo se verifica na relação entre o cidadão comum e a tecnologia. Cada vez mais se instala a perspectiva do utilizador: desde o momento que *funcione*, ele não se preocupa, nem se interroga acerca de como funciona.

Assim, a educação científica deve começar por despertar a curiosidade do aluno - e do cidadão - para aquilo que o rodeia, realçando a importância do que, à primeira vista, pode parecer trivial.

Um aspecto a ter em conta, quando se discute a educação científica, é o problema da subjectividade da observação. Afirmava o pré-historiador A. Leroi-Gourhan que "os olhos apenas vêem o que estão preparados para ver" (citado por Rosmorduc, J., 1983). A história da Física é uma demonstração permanente da veracidade destas palavras.

Um mesmo acontecimento não apresenta o mesmo significado, quando observado por indivíduos de épocas diferentes. Podemos transpor esta ideia para o plano didáctico, já que um mesmo facto terá diferentes significados, observado por alunos educados em ambientes diferentes, e portanto com um referencial sócio-cultural distinto.

Cabe ao professor a tarefa essencial de orientar devidamente as observações do aluno, disponibilizando o referencial teórico adequado.

6. O papel da experimentação na educação científica

Muito se tem discutido acerca do papel da experimentação na educação científica. Desde a posição fundamentalista de que tudo pode ser conseguido através do trabalho experimental, até à posição economicista, igualmente contestável, de que este é um desperdício de tempo e dinheiro, diferente importância lhe tem vindo a ser atribuída por educadores e investigadores.

Parece, contudo, haver algum consenso de que o trabalho experimental, tal como é desenvolvido pela maioria dos professores, deve ser repensado.

Já em 1977, Gowin apresentou o seu "V", como produto de muitos anos de pesquisas com o intuito de aperfeiçoar o ensino experimental. Preocupado com os efeitos relativamente pequenos que este produzia nos resultados escolares dos alunos, procurou construir um instrumento epistemológico que conduzisse a componente experimental de uma forma paralela à componente de pensamento (figura 1).

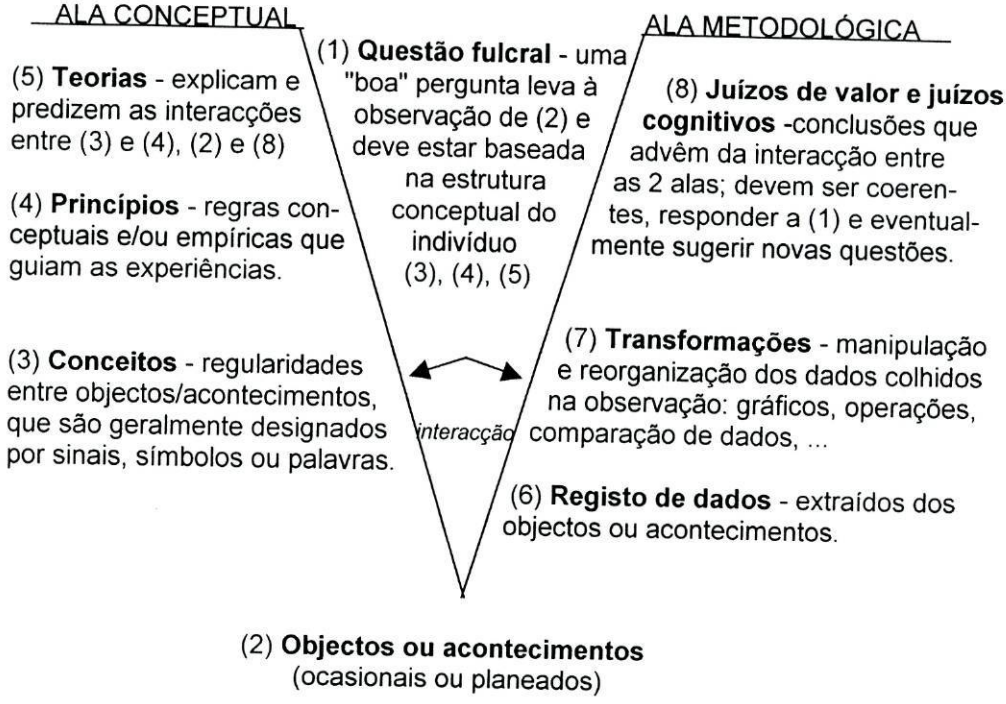


Figura 1.1. O "V" epistemológico de Gowin
(Novak, J.D., Gowin, D.B., 1996)

Gowin apontava como causa do aparente insucesso, o facto de os alunos prestarem, de um modo geral, atenção considerável e explícita aos fenómenos e objectos, raramente se preocupando com os conceitos, princípios ou teorias que orientam as suas observações.

É um dado adquirido, hoje em dia, tanto em ciência como em educação, que da simples observação não resulta um verdadeiro conhecimento. Sem um referencial teórico adequado, a observação pode tornar-se simplesmente inútil, ou até levar a resultados indesejáveis (Woolnough, B., Allsop, T.,1985).

O chamado "ensino por descoberta", muito popular nos EUA há algumas décadas, tentou, de modo artificial, encontrar um suporte teórico na psicologia evolutiva de Piaget, aproveitando a ideia de que a experiência com objectos concretos é um importante requisito para o crescimento cognitivo, especialmente em indivíduos que ainda não desenvolveram uma estrutura cognitiva que lhes permita realizar operações lógico-formais.

Apesar de eventualmente defensável, do ponto de vista motivacional, deste modelo de ensino apenas sobreviveu o *inquiry* (descoberta guiada) em que nas actividades, preparadas pelo professor, são reservadas pequenas sequências de aprendizagem que o aluno pode "descobrir" por si (Bruner, J., 1959).

Para enquadrar correctamente o trabalho experimental no contexto da educação científica, é necessário definir os seus objectivos e verificar quais deles são efectivamente atingidos, comparando a sua efectividade com a de outros métodos de ensino.

Geralmente as listas de objectivos do trabalho experimental centram-se nas três áreas seguintes:

(a) desenvolvimento e aquisição de competências práticas e técnicas laboratoriais;
(b) familiarização com fenómenos e acontecimentos científicos;
(c) envolvimento dos estudantes no processo de investigação científica.

(a) Embora os investigadores em didáctica apontem a necessidade de reformular o trabalho experimental numa base de investigação genuína e resolução de problemas, não é sugerido que todo o trabalho deva ser deste tipo. Continuará a haver necessidade de trabalhos práticos cujo objectivo seja predominantemente a aquisição de competências experimentais (Kempa, R. F., 1988).

Em Portugal, a desvalorização dos trabalhos práticos nas escolas, que acompanhou a explosão escolar das últimas décadas, produziu várias gerações de professores com uma total inépcia para a implementação de actividades experimentais, que se traduz actualmente num considerável entrave à sua reintrodução. Existe por parte de muitos profissionais uma rejeição primária de todo o tipo de auxiliares de ensino com uma base tecnológica: instrumentos eléctricos ou electrónicos, computadores e até audiovisuais.

Este é um problema que demorará igualmente várias gerações a ultrapassar, exigindo das autoridades educativas um cuidado especial nos programas de formação de professores.

(b) Para além das competências anteriormente referidas, o trabalho experimental tem certamente um papel importante a desempenhar na vivência de fenómenos físicos concretos. Muitas destas situações não podem ser, normalmente, substituídas por vídeos ou aprendizagem assistida por computador (CAL), como alguns autores defendem (Hodson, D.,1992).

Existem inúmeras investigações acerca de *misconceptions* (concepções "alternativas") que os alunos desenvolveram durante actividades experimentais (Driver, R., 1983, Osborne, R., e Freyberg, P.,1985, Tasker, R., 1981, entre outras).

Não são conhecidas, contudo, investigações conclusivas acerca da utilização dos métodos de ensino apontados em alternativa; está, portanto, por demonstrar, que tenham uma eficácia superior.

Argumentos habituais em favor da utilização do CAL apontam a sua capacidade para libertar o aluno das "restrições e distorções das experiências concretas,

permitindo portanto que se concentrem nos aspectos conceptuais" (Hodson, D.,1992).

Parece-me um erro ensinar ciência, de uma forma sistemática, à custa de modelos artificiais "perfeitos", não só pelo risco de se gerarem confusões entre estes e a realidade concreta, mas também pela visão errada que é transmitida acerca do que é "fazer" ciência.

Os eventuais insucessos experimentais podem, do ponto de vista formativo, ser tanto ou mais valiosos do que uma experiência bem sucedida, se convenientemente explorados pelo professor. Já em 1978 Brodin defendia que "experiências tão fortemente guiadas que o aluno não possa errar, são inúteis e mais eficazmente substituídas por demonstrações" (feitas pelo professor).

É inegável o interesse dos novos meios informáticos, mas devem usar-se sobretudo para manipulação de grandes quantidades de informação ou para simulação de condições que dificilmente possam ser conseguidas por via experimental.

Perante a actual profusão de *software* "educativo", os professores devem ser bastante criteriosos, já que, sob a capa de uma pretensa modernidade, esconde-se frequentemente o mercantilismo de quem procura vender produtos, de qualidade pedagógica e científica muitas vezes duvidosa.

Ao utilizar a experimentação numa perspectiva demonstrativa, com vista à familiarização com fenómenos e acontecimentos científicos, parecem ser relevantes as estratégias conhecidas genericamente por "Prever-Observar-Explicar" (Gunstone, R. F., 1988):

> *É pedido aos estudantes que efectuem uma previsão do que irá passar-se em determinada situação, por escrito; durante a demonstração, os alunos registam as suas observações, e é feita então uma confrontação entre estas e as previsões anteriormente efectuadas.*

Gunstone e os seus colaboradores baseiam-se em dados da Psicologia da Aprendizagem, segundo os quais o estímulo para o desenvolvimento conceptual é o reconhecimento de contradições e incongruências entre *ideias* (Piaget, J., Inhelder, B.,1958).

(c) Finalmente, e este é talvez o aspecto mais importante da questão, o trabalho experimental não deve limitar-se às actividades anteriormente referidas: adquiridas as necessárias competências experimentais, deve ser deixado um largo espaço para a realização de investigações "genuínas" pelos alunos, através das quais são desenvolvidas capacidades de resolução de problemas práticos.

Desde o "V" epistemológico de Gowin têm sido propostos diversos modelos para o desenvolvimento de actividades investigativas pelos alunos, que têm vindo a ser experimentados com maior ou menor sucesso. Um modelo de resolução de problemas para investigações experimentais, que tem tido bastante aceitação, é aquele que foi desenvolvido em Inglaterra pela *Assessment of Performance Unit, Department of Education and Science* (DES, 1984). A figura 2 apresenta um diagrama que resume os seus aspectos fundamentais:

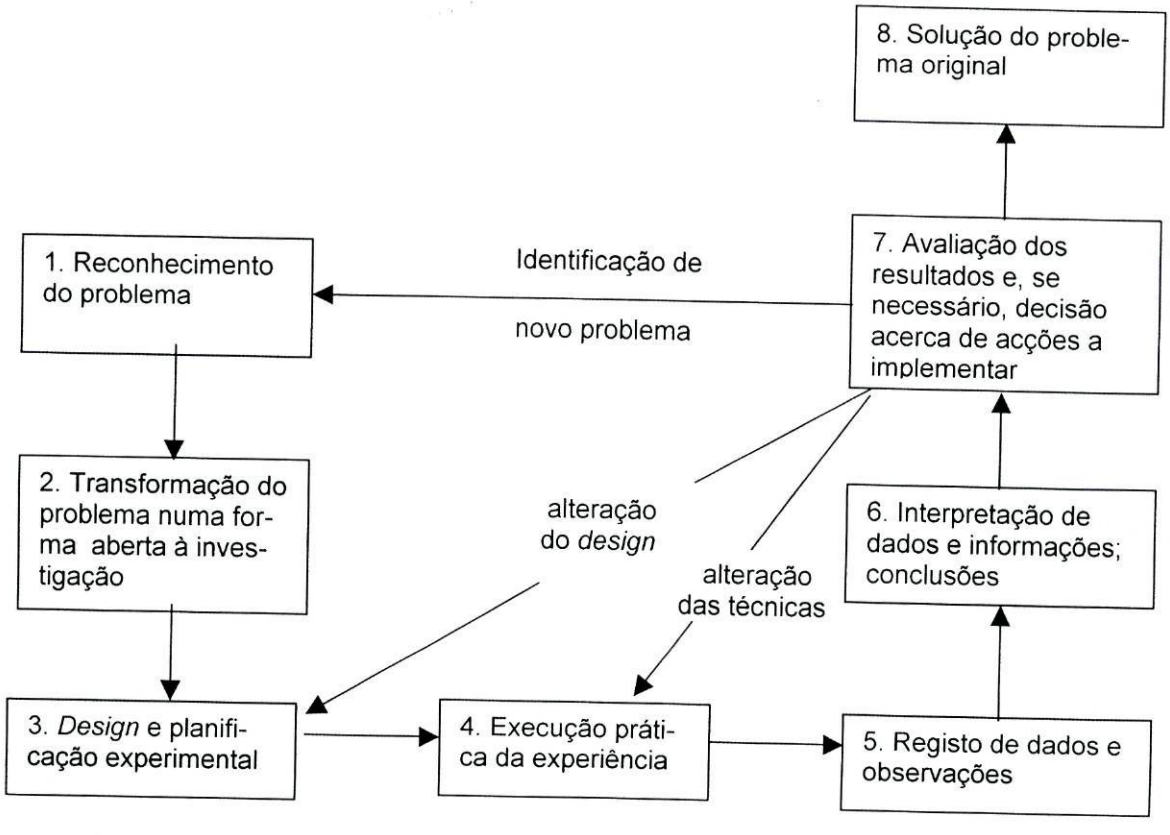


Figura 1.2. Modelo de resolução de problemas para investigações práticas *Assessment of Performance Unit* (DES, 1984)

Segundo alguns investigadores (Shulman, L., Tamir, P., 1973, Hofstein, A. e Lunetta, V. N., 1982) entre os objectivos do trabalho experimental contam-se também alguns de ordem atitudinal e afectiva. Contudo, sendo muito provável o contributo da experimentação para a sua consecução, não podemos afirmar que estes não possam ser atingidos através de uma metodologia diferente.

A simples motivação é apontada muitas vezes como argumento em favor do trabalho experimental nas escolas. Embora defenda uma motivação essencialmente *intrínseca* para a aprendizagem, penso que este argumento não deve ser de todo desprezado, como a experiência demonstra.

É, contudo, consensual entre os investigadores que qualquer tipo de motivação *extrínseca* diminui de forma significativa com a idade, tornando-se evidente a necessidade de aumentar progressivamente o grau de autonomia e o carácter de desafio intelectual das actividades.

7. Tipos de experiências

Discutem-se em seguida, de modo resumido, os diferentes tipos de experiências, no sentido de sistematizar a terminologia utilizada, clarificando simultaneamente a finalidade desta dissertação.

7.1. Experiências demonstrativas

Ao longo do trabalho serão designadas por *experiências demonstrativas* as actividades experimentais, qualitativas ou quantitativas, destinadas à visualização de fenómenos, verificação de leis ou medição de constantes físicas, independentemente de serem realizadas por alunos, individualmente ou em grupo, por um professor perante uma turma, ou por um palestrante perante uma audiência.

Note-se que esta designação, bem como a de *demonstrações*, é algumas vezes reservada às experiências realizadas por um professor ou palestrante, utilizando-se a expressão *experiências formativas* para aquelas que são realizadas pelos alunos.

Alguns autores estabelecem ainda uma diferença entre *experiências práticas* (aquelas que apenas cumprem o objectivo de familiarizar os alunos com fenómenos e acontecimentos científicos) e *trabalhos práticos*.

7.2. Experiências investigativas

Contrastando com aquele tipo de experiências, existe um outro, habitualmente designado por *experiências investigativas*. Nestas, não é fornecido um protocolo detalhado para executar de forma mais ou menos mecânica, mas existe a preocupação de resolver um problema, encontrar uma resposta à partida desconhecida para o aluno, seguindo uma estratégia que ele próprio deve definir.

Esta dicotomia entre demonstração e investigação, expressa em classificações clássicas como a da Nuffield (1975), pode, contudo, ter variantes, de acordo com o grau de autonomia da experimentação, o detalhe das instruções contidas no protocolo ou o tipo de orientação do professor.

Numa estratégia de "inquiry", por exemplo, embora a investigação seja guiada pelo professor, existe um espaço razoável para a reflexão e para a construção dos conceitos pelo aluno.

A preocupação essencial deste trabalho é fornecer aos professores de Física, afastados durante décadas do laboratório, uma ferramenta capaz de os ajudar a resolver dificuldades de ordem experimental no ensino da Óptica: assim, incluem-se protocolos detalhados para uma lista bastante exaustiva de experiências demonstrativas.

Defende-se e encoraja-se, contudo, a possibilidade de conversão de muitas delas em actividades investigativas, de acordo com os objectivos de ensino, as potencialidades dos alunos e o próprio tempo disponível. Esta tarefa, que não é, normalmente simples, é deixada como desafio à criatividade dos professores. [2]

[2] Um exemplo simples pode ser a *EXP.12N, "Estudo do efeito da abertura na luminosidade da imagem e na profundidade de campo"*, da qual decorre facilmente a seguinte actividade:
- *Investigar o efeito da abertura na nitidez da imagem formada* - em que seria o próprio aluno a seleccionar o material a utilizar e os ensaios a realizar.

2. O QUE É A LUZ

1. Introdução

Neste capítulo apresenta-se uma evolução histórica dos modelos descritivos da natureza da luz. Desde as ideias primitivas dos filósofos gregos da Antiguidade, passando pelos modelos corpuscular e ondulatório do século XVII, para chegar ao carácter de radiação electromagnética e finalmente à dualidade onda-corpúsculo.

Analisam-se em seguida algumas concepções frequentes dos alunos acerca da luz, estabelecendo uma analogia com as ideias dos antigos gregos e fornecendo indicações didácticas.

2. Natureza da luz

A luz desempenhou, ao longo da História da Ciência, um papel de relevo na compreensão da Matéria e do Universo. Encontra-se actualmente ligada a inúmeras aplicações em Medicina, na Indústria, nas Comunicações, e na Vida em geral.

A evolução dos modelos e teorias explicativas da luz e fenómenos luminosos desenrolou-se ao longo de um período de mais de dois mil anos, e não foi um percurso linear: "estas transformações nos paradigmas da óptica física são revoluções científicas, e a sucessiva transição de um paradigma para outro, por meio de uma revolução, é o padrão usual de desenvolvimento de uma ciência amadurecida" (Kuhn, T. S.,1962).

A proposta de teorias acerca da natureza da luz, e as subsequentes controvérsias, datam do séc. XVII, embora sejam conhecidas ideias bastante anteriores, directamente relacionadas com a visão.

Os antigos filósofos gregos recusavam a ideia de *acção à distância* e portanto, para eles, teria de existir algum tipo de comunicação entre os objectos e o órgão de visão. Assim, as interpretações mais destacadas podem dividir-se em três categorias:

- fluído que sai do olho, sob a forma de *raios visuais* (Homero, Euclides);
- fluído que entra pelo olho, sob a forma de *eidola*, imagens que envolveriam os objectos e viajariam até ao olho, transportando a sua forma e cor (Leucipo, Demócrito, Epicuro);

- movimento produzido no meio situado entre o objecto emissor e o órgão de visão (Aristóteles).

A interpretação de Aristóteles apresenta grandes semelhanças com a "teoria do éter" que viria a surgir no séc. XIX. Seria, contudo, a teoria dos raios visuais a mais influente até ao séc. XI, a partir do qual a cultura árabe se impôs de modo determinante.

De notar que até esta época ainda não tinha verdadeiramente despontado a ideia da luz como entidade com uma natureza própria. Apenas se falava em imagens ou raios visuais (dependendo da teoria aceite); *lux* era apenas um conceito subjectivo criado pelo espírito humano, como oposição à ideia de escuridão.

Ibn al-Haitham, conhecido no mundo ocidental como Alhazen, contribuiu de forma notável para o desenvolvimento da óptica, podendo considerar-se um percursor da revolução que viria a despontar apenas no séc. XVII. Com ele surge pela primeira vez a ideia da luz como entidade externa: os raios de *lumen* seriam as trajectórias de pequenos corpúsculos materiais, já que eram capazes de deixar impressões no órgão de visão. Como prova era apontado o fenómeno de "after-image", persistência da imagem - por exemplo, quando se olha para o Sol, e em seguida se fecham os olhos - e a própria sensação de dor causada nos olhos pelos raios solares.

Durante a Idade Média, a ideia de *eidola* é recuperada, passando a ter a designação de *espécies*. Estas, são, contudo, produzidas pelo *lumen*, quando incide num corpo, e movem-se ao longo dos raios visuais do observador, até atingirem a pupila.

Os modelos de *lux* e *lumen* viriam a fundir-se a partir de Kepler (1571-1630) no conceito único de "luz". A sua regra do triângulo telemétrico satisfez totalmente o empirismo da época, reforçando o desinteresse pelo mecanismo da visão.

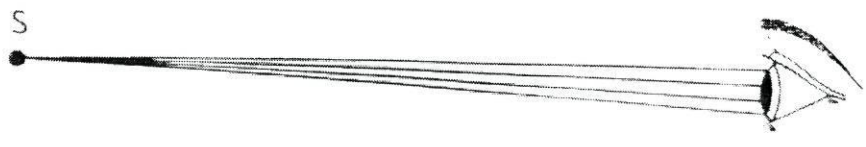


Figura 2.1. O triângulo telemétrico de Kepler
(adaptado de Ronchi, V., 1991)

Para Kepler, cada ponto de um objecto emite raios em todas as direcções, como uma estrela radiante; se um olho estiver situado à sua frente, todos os raios que entram formam um cone, tendo o ponto luminoso como vértice e a pupila como base. A função do olho seria apenas "medir" o pequeno ângulo do triângulo telemétrico e determinar a direcção do seu eixo.

2.1. O modelo corpuscular

No séc. XVII, os filósofos mecanicistas, incluindo Descartes, o abade Pierre Gassend (dito Gassendi) e Boyle procuraram explicar os fenómenos naturais e a estrutura do Universo, a partir dos conceitos de matéria e movimento.

Com base nesta concepção mecânica do mundo, Descartes propôs um modelo para a luz que viria a servir de base para a teoria corpuscular de Newton, embora entre os dois existam consideráveis diferenças: Newton contrapunha a ideia de "acção à distância" ao paradigma cartesiano de "acção por contacto", e atribuía à luz uma velocidade de propagação finita.

Para Newton, o principal fenómeno luminoso é a sua propagação rectilínea, "apenas explicável se os raios luminosos forem constituídos por partículas submetidas às leis da mecânica".

A sua teoria corpuscular foi construída de um modo que hoje nos parece algo ingénuo: ele postulou que os corpúsculos tinham de estar sujeitos a atracções gravíticas, podiam existir em diferentes tamanhos e estavam dotados de outras características, como uma periodicidade de emissão luminosa (*blinking*).

A luz seria, assim, uma substância, e bastante enigmática.

2.2. O modelo ondulatório

Ainda no séc. XVII, Huygens desenvolveu a sua teoria ondulatória, seguindo a linha de pensamento de Hook e Pardies: ele propõe que a luz, de modo semelhante ao som, é um movimento vibratório. Tal como o som se propaga através do ar, as ondas luminosas propagar-se-iam através do "éter", "um material muito leve e perfeitamente elástico, que impregna todos os objectos e preenche o vazio".

De acordo com o princípio de Huygens, cada ponto da frente de onda (que se propaga), pode ser considerado como uma fonte pontual de uma nova onda - *ondelette*, ou onda secundária - e a nova posição da frente de onda é a envolvente de todas estas *ondelettes*, provenientes de todos os pontos da frente de onda na posição anterior.

A aplicação mais brilhante deste princípio, foi a sua explicação do fenómeno da refracção, que respeitava o princípio de Fermat, prevendo que a propagação da luz é mais lenta na água do que no ar, ao contrário do que sucedia aplicando o modelo de Newton.

Contudo, Huygens não foi capaz de explicar satisfatoriamente a *propagação rectilínea da luz*, um facto fundamental, na época, para a aceitação de qualquer teoria. Por outro lado, o seu modelo considerava inicialmente as ondas luminosas, de modo idêntico às ondas sonoras, como longitudinais, o que não permitia igualmente explicar o fenómeno da *polarização*.

Tudo isto, aliado ao prestígio grangeado por Newton noutras áreas, levou a que o modelo ondulatório da luz fosse posto de parte até ao princípio do séc. XIX.

2.3. A luz como radiação electromagnética

A teoria ondulatória da luz viria a renascer pela mão de Thomas Young, que, por associação com as ondas sonoras, considerou inicialmente as ondas luminosas como longitudinais. Só após os estudos de Malus acerca da polarização da luz, Young admitiu a hipótese de elas serem transversas, tal como já anteriormente advogava Hooke, o eterno rival de Newton.

O nome de Young viria a ficar sobretudo ligado ao *princípio de interferência* por si introduzido para explicar as franjas coloridas em películas delgadas.

Seria Fresnel, cerca de treze anos depois, a desenvolver uma teoria ondulatória consistente, com bases matemáticas. A primeira versão desta teoria (*ondas escalares*) conseguia explicar a propagação rectilínea da luz, a reflexão, a refracção, a dispersão, a difracção e a interferência. A segunda versão (*ondas vectoriais*) explicou ainda a polarização da luz.

O séc. XIX seria, no domínio da Física, o século do electromagnetismo. Começando com a invenção da primeira pilha eléctrica, terminaria com a quantificação (empírica) da radiação por Max Planck, em 1900.

Em 1845 Faraday introduz o importante conceito de *campo* para explicar a acção eléctrica e magnética, e em 1864 Maxwell sintetiza todo o conhecimento experimental acerca daqueles fenómenos num conjunto de equações matemáticas [3], cuja simplicidade e simetria maravilharam Hertz, e ainda hoje nos surpreendem.

Maxwell demonstrou que o campo electromagnético se propagava no "éter" como uma onda transversa, sendo a sua velocidade de propagação dada por $c = 1/\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}$. Essa velocidade apenas dependeria, assim, de propriedades eléctricas e magnéticas do meio.

A partir de valores determinados empiricamente para a permitividade eléctrica e para a permeabilidade magnética (do ar), Maxwell encontrou um valor igual ao determinado experimentalmente para a velocidade da luz (a primeira determinação terrestre, que se deve a Fizeau, data de 1849).

Concluía-se, assim, que a luz é uma radiação electromagnética.

Hertz viria a confirmar, alguns anos mais tarde, a existência das ondas electromagnéticas, através de uma importante série de experiências. Viria também, ironicamente, a descobrir o *efeito fotoeléctrico* (1887), transformando-se involuntariamente num dos reformadores da concepção ondulatória da luz.

2.4. A dualidade onda-corpúsculo

No final do séc. XIX ainda se realizavam experiências procurando detectar movimentos relativos da Terra em relação ao "éter". Continuavam a procurar-se nas ondas electromagnéticas aspectos característicos das ondas mecânicas. Michelson (1852-1931) e Morley (1838-1923) publicaram em 1887 os resultados da sua experiência, realizada com uma precisão considerável.

[3] Na realidade, Maxwell apresentou vinte equações. Foi Heaviside, em 1885, que as reduziu a apenas quatro, utilizando a sua notação vectorial.

Os resultados dessas experiências foram invariavelmente negativos e levaram a que vários físicos, entre os quais Poincaré, começassem a duvidar da existência do "éter".

Em 1905, na sequência desses resultados experimentais, Einstein publica a sua teoria da relatividade restrita, na qual põe em causa as leis da Mecânica Clássica e postula que a luz se propaga no vazio com uma velocidade bem definida, independente do estado de movimento do emissor, rejeitando definitivamente o "éter", como um conceito supérfluo.

No mesmo ano, com base no trabalho de Planck (cujo alcance tinha passado despercebido) e procurando explicar o efeito fotoeléctrico, Einstein propõe novamente um carácter corpuscular para a luz; esta seria constituída por *quanta* de energia [4], sendo a energia de cada *quantum* proporcional à frequência da radiação, υ:

$$E = h\,\upsilon \qquad (2.1)$$

em que h é a constante de Planck (h = 6,6262 x 10^{-34} J s).

Nascia, assim, a Mecânica Quântica.

O séc. XX viu-a transformar-se, pouco a pouco, numa Teoria bem fundamentada, graças aos esforços de uma notável geração de físicos, como Bohr, Born, Heisenberg, Schrödinger, De Broglie, Pauli e Dirac.

O comportamento dos fotões como "partículas", foi demonstrado por Compton, através de uma série de experiências, realizadas entre 1919 e 1923. Ao colidirem com electrões livres, os fotões sofrem uma diminuição de energia, manifestada através de um aumento do comprimento de onda (efeito Compton), de valor equivalente ao que seria verificado numa colisão elástica entre duas partículas, desde que ao fotão seja atribuído um momento linear, dado por

$$p = \frac{h}{\lambda} \qquad (2.2)$$

[4] As "partículas" de luz viriam a ser designadas por *fotões*, em 1926, pelo químico Lewis.

Esta relação viria a ser estendida por De Broglie a partículas com massa em repouso não nula (tais como electrões, neutrões, átomos e moléculas).

No âmbito da Mecânica Quântica, não é mais possível utilizar imagens clássicas (baseadas em experiências sensoriais) para descrever ou representar partículas submicroscópicas, sejam de luz, sejam de matéria.

De facto, em interacções radiação-radiação, elas são representáveis por funções de onda, sendo estas, não "verdadeiras ondas", no sentido mecânico, mas *ondas de probabilidade*. Em interacções radiação-matéria elas manifestam um comportamento descontínuo, mas não identificável com a imagem de um corpo discreto e massivo da dinâmica Newtoniana, com forma e dimensões bem definidas, e perfeitamente localizável no espaço.

3. Algumas ideias dos alunos acerca da natureza da luz

A referência histórica introduzida, acerca da natureza da luz, teve como intenção mostrar como foi difícil chegar ao modelo actualmente aceite, no âmbito da Mecânica Quântica, e de como se torna inatingível para um aluno, sem uma capacidade de abstracção adequada e um domínio do necessário formalismo matemático, entender "o que é a luz".

Ela é bem ilustrativa de que a Ciência cada vez está mais longe da ideia de Thomas Huxley de ser "apenas senso comum organizado".

