ANTÓNIO JOSÉ TEMUDO PARALTA

ASTRONOMIA A ALTA RESOLUÇÃO ANGULAR COM ÓPTICA ADAPTATIVA E ESTRELAS LASER

DEPARTAMENTO DE MATEMÁTICA APLICADA
FACULDADE DE CIÊNCIAS DA UNIVERSIDADE DO PORTO

António José Temudo Paralta

Astronomia a alta resolução angular com óptica adaptativa e estrelas laser



Departamento de Matemática Aplicada
Faculdade de Ciências da Universidade do Porto
Setembro / 2003

António José Temudo Paralta

Astronomia a alta resolução angular com óptica adaptativa e estrelas laser



Tese submetida à Faculdade de Ciências da Universidade do Porto
para obtenção do grau de Mestre em Ensino da Astronomia

Departamento de Matemática Aplicada
Faculdade de Ciências da Universidade do Porto
Setembro / 2003

Para as minhas estrelas

Margarida, Alexandre e João Pedro

Agradecimentos

O meu bem haja ao Doutor Paulo Jorge Valente Garcia, pessoa afável e de trato simples que caracteriza os grandes homens, pela sua disponibilidade, pelo seu saber, orientações e sugestões que me foi dando ao longo desta dissertação o que me permitiu encarar as aulas de Matemática de um modo diferente, resultando em pleno junto dos alunos.

Uma palavra amiga para o meu colega Jorge Carlos Sousa que mostrou grande disponibilidade e colaboração na concretização das observações astronómicas no CAUP.

Agradecimentos especiais aos meus amigos, professores de línguas estrangeiras, Rui Espinho, Maria José Aragão Martins e Georgina Mendes pela colaboração e tradução de alguns textos e ao meu amigo Eng. Henrique Proença pelos comentários e dicas informáticas.

Para finalizar agradeço à minha esposa e aos meus filhos pelo apoio e encorajamento que me deram no decorrer deste trabalho.

Prefácio sobre o autor

António José Temudo Paralta nasceu em Nisa no ano de 1955. Fez o ensino secundário no Liceu Nacional de Castelo Branco. Frequentou o Instituto Superior Técnico entre 1975 e 1980. Foi monitor de alunos no Lar Académico Militar, em Oeiras, tendo sido responsável pelas salas de estudo dos alunos do ensino secundário. Em 1983 começou a leccionar, a disciplina de Matemática, na Escola Secundária Nuno Álvares em Castelo Branco. No ano seguinte leccionou, a mesma disciplina, na Escola Secundária Amato Lusitano na mesma cidade. Em 1999 concluiu a licenciatura em Matemática (ensino) na Universidade da Beira Interior. Leccionou, ainda, na Escola Secundária com 3º Ciclo de Alcains onde realizou o estágio pedagógico, na Escola Professor Mendes dos Remédios, em Nisa, na Escola EB 2,3/S de Mação e actualmente pertence ao Quadro de Nomeação Definitiva da Escola 2,3/S Ribeiro Sanches, de Penamacor e encontra-se destacado na Escola EB 2,3 João Roiz de Castelo Branco.

Exerceu os cargos de Director de Turma, Coordenador do Ensino Secundário Recorrente (Alcains), Presidente da Assembleia Constituinte do Agrupamento de Escolas Verde Horizonte de Mação, Coordenador dos Directores de Turma do 3º Ciclo na Escola EB 2,3 João Roiz de Castelo Branco.

Resumo

Nesta dissertação caracterizam-se os mecanismos físicos que estão por detrás da perda de qualidade da imagem captada pelos grandes telescópios e os métodos propostos para a recuperar. A compreensão dos fenómenos de interferência e de difracção das ondas luminosas é fundamental para perceber estes mecanismos. A difracção é o desvio sofrido por uma frente de onda ao passar por um obstáculo (tal como uma fenda ou os bordos da objectiva de um telescópio). A interferência é o resultado da sobreposição de duas ondas.

Faz-se uma abordagem geral ao telescópio e seu limite de difracção tendo em conta a natureza turbulenta da atmosfera. A atmosfera apresenta variações locais de temperatura que estão associadas à turbulência atmosférica, apresentando densidades diferentes e variáveis. Como a turbulência atmosférica é menor nos locais altos estes são escolhidos para a instalação dos grandes telescópios. A qualidade da imagem é determinada pelos efeitos atmosféricos para comprimentos de onda visíveis.

O efeito da turbulência atmosférica nas imagens estelares é normalmente separado em dois fenómenos distintos: o seeing e a cintilação. O seeing é o termo usado para descrever mudanças casuais na direcção da luz que entra no telescópio enquanto que a cintilação se refere a flutuações aleatórias na intensidade. Estes efeitos provêm de variações no índice de refracção e distorcem a frente de onda. O seeing e o Strehl são parâmetros quantitativos da qualidade da imagem a ter em conta nos métodos de correcção.

Para a correcção do efeito da turbulência atmosférica existem várias técnicas de imagem de alta resolução angular, como é o caso da interferometria speckle e da óptica adaptativa, sendo esta a mais recente. Um sistema de óptica adaptativa utiliza, como método principal de compensação das perturbações atmosféricas, a deformação de espelhos e permite fazer uma correcção da radiação emitida pela fonte antes de chegar ao detector. Esta é a diferença fundamental entre a OA e outras técnicas de alta resolução como, por exemplo, a interferometria speckle em que a qualidade da imagem é melhorada por meio de processamento das imagens já registadas.

Os astrónomos recorrem às estrelas laser, como uma fase mais avançada da óptica adaptativa, para aumentar a fracção do céu observável, uma vez que a OA necessita de uma referência.

A óptica adaptativa permitiu obter alguns resultados astronómicos observados por alguns telescópios ópticos e infravermelhos.

Em anexo, encontra-se um conjunto de actividades experimentais, realizadas com alunos dos ensinos básico e secundário, que ilustram os fenómenos anteriormente tratados tais como

o movimento ondulatório, a interferência e a difracção de ondas. São também anexados os resultados de uma noite de observação feita no CAUP, onde foi medido o seeing, observada a turbulência e a refracção atmosféricas.

Abstract

In this thesis we start by presenting the physical mechanisms behind the degradation of image quality in large optical telescopes and the procedures used to correct it. The understanding of the phenomena of interference and diffraction of light waves is essential to understand the above mechanisms. The diffraction is the error suffered by wavefront when she goes through an obstacle (as a split or the sides of the telescope's objective). The interference is the result of the superposition two waves.

We present the optical telescope, it's diffraction limit and the limitations introduced by the turbulent atmosphere. The atmosphere presents local temperature and density variations due to it's turbulence. The turbulence effects are smaller in high places and mountains, and therefore these are ideal large telescope locations. The image quality at visible wavelengths is affected by atmospheric effects.

The effect of atmospheric turbulence in stellar images is characterized by two different phenomena: seeing and scintillation. Seeing is used to describe random variations in the direction of the wavefront. Scintillation is used to describe random variation in stellar intensity at the telescope. These effects are due to random local variations of the refraction index in the atmosphere which distort the incoming wavefront. The seeing and Strehl ratio are the figures used to describe the image quality.

To correct the turbulence effects several techniques of high angular resolution are used: speckle interferometry and adaptive optics. An adaptive optics system compensates the atmospheric perturbations by deformable mirrors. The mirrors correct the wavefront perturbations in real-time. This is the fundamental difference between adaptive optics and other techniques such as speckle interferometry, where the compensation is done à posteriori by digital image processing.

Astronomers used laser guide stars in advanced adaptive optics systems to increase the sky coverage, as adaptive optics requires the use of reference stars. Adaptive optics techniques were used to obtain several astronomical results in the optical and infrared.

In an annex we present several experimental activities, which took place with elementary and high-school students , illustrating several phenomena presented in the thesis: wave motion, interference and diffraction. We further present experimental results of an observation run at CAUP where the seeing and atmospheric turbulence and refraction were observed.

Résumé

Dans cette dissertation, on fait la caractérisation de les mécanismes physiques auxquels se doit la perte de qualité de l'image captée par les grands télescopes ainsi que les méthodes proposées pour la récupérer. La compréhension des phénomènes d'interférence et de diffraction des ondes lumineuses est fondamentale pour comprendre ces mécanismes. La diffraction est une déviation subie par un front d'onde en passant par un obstacle (comme une fente ou les rebords de l' objectif d'un télescope). L'interférence est le résultat de la superposition de deux ondes.

On présente le télescope et son limite de diffraction en considérant la nature turbulente de l'atmosphère. L' atmosphère présente des variations locales de température qui sont associées à la turbulence atmosphérique, présentent des densités différentes et variables. Comme la turbulence atmosphérique est inférieure dans les endroits élevés ces locaux sont choisis pour l'installation des grands télescopes. La qualité d'image est déterminée par les effets atmosphériques pour les longueurs des ondes visibles.

L'effet de la turbulence atmosphérique sur les images stellaires est normalement séparé en deux phénomènes distincts: le «seeing» et la scintillation. Le seeing est le terme utilisé pour décrire des changements casuels dans la direction de la lumière qui entre dans le télescope alors que la scintillation se rapporte à des fluctuations aléatoires dans l'intensité. Ces effets proviennent de variations dans l'indice de réfraction.

Le seeing et le Strehl sont des paramètres quantitatifs de la qualité de l'image à considérer dans les méthodes de correction.

Pour la correction de l'effet de la turbulence atmosphérique, il y a plusieurs techniques d'imagerie de haute résolution angulaire, comme c'est le cas de l'interférométrie des tavelures et de l'optique adaptative, celle-ci étant la plus récente. Un système d'optique adaptative utilise comme méthode principale de compensation des perturbations atmosphériques, la déformation de miroirs qui permet de faire une correction de la radiation émise par la source avant d'aboutir au détecteur. Ceci est la différence fondamentale entre l'OA et d'autres techniques de haute résolution comme, par exemple, l'interférométrie des tavelures où la qualité de l'image est améliorée à travers le traitement des images déjà enregistrées.

Les astronomes ont recours aux étoiles laser, comme phase plus avancée de l'optique adaptative, afin d'augmenter la fraction de ciel observable, parce que l'OA nécessite une étoile de référence.

Ces nouvelles techniques de correction ont permis d'obtenir quelques résultats astronomiques observés par quelques télescopes optiques et infrarouges en utilisant l'optique adaptative comme solution pour éliminer les effets de l'atmosphère.

En annexe, nous présentons un ensemble d'activités expérimentales, réalisées avec des élèves de l'enseignement secondaire, qui illustrent les phénomènes antérieurement traités tels que le mouvement ondulatoire, l'interférence et la diffraction d'ondes. En annexe aussi, nous pouvons trouver les résultats d'une nuit d'observation réalisée au CAUP, au cours de laquelle fut mesuré le seeing ainsi que la turbulence et la réfraction atmosphériques.

ÍNDICE

DEDICATÓRIA 3
AGRADECIMENTOS 5
PREFÁCIO SOBRE O AUTOR 6

RESUMO 7
ABSTRACT 9
RESUME 11

1. INTRODUÇÃO 17

2. MOVIMENTOS OSCILATÓRIOS E ONDULATÓRIOS 19

2.1. NOÇÃO DE OSCILADOR 19
2.2. AMPLITUDE 20
2.3. MOVIMENTO HARMÓNICO SIMPLES 20
2.4. NOÇÃO DE ONDA 22
2.5. CLASSIFICAÇÃO DAS ONDAS 23
2.6. EQUAÇÃO DE ONDA 26
2.7. REFLEXÃO DE ONDAS 27
2.8. SOBREPOSIÇÃO DE ONDAS 29

3. INTERFERÊNCIA E DIFRACÇÃO 31

3.1. INTERFERÊNCIA DE ONDAS 31
3.2. ONDAS ESTACIONÁRIAS 33
3.3. DIFRACÇÃO E TEORIA ONDULATÓRIA DA LUZ 36
3.4. DIFRACÇÃO DE FENDA ÚNICA 40
3.5. DIFRACÇÃO NUMA FENDA CIRCULAR 45
3.6. A DIFRACÇÃO E O PRINCÍPIO DA INCERTEZA DE HEISENBERG 47
3.6.1. Comprimento de onda e a hipótese de De Broglie 47
3.6.2. O princípio da Incerteza de Heisenberg 48
3.6.3. O princípio da incerteza e o limite de difracção 50

4. O TELESCÓPIO E SEU LIMITE DE DIFRACÇÃO 51

4.1. INTRODUÇÃO 51
4.1.1. Telescópios refractores 54
4.1.2. Telescópios reflectores 55
4.2. OS GRANDES TELESCÓPIOS 58
4.2.1. Combinação da luz de vários telescópios 60
4.2.2. Comparação entre poder resolvente de um radiotelescópio e um telescópio no óptico 62
4.3. SEEING 63

5. A NATUREZA TURBULENTA DA ATMOSFERA 67

5.1. A ESTRUTURA DA ATMOSFERA 67
5.2. REFRACÇÃO E REFRACÇÃO ATMOSFÉRICA 73
5.2.1. Refracção 73
5.2.2. Refracção atmosférica 74
5.3. TURBULÊNCIA ATMOSFÉRICA 76
5.3.1. Bolhas de ar quente / frio na camada turbulenta 78

5.3.2. Efeitos da turbulência da atmosfera ... *78*
5.3.3. Seeing e cintilação ... *80*
5.4. CINTILAÇÃO DAS ESTRELAS ... 81
5.4.1. A cintilação ... *82*
5.4.2. A agitação ... *83*
5.4.3. A exposição ... *83*
5.5. DEGRADAÇÃO ATMOSFÉRICA DAS IMAGENS ... 83
5.5.1. Seeing e Strehl ... *83*
5.5.2. Tempo de coerência da atmosfera ... *84*

6. CORRECÇÃO DO EFEITO DA TURBULÊNCIA ... 87

6.1. INTERFEROMETRIA "SPECKLE" ... 87
6.2. BREVE HISTÓRIA DA ÓPTICA ADAPTATIVA ... 87
6.2.1. Introdução ... *87*
6.2.2. Astronomia a olho nu ... *90*
6.2.3. Astronomia com telescópios ... *93*
6.3. ÓPTICA ADAPTATIVA ... 95
6.3.1. Conceito ... *95*
6.3.2. Sistemas em funcionamento ... *97*
6.3.3. O problema da cobertura do céu ... *98*
6.3.4. Rayleigh e raios de sódio ... *99*
6.3.5. Anisoplanetismo focal ... *100*
6.3.6. Telescópios terrestres versus telescópios espaciais ... *101*
6.4. ESTRELAS LASER ... 103
6.4.1. Introdução ... *103*
6.4.2. Soluções do problema do tilt ... *104*
6.4.3. Medição do tilt a partir de uma estrela natural ... *105*
6.4.4. Conclusão ... *105*

7. ALGUNS RESULTADOS ASTRONÓMICOS ... 109

7.1. CONTEXTO ... 109
7.2. PUEO ... 112
7.3. HOKUPA'A ... 114
7.4. NAOS-CONICA ... 118

8. ENQUADRAMENTO PEDAGÓGICO E DIDÁCTICO ... 123

8.1. OBJECTIVOS GERAIS ... 123
8.2. ENQUADRAMENTO PEDAGÓGICO ... 123
8.3. ENQUADRAMENTO DOS PROTOCOLOS ... 135
8.4. ENQUADRAMENTO DIDÁCTICO ... 136
8.5. RELATÓRIO DAS ACTIVIDADES EXPERIMENTAIS ... 136
8.6. REFLEXÃO CRÍTICA ... 140

9. CONCLUSÃO ... 145

ANEXO A ... 147

ACTIVIDADE EXPERIMENTAL N.º 1 - ONDAS ... 149
ACTIVIDADE EXPERIMENTAL N.º 2 - REFLEXÃO ... 155
ACTIVIDADE EXPERIMENTAL N.º 3 - REFRACÇÃO ... 159
ACTIVIDADE EXPERIMENTAL N.º 4 - INTERFERÊNCIA ... 163
ACTIVIDADE EXPERIMENTAL N.º 5 - DIFRACÇÃO ... 167

ANEXO B **171**

ACTIVIDADE EXPERIMENTAL N.º 1 – DIFRACÇÃO DE UMA FONTE CIRCULAR 173
ACTIVIDADE EXPERIMENTAL N.º 2 – MEDIR O DIÂMETRO DE UM CABELO 179
ACTIVIDADE EXPERIMENTAL N.º 3 - SIMULAÇÃO DA TURBULÊNCIA ATMOSFÉRICA 185

ANEXO C **189**

O EFEITO DA ATMOSFERA NAS OBSERVAÇÕES ASTRONÓMICAS 191

CRÉDITOS DAS IMAGENS **197**

BIBLIOGRAFIA **199**

1. INTRODUÇÃO

Como consta da descrição da proposta desta dissertação: "*Se observarmos uma estrela a partir da Terra com um grande telescópio e o fizermos no espaço com telescópio idêntico vemos que o tamanho angular da estrela é muito maior na Terra. A causa do aumento de tamanho angular da imagem é a natureza turbulenta da atmosfera terrestre que degrada a precisão angular do telescópio*", abordarei alguns conceitos físicos que nos permitem compreender o que está por detrás da perda de qualidade de imagem obtida pelos grandes telescópios e dos métodos propostos para a recuperar.

Os primeiros capítulos fornecem a base teórica de tais mecanismos físicos onde a luz e as suas interacções com a matéria nos levam ao conhecimento de muitos fenómenos, entre os quais a interferência e a difracção, que permitem interpretar a luz como uma onda. Atendendo à semelhança das descrições físicas e matemáticas dos diferentes tipos de ondas, por simplicidade, concentrar-me-ei, em primeiro lugar, no estudo dos movimentos oscilatórios e ondulatórios referindo alguns exemplos com ondas na água.

No terceiro capítulo ocupar-me-ei da interferência e da difracção tendo em conta que as ondas luminosas se comportam de maneira similar aos outros tipos de ondas.

No quarto capítulo descreverei alguns tipos de telescópios, seguindo-se-lhe um outro capítulo onde descreverei a estrutura da atmosfera terrestre incluindo a turbulência atmosférica causadora da degradação das imagens obtidas pelos telescópios, onde serão referidos alguns parâmetros como o seeing, o Strehl e o tempo de coerência da atmosfera. A nossa atmosfera levanta vários problemas. A sua constituição e dinâmica constante formam obstáculos para quem quer ver mais além. Para os ultrapassar a óptica teve que evoluir dando origem à chamada óptica adaptativa. Assim, no sexto capítulo mencionarei dois métodos utilizados na correcção do efeito da turbulência atmosférica, nomeadamente a interferometria speckle e a óptica adaptativa. Um dos problemas que a óptica adaptativa levanta é o ângulo para o qual as correcções são válidas. Este ângulo normalmente é pequeno e cobre apenas uma área reduzida em torno da estrela analisada. Para ultrapassar esta limitação utilizam-se estrelas laser que têm por finalidade aumentar a cobertura do céu.

No sétimo capítulo apresentarei alguns resultados astronómicos que foram obtidos com alguns dos vários sistemas de óptica adaptativa existentes.

Tendo presente que este trabalho poderá servir como um texto de apoio para alunos e professores do ensino básico e secundário que procuram saber sempre mais sobre Astronomia procurei, dentro das minhas limitações como professor da disciplina de Matemática, realizar

algumas actividades experimentais de forma a motivar os alunos a criarem gosto pela experimentação desenvolvendo nestes o interesse científico. A realização de actividades experimentais, como as que se encontram em anexo, inserem-se num conjunto de metodologias do ensino das ciências, susceptíveis de possibilitar o desenvolvimento de atitudes, capacidades e conhecimentos.

2. MOVIMENTOS OSCILATÓRIOS E ONDULATÓRIOS

Neste capítulo irei introduzir a noção de oscilador, e farei a descrição física e matemática do estudo de ondas. Concentrar-me-ei no estudo dos movimentos ondulatórios que se representam por funções seno e coseno, mas cujos princípios também se aplicam a ondas de formas mais complexas.

As ondas sonoras e as ondas de luz são essenciais à percepção do ambiente à nossa volta porque os nossos olhos e ouvidos são capazes de detectá-las. A descrição física e matemática destes diferentes tipos de ondas são muito similares.

2.1. Noção de oscilador

A entrada para as nossas aulas tem lugar com intervalos de 90 minutos; a festa do Natal tem lugar com intervalos de um ano; a passagem do ponteiro dos minutos de um relógio de pulso pelo número 12 do mostrador tem lugar com intervalos de uma hora. Estes fenómenos repetem-se periodicamente, isto é, assumem as mesmas características com intervalos de tempo iguais. São, por isso, fenómenos periódicos. Uma categoria importante de fenómenos periódicos é constituída pelos movimentos periódicos, como sejam os movimentos de sístole e diástole do coração ou os movimentos das nossas pernas durante a marcha.

Designa-se por movimento periódico todo o movimento que se repete com as mesmas características ao fim de iguais intervalos de tempo. O movimento circular uniforme e o movimento pendular são exemplos de movimentos periódicos. Mas, embora periódicos, estes movimentos são muito diferentes um do outro. Enquanto que o movimento pendular se efectua com mudança de sentido para um e outro lado de uma certa posição, o movimento circular uniforme efectua-se sempre no mesmo sentido.

Ao intervalo de tempo compreendido entre duas passagens sucessivas do móvel pela mesma posição, na mesma direcção e sentido, chama-se *período* do movimento e representa-se por T. A grandeza inversa do período chama-se *frequência*, representa-se por ν, e corresponde ao número de oscilações ou de vibrações efectuadas numa unidade de tempo.

$$\nu = \frac{1}{T}$$

Frequência, ν, é o número de oscilações por segundo, ou seja, é o número de picos de onda que passam num dado ponto, por segundo sendo a sua unidade no Sistema Internacional (SI), o hertz (Hz), deste modo

$$1 \text{ hertz} = 1\text{Hz} = 1 \text{ oscilação por segundo} = 1 \text{ s}^{-1}.$$

Os movimentos periódicos análogos ao movimento pendular, isto é, que mudam periodicamente de sentido chamam-se oscilatórios ou vibratórios e os sistemas que os efectuam denominam-se *osciladores*.

Quando os osciladores são afastados da posição de equilíbrio e, em seguida, abandonados sem velocidade inicial começam a oscilar em torno dessa posição. Diz-se então que o oscilador efectua *oscilações livres* ou *oscilações próprias* e à respectiva frequência chama-se *frequência própria* ν_0.

2.2. Amplitude

A posição de um ponto do oscilador, em cada instante, em relação à posição de equilíbrio, fica definida por uma única coordenada a que se dá o nome de *elongação*. Elongação (linear ou angular) de um ponto do oscilador num dado instante é a abcissa (linear ou angular) do ponto móvel em relação à posição de equilíbrio. Ao valor absoluto da elongação máxima dá-se o nome de *amplitude*. Para oscilações de muito pequena amplitude e na ausência de atritos, o pêndulo elástico e o pêndulo gravítico simples podem ser considerados como osciladores harmónicos simples e o movimento por eles executado como um movimento harmónico simples.

2.3. Movimento harmónico simples

A expressão que permite determinar o valor da elongação de um ponto do oscilador em função do intervalo de tempo decorrido a partir de determinado instante é dada por

$$\boxed{x(t) = x_m \cos(\omega t + \phi)}$$

em que x_m, ω e ϕ são constantes. Sendo x_m a amplitude do movimento visto representar o valor absoluto da elongação máxima ($\pm x_m$) e ϕ uma constante cujo valor depende do instante escolhido para origem dos tempos. Para a constante ω consideraremos uma função periódica $x(t) = x(t+T)$ e como o período da função coseno é igual a 2π, tomando $\phi = 0$ para simplificação de cálculo:

$$x_m \cos \omega t = x_m \cos \omega (t+T) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \omega t + 2\pi = \omega (t+T) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow 2\pi = \omega T \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi \nu$$

À grandeza ω que é igual a $\frac{2\pi}{T}$ chama-se *frequência angular do movimento harmónico simples*. À grandeza $(\omega t + \phi)$ chama-se fase do movimento harmónico simples, no instante t. Ao ângulo ϕ chama-se fase no instante zero ou fase inicial do movimento harmónico simples.

A equação do movimento harmónico simples também pode ser traduzida pela expressão $x(t) = x_m \sin(\omega t + \phi)$ em que há apenas uma diferença de $\frac{\pi}{2}$ radianos na fase inicial.

Por derivação de $x(t) = x_m \cos(\omega t + \phi)$ obtém-se:

$$v(t) = \frac{dx}{dt} = \frac{d}{dt} [x_m \cos(\omega t + \phi)]$$

$$v(t) = -\omega x_m \sin(\omega t + \phi).$$

Derivando, novamente:

$$a(t) = \frac{d}{dt} [-\omega x_m \sin(\omega t + \phi)]$$

$$a(t) = -\omega^2 x_m \cos(\omega t + \phi)]$$

$$a(t) = -\omega^2 x(t).$$

Estas expressões traduzem, respectivamente, a lei das velocidades e a lei das acelerações do movimento harmónico simples, escolhendo, para a origem dos tempos, um instante em que o oscilador passe na posição de equilíbrio, deslocando-se no sentido positivo.

Quando o oscilador atinge as suas posições extremas ($x(t) = \pm x_m$), a sua velocidade anula-se para, nesses instantes, mudar de sentido. A aceleração do oscilador, nesses instantes, tem valores absolutos máximos ($a(t) = \pm\omega^2 x_m$) mas sinal contrário ao da elongação. Nos instantes em que o oscilador passa pela posição de equilíbrio ($x(t) = 0$) a sua velocidade tem valores absolutos máximos ($v(t) = \pm \omega x_m$) e a aceleração é nula, anulando-se também a força elástica que tende a levá-lo à posição de equilíbrio.

O módulo de velocidade aumenta quando o oscilador se move para a posição de equilíbrio (movimento acelerado) e diminui quando o oscilador se afasta dessa posição (movimento retardado).

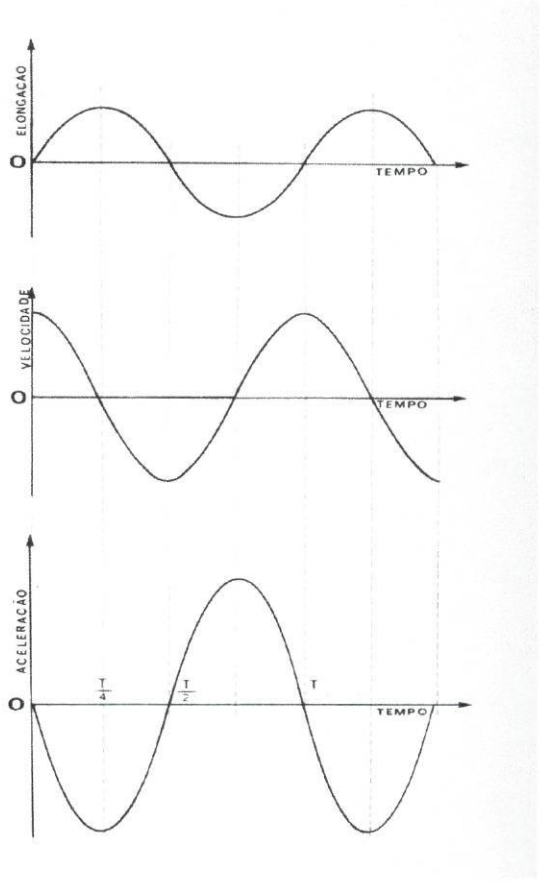


Figura 2.1 - Representações gráficas das funções de elongação, velocidade e aceleração relativas a um mesmo oscilador harmónico.

Um movimento harmónico simples é um movimento cujo período é dado por $T = \frac{2\pi}{\omega}$.

Como $\omega^2 = \frac{K}{m}$ teremos $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{K}}$ sendo m a massa do oscilador pontual e K uma constante que depende das características elásticas do oscilador.

O período de um movimento harmónico simples é independente da amplitude do movimento.

2.4. Noção de onda

Vivemos rodeados de ondas de todas as espécies. A energia que recebemos do Sol é transferida por ondas. É por ondas que comunicamos: ver, ouvir e falar dependem de

fenómenos ondulatórios. Ultra-sons e raios X são ondas usadas no diagnóstico de doenças. Raios γ, lasers e infravermelhos ajudam a tratar problemas de saúde. A análise das ondas sísmicas permite conhecer a estrutura do interior da Terra. Na informação à distância, é por ondas que se comunica: ondas hertzianas produzidas em estações emissoras proporcionam programas de rádio e de televisão; fibras ópticas, submersas, conduzem as ondas que ligam os continentes pelo telefone; satélites de comunicações recebem e transmitem sinais através de feixes hertzianos.

Consideremos as seguintes situações: ao deixarmos cair uma pedra numa superfície de água em repouso, nota-se, na água a formação sucessiva de círculos de raios cada vez maiores; quando tocamos um sino, ouvimos os sons em pontos distantes; quando ligamos um interruptor de um candeeiro, a luz espalha-se na sala. Todas estas situações diferentes apresentam algo de comum: resultam de uma perturbação física produzida num ponto do espaço, num dado instante, que se vai transmitindo através dele com certa velocidade.

Uma perturbação pode consistir num único impulso ou num grupo de impulsos se houver repetição.

A propagação da perturbação constitui um *movimento ondulatório* e diz-se que a perturbação se propaga por *ondas*.

Nem todas as ondas de determinado tipo são iguais: umas têm maior amplitude do que outras; umas propagam-se com maior velocidade do que outras. A grandeza que caracteriza um dado movimento ondulatório é a *frequência* da onda, ou seja, o número de cristas de onda que, por unidade de tempo, passa por um ponto qualquer do meio.

A frequência de uma onda não depende do meio em que se faz a propagação; só depende da origem da perturbação. O valor da frequência de uma onda é igual ao da frequência da origem da perturbação.

2.5. Classificação das ondas

As ondas podem ser classificadas de modos diferentes consoante as características que se pretende evidenciar.

Quanto à natureza, as ondas podem ser ***mecânicas*** ou ***electromagnéticas***.

Entende-se por *meio elástico*, um meio deformável que retoma a forma inicial quando cessa a causa deformadora. Por exemplo, uma corda esticada é um meio elástico a uma dimensão; a superfície livre da água é um meio elástico a duas dimensões; a atmosfera constitui um meio elástico a três dimensões.

As ondas que resultam da propagação através de um meio elástico, inicialmente em repouso, de uma deformação brusca de amplitude bastante pequena para não ultrapassar os limites de elasticidade, chamam-se *ondas mecânicas.*

Se pensarmos que a luz do Sol atravessa um espaço praticamente vazio antes de chegar até nós então, em particular, as ondas visíveis e as de rádio não precisam de nenhum meio material que as transmita. O campo electromagnético variável propaga-se mesmo no vazio. Estas ondas chamam-se *ondas electromagnéticas.*

As ondas podem ser classificadas como ***transversais***, se o movimento ondulatório se propagar perpendicularmente à direcção da vibração e como ***longitudinais*** se o movimento ondulatório se propagar na mesma direcção dessa vibração.

São exemplos de ondas transversais as ondas electromagnéticas, pois os campos eléctrico e magnético são perpendiculares à direcção de propagação. As ondas sonoras são ondas mecânicas, longitudinais que resultam da propagação de alterações de densidade e de pressão num fluido.

De acordo com o número de dimensões em que as ondas se propagam, estas classificam-se como ***unidimensionais*** (obtidas numa mola em hélice, numa corda ou num tubo sonoro), ***bidimensionais*** (obtidas na superfície livre da água) e ***tridimensionais*** (as ondas sonoras, numa atmosfera tranquila e as luminosas).

Quando há propagação de energia num meio elástico, as ondas designam-se por ***ondas progressivas***. Caso contrário, são ***ondas estacionárias***.

Quando se desloca, bruscamente, a extremidade de uma corda esticada, desde uma posição até outra, fazendo-a logo regressar à posição inicial, provoca-se a formação de uma onda única que se propaga ao longo da corda. À chegada da perturbação cada um dos pontos inicia um movimento idêntico ao que se imprimiu à extremidade e volta novamente ao repouso. Diz-se que se produziu um *impulso* ou uma onda única e que o movimento ondulatório é *aperiódico* porque os diferentes pontos do meio não são perturbados periodicamente.

Se continuarmos a agitar a extremidade da corda, num e outro sentido, produz-se uma sucessão de ondas que se designa por *trem de ondas.* Se o movimento comunicado à extremidade da corda for periódico, então produz-se um *trem de ondas periódicas.* No caso particular de a origem estar animada de um movimento vibratório sinusoidal, isto é, se a origem constituir um oscilador harmónico simples, diz-se que as ondas propagadas no meio são ***ondas periódicas sinusoidais***.

Consideremos um fluido homogéneo e isotrópico no qual imaginaremos uma esfera cujo volume supomos variar periodicamente. As variações de volume da esfera produzirão, no

meio em que se encontra, uma onda periódica cuja propagação se efectua com igual velocidade em todas as direcções. As ondas assim consideradas a três dimensões dizem-se ***ondas esféricas uniformes***. Chama-se *superfície de onda* ou *frente de onda* a qualquer superfície esférica de um meio elástico, concêntrica com a origem, cujos pontos entram em vibração num mesmo instante. Chama-se *raio de onda* a qualquer linha normal à superfície de onda, em cada ponto. O raio de onda indica a direcção de propagação da onda. Para regiões muito afastadas da origem da perturbação, as superfícies de onda das ondas esféricas podem considerar-se, numa extensão apreciável, como sendo *planas*. Como os raios de onda são então linhas paralelas corresponde, a estas ondas, uma única direcção de propagação. As ondas que se obtêm num fluido quando a origem da perturbação é plana são ***ondas planas***.

Se o movimento ondulatório se realiza em condições tais que apenas interessa considerar duas dimensões designaremos por *linhas de onda* em vez de superfícies de onda. Se as linhas de onda forem rectilíneas, as ondas dizem-se planas. Se as linhas de onda forem circunferências, as ondas dizem-se circulares.

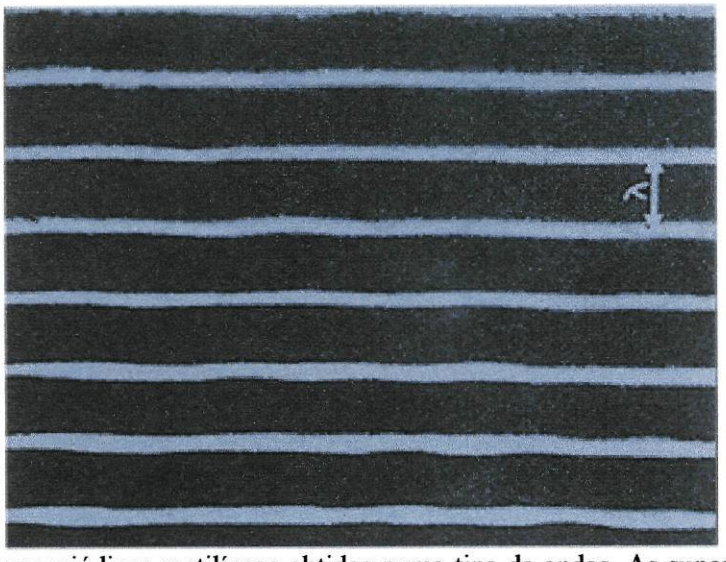


Figura 2.2 - Ondas periódicas rectilíneas obtidas numa tina de ondas. As superfícies de onda são linhas rectas.

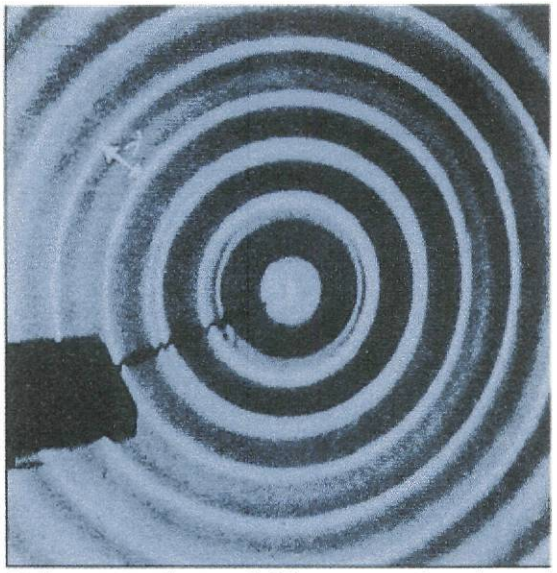


Figura 2.3 – Ondas periódicas circulares obtidas numa tina de ondas. As superfícies de ondas são circunferências.

2.6. Equação de onda

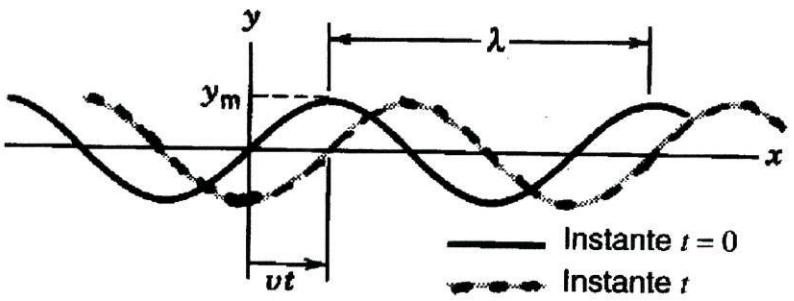


Figura 2.4 – No instante t , a onda percorre a distância $x = \upsilon t$, para a direita. As duas ondas têm forma sinusoidal.

Podemos representar uma onda por $y(x,0) = f(x)$ onde $f(x)$ é uma função que descreve a forma da onda. Suponhamos que a forma da onda não muda enquanto a onda se propaga. A velocidade de fase é a velocidade de progressão da onda. Chama-se velocidade de fase porque indica a velocidade com que uma dada crista, um vale ou uma outra fase qualquer da onda progride. Para um instante qualquer t, a onda é descrita por $y(x,t) = f(x - \upsilon t)$. Consideremos que qualquer fase da onda se propaga segundo a equação $x - \upsilon t$=constante. Se derivarmos a equação que caracteriza o movimento de fase de onda, virá

$$\frac{dx}{dt} - \upsilon = 0 \Leftrightarrow \frac{dx}{dt} = \upsilon .$$

Se a onda se mover em sentido contrário teremos $-\upsilon$ em vez de υ.

Uma onda transversal sinusoidal é definida por $y(x,0) = y_m \sin\frac{2\pi}{\lambda}x$. Onde y_m é a amplitude da onda sinusoidal. Se a onda se propagar no sentido positivo com velocidade υ, a equação de onda é

$$y(x,t) = y_m \sin\frac{2\pi}{\lambda}(x - \upsilon\ t)$$

O *período* T da onda é o tempo necessário para que qualquer ponto , de abcissa x, complete um ciclo do movimento transversal. A onda percorre a distância υT, que corresponde a um comprimento de onda $\lambda = \upsilon T$. O inverso do período chama-se *frequência* e representa-se por v.

A equação de onda pode ser representada por $y(x,t) = y_m \sin 2\pi\left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T}\right)$.

Atendendo ao *número de onda* κ, que é uma grandeza angular, dada em rad/m, $\kappa = \frac{2\pi}{\lambda}$ e à *frequência angular* ω, dada em rad/s , $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi v$, a equação de onda virá

$$y(x,t) = y_m sin(kx - \omega t).$$

Mas se a onda se propagar em sentido contrário, virá

$$y(x,t) = y_m sin(kx + \omega t).$$

2.7. Reflexão de ondas



Figura 2.5 – Reflexão

Quando uma onda se propaga num determinado meio e atinge o limite desse meio, reflecte-se. A reflexão é uma propriedade comum a todas as ondas. O eco, por exemplo,

consiste na reflexão das ondas sonoras. É com base na reflexão de ultra-sons que se obtêm as ecografias e que, nos navios se faz a pesquisa de obstáculos e de cardumes com o sonar.

Para a reflexão de ondas num meio unidimensional poderemos considerar o caso de uma corda fixa e de uma corda livre. No primeiro caso a elongação em cada ponto, quando passa o pulso de onda, tem sentido oposto antes e depois da reflexão. No caso da corda livre, a elongação em cada ponto, quando passa o pulso de onda, tem o mesmo sentido antes e depois da reflexão.