A Óptica, em particular, é uma área da Física que, se por um lado se torna extremamente motivadora pela sua beleza e actualidade, pode facilmente conduzir a interpretações erradas quando se recorre apenas ao "senso comum".

Existem semelhanças evidentes entre algumas concepções dos alunos de hoje e as ideias dos filósofos gregos. Tal como aqueles, os alunos tendem a introduzir uma visão antropomórfica do mundo que os rodeia - desde a mais tenra idade que a sua aprendizagem é feita através de uma interacção com os objectos, por meio dos sentidos.

Quando o termo "luz" é aplicado, muitas vezes refere-se ao que é visto - a *lux* dos nossos antecessores. Por outro lado, quando se afirma que a luz consiste em raios ou ondas ou fotões, a referência ao *lumen* é evidente. Uma concepção generalizada é que a *lux* é física, externa e idêntica ao *lumen*, não se atribuindo um papel especial ao observador (Ronchi, V., 1991).

Algumas investigações envolvendo alunos de 13-14 anos (Driver, R., Guesne, E., Tiberghien, A., 1985) mostraram, de facto, que estes identificam a luz *com a sua fonte* - lâmpada ou Sol - ou *com o respectivo efeito* - imagem na parede. Alguns deles definiram ainda a luz como *um estado*: "... em alguns dias há mais luz do que noutros".

Existe uma forte associação entre luz e visão para muitos alunos; quando inquiridos acerca do que faz a luz, as respostas dominantes são: a luz ilumina as coisas, e a luz permite ver.

Note-se ainda que os mesmos investigadores detectaram, em crianças de 10-11 anos, a ideia de que a luz só "existe" se for suficientemente intensa para produzir efeitos perceptíveis; analogamente, não existia a noção de conservação, podendo a luz "desaparecer" mesmo sem interacção com a matéria.

Alunos mais velhos (15-18 anos) revelaram já estar conscientes da existência de luz no espaço entre a fonte e um alvo (Verkerk, G., Bouwens, R. E. A., 1993), mas para eles a luz é um fenómeno estático: tal como o ar, preenche o espaço; se existir muita luz, fica claro, caso contrário fica escuro.

4. Indicações didácticas

A ideia de que a luz "preenche o espaço" pode ser confrontada com uma situação em que os raios luminosos provenientes de uma fonte pontual penetram no interior de uma caixa opaca, através de um orifício, e saem por outro orifício na parede oposta, formando uma imagem num alvo. Se a experiência for realizada numa sala obscurecida, os alunos poderão ver o interior da caixa pouco iluminado, em contraste com a imagem formada no alvo *{EXP. 2A}*.

No que respeita à natureza da luz, uma abordagem formal da dualidade onda-partícula parece estar completamente fora de questão, quer ao nível do ensino básico, quer ao nível do ensino secundário; contudo, seria interessante proporcionar aos alunos a oportunidade de visualizarem alguns fenómenos de interacção em que a luz intervenha, dos tipos:

- radiação-radiação
- radiação-matéria.

No primeiro caso, a observação do cruzamento de dois feixes de luz demonstrará que, ao contrário do que se passaria com feixes de partículas, em que haveria desvios devido à ocorrência de colisões, depois da zona de intersecção a luz prossegue o seu caminho de forma inalterável. A observação de franjas de interferência poderá ser pretexto, em seguida, para uma discussão, tomando como modelo o comportamento das ondas mecânicas, por exemplo numa tina de ondas {*EXP. 2B*}.

Note-se que uma das maiores dificuldades conceptuais no carácter ondulatório da luz, é "o que ondula", ao contrário do que sucede com as ondas mecânicas em que os alunos reconhecem facilmente ser água, ar, etc.

Mais adiante, no estudo dos fenómenos luminosos, a observação da reflexão e refracção simultâneas de um feixe luminoso, poderão servir para evidenciar a dificuldade que uma teoria corpuscular teria em explicar este facto.

No segundo caso, a abordagem mais simples parece ser a comparação de diversas fotografias idênticas, mas obtidas com diferentes tempos de exposição (Hecht, E., pág. 12). Sob iluminação pouco intensa, a imagem apresenta um padrão quase aleatório, em que cada ponto corresponde a um fotão. À medida que a iluminação se torna mais intensa, o carácter quântico é atenuado.

Os dois fenómenos em que o carácter corpuscular da luz se torna mais evidente são provavelmente os efeitos fotoeléctrico e Compton.

Este último não parece ser fácil de demonstrar numa escola básica ou secundária. Já o primeiro, aparece como sugestão no Guia de Experiências da Física Básica Nuffield, através de um dispositivo de fácil preparação {*EXP. 2C*}, que permite reproduzir a célebre experiência realizada por Hertz em 1887.

É apenas necessário dispor de um electroscópio de folhas (ou um electrómetro) e luz ultravioleta. Utilizando outras fontes de luz, de diferentes frequências, é possível levar os alunos a concluir que o fenómeno (emissão de electrões pela placa de zinco ligada ao electroscópio):

- depende da frequência da radiação luminosa incidente;
- não depende do tempo de incidência - com uma frequência inadequada, é inútil esperar que haja "energia suficiente" para que a emissão se dê.

3. PRODUÇÃO DE LUZ

1. Introdução

Ao longo deste capítulo apresenta-se uma breve nota histórica acerca da produção de luz e efectua-se uma síntese descritiva das principais fontes luminosas; atribui-se especial destaque ao laser pela sua importância, e pelo desconhecimento que ainda se verifica sobre o seu modo de funcionamento.

Referem-se ainda as principais concepções dos alunos acerca das fontes de luz, e fornecem-se indicações didácticas.

2. Em busca da luz

O carácter (ainda hoje) misterioso da luz, levou a que fosse comparada a uma deusa, ou a uma emanação do deus Sol, pelos povos da Antiguidade. Efectivamente, a luz solar é a principal fonte natural de luz da Terra.

Desde a descoberta do fogo, cerca de 400 000 anos a. C., que o Homem tem procurado formas artificiais de produzir energia, e luz em particular.

Ao longo da História a luz é também muitas vezes identificada com o fogo, já que, durante milénios, a combustão de diversos materiais foi o único meio utilizado para a produzir, recorrendo-se a meios mecânicos ou ópticos para despoletar a chama -- de notar que os primeiros fósforos datam de 1680 e que a sua industrialização apenas começou em 1841.

Foi já em plena época industrial que Davy inventou o arco eléctrico de carbono (1810), no qual a luz é emitida através de uma descarga eléctrica entre dois eléctrodos de carbono próximos. Cerca de 1850 ele era já utilizado de forma generalizada na iluminação de ruas, estações de caminhos de ferro e faróis, devido à sua grande intensidade luminosa. Contudo, a emissão de fumos nocivos tornava-o inadequado para a utilização doméstica, onde a iluminação a gás dominava.

Outras lâmpadas de descarga viriam a ser desenvolvidas para diversas utilizações, como a de sódio, a de mercúrio e a de xénon; esta última, com filtros adequados,

pode ser uma excelente fonte artificial para simulação da luz solar, já que apresenta uma temperatura de cor semelhante à da fotosfera solar.

A primeira lâmpada de incandescência seria construída em 1878, por Edison, baseando-se no efeito Joule. Neste tipo de lâmpadas, um filamento metálico, contido numa ampola de vidro com um gás inerte a uma pressão reduzida, é aquecido através da passagem de uma corrente eléctrica.

Até ao século XIX, a ausência de uma teoria atómica adequada, inibiu a explicação dos mecanismos que condicionam a produção de energia e a emissão de luz. Esta situação alterou-se durante o século XX, em particular desde os anos 40. Não foi certamente por acaso que em apenas duas décadas surgiram a lâmpada de fluorescência, o LED e o laser.

Nas lâmpadas de fluorescência, são produzidas descargas eléctricas em vapor de mercúrio a baixa pressão, provocando a emissão de radiação ultravioleta pelos átomos excitados de Hg; esta radiação é convertida em luz visível, pela excitação da fluorescência do fósforo (ou outros elementos) que constitui o revestimento interior da lâmpada.

Os LED (light-emitting diodes) são dispositivos que utilizam uma junção *p-n* num cristal semicondutor.

O *laser* surgiria em 1960, pela mão de T. H. Maiman, e a sua descoberta provocou uma das maiores revoluções tecnológicas da história da ciência. Pela sua importância merece um especial destaque no ponto seguinte.

3. Fontes de luz

As fontes de luz podem ser naturais, como as estrelas, ou artificiais.

3.1. Fontes incandescentes

Começaremos por nos referir às *fontes incandescentes*, entre as quais se contam as lâmpadas de tungsténio e combustões em geral, e as estrelas incluindo o caso particular do Sol.

Um corpo pode irradiar energia electromagnética em virtude, exclusivamente, da temperatura a que se encontra; este tipo de radiação diz-se puramente térmica (ou emissão *por incandescência*). O espectro obtido tem uma composição variável: à medida que a temperatura aumenta, às radiações infravermelhas juntam-se sucessivamente radiações do espectro da luz visível, e o corpo aquecido torna-se luminoso; a fracção de energia emitida sob a forma de luz visível aumenta com a temperatura, e o corpo passa de vermelho escuro a amarelo alaranjado, e finalmente a branco.

Este tipo de emissão resulta de os átomos se comportarem como osciladores, emitindo ou absorvendo quantidades de energia discretas, proporcionais à sua frequência. Esses valores de energia , segundo Planck, seriam dados por

$$E = \mathrm{n}\, h\, \upsilon \qquad (3.1)$$

em que n é um número inteiro positivo e h é uma constante.

Atendendo ao elevado número de osciladores, emitindo a diferentes frequências, a quantificação não é detectável para os nossos instrumentos de observação, e o espectro de radiações resultante aparece-nos como contínuo.

3.2. Fontes luminescentes

Quando as radiações não têm uma origem puramente térmica, considera-se uma emissão *por luminescência*.

Segundo o actual modelo do átomo, enquadrado na Mecânica Quântica, a luz emitida surge devido à emissão de fotões por átomos (ou moléculas) na transição de um estado excitado para outro estado de menor energia.

No estado fundamental do átomo, os electrões tendem a ocupar os níveis de energia mais baixa (princípio da energia mínima). Um átomo que, de algum modo, absorva energia, altera a sua configuração electrónica habitual, passando para um estado excitado.

Ao fim de algum tempo (normalmente inferior a 10^{-7} s) regressa ao estado fundamental, libertando a energia em excesso através da emissão de radiação.

Essa energia está relacionada com a frequência da radiação emitida, através da relação de Planck

$$E = h\,\upsilon\,. \qquad (3.2)$$

Se a emissão se verificar na gama visível de frequências do espectro electromagnético ($\approx 4\times10^{14}$ Hz a 8×10^{14} Hz), observa-se a produção de luz. [5]

A excitação de átomos ou moléculas pode ser conseguida através de vários processos:

- corrente eléctrica, como nos reclamos luminosos, tubos de Plücker e tubos de Geissler;
- acção de fotões, como nas lâmpadas de fluorescência e na fosforescência de muitas substâncias;
- reacções químicas, como em certos seres vivos, tais como pirilampos e peixes de profundidade.

3.3. Díodos emissores de luz (LED)

Os LED são basicamente constituídos pela junção de dois semicondutores, um de tipo *n* e outro de tipo *p*, fortemente dopados. Quando uma corrente eléctrica atravessa o díodo, electrões do lado *n* deslocam-se para o lado *p*, preenchendo alguns vazios, e produzindo fotões (e vice-versa).
Existem díodos capazes de emitir luz em todo o espectro da região visível, e no infravermelho próximo.

3.4. Lasers

O laser é essencialmente um amplificador óptico. Aliás o seu nome resulta das iniciais da expressão "light amplification by stimulated emission of radiation".

[5] A ordem de grandeza da frequência da radiação correspondente a uma transição entre níveis rotacionais consecutivos numa molécula diatómica é de 10^{11} Hz [infravermelho longínquo]; para uma transição entre níveis vibracionais adjacentes é de 10^{13} Hz [infravermelho próximo] e para uma transição entre níveis atómicos é de 10^{15} Hz [ultravioleta] (French, A. P., Taylor, E. F., 1983).

Já em 1916, Einstein tinha previsto a possibilidade de um novo processo de radiação a que chamou *emissão estimulada*. Contudo, apenas em 1954 surgiu a primeira aplicação prática, com a invenção do maser (um amplificador de microondas) por C. H. Townes. O laser nasceu como uma aplicação do princípio dos masers à luz visível.

Na emissão estimulada, um fotão incidente, de energia $h\upsilon = E_1 - E_0$ interage com um átomo no estado excitado E_1, e estimula-o a decair para um estado de menor energia, E_0.

Neste processo, o átomo liberta um fotão com a mesma energia, direcção de propagação, fase e polarização que o fotão inicial. Assim, como balanço final, obtemos dois fotões idênticos em vez de um, ou seja, dá-se um aumento da intensidade do feixe incidente.

A constituição de um laser, é, basicamente, uma *fonte de excitação*, um *meio activo* e *uma cavidade ressonante*.

A *fonte de excitação* pode ser de natureza óptica, eléctrica, química ou térmica, desde que a sua energia possa ser acoplada ao meio activo, para excitar os átomos e criar a necessária *inversão de população* [6].

No primeiro laser desenvolvido, a fonte consistia numa lâmpada de descarga contendo xénon, com a forma helicoidal, envolvendo o meio activo (cristal de rubi).

O *meio activo* é uma parte importante do dispositivo: muitos lasers recebem o nome de acordo com o tipo de meio utilizado (He-Ne, CO_2, ...). Este é escolhido de modo a fornecer uma largura espectral estreita. Atendendo à larga variedade de meios disponíveis, é possível produzir lasers de comprimentos de onda muito diversos, desde o ultravioleta até ao infravermelho.

A *cavidade ressonante* consiste normalmente num par de espelhos planos ou curvos cuidadosamente alinhados, separados por uma distância adequada, e

[6] O número de átomos no estado de energia mais elevada terá de exceder o número de átomos no estado de energia mais baixa, o que, contrariando a distribuição de Boltzmann, requer, por vezes, um fornecimento contínuo e vigoroso de energia (*pumping*) ao meio activo.

centrados com o eixo óptico do sistema laser. Os fotões emitidos com a direcção daquele eixo, são reflectidos para trás e para a frente, repetidamente, e a radiação estimulada aumenta de intensidade.

Embora o meio activo funcione, de facto, como um amplificador, a realimentação óptica proporcionada pela cavidade - aliada à emissão espontânea inicial - transforma o sistema laser num oscilador (logo uma fonte de luz !).

Uma parte do feixe resultante atravessa um dos espelhos, parcialmente reflector, saindo para o exterior. Este feixe tem importantes características, variáveis conforme o tipo de laser, podendo algumas delas ser optimizadas, de acordo com a aplicação a que se destina:

- *Monocromaticidade* - a luz emitida por um laser contínuo é quase monocromática; contudo, embora possa predominar um determinado comprimento de onda, λ_0, existe sempre alguma emissão dentro de um intervalo $\Delta\lambda$ (largura de banda), centrado em λ_0.

- *Coerência* - é a propriedade óptica que melhor distingue o laser de outras fontes de luz; a *coerência temporal* é uma medida do grau de monocromaticidade, enquanto que a *coerência espacial* mede a uniformidade de fase ao longo da frente de onda.

- *Direccionalidade* - o feixe laser pode apresentar um ângulo de divergência notavelmente reduzido, devido à geometria da cavidade ressonante (para um laser de He-Ne, tem a ordem de grandeza de 10^{-3} rad).

- *Potência radiante* - um laser pode emitir até 10^{33} fotões por segundo, conforme a sua potência, o que o torna a fonte de luz mais intensa conhecida.

- *Possibilidade de focagem num ponto* - ao contrário de outros feixes luminosos, um feixe laser pode ter um ângulo de divergência limitado por difracção. Este feixe pode ser focado numa zona de diâmetro extremamente reduzido, utilizando uma lente convergente.

Os lasers podem ser classificados de acordo com a sua aplicação, meio físico em que se situam os elementos activos, forma de excitação, etc. Assim, existem lasers de estado sólido, estado líquido, estado gasoso e de vapor, bem como lasers de raios X e de electrões livres.

Hoje em dia encontram-se muito difundidos os *lasers de díodo*, que se constroem tornando paralelas as faces opostas de um díodo emissor de luz, através de clivagem ao longo dos planos atómicos, e aplicando igualmente a realimentação óptica. O seu fabrico em série permite que sejam obtidos a um preço muito baixo, e as suas reduzidas dimensões tornam-nos particularmente portáteis (os ponteiros luminosos, por exemplo).

4. Algumas ideias dos alunos acerca das fontes de luz

Num estudo com alunos de 13 anos (Mechlova, E., 1993), após 15 aulas de Óptica, estes distinguiam fontes de luz de objectos iluminados, e sabiam explicar por que razão podem ver corpos que não emitem luz. Contudo, alguns alunos consideravam os espelhos e a Lua como fontes de luz !

Outro estudo com alunos de 13-14 anos (Driver, R., Guesne, E., Tiberghien, A., 1985) revela que existe, por vezes, uma identificação da luz com a lâmpada eléctrica, o que está de acordo com a concepção já referida no capítulo anterior (luz como *fonte*). Por outro lado estas crianças eram incapazes de explicar por que razão existe a luz do dia, quando "não há Sol", já que não se apercebem da interacção entre a luz e o ar.

Finalmente, numa investigação acerca de mudança conceptual (Galili, I., 1996) as ideias acerca das fontes de luz parecem evoluir de um primeiro modelo estático, em que a luz é uma entidade localizada numa região à volta da fonte, até um modelo em que a luz sai da fonte: *(a)* apenas em direcções radiais ou *(b)* segundo uma direcção preferencial, adequada ao utilizador.

Ao contrário da concepção *(a)*, essencialmente incompleta, a concepção *(b)* representava uma barreira significativa a uma compreensão genuína do fenómeno.

5. Indicações didácticas

É importante chamar a atenção dos alunos para diferentes objectos luminosos como o Sol, fósforos, lâmpadas de tipos diferentes, LED (e até lasers), com os quais o aluno convive diariamente, sem, normalmente, se interrogar acerca dos mecanismos de produção de luz. Poderá ser um ponto de partida para discutir alguns aspectos da teoria atómica, ao nível do ensino secundário, e as relações entre a ciência, a tecnologia e a sociedade.

Sugerem-se ainda duas actividades experimentais simples, envolvendo fontes de luz.

A primeira, permite estudar a dependência da intensidade luminosa, de uma lâmpada de incandescência e de um LED, com a tensão aplicada, utilizando uma fonte de tensão variável, e usando um fotómetro eléctrico a uma distância fixa da fonte de luz {*EXP. 3A*}.

A segunda, consiste na construção e exploração de uma câmara escura, que poderá servir posteriormente para outras experiências, e permitirá levar os alunos a distinguirem uma fonte pontual de uma fonte extensa (objecto), e a compreenderem que esta se comporta como um conjunto de um grande número de fontes pontuais {*EXP. 3B*}.

4. PROPAGAÇÃO DA LUZ

1. Introdução

Neste capítulo apresenta-se uma referência histórica acerca da noção de propagação rectilínea da luz, desde os antigos gregos até ao princípio de Fermat. São referidas as primeiras determinações da velocidade de propagação da luz (no ar) e discute-se a sua propagação em meios diferentes do vazio.

Apresentam-se ainda algumas ideias frequentes dos alunos acerca da propagação da luz, e apresentam-se indicações didácticas, incluindo formas de evidenciar as restrições à sua propagação rectilínea.

2. Propagação rectilínea da luz

"Deus e a Natureza nada fazem inutilmente". Esta afirmação de Aristóteles, baseada num determinado conjunto de observações, é talvez a mais antiga referência a um certo *princípio de economia*, que iria aparecer, ao longo dos séculos, sob diversas formas. Para Leonardo da Vinci (1452-1519), " a Natureza, para realizar um acto, toma sempre o caminho mais curto". Para Fontenelle (1657-1757) "ela é de uma poupança extraordinária; tudo o que puder fazer de uma maneira que lhe custe um pouco menos, mesmo que este menos não seja quase nada, é certo e sabido que ela o fará dessa maneira."

No que respeita à propagação da luz, esta economia significava uma propagação rectilínea. Foi com base nesse, e outros princípios, que Euclides (322 - 285 a. C.) desenvolveu a sua óptica geométrica:

- princípio de propagação rectilínea da luz;
- princípio da independência de propagação dos raios luminosos;
- princípio da reversibilidade do raio luminoso.

Nos seus estudos acerca da lei da reflexão, Hero de Alexandria (algures entre 150 a. C. e 250 d. C.) afirmou que "a luz, ao propagar-se entre dois pontos, através de uma superfície reflectora, escolhe o caminho mais curto possível".

Em 1657, Fermat, reformulando o princípio de Hero, propôs o seu célebre *princípio do tempo mínimo*, que se aplica tanto à reflexão como à refracção: "a trajectória seguida por um raio luminoso entre dois pontos é aquela que é percorrida no menor intervalo de tempo possível". [7]

Este princípio é extremamente importante, pois representa uma ferramenta conceptual para analisar os fenómenos ligados com a propagação da luz. Permite aceder directamente à natureza dos fenómenos sem preocupações sobre os mecanismos que os determinam.

A semelhança entre este princípio e o *princípio da acção mínima* de W. R. Hamilton (1805-1865), aplicado à mecânica, terá sido fundamental para o desenvolvimento da mecânica quântica por Schrödinger (1887-1961).

Note-se que a Óptica Geométrica, de Euclides, Hero de Alexandria, e mais tarde, Vitrúvio (séc. I) e Cláudio Ptolomeu (séc. II), é verdadeiramente uma geometria; baseando-se numa representação da luz em termos de raios luminosos que se propagam em linha recta, ela não parece preocupar-se com a natureza da luz.

O ensino tradicional da óptica nas escolas tem adoptado precisamente esta filosofia, o que pode ser perfeitamente defensável, se atendermos, por um lado ao desenvolvimento cognitivo dos alunos e por outro a que a Óptica Geométrica é válida, como primeira aproximação, sempre que a ordem de grandeza dos comprimentos de onda envolvidos for pequena relativamente às dimensões dos objectos.

3. Velocidade de propagação da luz

A elevadíssima velocidade de propagação da luz e as limitações nas técnicas de medição justificam que durante muito tempo se acreditasse na sua propagação instantânea. Caberia a Olaf Roemer demonstrar (1676) que aquela velocidade é

[7] Este enunciado, adequado ao ensino secundário numa perspectiva operacional, deve ser substituído por um outro, mais geral: "a luz propaga-se, entre dois pontos distintos, ao longo da trajectória para a qual o percurso óptico total tem um comportamento estacionário relativamente a variações dessa trajectória" (Hecht, E., 1991).

finita, baseando-se num estudo cuidadoso dos eclipses de Io, a lua mais próxima de Júpiter. Huygens e Newton, de posse dos dados de Roemer, calcularam o valor da velocidade da luz, obtendo $2,3 \times 10^8$ m s^{-1} e $2,4 \times 10^8$ m s^{-1}, respectivamente.

Como curiosidade, refira-se que Hooke se manteve céptico, argumentando que "um valor tão elevado não podia deixar de ser infinito".

A primeira medida terrestre da velocidade da luz viria a ser feita em 1849 por Fizeau, utilizando uma roda dentada em rotação e um espelho colocado a 8633 m de distância. Fizeau obteve o valor de $3,153 \times 10^8$ m s^{-1}.

No início dos anos 20, Michelson efectuou uma nova determinação, substituindo a roda dentada por um espelho rotativo com 8 faces, e colocando o espelho distante a cerca de 35 km de distância. Obteve um novo valor de $2,99796 \times 10^8$ m s^{-1}.

A *velocidade de propagação da luz no vazio* encontra-se fixada, desde 1983, pela 17ª Conferência Geral de Pesos e Medidas, em

$$c = 2,99792458 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$$

(A letra *c* é a inicial da palavra latina *celer*, que significa "rápido").

A luz propaga-se em meios materiais a uma velocidade diferente de *c*, podendo tornar-se menor ou mesmo maior do que *c* [8].

As causas são complexas; a explicação mais simples tem como base um modelo que encara o meio material como um conjunto de osciladores. A onda refractada, que constitui a única perturbação observável, é o resultado da interferência da onda inicial (primária) com as ondas (secundárias) resultantes da difusão pelos átomos individuais. Tanto a onda primária como as secundárias se propagam no vazio interatómico à velocidade *c*, não havendo assim violação dos postulados da Teoria da Relatividade Restrita.

[8] A velocidade de fase pode, em alguns casos especiais, ser superior a *c*; contudo, a velocidade de propagação da energia, nunca excede o valor de *c*.

4. Algumas ideias dos alunos acerca da propagação da luz

Muitas concepções dos alunos, que se desviam dos conceitos formais, resultam de aprendizagens empíricas realizadas anteriormente, na sua vida diária. "O conhecimento vulgar, a maior parte das vezes, não só se opõe ao conhecimento científico, mas também lhe é obstáculo" (Bachelard, G., 1934).

No que respeita à propagação da luz, factores relacionados com as próprias características dos conceitos envolvidos, podem também levar a diversas *misconceptions* dos alunos: o valor elevado da velocidade de propagação da luz, que escapa aos nossos sentidos, e um conjunto de restrições à validade da sua propagação rectilínea (ver ponto 5., na página seguinte).

Verkerk, G. e Bouwens, R.E.A. (1993) apontam três padrões detectados em alunos entre os 15 e os 18 anos:

- a distância até onde a luz se pode propagar é limitada pela extensão do seu efeito visível (apenas alguns metros, a não ser que se trate de uma fonte muito brilhante, como o Sol);
- a luz propaga-se a uma velocidade infinita (uma sala é toda iluminada ao mesmo tempo, quando se acende a luz);
- a luz pode "contornar" obstáculos, e assim, uma sala com uma única janela pequena é totalmente iluminada, e não apenas uma zona limitada, em frente da janela.

Investigações com alunos entre os 13 e os 14 anos (Driver, R., Guesne, E., Tiberguien, A., 1985) revelaram algum reconhecimento da luz como entidade distinta na sua fonte, pela utilização de expressões descritivas que evocam a ideia de movimento. Por outro lado, experiências simples com sombras e obstáculos com orifícios, eram, de uma forma geral, correctamente explicadas através da noção de propagação rectilínea da luz.

Para os mesmos investigadores, a noção de percurso rectilíneo da luz não tem significado para crianças de 10 a 11 anos, já que ainda identificam normalmente a luz com a sua fonte.

5. Indicações didácticas

A noção *de raio luminoso* é de particular importância no estudo da Óptica Geométrica. Ela resulta da propagação rectilínea da luz, constituindo mais uma ferramenta matemática do que um conceito físico.

É importante mostrar aos alunos que, na prática, se podem produzir feixes luminosos muito finos (laser, por exemplo), construindo assim o conceito operacional de raio luminoso como *limite para o qual tende um feixe luminoso, quando se diminui o seu diâmetro.*

Deve, contudo, evitar-se a identificação deste conceito com o próprio feixe luminoso, que ocorre frequentemente.

É fundamental ainda que sejam evidenciadas aos alunos as diversas restrições à propagação rectilínea da luz:

(a) só se aplica à propagação em meios *homogéneos* e *isótropos*;
(b) não se aplica na mudança de meio óptico;
(c) não se verifica quando a luz interage com objectos (obstáculos ou aberturas) cujas dimensões se aproximam da ordem de grandeza do seu comprimento de onda.

Assim:

(a) É aconselhável a criação de condições que tornem visível o trajecto dos raios luminosos, num meio homogéneo (solução aquosa de fluoresceína) e no mesmo meio transformado em heterogéneo pela adição de uma solução concentrada de cloreto de sódio {*EXP. 4A*}.

(b) Experiências diárias, como a vareta mergulhada em água, que parece quebrada, ou a moeda igualmente mergulhada, que aparenta localizar-se numa posição diferente, são fáceis de repetir; a observação do trajecto de um feixe luminoso delgado através de uma lâmina de faces paralelas e de um prisma, é ainda mais eloquente {*EXP. 4B*}.

(c) Embora a difracção seja referida mais adiante, a observação de alguns padrões de difracção (*EXP. 16A*) poderia ser antecipada, no sentido de constatar que certos obstáculos ou aberturas estreitas desviam a luz da sua propagação rectilínea.

Algumas consequências importantes da propagação rectilínea da luz são fenómenos como a sombra e a penumbra, responsáveis pelos eclipses e pelas fases da Lua. O seu estudo, simples e qualitativo, pode facilmente ser levado a cabo por alunos do ensino básico {*EXP. 4C*}.

A câmara escura, cuja construção foi sugerida no segundo tema "Produção de luz", baseia-se igualmente na propagação rectilínea da luz, o que poderá ser discutido com os alunos.[9]

No que respeita à velocidade de propagação da luz, a sua determinação experimental poderia ser feita como um trabalho prático, enquadrado em Técnicas Laboratoriais de Física. Atendendo à dificuldade de determinação da velocidade da luz no ar por um método que possa ser compreendido por alunos deste nível etário, sugere-se a determinação da velocidade da luz numa fibra óptica, através de um método baseado na medição directa de um tempo e uma distância {*EXP. 4D*}.

[9] O olho humano, como adiante será referido, comporta-se opticamente como uma câmara escura. O ângulo visual é também uma consequência da propagação rectilínea da luz.

5. DETECÇÃO E MEDIÇÃO DA LUZ

1. Introdução

Neste capítulo, distingue-se radiometria e fotometria, apresentando algumas das suas principais grandezas e definindo as respectivas unidades SI. Efectua-se uma sistematização dos principais detectores de luz, desde o olho humano aos transductores electrónicos.

Fornecem-se ainda indicações didácticas úteis.

2. Radiometria e fotometria

A luz é uma radiação electromagnética, e, como tal, transporta energia - esta é uma das suas características mais importantes.

A área da Física que trata da medição de qualquer radiação electromagnética chama-se *radiometria*.

As grandezas radiométricas referem-se ao conteúdo energético da radiação e, como tal, apenas envolvem medidas físicas puras, isto é, independentes de características do observador.

A *fotometria*, que trata especificamente da parte visível do espectro das radiações electromagnéticas, por outro lado, leva em linha de conta a resposta do olho humano "normal" à energia radiante, a diversos comprimentos de onda, envolvendo medições psicofísicas.

Atendendo a que o olho humano apresenta diferenças significativas, de indivíduo para indivíduo, foi necessário estabelecer um padrão de resposta "standard". O resultado deste trabalho, que coube à Comissão Internacional de Iluminação (CIE), é reproduzido na figura 5.1.

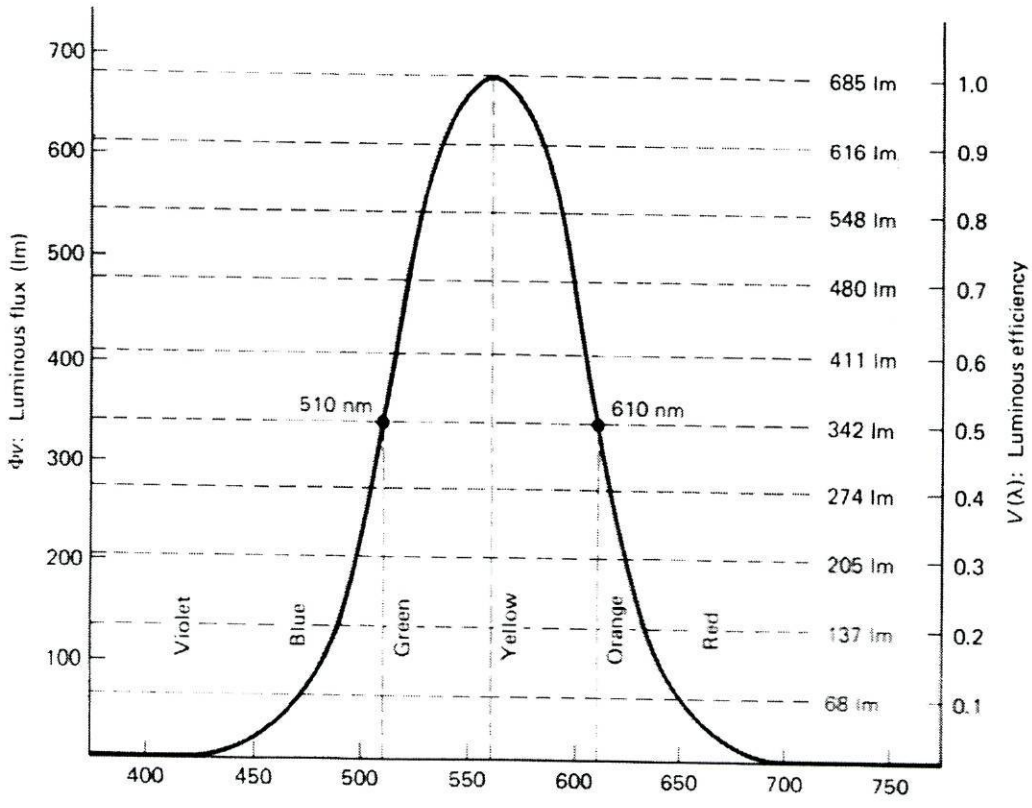


Figura 5.1. Curva de eficiência luminosa da CIE (*visão fotópica*). Para cada comprimento de onda, o fluxo luminoso correspondente a uma potência radiante de 1 W é igual ao produto de 685 lm pela eficiência luminosa (Pedrotti, S. J., Pedrotti, L. S., 1996)

Para distinguir as grandezas radiométricas das grandezas fotométricas, utilizam-se normalmente as designações *energético(a)* ou *luminoso(a)* a seguir ao respectivo nome. No que respeita aos seus símbolos, é aconselhável o uso de um índice inferior *e* (electromagnético) ou *v* (visual), respectivamente.

Existe um grande número de grandezas, quer radiométricas, quer fotométricas, criadas para variados fins (ver, por exemplo, Almeida, G., 1997). Referir-nos-emos apenas a algumas, com maior aplicação ao nível do ensino secundário.

A grandeza física que, no SI, mede a "quantidade de luz" produzida por uma fonte, é a *intensidade luminosa* (I *ou* I_V). A sua unidade SI é a candela (cd), definida como "a intensidade luminosa, numa dada direcção, de uma fonte que emite uma radiação monocromática de frequência 540×10^{12} Hz, e cuja intensidade energética nessa direcção é 1/683 W sr^{-1} (watt por esterradiano)" [10] .

[10] 16ª Conferência Geral de Pesos e Medidas (CGPM), Resolução 3., 1979.

Considerando uma fonte pontual P, que emite luz num meio homogéneo, esta propaga-se, de modo uniforme, em todas as direcções.

A *iluminação* [11] (E ou E_V), fluxo por unidade de superfície normal à direcção de incidência, a uma dada distância r, será proporcional a $1/r^2$, já que o fluxo luminoso é distribuído por uma superfície esférica de área igual a $4 \pi r^2$. Este é o enunciado da chamada *lei do inverso do quadrado das distâncias*, para fontes pontuais.

Como o fluxo luminoso não é mais do que o produto da intensidade luminosa pelo ângulo sólido Ω (figura 5.2.) normalmente comparam-se intensidades luminosas de fontes pontuais através da comparação de iluminações, desprezando, para distâncias não muito diferentes, a variação deste.

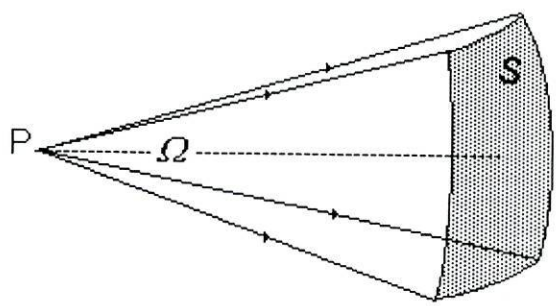


Figura 5.2. Definição do ângulo sólido Ω, cuja unidade SI é o esterradiano (sr).

A unidade SI de iluminação é o lux (lx), que se define como "a iluminação de uma superfície que recebe o fluxo luminoso de 1 lúmen, uniformemente distribuído por cada metro quadrado".

3. Detectores de luz

3.1. Olho humano

O olho humano constitui um sistema óptico centrado, e como tal, será abordado mais adiante. De momento apenas nos interessa referi-lo, enquanto detector de luz.

Trabalhos diversos sobre a visão humana indicam que o olho pode detectar cerca de 10 fotões, e possivelmente até mesmo 1, dependendo da respectiva frequência.

[11] Anteriormente designada por *intensidade de iluminação*. A grandeza radiométrica equivalente é a *irradiância*.

Ele é por vezes considerado um instrumento de comparação em fotometria, já que é capaz de detectar diferenças de menos de 2% na intensidade luminosa de duas fontes colocadas lado a lado, tal como acontece, por exemplo, ao usar o fotómetro de Bunsen (1844).

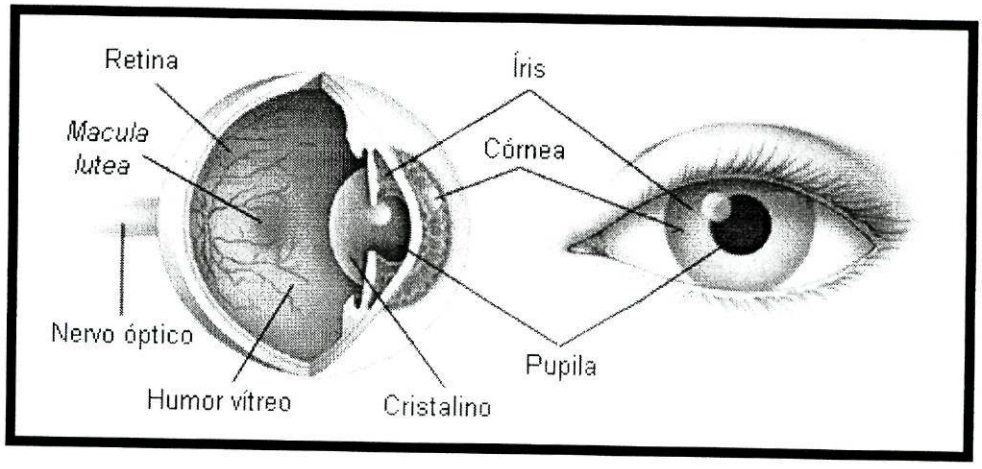


Figura 5.3. Anatomia do olho
(adaptado de American Academy of Ophtalmology, eyeNET, http://www.eyenet.org/public/anatomy/anatomy.html)

A *retina* é a parte do globo ocular sensível à luz (figura 5.3.). Trata-se de uma membrana constituída por dois tipos de células: *cones* e *bastonetes*.

Os cones (≈ 3 a 7 milhões) predominam numa região com cerca de 3 mm de diâmetro, próxima do centro da retina, chamada *macula lutea* (mancha amarela); são responsáveis pela visão diurna, permitindo distinguir as cores e diferenças de intensidade luminosa. Os bastonetes (≈ 110 a 130 milhões) distribuem-se mais densamente em direcção à periferia [12]; dado serem extremamente sensíveis a luz de baixa intensidade, são fundamentais na visão nocturna, embora apenas permitam distinções claro-escuro e não distinções de cores.

No centro da mancha amarela, encontra-se a zona de maior acuidade visual, denominada *fovea centralis*. Por contraste, existe uma pequena região da retina, situada junto da saída do nervo óptico, completamente insensível à luz, o *ponto cego* (figura 5.4.).

[12] Este facto faz com que um objecto possa ser melhor distinguido, à noite, quando observado, não de frente, mas ligeiramente de lado.

Figura 5.4. Ponto cego. Com o olho esquerdo fechado, fixe o olho direito no gato. Aproximando o rosto da figura, a uma certa distância deixará de ver o rato, pois a sua imagem estará a formar-se sobre o ponto cego da retina. (adaptado de Máximo, A., Alvarenga, B., sem data)

O *nervo óptico* destina-se a transmitir a sensação visual ao cérebro, sendo constituído por algumas centenas de milhares de fibras. Assim, em média, cada fibra é responsável pela transmissão de informação de cerca de uma centena de células da retina (cones e bastonetes).

O olho, quando adaptado a uma iluminação forte - *visão fotópica*, é sensível do vermelho (740 a 800 nm) ao violeta (360 a 400 nm), mas não de uma maneira uniforme; o máximo de sensibilidade varia de indivíduo para indivíduo, mas situa-se aproximadamente a meio daqueles valores (555 nm, CIE).

Para iluminação fraca, o olho adapta-se "ao escuro", e a sua sensibilidade aumenta bastante. Uma pequena parte dessa alteração é devida a uma expansão da pupila, mas a maior parte deve-se a alterações na retina, que demoram algum tempo a dar-se (1/2 h - 1 h). O olho adaptado a visão nocturna - *visão escotópica* - passa a ter o seu pico de sensibilidade a cerca de 507 nm (CIE), tornando-se esta menor na zona do vermelho.

Este deslocamento da curva de sensibilidade designa-se *por efeito de Purkinje*.

3.2. Método fotográfico

A fotografia foi, a seguir ao olho humano, o método mais antigo de detecção da luz. Baseada na fotosensibilidade de diversas substâncias químicas, desenvolveu-se a

partir de 1827. As emulsões fotográficas actualmente disponíveis podem cobrir sensibilidades espectrais que vão desde os raios X ao infravermelho próximo.

No primeiro tema "O que é a luz", sugeriu-se este método para apresentar evidências em favor de um modelo (também) corpuscular da luz.

O método fotográfico permite medições de intensidade luminosa bastante precisas; contudo, sendo indirecto, encontra-se sujeito a erros se não forem adoptadas diversas precauções. A tendência actual é a de utilizar, cada vez mais, dispositivos fotovoltaicos, mesmo em estudos de astronomia ou espectroscopia em que já foram efectuadas medições fotográficas.

3.3. Células fotoeléctricas

Os primeiros fotodetectores surgiram na sequência da descoberta do efeito fotoeléctrico por Hertz (1887). Em 1902, P. Lenard realizou uma célebre experiência utilizando um dispositivo como o indicado na figura 5.5.

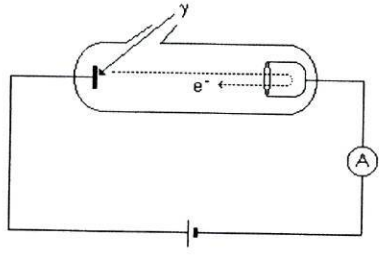


Figura 5.5. Experiência de Lenard

Com o colector ligado ao polo negativo do gerador de tensão variável, os electrões são repelidos, e apenas os mais energéticos conseguem atingi-lo. O amperímetro indicará um valor zero quando o potencial retardador atinge um valor crítico, designado *potencial de paragem*.

Lenard concluiu que o número de fotoelectrões é proporcional à intensidade luminosa, mesmo para intensidades bastante reduzidas (o que poderia ser explicado em termos de Física Clássica). Concluiu ainda que o efeito só se verificava para

determinados pares de frequências luminosas / materiais iluminados (o que já não podia ser explicado).

Este efeito viria a ter diversas aplicações tecnológicas, embora actualmente os fotodetectores deste tipo praticamente já não sejam utilizados.

Na *EXP. 2C*, já referida no primeiro tema, utiliza-se um dispositivo rudimentar baseado no efeito fotoeléctrico.

3.4. Transductores de luz mais utilizados

Existem diversos dispositivos que são utilizados para detectar, ou mesmo medir radiações electromagnéticas. Podemos classificá-los em duas categorias:

- *detectores térmicos*, quando respondem sobretudo à energia térmica da radiação incidente;
- *detectores quânticos*, quando respondem sobretudo à taxa de incidência dos fotões da radiação.

Na primeira categoria incluem-se dispositivos constituídos por um elemento de absorção (geralmente negro de fumo) e detectores propriamente ditos; estes podem ser *termopares*, junções de dois metais ou semicondutores diferentes, capazes de gerar uma d.d.p. e *termistores*, semicondutores que respondem a uma elevação de temperatura através de uma variação da sua resistência eléctrica, entre outros.

Na segunda categoria incluem-se os *fotoemissores*, os *fotocondutores*, as *células fotovoltaicas* e *fotodíodos*.

Os *fotoemissores* contêm uma superfície que absorve fotões incidentes com energia suficiente para permitir a extracção de electrões. Quando estes são simplesmente recebidos pelo cátodo positivo de um tubo onde se fez o vácuo, chamam-se *fotocátodos*; se o sinal for amplificado através de uma emissão electrónica secundária, chamam-se *fotomultiplicadores*. Em *fotocélulas contendo um gás* é possível conseguir o efeito de multiplicação através da excitação de portadores adicionais, por ionização do gás residual.

Estes detectores são bastante sensíveis nas zonas visível e ultravioleta do espectro electromagnético.

Os *fotocondutores* podem ser utilizados no visível e infravermelho: são materiais semicondutores, em que os fotões absorvidos produzem cargas adicionais sob a forma de pares electrão-lacuna.

Tanto as cargas negativas dos electrões, como as cargas positivas das lacunas contribuem para o aumento da condutividade. O CdS e CdSe, por exemplo, são adequados às regiões visível e infravermelho próximo, enquanto que o PbS e PbSe se aplicam ao infravermelho.

Uma *célula fotovoltaica* usa a energia radiante para produzir uma força electromotriz, quando intercalada num circuito. São conhecidas as células de silício (Si) e de selénio (Se). As primeiras cobrem o espectro visível e infravermelho próximo (operando a intensidades entre 10^{-3} e 10^{3} mW cm^{-2}); as segundas vão do infravermelho próximo ao ultravioleta (operando a intensidades de 10^{-1} a 10^{2} mW cm^{-2}).

O detector fotovoltaico mais utilizado é, contudo, o *fotodíodo*, actualmente fabricado em série, com um custo extremamente reduzido. Consiste numa junção entre um semicondutor tipo *p* (rico em portadores de carga positiva) e um semicondutor tipo *n* (rico em portadores de carga negativa). Na zona de junção surge um campo eléctrico interior, como consequência do desequilíbrio de cargas. Quando os fotões são absorvidos na vizinhança da junção, os pares electrão-lacuna são separados por este campo; os electrões são atraídos para a zona *n* e as lacunas para a zona *p*, dando origem a um campo eléctrico externo à junção.

Os fotómetros usados nas máquinas fotográficas e as células solares são aplicações conhecidas dos fotocondutores e células fotovoltaicas.

Por outro lado, as modernas câmaras CCD (*charge-coupled devices*) usam painéis de fotodíodos para a detecção de imagens.

4. Indicações didácticas

O radiómetro de Crookes é um dispositivo simples, normalmente existente nas escolas, que demonstra de forma lúdica e eficaz que a luz transporta energia; contudo, o seu funcionamento tem levado a diversas explicações divergentes que podem confundir os alunos. Uma célula solar pode ser uma boa alternativa {*EXP. 5A*}.

A nível qualitativo, e a propósito do carácter corpuscular da luz, no primeiro tema, foi já sugerida a utilização do método fotográfico e de um dispositivo fotoeléctrico rudimentar.

A nível quantitativo, sugerem-se duas experiências, em que se utilizam, respectivamente, um *método directo* de medição radiométrica e fotométrica, e *um método indirecto* (comparativo):

- A verificação da *lei do inverso dos quadrados da distância*, utilizando uma fonte pontual e um fotodetector adequado. Esta lei poderá também ser demonstrada simplesmente pelo professor, com o auxílio de um retroprojector e um ecrã {*EXP. 5B*}.

- A comparação das intensidades luminosas de duas fontes, utilizando o fotómetro de Bunsen {*EXP. 5C*}. Este, poderá ser simplesmente uma pequena folha de papel branco com uma mancha de gordura translúcida na parte central, ou uma versão mais moderna, com um material fluorescente.

Com o objectivo de comparar a absorção de luz por diferentes materiais transparentes ou semitransparentes, sugere-se ainda uma experiência de aplicação do fotómetro de comparação {*EXP. 5D*} que parece ser adequada como um trabalho prático para Técnicas Laboratoriais de Física.

6. DISPERSÃO DA LUZ. ESPECTROS.

1. Introdução

Este capítulo inicia-se com uma abordagem da dispersão da luz, baseada na sua relação histórica com a explicação do fenómeno do arco-íris. Segue-se uma breve referência aos vários tipos de espectros e suas aplicações.

Estuda-se em seguida o espalhamento (*scattering*) da luz, responsável pela cor azul do céu, entre outros fenómenos.

Por fim, nas indicações didácticas, sugerem-se diversas experiências simples para exploração qualitativa, quer da dispersão, quer do espalhamento da luz.

2. Arco-íris, balões com água e prismas

O arco-íris intrigou o Homem durante muitos séculos. Desde a Antiga Grécia que era observado o fenómeno que ocorre quando a luz atravessa um prisma ou um recipiente esférico transparente com água, e se discutia a sua semelhança com aquele que ocorre na Natureza.

Contudo, os antigos filósofos e os pensadores medievais não associavam o conjunto de cores obtidas directamente à luz, considerada branca na sua forma mais pura; as cores resultavam da adição de diferentes quantidades de "escuridão" à luz.

Refira-se que já em 1235 Grosseteste apontava a refracção numa "nuvem inteira" como explicação para a formação do arco-íris. Seria Roger Bacon, em 1267 o primeiro a compreender o papel de cada gota de água, e a constatar que o Sol, o observador e o centro do arco-íris se encontram alinhados segundo a mesma recta.

Em 1304, Theodoric de Freiburg desenvolveu uma teoria acerca do arco-íris, notavelmente parecida com a actual explicação, utilizando um recipiente esférico cheio de água como modelo de uma gota, para mostrar que existe uma reflexão significativa na sua superfície interior, para além das refracções da luz ao entrar e sair do recipiente (gota).

Este é um dos primeiros exemplos conhecidos de utilização paralela dos métodos da ciência moderna: modelização e experimentação.

Descartes, em 1635, conhecendo já as leis quantitativas da refracção, foi capaz de resolver os aspectos *geométricos* do fenómeno:

- por que razão o arco-íris se limita a um pequeno intervalo angular - os raios emergentes de cada gota tendem a concentrar-se num intervalo angular de θ = 40° a 42° (sendo θ o ângulo entre o raio incidente na gota e o raio emergente);
- por que razão as cores do arco-íris secundário (51°) aparecem em ordem inversa relativamente ao primário - existe uma *segunda* reflexão interna total em cada gota, pelo que o segundo arco-íris corresponde a uma reflexão do primeiro.

Não foi, contudo, capaz de explicar o aparecimento das cores. Esta explicação teria de esperar por Newton, as suas experiências com o prisma óptico e a compreensão do fenómeno da *dispersão da luz*.

Robert Hooke (1635-1703) era um defensor do modelo ondulatório da luz. A sua explicação para o fenómeno que ocorria no arco-íris ou no prisma, tinha a ver com um efeito provocado na luz pelo material (água ou vidro): a frente de onda incidente iria inclinar-se de vários ângulos em relação à direcção do movimento das "partículas do éter". No entanto, esta hipótese não foi por ele testada experimentalmente.

Newton iniciou as suas experiências com o prisma em 1666. Enquanto outros cientistas como Descartes e Hooke centraram as suas observações nas cores, ele preocupou-se com a forma oblonga do espectro [13] obtido; como poderia ser explicada por um único valor do índice de refracção ?

Fazendo passar o feixe de luz através de diferentes zonas do prisma, concluiu que as cores não eram alteradas pela quantidade de material atravessado. Utilizando um segundo prisma invertido em relação ao primeiro, Newton conseguiu recombinar as cores para obter, de novo, luz branca.

[13] Do latim *spectru*, fantasma.

Realizou então a experiência crucial que não ocorrera a Hooke: efectuou orifícios no alvo, de modo a obter luz de uma só cor, que fez passar através de um segundo prisma. Observou que este não modificava cada uma daquelas cores, e que elas eram projectadas em zonas diferentes do écran.

Concluiu assim que "cada cor tem o seu próprio índice de refracção" [14], e que "a luz branca não é mais do que uma mistura de cores nas devidas proporções".

Newton mostrou que este fenómeno de *dispersão* explicava de forma satisfatória a formação do arco-íris (figura 6.1).

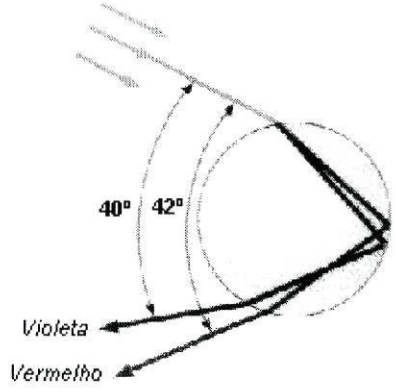


Figura 6.1. Explicação de Newton para as cores do arco-íris
(adaptado de Serway, R. A., Faughn, J. S., 1995)

Um raio de luz branca incide numa gota de água, sofrendo uma primeira refracção; a radiação violeta é a mais desviada e a vermelha a menos desviada. Na parte posterior da gota, a luz é reflectida, e volta a sofrer uma refracção, ao penetrar novamente no ar. Em todo este processo, o ângulo entre o raio incidente e o raio violeta emergente é de 40°, enquanto que para o raio vermelho emergente é de 42°. É esta pequena diferença angular que nos permite ver o arco-íris.

Quando um observador olha para o arco-íris, apenas verá a radiação vermelha proveniente de uma gota situada na sua parte superior, já que é a mais desviada. Analogamente, apenas verá a radiação violeta proveniente de uma gota situada na sua parte inferior, pois é a menos desviada. As cores restantes que chegam ao observador provêm de gotas situadas em posições intermédias.

[14] Para o vidro comum, o índice de refracção da luz violeta é cerca de 1% maior do que o da luz vermelha.

Os seus resultados não foram, então, considerados conclusivos, em especial por Hooke (na altura presidente da Royal Society).

Algumas fontes afirmam que o descontentamento de Newton com as desagradáveis e constantes polémicas com Hooke terá sido responsável pelo adiamento da publicação da sua *Optiks* até 1704, ano seguinte ao da morte daquele. Uma razão mais plausível será talvez o incêndio que, em Fevereiro de 1692, destruiu uma boa parte dos seus documentos contendo anotações de mais de vinte anos de trabalho.

3. Dispersão da luz

A velocidade de propagação de uma onda electromagnética, como a luz, num determinado meio (excepto o vazio), depende da frequência da radiação. É a este fenómeno que se chama *dispersão*.

Um meio em que a velocidade de propagação depende do comprimento de onda, diz-se *dispersivo*. Na *dispersão normal* [15], o índice de refracção diminui progressivamente com o comprimento de onda (figura 6.2).

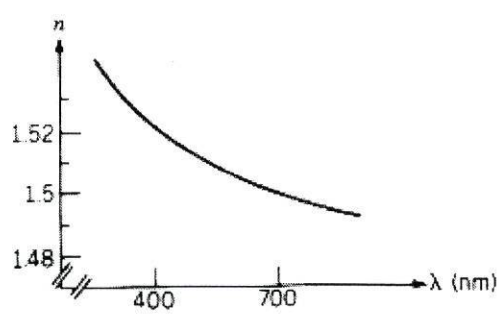


Figura 6.2. Variação do índice de refracção com λ,
para uma determinada variedade de vidro (Benson, H., 1991)

Quando fazemos incidir um feixe de raios paralelos de luz branca num paralelepípedo de vidro, embora exista dispersão, os raios emergentes surgem paralelos entre si e ao feixe incidente. Continuamos assim a ter uma percepção de cor branca.

[15] Para situações em que as frequências das radiações são próximas das frequências de ressonância doa átomos ou moléculas que constituem o meio dispersor, ocorre a chamada *dispersão anómala*, e o índice de refracção aumenta com o comprimento de onda.

No caso de um prisma, os seus lados não paralelos servem para aumentar a separação angular entre as radiações, tornando os raios emergentes não paralelos - cada comprimento de onda tem o seu ângulo de desvio próprio.

Tal como o prisma, a rede de difracção pode ser usada para a obtenção de *espectros*, e efectuar medições precisas de comprimentos de onda. Os espectroscópios (ou espectrómetros) que usam redes de difracção têm maior *resolução*, já que permitem distinguir comprimentos de onda bastante próximos.

4. Espectros

A luz emitida por uma determinada fonte, quando se refracta num meio dispersor, produz um espectro, dito *de emissão*.

Na emissão por incandescência, devido à proximidade das frequências das diversas radiações, obtém-se um espectro contínuo, como o de uma lâmpada de tungsténio. A composição deste depende essencialmente da temperatura do corpo emissor, já que, para cada temperatura existe uma curva característica da irradiância em função da frequência.

Na emissão por luminescência, podem obter-se espectros descontínuos, quer de riscas (espectros atómicos de substâncias no estado gasoso) quer de bandas (espectros moleculares).

Intercalando entre a fonte de emissão (de espectro largo) e o meio dispersor uma determinada substância, obtém-se o seu *espectro de absorção*.

A espectroscopia, quer de emissão, quer de absorção, é actualmente a ferramenta mais eficaz no estudo dos átomos e das moléculas; para isso muito contribuíram físicos como Fraunhöfer (1787-1826), Foucault (1819-1868), Kirchhoff (1824-1887), Bunsen (1811-1899), Huggins (1824-1910) e Rowland (1848-1901). Recorde-se ainda o importante papel que a interpretação dos espectros atómicos teve no desenvolvimento da Teoria Atómica moderna.

Para além da luz visível, conhecem-se hoje muitas outras radiações electromagnéticas, como as ondas de rádio e as microondas, as radiações infravermelha e ultravioleta, os raios X e os raios γ.

A palavra espectro é aplicada, num sentido genérico, ao conjunto de todas estas radiações.

5. Espalhamento (*scattering*) da luz

Entende-se por *espalhamento* da luz a absorção de energia de uma onda incidente por um meio apropriado, seguida da reemissão dessa energia em muitas direcções.

A teoria que explica este fenómeno, intimamente relacionado com a reflexão e a difracção, é bastante complexa, tornando-se mais simples em dois casos-limite:

- quando o meio é formado por partículas de dimensões muito menores do que o comprimento de onda da radiação - *espalhamento de Rayleigh* [16] ;

- quando o meio é formado por partículas de dimensões muito maiores que o comprimento de onda da radiação - *espalhamento de Mie* [17].

No espalhamento de Rayleigh, as radiações de λ mais elevado são menos afectadas do que as radiações de λ baixo, porque as partículas representam obstáculos de dimensões menores do que os comprimentos de onda. Assim, a intensidade da radiação resultante,

$$I_S \propto \frac{1}{\lambda^4} \qquad (6.1)$$

Verifica-se facilmente que esta radiação é parcialmente polarizada, ocorrendo a máxima polarização para um ângulo de 90º com a direcção de propagação, e um mínimo para 180º.

[16] Em homenagem a Lord Rayleigh (John William Strutt, 1824-1919).
[17] Em homenagem a Gustav Mie (1868-1957).

O espalhamento de Rayleigh é responsável, por exemplo, pela cor azul normalmente apresentada pelo céu diurno. A luz do Sol, ao penetrar na atmosfera segundo uma determinada direcção, é dispersa pelas moléculas do ar; na ausência de atmosfera, apenas seria detectada luz, se observada segundo a direcção de incidência. [18]

Este fenómeno afecta sobretudo as frequências mais altas (λ baixo), incluindo o azul. A razão entre as intensidades das radiações azul e vermelha, após espalhamento,

$$\frac{I_S(\text{azul})}{I_S(\text{vermelho})} \approx 5 \text{ a } 6 \qquad (6.2)$$

O observador recebe a radiação resultante, proveniente de múltiplas direcções, e o céu parece-lhe azul.

De igual modo, o fumo que sai do cigarro de um fumador, tem uma coloração azulada, enquanto que o fumo exalado, contendo gotas de água, de dimensões maiores, apresenta uma cor branca.

No espalhamento de Mie, a radiação resultante é essencialmente independente do comprimento de onda, o que justifica a coloração branca do nevoeiro, das nuvens e das partículas interestelares, entre muitos exemplos possíveis. Por outro lado, esta radiação, ao contrário do que se passava no espalhamento de Rayleigh, é não polarizada.

Quando as partículas se encontram dispostas ordenadamente, o que se verifica nos materiais cristalinos, tornam-se espalhadores coerentes, havendo um cancelamento da radiação em todas as direcções, excepto as correspondentes à refracção e reflexão da onda incidente. Quaisquer afastamentos em relação a esta disposição ordenada levam a que também ocorra espalhamento.