Num meio bidimensional com uma tina de ondas podemos criar ondas planas e fazê-las reflectir numa barreira oblíqua à direcção das ondas. A análise da reflexão permite concluir que o ângulo de incidência i (formado por qualquer raio das ondas incidentes com a perpendicular no ponto de incidência) é igual ao ângulo de reflexão r (formado por qualquer raio das ondas reflectidas com a perpendicular no ponto de incidência).

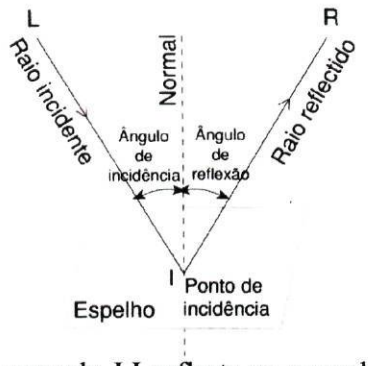


Figura 2.6 – O raio que incide segundo LI reflecte-se segundo IR. Do mesmo modo, um raio que incida segundo RI reflectir-se-á segundo IL.

O valor da velocidade escalar de propagação, V, de uma onda transversal, de pequena amplitude, numa corda homogénea, esticada, depende somente do valor da tensão, T, da corda e do valor da massa da corda por unidade de comprimento μ,

$$V = \sqrt{\frac{T}{\mu}} \quad \text{ou} \quad V = K\sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

sendo K uma constante numérica, sem dimensões.

Se a amplitude do movimento for pequena, a velocidade de propagação de um movimento ondulatório, transversal, ao longo de uma corda, homogénea e esticada, é independente da frequência desse movimento.

Sempre que o meio onde se propagam as ondas é tal que a velocidade de propagação não depende da frequência do movimento ondulatório, diz-se que o meio é *não dispersivo*.

A velocidade de propagação de um movimento ondulatório, sinusoidal, à superfície de um líquido, além de depender das propriedades do meio, depende também da frequência do movimento ondulatório e do comprimento de onda da onda no meio considerado, ao contrário do que se verifica numa corda homogénea, esticada. Neste caso, o meio diz-se *dispersivo*, isto é, as ondas propagam-se no meio tal que a velocidade de propagação depende da frequência da onda.

2.8. Sobreposição de ondas

Quando escutamos uma orquestra sinfónica, apesar de ser complexo conseguimos distinguir o som produzido por cada um dos instrumentos individualmente. O mesmo acontece com os electrões que nas antenas de rádio e televisão, são excitados por um grande número de sinais vindos de diversos centros de transmissão, mas no entanto, conseguimos sintonizar cada uma das estações em particular, sendo o sinal recebido de uma estação, em princípio, o mesmo que receberíamos se todas as outras estações deixassem de transmitir. Os exemplos anteriores mostram o princípio da sobreposição de ondas, isto é, se várias ondas se combinam numa região do espaço, o deslocamento de qualquer partícula nessa região, é a soma vectorial dos deslocamentos que cada onda provocaria se actuasse sozinha em qualquer instante de tempo.

Consideremos duas ondas que percorrem simultaneamente uma mesma corda esticada. Se cada onda se propaga sozinha na corda, os deslocamentos causados nesta seriam $y_1(x,t)$ e $y_2(x,t)$. O deslocamento na corda esticada, quando ambas as ondas se propagam, é $y(x,t) = y_1(x,t) + y_2(x,t)$. No caso de ondas mecânicas, em um meio elástico, o princípio da sobreposição é válido sempre que as forças variem linearmente com o deslocamento. Quando os impulsos se sobrepõem, o deslocamento da corda é a soma algébrica dos deslocamentos individuais que seriam causados devido a cada impulso separadamente como exige a equação $y(x,t) = y_1(x,t) + y_2(x,t)$. É o caso de podermos ouvir duas pessoas a falarem simultaneamente, sem haver distorção do som.

Quando duas ou mais ondas diferentes, com amplitudes e comprimento de ondas diferentes, estão presentes simultaneamente num meio, podemos aplicar o princípio da sobreposição em cada ponto e obteremos um complexo padrão de onda $y(x,t)$ que não se parece com as ondas componentes. A importância do princípio da sobreposição baseia-se no facto de que, se ele for válido, a análise de um movimento ondulatório complicado pode ser feita através da combinação de ondas simples. O matemático francês Jean Baptiste Fourier

(1768 – 1830) mostrou que qualquer movimento periódico de uma partícula pode ser representado como uma combinação de movimentos harmónicos simples. Se $y(x)$ representar a forma de onda num instante de tempo particular de uma fonte de ondas cujo comprimento de onda é λ, podemos representar a onda como uma série de Fourier de ondas sinusoidais,

$$y(t) = -\frac{A_1}{\pi} sin\omega t - \frac{A_2}{2\pi} sin2\omega t - \frac{A_3}{3\pi} sin3\omega t \ldots \text{ onde } \omega = \frac{2\pi}{T}.$$

Se o movimento não fosse periódico, como no caso de um impulso, a soma seria substituída por um integral, o integral de Fourier. Qualquer movimento de uma fonte de ondas pode ser representado como a sobreposição de movimentos harmónicos simples e qualquer forma de onda gerada pode ser analisada como uma combinação de componentes que individualmente são ondas harmónicas simples.

3. INTERFERÊNCIA E DIFRACÇÃO

Neste capítulo continuarei o estudo de ondas mecânicas referindo exemplos de ondas na água e ondas sonoras tendo presente que os princípios desenvolvidos também se aplicam, de igual modo, às ondas de luz que experimentam a interferência.

Concentrar-me-ei, ainda, nos fenómenos de difracção e de interferência em que a luz encontra obstáculos (ou aberturas) cujos tamanhos são comparáveis ao seu comprimento de onda. A difracção apresenta efeitos pouco desejáveis, como a dispersão da luz quando penetra na abertura de um telescópio, o que limita a sua capacidade de resolver estrelas que parecem estar próximas umas das outras.

3.1. Interferência de ondas

Quando duas fontes pontuais vibram na superfície da água, diz-se que há interferência num ponto da superfície, quando este ponto é atingido por duas ou mais ondas ao mesmo tempo. Se estas ondas forem de pequena amplitude, a vibração resultante no ponto em causa pode ser descrita pelo princípio de sobreposição das ondas, isto é, as elongações em cada ponto devidas às várias ondas, adicionam-se.



Figura 3.1 - Figura de interferência.

Se as duas fontes forem ***síncronas*** as suas frequências são iguais. Se as fontes oscilarem com a mesma fase, as ondas provenientes dessas fontes, ao sobreporem-se em cada ponto, ou estão em fase ou têm uma diferença de fase constante. As fontes dizem-se fontes ***coerentes***. É o que acontece na tina de ondas, porque é o mesmo oscilador que põe a vibrar as duas fontes.

A interferência diz-se ***construtiva*** num certo ponto quando se sobrepõem nesse ponto ondas em fase: a um pico (ou vale) de uma onda sobrepõe-se outro pico (ou vale) da outra.

A interferência diz-se ***destrutiva*** num certo ponto quando se sobrepõem nesse ponto ondas em oposição de fase: a um pico (ou vale) de uma onda sobrepõe-se um vale (ou um pico) de outra.

Consideremos o caso geral de duas ondas, cujas constantes de fase são ϕ_1 e ϕ_2. As equações para as duas ondas são:

$$y_1(x,t) = y_m \sin(kx - \omega t - \phi_1)$$

e

$$y_2(x,t) = y_m \sin(kx - \omega t - \phi_2).$$

Aplicando o princípio da sobreposição de ondas :

$$y(x,t) = y_1(x,t) + y_2(x,t)$$

$$y(x,t) = y_m [\sin(kx - \omega t - \phi_1) + \sin(kx - \omega t - \phi_2)].$$

Usando a igualdade para a soma dos senos de dois ângulos

$$\sin A + \sin B = 2 \sin \frac{A+B}{2} \cos \frac{A-B}{2}$$

$$y(x,t) = \left[2y_m \cos(\frac{\Delta\phi}{2}) \right] \sin(kx - \omega t - \phi')$$

onde $\phi' = \frac{\phi_1 + \phi_2}{2}$. A grandeza $\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1$ é a chamada *diferença de fase* entre as duas ondas.

A onda resultante corresponde a uma nova onda cuja frequência é a mesma das componentes, mas com a amplitude igual a $2y_m \left| \cos\frac{\Delta\phi}{2} \right|$. Se $\Delta\phi = 0$, a amplitude resultante será $2y_m$ e a equação $y(x,t)$ reduz-se a $y(x,t) = 2y_m \sin(kx - \omega t - \phi')$, isto é, as duas ondas têm a mesma fase em todos os pontos e a crista de uma onda coincide com a crista da outra, assim como os vales, o que implica interferência construtiva total e a amplitude resultante é o dobro da amplitude de cada onda. Se $\Delta\phi = 180°$ a amplitude resultante virá igual a zero, ou seja, a crista de uma onda coincide com o vale da outra e a amplitude resultante será nula, correspondendo à interferência destrutiva total.

Adicionando duas ondas sinusoidais com o mesmo comprimento de onda e a mesma amplitude resulta sempre uma onda sinusoidal com o mesmo comprimento de onda, pode-se também adicionar componentes que tenham o mesmo comprimento de onda e amplitudes

diferentes. A resultante será uma onda sinusoidal com o mesmo comprimento de onda, mas com a amplitude resultante mais complexa.

3.2. Ondas estacionárias

Considerámos os efeitos de sobreposição de duas ondas com a mesma amplitude e frequência que se moviam no mesmo sentido. Mas qual será o efeito se as duas ondas se moverem em sentidos contrários?

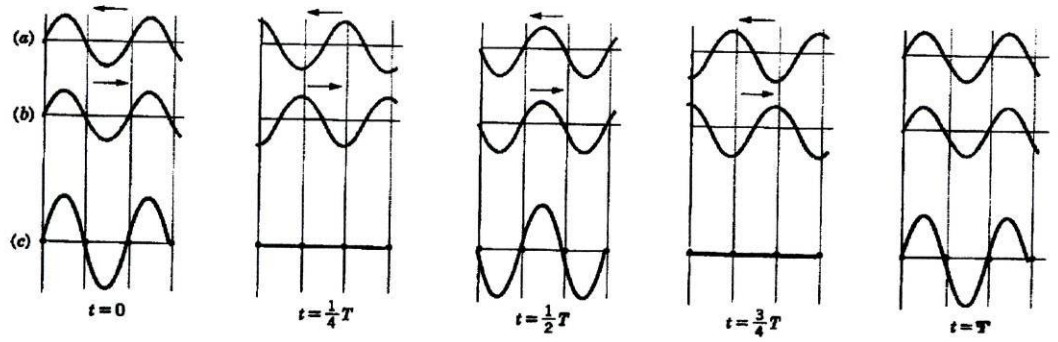


Figura 3.2 – a) e b) Duas ondas progressivas com o mesmo comprimento de onda e a mesma amplitude e movendo-se em sentidos contrários.
c) A sobreposição das duas ondas em instantes de tempo diferentes.

Observa-se que certos pontos, equidistantes uns dos outros, estão sempre em repouso por corresponderem a pontos de interferência destrutiva (***nodos***), enquanto outros pontos, também equidistantes uns dos outros, estão animados de movimento vibratório de amplitude máxima e correspondem a pontos de interferência construtiva (***antinodos ou ventres***). A este sistema de *nodos* e *antinodos* dá-se o nome de ***onda estacionária.***

As ondas estacionárias podem ser representadas pelas equações :

$$y_1(x,t) = y_m \sin(kx - \omega t)$$

$$y_2(x,t) = y_m \sin(kx + \omega t).$$

A resultante pode ser escrita

$$y(x,t) = y_1(x,t) + y_2(x,t)$$

$$y(x,t) = y_m sin(kx - \omega t) + y_m sin(kx + \omega t).$$

Usando, novamente, a igualdade para a soma dos senos de dois ângulos

$$\sin A + \sin B = 2 \sin \frac{A+B}{2} \cos \frac{A-B}{2}$$

Virá a equação

$$y_m(x,t) = [2y_m \sin kx]\cos\omega t$$

que descreve uma onda estacionária, mas não pode representar uma onda progressiva visto que x e t não aparecem na combinação exigida $x - vt$ ou $x + vt$, isto é, na forma $y(x,t) = f(kx + \omega t)$.

Repare-se que numa qualquer posição x, uma partícula executa um movimento harmónico simples ao longo do tempo e todas as partículas vibram com a mesma frequência angular ω. Numa onda progressiva, cada partícula da corda vibra com a mesma amplitude e numa onda estacionária a amplitude não é a mesma para partículas diferentes mas varia com a localização x de cada partícula.

A distância entre dois nodos consecutivos ou entre dois antinodos (ventres) consecutivos é igual a $\frac{\lambda}{2}$ e a distância entre um nodo e um antinodo vizinho é igual a $\frac{\lambda}{4}$.

A amplitude $|2y_m \sin kx|$ toma o valor máximo de $2y_m$ nos pontos onde $kx = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}, \frac{5\pi}{2}, \ldots$ ou $x = \frac{\lambda}{4}, \frac{3\lambda}{4}, \frac{5\lambda}{4}, \ldots$. Estes pontos são os antinodos e estão separados entre si por meio comprimento de onda.

A amplitude é zero quando os valores de kx são $\pi, 2\pi, 3\pi, \ldots$ ou $x = \frac{\lambda}{2}, \lambda, \frac{3\lambda}{2}, \ldots$. Estes pontos são os nodos e estão igualmente separados por meio comprimento de onda.

A separação entre um nodo e um antinodo adjacente é um quarto do comprimento de onda. Os nodos estão em repouso não havendo transmissão de energia para a esquerda ou para a direita, porque não há fluxo de energia através dos nodos. A energia permanece estacionária na corda, embora se alterne entre energia cinética de vibração e energia potencial elástica. Quando todos os antinodos têm deslocamento máximo, a energia é armazenada apenas como energia potencial, em particular como energia potencial elástica associada ao esticar da corda.

Uma maneira fácil de se obter uma onda estacionária é sobrepor uma onda progressiva numa corda com a onda reflectida que se move no sentido oposto.

Consideremos um impulso que percorre uma corda esticada fixa numa extremidade.

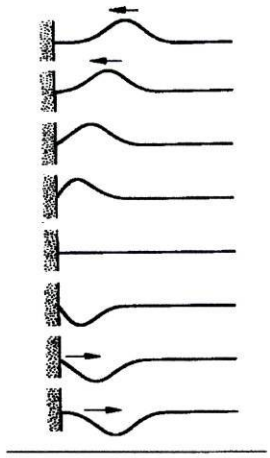


Figura 3.3 – A fase do impulso reflectido é invertida, sendo de 180° a diferença de fase entre o impulso incidente e o reflectido.

Quando o impulso chega à extremidade, exerce uma força para cima no suporte, que é rígido e portanto não se move. De acordo com a terceira lei de Newton, o suporte exerce uma força igual mas de sentido oposto na corda. Essa reacção gera um impulso que parte do suporte e se move na corda de volta à extremidade livre, em sentido oposto ao do impulso incidente. Este impulso foi reflectido na extremidade fixa da corda. Se um trem de ondas incide na extremidade fixa, gera-se um trem de ondas reflectido. O deslocamento de qualquer ponto na corda será a soma dos deslocamentos causados pelas ondas incidente e reflectida. Quando a extremidade é fixa, essas duas ondas devem sempre produzir interferência destrutiva nesse ponto, de modo que o deslocamento seja nulo. Assim, a onda reflectida está sempre 180° fora de fase com a onda incidente. Uma onda transversal sofre uma mudança de fase de 180° quando se reflecte numa extremidade fixa.

Consideremos, agora, a reflexão de um impulso numa extremidade livre.

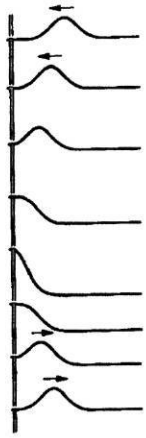


Figura 3.4 – A fase da onda reflectida não muda em relação à fase da onda incidente.

A corda está presa num anel para que deslize sem atrito ao longo de um suporte transversal. Quando o impulso aí chega, ele exerce uma força no elemento de corda ali situado. Esse elemento é acelerado e, como no caso de um pêndulo, vai além do seu ponto de equilíbrio e exerce uma força de reacção na corda. Essa reacção gera um impulso que se move ao longo da corda no sentido oposto ao do impulso incidente. Houve uma reflexão do impulso no extremo que está livre para se movimentar. O extremo livre sofre o deslocamento máximo das partículas da corda; um trem de ondas incidente e outro reflectido devem interferir construtivamente neste ponto para que ocorra um máximo. Neste ponto a onda reflectida está sempre em fase com a onda incidente. Numa extremidade livre, uma onda transversal é reflectida sem mudança de fase.

3.3. Difracção e teoria ondulatória da luz

Ao desvio ou dispersão de ondas que encontram um objecto no seu trajecto chama-se *difracção*.

A difracção ocorre com todos os tipos de ondas. As ondas sonoras são defractadas por objectos comuns e, como resultado, podemos ouvir sons mesmo que não estejamos alinhados com as suas fontes; podemos ouvir atrás de uma porta, por exemplo, devido à difracção das ondas sonoras. Para que a difracção seja facilmente detectada o tamanho do objecto deve ser da ordem do comprimento de onda das ondas incidentes. No caso das ondas luminosas, a difracção passa despercebida aos nossos olhos porque os espaços entre os obstáculos que a luz encontra no seu trajecto, têm dimensões lineares muito superiores aos valores do comprimento de onda λ.

Os efeitos de difracção dependem da largura l do obstáculo e do comprimento de onda λ, do movimento ondulatório, sendo tanto mais apreciáveis quanto maior for o valor da razão $\frac{l}{\lambda}$.

A difracção apresenta efeitos indesejáveis, como a dispersão da luz quando penetra na abertura de um telescópio limitando a sua capacidade de resolver estrelas que parecem estar próximas umas das outras.

Quando a luz passa através de uma fenda estreita, os feixes de luz não só se alargam para além da sombra geométrica da fenda, mas também dão origem a uma série de bandas claras e escuras alternadas, semelhantes a *franjas de interferência.*

As ondas luminosas provenientes de fontes distintas ou mesmo de partes diferentes da mesma fonte, ao encontrarem-se num ponto qualquer, combinam-se de acordo com o

princípio da sobreposição que foi estudado para as ondas mecânicas. No caso de duas ondas atingirem um ponto desfasadas de um número inteiro de comprimento de onda, há interferência construtiva e a amplitude da vibração resultante é máxima e igual à soma das amplitudes. Por outro lado se as duas ondas atingirem um ponto desfasadas de um número ímpar de meios comprimentos de ondas, há interferência destrutiva e a amplitude da vibração resultante é mínima e igual à diferença das amplitudes.

Da interferência das ondas luminosas em pontos de um alvo resultam franjas de interferência, que são formadas por manchas alternadamente claras (interferência construtiva) e escuras (interferência destrutiva).

Para que se observem franjas de interferência, torna-se indispensável que as duas fontes luminosas sejam *coerentes*, isto é, emitam luz aproximadamente monocromática e com uma diferença de fase constante nos pontos de origem. Temos fontes coerentes de luz visível como, por exemplo, o laser.

O aparecimento das franjas de interferência é uma forte evidência da natureza ondulatória da luz.

Mostra-se que a forma dos padrões de interferência exige também que a luz se propague na forma de ondas.

Embora a difracção já fosse conhecida na época de Huygens e Newton, nenhum deles acreditava que ela evidenciasse a natureza ondulatória da luz. Segundo Newton a luz era constituída por pequenos corpos (corpúsculos) que se deslocavam em linha recta com grande velocidade. Esta teoria explicava a propagação rectilínea, a reflexão e a refracção. Quanto a esta última, admitia Newton que os corpúsculos eram fortemente atraídos pelo vidro e pela água e que, quando se aproximavam da superfície de separação destes meios, recebiam um impulso que fazia aumentar a componente do momento linear perpendicular à superfície, fazendo-os aproximar da normal. Esta teoria previa que a velocidade da luz fosse maior no vidro e na água.

Por volta de 1680, surgiu a Teoria Ondulatória de Huyghens, que considerava a luz como uma onda. Também explicava a reflexão e a refracção mas, para esta, previa uma velocidade da luz menor no vidro e na água do que no ar.

Os opositores da Teoria Ondulatória argumentavam que a luz não era uma onda porque, propagando-se no vazio, qual era o meio material que a transmitia? Então, nos séculos XVII e XVIII, imaginou-se a existência de um fluido invisível que penetrava em toda a matéria e enchia todo o espaço, a que se chamou «éter», responsável pela propagação das ondas luminosas. Faltavam, aos defensores da Teoria Ondulatória, as provas experimentais da

interferência da luz, fenómeno que ocorria com as outras ondas, uma vez que, para a difracção, que era observável, os seguidores de Newton admitiam que os corpúsculos se dispersavam dos bordos das fendas, embora nunca tenham conseguido aprofundar como é que os raios de luz inflectem e se separam em franjas. Newton reconhecia que a Teoria Ondulatória explicava as cores formadas pelas lâminas delgadas, mas recusou-a devido à evidência da propagação rectilínea da luz. Na época, o prestígio de Newton fez com que a Teoria Corpuscular fosse aceite durante mais de um século.

Em 1801, Thomas Young fez a primeira experiência com sucesso sobre interferência da luz, tendo medido o comprimento de onda médio da luz branca. Mas o seu trabalho só foi conhecido quando o físico francês Fresnel o desenvolveu, através de experiências sobre difracção e interferência, e lhe forneceu consistência matemática. Foram os inesperados resultados obtidos (para os defensores da Teoria Corpuscular) na experiência da difracção em obstáculos que convenceram os físicos da época que a luz era uma onda. Nesta experiência colocou-se um alvo entre uma fonte luminosa monocromática e um obstáculo circular, tendo surgido um ponto brilhante no centro da sombra geométrica.

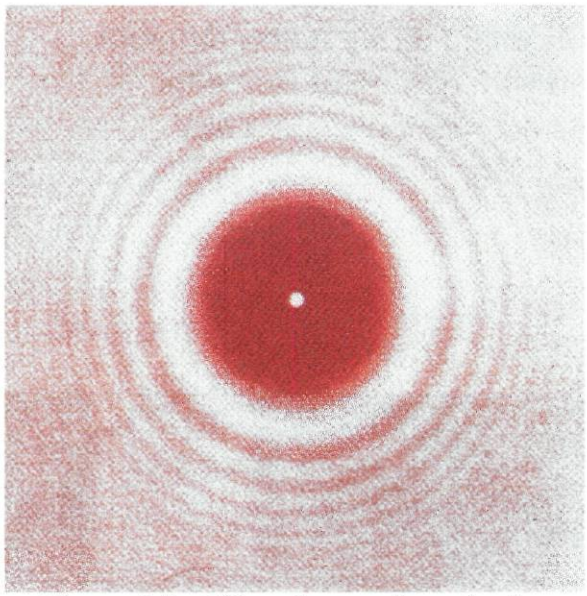


Figura 3.5 – Difracção num disco circular.

Fresnel deduziu que a propagação rectilínea é o resultado do comprimento de onda muito curto da luz. Por volta de 1820, Young e Fresnel explicaram, com base na Teoria Ondulatória, a polarização da luz e assim demonstraram que as ondas luminosas são transversais.

Quando, em 1850, Foucault mediu a velocidade da luz na água e demonstrou que era menor que no ar, a Teoria Corpuscular de Newton foi definitivamente abandonada.

A necessidade da existência do "éter" desapareceu quando o físico escocês Maxwell (1831-1879) sugeriu, em 1864, que a luz era uma onda electromagnética e consistia num campo eléctrico e num campo magnético variáveis. No fim do século XIX, a Teoria Electromagnética de Maxwell unificou a Electricidade, o Magnetismo e a Luz.

Ao observarmos os limites da sombra produzida por um objecto, veremos que não há separação nítida entre luz e sombra. Tal como as ondas de água, a luz contorna obstáculos, isto é, difracta-se. A difracção observa-se melhor com fontes luminosas pequenas. Se, por exemplo, colocarmos entre uma fonte luminosa monocromática e um alvo o gume rectilíneo de uma lâmina de barbear, a luz da fonte espalha-se para a sombra geométrica.

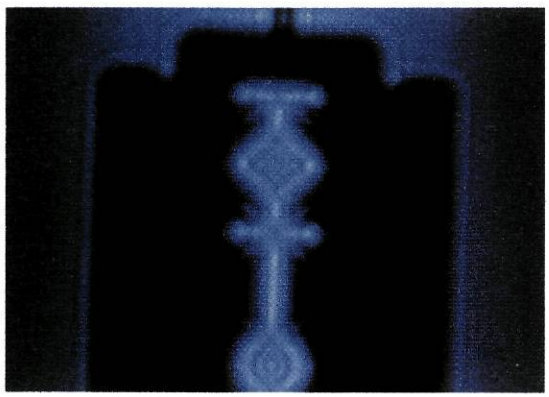


Figura 3.6 – Padrão de difracção gerado por uma lâmina de barbear iluminada com luz monocromática.

Um outro exemplo de difracção são os objectos flutuantes que muitas pessoas observam no seu campo visual. Estes podem ser vistos focando os olhos no infinito enquanto olhamos fixamente para uma folha de papel em branco. Este fenómeno é causado por células sanguíneas e fragmentos microscópicos presentes no fluido ocular e o que observamos é a figura de difracção que se forma sobre a retina.

3.4. Difracção de fenda única

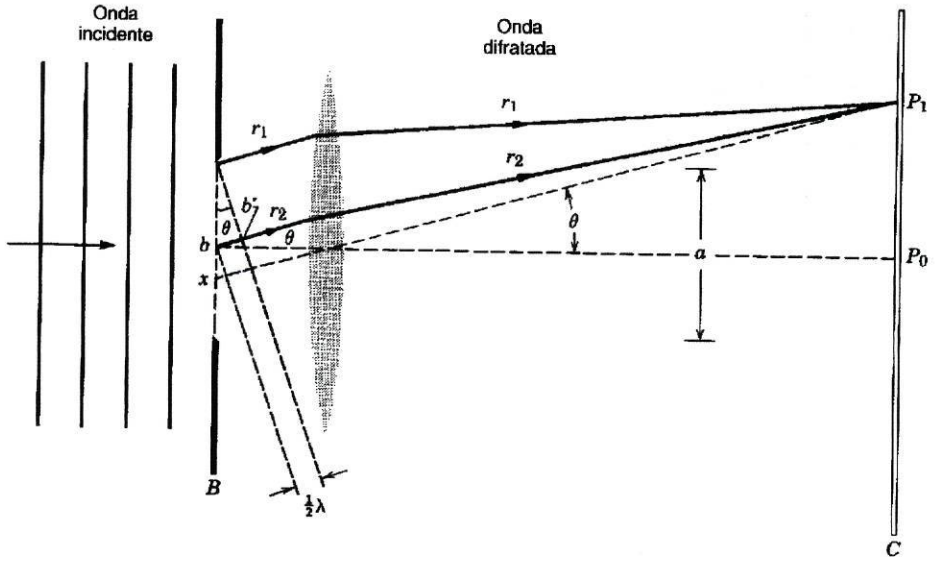


Figura 3.7 – As condições para o primeiro mínimo do padrão de difracção.

Consideremos uma fenda de largura a. Os raios de luz que alcançam P_1 na Fig. 3.7 saem da fenda com um ângulo θ. O raio x P_1 passa sem sofrer deflexão através do centro da lente, determinando θ. O raio r_1 origina-se no cimo da fenda e o raio r_2 no seu centro. Se θ for escolhido de modo que a distância bb' na figura seja igual a meio comprimento de onda, r_1 e r_2 estarão fora de fase e ocorrerá interferência destrutiva em P_1. O mesmo acontece para um raio logo abaixo de r_1 e outro abaixo de r_2. Para cada raio que passa através da metade superior da fenda, existe um raio correspondente passando através da metade inferior, originando-se num ponto situado a uma distância $a/2$ abaixo do primeiro raio, de forma que os dois raios estão fora de fase em P_1. Cada raio que chega a P_1, vindo da metade superior da fenda, interfere destrutivamente com outro vindo da metade inferior. A intensidade em P_1 é zero e P_1 é o primeiro mínimo da figura de difracção.

A condição para o primeiro mínimo pode ser escrita como

$$\frac{a}{2}\sin\theta = \frac{\lambda}{2} \quad \text{ou} \quad a\sin\theta = \lambda .$$

A equação $a\sin\theta = \lambda$ mostra que o máximo central se alarga à medida que a fenda se torna mais estreita. Se a largura da fenda é igual a um comprimento de onda $\lambda = a$, o primeiro mínimo ocorre para $\theta = 90°$.

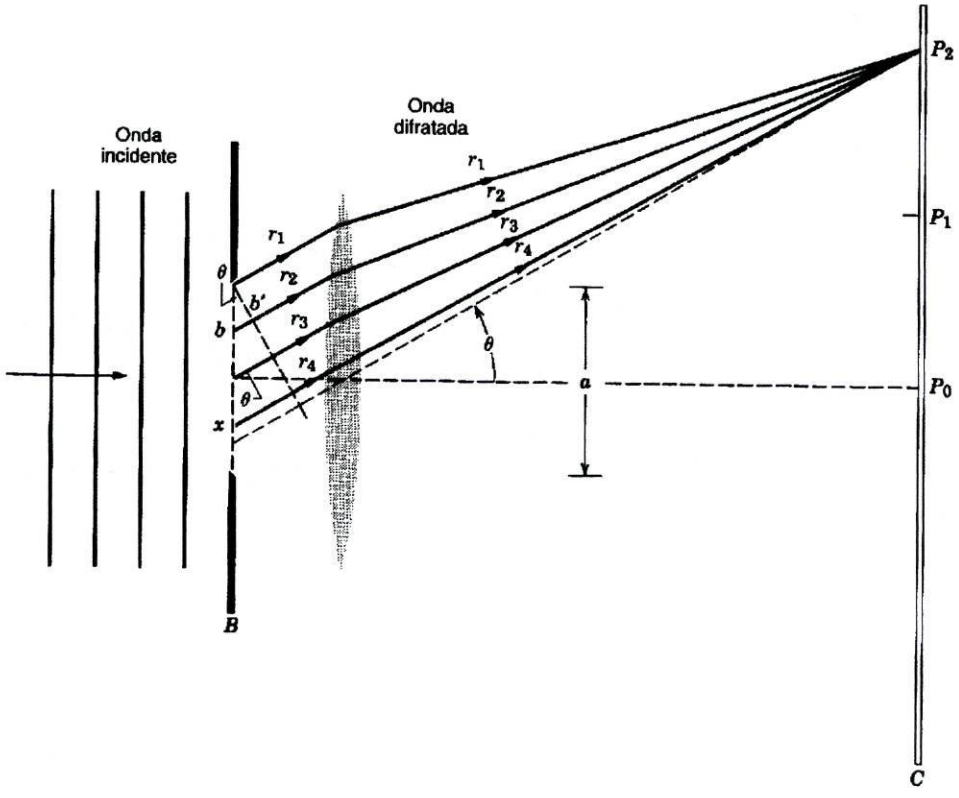


Figura 3.8 – As condições para o segundo mínimo do padrão de difracção. O ângulo θ é tal que a distância bb' é igual a meio comprimento de onda.

A fenda está dividida em quatro zonas iguais, com um raio partindo do cimo de cada uma das zonas. Seja θ escolhido de modo que a distância bb' é igual a meio comprimento de onda. Os raios r_1 e r_2 chegam a P_2 em oposição de fase havendo interferência destrutiva. Os raios r_3 e r_4 estão também meio comprimento de onda fora de fase e anulam-se. Consideremos outros quatro raios, emergindo da fenda a uma dada distância abaixo dos quatro primeiros. Os dois raios abaixo de r_1 e r_2 anulam-se, assim como os dois raios abaixo de r_3 e r_4. Prosseguiremos ao longo da fenda e concluiremos que nenhuma luz atinge P_2; localizamos um segundo ponto de intensidade zero.

A condição descrita exige que $\frac{a}{4}\sin\theta = \frac{\lambda}{2}$ ou $a\sin\theta = 2\lambda$.

Para uma determinada largura de fenda a e um comprimento de onda λ, a equação $a\sin\theta = 2\lambda$ dá a posição na tela do segundo mínimo, em termos do ângulo θ. Generalizando, a fórmula geral para os mínimos no padrão de difracção sobre a tela C é $a\sin\theta = m\lambda$ onde m = 1,2,3,... (mínimos). Existe um máximo aproximadamente no ponto médio entre cada par de mínimos adjacentes. A equação $a\sin\theta = m\lambda$ admite dois mínimos e máximos correspondentes para cada valor de m, um num ângulo θ acima do eixo central e outro abaixo.

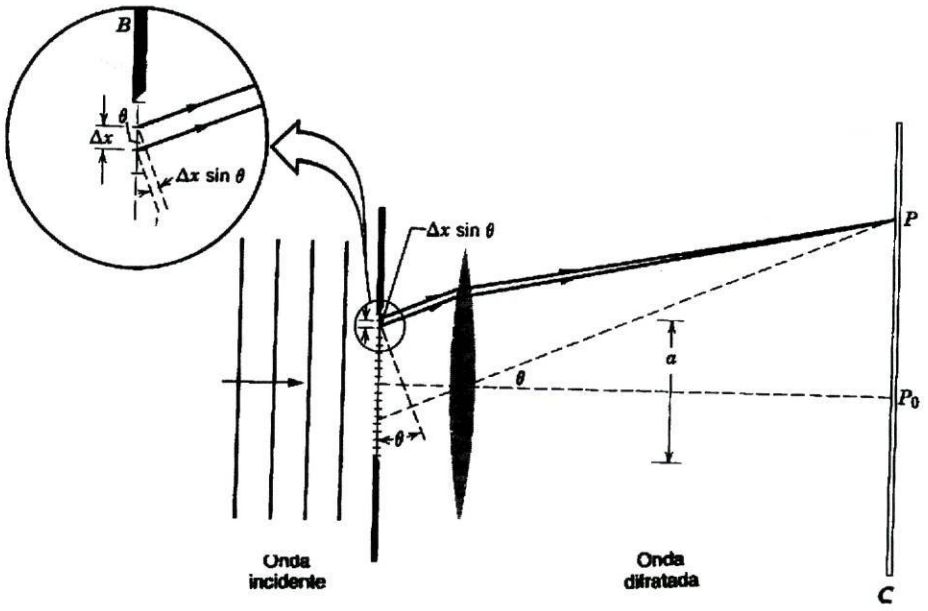


Figura 3.9 – Uma fenda de largura a é dividida em N faixas de largura Δx.

A Figura 3.9 mostra uma fenda de largura a dividida em N faixas paralelas, cada uma de largura Δx. As faixas são muito estreitas, de modo que cada uma pode ser vista como um irradiador de ondas elementares de Huygens, e toda a luz de uma dada faixa chega ao ponto P com a mesma fase. As ondas que chegam a P, vindas de qualquer par de faixas adjacentes, têm a mesma diferença de fase constante $\Delta\phi$ que pode ser calculada a partir de

$$\text{diferença de fase} = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)(\text{diferença de caminho})$$

ou

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta x \sin\theta$$

onde $\Delta x \sin\theta$, é a diferença de caminho para os raios que se originam em pontos correspondentes de faixas adjacentes.

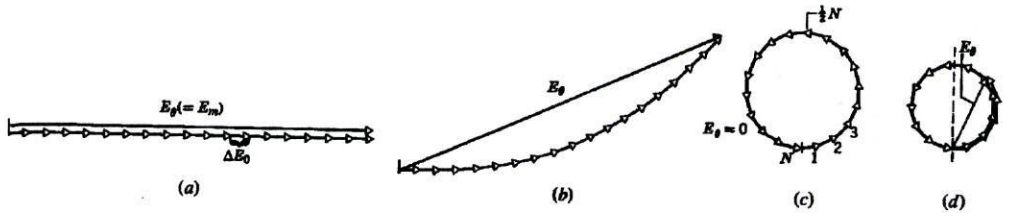


Figura 3.10 – Fasores na difracção de fenda única. Mostra as condições:
(a) no máximo central;
(b) numa direcção pouco afastada do máximo central;
(c) no primeiro mínimo;
(d) no primeiro máximo depois do máximo central.
Esta figura corresponde a $N = 18$ na figura 3.9.

Consideremos a intensidade do campo eléctrico resultante no ponto P_0. Como $\theta = 0$ e a equação $\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta x \sin\theta$ dá $\Delta\phi = 0$ como a diferença de fase entre faixas adjacentes. Se colocarmos N vectores de comprimento ΔE_0, com a extremidade de um coincidindo com a origem do seguinte e paralelos uns aos outros. A resultante E_θ é o valor máximo que a resultante destes N vectores pode ter e que designaremos por E_m.

À medida que nos afastamos de $\theta = 0$, a diferença de fase $\Delta\phi$ toma um valor não nulo. Colocando os vectores com a extremidade na origem do seguinte em que a direcção de cada um tem uma diferença igual a $\Delta\phi$ em relação à direcção do anterior e obteremos uma resultante E_θ menor. Consideremos o primeiro mínimo do padrão de difracção onde a intensidade é zero de forma que a resultante E_θ deve ser zero. Significa que os N vectores, alinhados origem com a extremidade, formem uma circunferência.

A diferença de fase torna-se maior, depois do primeiro mínimo e os vectores formam um ângulo maior do que 360°. Para uma determinada diferença de fase, a resultante E_θ alcança o maior comprimento correspondendo ao primeiro máximo depois do central. A intensidade deste máximo é menor do que a do máximo central. Este arco fecha-se sobre si mesmo dando uma resultante igual a zero a que corresponde o segundo mínimo.

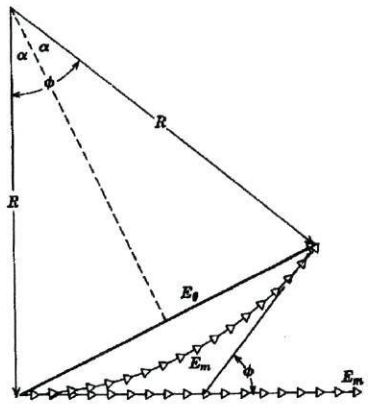


Figura 3.11 – Uma construção usada para calcular a intensidade na difracção de fenda única.

Da figura 3.11 podemos concluir que $E_\theta = 2R\sin\frac{\phi}{2}$.

A medida de ϕ em radianos é $\phi = \frac{E_m}{R}$, $E_m << E_0$ e por isso $E_m = 2R\sin\frac{\phi}{2} \approx 2R\frac{\phi}{2} \Leftrightarrow \phi = \frac{E_m}{R}$.

Utilizando as equações anteriores e substituindo R na 1ª equação, temos:

$$E_\theta = \frac{E_m}{\frac{\phi}{2}}\sin\frac{\phi}{2}.$$

Substituindo $\frac{\phi}{2}$ por α, a intensidade I_θ do padrão é proporcional ao quadrado da amplitude, $I_\theta = I_m\left(\frac{\sin\alpha}{\alpha}\right)^2$. Repare-se que o que se observa é a energia proporcional a E^2, é, por isso, que a intensidade surge como E^2.

ϕ é a diferença de fase entre raios que vêm do topo e da base da fenda e que a diferença de caminho para esses raios é $a\sin\theta$, temos $\phi = \frac{2\pi}{\lambda}(a\sin\theta)$. Combinando $\alpha = \frac{\phi}{2}$ com $\phi = \frac{2\pi}{\lambda}(a\sin\theta)$ temos $\alpha = \left(\frac{\pi a}{\lambda}\right)\sin\theta$.

Os mínimos ocorrem na equação $I_\theta = I_m\left(\frac{\sin\alpha}{\alpha}\right)^2$ quando

$\alpha = m\pi$ onde m =1, 2, 3, ...

Combinando $\alpha = \left(\frac{\pi a}{\lambda}\right)\sin\theta$ com $\alpha = m\pi$ temos $m\pi = \frac{\pi a}{\lambda}\sin\theta$ ou $a\sin\theta = m\lambda$ onde m =1, 2, 3, ...

3.5. Difracção numa fenda circular

Ao focalizar uma imagem, uma lente deixa passar apenas a luz que incide dentro do seu perímetro circular. A lente comporta-se como uma abertura circular numa tela opaca. Este tipo de abertura forma uma figura de difracção análoga à da fenda única. Os efeitos de difracção limitam a capacidade dos telescópios e de outros instrumentos ópticos formarem imagens precisas.