[18] As fotografias da Terra, observada a partir da Lua, demonstram claramente que, sem atmosfera, o céu diurno é tão negro como o céu nocturno.

6. Indicações didácticas

Para este tema, sugere-se a repetição, com as devidas adaptações, das experiências de Theodoric de Freiburg {*EXP. 6A*} e Newton {*EXP. 6B*}.

No caso destas últimas, o laser pode desempenhar com vantagem o papel de luz monocromática.

Por outro lado, o estudo dos espectros, mais indicado para alunos do ensino secundário, ajudará a uma melhor compreensão dos mecanismos de produção de luz (segundo tema).

Observando uma lâmpada de incandescência através de um espectroscópio, e fazendo variar a tensão, pode apreciar-se a evolução do seu espectro contínuo {*EXP. 6C*}.

Poderão também ser observados espectros descontínuos, obtidos através de descargas eléctricas em gases rarefeitos, desde que sejam tomadas todas as necessárias precauções de segurança ao utilizar a fonte de tensão adequada {*EXP. 6D*}.

Sugere-se ainda a simulação do fenómeno do espalhamento num tanque com uma suspensão coloidal {*EXP. 6E*}. Esta experiência poderá ainda ser aproveitada, mais tarde, para demonstrar a polarização por dispersão.

7. COR

1. Introdução

A discussão do carácter da cor, distinguindo os seus aspectos fisiológicos, psicológicos e físicos, ocupa uma parte importante deste capítulo.

Discutem-se ainda ideias frequentes dos alunos - e do público em geral - acerca da cor, apresentando-se sugestões didácticas de abordagem deste tema.

2. O carácter da cor

Aristóteles considerava a cor como uma propriedade intrínseca dos corpos, independente da luz com que eram iluminados.

Para os filósofos greco-romanos, a cor (tal como a *lux*) era encarada como uma representação psíquica, uma criação do espírito para representar sinais chegados do mundo exterior através do sentido da visão. Os sonhos demonstravam essa capacidade de criação.

Já no séc. XVII, a observação de fenómenos luminosos, como a difracção e a dispersão, em que a cor intervinha, veio ainda mais aprofundar o seu carácter misterioso.

Kepler, por exemplo, evitou referir-se à cor. De acordo com a opinião dominante na primeira metade deste século, a luz era "branca e sem cor". A luz do Sol era pura e perfeita: quando incidia nos corpos, era colorida por estes.

Por outro lado, Grimaldi pensava que a cor não estava localizada nos corpos, era antes uma modificação da estrutura do *lumen*; chegou a sugerir que era devida a uma vibração transversa relativamente à direcção de propagação da luz.

Quanto a Newton, ele foi bastante preciso ao exprimir o carácter subjectivo da cor, não atribuindo aos raios luminosos uma cor, mas sim "um certo poder e disposição para gerar uma sensação desta ou daquela cor". Apesar disso, os seus seguidores

adulteraram esta ideia [19], passando a considerar a luz, a cor e as imagens, como entidades puramente físicas.

Não é por acaso que, no início do séc. XVIII, Pierre Bouguer (1678-1758) cria a fotometria (medição da luz), e um século depois surge a colorimetria (medição da cor).

A colorimetria mede a chamada *cor objectiva*, propriedade da luz proveniente dos objectos, através do seu espectro cromático.

O conceito mais completo de cor é, contudo, a *cor subjectiva*, pela primeira vez descrita por Goethe, em 1810, no seu *Tratado das Cores*. Esta representa a cor tal como é percepcionada pelo sistema nervoso (incluindo o respectivo órgão sensorial, o olho) e é apenas avaliada qualitativamente, por comparação com um observador-padrão.

Existem cores subjectivas que não são espectrais, como é o caso do castanho ou do magenta, o que destaca bem a diferença entre ambas.

3. Aspectos fisiológicos e psicológicos da cor

O conceito de "luz branca" não é o mesmo para todos os observadores: ele depende da nossa percepção do espectro diurno. Existem muitos pares de feixes luminosos coloridos que provocam uma sensação semelhante de cor branca. De modo idêntico, a sensação de amarelo pode ser provocada por uma radiação pura de λ = 580 nm, ou através de uma combinação das cores verde e vermelha.

Inversamente, uma qualquer cor pode ser percepcionada de modo diferente por observadores diferentes, e, no caso limite, existem indivíduos incapazes de distinguir certas cores (*daltonismo*).

A detecção de cor é feita nos *cones* da retina, os quais podem ser de três tipos, β, γ e ρ, com respostas preferenciais, respectivamente na zona do azul, do verde e do

[19] Como outras, de resto. Aparentemente Newton não defendia o modelo corpuscular da luz do modo intransigente que lhe é atribuído.

vermelho. O nervo óptico envia essa informação ao cérebro, que a interpreta como uma vasta mistura de frequências, normalmente com energias semelhantes.

Contudo, a percepção do mundo exterior não depende apenas do órgão de visão, mas também de aspectos psicológicos ligados ao observador, tais como emoções, motivações, processos adaptativos, etc.

A *cor subjectiva* não é, portanto, apenas uma propriedade da matéria ou da luz, mas uma manifestação electroquímica do sistema sensorial.

4. Aspectos físicos da cor

A explicação da *cor objectiva* está intimamente ligada à decomposição da luz branca.

4.1. Coloração aditiva

No início do século XIX, T. Young mostrou que é possível produzir luz branca sobrepondo três feixes de luz de frequências bastante diferentes.

As cores que constituem esses feixes, designam-se *cores primárias*. Note-se que, embora o vermelho, o verde e o azul sejam as cores primárias mais utilizadas (por exemplo, nos aparelhos de televisão), existem outros conjuntos de cores primárias, que nem sequer têm de ser, necessariamente, monocromáticas.

A adição de feixes luminosos designa-se por coloração *aditiva*.

As combinações possíveis, resultantes da adição de luz vermelha, verde e azul são:

vermelho + azul = magenta

azul + verde = ciano

vermelho + verde = amarelo

Duas cores dizem-se *complementares* quando da sua adição resulta o branco.

Facilmente se verifica que os três pares seguintes são cores complementares:

magenta, verde
ciano, vermelho
amarelo, azul

Uma cor diz-se *saturada* quando não contém nenhuma quantidade de branco. Assim, por exemplo, o rosa é um vermelho pouco saturado, já que tem um fundo branco.

4.2. Coloração subtractiva

A luz branca contém, de um modo equitativo, todas as frequências da região visível do espectro.

Quando um objecto *difusor*, altamente reflector para qualquer frequência, é iluminado com luz branca, parece igualmente branco. Se, pelo contrário, o objecto hipoteticamente absorvesse todas as frequências, apareceria preto.

As cores características da maior parte das substâncias têm a sua origem no fenómeno da *absorção selectiva*. As respectivas moléculas têm ressonâncias na zona do visível, absorvendo apenas determinadas frequências. [20]

Um corante absorve uma gama extensa de frequências; caso contrário, reflectiria a maior parte das frequências, aparecendo quase branco.

As cores dos objectos são, assim, exemplos de coloração *subtractiva*.

Podemos compreender melhor este processo, intercalando *filtros* de várias cores no trajecto da luz branca. É possível obter todas as cores, através de várias combinações de filtros magenta, ciano e amarelo (cores primárias para misturas subtractivas); não é por acaso que são as cores mais importantes numa caixa de tintas e são as cores básicas em fotografia e em impressão.

Note-se que um processo *aditivo* destas três cores produziria, teoricamente o preto.

[20] Por exemplo, a água do mar tem uma tonalidade azul-esverdeada, pois as moléculas de água apresentam uma grande zona de ressonâncias no infravermelho, que se estende um pouco até ao vermelho; a cerca de 30 m de profundidade, a água já absorveu praticamente toda a componente vermelha da luz solar.

4.3. Atributos da cor

O princípio tricromático, que remonta ao séc. XIX, conduziu inicialmente à ideia das três cores primárias. Hoje é habitual definir, alternativamente, três atributos característicos da cor de um objecto, que influenciam a sua percepção: *tonalidade*, *saturação* e *brilho*. Estes são utilizados, de modo generalizado, nos programas informáticos de tratamento de imagens.

A tonalidade está relacionada com o comprimento de onda dominante, enquanto que a saturação traduz a maior ou menor pureza espectral. O brilho tem a ver com a intensidade da luz proveniente do objecto.

5. Algumas ideias dos alunos acerca da cor

Muitas concepções desenvolvidas acerca da cor estão relacionadas com a incapacidade de os alunos distinguirem os aspectos físicos da cor dos aspectos fisiológicos da percepção da cor (Jung, W., 1982, Andersson, B., Kärrqvist, C., 1983 e La Rosa, C., et al.,1984).

Por outro lado, no dia-a-dia, e nas próprias aulas de Educação Visual, a cor surge habitualmente associada à matéria, enquanto no ensino da Física ela surge associada à luz. A percepção quase nunca é levada em linha de conta (Chauvet, F.,1993).

A concepção, tão frequente no quotidiano, de que a cor é uma propriedade dos objectos, encontra a sua raiz no "senso comum", assemelhando-se assim ao primitivo conceito aristotélico. O ensino da Física, colocando a tónica na *cor objectiva*, apenas tem tido o efeito de substituir uma ideia errada por outra bastante incompleta.

Por outro lado, os alunos lidam, em Educação Visual, com a cor de pigmentos, enquanto em Física estudam a cor espectral. Não é surpreendente a confusão que surge entre adição e subtracção de cores.

Alguns exemplos de ideias dos alunos acerca da cor:

- Os objectos são visíveis porque têm uma cor diferente do ambiente do "fundo".
- As cores formam um conjunto de intensidades luminosas, do preto ao branco, que também são cores.
- A cor é puramente uma propriedade de um objecto, e nunca da própria luz.
- A luz ao passar através de vidro colorido é "pintada" pelo vidro.

Sugere-se uma estratégia construtivista de abordagem a este tema, que, em linhas gerais, se apresenta no ponto seguinte (Chauvet, F.,1993).

6. Indicações didácticas

O principal objectivo é permitir que os alunos façam predições e analisem situações, usando a ideia de *cadeia* no processo de informação acerca da cor (figura 7.1.):

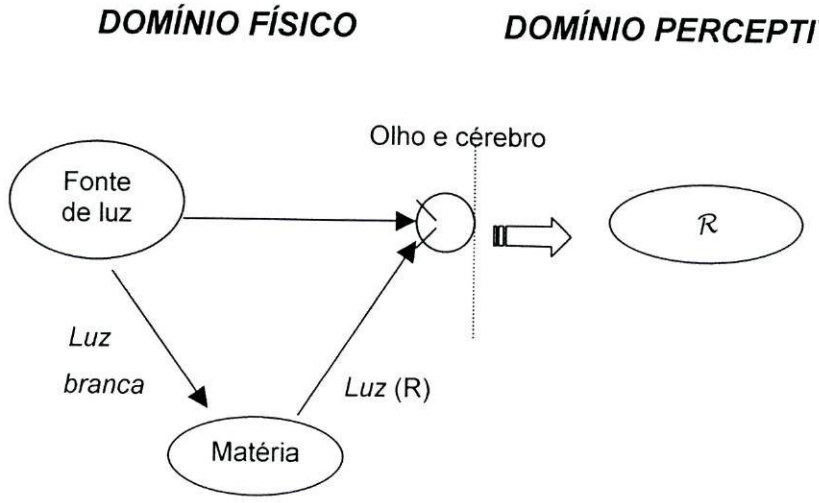


Figura 7.1. Diagrama funcional: a cor
(adaptado de Chauvet, F.,1993)

No domínio físico, a luz com determinada coloração é designada por R e no domínio perceptivo, a sensação de cor é representada por $\mathcal{R}$.

Os aspectos físicos da cor são a entrada da luz no olho e a interacção da matéria com a luz; o resultado desta interacção é luz difusa e uma mudança na composição da luz.

Existe percepção de cor quando o olho detecta uma diferença na composição da luz branca.

A sequência de experiências sugeridas inicia-se com a adição de cores, com a qual é introduzida a ligação entre a composição da luz e a cor percepcionada {*EXP. 7A - 1ª parte*}. Iluminam-se em seguida objectos coloridos com luz de diferentes cores {*EXP. 7A - 2ª parte*}. Finalmente introduz-se o conceito de subtracção usando filtros e pigmentos {*EXP. 7B*}.

Deve ser dada particular atenção a estes dois últimos aspectos, atendendo à sua dificuldade para os alunos.

8. REFLEXÃO DA LUZ

1. Introdução

Aborda-se em seguida a reflexão da luz, particularizando o caso em que esta ocorre nos metais, e distinguindo reflexão especular e difusa.

Efectua-se ainda uma breve discussão de algumas ideias dos alunos acerca deste fenómeno, apresentando-se sugestões didácticas.

2. O fenómeno da reflexão

A reflexão da luz, bem como a lei de igualdade dos ângulos de incidência e de reflexão era já conhecida na Antiguidade. Na obra *Catóptrica*, atribuída a Euclides [21], os aspectos geométricos da reflexão em espelhos planos aparecem descritos de forma detalhada.

Bastante mais tarde, por volta do ano 1000 d. C., Ibn-al Haytan, conhecido entre os latinos por Alhazem, estabeleceria que as direcções de incidência e de reflexão se situam no mesmo plano normal à superfície reflectora, e estenderia as leis da reflexão aos espelhos curvos.

No século XVII, a reflexão da luz não constituía um argumento em favor de nenhuma das teorias acerca da natureza da luz, já que tanto a teoria corpuscular como a teoria ondulatória apresentavam explicações satisfatórias para aquele fenómeno.

As leis da reflexão foram deduzidas de várias formas, partindo de modelos completamente diferentes. Hero de Alexandria utilizou o *principio do caminho mais curto*, Fermat usou o *princípio do tempo mínimo*.

Huygens aplicou o seu princípio: " *cada ponto de uma frente de onda primária constitui uma fonte pontual para ondas secundárias; a posição da frente de onda primária num instante posterior, é determinada pela envolvente de todas essas ondas secundárias, que se propagam com velocidade e frequência iguais às da onda primária.*"

[21] Alguns historiadores defendem a tese de que esta obra tem autoria posterior.

É importante notar que, no séc. XIX, este princípio seria modificado por Fresnel, de modo a adaptá-lo ao fenómeno da *difracção* e Kirchhoff conferir-lhe-ia uma base matemática, relacionando-o com a equação de onda.

Ao nível atómico, podemos aplicar este princípio, imaginando uma onda que incide na superfície de separação de dois meios. Cada átomo, num processo de dispersão, gera uma onda secundária, cujo atraso de fase é determinado pela inclinação da onda incidente.

Estas ondas secundárias interferem construtivamente apenas se o ângulo de incidência for igual ao ângulo de reflexão, $\theta_i = \theta_r$ (figura 8.1.).

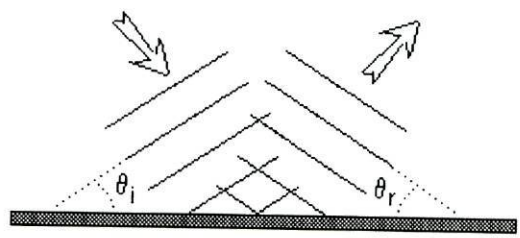


Figura 8.1. Reflexão da luz

Note-se que a presença de um único feixe reflectido só acontece para comprimentos de onda muito maiores do que o espaçamento entre os átomos (≈ 0,1 nm), o que é verdadeiro para a luz visível, mas não, por exemplo, para os raios X; neste caso prevalece o fenómeno de difracção.

3. Reflexão em metais

Para que um material seja transparente a uma determinada radiação, a profundidade de penetração da mesma deve ser grande, quando comparada com a espessura. Os metais, com profundidades de penetração extremamente baixas (≈ 10^{-9} m) são bastante opacos, excepto em películas muito finas [22].

O brilho "metálico" que apresentam, resulta da sua elevada reflectância, já que a onda incidente não consegue neles penetrar.

[22] Os espelhos parcialmente reflectores são uma aplicação importante, que pode ser demonstrada por exemplo, com os óculos de sol espelhados que existem no mercado a preço muito baixo, e que não se recomendam senão para este fim.

Embora os metais sejam essencialmente considerados incolores, já que reflectem quase toda a luz incidente, as diferenças verificadas na prática resultam da maior ou menor absorção de certos comprimentos de onda.

4. Reflexão especular e reflexão difusa

A *reflexão especular* é aquela que se verifica nas superfícies lisas; entende-se como *lisa* uma superfície em que as irregularidades superficiais são pequenas relativamente ao comprimento de onda da radiação incidente.

Na reflexão especular, um feixe incidente de raios paralelos dá origem a um feixe reflectido de raios igualmente paralelos.

A luz reflectida especularmente é sempre parcialmente polarizada, como se pode confirmar, observando a luz reflectida por um espelho através de um polaróide, e rodando-o.

A reflexão *difusa* dá-se quando a superfície não é lisa. As leis da reflexão são, contudo, válidas, em regiões suficientemente pequenas que possam ser consideradas lisas.

Estes dois conceitos representam situações extremas; são comuns exemplos de reflexão parcialmente especular e parcialmente difusa.

5. Algumas ideias dos alunos acerca da reflexão

Estudos com alunos de 13 anos de idade revelaram que a grande maioria reconhece que os corpos brancos reflectem melhor a luz, enquanto os corpos negros a absorvem melhor (Mechlova, E., 1993).

De uma forma geral os alunos conhecem as leis da reflexão. Na verdade, este é o único fenómeno óptico que pode ser facilmente descrito por um simples modelo corpuscular também aplicável macroscopicamente a bolas de bilhar ! É ainda aquele cujas leis foram conhecidas mais cedo na história da ciência...

Contudo, quando se trata de aplicar essas leis em situações concretas, o panorama piora substancialmente.

Por outro lado, existe alguma confusão entre reflexão especular e difusa, particularmente no que respeita à visão (Driver, R., Guesne, E., Tiberghien, A., 1984), como se pode compreender pelas seguintes afirmações de alunos:

- os raios luminosos podem ser vistos a uma certa distância se forem suficientemente fortes, mesmo não interagindo com objectos;
- muitos objectos são visíveis porque reflectem a luz de forma difusa.

6. Indicações didácticas

Ao iniciar o estudo da Óptica Geométrica, é importante esclarecer a noção de raio luminoso, distinguindo-o do feixe muito estreito obtido com uma lâmpada de Reuter e um colimador dotado de uma fenda, com uma "caixa de raios" ou com uma fonte laser.

As leis da reflexão deverão ser verificadas, quer com um espelho plano, quer com espelhos curvos {*EXP. 8A*}. Na impossibilidade de utilizar o disco de Hartl, poderá ser usado papel milimétrico polar, ou simplesmente papel branco e um transferidor.

Os alunos poderão constatar, durante esta experiência, que os raios luminosos só se tornam visíveis se forem rasantes, ou seja, se *interagirem com a matéria* do disco ou folha de papel.

É conveniente realizar ensaios para diversos ângulos de incidência, incluindo a incidência normal (ângulo nulo).

Para observar e comparar as reflexões especular e difusa, torna-se bastante conveniente fazer incidir um feixe de luz num espelho plano, que se polvilha em seguida com pó de giz, observando o efeito provocado na imagem do feixe reflectido obtida num alvo.{*EXP. 8B*}.

9. ESPELHOS

1. Introdução

Neste capítulo é feita uma breve referência histórica à origem dos espelhos, e efectua-se uma classificação dos mesmos.

Discute-se ainda o uso de espelhos esféricos e a aplicação *da aproximação paraxial*, para a qual é válida a equação de Gauss. Analisam-se também as características das imagens dadas pelos espelhos planos e esféricos.

Por fim, exploram-se ideias frequentes dos alunos acerca dos espelhos e imagens por eles formadas e fornecem-se algumas indicações didácticas.

2. Origem dos espelhos

O primeiro *espelho* usado pelo Homem terá sido a água em repouso na Natureza.

A utilização do cobre, iniciada cerca de 3500 a. C., e do bronze, cerca de 2850 a. C., terão levado à construção de espelhos metálicos [23].

Existem referências a espelhos nos livros do Exodus (≈ 1200 a. C.) e de Job (≈ 600 a. C.). Os chineses terão também usado espelhos cerca de 400 a. C.

A palavra espelho tem origem no vocábulo latino *speculu*, que designava uma liga de cobre rica em estanho, introduzida pelos romanos para o fabrico de espelhos.

Desde a Antiga Grécia que são conhecidos, para além dos espelhos planos, os espelhos curvos e as características das suas imagens. Na *Catóptrica*, Euclides aborda quer os espelhos côncavos quer os convexos.

Aristóteles terá usado *espelhos ardentes* para incendiar a frota romana que assediava a cidade de Siracusa, concentrando os raios do Sol.

Os espelhos metálicos foram utilizados até cerca do séc. XIX, dadas as dificuldades técnicas de deposição de uma camada brilhante sobre a face do espelho de vidro.

[23] O espelho mais antigo que chegou até nós em perfeitas condições, foi encontrado no Egipto, e data do séc. XIX a. C.

Foucault aperfeiçoou a técnica de construção de espelhos com base de vidro, em 1858.

Os espelhos planos podem ser de dois tipos, de acordo com a face onde o revestimento é efectuado: *espelhos de superfície frontal*, utilizados em diversas aplicações técnicas, e *espelhos de segunda superfície*, mais comuns, dado que, deste modo, o vidro protege a camada reflectora.

Actualmente, o revestimento mais utilizado nestes últimos é o alumínio, em vez da prata preferida no passado. Este revestimento pode ser protegido com a deposição adicional de monóxido de silício ou fluoreto de magnésio.

3. Tipos de espelhos

Um feixe de raios paralelos, ao incidir num espelho plano, é transformado num feixe reflectido de raios também paralelos.

Num espelho côncavo, o feixe reflectido converge, o que leva a que estes espelhos sejam muitas vezes designados por *convergentes*. Analogamente, num espelho convexo, o feixe reflectido diverge, o que justifica a designação de espelhos *divergentes*.

No caso de um espelho parabólico côncavo, a convergência dos raios reflectidos dá-se num único ponto - o foco *real* do espelho. (Se se tratar de um espelho parabólico convexo, são os prolongamentos dos raios reflectidos que convergem num foco *virtual*).

Atendendo ao *princípio de reversibilidade do raio luminoso*, podemos concluir que uma fonte pontual colocada no foco de um espelho parabólico côncavo, dará origem a um feixe de raios paralelos.

Estas características únicas tornam os espelhos parabólicos ideais para inúmeras aplicações: holofotes, emissores de microondas, espelhos de telescópios ópticos, antenas radiotelescópicas, antenas de telecomunicações, etc. [24]

[24] Existem outros tipos de espelhos *asféricos* com interesse, como os hiperbolóides e elipsóides, usados na construção de telescópios dos tipos, respectivamente, de Cassegrain e Gregoriano.

Infelizmente, o custo de produção de espelhos deste tipo com elevada qualidade, é muito alto. Usam-se então espelhos esféricos, muito mais baratos e fáceis de fabricar.

4. Aproximação paraxial

A equação de uma parábola, com o vértice na origem e o foco a uma distância *f*, é, como se sabe

$$y^2 = 4 f x \qquad (9.1)$$

ou, resolvendo em ordem a *x*,

$$x = \frac{y^2}{4 f} \qquad (9.2)$$

Por outro lado, uma secção circular de uma esfera de raio *R*, centrada na origem, pode ser traduzida por

$$y^2 - 2 R x + x^2 = 0 \qquad (9.3)$$

Resolvendo em ordem a *x*, e desenvolvendo em série binomial, para $x < R$, obtém-se

$$x = \frac{y^2}{2R} + \frac{y^4}{8R^3} + \frac{y^6}{16R^5} + \ldots \qquad (9.4)$$

Comparando a equação (9.4) com (9.2) constata-se que apenas se tornam equivalentes, se puderem ser desprezados todos os termos excepto o de 1ª ordem. É o que acontece para $y << R$, ou seja, na *região paraxial* (próxima do eixo do espelho), sendo então $R = 2 f$.

A utilização de espelhos esféricos para obter imagens de objectos extensos conduz normalmente ao aparecimento de *aberrações*, devido aos termos de ordem superior, que deixam de ser desprezáveis.

5. Imagens dadas pelos espelhos

5.1. Espelho plano

As imagens dadas por um espelho plano são virtuais, direitas e do mesmo tamanho que o objecto.

A reflexão num espelho plano *aparenta* inverter a direita com a esquerda. Na realidade, este efeito é mais uma "perversão" do que uma inversão, já que resulta da diferente posição do observador face ao objecto e à sua imagem.

A única simetria que se verifica entre a imagem e o objecto é na direcção perpendicular ao espelho (eixo dos zz'), como se pode facilmente verificar na figura 9.1.:

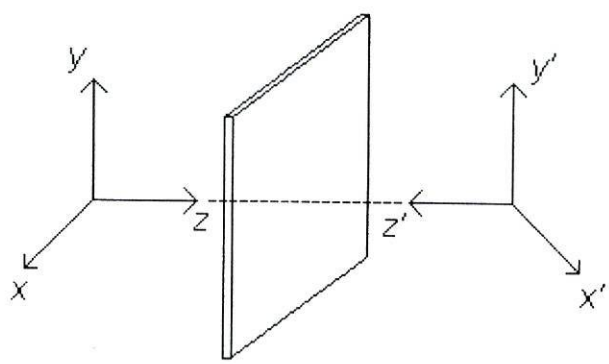


Figura 9.1. Reflexão num espelho plano

5.2. Espelhos esféricos

As imagens dadas pelos espelhos esféricos, na aproximação paraxial, localizam-se facilmente através de construções geométricas simples, utilizando quaisquer dois dos seguintes raios luminosos (ditos *principais*):

- Um raio cuja direcção coincide com um raio de curvatura do espelho, segue o caminho inverso, após reflexão.
- Um raio paralelo ao eixo do espelho, passa no foco, após reflexão.
- Um raio que passe no foco, torna-se paralelo ao eixo, após reflexão.
- Um raio incidente no centro do espelho faz o mesmo ângulo com o espelho, após reflexão.

As imagens dadas por um espelho convexo são sempre virtuais, direitas e menores do que o objecto.

No caso de um espelho côncavo, as características das imagens dependem da localização do objecto relativamente ao espelho. Assim, um objecto situado além da dupla distância focal produz uma imagem real, invertida e menor do que o objecto; colocando este na dupla distância focal a imagem mantém as características mas o seu tamanho torna-se igual ao do objecto; com este entre o foco e a dupla distância focal, a imagem torna-se maior do que o objecto; passando o foco, onde as características são indeterminadas (dado que a imagem se forma no infinito), a imagem passa então a ser virtual, direita e maior do que o objecto.

Para um estudo quantitativo dos espelhos, é muito útil a equação de Gauss,

$$\frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} = \frac{1}{f} \qquad (9.5)$$

deduzida para a aproximação paraxial, e que implica a seguinte convenção de sinais:

s_o , s_i e f são positivas (reais) à esquerda, e negativas (virtuais) à direita do espelho, considerando que a luz vem da esquerda.

A partir desta equação, introduzindo x_o e x_i, distâncias medidas a partir dos pontos focais, deduz-se facilmente a equação de Newton:

$$x_o \, x_i = f^2 \qquad (9.6)$$

Pode definir-se ainda a ampliação transversa (ou linear) como

$$M_T = \frac{y_i}{y_o} = -\frac{s_i}{s_o} \qquad (9.7)$$

em que y_i e y_o são as dimensões transversas da imagem e do objecto.

Se $M_T > 0$, a imagem é direita; se $M_T < 0$, é invertida. Se $|M_T| > 1$, a imagem é ampliada; se $|M_T| < 1$, é reduzida.

De notar a semelhança de características entre um espelho côncavo e uma lente convexa, e entre um espelho convexo e uma lente côncava, o que se justifica por razões geométricas.

6. Algumas ideias dos alunos acerca dos espelhos

Resumem-se a seguir algumas concepções frequentes de alunos dos 15 aos 18 anos (Verkerk, G., Bouwens, R. E. A., 1993):

- A posição da imagem é na superfície do espelho plano, atrás da superfície é impossível.
- Longe de um espelho plano podemos ver uma parte maior do nosso corpo do que muito perto dele.
- Num espelho plano só se podem ver os objectos situados em frente a ele.

Estes investigadores realçam o facto de que a formação de imagens é um assunto abstracto e difícil de explicar. Insistem na importância de destacar que **todos** os raios que partem de um ponto-objecto contribuem para a formação da respectiva imagem e não apenas alguns (por exemplo os raios *principais*, usados na construção geométrica das imagens).

Parece ser muito comum entre os alunos a ideia de uma espécie de "imagem viajante", que parte do objecto e chega à imagem (e ao olho), em bloco, segundo as leis da perspectiva (figura 9.2.).

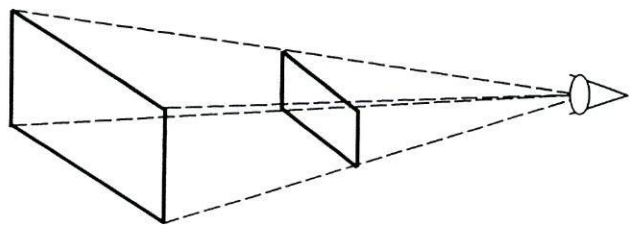


Figura 9.2. A concepção da "imagem viajante"
(adaptado de Verkerk, G., Bouwens, R. E. A., 1993)

Esta concepção é notavelmente parecida com a *eidola* dos antigos gregos ou com as *espécies* da Idade Média, que se moviam ao longo dos raios visuais, contraindo-se progressivamente para entrar na pupila e transportando consigo a forma e cor dos objectos de que provinham.

Por outro lado, a explicação dos físicos para as imagens virtuais - a luz proveniente de um objecto O atinge o olho, após reflexão no espelho, exactamente como se viesse em linha recta de um objecto O', simétrico de O relativamente ao plano do espelho - está seguramente para além da compreensão da maioria dos alunos do ensino básico.

Acrescente-se a notória dificuldade que alunos de 13 anos demonstram em distinguir imagens reais de imagens virtuais (Mechlova, E., 1993).

7. Indicações didácticas

O estudo dos espelhos deve ser iniciado pela observação das trajectórias dos raios reflectidos, que ajudará a compreender a diferença entre espelhos convergentes e divergentes {*EXP. 9A*}.

A localização da imagem atrás de um espelho plano pode ser evidenciada, de forma bastante motivadora, através de uma ilusão, utilizando um vidro, em vez de um espelho, e duas velas {*EXP. 9B*}.

De um modo sistemático e mais rigoroso, o uso de alfinetes, em conjunto com a técnica de não-paralaxe, permite igualmente a localização de imagens, com a vantagem de as experiências poderem ser realizadas pelos alunos, sem necessidade de obscurecer a sala {*EXP. 9C*}.

A multiplicidade de imagens dadas por dois espelhos planos pode ser demonstrada, de forma qualitativa, a alunos do ensino básico. A dedução da relação quantitativa parece ser mais adequada para alunos do ensino secundário {*EXP. 9D*}.

A abordagem às características das imagens dadas pelos espelhos pode ser feita vantajosamente de forma experimental, num banco de óptica, em vez da simples apresentação de uma tabela {*EXP. 9E*}.

Existem ainda inúmeras experiências quantitativas que se podem realizar com espelhos curvos.

Relativamente aos espelhos côncavos, a forma mais simples de determinar a sua distância focal, consiste em localizar directamente o foco, utilizando um objecto distante {*EXP. 9F*}; este método é perfeitamente adequado para alunos do ensino básico.

Se se dispuser de um esferómetro, pode também determinar-se a distância focal através do raio de curvatura, de forma bastante expedita, embora mais aconselhável para Técnicas Laboratoriais de Física {*EXP. 9G*}.

Os métodos de coincidência da imagem e objecto {*EXP. 9H*} e dos focos conjugados {*EXP. 9I*}, quer com recurso ao banco de óptica, quer utilizando alfinetes e a técnica de nâo-paralaxe, são aconselháveis apenas para alunos do ensino secundário.

A verificação da equação de Newton para um espelho convergente, embora não pareça ser muito importante, pode ser feita também utilizando alfinetes e a técnica de não-paralaxe {*EXP. 9J*}.

No que respeita aos espelhos convexos, o esferómetro pode igualmente ser utilizado para determinar a sua distância focal {*EXP. 9K*}. Outros métodos propõem uma lente convexa auxiliar {*EXP. 9L*}, ou um espelho plano auxiliar {*EXP. 9M*}.

De notar que a chamada "óptica de alfinetes" só resulta bem se estes se encontrarem convenientemente iluminados. Possivelmente uma boa ideia seria substituir os alfinetes por pequenos LED. Apesar de não testada, fica como sugestão para uma futura investigação.

10. REFRACÇÃO DA LUZ

1. Introdução

Uma breve introdução histórica enquadra a dedução da lei de Snell-Descartes através da aplicação do princípio de Fermat.

Define-se índice de refracção, destacando a sua dependência da frequência luminosa e explicam-se alguns fenómenos atmosféricos com base na refracção. Define-se ainda índice de refracção relativo.

Finalmente, são abordadas ideias frequentes dos alunos acerca da refracção, e fornecidas indicações didácticas.

2. O fenómeno da refracção

Platão, na sua *República*, menciona o "quebrar" aparente de objectos parcialmente imersos em água, o que mostra que o fenómeno da refracção atrai a atenção do Homem desde a Antiguidade. Também na *Catóptrica*, de Euclides, podemos encontrar a descrição de uma experiência de refracção. A experiência consistia em fazer passar um feixe de luz solar através de uma abertura estreita, de modo a incidir na superfície da água contida num recipiente de vidro, permitindo assim observar o que se passava no fundo.

Mais tarde, Cleomedes (50 d. C.) e Cláudio Ptolomeu (130 d. C.) estudaram igualmente este fenómeno, tendo este último elaborado tabelas de correspondência de ângulos de incidência e refracção, para vários meios.

Na *Maggia Naturalis*, de Della Porta (1558), podem encontrar-se descrições curiosas - e bastante imprecisas - da refracção e do modo como a observamos. São exemplos: "um objecto mergulhado dentro de um meio mais denso que o ar, visto perpendicularmente, entra direito; mas, se visto obliquamente, desvia-se da perpendicular" ou ainda "quando a imagem refractada de um objecto chega ao olho, não é vista no seu lugar".

Estas descrições, onde se encontra implícita uma concepção de imagem que "viaja" até ao olho, podendo até ter diferentes percursos consoante o local em que se

encontra o observador, poderiam ter sido escritas por um aluno do ensino básico nos nossos dias...

Kepler (1611), na sequência dos trabalhos de Witelo (séc. XIII) e Della Porta, procurou encontrar as leis da refracção, mas apenas chegou a uma aproximação para pequenos ângulos [25] , na qual os ângulos de incidência e refracção são proporcionais, e que, aliás, Ptolomeu já conhecia.

A expressão matemática da lei da refracção parece ser da autoria de W. Snell [26] (1621), embora tenha sido Descartes (1637) a formulá-la em termos de senos, tal como hoje nos é familiar.

Fermat (1657), desconfiando dessa formulação, efectuou a análise do fenómeno da refracção com o seu *princípio do tempo mínimo*, acabando, para sua própria surpresa (e contrariedade), por confirmar o resultado de Descartes.

3. Leis da refracção

Consideremos um raio luminoso SO que incide na superfície de separação de dois meios 1 e 2, e OP o respectivo raio refractado (figura 10.1.). Estes raios encontram-se no mesmo plano normal à superfície.

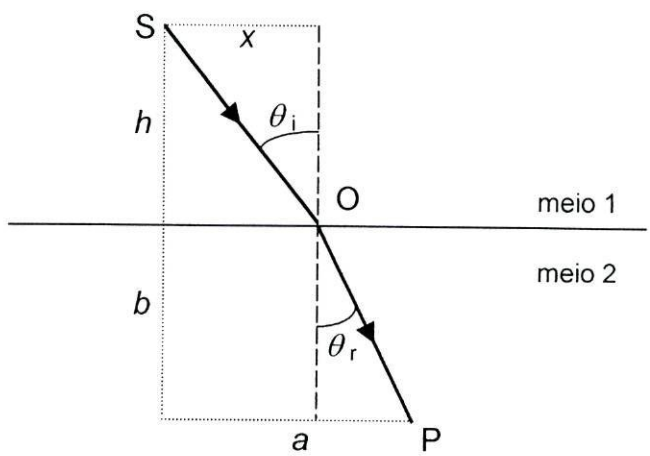


Figura 10.1. Refracção da luz

O tempo *t* que a luz demora a propagar-se de S a P é dado por:

[25] Para um ângulo de 10º (0,12 rad) o erro é de cerca de 1%, se *n* for pequeno.
[26] Embora esta seja a forma mais frequente como o seu nome se encontra referido, deveria escrever-se preferencialmente Snel, devido à sua origem holandesa.

$$t = \frac{\overline{SO}}{v_1} + \frac{\overline{OP}}{v_2} \qquad (10.1)$$

sendo v_1 e v_2 as velocidades de propagação nos meios 1 e 2.

Substituindo, vem

$$t = \frac{(h^2 + x^2)^{\frac{1}{2}}}{v_1} + \frac{\left[b^2 + (a-x)^2\right]^{\frac{1}{2}}}{v_2} \qquad (10.2)$$

O tempo t será minimizado (relativamente a variações de x) quando $dt/dx = 0$, isto é,

$$\frac{dt}{dx} = \frac{x}{v_1(h^2 + x^2)^{\frac{1}{2}}} + \frac{-(a-x)}{v_2\left[b^2 + (a-x)^2\right]^{\frac{1}{2}}} = 0 \qquad (10.3)$$

Aplicando a definição de seno de um ângulo, e observando a figura, podemos finalmente escrever

$$\frac{\text{sen } \theta_1}{v_1} = \frac{\text{sen}\,\theta_2}{v_2} \qquad (10.4)$$

Esta não é mais do que a expressão algébrica da lei de Snell-Descartes, se atendermos à definição de índice de refracção (absoluto) n_i :

$$n_i = \frac{c}{v_i} \qquad (10.5)$$

Como o índice de refracção depende da frequência (dispersão), os valores tabelados de índices de refracção [27], devem ser referidos ao mesmo λ, normalmente correspondente à risca amarela D do sódio (λ = 589,3 nm) [28].

Note-se que, quando a luz se propaga de um meio óptico para outro, a sua frequência não varia, como um simples princípio de continuidade leva a reconhecer: se isso não acontecesse, teríamos ou um "empilhamento" de frentes de onda na fronteira ou uma situação de criação ou destruição de frentes de onda.

[27] Por definição, o índice de refracção do vazio é 1. Para o caso do ar, a 101325 Pa e 293 K, é 1,0003.
[28] Na realidade, esta risca é um doblete (589,0 e 589,6 nm), pelo que o valor indicado é uma média.

Assim, como, em cada meio óptico homogéneo e isótropo é sempre válida a relação

$$v = \lambda \nu \qquad (10.6)$$

a variação de velocidade de propagação terá de afectar o comprimento de onda (figura 10.2.):

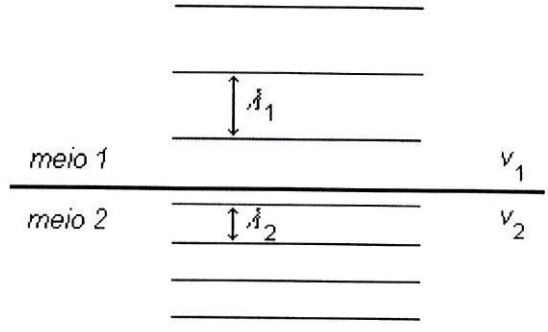


Figura 10.2. Quando a onda se propaga do meio 1 para o meio 2, de maior índice de refracção, dado que v diminui, λ diminui também. A frequência mantém-se constante.

4. Fenómenos atmosféricos

Quando a luz solar atravessa camadas atmosféricas de índice de refracção sucessivamente maior, a sua trajectória aproxima-se da normal, de modo progressivo (figura 10.3.).

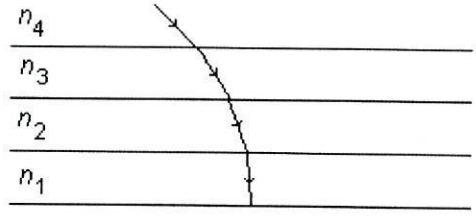


Figura 10.3. Refracção da luz através de camadas atmosféricas de n crescente

Quando a variação do índice é contínua, a trajectória torna-se uma linha curva. Assim, a luz, num meio não homogéneo, não se propaga em linha recta.

Isto explica fenómenos atmosféricos como as miragens (figura 10.4.) que ocorrem em dias quentes, devido à variação do índice de refracção do ar, que tem um valor mínimo junto ao solo.

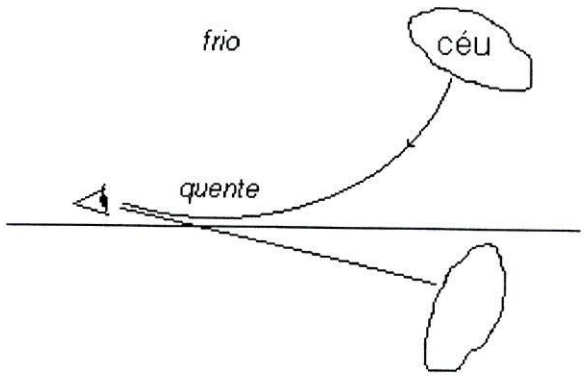


Figura 10.4. Miragem, apenas uma imagem do céu

No pôr-do-sol, podermos ver aquele astro mesmo depois de se encontrar abaixo da linha do horizonte, devido à variação do índice de refracção da atmosfera com a altitude (figura 10.5.):

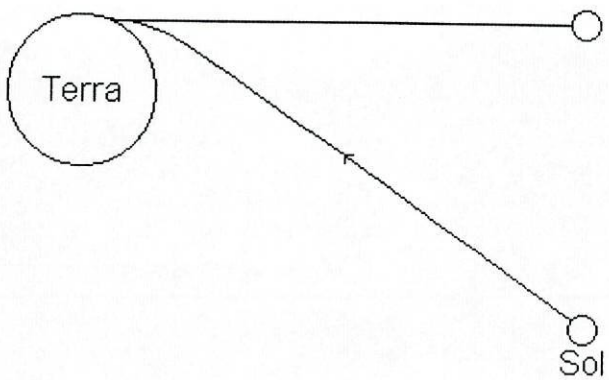


Figura 10.5. Refracção da luz solar durante o pôr-do-sol

5. Índice de refracção relativo

Da expressão habitual da lei de Snell-Descartes,

$$n_1 \text{ sen } \theta_1 = n_2 \text{ sen } \theta_2 \qquad (10.7)$$

resulta a definição de índice de refracção relativo entre dois meios 1 e 2, razão entre os índices de refracção absolutos:

$$n_{2,1} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\text{sen}\,\theta_1}{\text{sen}\,\theta_2} \qquad (10.8)$$

6. Algumas ideias dos alunos acerca da refracção

Alunos de 11 anos, interrogados sobre a causa de um lápis, mergulhado na água contida num gobelé, parecer "quebrado", apresentaram as seguintes respostas-tipo:

- a água faz com que ele pareça partido;
- a água dobra os raios de luz;
- a forma do gobelé faz com que o lápis pareça partido;
- a combinação da água e gobelé fazem o lápis parecer maior.

Alguns alunos eram de opinião que a água actuava como uma lupa e outros relacionavam a sua resposta com os raios luminosos (Shapiro, B. L., 1989).

Num outro estudo, realizado com alunos de 13 anos, verificou-se que, de uma forma geral, estes eram capazes de usar as leis da refracção ao resolver problemas do dia-a-dia. Reconheciam com facilidade a trajectória dos raios luminosos para a refracção perpendicular, mas o ângulo de refracção para outros casos era apenas reconhecido por menos de metade dos alunos (Mechlova, E., 1993).

7. Indicações didácticas

O conceito de "seno" é fundamental para a abordagem quantitativa da refracção da luz, excepto na aproximação para pequenos ângulos.

Assim, recomenda-se que, ao nível do ensino básico, seja feito apenas um tratamento qualitativo; a aproximação para pequenos ângulos, levando a uma simples proporcionalidade entre os ângulos de incidência e de refracção, poderá ser uma abordagem adequada, salvaguardando a possibilidade de os alunos efectuarem uma generalização errada.

Para verificar as leis da refracção, recomenda-se a utilização de um semi-cilindro de vidro (de modo a eliminar o segundo desvio à saída do vidro), e um disco de Hartl, ou, em alternativa, papel milimétrico polar ou uma folha de papel branco e um transferidor {*EXP. 10A*}.

A importância do índice de refracção pode ser evidenciada mergulhando um objecto de vidro num líquido com índice de refracção idêntico ao do vidro {*EXP. 10B*}; verifica-se que o objecto se torna invisível, já que não existem reflexões na interface com o meio líquido.

Existem inúmeros métodos e técnicas para determinar índices de refracção, adequados ao ensino secundário.

A utilização de um espelho côncavo e alfinetes, com a técnica de não-paralaxe, é bastante simples {*EXP. 10C*}. O método da profundidade aparente, com recurso a uma câmara de vídeo, é uma alternativa mais sofisticada, que pode ser aplicada quer a sólidos, quer a líquidos transparentes {*EXP. 10D*}. Ambos usam a aproximação para pequenos ângulos.

A utilização de uma lente convexa e um espelho plano é também uma possibilidade, embora de difícil execução {*EXP. 10E*}.

Recomenda-se o uso de uma lâmina de faces paralelas com alfinetes, pela facilidade de execução na sala de aula, e sobretudo porque é o método que dá aos alunos uma ideia mais intuitiva do fenómeno da refracção {*EXP. 10F*}. A utilização de um prisma óptico revela-se bastante difícil para os alunos, que têm problemas na obtenção da posição de *desvio mínimo* {*EXP. 10G*}.

Um método bastante rigoroso é o de Searle, que recorre a uma célula de ar, mergulhada no líquido em estudo; a maior dificuldade é a construção da célula, de paredes finas e transparentes, hermeticamente fechada {*EXP. 10H*}.

Finalmente, refira-se a utilização do refractómetro de Abbe, que permite a obtenção de valores extremamente precisos {*EXP. 10I*}.

As três últimas experiências são talvez mais adequadas para uma área como Técnicas Laboratoriais de Física.

11. REFLEXÃO INTERNA TOTAL

1. Introdução

Segue-se uma análise do fenómeno da reflexão interna total, bem como uma referência às suas principais aplicações; é mencionada ainda a chamada reflexão interna total frustrada.

Finalmente são fornecidas algumas indicações didácticas, em especial no que se refere a experiências demonstrativas que ilustram este fenómeno.

2. Reflexão interna total

Quando um feixe luminoso incide na superfície de separação de dois meios transparentes, com índices de refracção n_1 e n_2, sendo $n_2 > n_1$, verifica-se simultaneamente uma refracção e uma reflexão, para pequenos ângulos de incidência (figura 11.1).

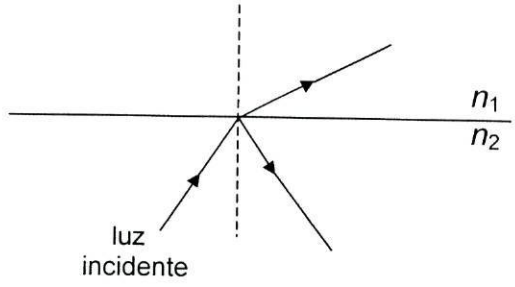


Figura 11.1. Refracção e reflexão simultâneas

À medida que o ângulo de incidência aumenta, atinge-se um valor crítico θ_c, para o qual o raio refractado emerge paralelamente à superfície de separação (figura 11.2).

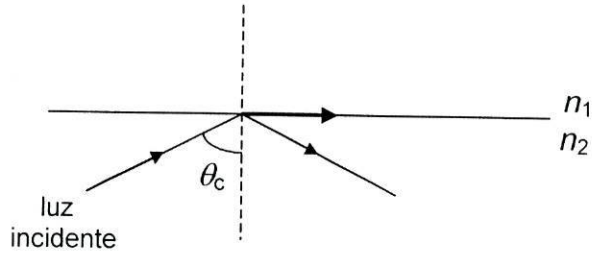


Figura 11.2. Reflexão total

Para ângulos de incidência superiores a θ_c, a luz é totalmente reflectida, no interior do meio de maior índice de refracção.

Este fenómeno, designado *reflexão interna total* foi descoberto por Kepler, em 1604.

O valor do ângulo crítico, obtém-se facilmente a partir da lei de Snell-Descartes,

$$\frac{\operatorname{sen}\theta_2}{\operatorname{sen}\theta_1} = \frac{n_1}{n_2} \qquad (11.1)$$

fazendo $\theta_2 = \theta_c$ e $\theta_1 = 90\ ^\circ$:

$$\operatorname{sen}\theta_c = \frac{n_1}{n_2} \qquad (11.2)$$

O valor do ângulo crítico, da água para o ar, é de 48,5 °.

3. Aplicações da reflexão total

Os prismas ópticos [29] de 45 ° reproduzem o fenómeno de reflexão total, quando a luz incide numa das duas faces perpendiculares (figura 11.3):

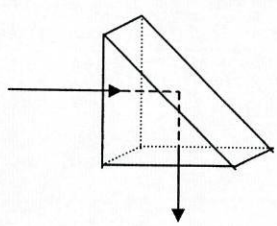


Figura 11.3. Reflexão total num prisma

Se o prisma for de vidro (com $n \approx 1{,}5$), ocorre reflexão total quando o ângulo de incidência na face posterior é superior ao ângulo crítico (cerca de 42 °), tal como na situação da figura.

Dado que a sua eficiência é de quase 100%, os prismas de reflexão substituem com vantagem os espelhos metálicos, em muitas situações.

O vidro, e certos plásticos, podem ser usados para fabricar fibras delgadas, com diâmetros entre 5 μm e 1 mm - as *fibras ópticas*. Se um raio luminoso entrar por uma das extremidades da fibra segundo um ângulo conveniente, sofrerá reflexões internas totais sucessivas, percorrendo todo o seu comprimento, sem grandes perdas.

[29] Existe uma grande variedade de prismas, capazes de orientar ou desviar o feixe luminoso de forma adequada a um determinado fim (Hecht, E., 1991, *pág.174-180*).

Para uma fibra de comprimento L e diâmetro D, cujo índice de refracção seja n_f, um raio luminoso que incida segundo um ângulo θ_i, sofrerá um número total de reflexões dado por:

$$N = \frac{L \operatorname{sen}\theta_i}{D\,(n_f^2 - \operatorname{sen}^2\theta_i)^{\frac{1}{2}}} \pm 1 \qquad (11.3)$$

arredondado ao inteiro mais próximo. (O factor ±1 depende do ponto de incidência e deixa de ter significado quando N é elevado, o que geralmente acontece [30]).

As fibras ópticas começaram a ser fabricadas em 1953, embora haja referência, na literatura, a "guias de luz", desde há mais de 100 anos. Têm largas aplicações em Medicina (endoscopia) e sobretudo na área das comunicações a distância.

Com efeito, assiste-se actualmente a uma verdadeira revolução no mundo das telecomunicações, para a qual muito contribui a utilização de fibras ópticas. A energia radiante, de frequências muito mais elevadas do que os sinais eléctricos, propagando-se ao longo de fibras, permite aumentar significativamente a capacidade de manipular informação. A actual tecnologia, que ainda não atingiu o limite teórico, permite transmitir 40 000 conversas telefónicas simultâneas através de apenas um par de fibras de vidro !

Além disso, as perdas de potência, devidas à atenuação do sinal durante a propagação, são muito menores nas fibras ópticas do que nos vulgares condutores de cobre. A distância máxima entre regeneradores, que para as primeiras fibras ópticas era bastante reduzida, tem vindo a aumentar significativamente, sendo actualmente utilizada uma distância de 50 km.

4. Reflexão interna total frustrada

Se posicionarmos dois prismas do modo a seguir indicado (figura 11.4), e preenchermos o espaço entre as duas faces encostadas com uma fina camada de

[30] O número de reflexões atinge normalmente as centenas, por cada centímetro de comprimento da fibra.

uma substância transparente de baixo índice de refracção, observa-se que uma parte do feixe incidente é transmitida, enquanto outra é reflectida (figura 11.4).

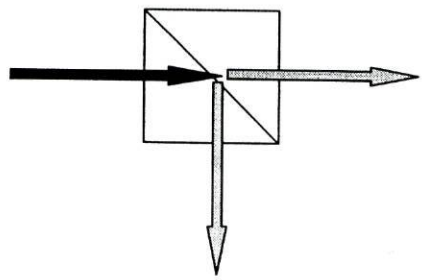


Figura 11.4. Reflexão interna total frustrada

Este processo designa-se por *reflexão interna total frustrada*, apresentando semelhanças com o *efeito de túnel* da Mecânica Quântica, já que a energia da onda incidente pode ser transmitida através de um intervalo no meio de propagação.

Para além dos espelhos semi-reflectores, já anteriormente referidos, existem outros *divisores de feixe*, que se baseiam na reflexão interna total frustrada.

Podemos observar este fenómeno no quotidiano, quando seguramos com a mão um copo cheio de água: conseguimos ver as nossas impressões digitais em zonas que normalmente se comportariam como espelhos, devido à reflexão total.

5. Indicações didácticas

O estudo do fenómeno da reflexão total pode ser um óptimo pretexto para uma abordagem global dos fenómenos da reflexão e refracção da luz, que normalmente não é feita. Para além de se aperceberem da complementaridade destes dois fenómenos, os alunos compreenderão facilmente que um simples modelo mecânico não seria capaz de explicar a sua ocorrência em simultâneo.

O aparelho de Silbermann, também conhecido por tanque de Nakamura, permite observar a reflexão interna total, na passagem de um feixe luminoso da água (ou outro líquido transparente) para o ar, e determinar o valor do ângulo crítico. Embora não se encontre normalmente disponível nas empresas de material didáctico nacionais, pode ser reproduzido em acrílico {*EXP. 11A*}.

Este fenómeno é também convenientemente observado com um prisma de reflexão total, o qual pode ser explorado nas posições de prisma de Amici e de prisma de Porro {*EXP. 11B*}.

É ainda interessante observar a reflexão total numa vareta de vidro, numa fibra óptica, numa pilha de lamelas de microscópio, ou num fio de água que escorre de uma garrafa de plástico {*EXP. 11C*}.

12. LENTES

1. Introdução

Este capítulo inicia-se com uma síntese dos principais factos históricos relacionados com o tema. Procura-se depois definir e classificar sumariamente as lentes. Apresentam-se em seguida as equações mais relevantes para o seu estudo, bem como as características das imagens formadas.

Finalmente, discutem-se ideias frequentes dos alunos acerca da formação destas imagens e apresentam-se sugestões didácticas, incluindo uma grande variedade de experiências, cobrindo diferentes finalidades e níveis de desenvolvimento.

2. Lentes

As primeiras referências históricas às lentes, datam da Antiga Grécia. Numa comédia de Aristófanes (423 a. C.), por exemplo, um personagem sugere a utilização de um "vidro ardente" para queimar um documento.

Também Séneca, filósofo romano (3 a. C. - 65 d. C.), menciona o uso de um globo de vidro cheio de água como instrumento de ampliação. Por sua vez, Plínio (23 - - 79 d. C.) refere-se igualmente aos "vidros ardentes" que os romanos utilizavam para desencadear o fogo e, entre os achados arqueológicos da época, contam-se esferas de vidro e de cristal, e até uma lente plano-convexa.

A refracção através de um globo de vidro cheio de água viria a ser estudada mais tarde por Della Porta [31] e Kepler. Este, através de observações atentas dos raios emergentes, viria a introduzir a noção de *diafragma*, abrindo caminho a uma interpretação do funcionamento da pupila do olho.

A ideia da utilização de lentes para compensar os defeitos de visão surgiria muito mais tarde, sendo atribuída normalmente a Roger Bacon (1215-1229). As primeiras associações de lentes dever-se-ão a Della Porta, que, em 1589, na sua *Magia Naturalis*, apresentou um estudo bastante completo envolvendo lentes convexas e côncavas.

[31] No seu trabalho *De telescopio*, não publicado.

As lentes viriam a ter um papel determinante no avanço da ciência, com a construção, no séc. XVII, do primeiro telescópio e do primeiro microscópio, que abriram as portas, respectivamente, ao estudo do Universo e do mundo microscópico.

A qualidade do vidro óptico, fundamental para o fabrico de lentes perfeitas, foi sendo progressivamente melhorada até aos nossos dias; Huygens (1655) teve um papel de relevo nesta área.

Um importante avanço tecnológico foi a invenção das lentes acromáticas, nas quais são eliminadas as perturbadoras aberrações cromáticas.

Contrariando as ideias de Newton, que achava impossível a construção de lentes acromáticas, John Dollond (1758), concretizaria esta ideia utilizando vidro "crown" e cristal de rocha [32].

Seria, contudo, durante a segunda metade do século XX que a Óptica sofreria a sua maior revolução, com a construção de elementos ópticos de grande precisão, o recurso a revestimentos por películas delgadas, o uso de plásticos para a construção de lentes asféricas.

A partir de 1976 apareceriam as primeiras lentes GRIN (GRadient INdex), feitas de um material não homogéneo, em que o índice de refracção varia radialmente.

Uma das áreas mais importantes da indústria óptica actual, dedica-se precisamente à concepção e construção de lentes para fins específicos, como sejam fotografia, cinema, vídeo ou televisão.

Seria uma falha grave não referir a capacidade que uma lente tem de realizar a transformada de Fourier, o que lhe confere um papel importantíssimo no processamento óptico; este assunto está, no entanto, completamente fora do âmbito do trabalho.

[32] Aparentemente as lentes acromáticas devem-se a Chester Moon Hall (1703-1711), em trabalho anterior, embora não publicado.

3. Tipos de lentes

Uma *lente* é um sistema óptico constituído por dois ou mais *dioptros* [33], um dos quais, pelo menos, é curvo. Esta definição abrange apenas as lentes refractivas, mais comuns.

Se quisermos incluir outros tipos de lentes, como as de Fresnel ou as GRIN, podemos dizer, de um modo mais abrangente, que "uma lente é um sistema refringente usado para alterar a forma das frentes de onda" (Hecht, E., 1991).

Para caracterizar uma lente existem dois importantes parâmetros: a *abertura* (que condiciona não só a luminosidade da imagem, como também a sua qualidade e a profundidade de campo) e a *distância focal*.

Daremos atenção, neste trabalho, apenas às lentes refractivas, já que são as de uso mais comum. Para estas, a distância focal depende do índice de refracção e das curvaturas das suas faces; as aberrações cromáticas que surgem, podem ser minimizadas por diversos processos, que encarecem substancialmente o seu fabrico.

As lentes refractivas podem ser classificadas em *espessas* ou *delgadas*.

Estas últimas são lentes ideais, para as quais a espessura seria desprezável, o que implica que os raios luminosos não sofreriam qualquer desvio lateral ao atravessá--las. Embora isto não seja, em rigor, verdadeiro, consideramos as lentes comuns com que habitualmente lidamos, como delgadas.

Tal como para os espelhos, existem lentes *convergentes* e *divergentes*. No quadro 12.1 da página seguinte apresenta-se um resumo dos principais tipos de lentes, quer convergentes, quer divergentes.

[33] Do grego *dioptron*. Designa um conjunto de dois meios ópticos homogéneos, transparentes e isótropos, separados por uma superfície bem definida (plana ou curva).

Quadro 12.1

(tipos de lentes)

Lentes convergentes	Lentes divergentes
Lente biconvexa	*Lente bicôncava*
Lente meniscoconvexa	*Lente meniscocôncava*
Lente planoconvexa	*Lente planocôncava*

4. Equações das lentes

A Óptica Geométrica normalmente estudada, é a óptica Gaussiana, paraxial, ou de primeira ordem, já que (tal como se passa para os espelhos) considera apenas os raios luminosos numa zona próxima do eixo óptico - raios paraxiais.

O desenvolvimento em série das funções trigonométricas, considerando ângulos pequenos de incidência, e consequentemente desprezando os termos de ordem superior a 1, leva a que:

$$\text{sen}\,\varphi \approx \varphi \approx \text{tg}\,\varphi \qquad \text{e} \qquad \cos\varphi \approx 1$$

Esta simplificação permitiu deduzir importantes expressões algébricas aplicáveis a lentes delgadas rodeadas por um meio de índice de refracção unitário (vazio ou ar, como boa aproximação).