A imagem formada por uma lente pode ser distorcida por diversos efeitos, como por exemplo, aberrações cromáticas e esféricas. Estes efeitos podem ser substancialmente reduzidos ou até mesmo eliminados, moldando adequadamente a superfície das lentes ou introduzindo elementos de correcção no sistema óptico.

A análise matemática da difracção por uma abertura circular mostra que o primeiro mínimo ocorre num ângulo medido a partir do eixo central, dado por $\sin\theta = 1{,}22\frac{\lambda}{d}$, onde d é o diâmetro da abertura. Podemos comparar esta equação com $a\sin\theta = \lambda$ que localiza o primeiro mínimo de uma fenda de largura a . Estas expressões diferem pelo factor 1,22 que aparece quando dividimos a abertura circular em fontes elementares de Huygens e integramos para toda a abertura.

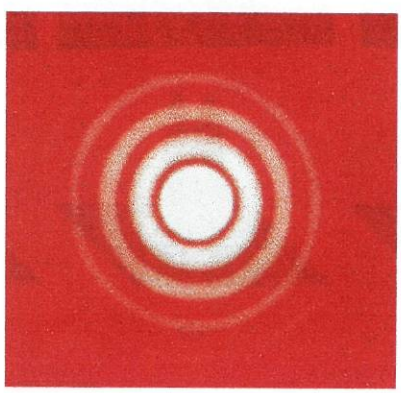


Figura 3.12 – Padrão de difracção de uma abertura circular.

Poder de resolução de um instrumento óptico é a sua capacidade de distinguir pormenores, de formar imagens separadas de dois objectos muito próximos um do outro.

Vemos os objectos através de aberturas, que podem ser a pupila dos olhos ou a lente de um instrumento óptico. Ao observarmos um objecto pontual através de uma abertura, a imagem não é apenas um ponto mas um ponto circundado por anéis luminosos, devido ao fenómeno da difracção. Assim, só conseguiremos distinguir as imagens de dois objectos pontuais se elas não ficarem sobrepostas. Há um *limite de resolução*, isto é, uma distância mínima entre dois objectos pontuais para que eles possam ser vistos distintamente através de uma abertura.

Aumentando a amplificação angular de um instrumento óptico, o diâmetro dos anéis luminosos das imagens de dois objectos pontuais aumenta mais rapidamente que a distância entre eles. Por isso, podemos estar a aumentar a amplificação angular, sem que o poder de resolução aumente. É como esticar uma tela: a pintura fica maior, mas não se vêem mais detalhes.

Como a difracção depende do tamanho da abertura e do comprimento da onda da luz utilizada, aumenta-se o poder de resolução de um instrumento óptico usando lentes de grande diâmetro e luz de pequeno comprimento de onda. Num telescópio, a objectiva tem sempre grande diâmetro mas, devido a dificuldades de construção, este não pode ultrapassar um metro. Em alguns microscópios, e para ver objectos de tamanho inferior a 10^{-7} m, iluminam-se estes com luz ultravioleta, com raios X, ou até com feixes de electrões. A luz ultravioleta tem um comprimento de onda mais curto e por isso permite que os detalhes mais subtis sejam melhor observados do que seria possível se esse microscópio usasse luz visível.

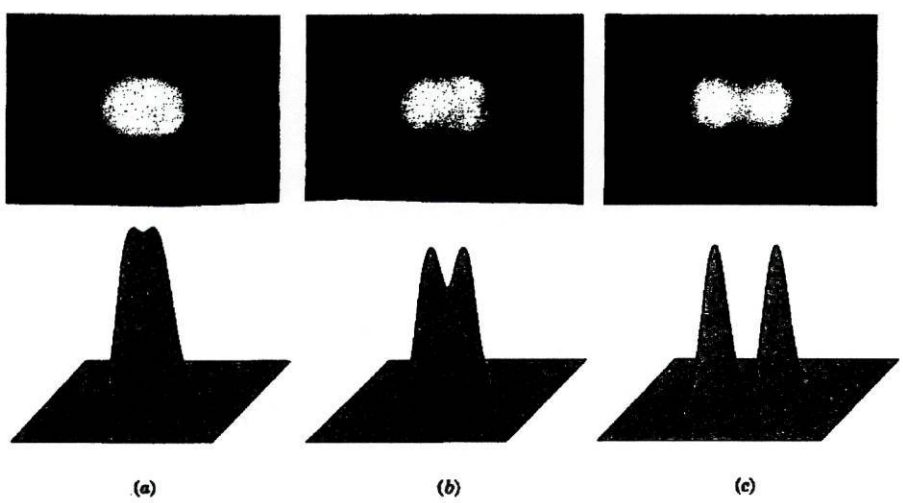


Figura 3.13 – Imagens de duas fontes pontuais (estrelas) distantes formadas por uma lente convergente. Por baixo das imagens estão representados perfis das intensidades gerados por computador.

a) estrelas muito próximas;
b) estrelas mais distantes satisfazendo o critério de Rayleigh para a resolução das suas imagens;
c) estrelas ainda mais afastadas e as suas imagens bem resolvidas.

Na Figura 3.13*a)* os objectos não estão resolvidos, isto é, não se pode distingui-los de um único objecto pontual.

Na Figura 3.13*b)* os objectos estão parcialmente resolvidos e a separação angular das duas fontes pontuais é tal que o máximo central do padrão de difracção de uma delas incide sobre o primeiro mínimo do padrão de difracção da outra. É o chamado ***critério de Rayleigh*** para a resolução de imagens. Da equação $\sin\theta = 1{,}22\frac{\lambda}{d}$ temos que dois objectos que podem ser parcialmente resolvidos pelo critério de Rayleigh devem ter uma separação angular $\theta_R = \sin^{-1}\frac{1{,}22\lambda}{d}$. Como os ângulos envolvidos são muito pequenos, podemos substituir $\sin\theta_R$ por θ_R e virá $\theta_R = 1{,}22\frac{\lambda}{d}$, onde θ_R é expresso em radianos. Se a separação angular θ entre os objectos for maior do que θ_R, podemos resolver os dois objectos; se for menor, não os resolveremos. O ângulo θ_R é a menor separação angular para a qual a resolução é possível, usando-se o critério de Rayleigh.

Quando queremos usar uma lente para resolver objectos de pequena separação angular, é preferível fazer com que o disco central da figura de difracção seja o menor possível. Pode ser feito aumentando-se o diâmetro da lente ou usando-se um comprimento de onda mais curto. Uma das razões para a construção de grandes telescópios é a de produzir imagens mais definidas de modo que possamos examinar com mais detalhe os objectos astronómicos. As imagens são também mais brilhantes porque além da energia estar concentrada num disco de difracção menor também a lente maior colecta mais luz. Assim, objectos mais ténues podem ser observados tal como as galáxias distantes. Isto acontece no espaço uma vez que na Terra é a turbulência atmosférica que limita a resolução angular e não o telescópio.

3.6. A difracção e o princípio da incerteza de Heisenberg

3.6.1. Comprimento de onda e a hipótese de De Broglie

Na sequência da descoberta da dualidade corpúsculo-onda, o físico francês Louis De Broglie estava intrigado com o facto de que a radiação parecia apresentar uma dualidade onda-partícula enquanto que a matéria parecia ser inteiramente corpuscular. De Broglie começou por imaginar que a matéria também deveria possuir um carácter dual e que as partículas como os electrões deveriam ter propriedades ondulatórias.

Do momento linear $p = \frac{h}{\lambda}$ onde h é a constante de Planck, Louis De Broglie sugeriu que esta equação deveria relacionar as propriedades corpusculares e ondulatórias da matéria. Uma partícula livre que se mova com o momento linear p está associada a uma onda sinusoidal de comprimento de onda λ dado por $\lambda = \frac{h}{p}$. A constante de Planck actua como elo de ligação entre os aspectos ondulatório e corpuscular, tanto da matéria como da radiação. O comprimento de onda de uma partícula calculado a partir de $\lambda = \frac{h}{p}$ é o chamado *comprimento de onda de De Broglie*. Esta equação mostra-nos porque é que não observamos o comportamento ondulatório dos objectos comuns. A constante de Planck é tão pequena, $\approx 10^{-34} J \cdot s$, que os comprimentos de onda dos objectos mais comuns são muitas ordens de grandeza menores do que o tamanho de um núcleo. Não seria possível construir uma fenda dupla nesta escala capaz de revelar a natureza ondulatória desses corpos.

3.6.2. O princípio da Incerteza de Heisenberg

A matéria tem um carácter ondulatório mas também tem um carácter corpuscular. A diferença entre estes dois pontos de vista é que a posição de uma partícula pode ser localizada tanto no espaço como no tempo, mas uma onda não pode porque está distribuída ao longo desta duas dimensões.

Quando lidamos com partículas não há dificuldade em dizer que em cada instante onde uma partícula se encontra, isto é, a posição num dado instante t_0 é x_0, embora não saibamos nada sobre o momento linear p da partícula. No caso de uma onda sinusoidal poderemos dizer que a onda está por toda a parte embora o seu comprimento de onda, λ, esteja bem determinado e por isso poderemos afirmar que o seu momento está bem definido.

Conciliando estas duas abordagens iremos ver se é possível agrupar um conjunto de ondas de tal maneira que, no final, tenhamos qualquer coisa que se assemelhe a uma partícula. Isto será válido para todos os tipos de onda, sejam elas ondas sonoras, ondas na água ou ondas electromagnéticas. É possível criar qualquer forma de onda que desejarmos fazendo um somatório de ondas sinusoidais com números de onda, amplitudes e fases adequadamente escolhidos. Juntando duas ondas sinusoidais com comprimentos de onda diferentes, o resultado não é uma onda sinusoidal. Juntando cada vez mais ondas, com diferentes comprimentos de onda, a onda resultante vai sendo cada vez mais localizada no espaço. No limite em que juntamos ondas de todos os comprimentos de onda é possível obter uma onda que se comporta como se fosse um ponto material.

A precisão na localização é conseguida à custa de uma imprecisão crescente do comprimento de onda.

Suponhamos que a experiência de difracção por uma fenda é feita não com ondas luminosas mas sim com um feixe de electrões com momento p bem definido.

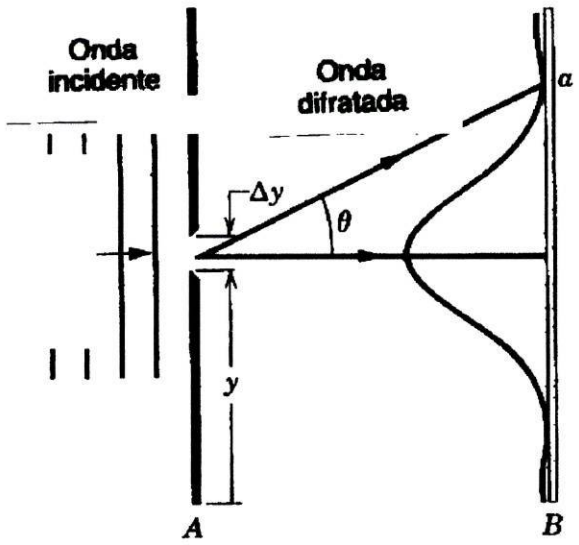


Figura 3.14 – Um feixe de electrões incidente é difractado na fenda da tela A. Se estreitarmos a fenda, o padrão torna-se mais largo.

De acordo com Broglie, e com a experiência, vai-se obter no alvo uma figura de difracção.

Se se quiser saber com mais exactidão por onde passam os electrões tem de se reduzir a abertura Δy. Mas a cada Δy vai sempre corresponder uma abertura angular θ na determinação da imagem da abertura, definida entre os primeiros mínimos que corresponde a uma imprecisão Δp no momento, dado por $\Delta p \cong p \sin\theta$.

Por outro lado, pela condição de primeiro mínimo na difracção por uma fenda

como $\lambda = \frac{h}{p}$ virá $\Delta y = h \frac{1}{p \sin\theta}$.

Atendendo a que $\Delta p \cong p \sin\theta$, virá $\boxed{\Delta y \cdot \Delta p \cong h}$.

Em 1927, Werner Heisenberg obteve a relação de incerteza $\Delta y \cdot \Delta p \cong h$ que o levou à formulação do princípio da Incerteza de Heisenberg:

Não é possível determinar ao mesmo tempo a posição e o momento linear de uma partícula com precisão ilimitada.

3.6.3. O princípio da incerteza e o limite de difracção

Para a luz podemos realizar o raciocínio inverso do anterior para compreendermos o limite de difracção de um telescópio à luz da mecânica quântica.

Para um telescópio caracterizada por um diâmetro $\tilde{D}$ o princípio da incerteza afirma-nos que:

$$\tilde{p} \mid \tilde{D} \geq h, \text{ consequentemente } \frac{h}{\lambda}\sin\theta - D \geq h \quad \text{se } \theta << 1 \Rightarrow \theta \geq \frac{\lambda}{D}$$

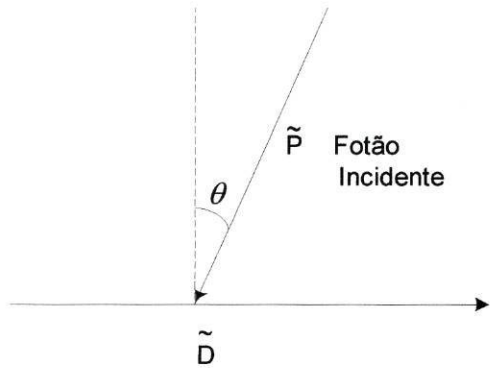


Figura 3.15 – Ângulo da onda incidente

Ora a equação anterior diz-nos que um telescópio de diâmetro D é incapaz de medir com precisão a quantidade de movimento (em particular no ângulo da quantidade de movimento – ângulo da onda incidente) menor que $\frac{\lambda}{D}$. No capítulo 4 determinar-se-á um resultado similar por outro raciocínio.

4. O TELESCÓPIO E SEU LIMITE DE DIFRACÇÃO

Feito o estudo da difracção e da teoria ondulatória da luz, chegou o momento de falar um pouco do telescópio e do seu limite de difracção. O telescópio é um dos instrumentos mais usados pelos astrónomos. Estes usam instrumentos para observar e analisar todos os tipos de radiação electromagnética do espaço. Os astrónomos em terra podem observar o Universo através de três bandas espectrais: a banda do óptico (luz visível), a banda de infravermelho e de rádio. Abordarei os vários tipos de telescópios, referindo as vantagens e desvantagens de cada um. Debruçar-me-ei sobre os grandes telescópios da actualidade e terminarei com uma abordagem sobre as distorções das imagens telescópicas resultantes da turbulência na atmosfera da Terra.

4.1. Introdução

Há objectos que estão tão distantes ou são tão pequenos que não conseguimos distinguir pormenores sobre eles e, às vezes, não conseguimos mesmo vê-los à vista desarmada. Para resolver situações destas, existem muitos instrumentos correspondentes a sistemas de lentes ou a sistemas de lentes e espelhos.

Instrumentos para registar, ampliar e projectar imagens são exemplos de aparelhos ópticos. Um destes aparelhos é o *telescópio* que permite observar a imagem de objectos longínquos, tais como planetas, estrelas, galáxias e quasares. Os telescópios podem ser de dois tipos: os *refractores* e os *reflectores*.

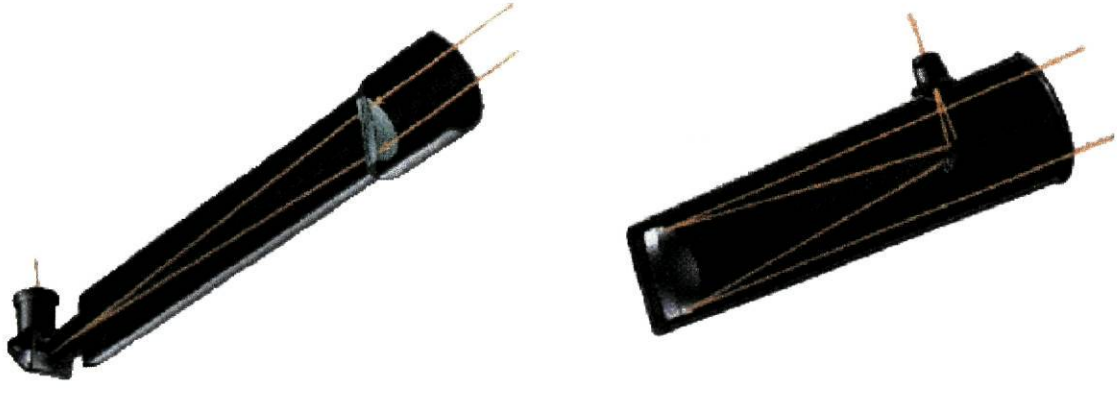


Figura 4.1 – Na figura do lado esquerdo está representado um telescópio refractor e na da direita um telescópio reflector.

A maior diferença entre estes dois tipos de telescópios está no colector de luz usado, que recolhe a luz e forma a imagem do objecto observado, e ao qual é costume chamar *objectiva* do telescópio.

No telescópio pretende-se que os objectos muito distantes possam ser observados como se estivessem muito mais perto. Como tal, o ângulo segundo o qual se vê a imagem final é muito maior do que o ângulo sob o qual o olho veria o mesmo objecto. Por isso, no telescópio é importante ter em conta uma grandeza que relaciona os dois ângulos. Esta grandeza é chamada *poder ampliador* e mede a capacidade que o telescópio tem em aumentar o objecto observado.

Na prática calcula-se o poder ampliador de um telescópio pela relação

$$Poder\ ampliador = \frac{F_c}{F_e}$$

onde F_c é a distância focal da objectiva que corresponde à distância entre a objectiva e o plano focal e F_e é a distância focal da ocular que corresponde à distância entre o plano focal e a ocular.

O poder ampliador aumenta o tamanho da imagem no campo de visão, mas não a sua resolução.

Existem ainda mais dois parâmetros importantes que caracterizam um telescópio. São eles o *poder colector* que mede a capacidade do telescópio de colectar luz, ou seja, a possibilidade de observar objectos de fraca intensidade e o *poder resolvente* que mede a menor distância angular entre dois objectos para os distinguir no céu.

O poder colector de um telescópio é muito superior ao do olho humano, o que possibilita a observação de objectos menos brilhantes. A energia captada está relacionada com o fluxo observado do objecto e com a área da superfície colectora e é dada por

$$E_{captada} = F_{observado} \times A$$

onde A representa a área da superfície colectora do telescópio. Como a maioria dos telescópios possuem uma objectiva circular, a área colectora é

$$A = \pi \times \frac{D^2}{4}$$

onde D é o diâmetro do telescópio e $\pi \approx 3{,}1416$. Por exemplo, um telescópio com 30 cm de diâmetro tem um poder colector nove vezes maior do que um telescópio com 10 cm de diâmetro pois,

$$\frac{\frac{\pi \times 30^2}{4}}{\frac{\pi \times 10^2}{4}} = \left(\frac{30}{10}\right)^2 = 9$$

O poder colector é proporcional ao quadrado do diâmetro do telescópio. Normalmente os detalhes de uma imagem estão directamente associados ao aumento do diâmetro do telescópio.

O poder resolvente de um telescópio é a sua capacidade de produzir imagens bem definidas em condições ideais de observação e depende directamente do valor da abertura e inversamente do comprimento de onda da luz que lhe chega.

Quando as ondas luminosas da luz das estrelas atingem a superfície de uma lente ou de um espelho, sofrem um efeito chamado difracção e convergem depois para pontos diferentes. Devido à difracção, a imagem formada por uma lente ou por um espelho aparece ampliada, mas, em vez de um simples ponto, tem o aspecto de um pequeno círculo de contornos mal definidos, circundado por anéis. A esta imagem dá-se o nome de figura de difracção. A difracção limita o poder resolvente.

Se a separação entre duas estrelas é muito pequena, as suas figuras de difracção podem sobrepor-se de modo a parecerem uma única estrela. Pormenores como crateras na Lua ou detalhes de um planeta tornam-se também imperceptíveis pela difracção.

O ângulo α dado pelo primeiro mínimo de difracção está relacionado com o comprimento de onda λ e com o diâmetro da abertura D através da equação $\text{sen}\,\alpha = 1{,}22\frac{\lambda}{D}$. Na prática, muitas vezes, como o ângulo α é pequeno, fazemos $\text{sen}\,\alpha \approx \alpha$ sendo, neste caso, o ângulo para o qual ocorre o primeiro mínimo dado por $\alpha = 1{,}22\frac{\lambda}{D}$.

O poder resolvente de um telescópio é a capacidade deste produzir imagens distintas de pontos muito próximos e é dado por $\alpha = 1{,}22\frac{\lambda}{D}$ onde λ é o comprimento de onda que estamos a observar e D é o diâmetro da objectiva. Como λ e D são dados nas mesmas unidades, tornam α uma quantidade adimensional que normalmente é convertida para segundos de arco, assim $\alpha(") = 1{,}22 \times 3600 \times \frac{180}{\pi} \times \frac{\lambda}{D}(") \Leftrightarrow \alpha(") = 1{,}22 \times 206265 \times \frac{\lambda}{D}(")$.

Quando a distância angular é igual a α dizemos que foi atingido o *limite de resolução de Rayleigh*. O uso de α para avaliar a resolução de um sistema óptico é conhecido como *critério de Rayleigh* que diz que, dois objectos estão resolvidos espacialmente quando o centro de um dos discos de Airy coincide com o primeiro mínimo da figura de difracção do

outro objecto. Chama-se disco de Airy ao máximo central de um padrão de difracção em homenagem a Sir George Airy que no ano de 1835 resolveu pela primeira vez o problema da difracção por uma abertura circular. Quando $\alpha >> 1{,}22\ \frac{\lambda}{D}$ as fontes são vistas como fontes separadas e para pequenos valores de α as figuras de difracção sobrepõem-se e torna-se difícil distinguir as fontes. Para uma distância angular crítica definida pela relação $1{,}22\frac{\lambda}{D}$ o primeiro mínimo da figura de difracção produzida por uma das fontes coincide com o máximo central da outra fonte.

As imagens de objectos próximos tendem a sobrepor-se por causa da difracção produzida pela abertura do telescópio.

4.1.1. Telescópios refractores

O astrónomo italiano Galileu (1564-1642) foi o primeiro a apontar um telescópio refractor para o céu em 1609. O maior instrumento que construiu tinha uma abertura inferior a 50 mm. Actualmente, os telescópios refractores variam de tamanhos que vão das versões iniciais de 60 mm até ao maior do mundo. Este telescópio tem uma objectiva com 1,02 metros de diâmetro e um tubo com cerca de 20 metros, está situado no Observatório de Yerkes, em Williams Bay, nos Estados Unidos e foi inaugurado em 1897.

Um telescópio refractor baseia-se na combinação de duas lentes convergentes - a *objectiva* (lente principal) e a *ocular*. A luz entra na objectiva, que está montada no topo de um tubo, e é refractada de modo a formar uma imagem perto da outra extremidade do tubo. O facto do tubo ser fechado evita a entrada de poeiras, humidade e luz parasita.

Com a objectiva obtém-se uma imagem real e invertida do objecto distante, situada no plano focal da lente. Esta imagem é então vista através da ocular, que actua como uma lupa em relação à imagem real formada com a objectiva. A ocular pode ser trocada por outras, a fim de fazer variar a ampliação.

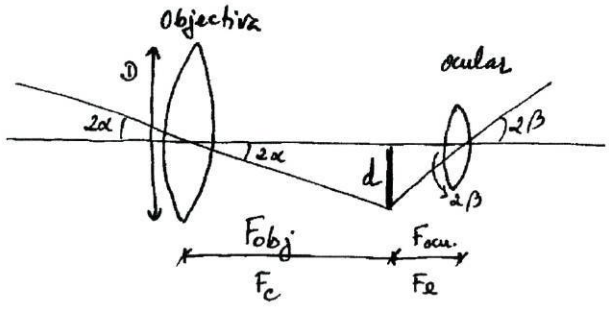


Figura 4.2 – Representação esquemática de um refractor.

A distância da objectiva à imagem corresponde à distância focal.

$$F_c \sin(2\alpha) = F_e \sin(2\beta) \text{ como } \alpha, \beta << 1 \Rightarrow \frac{F_c}{F_e} = \frac{\beta}{\alpha} >> 1$$

$\therefore$ amplia a imagem.

Quanto maior for a distância focal da objectiva e menor a distância focal da ocular, maior será o poder ampliador do telescópio. No entanto, não é possível aumentar muito a distância focal da objectiva, pois quanto maior for essa distância focal maior terá de ser o tubo do telescópio, tornando-se difícil de construir.

Os telescópios refractores de grande poder ampliador necessitam também de objectivas de grande diâmetro, de forma a poderem concentrar o mais possível a luz provinda de um astro muito distante. Mas, à medida que se pretende aumentar o tamanho da objectiva, torna-se mais difícil produzir uma lente com qualidade, além de se tornar difícil montar o telescópio.

Os grandes refractores são usados nos casos em que a qualidade e a resolução das imagens são muito importantes, como a observação de pormenores na superfície da Lua e dos planetas ou de sistemas de estrelas duplas.

A construção de telescópios refractores de grandes dimensões está praticamente abandonada devido a algumas desvantagens que estes telescópios apresentam tais como:

1. Efeito da aberração cromática.
2. A facilidade com que a radiação atravessa a lente varia com o comprimento de onda. A luz no ultravioleta não atravessa a lente.
3. O aumento da grossura da lente dificulta a passagem da radiação.
4. Dificuldade em construir lentes sem imperfeições e com perfeita curvatura de ambos os lados da lente.
5. A objectiva é suportada apenas nas extremidades, o que torna difícil o seu manuseamento.

4.1.2. Telescópios reflectores

Os telescópios reflectores têm um espelho de vidro bastante polido - o *espelho primário* -, montado no fundo de um tubo ficando aberta a outra extremidade. Os reflectores usam, assim, um espelho como colector de luz. Na maioria dos telescópios, os espelhos reflectores são parabólicos de forma a terem um único foco para concentrar os raios de luz, considerados paralelos, que chegam ao telescópio vindos dos objectos celestes que se encontram a uma grande distância. Quando a luz de um objecto celeste atinge o espelho, é reflectida para trás e forma a imagem no foco *principal*.

Muitos observatórios astronómicos usam telescópios reflectores em vez de telescópios refractores, visto que:

1. Os reflectores são mais baratos do que os refractores com a mesma dimensão.
2. Os espelhos são suportados pela base e, portanto, poderão ter grandes dimensões.
3. Não há aberração cromática. A radiação é reflectida da mesma forma qualquer que seja o comprimento de onda.
4. Precisam apenas de uma superfície polida.

Os tamanhos dos telescópios reflectores variam desde os reflectores newtonianos de 75 mm até ao maior do mundo, o telescópio Keck, de 10 metros, situado no topo do extinto vulcão Mauna Kea, no Havai.

Um dos maiores telescópios reflectores do mundo encontra-se instalado num observatório situado no Monte Palomar, na Califórnia. O diâmetro do seu espelho é de 5 metros e pesa 125 toneladas. O mecanismo deste telescópio está ligado a um computador que permite orientá-lo com grande precisão para a zona do espaço a observar.

Os reflectores gigantes são usados nas situações em que a abertura é o mais importante, como descobrir objectos muito distantes e pouco luminosos. Alguns dos grandes telescópios reflectores possuem sistemas ópticos que fraccionam o percurso da luz no seu interior, permitindo reduzir o comprimento físico, sendo assim possível instalá-los em cúpulas mais pequenas do que as dos refractores.

Os astrónomos concebem telescópios cada vez maiores e novas técnicas de observação para aumentarem a quantidade de luz captada e obterem maior poder de resolução.

Os telescópios mais recentes possuem um único espelho de peso relativamente baixo, instalado num suporte individual, ou mosaicos de vários espelhos individuais, que são utilizados individualmente ou em combinações, através de um sistema controlado por computador.

Os telescópios espaciais podem efectuar observações em contínuo, não sendo perturbados pelas nuvens nem pela luz do dia.

TABELA 4.1 Vantagens e desvantagens dos telescópios reflectores e refractores.

	**Vantagens**	**Desvantagens**
Telescópio Refractor	➢ São resistentes e não estão sujeitos ao desalinhamento da óptica. ➢ A superfície da lente está selada no interior do telescópio e não se encontra, portanto, em contacto com a atmosfera. Raramente precisa de ser limpa. ➢ Como o tubo está isolado do exterior, correntes de ar e efeitos devidos à variação de temperatura são praticamente eliminados. Isso significa uma maior estabilidade da imagem do que a obtida com um reflector com as mesmas dimensões.	➢ Efeito da aberração cromática. ➢ A facilidade com que a radiação atravessa a lente varia com o comprimento de onda. A luz no ultravioleta não atravessa a lente. ➢ O aumento da grossura da lente dificulta a passagem da radiação. ➢ Dificuldade em construir lentes sem imperfeições e com perfeita curvatura de ambos os lados da lente. ➢ A objectiva é suportada apenas nas extremidades, o que torna difícil o seu manuseamento.
Telescópio Reflector	➢ Não há aberração cromática. A radiação é reflectida da mesma forma qualquer que seja o comprimento de onda. ➢ Os espelhos são suportados pela base e, portanto, poderão ter grandes dimensões. ➢ Os reflectores são mais baratos do que os refractores com a mesma dimensão. ➢ Precisa apenas de uma superfície polida.	➢ Facilidade do desalinhamento da óptica. ➢ Nos maiores telescópios o tubo do telescópio é aberto e a óptica precisa de constantes cuidados (ser limpa) devido ao contacto do espelho com o ar. ➢ A luz é redireccionada para o foco através de um espelho secundário que se encontra em frente do primário. Esse espelho secundário introduz novos efeitos de difracção aparecendo os objectos estelares mais brilhantes com a forma de "uma estrela de Natal". Este efeito surge devido à difracção no suporte metálico (vulgo "aranha") do espelho secundário. ➢ Espelho sensível à variação das condições térmicas.

4.2. Os grandes telescópios

Durante a primeira metade do século XX George Ellery Hale impulsionou fortemente o desenvolvimento dos grandes telescópios: Em 1908 levou a cabo a instalação de um telescópio com um espelho de um metro e meio de diâmetro em Mount Wilson, o maior telescópio do mundo nessa época. Em menos de uma década Hale instalou no mesmo local um novo telescópio, de dois metros de diâmetro, o qual contou com algumas inovações presentes nos telescópios modernos. Este instrumento, o maior do mundo dos anos trinta, revolucionou as nossas ideias sobre o Universo. Hale continuou a pensar em telescópios de maiores dimensões e promoveu o desenvolvimento de um telescópio com um espelho de cinco metros de diâmetro. Hale não viveu o suficiente para ver o seu sonho convertido em realidade, no entanto para o homenagear o telescópio inaugurado em 1948 em Monte Palomar foi baptizado com o seu nome. Durante várias décadas pensou-se que se tinha alcançado o limite máximo e que não seria possível construir espelhos de maiores dimensões. A excepção que pareceu confirmar a regra foi a difícil construção de um telescópio com um espelho de seis metros de diâmetro na União Soviética. Tentaram a todo o custo superar em dimensão o telescópio dos Estados Unidos de cinco metros, a construção deste instrumento demorou uns vinte anos.

Apesar de ser, na altura, o maior telescópio do mundo, o telescópio soviético não superou o desempenho do telescópio de cinco metros do Monte Palomar. A tecnologia utilizada na construção dos telescópios parecia ter alcançado o auge e nos vinte e cinco anos seguintes os novos telescópios não ultrapassaram os 4,2 metros de diâmetro. Preocuparam-se, ainda, em escolher melhores sítios astronómicos, desenvolverem melhores instrumentos e terem telescópios de melhor qualidade óptica em edifícios com melhores características térmicas.

Os avanços tecnológicos das últimas décadas permitem hoje em dia a construção de espelhos de diâmetros superiores a seis metros, relativamente finos e leves, que podem ser montados em estruturas com um tamanho menor que a do telescópio de cinco metros do Monte Palomar. Com estes avanços ressurgiu o sonho dos grandes telescópios e, durante a década de oitenta, iniciaram-se vários projectos que se encontram em actividade:

- O telescópio Keck, onde 36 espelhos hexagonais de 1,8 metros de lado, dispostos numa distribuição análoga à de um favo de mel, formam um espelho de dez metros de diâmetro. O telescópio Keck, o maior do mundo na actualidade, entrou em funcionamento nos finais de 1990, tendo o primeiro ano sido dedicado a ensaios. O projecto foi concluído com a construção de um telescópio gémeo, o Keck II, situado a

75 metros de distância do Keck I, em Mauna Kea, no Hawai, a 4200 metros acima do nível do mar.

- O telescópio Subaru, com 8,3 metros de diâmetro, encontra-se instalado em Mauna Kea, no Hawai a 4139 metros. Aqui as condições exigidas para as observações, tais como a humidade baixa e o céu nocturno muito escuro, são boas. Subaru é o nome japonês das Pleiades.

- Não menos ambicioso é o "Very Large Telescope", ou simplesmente VLT, que é um conjunto de quatro telescópios com espelhos de 8,2 metros de diâmetro que podem trabalhar de forma individual. O VLT foi construído no Cerro Paranal, montanha do deserto de Atacama, Chile, um local com mais de duzentas noites por ano de céu fotométrico (e mais de trezentas noites "utilizáveis"), situado a 2660 metros de altura acima do nível do mar.

- O Grande Telescópio das Canárias (GTC), é conceptualmente semelhante ao Keck. Trata-se de um mosaico de 36 elementos vitrocerâmicos hexagonais, de 1,9 metros de diagonal cada um, que formarão, ao juntarem-se, um espelho hexagonal de 11,4 metros de extremo a extremo (equivalente a um espelho circular de 10,4 metros de diâmetro). Este telescópio fica instalado no Observatório del Roque de los Muchachos, na ilha de La Palma nas Canárias, a 2400 metros acima do nível do mar onde, devido aos Ventos Alísios, a atmosfera é estável e transparente. A construção do GTC é uma iniciativa espanhola, liderada pelo Instituto de Astrofísica das Canárias e conta com o apoio económico da Administração Central, do Governo Canário e de fundos europeus.

- O telescópio binocular grande (LBT) é uma colaboração entre as comunidades astronómicas italiana, alemã e norte-americana. O LBT situa-se em Mount Graham na parte sul do Arizona, nos Estados Unidos. O objectivo do projecto do LBT é construir um telescópio binocular com dois espelhos de 8,4 metros de diâmetro numa só montagem. O telescópio foi terminado em Itália e enviado ao Arizona no Verão de 2002.

- O projecto Gemini consiste em dois potentes telescópios ópticos-infravermelhos de oito metros de diâmetro cada um, visando a exploração do Universo, dos planetas e das estrelas próximas até às galáxias mais longínquas. Poderão captar imagens em todo o espectro luminoso desde o infravermelho até ao ultravioleta, com uma nitidez comparável à dos telescópios em órbita.

O Observatório Gemini resultou de uma cooperação internacional de sete países dos quais fazem parte os Estados Unidos, o Reino Unido, o Canadá, o Chile, a Austrália, a Argentina e o Brasil. É constituído pelos telescópios *Gemini Norte* que está em funcionamento desde 1999 em Mauna Kea, Hawai, a 4000 metros de altura e *Gemini Sul* que foi inaugurado a 18 de Janeiro de 2002 e está situado a 2400 metros de altura, no Cerro Pachon (nos Andes Chilenos). Neste local o Gemini Sul goza de uma atmosfera mais fria, seca e nítida do que o Gemini Norte situado em pleno Oceano Pacífico. Os telescópios Gemini Norte e Gemini Sul são dois dos maiores do mundo e ambos permitem o estudo da origem e evolução do Universo a partir dos dois hemisférios. Estes dois telescópios poderão ser utilizados pelos astrónomos para seguir planetas jovens orbitando à volta de estrelas próximas, para sondar as fases iniciais de formação estelar, no meio interestelar e para captar a luz proveniente de galáxias jovens e quasars após uma viagem de milhares de anos.

4.2.1. Combinação da luz de vários telescópios

Alguns dos grandes telescópios recorrem à interferometria para melhorarem o seu poder de resolução. A interferometria é uma técnica usada essencialmente no rádio, porque estas ondas são radiações electromagnéticas de baixa frequência que não são absorvidas pela atmosfera terrestre. Esta técnica serve para melhorar a resolução espacial, em que são usados dois ou mais radiotelescópios de tamanho médio, a vários quilómetros de distância na observação simultânea do mesmo corpo emissor. Combinando os sinais recebidos por cada um dos telescópios, é possível obter o mesmo poder resolvente, que o obtido com um só radiotelescópio possuindo um disco com vários quilómetros de diâmetro. Esta técnica permite que dois telescópios separados, entre si, de 100 metros tenham uma observação tão detalhada como a de um grande telescópio de 100 metros. Suponhamos que tínhamos um telescópio com um espelho primário parabólico de 100 metros de diâmetro, o qual teria uma resolução tão grande que permite separar estrelas num espaço de 1,4 milisegundos de arco. A luz colectada pelo disco do telescópio termina no foco do mesmo, em fase. Todas as cristas e vales das ondas de luz estão alinhadas, o que é necessário para obter uma alta resolução. Suponhamos que pintamos de preto o espelho deixando só dois círculos de 10 metros de diâmetro sem pintar os lados opostos do espelho. O telescópio resultante será muito menos sensível porque só uma parte do espelho possibilita a reflexão da luz. Mas continuará com o mesmo poder de resolução que o telescópio de 100 metros porque as ondas de luz, que terminam no foco, continuam em fase. Assim poderíamos construir dois telescópios de 10

metros de diâmetro separados de 100 metros, de tal forma que os espelhos sejam parte de um mesmo espelho parabólico virtual de 100 metros, obtendo-se o mesmo poder de resolução de um telescópio de 100 metros. A interferometria tem sido aplicada em alguns dos grandes telescópios como sejam o caso do VLT e o caso dos dois telescópios Keck. Estes telescópios estão separados aproximadamente 100 metros e supostamente não são parte de uma mesma superfície parabólica. Assim a luz captada por cada um dos telescópios não está em fase quando enviada a um mesmo detector. Para que a interferometria funcione, os astrónomos têm que fazer muitas correcções para compensar este desfasamento da luz proveniente de cada telescópio.

Estas correcções são muito mais complicadas para telescópios no óptico e no infravermelho do que para telescópios no rádio.

Tal como acontece com os telescópios ópticos, quanto maior for a superfície colectora, mais será a radiação que poderá ser captada. A síntese de abertura é uma técnica que combina observações de dois ou mais interferómetros. Estes estão ligados através de computadores para se obter um poder resolvente equivalente ao de uma antena colectora gigante.

O VLA - Very Large Aray é o primeiro sistema de síntese de abertura do National Radio Astronomy Observatory, localizado a 2100 m de altitude no estado americano do Novo México. O VLA é constituído por vinte e sete antenas em forma de disco com vinte e cinco metros de diâmetro que, por serem móveis, podem ser usadas em diferentes configurações para simular as características de uma radioantena de 34 Km de diâmetro completamente orientável. Tem 72 estações de observação ao longo de um Y gigante, tendo cada braço do Y cerca de 21 Km.

A Interferometria de Linha de Base muito Longa (VLBI - Very Long Base Line Interferometry) usa o mesmo princípio que a interferometria no rádio diferindo apenas na distância a que se encontram os radiotelescópios. Os radiostelescópios são independentes, estando a distâncias de milhares de quilómetros, havendo uma unidade que faz a coordenação da observação, na Holanda, obtida em cada radiotelescópio, obtendo-se uma melhor resolução. Os dados obtidos podem ser correlacionados para simularem um disco tão grande como a Terra. Um destes sistemas VLBI, situado na Europa, compreende o telescópio de Jodrell Bank, na Inglaterra, o telescópio de Effelsberg, na Alemanha e catorze discos em Westerbork.

Existe um interferómetro idêntico no continente americano, conhecido por VLBA (Very Long Baseline Array), constituido por dez radiotelescópios distribuídos pelos Estados Unidos, desde o Hawai a St. Croix, no nordeste do Canadá. Todos os dados recolhidos pelas dez

antenas são posteriormente processados por computador, o que permite sintetizar um sinal como se tivesse sido recebido por um radiotelescópio com um diâmetro de 8000 quilómetros que proporciona uma resolução de 0,2 milionésimos de segundo de arco.