A equação de Halley (ou dos fabricantes de lentes), deve-se ao astrónomo Edmond Halley (1656-1742):

$$\frac{1}{s_o}+\frac{1}{s_i}=(n-1)\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}\right) \qquad (12.1)$$

e relaciona as distâncias objecto-lente e objecto-imagem, com o índice de refracção do material de que a lente é feita, e com os raios de curvatura dos dois dioptros.

Newton estabeleceu também, em 1704, a equação [34]:

$$x_o\, x_i = f^2 \qquad (12.2)$$

que relaciona a distância focal com as distâncias x_o e x_i, medidas a partir dos pontos focais da lente.

Mais utilizada é, certamente, a equação de Gauss (1777-1885):

$$\frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} = \frac{1}{f} \qquad (12.3)$$

que é também válida para os espelhos, como se viu anteriormente.

Estas equações são de simples aplicação, quer a lentes convergentes, quer a lentes divergentes, desde que se respeitem as necessárias convenções de sinais (quadro 12.2).

Quadro 12.2

(convenções de sinais)

Grandeza física	sinal	
	+	-
s_o	Objecto real	Objecto virtual
s_i	Imagem real	Imagem virtual
f	Lente convergente	Lente divergente
y_o	Objecto direito	Objecto invertido
y_i	Imagem direita	Imagem invertida
M_T	Imagem direita	Imagem invertida

Considerando a luz a propagar-se da esquerda para a direita, o objecto é real se estiver situado à esquerda da lente, e vice-versa; a imagem é real se estiver situada à direita da lente, e vice-versa. As distâncias transversas acima do eixo óptico são consideradas positivas e inversamente.

[34] Por convenção, x_o é positivo para a esquerda do foco correspondente ao objecto e x_i é positivo para a direita do foco correspondente à imagem (para o objecto colocado do lado esquerdo da lente). Facilmente se conclui que x_o e x_i têm sempre o mesmo sinal.

5. Características das imagens dadas pelas lentes

A construção das imagens dadas pelas lentes pode ser feita recorrendo aos métodos do raio paralelo ou do raio oblíquo, que se exemplificam nas figuras 12.1. e 12.2. , para uma mesma situação.

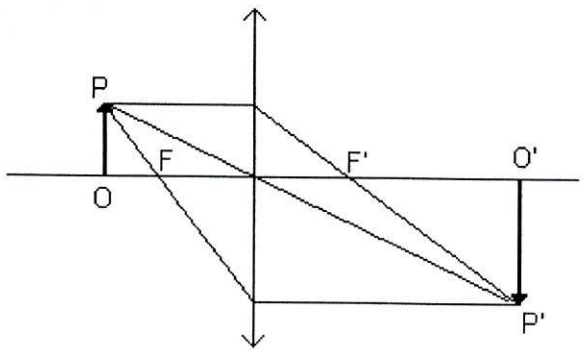


Figura 12.1. Método do raio paralelo: um raio proveniente do objecto, paralelo ao eixo óptico, passa pelo foco imagem; pelo princípio de reversibilidade do raio luminoso, um raio proveniente do objecto, que passe pelo foco objecto, resulta num raio paralelo ao eixo óptico

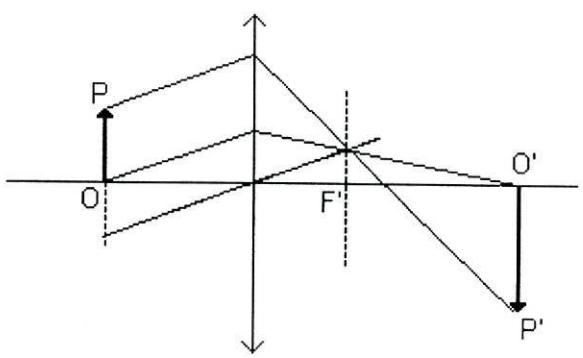


Figura 12.2. Método do raio oblíquo: dois raios oblíquos, mas paralelos entre si, provenientes do objecto, terão de intersectar-se num ponto do plano focal.

De notar que, na aproximação paraxial, os pontos complanares do objecto são convertidos em pontos imagem igualmente situados num mesmo plano; estes planos designam-se *conjugados* e são bastante importantes para a construção de imagens.

As imagens dadas pelas lentes côncavas são sempre virtuais, direitas e menores do que o objecto.

Para as lentes convexas, as características dependem da localização do objecto em relação à lente. Assim, um objecto situado além da dupla distância focal produz uma

imagem real, invertida e menor do que o objecto; colocando este na dupla distância focal a imagem mantém as características mas o seu tamanho torna-se igual ao do objecto; com este entre o foco e a dupla distância focal, a imagem torna-se maior do que o objecto; passando o foco, onde as características são indeterminadas (dado que a imagem se forma no infinito), a imagem passa então a ser virtual, direita e maior do que o objecto.

A ampliação transversa M_T define-se do mesmo modo que para os espelhos:

$$M_T = \frac{y_i}{y_o} = -\frac{s_i}{s_o} \qquad (12.4)$$

sendo y_i e y_o as dimensões transversas da imagem e do objecto.

6. Algumas ideias dos alunos acerca das lentes

As concepções dos alunos relativas à formação de imagens, referidas a propósito dos espelhos verificam-se igualmente para as lentes. Detectam-se enormes dificuldades ao desenhar e interpretar diagramas, e ao explicar e prever fenómenos ópticos.

Eylon, B. S., Ronen, M. e Langley, D. (1993) sistematizam de forma bastante completa os erros típicos dos alunos:

- Existe uma identificação do raio luminoso simbólico com um feixe de luz real, como o do laser.
- A utilização de apenas alguns raios *principais* para a construção de imagens, leva a que os alunos pensem que apenas estes contribuem para a formação da imagem (ou, pelo menos, são essenciais para a sua formação); nas situações em que os alunos admitem a existência de *outros* raios, normalmente não são capazes de os identificar, nem sequer de indicar a sua direcção.
- Muitas vezes desenha-se um feixe de luz, a partir de uma fonte, considerando apenas a parte que é relevante para a construção da imagem; isto leva a que o aluno esqueça a parte restante.
- O uso de "regras" para as construções geométricas, quando não compreendidas, leva a que sejam aplicadas em situações inadequadas.

- Nos manuais, as construções são feitas recorrendo a linhas sólidas, e tracejadas (às vezes de vários tipos); o não esclarecimento do seu significado contribui também para interpretações erradas.
- A imagem real é muitas vezes confundida com uma fonte de luz isotrópica: para isso contribui a observação frequente de imagens reais projectadas num ecrã .

Galili, I. (1996) estudou a mudança conceptual dos alunos no que se refere à formação de imagens por uma lente convergente, tendo verificado que, numa primeira fase, estes consideravam uma imagem "viajante", do objecto para a lente, que seria globalmente invertida por esta, atingindo a seguir o alvo.

Numa segunda fase, pós-lectiva, os alunos efectuavam uma descrição em termos de raios luminosos, que partiam de cada ponto da fonte de luz e transportavam informação acerca desse ponto, interagindo então com a lente; a imagem era reconstruída no alvo a partir de um conjunto particular de raios - uma descrição ainda bastante distanciada do conhecimento formal.

7. Indicações didácticas

Para lidar com as dificuldades dos alunos no que respeita à construção de imagens, algumas ideias úteis podem ser:

- Esclarecer o significado do modelo de raios luminosos.
- Explicitar as considerações que levam à escolha dos raios relevantes para cada situação.
- Traçar os raios de forma mais completa (por exemplo, representar o trajecto da luz para além da imagem).
- Evitar, sempre que possível, o uso de *raios especiais*, e dar preferência a feixes, em vez de raios.
- Usar o modelo de raios para discutir aspectos qualitativos.
- Enfatizar a validade de utilização de "regras".
- Discutir a formação de imagens em paralelo com a sua observação, aplicando o modelo à realidade e à experimentação.
- Confrontar as concepções dos alunos com a interpretação correcta, em termos do modelo de raios luminosos.

A abordagem experimental ao estudo das lentes, deveria começar pela sua classificação, com base na convergência ou divergência de um feixe de raios paralelos que as atravessa {*EXP. 12A*}.

O estudo das características das imagens dadas pelas lentes produzirá decerto melhores resultados, quando a construção geométrica de imagens for desenvolvida a par da actividade experimental {*EXP. 12B*}.

No que respeita a experiências quantitativas, a forma mais simples de determinar a distância focal de uma lente convexa, adequada ao ensino básico, é através de localização directa do foco principal {*EXP. 12C*}.

Mais adequados ao ensino secundário são o método que utiliza um espelho plano auxiliar {*EXP. 12D*} ou o dos focos conjugados {*EXP. 12E*}, quer recorrendo ao banco de óptica, quer à técnica de não-paralaxe com alfinetes.

Apresentam-se ainda dois outros métodos, o de Bessel {*EXP. 12F*} e aquele que recorre ao traçado do gráfico da distância objecto-imagem, em função da distância objecto-lente {*EXP. 12G*}; ambos recorrem à localização das duas posições da lente que produzem imagens reais, para uma distância fixa entre o objecto e o alvo. Parecem ambos mais adequados, pela morosidade de execução e complexidade, a uma área mais especializada.

O método da ampliação é de simples utilização, recorrendo ao conceito de ampliação transversa e à técnica de não-paralaxe com alfinetes {*EXP. 12H*}.

Refere-se também a verificação experimental da equação de Newton para uma lente convergente {*EXP. 12I*}, embora de discutível interesse educativo.

O estudo da associação de duas lentes convexas só é igualmente indicado para uma área mais especializada {*EXP. 12J*}.

Quanto à associação de uma lente côncava e uma lente convexa, poderá ter interesse a sua abordagem ao nível do ensino secundário, como um método de determinação da distância focal de uma lente côncava - método das lentes coladas {*EXP. 12K*}.

Refere-se ainda outro método opcional para a determinação da distância focal de uma lente côncava: aquele que utiliza um espelho côncavo auxiliar {*EXP. 12L*}.

O método de Boys é interessante para os alunos aprenderem a medir o raio de curvatura das faces de uma lente {*EXP. 12M*}, mas parece mais indicado para Técnicas Laboratoriais de Física.

O estudo das lentes, mesmo ao nível do ensino secundário, não ficaria completo sem estudar o efeito da abertura, quer na luminosidade da imagem, quer na profundidade de campo {*EXP. 12N*}, aspectos essenciais, como é sabido, em fotografia.

Finalmente, sugere-se uma abordagem qualitativa às aberrações (esférica e de cor), com dispositivos adequados {*EXP. 12O*}.

13. INSTRUMENTOS ÓPTICOS COMPOSTOS

1. Introdução

Neste pequeno capítulo são abordados os instrumentos ópticos compostos, com destaque para o telescópio e o microscópio.

Efectua-se uma breve introdução histórica e discutem-se os princípios do seu funcionamento. Por fim apresentam-se algumas indicações didácticas de índole experimental.

2. Instrumentos ópticos compostos

Parece dever-se a Roger Bacon (1215-1229) a ideia de associar lentes para construir um telescópio. Contudo, o primeiro estudo publicado de associações de lentes é a *Magia Naturalis* de Della Porta (1589).

Não existe um consenso entre os historiadores da ciência, quanto à invenção do telescópio. A construção do primeiro telescópio refractor é muitas vezes atribuída ao fabricante de óculos holandês Hans Lippershey (1587-1619); neste telescópio era utilizada como objectiva uma lente côncava, obtendo-se uma imagem final direita. [35]

Galileu ouviu falar neste instrumento, e, tendo compreendido a sua importância para a ciência, construiu ele próprio um exemplar. As suas cuidadosas observações astronómicas levaram à descoberta dos satélites de Júpiter (1610). Esta, foi rodeada de enorme controvérsia, sendo acusado por muitos dos seus contemporâneos, entre os quais Kepler, de "tomar por real aquilo que eram apenas imagens vistas através do telescópio".

Tendo Galileu enviado um dos seus telescópios de presente ao eleitor de Colónia, Kepler (1571-1630), serviu-se dele para conduzir as suas próprias observações, convencido de que iria desmentir Galileu; acabaria, no entanto, por concordar que este tinha razão.

[35] Aparentemente este telescópio não era mais do que uma cópia de um modelo italiano de 1590 importado para a Holanda (Ronchi, V., 1991). Assim, é muito provável que o autor seja o próprio Della Porta ou um seu conterrâneo.

Na sequência deste episódio, entusiasmado com as potencialidades do instrumento, Kepler utilizou-o exaustivamente, tendo produzido uma importante obra nas áreas da Óptica e da Astronomia. O telescópio entretanto construído por si, passou a ter uma lente convexa como objectiva, sendo as imagens finais invertidas.

A dificuldade de produzir lentes de qualidade, isentas de aberrações cromáticas, levou Newton (1672) a construir o primeiro telescópio reflector, no qual utilizou um espelho parabólico em substituição da lente objectiva.

Embora hoje em dia seja possível fabricar magníficas lentes acromáticas, o telescópio de Newton continua a apresentar muitas vantagens práticas, designadamente na construção de telescópios de grandes dimensões, como o VLT do European Southern Observatory (Chile, 1998).

Um outro instrumento óptico que contribuiu igualmente, de modo determinante, para o desenvolvimento científico, foi o microscópio composto, cuja invenção é atribuída a Zacharias Janssen (1588-1632). Francisco Fontana (1580-1656) viria a modificá--lo, à semelhança do que Kepler fez com o telescópio, introduzindo uma lente convexa como objectiva.

Desde então, para além de um grande aperfeiçoamento sofrido pelo telescópio e pelo microscópio, muitos outros instrumentos ópticos compostos têm sido inventados, tais como os binóculos, o espectroscópio, a câmara fotográfica, o periscópio, os projectores (de diapositivos, retroprojector, episcópio), o endoscópio, o sistema de leitura óptica (varrimento laser).

3. Microscópio e telescópio ópticos

A palavra telescópio tem a sua origem etimológica no vocábulo grego *teleskopos,* que significa "ver à distância". De facto, na utilização deste instrumento, o que se amplia é um *objecto longínquo*, ao contrário do que se passa no microscópio, em que é ampliado um *objecto próximo*.

Em ambos estes instrumentos existem dois sistemas de lentes, a *ocular* e a *objectiva*.

No caso do microscópio composto, a função da objectiva é formar uma imagem real, invertida e maior que o objecto, num plano situado a uma distância da ocular inferior à sua distância focal, para que a ocular funcione como uma lupa (figura 13.1):

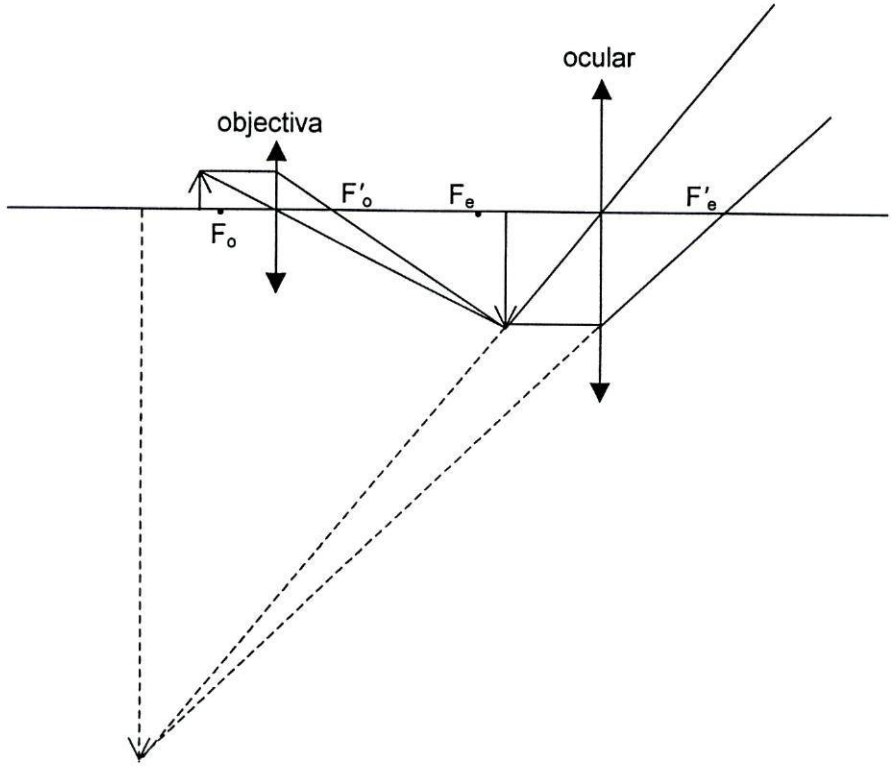


Figura 13.1. Microscópio composto

A distância focal da objectiva de um microscópio é da ordem dos mm, para permitir a sua aproximação do objecto em estudo; a distância focal da ocular é um pouco superior. A distância entre os pontos focais dos dois sistemas de lentes (F'_o e F_e) é geralmente fixa (cerca de 16 cm).

Os parâmetros que caracterizam um microscópio são:

- *profundidade de foco*, que é aproximadamente igual a 1/AN [36]
- *diâmetro de extensão de campo*, razão entre o diâmetro do campo aparente da ocular e a ampliação da objectiva
- *ampliação do microscópio*, produto da ampliação linear transversa da objectiva, pela ampliação angular *da* ocular.

[36] Abertura numérica, que se define como AN = n sen θ_{max} em que n é o índice de refracção do meio em que a lente está imersa e θ_{max} é o semi-ângulo máximo no interior do qual a objectiva recebe energia luminosa.

Os telescópios astronómicos, como o de Kepler, são normalmente inversores, isto é, as imagens finais que fornecem, são invertidas. Nos telescópios terrestres, como o de Galileu, as imagens finais são direitas.

É possível, contudo, introduzir um sistema adicional de lentes entre a ocular e a objectiva dos telescópios astronómicos, para corrigir a inversão.

Em qualquer telescópio, com um objecto longínquo, os raios incidentes constituem um feixe de raios paralelos, e assim, a imagem intermédia vai formar-se no plano focal da objectiva.

Nos telescópios terrestres, a ocular é normalmente montada de modo que o seu ponto focal F'_e coincida com o ponto focal da objectiva, F'_o. Deste modo, a imagem forma-se no infinito (figura 13.2.):

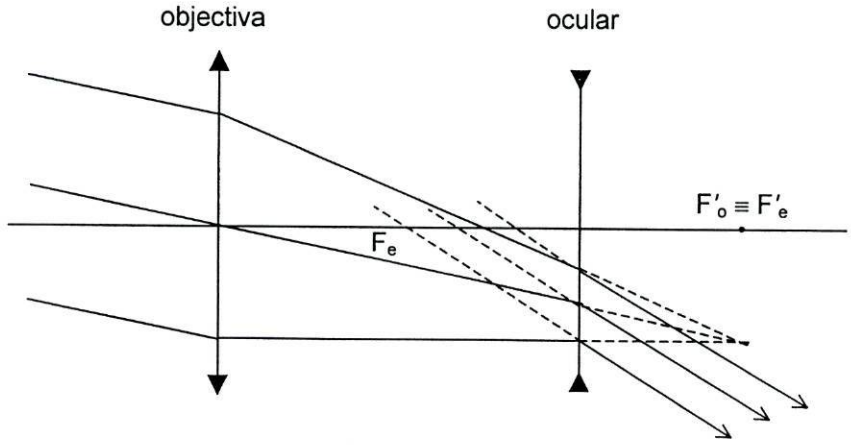


Figura 13.2. Telescópio terrestre

Nos telescópios astronómicos, forma-se uma imagem real num plano situado a uma distância da ocular inferior à sua distância focal, para que a ocular funcione como uma lupa (figura 13.3, na página seguinte).

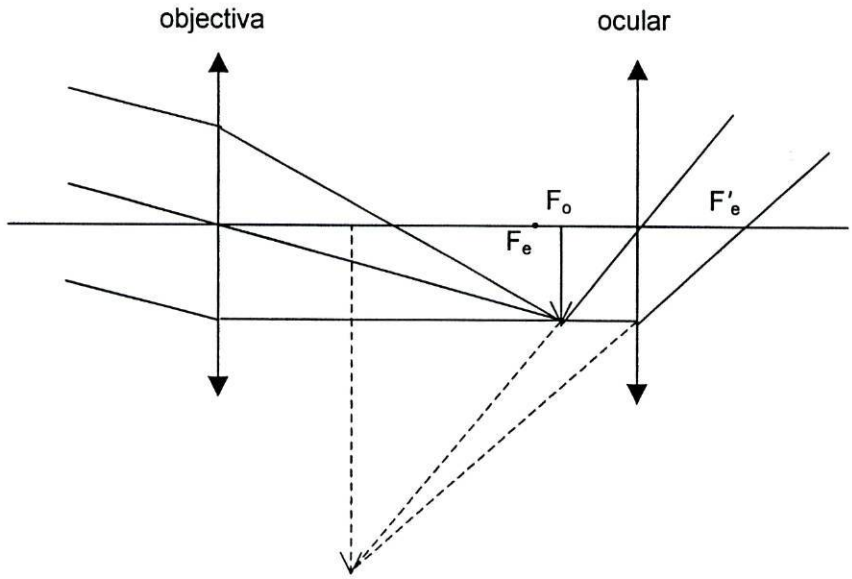


Figura 13.3. Telescópio astronómico

Na aproximação paraxial, a ampliação angular de um telescópio astronómico é dada por

$$M_A = -\frac{f_o}{f_e} \qquad (13.1)$$

Isto significa que, para uma boa ampliação, terá de ser $f_o >> f_e$, o que torna estes telescópios normalmente longos.

Newton construiu o seu telescópio reflector porque estava convencido que não seria possível conseguir lentes de boa qualidade, nomeadamente acromáticas. Assim, a objectiva foi substituída por um espelho côncavo e um pequeno espelho plano que reflectem a luz para a ocular (figura 13.4.):

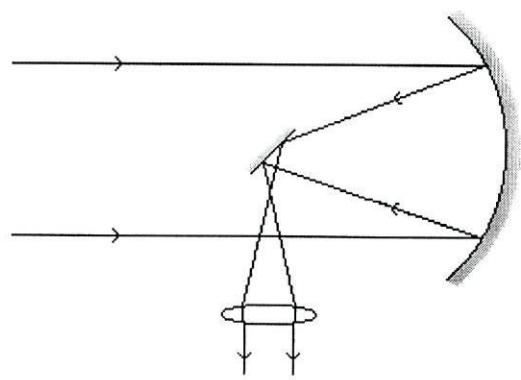


Figura 13.4. Telescópio reflector

Os telescópios modernos utilizam habitualmente espelhos parabólicos, que podem atingir diâmetros muito grandes (vários metros), para maior luminosidade.

Nos binóculos (telescópios binoculares), a separação existente entre as duas objectivas traduz-se num efeito estereoscópico. A correcção da inversão da imagem é geralmente feita através de prismas.

As características ópticas mais importantes destes instrumentos são a ampliação e o diâmetro da objectiva (mm); encontram-se normalmente gravadas no seu corpo [37].

4. Poder de resolução

Chama-se *poder de resolução* de um instrumento à separação mínima necessária entre dois objectos pontuais para se tornarem discerníveis pelo sistema óptico.

O poder de resolução varia directamente com o comprimento de onda e inversamente com a abertura numérica, AN.

Verifica-se, por exemplo, em microscopia, que é possível obter detalhes mais finos com luz ultravioleta do que com luz visível.

5. Indicações didácticas

Com o banco de óptica é possível demonstrar facilmente o funcionamento do microscópio {*EXP. 13A*} e do telescópio {*EXP. 13B*}. A demonstração qualitativa (1ª parte) pode ser feita quer por alunos do ensino básico, quer por alunos do ensino secundário; a determinação da ampliação parece ser mais adequada para alunos do ensino secundário.

Como sugestão para Técnicas Laboratoriais de Física, a determinação do poder resolvente de um telescópio {*EXP. 13C*} pode tornar-se uma interessante actividade de investigação.

[37] Por exemplo, 7x50 significa uma ampliação máxima de 7 vezes e uma objectiva com 50 mm de diâmetro.

14. VISÃO

1. Introdução

Este capítulo é iniciado com uma breve introdução histórica acerca da visão. Segue-se uma descrição sucinta da estrutura do olho humano e dos principais defeitos de visão e sua correcção. Define-se ainda potência focal de uma lente, e a sua unidade prática, a dioptria.

Finalmente analisam-se algumas ideias frequentes dos alunos e apresentam-se sugestões didácticas para abordagem dos aspectos ópticos e fisiológicos da visão.

2. Visão

Como foi já referido a propósito da natureza da luz, os antigos gregos acreditavam que a visão é devida a um conjunto de raios emitidos pelo olho e reflectidos de volta pelo objecto, como o actual radar; esta ideia encontra-se claramente traduzida em algumas passagens da *Catóptrica* de Herão de Alexandria (séc. II - I a. C.).

Outra ideia muito popular baseava-se nas *eidola*, recuperadas na idade média sob a forma de *espécies*, imagens viajantes que se deslocavam do objecto até ao olho, segundo as leis da perspectiva.

Muitos aspectos ligados à visão foram estudados ao longo de milhares de anos, não só relacionados com a formação de imagens (aspectos ópticos), mas também com a sua retenção e memorização, com a activação dos mecanismos do olho, com o estímulo do sistema nervoso, com a relação entre a visão e a percepção da posição e distância dos objectos, etc. (aspectos fisiológicos).

A primeira descrição detalhada do olho humano, foi efectuada no séc. X; sendo devida a Ibn-al Haytan; foram identificadas então três regiões: o aquoso, o cristalino e o vítreo.

A chave para o mecanismo da visão apenas seria encontrada no séc. XVII, pela mão de Kepler. Este, descreve o olho como uma lente convergente que projecta uma imagem real na retina côncava (funcionamento análogo ao de uma câmara

escura). Isto implicaria, como se sabe, que a imagem formada devia ser invertida, o que é contrário ao senso comum.

Descartes, cerca de 1630, realizou uma experiência com um olho de boi, destinada a comprovar aquela explicação. Num orifício de uma janela, colocou o olho, voltado para o exterior, e espreitou pela parte posterior, que tinha previamente raspado para a tornar transparente; pôde assim observar uma pequena imagem invertida da paisagem exterior [38].

Concluiu, assim, que a imagem formada no olho é, de facto, invertida. Teria, então, de haver uma explicação complementar para justificar a percepção não invertida que temos dos objectos.

A utilização de lentes para melhorar a visão, data do séc. XIII, embora possivelmente ainda de modo empírico. Quanto ao seu uso generalizado, apenas aconteceria no século XVIII, dado que até então era considerado "pouco próprio". Por outro lado, as lentes usadas (quase planas, côncavas ou convexas) apenas proporcionavam uma visão correcta junto do centro. Só em 1804, a lente *menisca*, que permite uma visão periférica praticamente sem distorção, seria introduzida por Wollaston.

Em 1825, George B. Airy utilizou pela primeira vez uma lente cilíndrica para a correcção do astigmatismo; contudo esta só seria difundida a partir de 1862.

Já no séc. XX, surgiriam ainda as *lentes de contacto* para a correcção de defeitos de visão.

3. Estrutura do olho humano

O olho humano comporta-se como uma lente dupla. Na verdade, grande parte da refracção dá-se na *córnea*, que é a membrana exterior, e a restante no *cristalino*, que se encontra imerso em dois líquidos, chamados *humores*.

[38] Esta experiência parece ter sido realizada alguns anos antes pelo jesuíta alemão Cristopher Scheiner.

O cristalino é uma autêntica lente GRIN, já que é constituído por 22 000 camadas extremamente delgadas, cujo índice de refracção varia entre 1,406 (no interior) e 1,386 (no córtex menos denso).

O *humor vítreo* contém partículas microscópicas de restos celulares livres: são as *moscae volitantes* que podemos ver atravessando o campo visual, quando olhamos obliquamente para uma fonte de luz.

A entrada da luz faz-se através de um orifício, a *pupila*, cuja abertura é controlada pela *íris* (a parte colorida). A luz é focada na *retina* (figura 14.1).

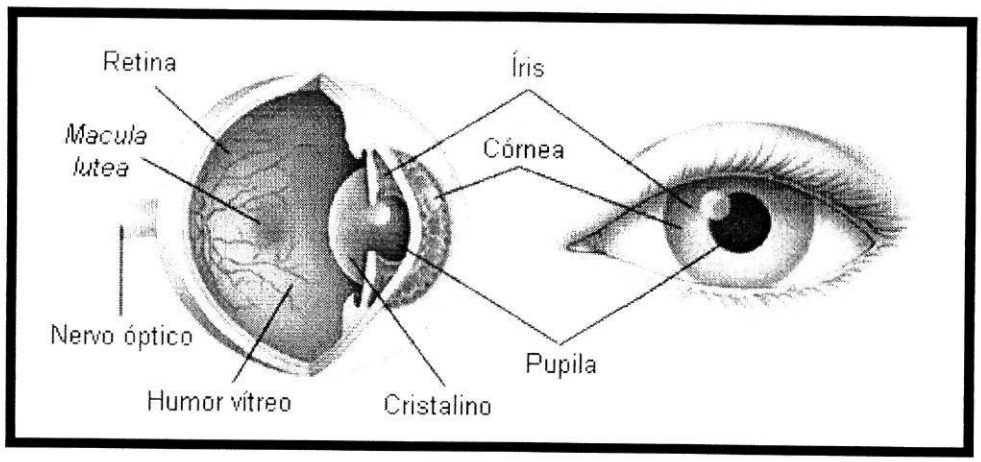


Figura 14.1. Anatomia do olho
(adaptado de American Academy of Ophtalmology, eyeNET, http://www.eyenet.org/public/anatomy/anatomy.html)

A zona de junção do *nervo óptico* com o olho, não contém qualquer célula receptora; é o chamado *ponto cego*.

O olho pode focar objectos colocados a diferentes distâncias, através de um mecanismo, chamado acomodação; este, consiste na contracção ou distensão dos *músculos ciliares*, que actuam sobre o cristalino, variando a sua distância focal.

A distância mais longínqua que pode ser focada a olho nu designa-se por *ponto longínquo*; a distância mais próxima a que um objecto pode ser focado sem dificuldade chama-se *ponto próximo*. [39]

[39] O *ponto longínquo* situa-se no infinito, para um olho normal (emétrope). O *ponto próximo* para uma criança é de cerca de 7 cm; para um jovem de cerca de 12 cm; para um adulto, entre 28 e 40 cm; para um idoso é de cerca de 100 cm.

4. Ametropias (defeitos de visão)

4.1. Miopia

A miopia é um defeito de visão no qual o ponto focal imagem de um olho não acomodado se situa aquém da retina (figura 14.2).

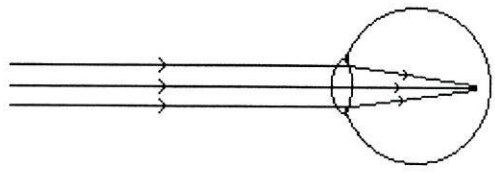


Figura 14.2. Olho míope

Um olho míope tem o *ponto remoto* a distância finita; os objectos situados para além daquele ponto não poderão formar imagens nítidas. Por isso se diz que "vê mal ao longe". A correcção deve ser feita com uma lente divergente adequada.

4.2. Hipermetropia

Neste caso, o ponto focal imagem de um olho não acomodado situa-se para lá da retina (figura 14.3).

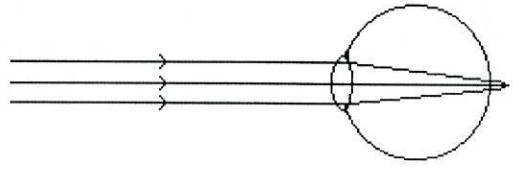


Figura 14.3. Olho hipermétrope

O hipermétrope consegue acomodar, de modo a ver objectos distantes com nitidez; mas não para ver objectos próximos. Por isso se diz que "vê mal ao perto". A correcção deve ser feita com uma lente convergente adequada.

4.3. Presbitia

Vulgarmente designada por "vista cansada", a presbitia surge devido à perda de flexibilidade dos músculos ciliares e endurecimento do cristalino, que acompanham o envelhecimento.

O *ponto próximo* torna-se mais distante, o que dificulta a visão de objectos próximos (figura 14.4).

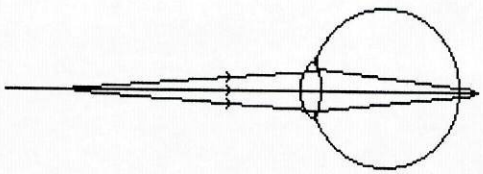


Figura 14.4. Olho presbita

Por esta razão, as pessoas de idade tendem a afastar de si os livros para ler com mais facilidade. A correcção deve ser feita também com uma lente convergente adequada.

4.4. Astigmatismo

Este é talvez o defeito mais frequente da visão [40], em maior ou menor grau. Deve-se a alterações da curvatura da córnea.

Se o astigmatismo for irregular, não é fácil compensá-lo. Se for regular, pode ser compensado com uma lente cilíndrica, devidamente orientada.

5. Potência focal de uma lente

Define-se a *potência focal* ou *vergência* de uma lente como a razão entre o índice de refracção do meio óptico onde esta se encontra, e a sua distância focal nesse meio.

No vazio ou no ar, a vergência é simplesmente o inverso da distância focal, já que o índice de refracção é unitário:

$$P = \frac{1}{f} \qquad (14.1)$$

A sua unidade habitual é a dioptria (D), equivalente ao m^{-1} (SI).

[40] Cerca de 25% dos adultos jovens necessitam de compensações oculares com ± 0,5 D e cerca de 65% com ± 1,0 D ou menos.

6. Algumas ideias dos alunos acerca da visão

Segundo Verkerk e Bouwens (1993) a principal dificuldade dos alunos é o não relacionamento entre a luz e a visão. Embora reconheçam que a existência de luz perto de um objecto é uma condição para ele ser visto, não se apercebem de que têm de entrar nos olhos raios luminosos provenientes do objecto.

Por exemplo, numa entrevista, uma aluna declarava que podia ver uma lâmpada acesa colocada a centenas de metros, embora a distância fosse demasiado grande para que um raio de luz chegasse até ao seus olhos.

Um outro estudo (Driver, R., Guesne, E., Tiberghien, A., 1985), para além de apresentar idêntica conclusão, detecta ainda a atribuição de um papel activo ao olho por parte de muitos alunos (13-15 anos), à semelhança do modelo dos raios visuais dos antigos gregos. Estes autores evidenciam diversos aspectos da linguagem do quotidiano que contribuem para esta concepção: "olhar crítico", "olhar fulminante", "mau olhado", etc. Além disso, algumas personagens da ficção, como o Super-homem, emitem efectivamente raios através dos olhos !

É importante ainda salientar a concepção, detectada por investigadores de diversos países (Alemanha, França e Suécia) de que os olhos vêem independentemente de qualquer mediador entre estes e o objectos.

O diagrama apresentado na figura 14.5, da página seguinte, procura resumir a progressão nas concepções de visão encontradas nos alunos.

Um estudo de Yip, Din-Yan (1998) evidencia que a utilização de diagramas inadequados ou mesmo incorrectos por parte dos professores, tende a perpetuar as concepções alternativas dos alunos. Este autor sugere que as instituições deveriam incorporar, na formação de professores, informação acerca das concepções mais frequentes dos alunos, factores que contribuem para o seu desenvolvimento, e estratégias construtivistas de confrontação que levam à mudança conceptual.

Apresenta ainda algumas questões que, na sua perspectiva, deveriam servir de guia para debates a realizar por pequenos grupos de alunos:

- Por que razão os nossos olhos vêem os objectos ?
- Como representar um feixe luminoso que parte de um ponto do objecto ?
- Por que motivo a refracção é essencial para a focagem ?
- Qual a importância da formação da imagem na retina ?

Sem uma resposta adequada a estas questões, possivelmente o conhecimento dos alunos limitar-se-á a uma simples memorização.

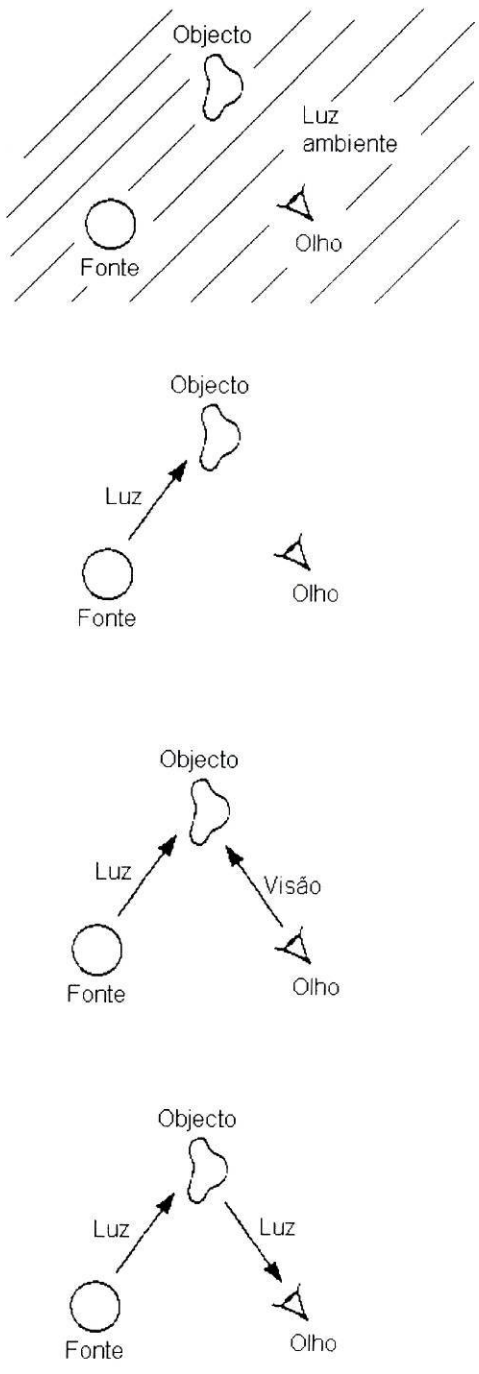


Figura 14.5. Progressão nas concepções de visão encontradas em alunos (adaptado de Driver, R., Guesne, E., Tiberghien, A., 1985)

7. Indicações didácticas

Existem no mercado diversos modelos do olho humano, designadamente tri-dimensionais e desmontáveis. A sua utilização é muito útil para o estudo da anatomia do olho.

O seu funcionamento óptico pode, contudo, ser demonstrado facilmente com um balão de vidro contendo uma solução aquosa de fluoresceína, uma fonte de luz (feixe cilíndrico de luz branca) e algumas lentes {*EXP. 14A*}.

Uma actividade simples de observação, que os alunos podem realizar individualmente, permite demonstrar a existência do "ponto cego" {*EXP. 14B*}.

Uma outra actividade, igualmente simples, com um pedaço de cartolina e um alfinete, permite verificar que a imagem formada na retina é, de facto, invertida {*EXP. 14C*}, sem ter necessidade de recorrer a um olho de boi, como Descartes...

Atendendo a que o olho humano é um instrumento óptico, será interessante estudar o seu poder resolvente {*EXP. 14D*}.

Para uma melhor compreensão dos aspectos fisiológicos da visão, sugerem-se quatro demonstrações:

- efeito de persistência de visão, com o disco de Newton {*EXP. 14E*};
- ilusão de cor, com o disco de Benham {*EXP. 14F*};
- efeito de Purkinje, com um projector e filtros {*EXP. 14G*};
- efeito de Pulfrich, com um pêndulo mecânico e um filtro de densidade neutro {*EXP. 14H*}.

15. POLARIZAÇÃO DA LUZ

1. Introdução

Este capítulo é iniciado com uma breve síntese dos principais factos históricos ligados à polarização. Efectua-se em seguida uma interpretação electromagnética deste fenómeno e discutem-se os diversos processos de obtenção de luz polarizada.

Após uma referência à actividade óptica, característica de algumas substâncias, são apresentadas sugestões didácticas, incluindo um conjunto de experiências que permitem cobrir as principais vertentes da polarização.

2. Polarização

O fenómeno de *polarização* foi observado pela primeira vez por Huygens, na sequência da descoberta, em 1669, por Bartholin, da birrefringência de um cristal de "espato da Islândia" (calcite).

As duas imagens resultantes são devidas a um feixe de raios ordinário (O) e a um feixe de raios extraordinário (E), assim chamado por não se comportar de acordo com a lei de Snell, quando se observa a refracção nas faces do cristal [41]. Huygens verificou que, passando esses feixes através de um segundo cristal, e rodando-o, conseguia converter o feixe O num feixe E e inversamente.

Seria Newton a baptizar este fenómeno, reconhecendo naquela "assimetria lateral" uma analogia (incorrecta) com os ímanes.

Apenas em 1808, quando Malus observou a polarização em fenómenos de reflexão, compreendeu que ela não era devida a propriedades dos meios cristalinos, mas estava relacionada com a própria natureza da luz; contudo, o modelo de ondas longitudinais até então defendido, não permitia explicar os resultados das observações.

Malus estabeleceu, no ano seguinte, uma relação entre a irradiância da luz que atravessa dois polarizadores (um na função de analisador) e o ângulo entre os seus eixos de transmissão - *lei de Malus*.

[41] Por exemplo, numa incidência normal, o raio O continua na mesma direcção, enquanto o raio E sofre um desvio angular.

Em 1811, Arago observou pela primeira vez actividade óptica numa lâmina de quartzo. Praticamente em simultâneo, Biot observou a mesma propriedade em várias substâncias naturais, como a terebentina.

Brewster efectuou um estudo experimental da polarização por reflexão, e apresentou a lei que tem o seu nome em 1815.

O *dicroísmo*, ou polarização por absorção selectiva, foi provavelmente descoberto por Biot, no mesmo ano.

Após alguns anos de indefinição, a sugestão de Young de que as ondas luminosas podiam resultar da vibração transversa do "éter" veio permitir uma explicação simples para a polarização: a dupla lateralidade da luz seria uma consequência das duas vibrações ortogonais do "éter", perpendiculares à direcção de propagação.

Com base nesta sugestão, Fresnel desenvolveu uma descrição matemática das oscilações transversais do "éter".

Para realizar o estudo experimental da polarização eram normalmente utilizados cristais de calcite; em 1828, W. Nicol introduziu aquele que viria a ser o polarizador birrefringente mais comum - o *prima de Nicol*. Este prisma era preparado cortando e colando, de modo conveniente, um romboedro de calcite.

Em 1852, W. B. Herapath observou que um cristal de sulfato periodídico de quinino (herapatite), orientado de modo conveniente, era capaz de absorver totalmente luz polarizada.

Apesar das diversas descobertas de ordem prática, só com a teoria electromagnética da luz, devida a Maxwell (1864), foi possível chegar a um modelo capaz de explicar satisfatoriamente o fenómeno da polarização.

A primeira folha polarizadora dicróica, conhecida como *folha polaróide J* surgiria em 1928; este foi o primeiro de uma série de polarizadores lineares que E. H. Land viria a criar, explorando a descoberta que Herapath tinha feito 76 anos antes.

Em 1938 Land concebe a *folha polaróide H* ; esta é feita à base de álcool polivinílico, distendido segundo uma determinada direcção, e mergulhado em seguida numa tinta rica em iodo. Este é, actualmente, o polarizador mais utilizado.

3. Interpretação electromagnética da polarização

Numa onda electromagnética os campos eléctrico e magnético oscilam perpendicularmente à direcção de propagação.

A polarização está relacionada com a direcção do vector campo eléctrico num dado ponto, podendo ser variável com o tempo.

Considerando o caso mais simples de uma onda sinusoidal (de frequência angular ω), podemos representá-la pelo campo eléctrico [42] que se propaga na direcção z :

$$\vec{E}(x,y,z,t) = \vec{E}_0(x,y)\, sen\,(k\,z - \omega\,t) \qquad (15.1)$$

As componentes daquele vector segundo as direcções x e y , são

$$E_x(z,t) = E_{x,0}\, sen\,(k\,z - \omega\,t) \qquad (15.2)$$

$$E_y(z,t) = E_{y,0}\, sen\,(k\,z - \omega\,t + \phi) \qquad (15.3)$$

A diferença de fase ϕ representa o atraso temporal entre as ondas E_x e E_y num dado ponto do espaço.

Para luz *não polarizada*, o ângulo ϕ flutua aleatoriamente, provocando uma mudança de direcção, igualmente aleatória, do vector de onda ao longo do tempo.

A luz solar e a luz proveniente das lâmpadas de incandescência ou fluorescência são *não polarizadas*.

[42] O vector campo magnético ser-lhe-ia, é claro, perpendicular.

Na *polarização linear*, em que $\phi = 0$ [43], E_x e E_y encontram-se em fase, e o vector campo eléctrico oscila ao longo de um segmento de recta, que faz um ângulo θ com o eixo dos x :

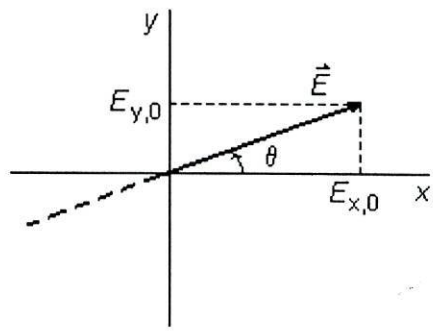


Figura 15.1. Polarização linear

O ângulo θ é determinado pelas amplitudes $E_{x,0}$ e $E_{y,0}$:

$$tan\,\theta = \frac{E_{y,0}}{E_{x,0}} \qquad (15.4)$$

Um exemplo mecânico poderia ser uma corda vibrando num plano horizontal:

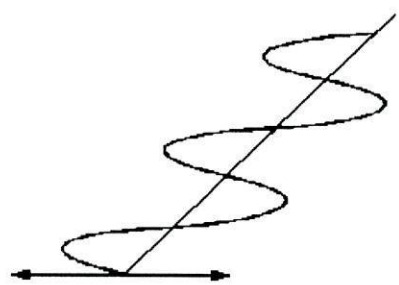


Figura 15.2. Onda linearmente polarizada

A polarização pode também ser *circular*, se $\phi = \pi/2$ e $E_{x,0} = E_{y,0} = E_0$.

Neste caso, as equações (15.2) e (15.3), passam a ter a forma

$$E_x\,(z,t) = E_0\; sen\,(k\,z - \omega\,t) \qquad (15.5)$$

$$E_y\,(z,t) = E_0\; cos(k\,z - \omega\,t) \qquad (15.6)$$

[43] Se $\phi = \pi$ existe igualmente polarização linear, mas passará a ser $tan\,\theta = -\frac{E_{y,0}}{E_{x,0}}$.

O movimento descrito pelo vector campo eléctrico encontra-se esquematizado na figura 15.3.

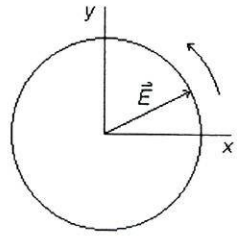


Figura 15.3. Polarização circular

O vector campo eléctrico roda no sentido directo com frequência angular ω; por isso se diz que esta onda tem uma polarização *circular direita*.

A polarização *circular esquerda* ocorre quando $\phi = -\pi/2$ e $E_{x,0} = E_{y,0}$. Neste caso o vector campo eléctrico roda no sentido retrógrado.

Finalmente, a polarização pode ser *elíptica*, se $E_{x,0} \neq E_{y,0}$ e o ângulo ϕ for diferente de 0 ou π, apresentando também as variantes *direita* e *esquerda*.

4. Formas de obtenção de luz polarizada

4.1. Polarização por absorção

Quando a luz não polarizada atravessa uma folha polaróide [44], a componente do campo eléctrico paralela à direcção de distensão das longas moléculas, provoca uma oscilação dos respectivos electrões; assim, essa componente é praticamente absorvida. A luz torna-se *polarizada*, segundo a *direcção de polarização* do polaróide - perpendicular à direcção de distensão das moléculas (figura 15.4).

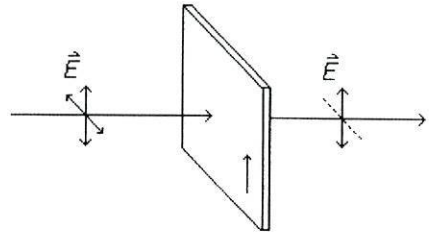


Figura 15.4. Polarização por absorção

[44] Nome comercial do material polarizador correntemente utilizado.

Se fizermos passar a luz polarizada por um segundo polarizador, cujo eixo ou direcção de polarização faz um ângulo θ com o eixo do primeiro polarizador, apenas a componente do campo segundo o respectivo eixo de polarização, $E \cos \theta$, é transmitida.

Como a irradiância é proporcional ao quadrado da amplitude do campo, a intensidade da luz transmitida é então dada por

$$I = I_0 \cos^2 \theta \qquad (15.7)$$

Este é o enunciado da *lei de Malus*.

Num polarizador ideal, a intensidade transmitida varia entre um valor máximo (I_0), para um ângulo de 0°, até um valor nulo, para um ângulo de 90°.

4.2. Polarização por reflexão

Quando a luz não polarizada incide na superfície de separação de dois meios ópticos, segundo um ângulo adequado, θ_p, designado *ângulo de polarização* ou *de Brewster*, a luz reflectida é polarizada (e a luz refractada é parcialmente polarizada):

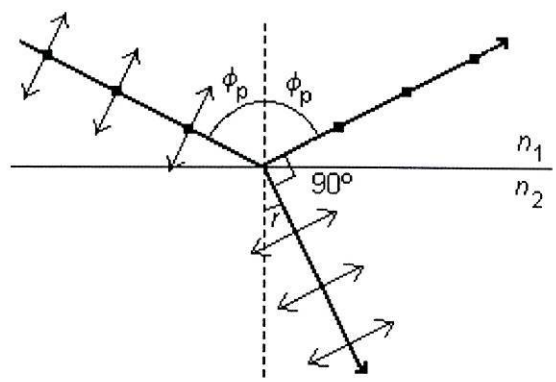


Figura 15.5. Polarização por reflexão

Verifica-se experimentalmente que os raios reflectidos e refractados são perpendiculares, ou seja, $\theta_p + r = 90°$.

Aplicando a lei de Snell,

$$n_1 \text{ sen } \theta_p = n_2 \text{ sen } r \qquad (15.8)$$

e atendendo a que sen r = cos θ_p, é fácil calcular o ângulo de Brewster [45] :

$$\tan \theta_p = \frac{n_2}{n_1} \qquad (15.9)$$

Esta expressão é conhecida como *lei de Brewster.*

Podemos analisar a polarização por reflexão, em termos da teoria electromagnética.

A componente do campo eléctrico da onda incidente, paralela ao plano de incidência, vai provocar no interior do segundo meio oscilações electrónicas, cuja direcção é, para o ângulo de Brewster, a mesma do raio refractado; isto implicaria uma oscilação longitudinal da onda reflectida, o que não é aceite. Assim, apenas a componente normal ao plano de incidência contribui para a onda reflectida.

A polarização por reflexão não se torna, na prática, eficiente, devido à baixa percentagem (cerca de 8%) da luz incidente que é reflectida.

4.3. Polarização por dupla refracção

Os líquidos e os sólidos amorfos (como o vidro) são materiais *isotrópicos* porque as suas propriedades não dependem da direcção; em particular, a velocidade de propagação da luz é a mesma, qualquer que seja a direcção considerada.

A dupla refracção ou birrefringência ocorre em *cristais opticamente anisotrópicos.* Nestes, existe um eixo óptico, ao longo do qual ambos os feixes, ordinário (O) e extraordinário (E), se propagam com a mesma velocidade (ou seja, têm igual índice de refracção).

O índice de refracção do feixe E, depende do seu ângulo com o eixo óptico, atingindo um máximo para 90º. Nesta situação, a diferença de fase entre os dois feixes é proporcional à espessura do cristal, o que é aproveitado para a construção das chamadas *lâminas de atraso.*

[45] Para a interface ar-vidro, o ângulo de Brewster é de 57º.

Quando um feixe não polarizado atravessa um cristal de calcite, os feixes O e E são linearmente polarizados ao longo de direcções perpendiculares (figura 15.6).

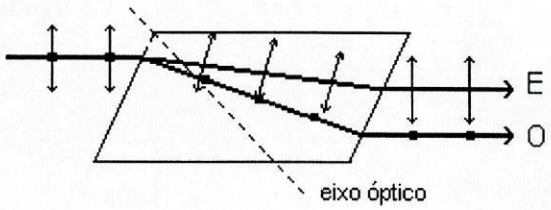


Figura 15.6. Polarização por dupla refracção

4.4. Polarização por dispersão

Quando a luz despolarizada incide num gás, segundo o eixo dos *z*, provoca oscilações dos electrões, paralelamente à direcção do vector campo eléctrico. Dá-se assim a dispersão da luz, em todas as direcções.

Para um observador situado no plano *xy* (figura 15.7) a luz aparece linearmente polarizada, pois não existe oscilação ao longo do eixo dos *z*, nem ao longo do eixo dos *x*, já que isso implicava uma componente longitudinal da onda.

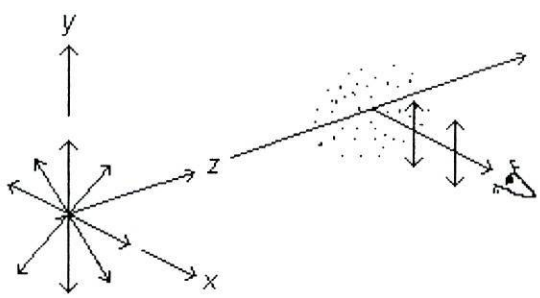


Figura 15.7. Polarização por dispersão

A luz solar surge polarizada linearmente, quando observada segundo determinadas direcções; por essa razão, certas regiões do céu aparecem negras, através de óculos polaróide.

5. Actividade óptica

Qualquer substância que provoque uma rotação do campo eléctrico de um feixe de luz linearmente polarizada, diz-se *opticamente activa*.

Olhando de frente para a fonte de luz, a rotação pode dar-se para a esquerda ou para a direita; no primeiro caso a substância diz-se *levógira* e no segundo, *dextrógira*.

A actividade óptica está relacionada com a estrutura das substâncias, e a sua explicação exige uma abordagem quântica, fora do âmbito deste trabalho. Um modelo mais simples, procura explicar a rotação do plano de polarização à custa das moléculas encaradas como condutores helicoidais.

O *poder rotatório específico de uma substância*, define-se como o número de graus de rotação por unidade de concentração e de comprimento atravessado pelo feixe de luz.

6. Indicações didácticas

Embora muitos alunos conheçam os óculos polaróide, o fenómeno da polarização da luz é praticamente desconhecido entre eles.

Uma possível abordagem experimental deveria iniciar-se pela demonstração qualitativa da polarização por absorção, utilizando um retroprojector, três polarizadores e óculos polaróide {*EXP. 15A*}. Pode aproveitar-se para observar materiais plásticos transparentes, previamente submetidos a tensões mecânicas, com um polarizador e um analisador, evidenciando a sua *birrefringência mecânica* ou *fotoelasticidade*.

A lei de Malus pode ser verificada utilizando um fotómetro de comparação e duas fontes de luz, e interpondo um conjunto de dois polarizadores (cujos eixos de polarização podem rodar, um em relação ao outro) entre uma das fontes e o fotómetro {*EXP. 15B*}.

Em seguida, poderia observar-se a polarização por reflexão, usando uma pilha de lâminas de vidro (como fez Arago em 1812), e, usando um polarizador e um transferidor, tentar medir o ângulo de Brewster {*EXP. 15C*}, que poderia ser comparado com o valor calculado.

Um cristal birrefringente de calcite não é difícil de conseguir, e podem efectuar-se com ele várias investigações, no âmbito da polarização por dupla refracção {*EXP. 15D*}.

A demonstração atrás sugerida do espalhamento {*EXP. 6E*} pode servir para observar a polarização por dispersão, utilizando um polarizador na direcção adequada.

Finalmente, pode determinar-se o poder rotatório específico de uma substância opticamente activa, como a glicose (em solução aquosa), desde que se disponha de um *polarímetro* {*EXP. 15E*}.

Esta última experiência, pelas suas características, parece mais indicada para uma área de Técnicas Laboratoriais (Física / Química).

16. INTERFERÊNCIA E DIFRACÇÃO

1. Introdução

Neste capítulo, após uma introdução histórica ao tema, apresenta-se uma interpretação electromagnética para os fenómenos de interferência e difracção. Em particular, no que se refere à interferência, dedica-se especial atenção à experiência de Young, dada a sua importância histórica, aos fenómenos de interferência em filmes finos, tão comuns no dia-a-dia, e ao interferómetro de Michelson, ainda hoje muito utilizado. Aborda-se também a difracção por uma fenda simples, não esquecendo o princípio de Babinet.

Finalmente, relacionam-se entre si os fenómenos de interferência e difracção, e fornecem-se algumas indicações didácticas, com destaque para uma série de experiências que podem ser efectuadas ao nível dos ensinos básico e secundário.

2. Difracção e interferência

Quando a luz se propaga para além de um obstáculo ou abertura, pode sofrer um desvio relativamente à propagação rectilínea.

Terá sido Grimaldi (1618-1663) o primeiro a observar este fenómeno, quando verificou a existência de faixas de luz na zona de sombra de uma vara, iluminada por uma fonte de luz pontual; deu-lhe o nome de *difracção*.

Hooke (1635-1703) observou igualmente a difracção, tendo sido pioneiro no estudo de padrões de interferência coloridos em películas delgadas. Admitiu que resultavam da interacção entre a luz reflectida nas duas superfícies.

Também Newton se dedicou ao estudo da interferência com luz difusa, publicando os seus resultados em 1704. Para observar as franjas de interferência, era depositada uma fina camada de pó (talco) ou humidade sobre a superfície de um espelho, e utilizada uma fonte pontual intensa.

Uma explicação mais completa da interferência surgiria apenas em 1802 com a célebre experiência de Young, o seu *princípio de interferências,* e o renascer da teoria ondulatória da luz.

Treze anos depois, Fresnel, trabalhando independentemente, integrou os princípios de Huygens e Young, corrigindo o primeiro, que não levava em linha de conta o comprimento de onda da radiação.

Surgiu assim *o princípio de Huygens-Fresnel*, como é conhecido: "cada ponto de uma frente de onda não obstruída constitui, em qualquer instante, uma fonte de ondas esféricas secundárias (com a mesma frequência da onda primária); a amplitude do campo óptico em qualquer ponto do espaço é dada pela sobreposição de todas essas ondas (tendo em conta as suas amplitudes e fases relativas)."

Em 1818, Fresnel apresentou um artigo à Academia das Ciências francesa, no âmbito de um concurso para estudos acerca do fenómeno da difracção, no qual defendia o carácter ondulatório da luz; no júri encontravam-se, entre outros, Laplace, Biot e Poisson, defensores do modelo corpuscular. Numa notável análise da teoria de Fresnel, Poisson previu que, se esta fosse válida, no centro da sombra geométrica de um pequeno objecto circular, deveria surgir um ponto brilhante de luz; pensava, assim, enterrar definitivamente aquelas ideias. Contudo, Arago, também membro do júri, realizou a experiência e o ponto brilhante lá estava ! (figura 16.1).

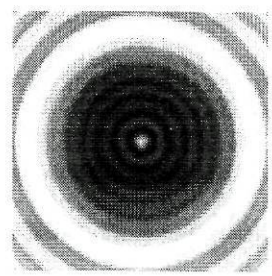


Figura 16.1. Ponto de Poisson

Fresnel venceu o concurso e a teoria ondulatória passou a ter uma aceitação generalizada.

Esta curiosa história do *ponto de Poisson*, como ficou a ser conhecido, é um exemplo divertido de como o desenvolvimento da ciência nem sempre se dá de forma tão simples como se possa pensar...

Merecem referência as primeiras medidas de comprimentos de onda, levadas a cabo por Fraunhofer (1787-1826), utilizando redes de difracção, cuja construção foi

por si melhorada. Note-se que a primeira *rede de difracção* data de 1785, sendo devida a David Rittenhouse.

Kirchhoff (1824-1887) viria a construir uma teoria mais rigorosa da difracção, válida para situações em que a dimensão do obstáculo ou abertura é grande, quando comparada com o comprimento de onda.

Cerca de 1880, Michelson inventou o seu primeiro *interferómetro*, instrumento de precisão que permite a medida de comprimentos, em termos do comprimento de onda de uma fonte monocromática. Foi com este instrumento que se realizou a célebre experiência de Michelson-Morley, que levaria ao abandono da hipótese do "éter".