4.2.2. Comparação entre poder resolvente de um radiotelescópio e um telescópio no óptico

Vou comparar o poder resolvente do maior radiotelescópio totalmente orientável, que é o de Effelsberg, na Alemanha e que possui um diâmetro de 100 metros com o de um telescópio no óptico que possui 1 metro de diâmetro.

O poder resolvente de um telescópio é dado por $\alpha = 1{,}22\frac{\lambda}{D}$ onde λ representa o comprimento de onda médio observado e D o diâmetro do telescópio. No caso da emissão rádio, podemos tomar um $\lambda_r = 6\times10^{-3}$ metros enquanto que para o óptico $\lambda_o = 6000\times10^{-10}$ metros.

A razão dos poderes resolventes óptico / rádio é

$$\frac{\alpha_o}{\alpha_r} = \frac{\lambda_o}{\lambda_r}\times\frac{D_r}{D_o} \Leftrightarrow \frac{\alpha_o}{\alpha_r} = \frac{6000\times10^{-10}}{6\times10^{-3}}\times\frac{100}{1} \Leftrightarrow \frac{\alpha_o}{\alpha_r} = \frac{6\times10^{-5}}{6\times10^{-3}}$$

$$\frac{\alpha_o}{\alpha_r} = 10^{-2} \Leftrightarrow \frac{\alpha_o}{\alpha_r} = 0{,}01 \Leftrightarrow \alpha_o = 0{,}01\alpha_r \Leftrightarrow \alpha_r = 100\alpha_o$$

Desta comparação conclui-se que com um telescópio de um metro no óptico conseguimos distinguir duas estrelas separadas por 0,15 segundos arco, enquanto que no rádio esse limite é cem vezes superior. Assim os telescópios no óptico têm maior poder resolvente do que os radiotelescópios, porque a frequência da luz visível é muito superior à das ondas rádio. Na prática há outros factores que limitam o poder resolvente dos telescópios no óptico, como a turbulência da atmosfera terrestre, o que torna por isso os radiotelescópios mais eficazes.

Com técnicas de interferometria a precisão angular em radioastronomia é muito maior, ultrapassando o obtido no óptico tendo sido já atingidas resoluções próximas de 0,001 segundos arco.

4.3. Seeing

Seeing é o movimento ou distorção de uma imagem telescópica resultante da turbulência na atmosfera da Terra. Pensa-se que é causado por ondulações entre camadas de ar separadas o que perturba o caminho da luz. O seeing varia consideravelmente de um lugar para outro, com as condições do tempo e pode mudar radicalmente de um segundo para o outro. O astrónomo francês Eugène Michael Antoniadi (1870-1944) desenvolveu uma escala que permite a classificação das condições de visibilidade, ou seeing, nas quais se realizam as observações astronómicas. Esta escala é muito usada pelos astrónomos amadores.

TABELA 4.2 Escala Antoniadi

Escala de Antoniadi		
Categorias	**Seeing**	**Seeing em arcsec**
I	Visibilidade perfeita, sem qualquer tremor.	$< 0{,}4$"
II	Leves ondulações, com momentos de calma que duram vários segundos, percorrendo os anéis de difracção.	$\approx 0{,}4 - 0{,}9$"
III	Visibilidade moderada, com tremores, deformações do disco central e anéis interrompidos.	$\approx 1{,}0 - 2{,}0$"
IV	Má visibilidade, com imagem em constante movimento apresentando desde pequenas ondulações até agitação constante.	$\approx 3{,}0 - 4{,}0$"
V	Péssima visibilidade, mal permitindo a elaboração de um esboço da imagem.	> 4"



I II III IV V

Figura 4.3 – Imagens das categorias do seeing segundo a escala de Antoniadi.

Existe uma outra escala que é usada quer por astrónomos amadores quer por astrónomos profissionais. É uma escala subjectiva constituída por dez níveis em que os astrónomos

registam as condições qualitativas da visibilidade atmosférica, correspondendo ao nível 1 a pior visibilidade e ao nível 10 uma visibilidade perfeita.

TABELA 4.3 Escala de Pickering

Escala de Pickering	
Níveis	**Seeing**
P-1	A imagem da estrela é geralmente o dobro do diâmetro do terceiro anel de difracção se este puder ser visto. Imagem estelar com 13''.
P-2	A imagem ocasionalmente é o dobro do diâmetro do terceiro anel (13").
P-3	O diâmetro da imagem é idêntico ao diâmetro do terceiro anel (6,7"), e mais brilhante no centro.
P-4	O disco central de difracção de Airy é frequentemente visível; arcos dos anéis de difracção são vistos às vezes em estrelas brilhantes.
P-5	O disco de Airy é sempre visível; nas estrelas brilhantes vêem-se frequentemente arcos.
P-6	O disco de Airy é sempre visível; vêem-se constantemente pequenos arcos.
P-7	O disco de Airy está bem definido e nítido algumas vezes; os anéis de difracção são vistos como longos arcos ou círculos completos.
P-8	O disco de Airy está sempre bem definido e nítido; os anéis de difracção são vistos como longos arcos ou círculos completos, mas sempre em movimento.
P-9	O anel interior de difracção é estacionário. Os anéis exteriores estão momentaneamente estacionários.
P-10	O padrão de difracção completo é estacionário.

Nesta escala poderemos considerar que:

- A visibilidade é muito má se o seeing estiver compreendido entre os níveis 1 e 3;
- A visibilidade é fraca se o seeing estiver compreendido entre os níveis 4 e 5;
- A visibilidade é boa se o seeing estiver compreendido entre os níveis 6 e 7;
- A visibilidade é excelente se o seeing estiver compreendido entre os níveis 8 e 10.

Os observadores terão ideias diferentes quanto ao significado dos números. Com o intuito de uniformizar esta escala, o astrónomo norte-americano, William Henry Pickering (1858-1938) do Observatório de Harvard usou um telescópio refractor de 5 polegadas. Os comentários de Pickering sobre discos e anéis de difracção terão que ser modificados para instrumentos maiores ou menores, mas são um bom ponto de partida para a elaboração da escala anterior que se baseia na grande ampliação de uma estrela quando esta é focalizada num pequeno telescópio.

Para algumas estrelas é impossível fazer a medição directa do diâmetro angular devido ao efeito do *seeing*. A radiação de uma estrela ao atravessar a atmosfera terrestre percorrerá elementos de massa de ar com temperatura e densidade diferentes, logo com diferentes valores para o índice de refracção. Daí resulta que haverá pequenas variações na direcção da radiação o que implica que a imagem formada no foco do telescópio é não pontual. Aparecerá uma mancha de dimensão variável, entre $\cong 0.5"$ em locais excelentes para observação até 4-5" em locais de má qualidade astronómica.

Por outro lado, para um telescópio de diâmetro D o limite de difracção para radiação com comprimento de onda λ é $1.22\frac{\lambda}{D}$.

Para certos valores de lambda (óptico) e para telescópios com $D > 20\ cm$ o limite de difracção é menor que o *seeing*.

Podemos considerar que o seeing é actualmente fundamental na definição da qualidade das imagens telescópicas, e portanto, da qualidade astronómica do céu.

Dado o elevado custo dos grandes telescópios e o avanço das técnicas de imagem (alta resolução angular), é de extrema importância conhecer a potencialidade, em termos de seeing, tanto de futuros observatórios astronómicos como dos já existentes. Precisamos de saber quais são os melhores lugares de observação e ainda assegurarmo-nos de que os telescópios já existentes não estão afectados pela turbulência gerada.

A turbulência atmosférica prejudica seriamente a qualidade da imagem obtida de um objecto celeste. A direcção e a intensidade do feixe de luz proveniente destes objectos é afectado de um modo constante e variável.

O termo constante na mudança de direcção do feixe de luz ao atravessar a atmosfera terrestre é aquilo que se denomina refracção e as flutuações na direcção do feixe de luz que ocorrem ao acaso produzem o chamado efeito de seeing. O termo constante de perda de luminosidade ao atravessar a atmosfera é conhecido como extinção atmosférica, enquanto que as flutuações não sistemáticas da intensidade da luminosidade proveniente dos objectos observados denominam-se cintilação.

O seeing traduz-se num aumento das imagens astronómicas relativamente ao tamanho calculado teoricamente. Contudo, no foco de um telescópio, na Terra e sem qualquer correcção, é impossível alcançar a resolução angular teórica, já que a luz proveniente dos objectos celestes deve atravessar várias camadas turbulentas da atmosfera que perturbam a sua propagação. Na prática o valor do seeing em astronomia é dada pela largura a média altura *(fwhm)* do perfil de uma estrela em segundos de arco, demonstrando a experiência que o valor do seeing é sempre superior a $\approx$0,25".O seeing ao ser definido no sentido da exposição longa (no tempo) inclui o *blurring* (o alargamento instantâneo da imagem) e o *image motion* (o movimento errático da mesma).

O seeing é usado como um parâmetro quantitativo da qualidade da imagem. Um seeing menor do que 1" pode ser considerado bom e quando da ordem de 0,5" ou menor excelente.

5. A NATUREZA TURBULENTA DA ATMOSFERA

Os telescópios ópticos colocados na Terra, são limitados na sua capacidade de formar imagens nítidas, devido às distorções causadas pela atmosfera. Começarei por descrever a estrutura da atmosfera e abordarei de seguida os vários efeitos da turbulência atmosférica, referindo a sua importância na degradação atmosférica das imagens.

5.1. A estrutura da atmosfera

A atmosfera da Terra é uma janela do Universo. Esta atmosfera frágil, translúcida de gases alimenta a vida na Terra, fornecendo-lhe o ar e a protecção das radiações perigosas e dos impactos destrutivos dos meteoritos. A sua transparência permite-nos vislumbres tentadores do cosmos, da segurança do nosso planeta, mas a atmosfera está em constante movimento e está longe de ser uma janela perfeita. Os raios de luz, que chegam até nós, mantêm-se inalterados ao longo das distâncias e trazem informação dos recantos distantes do Universo. Esses raios são distorcidos nos momentos finais da sua longa caminhada através do espaço.

A curiosidade humana sobre os objectos misteriosos vistos através da janela atmosférica deram origem ao nascimento da Astronomia. O Sol e a Lua forneciam-nos um calendário diário e mensal e marcavam as celebrações religiosas. O aparecimento no céu nocturno de estrelas específicas, apenas visíveis em certas épocas do ano, guiavam as actividades sazonais tais como as sementeiras.

Presentemente a astronomia óptica tem sido dominada pelos telescópios terrestres, apesar de uma crescente importância do telescópio espacial HST, que alcançam os recantos mais distantes do Universo. A atmosfera, através das suas propriedades de absorção, dispersão e turbulência, limitam a nossa capacidade de fazer medidas científicas com estes instrumentos. Alguns instrumentos que orbitam sobre a atmosfera terrestre podem desempenhar um papel muito importante na Astronomia do século XXI, mas, devido ao grande tamanho em relação aos foguetões e flexibilidade destes instrumentos é provável que eles continuem a ser a fonte principal de informação astronómica para o futuro.

Foram feitos enormes esforços na última metade do século passado para melhorar os meios de compensar os efeitos atmosféricos. Foram encontradas janelas espectrais no infravermelho (IR) e no rádio que permitem observações do cosmos a frequências diferentes das bandas visíveis. As ondas de rádio irão penetrar nas nuvens, sendo a sua refracção e dispersão

facilmente compensadas. O principal objectivo da utilização dos telescópios é revelar a verdade sobre o Universo.

A atmosfera terrestre sempre representou um ecrã (tela) entre qualquer observador e o resto do Universo, isto é, é o último obstáculo presente entre a fonte e o sistema de observação.

A Terra está envolvida por uma atmosfera que se estende por várias centenas de quilómetros no espaço. A atmosfera inicial, há mais de 4 mil milhões de anos, era talvez muito diferente da actual. Do interior da Terra podem ter sido libertados alguns compostos formados por hidrogénio, carbono, oxigénio e azoto, como dióxido de carbono, amónia e metano e, ainda, vapor de água.

O dióxido de carbono muito solúvel em água pode ter sido removido pela combinação com outras substâncias como o cálcio, nos oceanos, para formar calcário. O oxigénio livre, indispensável à nossa respiração, foi provavelmente gerado pelas plantas verdes. Na fotossíntese, as plantas verdes absorvem dióxido de carbono do ar, utilizam-no para o seu crescimento e libertam oxigénio.

Actualmente a atmosfera terrestre é constituída principalmente por azoto (N_2), oxigénio (O_2), e pequenas quantidades de outros gases, como, por exemplo, o dióxido de carbono (CO_2), a água (H_2O), e o metano (CH_4). O ar contém cerca de 21% de oxigénio, 78% de azoto e 1% de árgon, dióxido de carbono e outros gases. Existem também quantidades variáveis de vapor de água, poeiras, monóxido de carbono e produtos químicos das indústrias. Embora o vapor de água, o dióxido de carbono e o ozono estejam presentes no ar em quantidades muito pequenas, são de importância vital porque possuem a capacidade de absorver radiação infravermelha e ultravioleta, e assim afectar a temperatura da atmosfera e da superfície.

As nuvens desempenham um importante papel na manutenção do equilíbrio entre os níveis de radiação solar (incidente) e térmica (emitida). Mais de metade da superfície da Terra encontra-se sempre coberta de nuvens.

A atmosfera da Terra apresenta cinco camadas principais, que são causadas por variações de temperatura e de pressão resultantes da distribuição do aquecimento solar.

A *troposfera* contém o ar que respiramos sendo a camada mais baixa da atmosfera terrestre (zona da meteorologia). É a mais densa das camadas atmosféricas e apresenta uma descida da temperatura com a elevação em altitude. As nuvens, a chuva e a neve formam-se nesta camada. Contém cerca de 80% da massa total da atmosfera e é onde é absorvida a radiação visível, infravermelha e ultravioleta. A troposfera vai desde o nível do mar até cerca de 12 Km de altitude.

A *estratosfera* é a camada da atmosfera terrestre na qual a temperatura aumenta gradualmente com a altitude, embora as temperaturas estejam abaixo do ponto de congelação, e é nela que se encontra a maior parte do ozono. Esta camada de ozono está a cerca de 50 quilómetros de altitude acima da superfície, imediatamente acima da camada onde ocorrem os fenómenos meteorológicos, absorvendo a radiação ultravioletra.

A *mesosfera* estende-se até 80 quilómetros. É a camada da atmosfera mais fria podendo a sua temperatura chegar até aos –90°C.

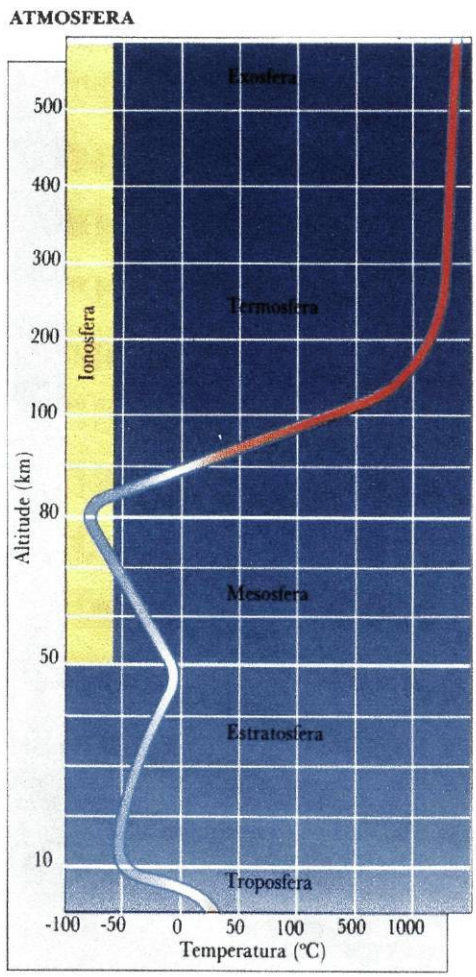


Figura 5.1 – Camadas da atmosfera terrestre.

A *ionosfera* situa-se a partir de uma altitude de cerca de 150 quilómetros. É a região da atmosfera na qual os gases são ionizados pela radiação ultravioleta e de raios X do Sol. Variações na actividade solar alteram a concentração de iões na atmosfera e possivelmente influenciam a frequência ou a intensidade dos temporais. Partículas electricamente carregadas provenientes do Sol através do vento solar são canalizadas pelo campo magnético da Terra para os pólos terrestres. Aí penetram mais facilmente na atmosfera terrestre e interagem com os átomos da atmosfera, transmitindo-lhes energia e excitando-os para níveis de energia

superiores. Quando esses átomos regressam ao seu estado fundamental, emitem radiação: as luzes que observamos nas auroras boreais e austrais.

A *exosfera* é a região mais alta e mais exterior da atmosfera da Terra, situando-se acima dos 500 km. Nesta camada, as condições não são muito diferentes das do espaço exterior, dado que o ar é rarefeito (ou pouco denso).

Existe uma zona de transição entre a troposfera e a estratosfera da Terra que se situa a uma altitude entre 11 e 13 quilómetros acima da superfície e que se chama *tropopausa.*

Podemos considerar uma outra camada da atmosfera terrestre situada entre os 80 e 500 quilómetros acima da superfície que é caracterizada por grandes flutuações de temperatura. A esta camada dá-se o nome de *termosfera.* Nestas altitudes, o número de moléculas presente é baixo e, por isso, a retenção do calor é pequena. Os gases da termosfera são ainda mais rarefeitos do que os da mesosfera. Contudo, absorvem a radiação ultravioleta do Sol, fazendo com que as temperaturas subam além dos 1000 °C.

A atmosfera terrestre apresenta uma certa opacidade que deriva das suas propriedades físicas e da composição da atmosfera, ou seja, tem propriedades de absorção da radiação.

O espectro de um planeta mostra muitas riscas e bandas largas de absorção que são as impressões digitais das moléculas que constituem a sua atmosfera. Uma das diferenças entre as atmosferas das estrelas e as dos planetas é que as últimas contêm muito mais moléculas que átomos. Um espectro de um planeta consiste em duas partes:

1. A parte onde domina a radiação solar reflectida ($\lambda < 4\mu m$);
2. A parte onde a emissão térmica de um planeta prevalece ($\lambda > 4\mu m$).

Falar em radiação reflectida implica a presença de um reflector. No caso da Terra pode ser a superfície (terra, mar) ou as nuvens. O espalhamento e a reflexão mudam apenas a direcção da radiação mas é através da absorção que a radiação é convertida em calor. Quando uma molécula de gás absorve radiação esta energia é transformada em movimento molecular interno, detectando-se um aumento de temperatura. Os gases absorvem bem a radiação disponível, tendo um papel fundamental no aquecimento da atmosfera.

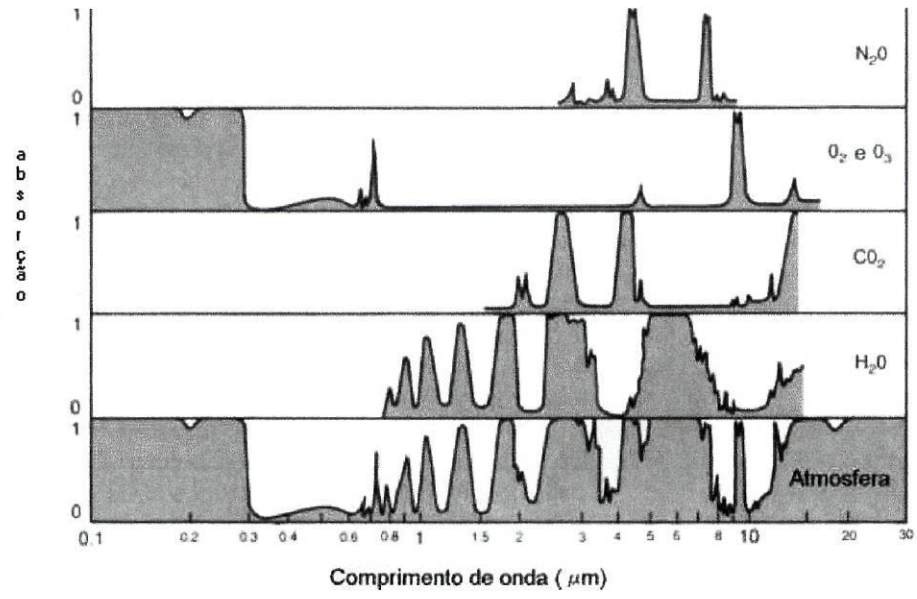


Figura 5.2 – Absorção dos diferentes gases da atmosfera terrestre consoante o comprimento de onda.

O azoto, o constituinte mais abundante da atmosfera terrestre, tem um fraco poder de absorção da radiação solar incidente, que se concentra principalmente nos comprimentos de onda entre 0,2 μm e 2 μm.

A fotodissociação do oxigénio (entre 50 a 110 km de altitude) $O_2 + h\nu = 2\,O$, absorve toda a radiação solar ultravioleta para $0{,}1\,\mu m < \lambda < 0{,}2\,\mu m$. O oxigénio atómico assim obtido é altamente reactivo, sendo de particular importância a reacção $O_2 + O + M = O_3 + M$ (M é uma terceira molécula necessária para retirar o excesso de energia libertada na reacção) que é o mecanismo dominante para a produção de ozono na atmosfera. Como a probabilidade de ocorrência desta reacção cresce com o quadrado da densidade do gás, o oxigénio atómico é estável na alta mesosfera e termosfera, enquanto que na estratosfera, o oxigénio atómico combina-se rapidamente para formar o ozono.

A radiação ultravioleta para $0{,}2\,\mu m < \lambda < 0{,}3\,\mu m$ é absorvida na reacção de fotodissociação do ozono, na estratosfera (entre 20 a 60 km) $O_3 + h\nu = O_2 + O$.

O átomo de oxigénio combina rapidamente com O_2 para formar outra molécula de O_3.

Quando $O_2 + O + M = O_3 + M$ e $O_3 + h\nu = O_2 + O$ ocorrem sequencialmente, não há mudança na estrutura química, apenas há absorção de radiação e a resultante entrada de calor e aumento de temperatura na estratosfera.

O vapor de água absorve significativamente a radiação solar incidente e, conjuntamente com o oxigénio e o ozono, é responsável pela maior parte da radiação solar que é absorvida na atmosfera, sendo também um factor muito importante na limitação de observações no

infravermelho próximo. As bandas fotométricas no infravermelho próximo situam-se em zonas de baixa absorção de vapor de água.

No intervalo entre 0,3 μm e 0,7 μm, nenhum gás absorve radiação, existindo uma larga "janela" que corresponde ao intervalo no visível ao qual pertence uma grande parte da radiação solar. A maior parte da absorção da radiação solar em comprimentos de ondas do intervalo do infravermelho deve-se ao vapor de água e ocorre na troposfera, onde está localizado o vapor de água. Esta absorção apresenta grande variabilidade devido à distribuição do vapor de água.

A difusão atmosférica interdita a observação diurna no visível. É também responsável pela poluição luminosa à noite.

A refracção desvia a direcção aparente de um astro da sua verdadeira direcção.

A emissão térmica da atmosfera reproduz igualmente o céu emissivo de dia como de noite e perturba a observação no infravermelho e milimétrico.

A turbulência atmosférica degrada as imagens, introduzindo flutuações de fase que perturbam a performance final ou a qualidade final das observações obtidas, estas flutuações serão debatidas mais detalhadamente na secção seguinte.

A ionização da atmosfera cria um plasma que modifica a propagação da radiofrequência.

O conjunto destes fenómenos aumenta variavelmente no tempo e dependem muito do lugar de observação. O acesso ao espaço permitiu abrir a observação na totalidade do espectro electromagnético. Mesmo no espaço, residem fenómenos parasitas como na atmosfera da Terra, perturbando as observações.

Por ser do interesse imediato deste trabalho vou concentrar-me na turbulência atmosférica e refracção.

5.2. REFRACÇÃO e refracção atmosférica

5.2.1. Refracção

O fenómeno da passagem da luz, de um meio transparente para outro, desde há muito que é estudado pelo Homem.

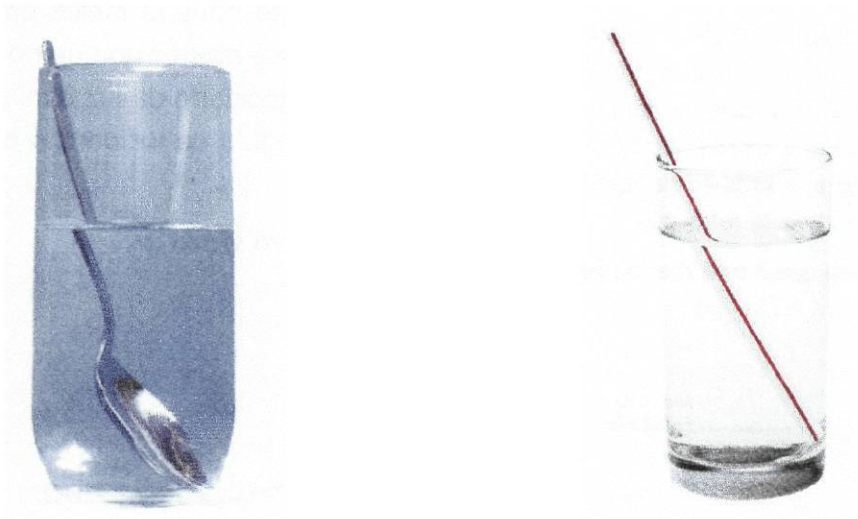


Figura 5.3 – Uma colher e uma palhinha mergulhadas na água parecem quebradas à superfície.

Os fenómenos observados nestas figuras traduzem factos de observação corrente. O facto dos raios luminosos mudarem de direcção na passagem do ar para a água permite-nos explicar a imagem de uma colher e de uma palhinha de refresco quebradas, quando parcialmente mergulhadas num copo com água. O raio luminoso que se propaga no ar e incide na água designa-se por raio incidente. O raio que se propaga na água, depois de ter mudado bruscamente de direcção, chama-se raio refractado. Quando um raio luminoso passa do ar para a água, o ângulo de refracção r é menor que o ângulo de incidência i e o raio refractado aproxima-se da normal. Neste caso, a água diz-se mais refrangente que o ar.

À passagem da luz de um meio transparente, com uma determinada densidade, para outro de densidade diferente, acompanhada da mudança de direcção dos raios luminosos, chama-se *refracção* da luz.

O raio de luz AB, que passa através do vazio, encontra a face superior PQ da lâmina de vidro de faces paralelas e origina o ângulo i com a normal BN. O ângulo NBA é o ângulo de incidência.

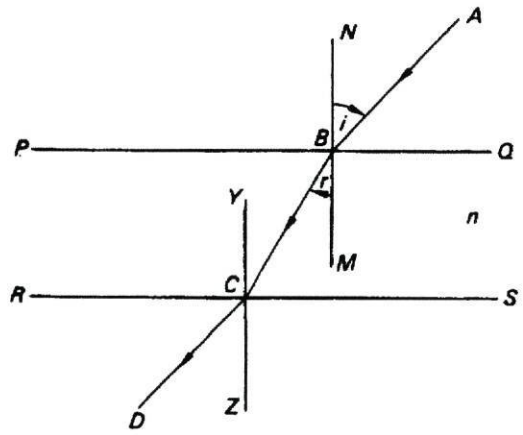


Figura 5.4 – Representação do trajecto de um raio através da lâmina de faces paralelas.

O raio é refractado até *C* na face inferior da lâmina *RS*. O ângulo *MBC* é o ângulo de refracção *r* e é menor do que *i*. O ângulo de emergência *ZCD* é igual ao ângulo de incidência *i*; o raio emergente é paralelo ao raio incidente.

Então, a *primeira lei de refracção* diz-nos que o raio incidente *AB*, a normal *BN* e o raio refractado *BC* são coplanares.

A *segunda lei de refracção* (lei de Snell) diz-nos que o quociente dos senos dos ângulos de incidência e de refracção é igual ao *índice de refracção n.*

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n$$

Desde que $r<i$, $n>1$.

O índice de refracção, *n*, de um meio óptico para um certo comprimento de onda da luz, é dado pelo quociente entre a velocidade da luz no vácuo e o valor da velocidade da luz nesse meio. Este índice é uma grandeza sem dimensões e quanto maior for o índice de refracção de um meio, menor é a velocidade da luz nesse meio.

5.2.2. Refracção atmosférica

Acima de cerca de 100 km não há refracção apreciável. Como o raio da Terra é igual a 6372 km pode-se desprezar a curvatura da atmosfera, considerando a atmosfera constituída por camadas planas e paralelas. Por isso, na figura 5.5, vê-se que a atmosfera é constituída por várias camadas paralelas de diferentes densidades, sendo grande a densidade à superfície da Terra e constante dentro de cada camada. Acima da atmosfera surge o vácuo do espaço.

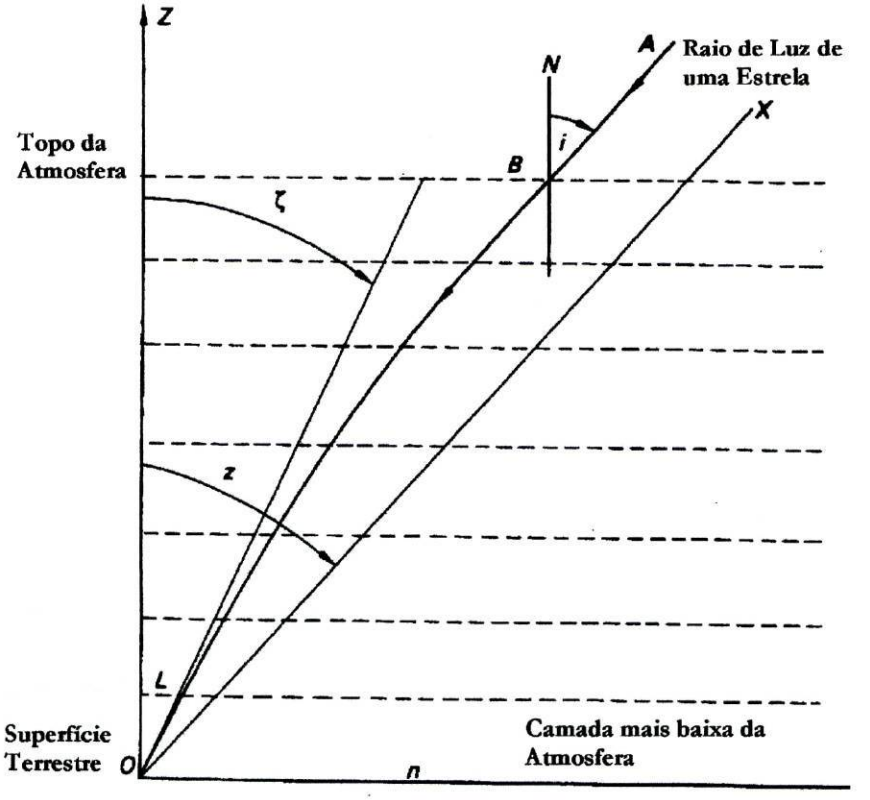


Figura 5. 5 – Refracção da luz de uma estrela pela atmosfera terrestre.

O raio de luz de uma estrela encontra a camada mais alta da atmosfera em *B*, o ângulo de incidência *i* será refractado sucessivamente nas várias camadas até chegar ao observador *O*.

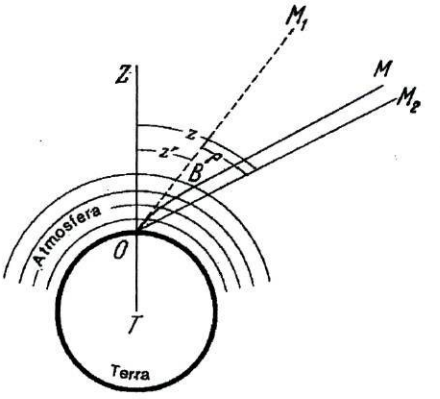


Figura 5.6 – Refracção atmosférica.

Os raios de luz provenientes de um dado corpo celeste, antes de incidirem nos olhos do observador, passam através da atmosfera da Terra e refractam-se nela. Uma vez que a densidade da atmosfera cresce à medida que se aproxima da superfície terrestre, o raio de luz (Fig.5.6) sofre um desvio cada vez maior, sempre no mesmo sentido, por uma linha curva, daí que a direcção OM_1 em que o observador *O* vê o astro considerado fique desviada para o lado

do zénite, deixando de coincidir com a direcção OM_2 (paralela a BM) em que o observador veria o astro se não existisse a atmosfera.

O fenómeno da refracção dos raios luminosos quando atravessam a atmosfera terrestre chama-se *refracção atmosférica*.

O ângulo de refracção ρ é dado pelo ângulo M_1OM_2 e o ângulo ZOM_1 representa a distância zenital aparente z', do astro, enquanto que o ângulo ZOM_2 representa a distância zenital verdadeira z.

Da figura 5.6 deduz-se que $z - z' = \rho$, o que significa que, a distância zenital verdadeira do astro é superior à aparente, sendo a diferença entre elas igual ao valor da refracção ρ. A refracção parece fazer subir o astro acima do horizonte.

A refracção depende da altura do astro acima do horizonte, do estado da atmosfera e em especial da sua densidade que varia em função da pressão e da temperatura.

O fenómeno da refracção modifica os contornos dos discos do Sol e da Lua durante os seus nascimentos e ocasos. No ar, o índice de refracção é menor para a luz de comprimentos de onda maiores e consequentemente a luz infravermelha é menos refractada que a luz visível. Este efeito faz com que a atmosfera se comporte como um prisma separando a cor dos astros. O nome desta refracção, dependente do comprimento de onda, é *refracção atmosférica diferencial* (ver experiência no anexo C).

5.3. Turbulência atmosférica

As imagens das estrelas e observações na superfície da Terra são muito diferentes das esperadas pelas previsões da óptica geométrica e ondulatória. Isto é devido à existência de uma atmosfera que deve ser atravessada pela luz dos astros antes desta luz chegar à objectiva do telescópio. O que ocorre essencialmente é que a atmosfera apresenta variações locais de temperatura, que estão associadas ao seu movimento (turbulência atmosférica), apresentando pois densidades diferentes e variáveis. Ao atravessar camadas de ar de diferentes densidades, a luz é refractada de forma diferente e a direcção dos raios varia. Além disso, a direcção da superfície entre camadas de densidades diferentes varia, o que é outro factor importante para o desvio diferenciado dos raios de luz. Como resultado deste efeito, os fotões provenientes de uma qualquer fonte são refractados.

O efeito da atmosfera dá, como resultado, um aumento da imagem de uma estrela não resolvida que é chamado de seeing, e é usado como um parâmetro quantitativo da qualidade da imagem.

Como o efeito do espalhamento da figura de difracção é aleatório, a forma final da imagem é aproximadamente uma gaussiana bidimensional. Na prática, o valor do seeing nesta curva é dado pela largura a meia altura da imagem (FWHM).

As características do local onde o telescópio está instalado estão ligadas à qualidade da imagem obtida. Como a turbulência da atmosfera é menor nos locais altos estes são escolhidos para a instalação dos grandes telescópios. As condições meteorológicas do local são levadas ainda em conta para a construção de um observatório astronómico. Um outro factor importante para o seeing é a turbulência, próxima ao telescópio, devida à diferença de temperatura entre o solo e o ar ou ainda, entre ar dentro e fora da cúpula. Portanto, uma medida importante para minimizar o seeing é a criação de condições para que as temperaturas interna e externa sejam iguais. Hoje em dia para melhorar a qualidade da imagem de um telescópio, começa-se a usar a óptica adaptativa.

A informação que recebemos de um objecto astronómico apresenta-se sob a forma de radiação electromagnética que foi perturbada pela passagem através da atmosfera. As flutuações espaciais que condicionam a observação astronómica têm escalas que vão de vários milhares de km (depressões e anticiclones) ao mm (dissipação viscosa). Do mesmo modo, as flutuações temporais têm períodos que vão das evoluções climáticas seculares ao milisegundo, característica dos tempos de deformação das imagens.

A deformação das imagens pela turbulência atmosférica é criada pelas variações do índice de refracção do ar, devido à variação de temperatura. Estas variações são totalmente aleatórias e turbulentas.

A teoria de Kolmogorov, apresentada em 1941, baseada na "Turbulência em cascata" supõe que num meio turbulento a energia é injectada sob a forma cinética na atmosfera e se redistribui por escalas espaciais cada vez mais pequenas, isto é, a energia cinética dos movimentos a grande escala transfere-se a movimentos de escalas menores, até uma determinada escala l, formando os turbilhões. A partir da escala l, a energia dissipa-se em calor por fricção viscosa (atrito).

Os trabalhos de Kolmogorov e de Tatarski permitem descrever o espectro de variação da temperatura num escoamento turbulento homogéneo e isótropo.

Por outro lado, a lei de Kolmogorov descreve essa turbulência para vectores de onda K que obedece à relação $L_0^{-1} < |K| < l_0^{-1}$, onde l_0 e L_0 são respectivamente, as escalas internas e externas da turbulência. Na atmosfera, a turbulência gera-se em diferentes escalas. Ao nível do solo l varia de alguns milímetros até ao centímetro na tropopausa. L é da ordem de algumas dezenas de metros, dependendo estes valores dos sítios e das condições de excitação

da turbulência (vento). Estes valores podem ir de alguns metros a várias centenas ou milhares de metros. O seu conhecimento é muito importante para a interferometria óptica porque determina a amplitude da perturbação diferencial de fase (efeito de pistão) entre duas pupilas afastadas.

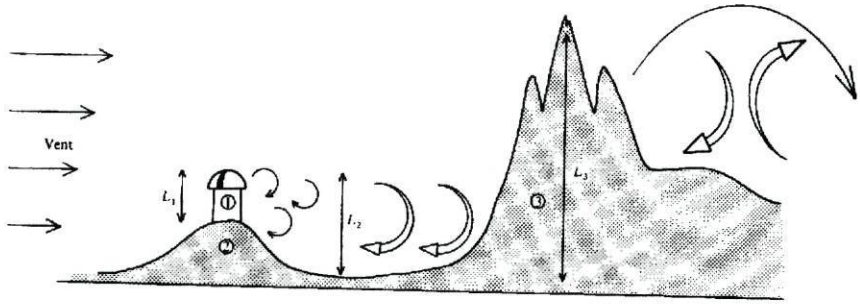


Figura 5.7 – Representação esquemática da geração da turbulência atmosférica por diferentes obstáculos. As escalas L_1, L_2 e L_3 são características das escalas externas.

5.3.1. Bolhas de ar quente / frio na camada turbulenta

Na atmosfera existem camadas de ar constituídas por bolhas de ar quente e de ar frio. Entre estas ocorrerão transferências de calor essencialmente por convecção.

O calor ganho na camada mais baixa da atmosfera através de radiação ou condução é normalmente transferido por convecção. A convecção ocorre como consequência das diferentes densidades do ar. Quando o calor é conduzido da superfície relativamente quente para o ar que se encontra por cima, este torna-se mais quente que o ar vizinho. O ar quente é menos denso que o ar frio de modo que as bolhas de ar frio descem e as bolhas de ar mais quente e menos densas sobem. O ar mais frio é então aquecido pela superfície terrestre e o processo repetir-se-á. Assim, a circulação convectiva do ar transporta calor verticalmente da superfície da Terra para a troposfera, sendo responsável pela redistribuição do calor das regiões equatoriais para os pólos e pelo movimento das bolhas de ar que causam a turbulência atmosférica.

5.3.2. Efeitos da turbulência da atmosfera

O efeito mais notável da turbulência atmosférica é uma imagem "desfocada" no plano focal de um telescópio. Para um grande telescópio o tamanho da imagem, normalmente chamado o disco de seeing, é normalmente maior do que o disco de difracção. O raio angular do disco de Airy é o limite de resolução θ,

$$\theta_1(arc\,\mathrm{sec}) = 0{,}25\lambda(\mu m)/\,D(m)$$

Se o raio θ do disco seeing é 0,5 arcsec e $\lambda = 0{,}5\mu m$, temos $\theta = \theta_1$ para um telescópio de 25 cm.

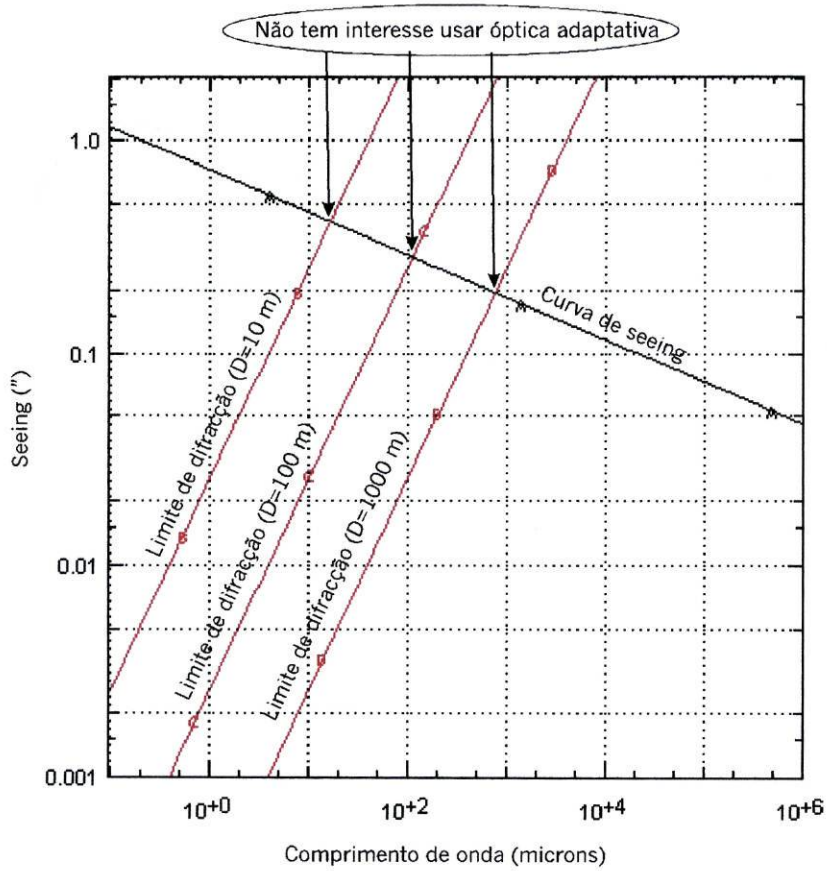


Figura 5.8 – Gráfico que relaciona o limite de difracção com o seeing.

Para comprimentos de onda visíveis e telescópios de 25 cm ou maiores, o tamanho da imagem é determinado pelos efeitos atmosféricos. Porque $\theta_1 \alpha\ \lambda / D$ <0,5".

O disco de seeing pode comparar-se com o disco de difracção para comprimentos de onda no infravermelho para grandes telescópios, especialmente para comprimentos de onda maiores que alcançam o solo.

A relação de Strehl é uma expressão da quantidade de luz contida dentro do disco de Airy como uma percentagem do máximo teórico que estaria contido dentro do disco com um sistema óptico perfeito, sendo a medida no pico do disco de Airy obtida em função do erro da frente de onda.

A relação de Strehl tornou-se num critério para avaliar a qualidade óptica. O desempenho de Strehl é expresso numa escala de números de 0 a 1, mas também se utiliza de 0% a 100%. Um sistema imperfeito corresponde a 0, correspondendo o 1 a um sistema perfeito. Um

sistema com um espelho perfeito coloca 84% da luz no disco de Airy e 16% da luz nos anéis. Um telescópio, no limite de difracção, focaliza 68% da luz incidente no disco central. A quantidade máxima de luz que pode ser focalizada por um sistema óptico perfeito é de 84% que é igual a uma relação de Strehl de 1. Ao dividirmos 68% por 84% obtemos uma relação de Strehl de 0,80.

Podemos definir a relação de Strehl como a intensidade do ponto da imagem no ponto mais central e brilhante dividido pela mesma intensidade da imagem sem qualquer aberração (turbulência). Voltarei a referir esta relação em 5.5.1.

5.3.3. Seeing e cintilação

O efeito da turbulência atmosférica nas imagens estelares é normalmente separado em dois fenómenos distintos.

Seeing é o termo usado para descrever mudanças casuais na direcção da luz que entra no telescópio enquanto que a cintilação se refere a flutuações também ao acaso (casuais) na intensidade.

Estes dois efeitos provêm de variações no índice de refracção.

Descrevemos em primeiro lugar os efeitos de seeing e cintilação na imagem estelar tal como o olho a observa. A cintilação é mais evidente a olho nu tal como o fenómeno de twinkling (piscar). No telescópio a cintilação não é normalmente vista sendo necessário um fotómetro para registar as flutuações na intensidade. Geralmente, quanto maior for a abertura menor serão as mudanças fraccionadas na intensidade.

O seeing manifesta-se de maneiras diferentes em função da abertura do telescópio.

Num bom seeing, com 10 cm de abertura (ou menor), o disco de Airy de uma estrela move-se casualmente em torno da sua posição focal dada no plano focal com variações de 1 ou 2 arcsec, uma vez que um telescópio de 10 cm só é sensível ao tilt e por isso só observamos o efeito de tilt, isto é, a mudança de posição da estrela.

Num grande telescópio de 0,5 metros ou maior, uma imagem "desfocada" é vista com pouco ou nenhum movimento da imagem no seu todo porque o telescópio já é sensível a vários modos (tilt, aberração, coma) e por isso tem vários speckles.

Se um olho pudesse seguir as mudanças rápidas dentro da imagem veria um padrão de mudanças de speckles (manchas) tendo cada speckle um comprimento comparável ao do disco de Airy.

Um dado padrão de speckle está estacionário durante algum tempo na ordem dos 10-50 msec, com dois padrões similares apenas para uma fonte pontual cerca de 10 arcsec cada um. A partir destas observações deduzimos que a curvatura da frente de onda é negligenciável para distâncias da ordem dos 10 cm, com inclinações instantâneas de 1 ou 2 arcsec a partir de uma frente de onda não distorcida. A imagem vista num grande telescópio é a média para muitas secções da frente de onda, cada uma com uma inclinação diferente.

5.4. Cintilação das estrelas

À mudança observada no brilho das estrelas chama-se *cintilação*.

As estrelas só cintilam quando olhamos para elas da Terra. No espaço, elas brilham de forma constante. Nós vemos as estrelas a cintilarem e a tremeluzir por causa do ar à volta da Terra. À medida que a luz de uma estrela viaja na nossa direcção é desviada por bolhas de ar quente e frio.

A luz proveniente das estrelas, ao atravessar a atmosfera, encontra correntes de ar quente e de ar frio que estão em movimento. Devido à refracção da luz nestas camadas, o trajecto dos raios luminosos vai-se alterando. A mudança rápida da imagem da estrela origina a cintilação.

As estrelas que se encontram mais perto do horizonte cintilam mais. Isto acontece porque quando olhamos para o horizonte devemos olhar através de mais ar do que quando olhamos na direcção do zénite.

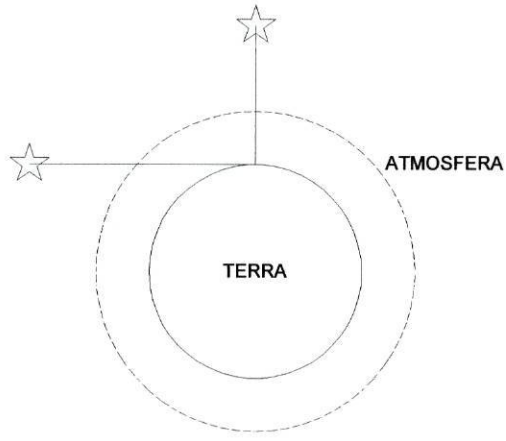


Figura 5.9 – Esquema que ilustra o raio de luz de uma estrela situada no horizonte que percorre uma maior zona da atmosfera em relação a uma situada na direcção do zénite.

O efeito de cintilação é causado por massas de ar com temperaturas diferentes que passam entre o observador e o objecto que está a ser observado. Um efeito semelhante poder-se-á observar num dia de Verão quando olhamos para o fundo de uma estrada quente de alcatrão. No caso das estrelas, o efeito é causado pela Terra que é aquecida pelo Sol durante o dia e a

Terra continua a libertar este calor durante a noite. As bolhas de ar em contacto com a Terra aquecem, as moléculas do gás afastam-se mais umas das outras, passando a ocupar um volume maior e, por isso, o ar torna-se menos denso, fazendo com que as bolhas de ar quente subam e se misturem com bolhas de ar frio, causando a turbulência atmosférica. O mesmo acontece, por vezes, quando, à noite, subimos a um monte e olhamos a nossa cidade, parece-nos que as suas luzes cintilam como as estrelas. Para pequenas cintilações das estrelas nós dizemos que existe um bom seeing.

A cintilação das estrelas é provocada pela mudança rápida no brilho das estrelas e também pela mudança na cor com que as estrelas cintilam percorrendo todas as cores do arco íris.

A cintilação surge porque as pequenas bolhas de ar quente e frio movem-se constantemente entre o observador e a estrela. O ar quente tem uma densidade diferente da do ar frio. Os raios de luz ao passarem através das bolhas de ar sofrem um desvio nos seus diferentes trajectos devido à refracção. Podemos considerar que as bolhas de ar quente e frio são lentes de tipos diferentes. Quando o ar afasta a luz da estrela do observador, a estrela escurece, apresentando um brilho menos intenso do que o normal. Quando uma outra bolha de ar transmite ao observador mais luz, a estrela parece mais brilhante do que o normal. Quando há mudança de tempo com vento de alta altitude, o ar quente e frio misturam-se com maior facilidade e estrelas parecem cintilar rapidamente.

Estas pequenas bolhas de ar não são lentes perfeitas, assemelham-se mais a prismas. Os prismas decompõem a luz branca nas suas várias cores. Imaginando pequenos prismas a moverem-se entre o observador e a estrela, estes emitir-lhe-iam flashes de várias cores. Se o observador tiver uma visão bastante sensível poderá ver pequenos arco íris. Este observador veria o flash da estrela através de várias cores ao mesmo tempo, vermelho, amarelo, verde e azul.

Com muitas pequenas bolhas de ar entre o observador e a estrela, observar-se-á uma combinação aleatória de cores.

Podem distinguir-se três efeitos causados pela perturbação atmosférica que são suportados pela frente de onda: a cintilação, a agitação e a exposição.

5.4.1. A cintilação

A cintilação é uma variação local de energia luminosa recebida no telescópio. Geralmente admite-se que as degradações da frente de onda são originadas nas camadas atmosféricas de baixa altitude. Neste caso o efeito da cintilação é desprezado e a degradação da frente de onda é reconduzida até às flutuações de fase.

5.4.2. A agitação

A agitação da imagem no plano focal do telescópio é causada pela variação média do gradiente da frente de onda na abertura do telescópio, correspondendo a uma variação do ângulo do plano médio tangente à frente de onda.

5.4.3. A exposição

A exposição de uma imagem é causada pela perda da coerência espacial da frente de onda. O efeito de exposição manifesta-se pela criação de manchas nas imagens formadas no foco dos telescópios. Estas manchas são designadas por *speckles*.

5.5. Degradação Atmosférica das imagens

5.5.1. Seeing e Strehl

Há diversos conceitos que merecem alguma referência quando falamos no desempenho da óptica adptativa que será descrita no próximo capítulo. Um destes conceitos é o parâmetro de Fried, r_0, que pode ser visto como o diâmetro máximo de um telescópio que suporta as imagens no limite de difracção com uma determinada atmosfera. As escalas típicas para r_0 variam entre 1 e 20 cm, podendo estes valores alterar-se rapidamente com o tempo. De facto, o parâmetro de Fried é uma medida da turbulência atmosférica, no qual r_0 diminui quando a turbulência aumenta. Nas mesmas condições atmosféricas o tamanho do parâmetro de Fried depende do comprimento de onda, sendo as correcções mais fáceis de executar no infravermelho do que no visível.

Um outro conceito importante é o da relação de Strehl. Esta relação é um critério tradicional para medir a qualidade da imagem dada pela razão entre a intensidade máxima de uma imagem e a intensidade máxima da imagem no limite de total difracção, ambas normalizadas para a mesma integração de fluxo. A relação de Strehl (qualidade da imagem) melhora quando o parâmetro de Fried aumenta. Uma imagem com uma relação de Strehl da ordem de 0,9 no infravermelho com OA pode apresentar uma relação de Strehl de 0,1 a 0,2 para comprimentos de onda no visível. A relação de Strehl, na ausência de OA, é dada por $\frac{D}{r_0}$, onde D é o diâmetro da objectiva do telescópio e r_0 é o parâmetro de Fried. É claro que a

qualidade da imagem de um sistema de óptica adaptativa é sensível aos erros causados pela frente de onda incidente tal como o parâmetro de Fried (que depende do comprimento de onda) ao tamanho do telescópio.

O parâmetro de Fried, r_0, chega para definir a imagem perturbada cuja largura a meia altura é função da razão $\frac{\lambda}{r_0}$. O valor angular, $\Delta\Theta = \frac{\lambda}{r_0}$ é frequentemente designado por *seeing*.

O valor do parâmetro de Fried, $r_0(\lambda)$, é definido para um comprimento de onda referencial λ_0=0,5 μm. Como $r_0 \alpha \lambda^{\frac{6}{5}}$, o valor do parâmetro de Fried para qualquer comprimento de onda λ_1 é dado pela relação

$$r_0(\lambda_1) = r_0(\lambda_0)\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_0}\right)^{\frac{6}{5}}$$

Um telescópio dará imagens mais próximas do limite de difracção no infravermelho do que no visível, para um determinado diâmetro e um ângulo zenital dado.

Fried mostrou, ainda, que r_0 pode ser também definido como o diâmetro de uma área da superfície de onda sobre o qual a média das flutuações de fase dadas pela atmosfera são aproximadamente iguais a 1 radiano. Assim o parâmetro de Fried pode ser também considerado como uma medida do comprimento de coerência das flutuações de fase provocadas pela turbulência.

A função de espalhamento, na qual a transformada de Fourier é a soma de dois termos, um disco de Airy mais o halo dado pela luz difractada através do que resta dos erros da pequena escala da fase da frente de onda.

5.5.2. Tempo de coerência da atmosfera

Num modelo simples da atmosfera com apenas uma camada turbulenta, o tempo de coerência atmosférica τ_0 é igual ao tempo de translação das perturbações da frente de onda, com uma velocidade v e um diâmetro do telescópio D :

$$\tau_0 = \frac{D}{v}$$

No caso de um modelo com várias camadas turbulentas, onde a dispersão das velocidades do vento nas camadas turbulentas é dada por Δv, a relação anterior virá:

$$\tau_0 = \frac{r_0}{\Delta v}$$

O tempo de coerência é a duração média durante a qual a fase da frente de onda não varia mais que um radiano. Há várias definições de tempo de coerência, mas segundo Roddier, o tempo de coerência é proporcional à razão do parâmetro de Fried e à velocidade horizontal da camada horizontal.

$$\tau_0 \alpha \frac{r_0}{v}$$

Quando a duração de uma exposição é grande comparativamente com τ_0, a intensidade observada em cada ponto da imagem é reenviada ao valor médio da intensidade instantânea. Estamos, neste caso, perante uma imagem de longa exposição e a resolução angular destas exposições está limitada pelas condições atmosféricas, qualquer que seja o tamanho do telescópio ($> r_0$).

Pelo contrário, quando o tempo de exposição é muito pequeno em relação a τ_0, estamos perante o caso de imagens de curta exposição. As altas frequências espaciais mantêm-se, embora muito misturadas (spekles), e a resolução angular não será mais limitada pelas condições atmosféricas mas sim pelo limite de difracção do telescópio.

6. CORRECÇÃO DO EFEITO DA TURBULÊNCIA

Vimos anteriormente que a turbulência natural na atmosfera distorce as frentes de onda planas que atingem a Terra vindas de objectos muito distantes.

Neste capítulo apresentarei alguns modos de corrigir os efeitos da turbulência atmosférica na qualidade da imagem. Começarei por apresentar um método que trata e processa as imagens à posteriori - a interferometria speckle, seguidamente a óptica adaptativa que funciona em tempo real e finalizarei com a apresentação das estrelas laser que permitem corrigir algumas limitações da óptica adaptativa com estrelas de referência naturais e artificiais.

6.1. Interferometria "speckle"

A aplicação da técnica de *interferometria "speckle"* em astronomia foi proposta por Labeyrie em 1970 e teve um grande impacto em astronomia com grandes telescópios.

Inicialmente consistia em algo muito simples como recolher um elevado número de imagens e calcular o espectro de potências (o quadrado do módulo da transformada de Fourier) de cada uma delas. Os espectros de potências de uma única imagem são bastante ruidosos por causa da turbulência atmosférica e do reduzido número de fotões detectados. Medindo os espectros de potências de muitas imagens pode recuperar-se a informação do espectro de potências do objecto observado, preservando a informação até ao limite de difracção do telescópio.

Com a informação do espectro de potências do objecto podem estudar-se alguns casos simples. Por exemplo, deste modo podem medir-se as separações angulares entre os componentes de um sistema binário e o tamanho angular de uma estrela resolvida. No entanto, para se poder aplicar o método a objectos mais complicados, dos quais não se tenha nenhuma informação "à priori", deve obter-se também informação da fase da transformada de Fourier desse objecto. O espectro de potências só por si não permite reconstruir o objecto.

6.2. Breve história da Óptica Adaptativa

6.2.1. Introdução

Para situar a óptica adaptativa numa perspectiva histórica, começaremos com o velho objectivo de determinar as posições dos corpos celestes. A regularidade dos movimentos dos

corpos celestes foi reconhecida em tempos antigos tendo, para tal, a Astronomia dado um contributo bastante positivo .

Os primeiros modelos do Universo tinham como objectivo explicar os movimentos dos corpos celestes.

A invenção do telescópio, no início do século XVII, revelou a estrutura do Sistema Solar.

A essência da óptica adaptativa é a capacidade de medição e correcção da direcção dos raios estelares ou de objectos astronómicos perturbados pela turbulência atmosférica.

A função da óptica adaptativa na astronomia é remover desvios da trajectória óptica entre o objecto celestial e o fotómetro ou o CCD. Quando isto é alcançado, a qualidade da imagem é limitada apenas pelo tamanho da abertura do telescópio.

Para observações astronómicas, os desvios ocorrem perto do final da trajectória óptica, na atmosfera da Terra e no próprio telescópio. Se não for corrigida, a imagem de uma estrela é espalhada para um disco de seeing que pode ser 10-100 vezes maior que o limite de difracção do próprio telescópio, degradando a resolução angular e reduzindo grandemente o pico de intensidade. A maioria da degradação da imagem é causada por variações ocasionais de fases devido à turbulência dentro da trajectória do raio. Um sistema de óptica adaptativa mede estas fases de perturbação e compensa-as em tempo real, restaurando a qualidade da imagem para uma fracção útil da difracção - capacidade limitada do telescópio. Para ampliações astronómicas, o pico de intensidade da imagem requerido é tipicamente entre 0,1 e 0,8 vezes a sua difracção - valor limitado, dependendo da tarefa científica. Em certos casos, tais como detectar pares indistintos de estrelas, é requerido um valor mais elevado de compensação para reduzir a luz dispersa de uma estrela.

A óptica adaptativa é capaz de melhorar a performance da maioria dos instrumentos ópticos usados em astronomia, incluindo espectrógrafos e interferómetros e outros aparelhos. Não é limitado a compensar a turbulência atmosférica, apesar de isto ser normalmente o problema mais sério nas observações terrestres. O sistema adaptativo pode ser usado para corrigir desvios da imagem no espelho primário bem como os desvios ópticos que surgem de qualquer perturbação ao acaso, após o alinhamento das pequenas variações de temperatura e do vector de gravidade, que pode ter uma escala de tempo de horas até aos remoinhos da turbulência que se movem rapidamente transportados por ventos de alta velocidade, produzindo uma série de frequências dadas pelo sinal que se aproxima dos 1000 hertz.

As perturbações atmosféricas que afectam os grandes telescópios têm frequências acima de 1 hertz. A óptica adaptativa irá descer pouco a pouco até às mais baixas frequências temporais e provou-se ser conveniente, na prática, compensar as perturbações de frequência mais baixa,

devido à temperatura e gravidade, através de um sistema de comandos separados conhecido como "óptica activa". Nos grandes telescópios o espelho primário é potencialmente a maior fonte de erros da frente de onda de baixa frequência. A principal função da óptica activa é controlar a sua imagem óptica, eliminando numerosos erros de fases de baixa frequência. Isto permite que o sistema de uma série de frequências dadas pelo sinal temporal seja necessário para compensar a turbulência atmosférica. Uma outra diferença é que os sistemas de óptica activa normalmente usam uma referência local (que pode ser óptica ou mecânica) para controlar o espelho primário enquanto que os sistemas de óptica adaptativa têm necessidade de empregar fontes de referência distantes para medir a frente de onda. Algumas montagens de óptica activa usam uma estrela natural para calibrar o sistema de controle.

As duas propriedades importantes de um grande telescópio são a sua área colectora e a sua resolução angular. Uma maior abertura D não aumenta apenas a quantidade de luz recolhida, mas também reduz o diâmetro de uma imagem de uma estrela irresoluta de forma a que o seu pico de intensidade aumente com D^4, enquanto que a resolução angular melhora com $\frac{\lambda}{D}$ (quanto mais pequeno for melhor). Durante os 400 anos de existência dos grandes telescópios a tecnologia de melhoramento óptico tem permitido o aumento das suas aberturas de uma forma regular. Apesar de um grande poder de concentração de luz já ter sido alcançado (os dois telescópios Keck têm aberturas de 10 m), o desempenho dos maiores telescópios há muito tempo que alcançaram o limite imposto pela turbulência atmosférica. Para aberturas maiores do que a coerência de comprimento de turbulência r_0 que está geralmente compreendido entre 0,1 e 1 m, dependendo do comprimento de onda e das condições atmosféricas, a resolução angular é limitada a $\frac{\lambda}{r_0}$ e o pico de intensidade da imagem aumenta apenas com o quadrado da abertura do telescópio. Estas restrições têm sido eliminadas na última década pelo uso de espelhos primários activos e da óptica adaptativa aumentando bastante o desempenho dos grandes telescópios terrestres.

A óptica adaptativa permite que telescópios relativamente pequenos igualem ou excedam o desempenho de instrumentos maiores e mais equilibrados.

6.2.2. Astronomia a olho nu

As características mais notáveis durante a noite no céu são as figuras produzidas pelas estrelas fixas entre os planetas. As estrelas podem ser diferenciadas pela sua cor e pelo seu brilho.

Antes de 600 A.C. os astrónomos da Babilónia utilizavam instrumentos de visão muito simples para estabelecer a direcção e determinar os movimentos do Sol, da Lua e dos planetas, com alguma precisão surpreendente. Foi dada muita importância à previsão dos eclipses. Esta informação passou para os gregos, através de Platão (427-347 A.C.) que descreveu a Terra como um modelo centrado no Universo baseado em esferas concêntricas. Este modelo não explicava todos os fenómenos conhecidos, e os seguidores de Platão propuseram modelos abstractos e idealísticos do Universo. Para explicar melhor os movimentos observados dos planetas, Eudoxos (408-355 A.C.) apresentou um sistema complexo formado por 27 esferas geocêntricas, quatro das quais pertenciam a cada um dos planetas. Isto foi considerado como uma pura invenção matemática. Pederson [1974] verificou que os corpos celestes não eram considerados como objectos até cerca de 400 A.C..

Aristóteles (384-322 A.C.), discípulo de Platão, tinha um ponto de vista mais objectivo da natureza. Ele valorizou a Matemática e considerou-a como um auxiliar para a observação directa, pois ele acreditava que era a única maneira de adquirir conhecimentos do mundo físico.

Cerca de 300 A.C. foi fundada uma universidade e uma biblioteca em Alexandria, que se tornou o centro da Astronomia grega teórica e observacional. Aristarchos de Samos (310-230 A.C.) criou a teoria heliocêntrica do Universo mas considerou-a apenas como uma hipótese matemática e não como uma representação da realidade física.

O auge da astronomia grega foi atingido com Hipparchos (190-120 A.C.), que combinou competências teóricas e observacionais, compilando o primeiro catálogo das posições e grandezas das estrelas. Usou instrumentos de medição como esferas armilares. Ele descobriu a precessão dos equinócios. As observações de Hipparchos relativas às posições dos planetas revelaram os princípios da teoria proposta por Eudoxos, resultante da adopção do sistema de epiciclos, inicialmente sugerida por Apollonius. O cuidado e a aproximação prática usada por Hipparchos fez dele o primeiro astrónomo observacional.

Dos cerca de três séculos que separam Hipparchos de Ptolomeu, muito pouco se sabe relativamente ao desenvolvimento da Astronomia.

Ptolomeu (90-160 D.C.) aumentou o catálogo de Hipparchos, compensando as anteriores observações com a precessão. Esta é devida ao facto de a Terra não ser uma esfera e o Sol e a

Lua moverem-se numa órbita inclinada relativamente ao equador. O Pólo Norte Celeste (PNC) executa um movimento de precessão em torno do Pólo Norte Eclíptico (PNE), descrevendo uma órbita circular de raio ε e período 26000 anos. Ptolomeu tornou-se conhecido pelo trabalho de "*A Colecção de Matemática*", constituída por 13 volumes a que os árabes chamavam "*al-Magiste*" que depois das traduções europeias ficou conhecido por *Almageste*. Foi a primeira referência para a Astronomia durante mais de mil anos. O Universo centrado na Terra tinha um esquema geométrico que explicava os movimentos circulares permitindo que as suas posições fossem previsíveis no futuro. Também descreveu instrumentos de observação incluindo o quadrante no qual os ângulos eram medidos em termos de distâncias. Este deve ter sido o primeiro instrumento cuja calibragem "software" foi utilizado para apoiar o "hardware" óptico.

Durante algum tempo, foi provavelmente o conhecimento da óptica que permitiu estudar as propriedades da atmosfera terrestre. O fenómeno da reflexão óptica e refracção foram conhecidos no século V A.C. através do uso de espelhos e vidros queimados que focalizavam os raios de Sol, mas a primeira descrição quantitativa destes fenómenos só surgiu no século II D.C. nos livros de Ptolomeu sobre óptica. Os movimentos dos planetas, incluindo o movimento retrógrado, foram conhecidos na época de Platão, cerca de 400 anos A.C..

Os primeiros instrumentos astronómicos foram usados no Egipto e na Mesopotâmia por volta de 1500 A.C., para medir o movimento diário e anual do Sol. Incluem-se aqui o gnomon, a vara vertical, o relógio de sol e o astrolábio. Com estes simples instrumentos foram feitas algumas medidas, incluindo o meridiano do local e os pontos cardeais, as datas dos solestícios e equinócios, a duração dos dias e do ano. É interessante notar que tais observações astronómicas precederam as teorias do Sistema Solar cerca de 1000 anos. As horas de luz / dia foram registadas por relógios de sol . Estes estavam calibrados para seis horas de luz registadas antes do meio dia e no sentido contrário registavam as horas de luz da parte da tarde.

Por volta do século IV A.C. o gnomon foi desenvolvido dividindo os pólos em horas. Para actividades comuns, o dia e a noite foram divididos em 12 horas cada. Nos equinócios o número de horas de dia e de noite era igual, mas em outras alturas do ano, a duração do dia e da noite variava, o dia era maior no Verão e menor no Inverno. Pequenos períodos de tempo eram medidos por relógios de água nos quais a água corria para uma pequena vasilha por um pequeno orifício.

Manter o tempo constante foi o principal problema da Astronomia até ao século XVIII.

Cleomedes (século I D.C.) foi o primeiro a fazer referência à refracção atmosférica em relação a um eclipse paradoxal, durante o qual o Sol e a Lua eclipsada eram visíveis. Isto não deveria ocorrer se os raios de luz se propagassem em linha recta. Cleomedes explicava que o fenómeno era devido à curvatura dos raios de luz na atmosfera. Ptolomeu também estudou a refracção atmosférica concluindo que um destes efeitos era aumentar a distância aparente das estrelas.

Depois da desintegração do Império Romano e de um incêndio na biblioteca de Alexandria em 641 D.C., as cidades árabes de Bagdad, Cairo e Damasco tornaram-se o centro da Astronomia.

Nos séculos XI e XII grandes instrumentos de observação foram construídos na Europa, Arábia e Índia. Foi a época em que o grande físico árabe Ibn al-Haitham (Alhazen, 965-1039) descreveu pela primeira vez os efeitos atmosféricos em observações astronómicas - a mudança da forma do Sol e da Lua à medida que se aproximam do horizonte e a necessidade de considerar a refracção atmosférica na determinação da posição das estrelas.

Por volta desta época, os árabes aperfeiçoaram o astrolábio, pequeno instrumento que permite que o tempo seja determinado através da posição do Sol ou das estrelas, sendo de grande importância para a navegação.

O astrolábio usado pelos árabes provavelmente teve origem no Egipto nos séculos III e IV D.C. e combinava dois instrumentos . O alidade mostrava a altitude, o ângulo do Sol ou o brilho das estrelas. No outro lado do disco estava uma calculadora que convertia o ângulo medido na hora local.

O culminar da Astronomia a olho nu surgiu no século XVI, com Tycho Brahe no observatório de Uraniborg na Dinamarca, onde usavam grandes quadrantes e esferas armilares para medir as posições dos corpos celestes. É de salientar que isto ocorreu antes da invenção do telescópio e que, até então, não se utilizava qualquer aparelho de óptica na observação dos corpos celestes. A acuidade do olho humano é de cerca de 1 minuto de arco da luz do dia, quando o diâmetro da pupila ronda os 2,5 mm. À noite o diâmetro da pupila pode ir até 7 mm e a acuidade é pior. Com os instrumentos de observação têm que se ter em consideração dois aspectos: a precisão com qual o instrumento é calibrado e a precisão do alinhamento.

Antes de Tycho Brahe, a precisão não era melhor do que ± 10 minutos de arco o que levava a erros de vários dias na previsão da posição dos planetas. Tycho conseguiu reduzir os erros de visão em cerca de 2 minutos de arco eliminando erros de paralaxe ocorridos com pínulas convencionais. A pínula de observação é formada por quatro fendas definindo um quadrado como mostra a figura 6.1. Na extremidade do instrumento coloca-se um quadrado

opaco do mesmo tamanho que o primeiro. O instrumento era ajustado de modo a que a estrela tocasse cada lado do quadrado quando visto através das fendas correspondentes.

Tycho reduziu o erro das suas observações em cerca de 1/2 minuto de arco utilizando um cilindro como mira.

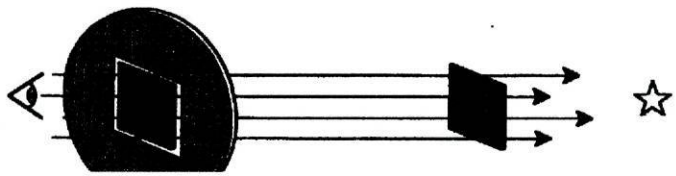


Figura 6.1 – Sistema de mira, anterior à invenção do telescópio, usado por Tycho Brahe, no século XVI, para eliminar a paralaxe. A estrela foi alinhada por cima simultaneamente pelas quatro fendas dos quatro lados da pínula quadrada.

Os efeitos atmosféricos não são aparentes embora as medidas angulares ainda tenham que ser corrigidas para a refracção atmosférica. A precisão com que a posição das estrelas podia ser medida não foi melhorada até à utilização do telescópio que foi inventado 50 anos mais tarde.

6.2.3. Astronomia com telescópios

Foi a invenção do telescópio que deu aos astrónomos a chave para a compreensão do Universo. Galileu ouviu falar na existência de um novo instrumento em 1609 mas não sabia das combinações das lentes. Ele rapidamente descobriu a combinação utilizada e que era formada por uma ocular côncava com uma objectiva convexa e confirmou que elas faziam os objectos distantes parecerem mais próximos.

Em 1610, apontou um telescópio para Júpiter e viu três estrelas perto deste planeta. Inicialmente pensou que eram três estrelas fixas, mas na noite seguinte descobriu que tinham mudado as suas posições em relação ao planeta. Observações posteriores revelaram a existência de um quarto objecto. Concluiu que havia satélites a orbitar o planeta Júpiter; o seu telescópio tinha revelado qual era a estrutura básica do sistema solar. No mesmo ano, observou a mudança de tamanho e fases de Vénus, o que confirmou que ele pode girar à volta do Sol mas não da Terra. O modelo geocêntrico do Universo, aceite por mais de 2000 anos, acabava de ser derrubado. A teoria heliocêntrica que Copérnico e Kepler defendiam foi confirmada em poucas noites de observações.

As descobertas de Galileu demonstravam o valor da utilização de novos instrumentos para aumentar o conhecimento do Homem sobre o mundo através de observações científicas, de

modo a deduzir rapidamente a verdade através de argumentos lógicos. Estava criado um princípio básico da ciência.

O telescópio fornece-nos novas informações sobre o Universo e permite-nos confirmar as teorias que explicavam as descobertas anteriores. Esta relação entre instrumentação e teoria é fundamental para a ciência. A observação produz informação; a análise da informação sugere nova teoria; novos instrumentos são criados para confirmar a nova teoria; novos factos são descobertos; e o processo repete-se.

Nos primeiros séculos dos telescópios, estes eram instrumentos simples. Tinham algumas limitações básicas, tais como o fabrico das lentes e espelhos e o carregar dos objectos pesados. O principal objectivo dos astrónomos deste tempo era determinar a posição das estrelas e dos planetas, assim o telescópio não era utilizado como um instrumento de mira óptica. O telescópio óptico foi inventado cerca de 1640 por William Gascoigne. Nele são localizados reticulados no foco da ocular o que habilita o telescópio a ser apontado com precisão a uma estrela.

Os telescópios de Galileu tinham um poder de resolução de apenas 10-15 arcsec, onde os efeitos da turbulência atmosférica não eram muito visíveis. Os astrónomos aperceberam-se das limitações impostas pela atmosfera não apenas na curvatura dos raios de luz ao mudarem a posição das estrelas mas também na imprecisão das imagens das estrelas e dos planetas. O primeiro astrónomo a ter em consideração a importância das condições atmosféricas nas imagens telescópicas foi Christian Huygens que, cerca de 1656, usou um telescópio com uma distância focal de 123 pés, a objectiva menor deste telescópio foi montada sobre um poste alto. Ele notou que as estrelas, assim como a Lua e os planetas, tremiam no telescópio mesmo quando a atmosfera parecia calma e serena.

Isaac Newton, nos seus estudos de prismas ópticos, tomou consciência dos problemas cromáticos nos telescópios reflectores. As suas medições sugeriam que todo o meio óptico tem o mesmo poder dispersivo, levando-o à errónea conclusão que é impossível corrigir a aberração cromática dos telescópios reflectores. Na sua busca de melhores instrumentos, Newton, em 1668, construiu um pequeno telescópio em que usou um metal primário côncavo com uma fenda diagonal secundária para reflectir o raio de luz para uma ocular no lado do tubo.

Newton conhecia já os problemas causados pela turbulência atmosférica, e na obra "*Opticks*", publicada em 1704, há descrições dos efeitos da turbulência bem como alguns avisos para a localização dos telescópios ópticos.

A possibilidade da compensação da turbulência atmosférica nem sequer fazia parte do imaginário no tempo de Newton.

Durante o século XVIII, a qualidade dos telescópios foi melhorando. Os seus espelhos, com diâmetros acima de 0,46 m, eram de metal polido compostos de cobre e estanho. Em 1778, William Herschel utilizou um espelho de metal polido "a most capital speculum" com apenas 15,7 cm de abertura com o qual ele compilou um catálogo de estrelas duplas e, cerca de 2 anos mais tarde, descobriu o planeta Urano. Herschel construiu telescópios reflectores com aberturas de 0,48 m e, finalmente, de 1,2 m , sendo este último o telescópio com maior abertura construído até esse momento. Herschel estava consciente do efeito da turbulência atmosférica, especialmente ao construir o telescópio de 1,2 m de abertura que colocou junto da sua casa no húmido e enevoado vale do rio Tamisa, próximo de Londres. Apesar de aí o tempo ser frequentemente severo, ele achou que esta alta humidade não impossibilitava um bom seeing.

6.3. Óptica Adaptativa

6.3.1. Conceito

A óptica adaptativa (OA) é uma das técnicas de alta resolução que consiste em corrigir a influência da atmosfera no momento do registo das imagens. A OA foi proposta por BabcocK em 1953 mas o primeiro sistema de OA só apareceu em astronomia quarenta anos mais tarde porque não foi possível, antes, pô-lo em prática por limitações tecnológicas.

A passagem de uma frente de onda pela atmosfera é distorcida ao longo de 20 Km de turbulências atmosféricas. Estas distorções provocam erros de fase de alguns micrómetros que são registados no espelho do telescópio.

Dado que o efeito da atmosfera afecta principalmente a fase da frente de onda, a forma mais simples de contrariá-lo é usar um espelho deformável. Este é submetido a forças precisas para que a sua superfície adopte uma forma tal que o excesso ou defeito do caminho percorrido pela luz compense as variações do caminho óptico devidas à turbulência atmosférica. Para medir as perturbações do caminho óptico utiliza-se uma estrela de referência . Mede-se a frente de onda incidente proveniente de uma fonte de referência pontual ou quase pontual (por exemplo, uma estrela), e aplica-se, em tempo real, uma correcção para restituir a forma plana a esta frente de onda.

Na ausência de distorção atmosférica, a frente de onda deveria ser plana à chegada ao telescópio. A óptica adaptativa utiliza como método principal de compensação das perturbações atmosféricas, a deformação de espelhos que estão localizados por detrás do foco

do telescópio. Se a compensação for feita correctamente com o espelho deformável, a frente de onda proveniente da estrela de referência emerge como plana.

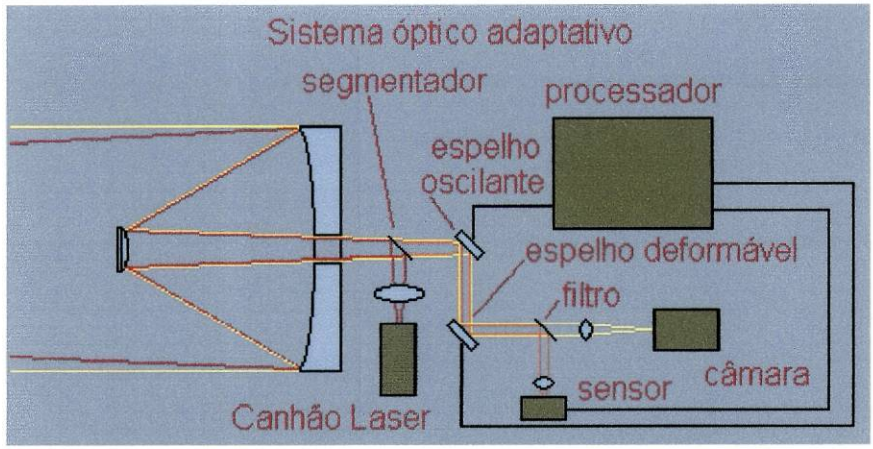


Figura 6.2 – Imagem esquemática do funcionamento de um sistema de óptica adaptativa.

A óptica adaptativa é um sistema de suportes electrónicos de reacção rápida que deformam um espelho do interior de um telescópio para compensar o modo como a atmosfera da Terra distorce a nossa visão dos corpos celestes. Na realidade, detecta a "cintilação" das estrelas e faz deslocar o espelho do telescópio para anular essa "cintilação". Este processo impede a imagem de ficar tremida e permite a observação de pormenores mais nítidos.

Os componentes fundamentais de um sistema de óptica adaptativa são: um sensor de frente de ondas (analisador); um sistema de controle que processa a informação registada pelo sensor; um espelho deformável que recebe instruções do sistema de controle para corrigir, em cada momento, as aberrações presentes.

Há que salientar a actuação do sistema de óptica adaptativa que permite fazer uma correcção na própria radiação emitida pela fonte antes de chegar ao detector. Esta é a diferença fundamental entre a OA e outras técnicas de alta resolução como, por exemplo, a interferometria speckle em que a qualidade da imagem é melhorada por meio de processamento das imagens já registadas.