As medições do metro-padrão, igualmente efectuadas por Michelson com um interferómetro, conduziram à actual definição, adoptada internacionalmente.

A primeira solução exacta de um problema de difracção surgiu apenas em 1896, pela mão de Sommerfeld; tratava-se, contudo, de uma situação irrealista - a maior parte dos problemas práticos não permite que sejam encontradas soluções rigorosas.

Nos finais do séc. XIX surgiria o interferómetro de Fabry-Perot, que, além de ser um instrumento de grande poder resolvente, é hoje utilizado como cavidade ressonante em determinados lasers.

O aparecimento do laser, em 1960, permitindo a utilização de luz praticamente monocromática e coerente, despoletou o aparecimento de uma grande variedade de interferómetros, para diversas aplicações.

Os princípios da interferometria não têm apenas aplicações em óptica, mas também noutras áreas, como a radioastronomia.

3. Interpretação electromagnética

A *interferência óptica* é interpretada como uma interacção entre duas ou mais ondas luminosas. Não existe uma diferença física entre difracção e interferência: geralmente quando um número reduzido de ondas interage, fala-se em interferência, reservando-se o termo difracção para um número elevado de ondas.

Considerando duas ondas luminosas monocromáticas, com a mesma frequência, que se propagam num meio homogéneo, e aplicando o princípio de sobreposição num determinado ponto, o campo eléctrico resultante será

$$\boldsymbol{E} = \boldsymbol{E}_1 + \boldsymbol{E}_2 \qquad (16.1)$$

Elevando ao quadrado, obtém-se

$$\boldsymbol{E}^2 = \boldsymbol{E}_1^2 + \boldsymbol{E}_2^2 + 2\,\boldsymbol{E}_1 \cdot \boldsymbol{E}_2 \qquad (16.2)$$

Recordando que a irradiância é proporcional ao quadrado do campo eléctrico, e realizando uma média temporal em ambos os membros da equação, podemos concluir que

$$I = I_1 + I_2 + I_{12} \qquad (16.3)$$

em que I_{12} constitui o *termo de interferência*.

Desenvolvendo o produto interno $\boldsymbol{E}_1 \cdot \boldsymbol{E}_2$, conclui-se que

$$I_{12} = \boldsymbol{E}_{01}\,\boldsymbol{E}_{02} \cos \phi \qquad (16.4)$$

sendo ϕ a diferença de fase entre as duas ondas que interferem, devida quer aos diferentes percursos, quer a um possível desfasamento inicial.

Assim, a irradiância total num ponto, pode ser igual, inferior ou superior à soma das irradiâncias, de acordo com o valor de ϕ; podemos considerar três casos limite:

- Quando $\phi = (2m+1)\pi/2$, as ondas encontram-se em quadratura de fase, e o termo de interferência anula-se.
- Quando $\phi = (2m+1)\pi$, a interferência é destrutiva e total.
- Quando $\phi = 2m\pi$, a interferência é construtiva e total.

(sendo m um número inteiro)

A interferência manifesta-se pelo aparecimento de distribuições luminosas características; observadas num plano, revelam zonas claras e escuras, entre as quais a intensidade varia suavemente - as *franjas de interferência*; no espaço tridimensional surgem *superfícies de interferência*.

É curioso notar que a equação (16.3) parece violar o princípio de conservação da energia. Contudo, atendendo a que a energia é reforçada nas regiões das franjas luminosas e atenuada nas regiões das franjas escuras, este princípio não deve ser aplicado num só ponto ou região, mas a todo o padrão de interferência.

Para que a interferência se verifique é fundamental a *coerência* mútua das ondas, garantida pela mesma frequência e uma relação constante de fase.

Consideremos duas fontes coerentes S_1 e S_2 e um determinado ponto P. Se os percursos das ondas de S_1 a P e de S_2 a P forem, respectivamente, r_1 e r_2, a diferença de percursos δ será

$$\delta = |r_2 - r_1| \qquad (16.5)$$

Podemos agora exprimir as condições de interferência em termos de δ:

Para a interferência construtiva: $\delta = m\,\lambda$ (16.6)

Para a interferência destrutiva: $\delta = (m + 1/2)\,\lambda$ (16.7)

(sendo m um número inteiro)

4. Experiência de Young

Young utilizou como fonte a luz solar que passava por um pequeno orifício, e fez com que esta atravessasse duas fendas muito próximas (figura 16.2).

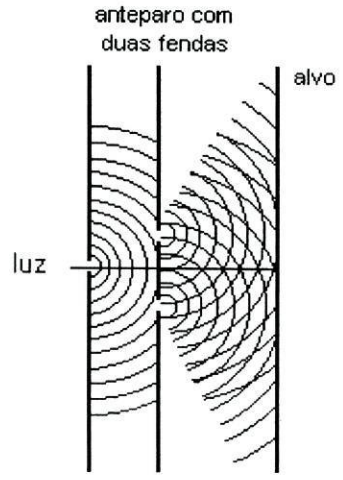


Figura 16.2.
Experiência de Young

A luz incidia então num alvo, originando bandas alternadamente claras e escuras (franjas de interferência).

Seja d o espaçamento entre as duas fendas e suponhamos, para simplificar, que a luz usada era monocromática, de comprimento de onda λ (figura 16.3.).

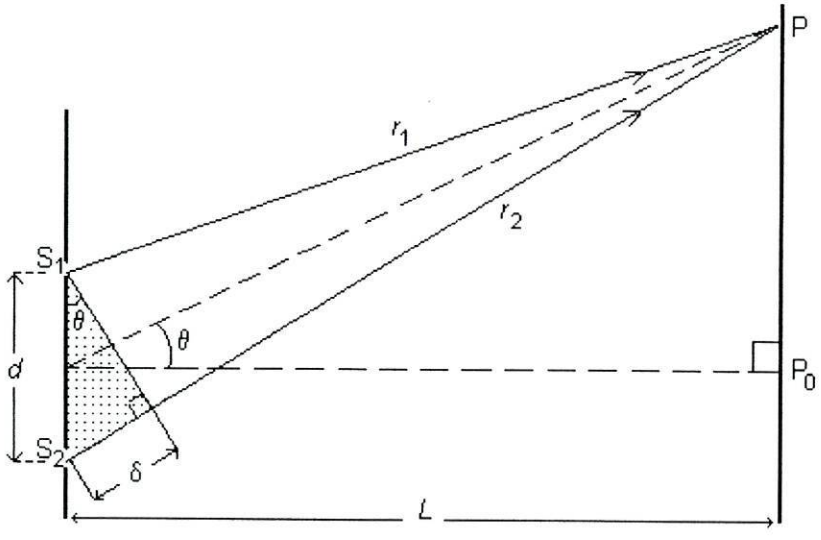


Figura 16.3.
Considerando $L >> d$,
podemos tomar
$\delta \approx d \text{ sen } \theta$

Como se deduz a partir da figura 16.3, as posições das franjas brilhantes e escuras, são, respectivamente, dadas por:

Máximos: $d \text{ sen } \theta = m \lambda$ (16.8)

Mínimos: $d \text{ sen } \theta = (m + 1/2) \lambda$ (16.9)

(sendo m um número inteiro)

No processo de interferência, uma onda não afecta, nem as condições de propagação, nem o comportamento da outra onda [46]. Fora da zona de sobre-posição, ambas se comportam como se não tivessem interferido.

5. Interferência em filmes finos

As cores observadas em bolas de sabão, em películas de óleo, ou em penas de pavão, devem-se à interferência das ondas luminosas reflectidas em ambas as superfícies de um filme fino.

Quando uma onda encontra um meio de maior índice de refracção, a onda reflectida sofre um desfasamento de π. Os raios reflectidos (r) e (r') são coerentes porque resultam do mesmo raio incidente, mas (r), ao contrário de (r'), sofreu um desfasamento de π (figura 16.4).

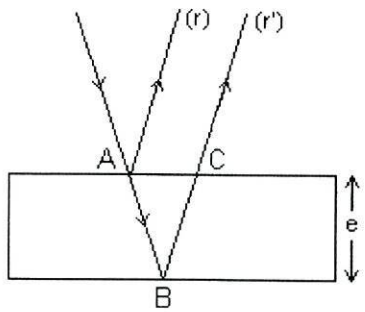


Figura 16.4. Interferência num filme fino

Se os raios forem praticamente perpendiculares à superfície do filme, a diferença de percurso entre eles é igual a $2e$.

Os raios interferirão construtivamente ou destrutivamente de acordo com a relação entre a espessura do filme, que é variável, e o comprimento de onda da luz no filme.

Se a luz incidente for branca, cada uma das cores espectrais produz a respectiva figura de interferência, resultando assim zonas coloridas com as cores espectrais, e outras com misturas de cores.

[46] Se não houver uma interacção não-linear com o meio material onde se dá a propagação.

6. Interferómetro de Michelson

Neste interferómetro, a luz monocromática proveniente de uma fonte extensa, S, é parcialmente reflectida e parcialmente transmitida por um espelho semi-reflector P. A luz reflectida atinge o espelho M_1, sendo enviada por este para os olhos do observador. A luz transmitida atravessa uma lâmina compensadora C e atinge o espelho M_2, que a devolve ao espelho P, sendo então conduzida também para os olhos do observador (figura 15.5).

A lâmina compensadora C tem como função assegurar que ambos os feixes tenham percursos ópticos idênticos no vidro. PM_1 e PM_2 são designados por *braços* do interferómetro.

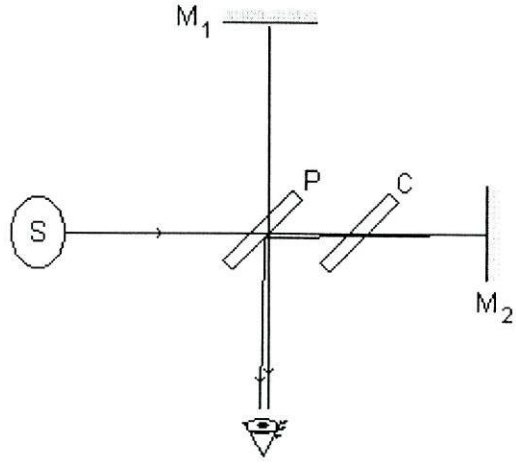


Figura 16.5. Interferómetro de Michelson

O sistema deste interferómetro é equivalente a um filme fino: uma pequena diferença entre as distâncias percorridas por ambos os feixes pode provocar interferência construtiva ou destrutiva.

Se os espelhos M_1 e M_2 estiverem exactamente perpendiculares, o "filme" de ar tem espessura uniforme e observam-se franjas circulares; em caso contrário, observa-se o padrão de interferência característico de um filme em forma de cunha.

O espelho M_1 pode ser deslocado para trás ou para a frente, por meio de um parafuso micrométrico, de modo a ajustar a espessura do "filme".

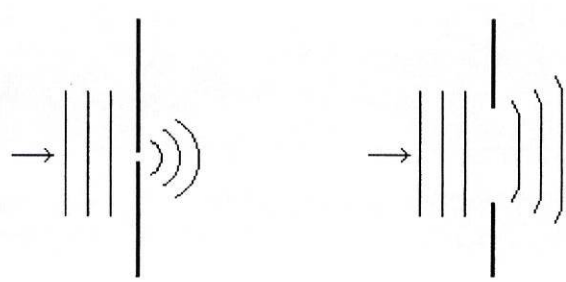
Se M_1 recuar de $\lambda/4$, a luz que se desloca neste braço terá o seu percurso aumentado de $\lambda/2$. Isto corresponde, no padrão de interferência, a uma troca de posição entre as zonas claras e escuras.

O interferómetro pode ser utilizado para medições extremamente precisas de comprimentos. Permite ainda a determinação do índice de refracção de um gás, se for introduzido num dos braços um cilindro transparente contendo uma amostra do mesmo.

7. Difracção por uma fenda simples

Uma onda tem tendência a contornar os bordos dos obstáculos ou das aberturas implicando isso uma deformação da frente de onda e uma variação da amplitude (figura 16.6.a).

Se a abertura for suficientemente grande, quando comparada com o comprimento de onda, a frente de onda na zona central praticamente não é afectada, e o fenómeno pode passar despercebido (figura 16.6.b).



(a) (b)

Figura 16.6. Difracção por um pequeno orifício ou por uma abertura de maiores dimensões

Na difracção de uma onda por uma fenda simples de abertura a, esta pode ser encarada como um conjunto de fontes pontuais.

Na direcção perpendicular à fenda todas as ondas secundárias geradas estarão em fase, e assim, haverá uma região brilhante central (máximo), para $\theta = 0$ (ver figura 16.3).

Neste caso ocorre interferência destrutiva sempre que

Mínimos: $a \text{ sen } \theta = n \lambda$ (16.10)

(sendo n um número natural)

Compare-se esta expressão com a que se refere à interferência de duas fontes coerentes (experiência de Young). [47]

8. Princípio de Babinet

Duas aberturas difractantes dizem-se *complementares* quando as regiões transparentes de uma correspondem às regiões opacas da outra. O princípio de Babinet afirma que os padrões de difracção de duas aberturas complementares são iguais (distribuições de irradiância equivalentes).

Dois exemplos (figura 16.11) são uma fenda simples e um fio de cabelo, ou um orifício circular e um pequeno disco, tal como uma célula sanguínea.

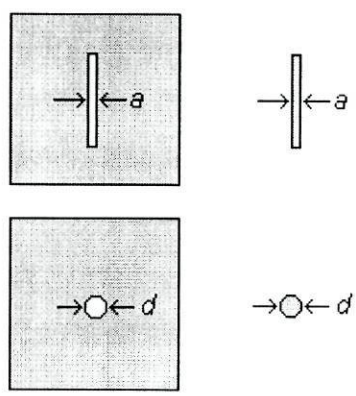


Figura 16.11. Aberturas complementares

9. Interferência e difracção combinadas

Ao abordarmos no ponto 4 a experiência de Young, focámos a nossa atenção na interferência, ignorando deliberadamente a difracção que ocorre em cada uma das fendas.

[47] As posições dos máximos secundários são dadas *aproximadamente* por sen $\theta = (n+1/2)\lambda$, sendo n um número natural.

O que se passa na realidade é que o padrão de difracção determina a distribuição global de luz obtida no ecrã. Podemos dizer que o padrão de interferência tem uma *envolvente* correspondente à difracção (figura 16.12).

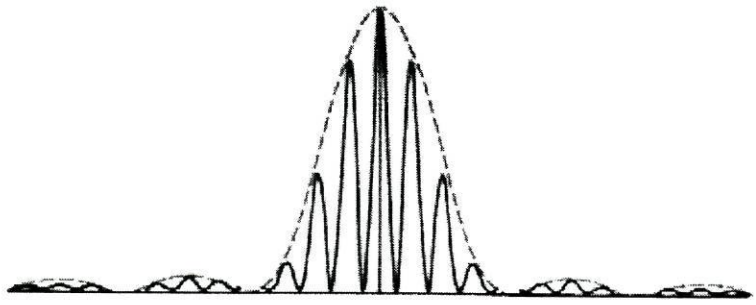


Figura 16.12. Interferência e difracção combinadas

Este efeito pode ser observado utilizando não duas, mas múltiplas fendas. Os padrões de interferência passam a ser diferentes, sendo o máximo central acentuado com o aumento do número de fendas.

Uma rede de difracção apresenta normalmente alguns milhares de fendas distribuídas por uma área de poucos centímetros quadrados. Assim, os máximos principais produzem franjas muito nítidas, enquanto os máximos secundários praticamente não se vêem.

10. Indicações didácticas

A interferência e a difracção encontram-se quase ausentes dos programas do ensino básico e do ensino secundário.

Os aspectos ondulatórios da luz essenciais à respectiva explicação tornam a sua abordagem bastante problemática; contudo, mesmo ao nível básico, o estudo qualitativo destes fenómenos parece ser possível e útil.

Assim, a observação de fenómenos quotidianos de interferência, poderia ser um bom começo: mancha de óleo, bolha de sabão, mica, etc.

Em seguida, seria interessante observar padrões de difracção utilizando um laser (preferencialmente de He-Ne) como fonte, e diversos objectos servindo como

obstáculos/aberturas: fenda estreita, fio metálico, cabeça de alfinete, orifício circular, pequeno disco {*EXP. 16A*}. Poderá observar-se o ponto de Poisson e verificar-se o princípio de Babinet.

Ao nível do ensino secundário, os alunos podem determinar o comprimento de onda de um laser usando uma fenda de abertura conhecida, e verificar o efeito da variação da abertura no padrão de difracção {*EXP. 16B*}.

Conhecido o comprimento de onda do laser, poderão, em seguida, medir a espessura de um cabelo ou o diâmetro de um glóbulo vermelho de sangue {*EXP. 16C*}.

Utilizando duas fendas próximas poderá ser estudada agora a interferência, determinando o espaçamento entre as fendas e verificando o efeito da sua variação no padrão obtido {*EXP. 16D*}.

Com determinados "kits" de fendas múltiplas existentes no mercado, podem ainda comparar-se diversos padrões de difracção e interferência {*EXP. 16E*}.

A influência da frequência da luz na interferência pode ser verificada qualitativamente, cobrindo uma lâmpada cilíndrica de filamento com três filtros (azul, vermelho e verde) e usando uma rede de difracção para observação directa {*EXP. 16F*}.

Finalmente, os alunos do ensino secundário, talvez em Técnicas Laboratoriais de Física, poderiam ter um primeiro contacto com um instrumento de precisão de inegável importância histórica, como o interferómetro de Michelson, caso disponível {*EXP. 16G*}.

BIBLIOGRAFIA

[1] **Abreu, M. C., Matias, L., Peralta, L. F.**, *Física Experimental - Uma introdução*, Presença, Lisboa, 1994

[2] **Albuquerque, W.V., Yoe, H.H., Tobelem, R.M., Pinto, E.P.S.**, *Manual de Laboratório de Física*, McGraw-Hill, São Paulo, 1980

[3] **Almeida, G.**, *Sistema Internacional de Unidades (SI)*, Plátano Editora, Lisboa, 1997

[4] **Alonso, M.**, *Somos muy Conservadores en la Enseñanza de la Física ?*, Lição plenária apresentada na XXVI Reunion Bienal de la Real Sociedad Española de Fisica, Las Palmas de Gran Canaria, Set 1997

[5] **Andersson, B., Kärrqvist, C.**, *How Swedish Pupils, aged 12-15 years, understand light and its properties*, Eur J Sci Edu, **5**, 287-402, 1983

[6] **Annequin et Boutigny**, *Cours de Physique - Préparation aux grandes Écoles scientifiques - OPTIQUE*, Vuibert, Paris, 1973

[7] **Arons, A.**, *The Various Language - An Inquiry Approach to the Physical Sciences*, Oxford University Press, New York, 1977

[8] **Avery, J. H., Ingran, A. W. K.**, *Modern Laboratory Physics*, Heinemann Educational Books, London, 1976

[9] **Bachelard, G.**, *O Novo Espírito Científico*, Edições 70, Lisboa, 1996 (trad. do original de 1934)

[10] **Benson, H.**, *University Physics*, John Wiley & Sons Inc, New York, 1991

[11] **Berkës, I.**, *A Física do Quotidiano*, Gradiva, Lisboa, 1992

[12] **Bernardo, L. M.**, *Introdução à Ciência da Luz (Óptica, Lasers e Visão)*, Departamento de Física, Faculdade de Ciências, Universidade do Porto, 1995 (não publicado)

[13] **Biezunski, M.**, *História da Física Moderna*, Instituto Piaget, Lisboa, 1998

[14] **Bloomfield, L. A.**, *How Things Work - The Physics of Everyday Life*, John Wiley & Sons Inc, New York, 1997

[15] **Braddick, H. J. J.**, *The Physics of Experimental Method*, Chapman & Hall, London, 1956

[16] **Brodin, G.**, *The Role of the Laboratory in the Education of Industrial Physicists and Engineers*, In **Jones, J. G., Lewis, J. L.** (ed.), *The Role of the Laboratory in Physics Education*, Proceedings of the Oxford Conference, Oxford, 1978

[17] **Bruner, J.**, *O Processo da Educação*, Companhia Editora Nacional, São Paulo (trad. não datada do original de 1959)

[18] **Chauvet, F.**, *Teaching Light, Colour and Vision*, Proceedings of the International Conference on Physics Education, Braga, 1993

[19] **Cooke, C.,** *An Introduction to Experimental Physics*, UCL Press, London, 1996

[20] **Daish y Fender**, *Física experimental*, UTEHA, Mexico, 1964

[21] **Driver, R.**, *The Pupil as Scientist ?*, Open University Press, London, 1983

[22] **Driver, R., Guesne, E., Tiberghien, A.**, *Children´s Ideas in Science*, Open University Press, Milton Keynes, Philadelphia, 1985

[23] **Driver, R., Squires, A., Rushworth, P., Wood-Robinson, V.**, *Making Sense of Secondary Science*, Rontledge, London, 1996

[24] **Eylon, B. S., Ronen, M., Langley, D.**, *Responding to Students' Learning Difficulties in Geometrical Optics by Using a Simulation Environment*, Proceedings of the International Conference on Physics Education, Braga, 1993

[25] **Ferreira, J. A., Franco, S.**, *Conceitos Elementares de Óptica Geométrica e sua Aplicação à Óptica da Visão*, Gaz Fís, **18** (2), 6-11, 1995

[26] **Freier, G. D., Anderson, F. J.**, *A demonstration handbook for Physics,* American Association for Physics Teachers, New York, 1981

[27] **French, A. P., Taylor, E.F.**, *An Introduction to Quantum Physics*, The M.I.T. Introductory Physics Series, Van Nostrand Reinhold (UK) Co Ltd, Berkshire, 1983

[28] **Galili, I.**, *Students' conceptual change in geometrical optics*, Int J Sci Edu, **7** (18), 847-868, 1996

[29] **Gamow, G.**, *The Great Physicists from Galileo to Einstein*, Dover Publications, Inc., New York, 1988

[30] **Gilbert, J. K., Watts, D. M.**, *Concepts, Misconceptions and Alternative Conceptions: changing Perspectives in Science Education*, Stu In Sci Edu, **10**, 61--98, 1983

[31] **Giordan, A., Vecchi, G.**, *As Origens do Saber*, Artes Médicas, Porto Alegre, 1996

[32] **Goldberg, L.**, *Teaching Science to Children*, Dover Publications Inc, New York, 1997

[33] **Gonzalez, A. M.**, *Light Stories: A Brief History of Light*, Proceedings of the International Conference on Physics Education, Braga, 1993

[34] **Gunstone, R. F.**, *Two teaching strategies for considering children's science*, Yearbook of the International Council of the Association for Science Education, **2**, 1-12, 1988

[35] **Hanks, A., Hanks, T.,** *Óptica Básica - Manual de Instruções e Guia Experimental para o Modelo OS-8515 da PASCO scientific*, Roseville, 1995

[36] **Hecht, E.**, *Óptica*, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1991

[37] **Hodson, D.**, *Redefining and reorienting practical work in school science*, Sch Sci Rev, **73** (264), Mar 1992

[38] **Hodson, D.**, *Hacia un enfoque más crítico del trabajo de laboratorio*, Enseñanza de las Ciencias, **12** (3), 299-313, 1994

[39] **Hofstein, A., Luneta, N.**, *The role of the laboratory in science teaching: neglected aspects of research*, Rev of Edu Res, **52**, 201-217, 1982

[40] **Jenkins, F. A., White, H. E.**, *Fundamentals of Optics*, McGraw-Hill, New York, 1957

[41] **Jung, W.**, *Fallstudien zur Optik*, Phys Did, **9**, 199-220, 1982

[42] **Júnior, F. R., Santos, J. I. C., Ferraro, N.G., Soares, P. A. T.**, *Os Fundamentos da Física (2 - Termologia, Geometria da Luz e Ondas)*, Editora Moderna, São Paulo, 1982

[43] **Kempa, R. F.**, *Functions of and Approaches to Practical Work in Science*, Proceedings of the Regional Conference in Botswana, Free University Press, Amsterdam, 1988

[44] **Kuhn, T. S.**, *The Structure of Scientific Revolutions*, University of Chicago Press, Chicago, 1962

[45] **La Rosa, C., et al.**, *Commonsense knowledge in optics: preliminary results of an investigation into the properties of light*, Eur J Sci Edu, **6**, 387-397, 1984

[46] **Leite, L., Sá, S.**, *Cor, Óptica e Pintura*, Gaz Fís, **20** (2/3), 17-22, 1997

[47] **Lynch, D. K., Livingston, W.**, *Color and Light in Nature*, Cambridge University Press, Cambridge, 1995

[48] **Máximo, A., Alvarenga, B.**, *Física - Volume 2*, Centro do Livro Brasileiro, Lisboa, sem data

[49] **McDermott, L. C.**, *Physics by Inquiry Vol. I e II*, John Wiley & Sons Inc, New York, 1996

[50] **McDermott, L. C.**, *Tutorials in Introductory Physics*, Prentice-Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 1998

[51] **Mechlova, E.**, *Studying Light with Simple Apparatus*, Proceedings of the International Conference on Physics Education, Braga, 1993

[52] **Michelson, A. A.**, *Studies in Optics*, Dover Publications, Inc., New York, 1995

[53] **Moszkowski, A.**, *Conversations with Einstein*, Horizon Press, 1970

[54] **Nelkon, M., Ogborn, J. M.**, *Practical Physics - Advanced Level*, Heinemann Educational Books, London, 1975

[55] **North Carolina State University Physics Department**, Physics Demoroom, "http://www.physics.ncsu.edu/demoroom/", 1998

[56] **Novak, J. D., Gowin, D. B.**, *Aprender a Aprender*, Plátano, Lisboa, 1996

[57] **Nuffield Foundation**, *Física Básica Nuffield - Guia de Experimentos*, Editorial Reverté, Barcelona, 1974

[58] **Oliveira, M. L., Sousa, A. S.**, *Técnicas Laboratoriais de Física - Bloco I*, Edições ASA, Porto, 1995

[59] **Oliveira, M. L., Sousa, A. S.**, *Técnicas Laboratoriais de Física - Bloco II*, Porto Editora, Porto, 1997

[60] **Osborne, R., Freyberg, P.**, *Learning in Science. The implications of Children's Science*, Heinemann Educational Books, London, 1985

[61] **Pauli, R., Mauad, F., Simão, C.**, *Física Básica 3 (Ondas, Acústica e Óptica)*, E.P.U., São Paulo, 1973

[62] **Pedrotti, F. L., Pedrotti, L. S.**, *Introduction to Optics*, Prentice-Hall, New Jersey, 1996

[63] **Piaget, J., Inhelder, B.**, *The Growth of Logical Thinking*, Rontledge & Kegan Paul, 1958

[64] **Preston, D. W.**, *Experiments in Physics - A Laboratory Manual for Scientists and Engineers*, John Wiley & Sons Inc, New York, 1985

[65] **Preston, D. W., Dietz, E. R.**, *The Art of Experimental Physics*, John Wiley & Sons Inc, New York, 1991

[66] **Rogers, E.**, *Physics for the Inquiring Mind*, Princeton University Press, Princeton, 1960

[67] **Ronchi, V.**, *Optics - The Science of Vision*, Dover Publications Inc, New York, 1991

[68] **Rosmorduc, J.**, *De Tales a Einstein*, Editorial Caminho, Lisboa, 1983

[69] **Rupert Hall, A.**, *All Was Light - An Introduction to Newton's Opticks*, Clarendon Press, Oxford, 1993

[70] **Santos, M. E. V. M.**, *Mudança Conceptual na Sala de Aula*, Livros Horizonte, Lisboa, 1998

[71] **Serway, R. A., Faughn, J. S.**, *College Physics*, Saunders College Publishing, 1995

[72] **Serway, R. A.**, *Physics for Scientists and Engineers*, Saunders College Publishing, 1996

[73] **Shamos, M. H.** (ed.), *Great Experiments in Physics - Firsthand Accounts from Galileo to Einstein*, Dover Publications Inc, New York, 1987

[74] **Shapiro, B. L.**, *What children bring to light: giving high status to learners' views and actions in science*, Sci Edu, **73** (6), 711-33, 1989

[75] **Shayer, M., Adey, P.**, *Towards a Science of Science Teaching*, Heinemann Educational Books, London, 1983

[76] **Shulman, L., Tamir, P.**, *Research on teaching in the natural sciences*, In **Travers, R. M. W.** (ed.), *Second Handbook of research on teaching*, Rand McNally, Chicago, 1973

[77] **Sprott, J. C.**, *Physics Demonstrations - A Sourcebook for Teachers of Physics*, "http://sprott.physics.wisc.edu/demobook/", 1998

[78] **Stead, F. B., Osborne, R. J.**, *Exploring Science Students' Concepts of Light*, Aus Sci Tea J, **26**, 84-90, 1980

[79] **Tasker, R.**, *Children's views and classroom experiences*, Aus Sci Tea J, **27**, 33-37, 1981

[80] **Tyler, F.**, *A Laboratory Manual of Physics*, Edward Arnold (Pub), London, 1970

[81] **U. C. Berkeley Physics Department**, *Physics Lecture Demonstrations*, "http://www.mip.berkeley.edu/physics/", 1998

[82] **University of Oregon Physics Department**, *Physics Demonstration Catalog*, "http://guernsey.uoregon.edu/~phdemo/demo/", 1998

[83] **Verkerk, G., Bouwens, R. E. A.**, *Learning Optics from Seeing Light*, Proceedings of the International Conference on Physics Education, Braga, 1993

[84] **Wall, C. N., Levine, R. B., Christensen, F. E.**, *Physics Laboratory Manual*, Prentice-Hall Inc, New Jersey, 1972

[85] **Whelan & Hodgson**, *Essential Pre-University Physics*, John Murray, London, 1971

[86] **Whittle, R. M., Yarwood, J.**, *Experimental Physics for Students*, Chapman and Hall, London, 1973

[87] **Woolnough, B., Allsop, T.**, *Practical Work in Science*, Cambridge University Press, Cambridge, 1985

[88] **Yip, Din-Yan**, *What's wrong with the eye?*, Sch Sci Rev, **79** (288), 87-91, Mar 1998

[89] **Young, H. D.**, *Fundamentals of Optics and Modern Physics*, McGraw-Hill, New York, 1968

[90] **Zylbersztajn, A., Gilbert, J. K.**, *Does Practice in the Laboratory Fit the Spirit ?*, Aus Sci Tea J, **27** (3), 39-44, 1981