Há vários problemas que surgem ao fazer este tipo de correcção. Um deles é a pequena probabilidade de encontrar uma fonte de referência suficientemente brilhante para poder servir de referência a um sensor de frente de ondas. Foy e Labeyrie, em 1985, para resolverem este problema recorreram ao laser para criar fontes de referência artificiais em camadas altas da atmosfera. Outro problema é o desfasamento entre o instante da medida da frente de onda e o momento em que a correcção se aplica, a única solução é fazer funcionar o sistema mais rapidamente o que requer fontes de referência mais luminosas.

A utilização de um sistema de óptica adaptativa não exclui a utilização de outros métodos de alta resolução. É desejável, sempre que possível, complementá-la com a utilização de outro método de tratamento posterior das imagens que permita conseguir uma maior correcção destas. A óptica adaptativa permite preservar informação de alta frequência espacial que numa longa exposição se perderia, mas não oferece uma correcção total.

6.3.2. Sistemas em funcionamento

O principal problema de trabalhar com técnicas de alta resolução é o conhecimento do efeito que exerce o conjunto atmosfera+telescópio em cada imagem de curta exposição. Este efeito pode descrever-se por meio da função de transmissão óptica de exposições curtas, ou alternativamente através de uma função de abertura que descreve a fase de cada ponto da pupila. O sensor de frente de ondas é um dispositivo idealizado para medir a função de abertura. A maioria destes dispositivos necessita de uma fonte de referência para se tornarem operacionais. A turbulência atmosférica introduz uma distorção na frente de ondas diferente para cada região do céu que se observa. Por isso a medida do sensor de frente de ondas só se aplica a um pequeno ângulo à volta da estrela de referência denominado *ângulo isoplanático*.

Se considerarmos a atmosfera como uma só camada turbulenta, o ângulo isoplanático pode ser definido como um ângulo dentro do qual se vê, desde o solo, uma célula turbulenta de diâmetro r_0 e situada a uma altura h, denotando-se por

$$\theta_0 \approx \frac{r_0}{h}$$

Os sistemas de óptica adaptativa utilizados para aplicações astronómicas estão divididos em duas categorias: os sistemas que combinam um analisador de Shack-Hartmann / espelho piézo-stack e os sistemas baseados num sensor de curvatura / espelho bimorfo.

O sensor de Shack-Hartmann utiliza uma matriz bidimensional de lentes que se situam na posição de uma imagem da pupila. A imagem formada pela matriz de micro-lentes é registada pelo detector situado no plano focal das micro-lentes. Cada micro-lente forma uma imagem cujo centro está desalinhado do eixo óptico da micro-lente em função dos gradientes locais (tip-tilt) da frente de ondas.

O sensor de curvatura é um sistema que estima a fase da frente de ondas por meio do registo simultâneo de duas imagens em planos simetricamente desfocados. A diferença de intensidade entre pontos homólogos de cada plano é proporcional à segunda derivada da fase da frente de ondas na pupila. Este tipo de sensor adapta-se à utilização de um espelho deformável do tipo bimorfo num sistema de óptica adaptativa, já que os sinais que se devem

proporcionar à entrada deste tipo de espelho são as segundas derivadas da frente de ondas e esta é precisamente a saída do sensor de curvatura.

Qualquer dos sensores anteriores pode ser utilizado para fazer um registo das fases da frente de ondas de um modo simultâneo na recolha de imagens de curta exposição. Com a informação obtida por um sensor de frente de ondas podemos obter informação do módulo e da fase da função de transmissão óptica instantânea do conjunto atmosfera+telescópio.

6.3.3. O problema da cobertura do céu

Para maximizar o valor da compensação da imagem na astronomia de observação, a óptica adaptativa tem de ser aplicável a quase todo (de preferência a todo) o céu. Na realidade, devido ao anisoplanetismo angular, a área sobre a qual a compensação é efectiva está restringida a uma pequena área que circunda a fonte de referência. Para total compensação em ondas de luz visíveis, o ângulo isoplanático é cerca de 2 arcsec para condições médias, e a requerida fonte de referência tem uma magnitude de cerca de $m_v = 10$. Usando estrelas naturais, a cobertura do céu é limitada a cerca de 1/100000 do hemisfério, isto é um valor pouco significativo para observações profundas do céu. A situação melhora para grandes comprimentos de onda devido aos enormes valores de r_0 e θ_0. Para compensar imagens a $2{,}2\,\mu m$, é requerida uma fonte de referência de cerca de $m_v = 14$, e o ângulo isoplanático aumenta para cerca de 10 arc segundos, permitindo uma cobertura do céu de cerca de 1/1000.

Apesar da cobertura do céu ser um aspecto importante na óptica adaptativa para compensar objectos muito distintos, ainda muito trabalho deve ser feito usando fontes naturais no modo de autoreferência. Muitos objectos celestes de interesse em astronomia, tais como as nebulosas protoplanetárias, contêm estrelas suficientemente brilhantes para funcionarem como fontes de referência e são compactas o suficiente para se manterem dentro de um único ângulo isoplanático. Por exemplo, em 1995, Roddier e outros, obtiveram imagens compensadas da nebulosa bipolar "Frosty Leo" com uma resolução angular de 0,1 arcsec nas faixas J- e H- ($1{,}25 - 1{,}65\,\mu m$). O sensor da frente de onda operou a $0{,}85\,\mu m$.

Os raios laser permitem uma solução parcial para o problema da cobertura do céu. As estrelas artificiais geradas por raios dispersos dentro da atmosfera terrestre permitem fontes de referência para a medida exacta da maioria da turbulência dentro da abertura de um telescópio. A medição é incompleta devido à proximidade do raio no telescópio, isto produz um erro residual conhecido como *anisotropismo focal*. Existe um problema adicional: um raio laser projectado do solo não pode providenciar informação sobre a posição absoluta do objecto observado. Para fazer uma longa exposição de um objecto astronómico, a sua posição

tem de ser estabilizada para cerca de uma fracção da resolução espacial requerida. Mesmo quando se usa um raio laser, uma estrela de referência fixa fora da atmosfera terrestre é ainda requerida para estabilizar a imagem. A cobertura do céu obtida com a óptica adaptativa é por isso limitada pela capacidade de obter das estrelas naturais com brilho suficiente para ser usado para estabilização da imagem. Estas estrelas podem ser muito mais ténues que as estrelas naturais da óptica adaptativa sem estrela laser.

A estabilização do tilt pode ser alcançada com estrelas mais desvanecidas do que as que são requeridas para a compensação da frente de onda , resultando daí uma boa cobertura do céu. Para observações nas faixas IR entre 1,25 e 2,2 μm, estrelas tão esbatidas com uma magnitude visual m_v entre 16 e 18 podem ser usadas para a estabilização da imagem. É possível obter a estabilização da relação Strehl do tilt de 0,5 sobre 10% do céu a 1,25 μm, e 100% do céu a 2,2 μm. Através da compensação da estrela guia natural (bem como do objecto da ciência), a magnitude de limitação pode ser estendida para cerca de 20, resultando numa cobertura do céu de quase 100% até para observações a 0,7 μm. Estrelas guias de infravermelhos podem beneficiar directamente da óptica adaptativa primária devido ao grande ângulo isoplanático, que elimina a necessidade de um sistema de compensação separado.

6.3.4. Rayleigh e raios de sódio

O uso de raios laser para a óptica adaptativa foi primeiramente usado com o objectivo de defesa durante os anos 80 e a tecnologia chegou ao âmbito público em 1992. Os raios laser consistem numa luz dispersa gerada numa base terrestre que passa através dos constituintes da atmosfera. Existem duas formas de difusão de luz:

- *a difusão de Rayleigh* que é produzida por moléculas de ar e é útil em altitudes até 15 km;
- *a ressonância de fluorescência de sódio* que ocorre numa camada de átomos de sódio depositados por meteoros a uma altitude de cerca de 90 km.

A difusão de Rayleigh é mais eficiente para comprimentos de onda próximos do ultravioleta e útil até 0,6 μm. A força de retorno da difusão Rayleigh depende da densidade atmosférica, que desce exponencialmente com a altitude, então os raios Rayleigh são usados principalmente a altitudes entre 5 e 10 km. Para uma correcção adaptativa contínua, o poder de laser necessário está na ordem dos 100 *watt* por raio. O tamanho angular do ponto é normalmente limitado a 1 ou 2 arc segundos através da turbulência atmosférica. Se o raio laser for lançado através de um telescópio equipado com óptica adaptativa, o raio será

compensado e um ponto muito menor será obtido. Os raios Rayleigh provaram ser eficazes para pequenas aberturas do telescópio até 2 m, mas a sua relativa baixa altitude produz uma inadequada recolha de amostras da turbulência atmosférica com instrumentos de maior extensão. Em princípio, raios múltiplos podem ser utilizados para providenciar melhores medições da frente de onda, mas este processo torna ainda mais complexo um sistema já complicado.

Para telescópios de maior abertura, os raios de sódio permitem recolher melhores amostras da turbulência atmosférica devido à sua maior altitude. Para provocar a ressonância do sódio, o laser tem de ser sintonizado de modo preciso para próximo de $0{,}589\,\mu m$. O processo é bastante mais eficiente a gerar luz do que a gerar uma dispersão molecular. A energia de laser requerido por cada raio é de cerca de 10 *watt*.

No processo da ressonância fluorescente, os átomos de sódio são excitados pela irradiação do laser desde o estado de repouso até ao estado de excitação, donde o seu natural declinar produz a desejada radiação. Se o conjunto de átomos excitados é vasto, então a luz incidente produz uma emissão estimulada para o espaço; tal emissão é perdida para o telescópio. Essa condição é conhecida como *saturação* ou *branqueamento* e limita a energia de laser que pode ser usada de forma eficiente. A saturação é controlada através da limitação do pico da energia do laser.

6.3.5. Anisoplanetismo focal

As estrelas artificiais criadas por dispersão por laser estão necessariamente dependentes do número de átomos da atmosfera terrestre e consequentemente elas estão relativamente perto do telescópio. Estas fontes de referência mostram um volume em forma de cone da turbulência na área óptica do telescópio, como se vê na figura 6.3.

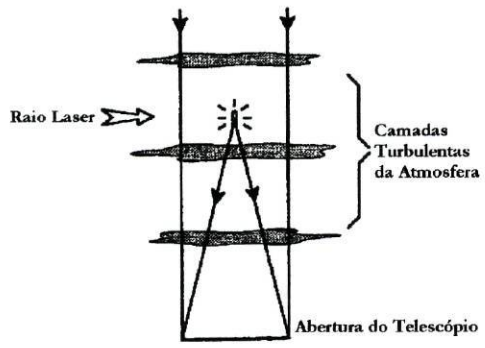


Figura 6.3 – Anisoplanetismo focal ou efeito de cone dado por uma amostra incompleta da turbulência atmosférica com um raio laser.

A turbulência acima da estrela não é medida, e a turbulência que ocorre abaixo da estrela é apenas parcialmente mostrada. O erro da frente de onda resultante é conhecido como *anisoplanetismo focal* ou *efeito de cone*. É caracterizado pelo parâmetro d_0, o diâmetro da abertura sobre a qual o desvio padrão médio da frente de onda devido ao anisoplanetismo focal é 1 rad^2. Quanto maior for o valor de d_0, menor será o erro. O valor de d_0 depende da altura do raio, do perfil da turbulência e do comprimento de onda. Devido à natureza irregular dos perfis de turbulência, d_0 é uma função não linear da altura.

Os valores de d_0 para os raios Rayleigh a 10 km de altitude são normalmente de cerca de 1 m para um comprimento de onda de 0,5 μm, 3 m para 1,25 μm, e 5 m para 2,2 μm. A maioria dos telescópios astronómicos irá, por isso, requerer uma grande quantidade de raios Rayleigh. Para proporcionar a compensação de comprimentos de onda no visível, um telescópio de 4 m iria requerer, pelo menos, uma grande quantidade de raios Rayleigh (4 x 4 filas), enquanto que um telescópio de 8 m que opere a 1,25 μm iria requerer uma grande quantidade de raios (3 x 3 filas). Sistemas de raios laser desta complexidade ainda não foram construídos.

Para grandes telescópios os raios de sódio têm uma vantagem considerável devido aos seus valores de d_0 serem maiores. Para um raio a 90 km, o valor de d_0 para um comprimento de onda de 0,5 μm é cerca de 4 m, enquanto que para 1,25 μm o valor é de perto de 10 m. Assim, para comprimentos de onda do infravermelho, até os grandes telescópios iriam beneficiar com um único raio de sódio. Apesar dos requisitos do laser para o sódio serem mais rigorosos em termos de comprimentos de onda e amplitude de energia (para evitar a saturação) os raios de sódio parecem ser os preferidos para a óptica adaptativa astronómica.

6.3.6. Telescópios terrestres versus telescópios espaciais

A óptica adaptativa remove algumas, mas não todas, das limitações da atmosfera a partir de telescópios terrestres. É por isso importante comparar as capacidades dos telescópios espaciais com as capacidades dos grandes telescópios terrestres equipados com óptica adaptativa. Os dois factores básicos são o seu custo e o seu desempenho. Para que os telescópios funcionem no espaço é necessário proceder-se ao seu transporte para a órbita o que produz constrangimentos no tamanho, no peso e na resistência dos componentes ao choque. O veículo espacial requer controle da altitude. O controle térmico é mais difícil do que na Terra devido ao ambiente mais extremo e devido ao limite de consumo de energia. O acesso humano a um telescópio espacial para reparações inesperadas ou modificações é limitado e dispendioso.

Não há dúvida alguma que com o advento da óptica adaptativa os grandes telescópios terrestres de desempenho equivalente nas faixas espectrais acessíveis da Terra podem ser construídos e postos a funcionar a baixo custo, incluindo até as estrelas laser necessárias para obter uma boa cobertura do céu. Eles têm melhor acessibilidade e podem ser programados ou adaptados rapidamente para tarefas especiais ou observações inesperadas. A instrumentação também pode ser preservada e actualizada mais rapidamente. É provável que os grandes telescópios sejam sempre maiores que os instrumentos de base espacial, dando-lhes uma orla de comprimentos de onda no infravermelho e em observações onde o número de fotões é importante.

Os telescópios espaciais serão sempre necessários para observações em faixas espectrais nas quais a atmosfera é opaca, sobretudo abaixo de $0{,}3\,\mu m$ No visível e perto de comprimentos de onda no infravermelho, os telescópios espaciais estão livres da emissão de ar radiante (airglow) da atmosfera de moléculas OH entre 0,5 e $2{,}5\,\mu m$. Uma aplicação promissora para instrumentos no espaço é a interferometria, onde se pode obter uma grande resolução angular com aberturas ópticas relativamente pequenas. Tendo em conta o elevado custo dos telescópios espaciais as suas aplicações limitar-se-ão a observações especializadas que não podem ser feitas a partir do solo.

A comparação pode ser sumariada da seguinte forma:

- a transmissão atmosférica é admissível até $0{,}3\,\mu m$, de forma a que apenas os telescópios espaciais possam trabalhar com raios ultravioletas com comprimentos de onda mais curtos;
- com comprimentos de onda no visível , as observações dos telescópios terrestres e espaciais são complementares. O Telescópio espacial Hubble (HST) é capaz de fornecer resoluções de 0,05 arcsec sobre um campo de 2,6 arco de minutos, com alto contraste. Os grandes telescópios terrestres com óptica adaptativa são capazes de uma resolução ainda maior (0,015 arcsec), mas apenas sobre um campo de visão muito mais pequeno (≈ 5 arcsec), devido ao anisoplanetismo. Para observações de visão limitada que não requerem óptica adaptativa, o campo de visão para os grandes telescópios terrestres é da ordem de um grau, conferindo-lhes capacidade para cobrir grandes áreas do céu;
- perto da zona dos infravermelhos numerosos telescópios terrestres com óptica adaptativa apresentam vantagens comparativamente ao (HST) em relação à resolução e ao poder de recolha de luz. O desempenho dos grandes telescópios terrestres a $10\,\mu m$ e comprimentos de onda superiores quase não é afectado pela atmosfera.

Existem dois factores dos quais resulta um benefício no desempenho de um sistema de grandes telescópios terrestres equipados com óptica adaptativa. São eles: a melhoria na resolução angular e o aumento na relação sinal / ruído para fontes não distintas no caso de um segundo plano limitado. O primeiro factor define o benefício na resolução espacial para a visualização directa e o benefício na resolução espectroscópica, enquanto que o segundo possibilita que os benefícios da óptica adaptativa sejam expressos em termos de um aumento da limitação da magnitude ou a redução no tempo de exposição. A óptica adaptativa é também essencial para os interferómetros, especialmente para aqueles que têm aberturas de ampla concentração, para permitir que o seu desempenho máximo seja atingido.

6.4. Estrelas laser

6.4.1. Introdução

A ideia da estrela laser apareceu na literatura em 1985 por Foy & Labeyrie, mas os militares americanos começaram a estudar este conceito alguns anos antes no âmbito do projecto da "guerra das estrelas" com a finalidade de aumentar a fracção do céu observável criado por um sistema de óptica adaptativa, com um laser, uma estrela de referência brilhante e artificial, ao lado do objecto a observar. Esta fornece grande quantidade de fotões ao analisador da frente de onda permitindo uma correcção de boa qualidade.



Figura 6.4 – Imagem da estrela de referência laser do telescópio Keck. O raio laser foi lançado de encontro a um fundo de estrelas reais numa exposição de 20 minutos.

Existem duas técnicas diferentes para criar uma estrela laser no céu.

As estrelas baseadas na difusão Rayleigh utilizam a rectrodifusão do raio laser pelas moléculas de ar. Este método não requer nenhum comprimento de onda especial, apenas é necessário uma potência para que o sinal volte de forma a ser medido com alguma precisão. A altitude da estrela é fixada por uma filtragem temporal artificial, deixando passar apenas os fotões provenientes de uma dada altitude. O inconveniente deste método é que a altitude média investigada é fixada pela densidade de moléculas no ar. Na prática uma estrela Rayleigh forma-se entre 15 e 20 km de altitude. A turbulência acima desta altitude não é explorada o que contribui para diminuir as "performances". Uma das limitações na utilização da estrela laser é o *efeito de cone*. Este limita esta experiência a pequenos telescópios (da ordem do metro), e não é na prática aplicável aos telescópios astronómicos.

A difusão ressonante na mesosfera repousa na retrodifusão, pelos átomos de uma camada atmosférica, do raio laser. Isto deverá estar de acordo com o comprimento de onda de uma transmissão do átomo em questão. Depois de se terem considerado as abundâncias atómicas na mesosfera e a secção eficaz das diferentes transições, acabou por se escolher a risca D_2 de sódio uma vez que esta risca é a solução mais eficaz. A camada de sódio encontra-se a cerca de 90 km de altitude. Daqui em diante considerarei apenas as estrelas artificiais baseadas no sódio, uma vez que estas são utilizadas na maioria dos sistemas astronómicos.

O efeito de cone deve-se a uma altitude finita relativamente próxima da camada de sódio onde a estrela laser é produzida. A luz proveniente desta fonte efectua uma propagação esférica em vez da propagação paralela que faz o objecto celeste situado no infinito.

As camadas mais altas não são atravessadas pelo laser, pois a turbulência não é aí medida.

Além disto, a superfície de onda medida pela estrela laser não corresponde à realidade por causa do *efeito de zoom*. Devido à propagação cónica, as medidas feitas nas camadas altas estão diminuídas e enchem a pupila. Obtém-se uma informação truncada e falsa.

A estrela laser apresenta duas grandes limitações fundamentais. A primeira é a indeterminação do movimento global da imagem ("tilt"), a outra é o efeito de cone.

6.4.2. Soluções do problema do tilt

O problema da indeterminação do tilt a partir de uma estrela laser surgiu devido ao princípio do retorno inverso da luz. O raio laser, se é emitido sobre o eixo óptico, percorre exactamente o mesmo trajecto de ida (através da camada de sódio) e de volta. A imagem da estrela fica imóvel. Ora, a imagem de uma estrela natural modifica-se ao longo do tempo, por causa do tilt atmosférico. Este movimento não é medido através da estrela laser.

6.4.3. Medição do tilt a partir de uma estrela natural

A solução "simples" consiste em encontrar uma estrela natural próxima do objecto astrofísico para medir o tilt ("a estrela do tilt"). A utilização de uma estrela laser permite utilizar uma estrela natural mais distante e menos brilhante do que no caso da OA com apenas uma estrela de referência natural. O outro sucesso tem a ver com a forma como determinamos o tilt. Toda a pupila do telescópio pode ser utilizada para fazer esta medida. A luz da estrela natural concentra-se em quatro pontos de medição, o que permite utilizar estrelas pouco brilhantes: a precisão da medição aumenta porque o tamanho da imagem diminui. Este êxito não se pode aplicar sem uma análise benéfica da correcção da OA. É importante notar que nos sistemas de quatro quadrantes com boas performances, baseados em fotodiodos, estão disponíveis para este tipo de aplicações. No entanto, o sucesso trazido pela estrela laser com referência de tilt natural não é tão grande como poderíamos pensar, visto que a contribuição do tilt na variação da frente de onda representa 87% (assim é necessário corrigi-la de modo a não limitar as performances do sistema de OA) e a degradação devida ao anisoplanetismo do tilt que é duas vezes mais lenta do que nos meios mais elevados.

6.4.4. Conclusão

A estrela laser tem por finalidade aumentar a cobertura do céu, isto é, a fracção do céu ou o número de objectos celestes acessíveis com um sistema de óptica adaptativa (OA). O método consiste em criar, em geral, numa camada mesoesférica de sódio, uma estrela de referência artificial que irá servir para medir a frente de onda. Esta aproximação sofre duas limitações físicas. Como o laser se propaga desde o solo e regressa seguindo o mesmo trajecto em volta da camada de sódio, não é possível medir o *tilt atmosférico* (movimento global da imagem). Para medir os dois modos indeterminados a solução mais simples consiste em utilizar uma estrela natural ("a estrela do tilt"). Este método permite aumentar significativamente a cobertura do céu. Le Louarn mostrou que em banda K (2,2 μm), ela aumenta de um factor 30 (observações obtidas nos pólos galácticos com um telescópio de 8 m) passando de 0,3% a 10%. Em altitudes galácticas mais baixas, onde a densidade das estrelas é maior, a cobertura do céu é total. O número de "quasars" observáveis em relação a um valor de *strehl* superior a 20 % passa de 357 a 6803. O número de estrelas jovens (pré-sequência principal) durante um período de luminosidade mínima passa de 317 para 822. Infelizmente, a situação agrava-se quando aquando das ondas mais curtas. Em banda J (1,25 μm), esta cobertura passa para 0,1% com uma estrela laser (ganhando um factor 5).

O número de "quasars" observáveis chega a 1119 e torna-se mais sensível às péssimas condições de turbulência atmosférica, porque com um modelo atmosférico mediano este número passa a zero. Este desvio brutal deve-se à combinação de dois efeitos. Primeiramente, o anisoplanetismo do tilt torna-se mais severo. Isto porque é necessário em situações iguais utilizar uma estrela de referência menos afastada do objecto astrofísico em banda J do que em banda K. Para além disso, as performances da OA com a estrela laser anulam-se mesmo se a referência do tilt do objecto científico se confundissem, por causa da segunda limitação física da estrela laser, o *efeito de cone*. Este efeito deve-se à distância finita da estrela de referência na atmosfera. Os raios luminosos provenientes desta fonte, não atingem propriamente o mesmo volume na atmosfera do que aquele formado pelos raios provenientes do objecto astronómico. Este efeito relativamente frágil nos grandes comprimentos de onda (e pequenos telescópios) torna-se a principal fonte de degradação das performances de uma OA com a estrela laser para 1 μm, nos telescópios de 8 m.

A utilização de numerosas estrelas laser permite ultrapassar esta limitação.

Le Louarn mostrou, ainda, que com a ajuda de quatro estrelas laser, o rendimento de *Strehl* de 80% poderia ser obtido no visível, com um telescópio de 8 m de diâmetro, ainda que só com uma estrela laser, o rendimento de *strehl* obtido seja só de 10%. Estas performances foram obtidas graças ao "método 3D" ou "tomografia da turbulência", que têm em atenção a natureza estratificada da turbulência atmosférica, que se concentra em finas camadas. Numerosos espelhos deformáveis são utilizados (óptica adaptativa multi-conjugada) para corrigir esta turbulência em certas altitudes. Este método permite, igualmente, aumentar o campo corrigido, já que um campo corrigido de 100" pode ser conseguido com um rendimento de *Strehl* de 30% no visível. Algumas formas de desfocalização e de astigmatismo não podem ser corrigidas a partir do efeito laser já que a indeterminação do tilt se propaga em várias direcções. Contudo, simples considerações geométricas mostram que no caso de várias estrelas laser, a combinação dos tilts sobre as estrelas laser pode causar desfocalizações e astigmatismo.

O número de camadas turbulentas principais na atmosfera varia entre 2 e 5, o que conduziu à utilização de vários espelhos deformáveis. No entanto, um estudo mais detalhado mostra que uma parte significativa da turbulência situa-se fora destas camadas. Esta turbulência criada no anisoplanetismo, no campo corrigido por uma óptica adaptativa multi-conjugada. Foi possível mostrar que se pode entender o conceito de ângulo isoplanático θ_0 no caso onde M espelhos deformáveis são utilizados para corrigir a turbulência. Este ângulo θ_m, como o seu análogo, depende somente do perfil de

turbulência e não do diâmetro do telescópio. Perfis realistas mostram que θ_3 é um factor 8-10 maior que θ_0, o que confirma o potencial dos sistemas multi-conjugados. O θ_m cresce quase linearmente com o número de espelhos.

Projectos de telescópios de grande diâmetro (30 a 100 m de diâmetro) apareceram para concorrer com o projecto do telescópio espacial da próxima geração (NGST). A óptica adaptativa faz parte integrante destes projectos. A utilização de uma única estrela laser será excluída, por causa do efeito de cone. Foram propostas soluções com várias estrelas naturais. Quanto maior for o diâmetro do telescópio maior será o campo que se pode reconstruir através do método 3D, se considerarmos que a altitude da turbulência fica constante. Para reconstruir um grande campo é rentável utilizar estrelas naturais afastadas umas das outras. Se o campo for suficientemente grande consegue-se uma cobertura total do céu. Infelizmente o número de espelhos deformáveis que se pode utilizar é limitado devido a obstáculos tecnológicos e são os efeitos isoplanáticos que limitam o campo que é possível corrigir. Uma alternativa é a utilização de estrelas laser que permitam obter uma grande cobertura do céu (50% no visível, nos pólos galácticos), mesmo se o tilt não puder ser medido a partir destas.

7. ALGUNS RESULTADOS ASTRONÓMICOS

Serão, agora, apresentados os resultados obtidos por alguns telescópios ópticos e infravermelhos usando ou não a óptica adaptativa assim como outros resultados obtidos com um telescópio colocado acima da atmosfera como uma outra solução alternativa para eliminar os efeitos da atmosfera.

7.1. Contexto

Debruçar-me-ei sobre algumas observações astronómicas que podemos encontrar na World Wide Web, baseadas nos dois métodos que referi no capítulo anterior. Existe um número reduzido de técnicas de alta resolução capazes de superar o limite de resolução imposto pela atmosfera numa longa exposição. Estas técnicas surgiram no último século e têm evoluído de um modo paralelo ao dos projectos dos grandes telescópios com o fim de explorar ao máximo a sua capacidade. Em geral, as técnicas de alta resolução baseiam-se no estudo das imagens obtidas com tempos de exposição muito curtos. Durante os intervalos destas exposições as trocas sofridas pela atmosfera são muito pequenas e esta pode-se considerar "congelada".

Cada método requer um modo particular de planificar as observações no telescópio. Primeiro surgiram as técnicas baseadas no tratamento e processamento à posteriori das imagens. Seguidamente apareceu o sensor de frente de ondas como ferramenta de ajuda a este tipo de processamento e recentemente começou-se a utilizar as técnicas de óptica adaptativa nas quais o sensor de frente de ondas é utilizado para controlar um sistema dinâmico de correcção das aberrações originadas pela atmosfera terrestre, em tempo real.

A extrema precisão da imagem é devida a estas novas tecnologias. Nos telescópios é possível obter imagens em vários comprimentos de onda.

Na óptica adaptativa faz-se a correcção das distorções na própria radiação emitida pela fonte pontual, antes de chegar ao detector (sensor da frente de ondas) enquanto que na interferometria speckle apenas se melhora a qualidade da imagem através do tratamento e processamento das imagens já registadas. A óptica adaptativa permite , em tempo real, obter imagens astronómicas a alta resolução angular a partir de um telescópio terrestre. Por enquanto, a correcção nunca é perfeita e as imagens adquiridas por um sistema óptico adaptativo são sempre afectadas por um fluxo residual, que apesar de menos importante que a ausência de correcção, ignora as interpretações morfológicas e fotométricas destas imagens.

Nenhum sistema de óptica adaptativa nos oferece uma correcção total e, por isso, não devemos excluir a utilização de outros métodos de alta resolução como complemento.

Observar o centro galáctico é especialmente difícil porque a sua luz precisa de viajar através de milhares de anos-luz, de gás e poeira, antes que possamos vê-la do nosso planeta. Só uma pequena porção de luz chega à Terra e a maioria dela está na parte do infravermelho do espectro. Alguns observatórios foram projectados para detectar com o máximo de eficiência as fontes de radiação infravermelha do espaço, usando sofisticadas tecnologias, tais como a óptica adaptativa e a optimização dos seus sistemas para a banda espectral do infravermelho. Estas tecnologias são usadas em vários telescópios, que se encontram em Mauna Kea no Havai, tais como, o Telescópio óptico/infravermelho monolítico de 8 m Gemini do Norte que possui um sistema de óptica adaptativa que inclui o Hokupa'a e o Telescópio óptico monolítico de 3,6 m do Canadá-França-Havai que possui um sistema de óptica adaptativa que inclui o PUEO. O Telescópio óptico de 8,2 m VLT (YEPUN) que se localiza no Cerro Paranal (Chile) também possui um sistema de óptica adaptativa que inclui o NAOS-CONICA.

O objecto, conhecido pelo nome trivial de IRS8 (significa fonte infravermelha de número 8), era apenas uma mancha de natureza desconhecida, até que o Gemini se tornou realidade. A avançada óptica do Telescópio Gemini mostrou que o IRS8 parece ser uma estrela a alta velocidade, penetrando numa nuvem de gás e poeira de origem desconhecida, próxima do centro galáctico. Movendo-se em relação à nuvem, a estrela cria uma onda de choque similar à que é formada por um barco movendo-se com velocidade sobre águas tranquilas.

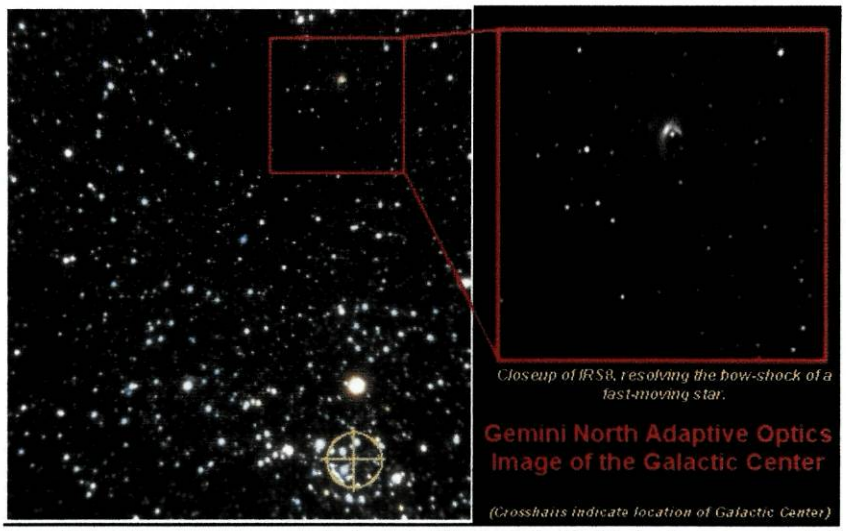


Figura 7.1 - A poucos anos de luz do Centro da Galáxia (cruz amarela) encontra-se o IRS8. Distingue-se a onda de choque que a estrela produz no gás circundante.

Esta descoberta poderá alterar a nossa compreensão do centro da nossa galáxia assim que os astrónomos determinarem como a estrela e a nuvem de gás se movem uma em relação à outra. Estudando esta interacção, as propriedades da nuvem de gás e as condições ao redor da

estrela serão melhor compreendidas e fornecerão uma nova e valiosa ferramenta para estudar as intensas condições próximas do centro da nossa galáxia.

O sistema de óptica adaptativa fornece também novos dados sobre o sistema solar. Surgem novas informações relativas ao sistema solar obtidas através das imagens captadas pelos grandes telescópios terrestres.

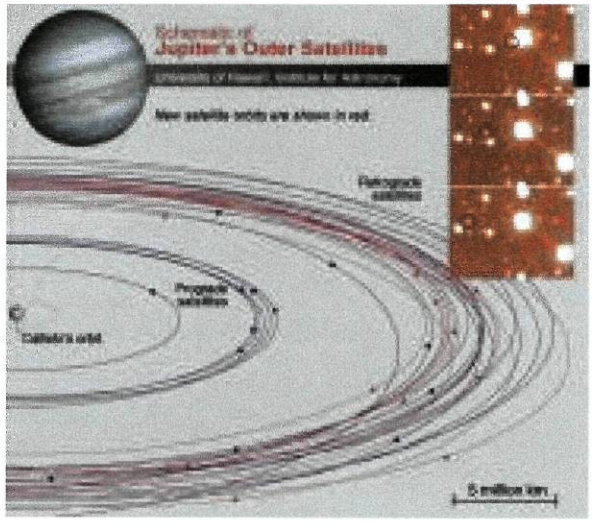


Figura 7.2 – Esquema que mostra as órbitas dos satélites irregulares de Júpiter. No canto superior direito estão as imagens de um dos novos satélites; os círculos a preto referem-se à sua localização e movimento relativamente a estrelas e galáxias de fundo.

Os investigadores Scott S. Sheppard e David C. Jewitt do Instituto para a Astronomia da Universidade de Havai tinham já descoberto em 2000 onze pequenas luas de Júpiter. Estima-se que estas luas tenham diâmetros que vão dos dois aos quatro quilómetros. Os cálculos efectuados basearam-se no albedo dos objectos, ou seja, na quantidade de luz solar reflectida pela sua superfície, que neste caso é cerca de quatro por cento. Estas novas luas foram descobertas usando o telescópio CFH de 3,6 metros em Mauna Kea, no Havai. Estes candidatos a satélites foram seguidos com o telescópio de 2,2 metros da Universidade do Havai, para confirmação das órbitas, chegando-se à conclusão de que se tratava de órbitas irregulares (muito inclinadas e excêntricas) e retrógradas (contrárias ao movimento de rotação do planeta).

Os mesmos investigadores descobriram, em Fevereiro de 2003, doze novos satélites de Júpiter, elevando para um total de 52 o número de luas de Júpiter. Nestas descobertas usaram-se duas câmaras digitais pertencentes aos telescópios de Subaru de 8,3 m e do Canadá-França-Havai de 3,6 m. Todos os satélites parecem ter órbitas retrógradas como a maioria dos satélites irregulares de Júpiter.

Existem numerosos outros exemplos em Astronomia onde se tem usado um sistema de óptica adaptativa como, por exemplo, na pesquisa de estrelas binárias, no estudo de outros planetas do nosso sistema solar, na procura de planetas fora do nosso sistema solar e também no estudo da superfície do Sol.

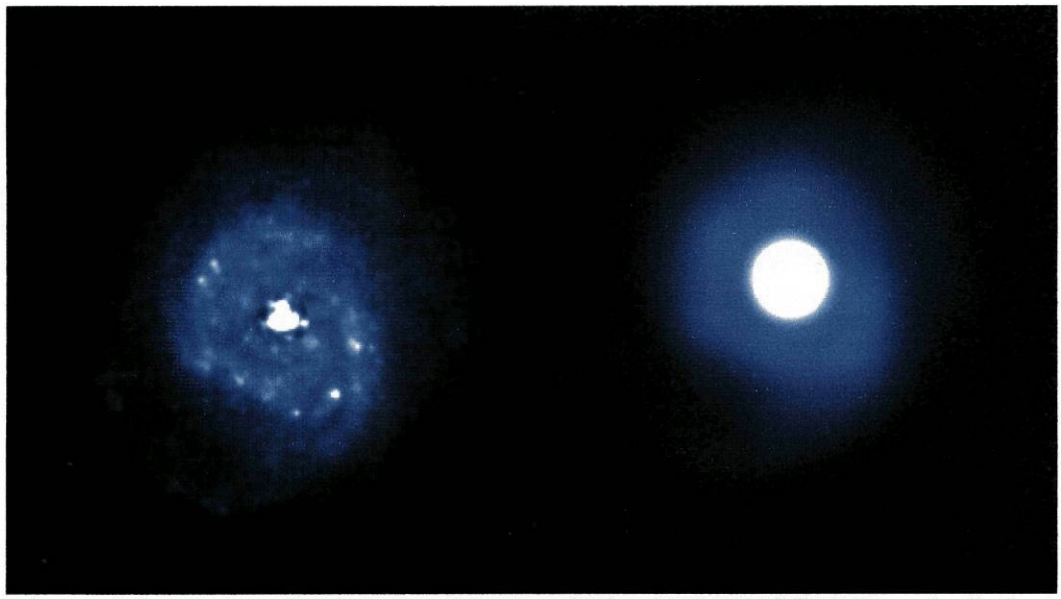


Figura 7.3 - Imagens da região nuclear da galáxia próxima NGC 7469, a da direita é sem óptica adaptativa e a imagem da esquerda obtida com óptica adaptativa (CFHT).

7.2. PUEO

O projecto do sistema óptico adaptativo começou nos finais da década dos anos oitenta. Usa um conceito aplicado ao sistema óptico adaptativo por François Roddier que é o de curvatura.

O primeiro sistema da óptica adaptativa de curvatura tinha apenas treze actuadores. Foi desenvolvido primeiramente no foco do coudé do CFHT e começou a operar em 1994.

A óptica adaptativa foi usada no CFHT, em meados da década de 90, para observar Saturno enquanto a Terra cruzava o plano dos anéis, uma vez que os anéis quase que desaparecem e é uma oportunidade rara de observar os satélites de Saturno, praticamente invisíveis da Terra. Este acontecimento foi observado simultaneamente pelo HST e pelo Telescópio de 3,6 m do Observatório Europeu do Sul (ESO) que também se equipou com um sistema de óptica adaptativa.

Dado o sucesso da curvatura da óptica adaptativa foi desenvolvida a mesma técnica para um sistema com dezanove actuadores. Esta nova óptica adaptativa foi designada por PUEO

O PUEO resultou da colaboração entre o telescópio de Canadá-França-Havai, o Instituto de astrofísica de Herzberg, o Observatório de Paris-Meudon e a companhia francesa CILAS.

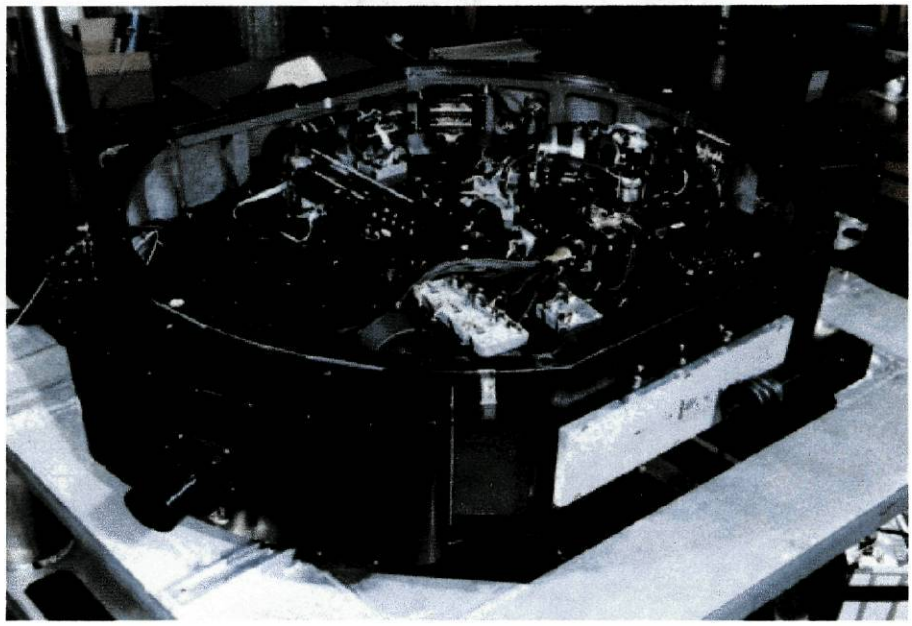


Figura 7.4 - Imagem do interior do instrumento PUEO.

O PUEO é um sistema de óptica adaptativa construído para o telescópio de Canadá-França-Havai (CFHT).

É constituído por um espelho bimorfo de dezanove actuadores e um sensor de curvatura. O banco óptico-mecânico foi projectado e fabricado no Observatório Astrofísico do Dominion (DAO) em Victória no Canadá. A companhia francesa CILAS em colaboração com a equipa de CFHT desenvolveu os algoritmos em tempo real e forneceu o espelho deformável de curvatura, o computador e o software de controle. Estes sistemas foram integrados no Observatório de Paris-Meudon, na França, onde foram testados e o instrumento calibrado. No primeiro semestre de 1996 foram executados os testes no PUEO em CFHT. O PUEO está aberto à comunidade científica de CFHT desde o segundo semestre de 1996.

O PUEO emprega espelhos parabólicos permitindo que um instrumento compacto com pequenos componentes ópticos forneça feixes reduzidos. Os feixes passam em linha recta pelo adaptador e normalmente são desviados por um espelho plano, assente numa calha móvel, de forma que o foco directo e o foco corrigido sejam coincidentes.

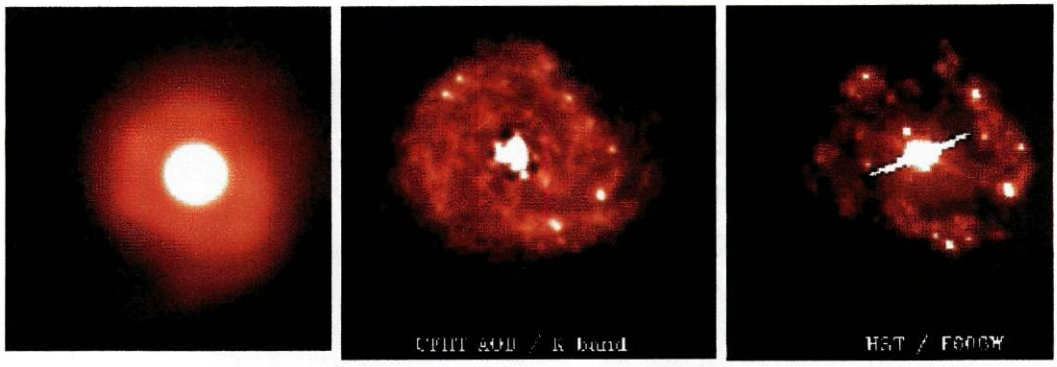


Figura 7.5 - A imagem da esquerda é típica de um grande telescópio sem óptica adaptativa. A largura a meia altura (FWHM) é de 0,7 arcsec. Nas imagens do centro e da direita faz-se a comparação de uma imagem da galáxia NGC7469 De Seyfert obtida na banda K usando óptica adaptativa PUEO do CFHT (FWHM=0,13 arcsec) com uma imagem obtida pelo HST da mesma galáxia.

Em 1997, começou a operar um sistema de óptica adaptativa de curvatura com trinta e seis actuadores produzindo as primeiras imagens infravermelhas de Neptuno. Estas imagens mostram a estrutura fina das suas faixas da nuvem com contraste elevado, permitindo que os detalhes da actividade atmosférica de Neptuno sejam monitorizados da Terra pela primeira vez.

As imagens profundas examinadas revelaram quatro dos satélites escuros descobertos pela Voyager 2.

7.3. Hokupa'a

O Hokupa'a é um instrumento utilizado na óptica adaptativa que foi construído pelo Instituto de Astronomia da Universidade do Havai e financiado pela National Science Foundation dos Estados Unidos da América.

A correcção é feita por um espelho deformável bimorfo feito com duas folhas de material piezo-eléctrico que podem introduzir curvaturas locais da frente de onda. Este espelho corrige todas as aberrações medidas até ao limite do sensor da frente de onda da curvatura de 36 elementos. Os erros da inclinação são corrigidos por este mesmo espelho. Estes erros de tip/tilt surgem dos efeitos não atmosféricos tais como os do próprio telescópio.

O desempenho real conseguido pelo Hokupa'a depende de muitos factores entre os quais se destacam as características da frente de onda da estrela-guia, as propriedades espacial e temporal intrínsecas da atmosfera, agitação do vento do telescópio, do comprimento de onda, das massas de ar da observação, dependendo ainda do seeing intrínseco na altura da observação.

O Hokupa'a alimenta uma câmara (detector) infravermelha (QUIRC). A qualidade final da imagem obtida pelo sistema depende fortemente das características da estrela-guia.

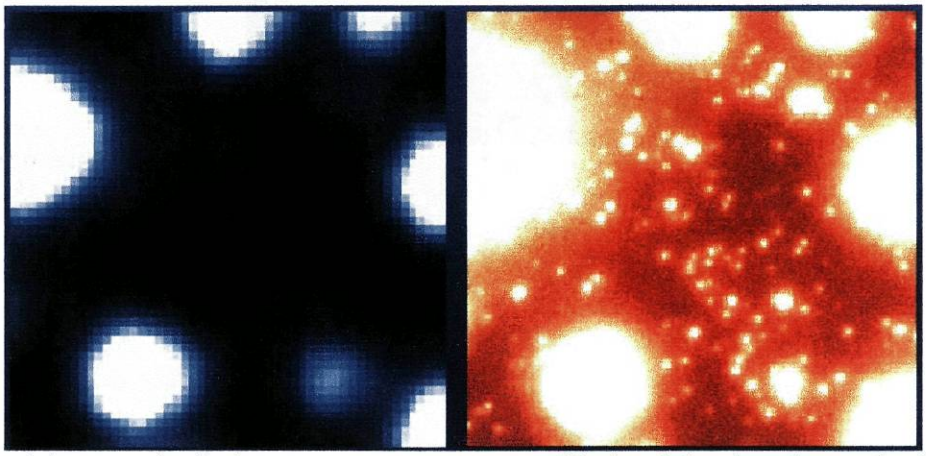


Figura 7.6 – A imagem da direita mostra uma pequena região do núcleo do aglomerado globular M13 usando o Hokupa'a com 2,2 μm. A imagem da esquerda mostra o campo correspondente a uma imagem de curta exposição nos comprimentos de onda do visível (0,55 μm) usando a câmara de aquisição.

A imagem obtida com o Hokupa'a e com a câmara infravermelha QUIRC corresponde a 940 segundos de tempo de integração. A largura máxima a meia altura (FWHM) é 0,85" para a imagem da esquerda.

As imagens corrigidas mostram o poder de um telescópio com um sistema de óptica adaptativa quando este detecta e resolve uma imagem fraca individual no infravermelho de muitas estrelas.

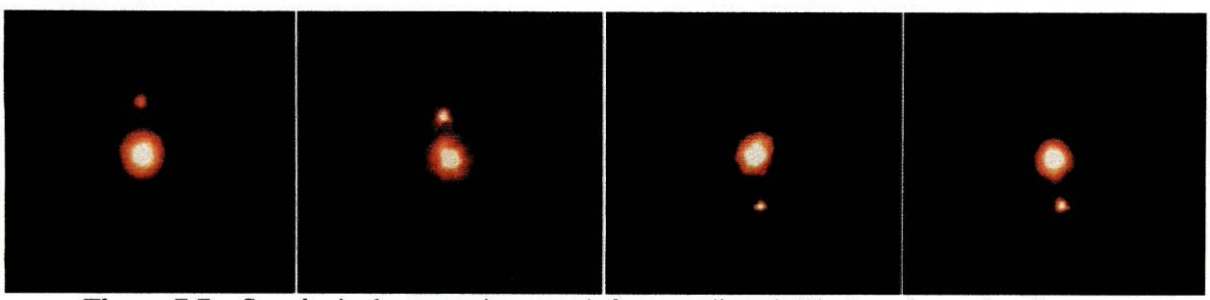


Figura 7.7 – Sequência de quatro imagens infravermelhas de Plutão e da sua lua Caronte.

Esta sequência de imagens foi obtida em noites diferentes durante o mês de Junho de 1999 pelo telescópio Gemini (Norte), utilizando a câmara infravermelha QUIRC e sistema de óptica adaptativa, Hokupa'a. Este sistema de óptica permite que as imagens sejam tão nítidas quanto possível ao serem registadas neste comprimento de onda.

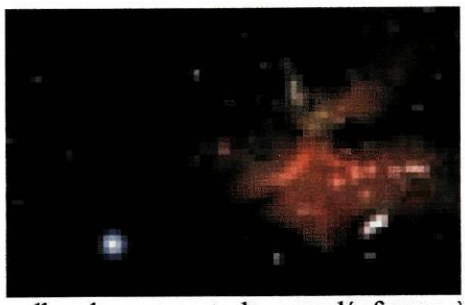


Figura 7.8 – Imagem infravermelha de uma estrela que dá forma à região G45.45+0.06 da nossa Galáxia, obtida com o telescópio Gemini (Norte).

Os maiores comprimentos de onda da luz infravermelha permitem aos astrónomos observarem estas novas estrelas e explorarem os processos de formação das estrelas. A maioria das estrelas neste conjunto não são vistas nos comprimentos de onda do visível. A poeira e o gás, que dão forma à região, absorvem a luz visível das estrelas e quando alguns raios de luz se escapam ficam ainda dentro da grande nuvem. No canto inferior esquerdo da figura 7.8 vê-se uma estrela mais brilhante, em primeiro plano, que não faz parte do conjunto G45.45+0.06.

A luz infravermelha difusa vista nesta imagem é a luz reflectida da estrela fora das partículas de poeira na nuvem e o hidrogénio incandescente é aquecido pelas estrelas mais novas e maciças do conjunto. No canto inferior direito há três estrelas brilhantes que podem ser responsáveis pelo aquecimento do hidrogénio e são aproximadamente 10 vezes mais maciças do que o nosso Sol e mais de 100000 vezes mais brilhantes. A análise da imagem, combinada com a espectroscopia, permitirá aos astrónomos determinar as idades das estrelas no conjunto, as principais fontes de calor e o que pode fazer com que os colapsos interestelares de uma nuvem dêem forma a novas estrelas.

Os espelhos deformáveis do sistema de óptica adaptativa é que corrigem os efeitos de distorções atmosféricas da luz da estrela resultando imagens significativamente mais nítidas.



Figura 7.9 – Imagem da nebulosa planetária BD+303639 obtida no observatório Gemini.

Na figura 7.9 está representada uma imagem infravermelha obtida pelo telescópio Gemini do Norte usando o sistema óptico adaptativo. Esta imagem foi obtida em Junho de 1999. As imagens estelares mostram uma definição de 0,083 arcsec, aproximando-se do limite teórico para um telescópio de 8 m.

A nebulosa planetária BD+303639 está aproximadamente a 10000 anos luz da Terra na direcção da constelação de Cygnus.

Há alguns milhões de anos a nebulosa planetária BD+303639 era uma estrela semelhante ao Sol, mas evoluiu para uma gigante vermelha tornando-se actualmente numa nebulosa planetária. Na fase actual o material ejectado é aquecido pela radiação ultravioleta da estrela central até se tornar incandescente. Dentro de dez milhares de anos o material ejectado será disperso no meio interestelar e a estrela central arrefecerá lentamente e acabará por desaparecer.

O anel brilhante visto em torno da estrela central é devido à emissão de hidrogénio no material ejectado durante a fase de gigante vermelha que tem sido aquecido pela estrela central. Este enorme escudo envolve o sistema planetário, sendo aproximadamente cem vezes maior que o nosso sistema solar.



Figura 7.10 – Observação do centro galáctico com o telescópio Gemini do Norte.

Esta imagem foi obtida em noites de Julho e Agosto de 2000. É difícil observar o centro galáctico visto que está a milhares de anos luz da Terra. A luz demora alguns milhares de anos a passar pelo gás e poeira até chegar junto de nós. Este material absorve a maior parte da radiação proveniente do centro galáctico, bloqueando-a ou reemitindo-a apenas parcialmente e em comprimentos de onda superiores, que pertencem à faixa do infravermelho do espectro.

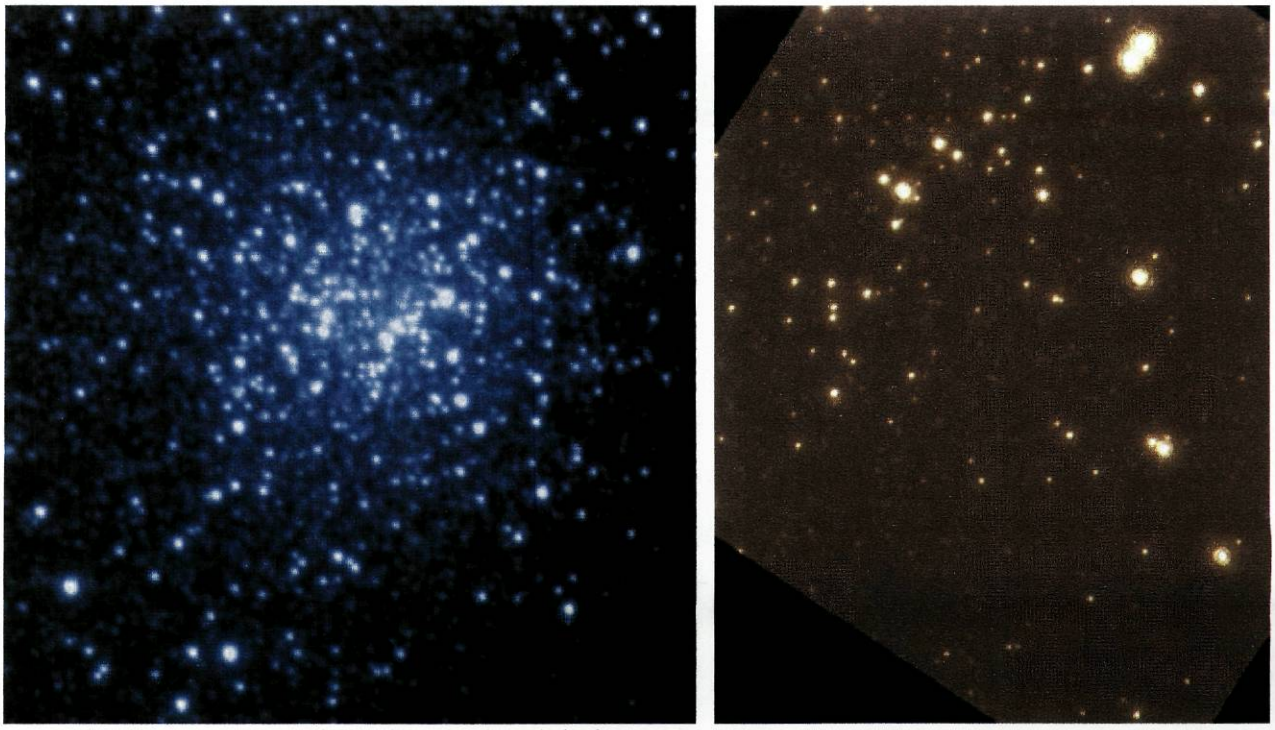


Figura 7.11 – Imagens do aglomerado globular NGC 6934. A imagem da esquerda é uma imagem óptica e a da direita é uma imagem infravermelha do mesmo aglomerado e foram ambas obtidas com o telescópio Gemini recorrendo ao sistema de óptica adaptativa Hokupa'a.

Este aglomerado encontra-se a 50000 anos luz da Terra. Embora este aglomerado esteja muito distante, ainda está dentro da nossa galáxia.

A imagem da esquerda é uma imagem nítida e bem definida devido às boas condições atmosféricas em Mauna Kea e também graças à excelente qualidade óptica do telescópio Gemini. Apesar das boas condições atmosféricas de Mauna Kea a luz de cada estrela fica manchada de tal modo que as muitas estrelas se sobrepõem ficando comprimidas de modo que não é possível estudá-las individualmente. Este problema resolve-se observando no infravermelho como é o caso da imagem da direita onde se podem ver facilmente as estrelas individualizadas.

7.4. Naos-Conica

O telescópio de 8.2 metros YEPUN é a unidade número quatro do VLT (*Very Large Telescope*), do ESO - Observatório Europeu do Sul. A este telescópio foi adicionado um sistema de óptica adaptativa em Novembro de 2001. Este sistema é composto por duas estruturas de nome NAOS, a componente da óptica adaptativa propriamente dita e CONICA, uma câmara e espectrógrafo de infravermelhos. Com este equipamento o YEPUN consegue fazer observações com uma qualidade notável, comparável à de observações feitas por telescópios espaciais.

O NAOS (sistema de óptica adaptativa de Nasmyth) é um projecto desenvolvido pelo ONERA (Instituto de Pesquisa Aeroespacial Francês), pelo Observatório de Paris, pelo Observatório de Grenoble, em colaboração com o Observatório do Sul Europeu (ESO) e alguns departamentos de pesquisa do espaço (CNRS).

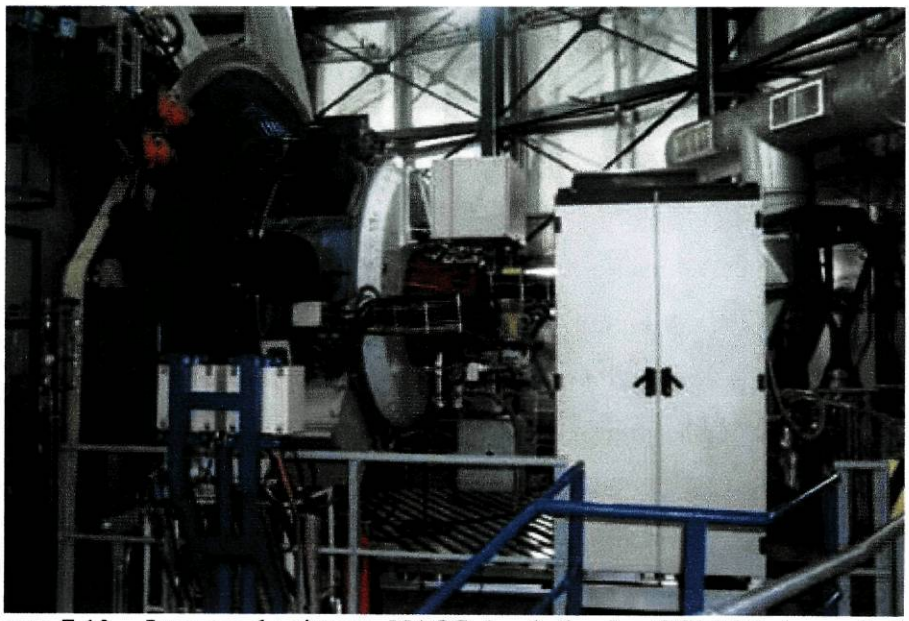


Figura 7.12 - Imagem do sistema NAOS (azul claro) e CONICA (vermelho) adaptado ao telescópio YEPUN em Novembro de 2001.

O sistema de óptica adaptativa NAOS está equipado com sensores de frente de onda que funcionam tanto no óptico como no infravermelho. O que este sistema tenta fazer é corrigir as distorções impostas pela atmosfera terrestre às frentes de onda que chegam do objecto que se pretende observar. Aquando da sua passagem pelas camadas turbulentas da atmosfera terrestre, as frentes de onda sofrem alterações que podem ser corrigidas em tempo real por estes sistemas. Para tal é necessário ter um objecto de referência que terá de ser brilhante e encontrar-se próximo do nosso alvo de estudo. CONICA é um espectrómetro e uma câmara de infravermelhos que está ligada ao sistema NAOS. Foi desenvolvida na Alemanha e contém uma série de instrumentos e mecanismos que a tornam muito eficiente.

NAOS analisa em tempo real a superfície e a distorção da onda produzida pela turbulência atmosférica. Esta análise é feita, no visível ou no infravermelho próximo (de $0{,}9\,\mu m$ até $2{,}5\,\mu m$), 500 vezes por segundo, usando estrelas naturais na parcela do céu observado ou estrelas artificiais (estrela laser usada pelo grande telescópio VLT).

As correcções são feitas por um espelho flexível deformável e as imagens estáveis, da posição angular, obtidas pelo espelho de estabilização são tratadas por um computador em tempo real. Uma imagem quase perfeita é entregue continuamente ao CONICA.

O espelho deformável de 115 mm de diâmetro é controlado em 185 pontos (um ponto por cada 7 mm) pelos actuadores pisoeléctricos.

A análise contínua das aberrações da frente de onda incidente é usada para controlar as deformações do espelho.

Os softwares de controle de CONICA e de NAOS foram projectados numa relação próxima com o software geral do telescópio VLT.

Existem cinco computadores que estão interligados para controlar NAOS e o tipo de observação que está a ser conduzida por CONICA, que é uma câmara infravermelha desenvolvida pelo Instituto de Planck em Heidelberg e em Garching (Alemanha).

O elevado desempenho da definição angular do sistema NAOS aumenta substancialmente o poder de detecção da CONICA e permitirá alcançar objectivos científicos sem precedentes, não só no nosso sistema solar como na nossa galáxia e para além desta.

Com o sistema NAOS, os astrónomos europeus têm uma ferramenta que lhes permite estudar os planetas do sistema solar, o escudo e o disco protoplanetário (ambientes estelares), ou a evolução das galáxias.

A imagem NAOS-CONICA de Saturno foi obtida em Dezembro de 2001, numa altura próxima do solstício de verão no hemisfério Sul, quando a inclinação dos anéis era bastante acentuada, de tal forma que permitia uma boa visão do Polo Sul do planeta. A mancha escura próxima do Polo Sul é uma estrutura excepcional com cerca de 300 quilómetros de diâmetro, enquanto que a mancha brilhante, que se encontra próximo do equador, é o que restou de uma tempestade gigantesca que assolou a atmosfera de Saturno durante mais de 5 anos.



Figura 7.13 - Esta fotografia de Saturno foi obtida a 8 de Dezembro de 2001 através do sistema NAOS-CONICA. São visíveis várias estruturas na atmosfera de Saturno bem como um grande pormenor na região dos anéis. A lua Thetys é visível na região abaixo do planeta.

Esta imagem é, possivelmente, a imagem mais nítida do sistema de anéis de Saturno alguma vez obtida através de um observatório localizado na superfície terrestre. São muitas as estruturas visíveis: a região mais interior, e relativamente escura, é o anel C, a área intermédia e brilhante é o anel B, enquanto que o anel A é o mais exterior. Podemos observar igualmente algumas "divisões" escuras, como a divisão de Cassini que separa o anel A e B, a divisão de Encke, próxima da orla exterior do anel A e a divisão de Colombo no anel C. Além destas são visíveis várias outras divisões, especialmente no anel C.

Esta observação foi particularmente difícil devido ao movimento de Saturno durante a exposição. Para que as imagens tivessem a maior qualidade possível o sistema NAOS utilizou como referência a lua de Saturno Tethys, enquanto que a imagem de Saturno se mantinha fixa na mesma posição do detector da CONICA. É por esta razão que a imagem de Tethys parece uma pouco difusa na fotografia.

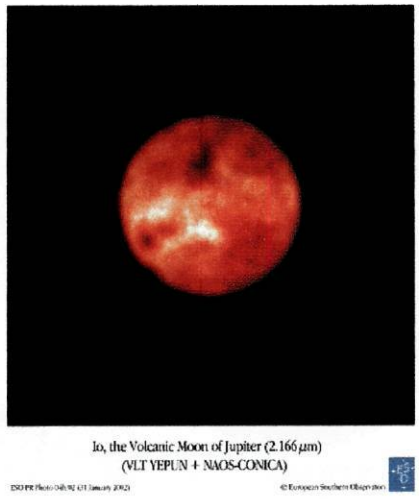


Figura 7.14 - Imagem da lua Io, foi obtida com um filtro de 2.166 μm, obtida a 5 de Dezembro de 2001.

A superfície da lua de Júpiter Io está coberta por vulcões activos e campos de lava. Devido a esta actividade vulcânica, a sua superfície é continuamente alterada. As formas de relevo visíveis actualmente são significativamente jovens, têm uma média de idade da ordem de um milhão de anos. As variações observadas no aspecto e coloração da superfície de Io são devidas a depósitos de compostos sulfurosos, libertados pelos vulcões.

8. ENQUADRAMENTO PEDAGÓGICO E DIDÁCTICO

Para nós que nos dedicamos à tarefa de ensinar e educar encontramos, com frequência, diversos problemas e dificuldades. Para que o nosso trabalho possa atingir as metas pretendidas, nós professores, devemos não só valorizar a formação ao nível das competências científicas e didácticas como aproveitar todos os recursos auxiliares ao nosso alcance. Cada vez mais se propõem novas estratégias metodológicas de ensino e, portanto, mais necessidade temos desses apoios. Assim, esta dissertação poderá servir de apoio quer a professores do ensino básico e secundário quer a alunos mais interessados em questões relacionadas com Astronomia e que não se encontram nos manuais escolares.

8.1. Objectivos gerais

- Compreender mecanismos físicos que estão por detrás da perda de qualidade da imagem e dos métodos propostos para a recuperar;
- Criar um texto de apoio onde:
  - **a)** se explicam estes fenómenos e métodos de alta resolução;
  - **b)** se apresentam actividades experimentais que os ilustram;
  - **c)** se apresentam aplicações astrofísicas destes métodos.

8.2. Enquadramento Pedagógico

O actual currículo do ensino básico não se identifica com uma adição de disciplinas, nem na perspectiva dos temas a trabalhar com os alunos, nem do ponto de vista dos espaços e tempos que a escola destina a este trabalho. Pretende-se que os alunos, ao longo da escolaridade obrigatória, adquiram um conjunto de competências gerais e essenciais necessárias a uma formação global, que lhes permita actuarem no futuro como consumidores esclarecidos e cidadãos capazes de se tornarem intervenientes responsáveis na resolução dos problemas do dia-a-dia, pessoais e da comunidade, que envolvem conhecimentos científicos e tecnológicos. A flexibilização curricular pretende que o currículo formal dê lugar a decisões curriculares que impliquem práticas de ensino e de aprendizagens diferentes.

A abordagem de conteúdos relacionados com a Astronomia é feita do seguinte modo:

- Ciências Físico-Químicas (8º ano do Ensino Básico) – Unidade de ensino "Nós e o Universo";

- Ciências da Terra e da Vida (10º ano do Ensino Secundário) – Unidades de ensino "Estrutura da Terra –Dados da Planetologia" e "Origem da Vida".
- Ciências Naturais / Ciências Físico-Químicas (7º ano do Ensino Básico) - Unidade de ensino "Terra no Espaço".

A Astronomia também é explorada em muitas escolas por alunos e professores em núcleos de Astronomia e clubes das Ciências. Estes podem motivar, incentivar e desenvolver o interesse científico e o gosto pela experimentação nos jovens que querem aceder a um nível de conhecimentos mais específico.

Filmes e imagens obtidos através da Internet no âmbito da Astronomia permitem utilizar e explorar, a diversos níveis, muitos conceitos adquiridos nas várias disciplinas quer do currículo do 3º Ciclo do Ensino Básico, nomeadamente do 7º Ano de escolaridade quer do currículo do Ensino Secundário.

Actualmente há um novo quadro de referências para a interpretação dos programas, ganhando centralidade as competências essenciais e as experiências de aprendizagem. Não nos podemos esquecer da manipulação e gestão do novo tempo lectivo (90 minutos) e a criação de áreas curriculares não disciplinares. É natural que os modos de exercício da docência exijam novas respostas e se altere o exercício da profissão. Assim, ganha sentido e oportunidade conceber novas referências que possibilitem uma acção pedagógica mais informada, mais consciente das possibilidades e dos limites. Se os professores dispuserem de referências claras, de guias práticos que explicitem os percursos pedagógicos e didácticos possíveis, de informação básica sobre as variáveis que interferem na promoção do sucesso educativo, certamente, os alunos melhorarão as aprendizagens e virá uma satisfação profissional para o docente.

É essencial que no 3º Ciclo se clarifique o estatuto das áreas curriculares não disciplinares: Área de Projecto (AP), Estudo Acompanhado (EA) e a Formação Cívica (FC).

Na Área de Projecto os alunos devem envolver-se na concepção, realização e avaliação de projectos, permitindo-lhes articular saberes de diversas áreas curriculares em volta de temas de pesquisa, que eventualmente poderão ser de Astronomia. Os professores poderão propor nos diversos Conselhos de Turma, aquando da elaboração do Projecto Curricular de Turma, que sejam trabalhados conteúdos relevantes que envolvam a Astronomia para elucidar conceitos matemáticos e/ou físicos.

O aluno do 3º Ciclo ao tratar estes temas, deverá desenvolver competências sociais, tais como a comunicação, o trabalho em equipa, a tomada de decisões e a avaliação de processos.

Aprenderá a resolver problemas, partindo das situações e dos recursos existentes que, por vezes, não são os desejados. Ainda podemos apontar outras finalidades da Área de Projecto:

- Promover a integração de saberes através da sua aplicação contextualizada.
- Desenvolver as vertentes de pesquisa e intervenção, promovendo a articulação das diferentes disciplinas.
- Aprofundar o significado social das aprendizagens disciplinares.

O Estudo Acompanhado visa promover a aquisição, pelos alunos, de métodos de estudo e de trabalho que lhes permitam realizar com crescente autonomia a sua aprendizagem e desenvolver a capacidade de aprender a aprender. Tem como finalidades:

- Ajudar o aluno na identificação e análise de estratégias de estudo em função das suas características individuais.
- Desenvolver competências de consulta e utilização de diversas fontes de informação.
- Estimular no aluno a capacidade de reconhecer as suas motivações e interesses e de concretizá-las em actividades.
- Orientar os alunos na auto-avaliação relativamente à eficácia das estratégias de estudo.

A Área de Projecto e o Estudo Acompanhado são áreas curriculares que são discutidas, planificadas e geridas em Conselho de Turma, sendo a sua operacionalização da responsabilidade apenas de um professor, contrariando assim o que estava inicialmente previsto que seriam dois docentes, os quais constituiriam um par pedagógico sendo preferencialmente de áreas disciplinares diferentes o que facilitaria em muito o bom rendimento escolar dos alunos.

A Formação Cívica é um espaço de diálogo e reflexão sobre experiências vividas e preocupações sentidas pelos alunos, assim como sobre temas e problemas relevantes da comunidade e da sociedade. O seu objectivo central é o de contribuir para a construção da identidade e o desenvolvimento da consciência física dos alunos. Tem como finalidades:

- Desenvolver competências necessárias ao exercício da cidadania.
- Desenvolver nos alunos atitudes de auto-estima, respeito mútuo e regras de convivência que conduzam à formação de cidadãos tolerantes, autónomos, participativos e civicamente responsáveis.
- Promover valores de tolerância, solidariedade e respeito pelos outros.
- Estimular a participação activa dos alunos na escola e na sociedade.
- Proporcionar aos alunos momentos de reflexão sobre a vida da escola e os princípios democráticos que regem o seu funcionamento.

Esta área curricular é discutida, planificada e gerida em Conselho de Turma, sendo a sua operacionalização da responsabilidade do Director de Turma.

A clarificação das competências a alcançar no final da educação básica toma como referentes os pressupostos da Lei de Bases do Sistema Educativo, sustentando-se num conjunto de valores e de princípios em que se destacam o desenvolvimento da curiosidade intelectual, do gosto pelo saber, pelo trabalho, pelo estudo e a participação na vida cívica de forma livre, responsável, solidária e crítica.

No final da educação básica o aluno deverá ser capaz de:

1. Mobilizar saber culturais, científicos e tecnológicos para compreender a realidade e para abordar situações e problemas do quotidiano.
2. Usar adequadamente linguagens do saber cultural, científico e tecnológico para se expressar.
3. Usar correctamente a língua portuguesa para comunicar de forma adequada e para estruturar pensamento próprio.
4. Usar línguas estrangeiras para comunicar adequadamente em situações de quotidiano e para apropriação de informação.
5. Adoptar metodologias personalizadas de trabalho e de aprendizagem adequadas aos objectivos visados.
6. Pesquisar, seleccionar e organizar informação para a transformar em conhecimento mobilizável.
7. Adoptar estratégias adequadas à resolução de problemas e à tomada de decisões.
8. Realizar actividades de forma autónoma, responsável e criativa.
9. Cooperar com os outros em tarefas e projectos comuns.
10. Relacionar harmoniosamente o corpo com o espaço, numa perspectiva pessoal e interpessoal promotora da saúde e da qualidade de vida.

O Projecto Curricular é o modo particular de reconstruir o currículo nacional tendo em consideração a realidade onde será concretizado. O Projecto Curricular de Turma (PCT) tem como referência o Projecto Curricular de Escola (PCE), devendo ser definido de modo a corresponder às particularidades de cada turma e a permitir a articulação horizontal e vertical das aprendizagens. O PCT permite-nos respeitar os alunos concretos e articular a acção dos diferentes professores da turma, com vista a ultrapassar a simples acumulação de conhecimentos, privilegiando a integração e a interdisciplinaridade dos saberes. A concretização do PCT exige a adequação e a diferenciação pedagógica que só se realizará

eficazmente se o Conselho de Turma proceder à caracterização da turma e à avaliação das aprendizagens adquiridas.

A nova reorganização curricular para o 3º Ciclo (já aplicada no 7º ano) aponta para uma abordagem da Astronomia de forma interdisciplinar nas disciplinas de Ciências Naturais e de Ciências Físico-Químicas. A disciplina de Matemática está interligada com as disciplinas das Ciências Físicas e Naturais, no campo da Astronomia, quando se faz o estudo dos números racionais, das equações e das ordens de grandeza no Universo.

Ciências Naturais	Matemática	Ciências Físico-Químicas
Terra – Um planeta com vida • *Condições da Terra que permitem a existência da vida* Considerando o Sistema Solar, os alunos devem reflectir sobre as condições próprias da Terra que a tornam no único planeta com vida. Através de fotografias de animais e plantas que habitam ambientes diversificados, recolhidas pelos alunos é possível gerar uma discussão sobre algumas das condições que os seres vivos necessitam para viver e que estão asseguradas na Terra (água, oxigénio, luz solar). O essencial é reforçar a ideia de biodiversidade e de unidade através da observação microscópica de células animais e vegetais. Uma vez que nas Ciências Físico-Químicas se discutem ordens de grandeza no Universo faz sentido a discussão dessas ordens de grandeza	**Conhecer melhor os números** • *Dimensões e diferentes ordens de grandeza de distâncias no Universo* Nas Ciências, as potências de base 10 e expoente positivo são usadas para representar números muito grandes como, por exemplo as distâncias médias dos vários planetas e as potências de base 10 e expoente negativo são usadas para representar números muito pequenos como, por exemplo, o tamanho das células e dos seres microscópicos. Utilização da notação científica para interpretar e comparar números ou grandezas físicas. Utilização da calculadora como auxiliar de cálculo ou como instrumento de pesquisa na resolução de problemas (determinar, em quilómetros, a distância entre a Ursa Menor e a Terra ou escrever o valor da massa da Terra em notação científica). • *Potências* Escrever e operar com potências de base 10. Usar a unidade astronómica (UA) para calcular as distâncias dentro do Sistema Solar e a unidade ano-luz para calcular as distâncias entre as estrelas. Pode	**Universo** • *O que existe no Universo* O professor pode introduzir a questão "O que conhecemos hoje acerca do Universo?" e abordar conceitos como os de galáxia, estrela, planeta, sistema planetário, buraco negro, constelação, espaço "vazio" e quasar. Outras questões exploratórias são: Como tem conseguido o Homem explorar o Universo? Onde nos encontramos no Universo? • *Distâncias no Universo* A visualização de filmes, a realização de uma visita de estudo ao Planetário e/ou a consulta da Internet são exemplos de situações onde os alunos se confrontam com as dimensões do Universo e as diferentes ordens de grandeza de distâncias no Universo (unidade astronómica, ano-luz e parsec). Considerando os trabalhos desenvolvidos pelos cientistas ao longo dos tempos, o

relacionadas com os seres vivos.

- *A Terra como um sistema*

Será feita uma abordagem do conceito de sistema recorrendo à visualização de documentários sobre a vida de vários grupos de animais que se relacionam entre si e com o meio.

Ciência, Tecnologia, Sociedade e Ambiente

- *Ciência produto da actividade Humana*

Os alunos devem ser sensibilizados para o carácter dinâmico da Ciência, tão evidente em episódios que fazem parte da própria história da Ciência (caso das teorias geo e heliocêntrica, resultantes do trabalho de cientistas como Ptolomeu, Copérnico e Galileu, já que nas Ciências Físico-Químicas se discutem estes assuntos).

- *Ciência e conhecimento do Universo*

As viagens espaciais são exemplos de temas de pequenas investigações baseadas na informação recolhida em documentos de fácil acesso tais como jornais, revistas e sítios da internet. A abordagem deste assunto permitirá reconhecer a Ciência como indissociável da Tecnologia e influenciada por interesses sociais e económicos.

propor-se aos alunos o estudo mais aprofundado destes temas, nomeadamente na Área de Projecto, em conjunto com as Ciências Físico-Químicas e as Ciências da Natureza, para que possam perceber a importância do uso da notação científica nessas e noutras ciências.

- *Escalas a usar na construção de modelos; dimensões e distâncias; construção de gráficos para identificar semelhanças e diferenças entre os planetas*

A utilização de folhas de cálculo (Excel) para compilar a informação recolhida pelos diferentes grupos possibilita, posteriormente, a construção de gráficos para identificar as semelhanças e diferenças entre os diferentes planetas.

- *Determinação da velocidade média; elaboração de gráficos relacionando dias do mês com a altura das marés*

Utilização da calculadora e da folha de cálculo para o cálculo da velocidade média e construção de gráficos.

- *Terminologia de equações e problemas envolvendo equações*

As equações traduzem relações relevantes entre os dados do problema e o que se pretende conhecer. Para resolver o problema é indispensável

professor pode promover um debate sobre "Como se tornou possível o conhecimento do Universo?", ilustrando episódios da História da Ciência.

De modo a sensibilizar os alunos para o carácter interactivo dos desenvolvimentos científico e tecnológico, em diferentes domínios da vida sócio-cultural em cada época, sugere-se que estes realizem dramatizações sobre a vida e obra de cientistas como Leonardo da Vinci, Galileu e Newton.

Sistema Solar

- *Astros do Sistema solar*

Os alunos poderão consolidar os conhecimentos adquiridos através da elaboração de mapas de conceitos, partindo de termos como Sol, Satélites naturais, planetas, estrelas, Lua, atmosfera, meteoros, cometas, órbita, etc.

A construção de modelos, nomeadamente do sistema Sol-Terra-Lua, usando escalas adequadas – uma para distâncias e outra para diâmetros -, seguida da discussão sobre as vantagens e limitações da utilização destes modelos, constituem actividades que os alunos podem realizar.

- *Características dos planetas*

Os alunos devem ter oportunidade para reflectir sobre as implicações ambientais, sociais e/ou emocionais de certos acontecimentos, como os desastres que tiraram a vida a astronautas (Challenger), a queda na Terra de satélites ou estações espaciais quando acabam as suas funções (Skylab e Mir) ou o envio de reactores nucleares para o espaço, entre outros.	escrever a equação mas é igualmente importante saber resolvê-la. Assim, não é possível resolver o problema sem resolver a equação. Os alunos devem resolver equações literais que envolvam fórmulas das Ciências Físico-Químicas. **Lugares geométricos** • *Definição e descrição* Os alunos contactam no dia-a-dia com muitos objectos de forma esférica. A superfície da Terra tem, aproximadamente, uma forma esférica. Interessa saber qual é a forma geométrica do equador e qual a forma do globo terrestre. **Razões e proporções** Resolução de problemas em que intervêm relações de proporcionalidade directa. Identificação da constante de proporcionalidade. **Vectores** Na Física as forças representam-se por vectores. A estes estão associados os conceitos de direcção, sentido e comprimento. Uma translação pode ser definida por um vector. **Trignometria** Os alunos necessitam de alguns conhecimentos de razões trignométricas de um ângulo agudo, em especial o seno e o coseno para a compreensão de fase do movimento harmónico simples.	Sugere-se a realização de pesquisas que resultem das questões e curiosidades dos alunos. A recolha e organização de dados sobre as dimensões, o tipo de atmosfera, a distância ao Sol, a duração de uma volta completa (quer em torno do eixo, quer em relação ao Sol), os satélites naturais, a massa, ou a temperatura média dos planetas são exemplos a considerar. Para a comunicação dos resultados, é fundamental incentivar o uso de diferentes suportes (apresentação em computador, cartaz ou jornal). A utilização de folhas de cálculo para compilar a informação recolhida pelos diferentes grupos possibilita, posteriormente, a construção de gráficos para identificar as semelhanças e diferenças entre os diferentes planetas. A comparação das características da Terra com as dos outros planetas do Sistema Solar permite responder à questão específica "O que faz da Terra um planeta com vida?", cuja resposta constituirá um quadro de exploração juntamente com o estudo efectuado em Ciências Naturais. **Planeta Terra** • *Terra e Sistema Solar* Para estudar a Terra e o Sistema Solar o recurso à simulação com material experimental e com programas de computador é uma sugestão que se apresenta para explorar os movimentos da Terra de modo a explicar a sucessão dos dias e das noites, as estações do noite, as fases da

		Lua e os eclipses da Lua e do Sol. Outras simulações permitem visualizar o movimento simultâneo dos planetas e satélites, o que é fundamental para os alunos o descreverem. • *Movimentos e forças* Abordagem dos conceitos de trajectória, velocidade média, forças e, em particular, força gravitacional, sendo importante que os alunos adquiram a noção de que há uma força de atracção entre os corpos celestes que mantém os planetas nas suas órbitas. Comparação da trajectória da Terra com a de outros planetas. Efectuar a distinção entre massa e peso. Os alunos devem relacionar a existência do fenómeno das marés com a força gravitacional. A partir de dados recolhidos em jornais diários, os alunos poderão elaborar gráficos, relacionando os dias do mês com a altura das marés; ao longo do ano, cada grupo pode construir, por exemplo, o gráfico relativo a determinado mês. **Ondas** • *Ondas transversais e longitudinais* Para estudar os vários tipos de ondas pode recorrer-se à sua simulação com material experimental (tina de ondas, gerador de sinais, osciloscópio, altifalante e microfone) e com programas de computador.

		Estas são algumas sugestões que se apresentam para a exploração das ondas. Também se podem observar estes tipos de onda numa mola helicoidal. • *Movimentos ondulatórios* Algumas características do som como a frequência, o comprimento de onda e a amplitude da onda são comuns a outros fenómenos com natureza ondulatória. É interessante observar ondas numa corda quando se agita para cima e para baixo a sua extremidade livre. • *Reflexão das ondas mecânicas* Realização de actividades experimentais utilizando a tina de ondas. • *Difracção das ondas mecânicas* Realização de actividades experimentais utilizando a tina de ondas. Também se pode recorrer ao feixe de laser quando este incide numa fenda circular. É ainda possível medir o diâmetro de um cabelo humano recorrendo à difracção do feixe luminoso do laser. • *Interferência de ondas* Realização de actividades experimentais utilizando a tina de ondas e o feixe de laser quando este incide em duas fendas. • *Refracção da luz e índice de refracção* Realização de actividades experimentais utilizando a tina de ondas.

Após a identificação dos Temas/Conteúdos relevantes das várias disciplinas do currículo do 7º ano de escolaridade, e do 3º Ciclo, com os quais aqueles poderiam apresentar alguma interdependência, conexão ou relação, surgiram possíveis articulações interdisciplinares. Estas podem desenvolver o trabalho colaborativo dos professores no sentido de adequarem o currículo aos seus alunos e planificarem o ensino/aprendizagem de uma forma mais integrada e global.

No quadro que se segue, apresentam-se os conteúdos que de alguma forma estão relacionados com a Astronomia. Este conjunto de conteúdos pode ser lido de uma forma interdisciplinar.

Temas/Conteúdos relevantes	Articulações interdisciplinares
Matemática *Conhecer melhor os números:* - Números primos e compostos - Potências - Quadrados e cubos perfeitos	**Língua Estrangeira** – a identidade: uso dos números nos dados pessoais e nos outros; as compras e o pagamento em numerário. **História** – sistemas de numeração das civilizações antigas. **Ciências Naturais** – dinâmica dos ecossistemas. **C. Físico- Químicas** – Ordens de grandeza no Universo.
Os números racionais: - Representação e ordenação dos números racionais - Valor absoluto e números simétricos - Estimativas - Operações em $\boldsymbol{Q}$	**História** – Evolução dos números até ao século XIV; contagem do tempo a.C. e d. C. **Geografia** – A população. **Ciências Naturais** – Etapas na história da Terra. **C. Físico- Químicas** – O movimento. **Educação Visual** – A simetria na representação. **Educação Tecnológica** – A tecnologia ao serviço da execução dos objectos. **Educação Física** – Tempos aproximados.
Equações: - Terminologia das equações - Problemas envolvendo equações	**C. Físico- Químicas/ Ciências Naturais** – O avanço da ciência: problemas levantados e equacionados.

Ciências Naturais	**Geografia** – Trabalho de campo: recolha de fotografias de animais e de plantas em ambientes diversificados. **C. Físico- Químicas e Matemática** – Ordens de grandeza relacionadas com os seres vivos. **Língua Portuguesa** – Comunicação regulada por técnicas: resumo. **Língua Estrangeira** – Espécies animais e vegetais características dos países a que respeita a aprendizagem da língua. **História** – As sociedades recolectoras (a caça e a apanha).
Terra no Espaço *Terra – Um planeta com vida* - Condições da Terra que permitem a existência da vida - A Terra como um sistema *Ciência, Tecnologia, Sociedade e Ambiente:* - Ciência produto da actividade humana - Ciência e conhecimento do Universo	**Língua Portuguesa** – O texto dramático: dramatizações sobre individualidades ligadas à história da ciência. **Matemática** – Os cientistas e sua importância na história da Matemática. **História** – As sociedades produtoras (inovações técnicas).
C. Físico- Químicas **Terra no Espaço** *Universo:* - O que existe no Universo - Dimensões do Universo	**Língua Portuguesa** – Utilização do dicionário: procura do significado dos termos relacionados com a constituição do Universo; simulações/dramatizações para apresentar cientistas como Galileu, Newton e Leonardo da Vinci. **Língua Estrangeira** – Uso do dicionário: procura de vocábulos equivalentes. **Matemática** – Dimensões e diferentes ordens de grandeza de distâncias no Universo. **História** – As sociedades produtoras: inovações técnicas; o avanço tecnológico

	das sociedades e o conhecimento do Universo.
Sistema Solar: - Astros do Sistema Solar - Características dos planetas	**Educação Visual** – Desenho do Sistema Solar. **Matemática** – Escalas a usar na construção de modelos; dimensões e distâncias; construção de gráficos para identificar semelhanças e diferenças entre os planetas.
Planeta Terra: - Terra e Sistema Solar - Movimentos e forças	**Língua Portuguesa** – Texto não literário: recolha de textos sobre os astronautas e os seus movimentos; Escrita criativa: redacção de textos subordinados aos temas: "Se eu fosse à Lua", "Se eu fosse um astronauta". **Língua Estrangeira** – A escolha das profissões e pesquisa de nomes de astronautas ou passageiros dos vaivéns de origem francesa ou inglesa. **Geografia** – Estado do tempo e clima relacionados com as estações do ano. **Educação Tecnológica** – Construção de um globo terrestre e de modelos do Sistema Sol-Terra-Lua. **Matemática** – Determinação da velocidade média; elaboração de gráficos relacionando dias do mês com altura das marés.

A utilidade da Matemática enquanto instrumento de interpretação e descrição de fenómenos reais depende essencialmente da capacidade que esta tem de representar esses fenómenos através de modelos matemáticos. Os alunos necessitam de aprender a trabalhar com todas estas representações e traduzir umas através de outras utilizando tecnologia, papel e lápis.

8.3. Enquadramento dos protocolos

	Actividades Experimentais	Disciplinas /Anos
Anexo A Tina de ondas	nº 1 - Ondas	**Ciências Físico-Químicas / 8º Ano** – O Som e a Audição; A Luz e a Visão. **Ciências Físico-Químicas / 11º Ano** – Investigando a estrutura dos átomos – Absorção e emissão da luz pela matéria – Características das ondas. **Química / 12º Ano** – As radiações como ondas electromagnéticas.
	nº 2 –Reflexão	**Ciências Físico-Químicas / 8º Ano** – O Som e a Audição; A Luz e a Visão. **Ciências Físico-Químicas / 11º Ano** – Investigando a estrutura dos átomos – Relação entre a luz emitida/absorvida por uma substância e a sua cor.
	nº3 – Refracção	**Ciências Físico-Químicas / 8º Ano** – O Som e a Audição; A Luz e a Visão. **Ciências Físico-Químicas / 11º Ano** – Investigando a estrutura dos átomos Relação entre a luz emitida/absorvida por uma substância e a sua cor.
	nº4 – Interferência	**Ciências Físico-Químicas / 11º Ano** – Movimento Ondulatório – Propriedades das ondas. **Física / 12º Ano** – Ondas electromagnéticas.
	nº5 – Difracção	**Ciências Físico-Químicas / 11º Ano** – Movimento Ondulatório – Propriedades das ondas. **Física / 12º Ano** – Ondas electromagnéticas.
Anexo B Raio laser	nº1 – Difracção	**Ciências Físico-Químicas / 8º Ano** – A Luz e a Visão.
	nº2 – Medir o diâmetro de um cabelo humano	**Matemática /8º Ano** – Equações literais.
	nº3 – Simulação da turbulência atmosférica	**Ciências Físico-Químicas / 8º Ano** - A Luz e a Visão. **Ciências Físico-Químicas / 9º Ano** – A atmosfera e mudanças de tempo – a atmosfera terrestre **Ciências Físico-Químicas / 10º Ano** – Interacção radiação-matéria; estrutura da atmosfera terrestre.

8.4. Enquadramento Didáctico

A aquisição e qualidade de imagens, em Astronomia, dá-nos a possibilidade de explorar vários conceitos físicos e matemáticos que constam do Currículo definido para as escolas, havendo a salientar conceitos relacionados com a óptica e equações.

Na disciplina de Matemática existem diversos tipos de aula, cada uma com a sua dinâmica própria. Em muitas delas, os conceitos e os conhecimentos matemáticos são introduzidos pelo professor e os alunos têm um papel de meros receptores de informação. Optei, em algumas aulas, por utilizar actividades experimentais para que o saber fosse construído no decurso da própria actividade matemática, cabendo aos alunos um papel de participação activa e cabendo-me, neste caso, um papel de organizador e dinamizador da aprendizagem. As actividades matemáticas (experimentais) devem despertar curiosidade e entusiasmo, fazendo apelo aos seus conhecimentos prévios e intuições. Estas actividades encontram-se em anexo e relatadas na secção 8.5.

Os conteúdos matemáticos envolvidos nestas actividades dizem respeito aos aspectos matemáticos envolvidos (conceitos e processos) no quadro do currículo correspondente.

8.5. Relatório das actividades experimentais

Ensinar é uma actividade criativa, activa e investigativa em que o professor tem de ser o agente propulsor de um trabalho de equipa que se quer coesa e profícua.

Para que o exercício desta actividade resulte positivo há que promover todo um processo de pesquisa metodológica ponderando as várias opções de acções pedagógicas, actuações interdisciplinares, abordagem programática e trabalho de equipa.

Os jovens de hoje tomam conhecimento, dia-a-dia, dos inúmeros avanços tecnológicos. O professor tem de acompanhar este ritmo, na sua actividade lectiva, adoptando estratégias inovadoras e criativas que se coadunem com as exigências da sociedade actual.

O trabalho experimental de tipo investigativo pode dar um importante contributo na formação básica de todos os alunos e pode centrar, em si mesmo, diversos aspectos das perspectivas actuais do ensino das ciências. Estas actividades proporcionam aos alunos oportunidades únicas de aprendizagem, nomeadamente no que respeita à aprendizagem de conceitos, competências e atitudes que têm sido apontados como fundamentais para a adaptação dos alunos a um mundo em mudança.

Os conteúdos programáticos e de ensino das ciências têm sido dominados pela informação factual e pela presença constante de termos e convenções. Este facto conduz por vezes à

confusão entre os termos e os conceitos que os mesmos pretendem identificar e faz ainda com que a ciência escolar veicule uma imagem de ciência como produto acabado e fixo.

Considerando que os alunos deste nível de ensino (8º Ano) ainda não estão habituados ao trabalho experimental e tendo em conta todas as limitações que existem em interligar as várias disciplinas para um trabalho mais orientado em torno de questões mais concretas, com uma probabilidade de os alunos chegarem a resultados conclusivos, recorri a algumas actividades práticas onde se incluía a "medição do diâmetro do cabelo humano".

Propus, como ponto de partida, a descrição de um fenómeno pouco conhecido (difracção) para os alunos do 8º Ano que motivou individualmente um vasto conjunto de questões que foram tratadas quer em aulas de Matemática quer em aulas de Ciências Físico-Químicas. No início surgiu um conjunto de questões algo desarticuladas. Em minha opinião um problema é uma questão da qual os alunos desconhecem a resposta e por isso devemos levá-los a reflectir sobre a possível articulação entre as várias questões e o que será necessário conhecer e fazer para chegar a uma ou mais soluções.

Este tipo de actividades leva os alunos a dedicarem mais atenção a aspectos que, noutras circunstâncias, desprezariam pela simples razão de que saberiam, à partida, que os mesmos não teriam qualquer influência nos seus resultados finais. A precisão nas medidas surge como uma necessidade natural inerente ao próprio processo deste trabalho.

A maioria dos alunos ficaram muito satisfeitos com a realização destas actividades e de tal modo entusiasmados que só perguntam porque razão não se fazem mais actividades deste tipo. Os alunos tiveram possibilidade de conhecer novos aparelhos, e passar da teoria à prática.

Existiram algumas dificuldades em gerir as actividades experimentais uma vez que a turma é muito heterogénea tendo, inclusivé, dois alunos com perspectivas de abandono escolar. A novidade dos materiais utilizados como, por exemplo, o laser despertaram nos alunos um enorme interesse.

Face à forma como os protocolos foram concebidos e utilizados na sala de aula e aos resultados obtidos, parece ser possível afirmar que, de certa forma, estas actividades contribuem para o desenvolvimento de competências não elementares em variadas vertentes do campo conceptual em estudo. Permitem, ainda, construir de forma sólida descrições de fenómenos associados à luz o que é particularmente notável para a idade e nível de ensino em causa, contribuem também para solidificar conhecimentos em Matemática, como o estudo de funções literais, a aplicação da notação científica, fazer medições e reduções de vários parâmetros à mesma unidade.

Já no ano lectivo de 2001/2002, na Escola Básica 2,3/S de Mação realizei algumas actividades experimentais sobre ondas, reflexão, refracção, interferência e difracção. As três primeiras foram realizadas por alunos dos ensinos básico e secundário que pertenciam ao Clube das Ciências, enquanto que nas duas últimas participaram alunos dos 11º e 12º Anos. Estas actividades tiveram lugar na semana dedicada às Ciências no final do referido ano lectivo.

Nestas experiências foi utilizada uma tina de ondas, que já existia na escola desde 1993, e que nunca tinha sido usada.

Este tipo de metodologia (trabalho experimental) suscitou nos alunos:

- a responsabilidade na elaboração e execução dos trabalhos experimentais;
- a necessidade de fazer pesquisa bibliográfica e procurar informações na Internet;
- a formulação de previsões de resultados;
- questionarem-se sobre os resultados obtidos.

Terminados os trabalhos experimentais, foi feita uma avaliação pelos alunos, tendo estes achado que o trabalho experimental desenvolvido foi pertinente, interessante, inovador e importante.

Consideraram ainda que os aspectos de maior importância foram:

- a melhoria da relação professor/aluno;
- a implementação da capacidade de trabalhar em grupo;
- a importância para o crescimento pessoal;
- o desenvolvimento de capacidades investigativas;
- a novidade nas estratégias e materiais utilizados.

Através das várias actividades práticas aplicadas nos anos lectivos 2001/2002 e 2002/2003, deu-se relevância à interdisciplinariedade e fez-se a promoção de capacidades e atitudes nos alunos. Os resultados obtidos permitem concluir que a aplicação aos ensinos básico e secundário da estratégia de actividade experimental como actividade investigativa, utilizando o estudo de ondas, contribui para uma melhoria significativa do ensino/aprendizagem de conceitos relacionados com a luz e para uma melhoria do ensino/aprendizagem de alguns conceitos matemáticos. Estes conceitos juntamente com os relacionados com a luz tornam-se indispensáveis para a moderna Astronomia.



Figura 8.1 – Grupo de alunos do 8º Ano (Escola EB2,3/S de Mação) realizando experiências com a tina de ondas na semana das Ciências.

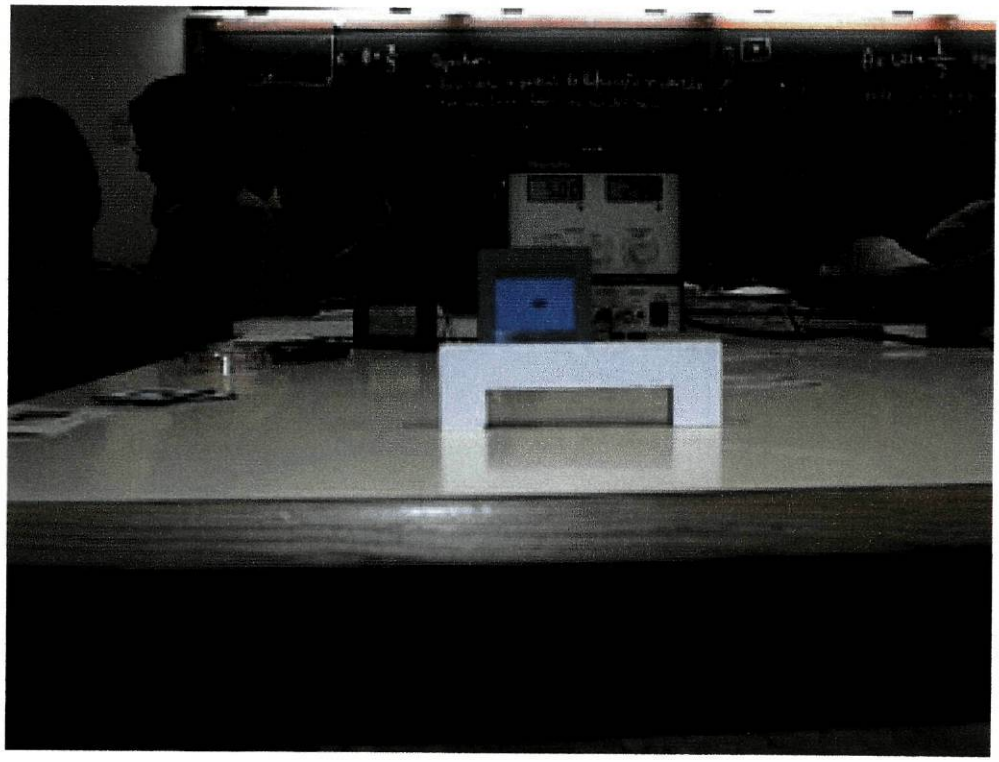


Figura 8.2 – Alunos do 8ºA (Escola EB2,3 João Roiz de Castelo Branco) realizando experiências com o laser para observar o fenómeno da difracção através de um orifício circular.

8.6. Reflexão crítica

Desde muito cedo que os alunos desenvolvem ideias e conceitos na tentativa de encontrarem explicação para muitos fenómenos que observam no seu dia-a-dia. Tentam dar uma explicação desses fenómenos, criando a sua própria ciência.

O meio em que o aluno está inserido tem uma influência muito grande nas suas concepções acerca dos fenómenos que observa.

A informação através dos meios de comunicação, da família e amigos pode levar o aluno a determinados esquemas conceptuais sem explicação científica.

Por exemplo, algumas ideias preconcebidas dos alunos são:

- A Terra está imóvel;
- O Sol e as estrelas movem-se no céu.

Nestas concepções, utilizam o modelo geocêntrico, confundindo as aparências com a realidade.

Por outro lado o Homem consegue explorar o Universo não só a partir da Terra como também do espaço. O Homem dispõe já de diversos equipamentos como telescópios, radiotelescópios e observatórios espaciais, entre outros.

Com os telescópios pretende-se que os objectos muito distantes possam ser observados como se estivessem muito mais perto. Estes instrumentos necessitam de captar grandes quantidades de luz. A detecção da luz permite ver o Universo. Há todo o interesse em estudar a luz e as suas propriedades porque nos permite conhecer o mundo que nos rodeia. Tanto a luz visível como a luz não visível são essenciais para esse conhecimento. A Ciência só é possível graças à luz.

Quando se inicia o estudo do subtema "Universo" os alunos mostram ainda muitas dificuldades relativas ao movimento dos corpos celestes como, por exemplo:

- Os corpos celestes mudam de posição ao longo da noite? E ao longo do ano?
- Observam-se os mesmos corpos celestes de locais distintos da Terra?

Só a partir de observações do céu nocturno e de registos efectuados é que os alunos podem mais facilmente obter resposta a estas questões.

Para que os alunos entendam o movimento dos corpos celestes, deve recorrer-se a:

- Observações durante a mesma noite, a diferentes horas (movimento aparente ao longo da noite);

- Observações em diferentes noites e sempre à mesma hora (movimento aparente ao longo do ano).

Estas observações poderão ser feitas a olho nu, com binóculos ou telescópios. Porém, a maioria das escolas, nomeadamente aquelas em que leccionei ultimamente, não se encontram apetrechadas com este tipo de instrumentos o que torna impossível estas observações. Seria bom que as escolas tivessem à sua disposição um pequeno observatório com telescópio e salas de informática, de forma a possibilitarem aos alunos pesquisas em biblioteca virtual dando-lhes a oportunidade de viajarem por este mundo de conhecimentos e descobertas, de modo que no futuro possamos formar uma sociedade capaz de entender e respeitar a nossa posição perante o planeta e o Universo.

Além da falta de recursos, os alunos como têm uma carga horária apenas diurna é quase impossível assistirem às observações nocturnas.

Uma forma de colmatar estas lacunas é a criação de Núcleos/Clubes de Astronomia nas escolas de forma a poder realizar várias actividades capazes de motivar, incentivar, desenvolver o interesse científico e o gosto pela experimentação nos alunos.

Apesar de todas as contrariedades no final do mês de Maio de 2003, juntamente com os professores de Ciências Naturais e Ciências Físico-Químicas do 3° Ciclo, participei activamente numa sessão de observação nocturna, que decorreu no pátio da Escola João Roiz de Castelo Branco. Para esta sessão foi necessário requisitar três binóculos e dois telescópios ao planetário da Escola Secundária Nuno Álvares em Castelo Branco. Tivemos ainda a colaboração de um núcleo de divulgação do Ensino da Astronomia da Universidade de Coimbra que se fez acompanhar de um planetário portátil e um telescópio.

Esta sessão teve a participação da maioria dos alunos do 7° e 8° anos e respectivos Encarregados de Educação (cerca de 400 participantes). Foi possível observar Júpiter e os seus quatro satélites mais importantes (Io, Europa, Ganimedes e Calisto). Os alunos ficaram bastante motivados para outras observações astronómicas e puderam ter um primeiro contacto com estes instrumentos ópticos. Estas observações (no terreno e no planetário) serviram para consolidar os conhecimentos adquiridos em Ciências Físico-Químicas (7° ano) – "Universo"; "Sistema Solar" e "Planeta Terra"; Ciências Físico-Químicas (8° ano) – "Nós e o Universo". Observações deste tipo também seriam úteis para os alunos do 10° ano (Ciências da Terra e da Vida – "Dados de Planetologia" e Ciências Físico-Químicas – componente da Química – "Das Estrelas ao Átomo").

Assim, independentemente do papel da teoria e da integração conceptual o trabalho experimental cumpre um papel essencial. A motivação dos alunos e o desenvolvimento de

atitudes científicas devem ser preocupações presentes em toda e qualquer actividade prática. As actividades práticas constituem uma componente fundamental no ensino da Astronomia.

Com o ensino da Astronomia, pretende-se criar nos alunos a motivação e o interesse pela ciência em geral, explorando o carácter multidisciplinar da Astronomia e aproveitando o fascínio que ela exerce sobre os alunos, professores e o público em geral. A Astronomia é especialmente apropriada para motivar os alunos e aprofundar conhecimentos em diversas áreas pois envolve a Física (Óptica – ao usar instrumentos de observação e registo de imagem: telescópios, binóculos; de onde vem a luz e como viaja; **ondas**; etc.) a Matemática (Lugar geométrico – superfície esférica e esfera; notação científica; **equações literais**; etc.) a Química (Estrutura da matéria; interpretação de espectros; etc.) a Geografia (Latitude, longitude, coordenadas, etc.) a História (uso de astrolábios na navegação e Descobrimentos) a Geologia (Origem da vida; evolução da atmosfera terrestre; dados da Astrogeologia; etc.) e a Informática (Pesquisa de informação e tratamento e dados).

O ensino em Portugal tem estado sujeito a constantes alterações. O acesso fácil ao conhecimento localizado em qualquer canto do mundo está progressivamente a transformar o ensino, o trabalho e as formas de comunicação social.

A utilização das novas tecnologias representa, por isso, um significativo desafio em relação ao papel tradicional do professor. A presença de novas tecnologias na educação não garante uma mudança efectiva nos processos de ensino/aprendizagem, é indispensável o uso adequado destas tecnologias.

O uso eficiente das novas Tecnologias da Informação e da Comunicação (TIC) em contexto pedagógico oferece algumas vantagens:

- a escola aproxima-se do mundo real;
- os alunos familiarizam-se com as tecnologias usadas no mundo do trabalho, adquirindo novas competências;
- através da Internet, os alunos podem alargar significativamente o âmbito dos conteúdos programáticos e torná-los significativos;
- auxilia a eficácia do ensino e da aprendizagem;
- enriquece os conteúdos curriculares e educativos.

Através da Internet os alunos podem navegar, por exemplo, pelos sítios da NASA, ESA e ESO, podendo acompanhar o que de mais recente acontece em Astronomia.

Além das actividades experimentais que se encontram anexadas a esta dissertação poder-se-á propor aos alunos a elaboração de trabalhos (de grupo ou individuais) de pesquisa sobre o Universo, o Sistema Solar e o Planeta Terra recorrendo a livros, enciclopédias, artigos de

jornais e revistas, materiais audiovisuais tais como diapositivos, CD-ROM, filmes e transparências e a Internet.

Se as actividades experimentais realizadas com o raio laser fossem postas em prática com alunos do 10º ano seria possível explorá-las com maior profundidade, uma vez que estes alunos já têm conhecimentos mais aprofundados de trignometria. A aplicação destas actividades a alunos do Ensino Secundário seria mais vantajosa do que a sua aplicação a alunos do Ensino Básico (8º Ano).

Sendo a criação de Núcleos/Clubes de Astronomia um contributo importante para o ensino das ciências, particularmente para o ensino da Astronomia, irei propor a criação de um núcleo de Astronomia na minha escola afim de desenvolver o gosto pela Astronomia e aprofundar conhecimentos de várias disciplinas.

O ensino da Astronomia integra-se naturalmente no currículo da disciplina de Matemática, permitindo a utilização de exemplos de grande interesse para os alunos tornando-a mais ligada ao mundo real. Por exemplo, a medição do diâmetro do cabelo humano facilitou a compreensão do conteúdo matemático em causa (equações literais) e tornou a disciplina de Matemática numa disciplina diferente e de maior agrado dos alunos.

9. CONCLUSÃO

O tema da dissertação foi o estudo das limitações que a atmosfera impõe na qualidade de imagem dos grandes telescópios terrestres, assim como as técnicas desenvolvidas para as corrigir. Comecei por introduzir os fenómenos oscilatórios e ondulatórios, seguidamente abordei a interferência e a difracção de ondas, em particular as luminosas e debrucei-me sobre os vários tipos de telescópios, suas vantagens e desvantagens. Após o estudo da natureza turbulenta da atmosfera terrestre concluí que esta é a causa do aumento de tamanho angular da imagem e que degrada a precisão angular do telescópio. A turbulência atmosférica distorce as frentes de onda planas, que atingem a Terra, vindas de objectos muito distantes.

Um dos efeitos causados pela perturbação atmosférica é a exposição de uma imagem em que há perda da coerência espacial da frente de onda. Este efeito manifesta-se pela criação de manchas nas imagens formadas no foco dos telescópios que são designadas por *speckles*. As *speckles* resultam da interferência das frentes de ondas distorcidas pela turbulência.

Vimos modos de corrigir os efeitos da turbulência atmosférica na qualidade da imagem, em especial a óptica adaptativa. A óptica adaptativa (OA) é uma das técnicas de alta resolução que corrige a influência da atmosfera no momento do registo das imagens. Actualmente todos os Observatórios usam a OA para obter imagens astronómicas a alta resolução angular a partir dos seus telescópios terrestres embora nenhum sistema de OA oferece uma correcção total e, por isso, normalmente são utilizados outros métodos de alta resolução como complemento. Assim, o telescópio Gemini (Norte), de 8 m, utiliza um sistema de óptica adaptativa chamado Hokupa'a, o telescópio Canadá-França-Havai (CFHT), de 3,6 m, usa o sistema de óptica adaptativa PUEO e o telescópio Very Large Telescope (VLT) do Observatório Europeu do Sul, de 8,2 m, recorre a um sistema de óptica adaptativa designado por NAOS.

A óptica adaptativa necessita de uma estrela de referência que pode ser uma estrela natural ou uma estrela criada artificialmente como é o caso das estrelas laser. Estas têm por finalidade aumentar a cobertura do céu, ou seja, o número de objectos celestes acessíveis com um sistema de óptica adaptativa.

Alguns resultados astronómicos que constam neste trabalho foram obtidos por alguns telescópios ópticos e infravermelhos usando a óptica adaptativa como uma solução para eliminar os efeitos da atmosfera.

Depois deste estudo percebe-se mais facilmente que as estrelas só cintilam, quando olhamos para elas da Terra, devido ao desvio de direcção que a luz sofre ao atravessar a atmosfera quando encontra correntes de ar quente e de ar frio que estão permanentemente em

movimento. A luz das estrelas é refractada ao atravessar a atmosfera terrestre. Os planetas não cintilam porque têm um diâmetro maior que o seeing e, por isso, os efeitos da cintilação são anulados. Em particular, podemos dividir a superfície do planeta em muitos bocados, cada um com o tamanho do seeing. Se cada bocado variar aleatoriamente temos que, em média, a soma de todos os bocados varia menos.

Durante a elaboração desta dissertação realizei actividades experimentais com alunos do ensino secundário e do básico, sobre ondas a fim de estudar os fenómenos associados a estas e cheguei à conclusão que os alunos ficaram mais motivados para o estudo do tema em causa, tendo os alunos considerado estas actividades muito interessantes.

No presente ano lectivo, desenvolvi actividades experimentais, com alunos, do ensino básico, subordinadas ao tema difracção da luz, nas quais os alunos mediram o diâmetro do cabelo podendo, deste modo, concretizar o conceito de equação literal. Concluí que houve uma melhoria na relação professor/aluno e um maior desenvolvimento nas capacidades investigativas; e que os alunos ficaram muito entusiasmados com a nova maneira de aprender Matemática, recorrendo a materiais completamente novos e diferentes dos habituais.

Além destas actividades fiz observações astronómicas para verificar o efeito da atmosfera nas referidas observações tendo medido o seeing, onde se obteve o valor de $\approx 3{,}44''$, no CAUP e concluído que pertence à categoria IV da escala de Antoniadi, que se caracteriza por ter má visibilidade com imagem em constante movimento. Observei ainda speckles e a refracção atmosférica diferencial onde o índice de refracção do ar tem uma dependência no comprimento de onda da luz.

ANEXO A

Escola Básica 2,3/S de Mação

Clube das Ciências **2001/2002**

Nível de escolaridade: **8º ano e seguintes**

Actividade experimental Nº 1 – Ondas

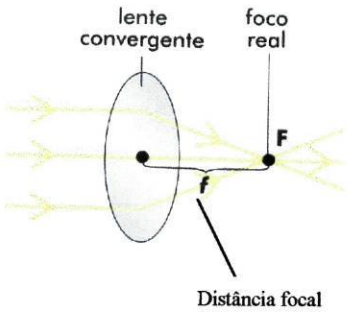
OBJECTIVOS:

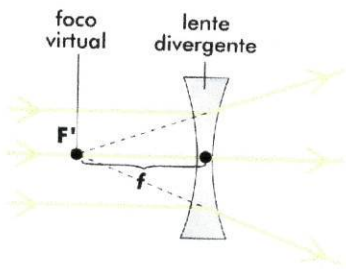
- Observar a produção de ondas progressivas.
- Determinar os factores de que dependem a frequência e a velocidade de uma onda.

INTRODUÇÃO / PRESSUPOSTOS TEÓRICOS:

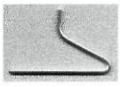
Iremos usar um modelo de ondas mecânicas produzidas numa tina de ondas para visualizar e tornar compreensível o que ocorre com o som, com a luz visível e com as outras radiações electromagnéticas.

Na tina de ondas provocam-se perturbações à superfície da água e obtêm-se, à superfície desta, ondas transversais. Ao ligarmos a lâmpada, existente no interior da caixa da tina, fazemos incidir um feixe de luz na água que se refracta. No tecto obtêm-se zonas escuras e claras: as zonas escuras correspondem aos vales, pois estes funcionam como lentes divergentes, e as zonas claras correspondem às cristas, pois estas funcionam como lentes convergentes.





EQUIPAMENTO E MATERIAL:

- Caixa da tina de ondas
- Vibrador
- Vara de suporte (haste)
- Suporte com lente de projecção
- Tina (recipiente transparente)
- Suporte com espelho
- Garrafa de esguicho com água destilada
- Ponta simples 
- Ponta linear 
- Conta gotas
- Pano de flanela

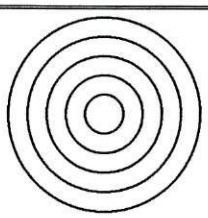
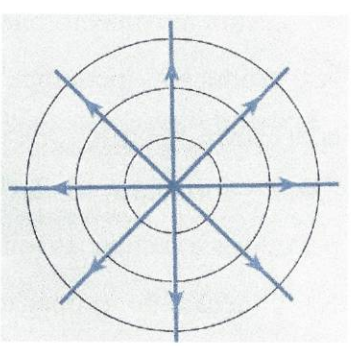
PROCEDIMENTOS:

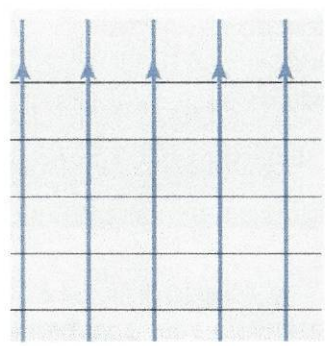
1. Introduza a vara de suporte (haste) no furo existente na parte superior da caixa da tina, pelo lado roscado, e enrosque-o firmemente, rodando no sentido dos ponteiros de um relógio.
2. Monte o vibrador, fazendo passar a haste pelo furo existente no corpo deste.
3. Pelo mesmo processo, monte na haste, a lente de projecção e o espelho.
4. Rode o corpo da lente de projecção, de modo que esta fique horizontal, paralela à face superior da caixa da tina.
5. Coloque o recipiente transparente, vazio, sobre a lente condensadora existente na parte superior da caixa.
6. Deite água na tina, com o auxílio do esguicho, até cerca de 1 cm de altura.
7. Deite duas ou três gotas de água, com o conta gotas, na tina e registe o que observa.

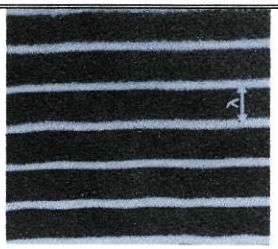
8. Seleccione a ponta simples que simula uma fonte simples. A ponta vibrante deve apenas tocar a superfície da água (para isso ajusta-se a altura do vibrador até obter esta condição).
9. Ligue os fios do vibrador aos alvéolos marcados "RIPPLER SUPPLY", existentes no painel frontal.
10. Ligue a tina de ondas, accionando o interruptor da alavanca para a posição "ON".
11. Registe os resultados observados.
12. Coloque um papelinho na superfície da água e registe o que observar.
13. Troque a ponta simples pela ponta linear e registe os resultados agora observados.
14. Rode o botão "INCREASE AMPLITUDE" para controlar a amplitude das vibrações e registe o que observar.
15. Mantenha a frequência do vibrador (use uma frequência baixa), altere a quantidade de água na tina e registe os resultados obtidos.

RESULTADOS OBSERVADOS:

Nota: As respostas a azul, são apenas uma possível resolução, uma vez que as grelhas foram entregues em branco aos alunos.

Registo das observações obtidas	**Esquemas**
Ponto7 Observa-se que uma perturbação pontual leva à propagação de uma onda circular.	
Ponto11 Observa-se que: • Uma perturbação (grupo de impulsos) origina um movimento ondulatório. • A produção periódica de impulsos conseguida com o vibrador e a ponta simples origina ondas progressivas, periódicas e circulares. • As ondas atingem diferentes fases de vibração, visto que há pontos de	

amplitude de vibração máxima, as *cristas*, e há pontos de amplitude de vibração mínima, os *vales*. A uma crista segue-se sempre um vale e ao conjunto de uma crista e de um vale corresponde uma vibração completa. • A separação de duas cristas consecutivas mantêm-se constante e chama-se comprimento de onda.	
Ponto12 Observa-se que: • O papelinho anda para cima e para baixo, um pouco para diante e para trás, mas mantêm-se no mesmo sítio. • Durante a propagação de uma onda , não há transporte de matéria. • O número de cristas de onda que, por unidade de tempo, passa por um ponto qualquer da água (meio) é a *frequência*, ou seja, o número de vibrações (oscilações) por segundo.	
Ponto13 Observa-se que: • Uma perturbação (grupo de impulsos) origina um movimento ondulatório. • A produção periódica de impulsos conseguida com o vibrador e a ponta linear origina ondas progressivas, periódicas e rectilíneas (ondas planas). • Na direcção de propagação, a distância entre duas cristas consecutivas é sempre a mesma e chama-se *comprimento de onda*. • Há propagação de energia sem transporte	

de matéria, tal como no ponto 12. • O número de cristas de onda que, por unidade de tempo, passa por um ponto qualquer da água (meio) é a *frequência*, ou seja, o número de vibrações (oscilações) por segundo.	
Ponto14 Observa-se que: • O número de cristas que, por unidade de tempo, passa num ponto da superfície da água, aumenta.. A frequência de onda aumenta. A frequência de onda não depende do meio elástico em que se propaga e é igual à frequência dos impulsos. • No mesmo meio elástico (água), quanto maior for a frequência, menor é o comprimento de onda.	
Ponto15 Observa-se que: • Quanto maior for a profundidade, maior é a velocidade e maior é o comprimento de onda. A frequência das ondas não varia com a profundidade. • A velocidade de onda depende das propriedades do meio em que as ondas se propagam.	

TÓPICOS DE DISCUSSÃO:

Com base nas observações realizadas e com a ajuda do manual escolar, indique:

- que tipo de ondas observou;

- se houve propagação de energia com ou sem transporte de matéria;
- se a distância entre duas cristas consecutivas é sempre a mesma;
- de que factores depende a velocidade de onda;

DISCUSSÃO E CONCLUSÃO:

Nesta actividade foi possível observar ondas circulares e ondas planas consoante utilizámos o conta gotas e uma ponta simples ou uma ponta linear.

Quando deixámos cair algumas gotas de água na tina formaram-se circunferências concêntricas que se afastaram do ponto onde as gotas caíram porque se produziu uma perturbação. Esta consiste na deformação num ponto da superfície da água, que se propagou originando um movimento ondulatório, que é o movimento de propagação de um impulso ou de um grupo de impulsos. Quando colocámos uma ponta simples no vibrador formaram-se, igualmente, ondas circulares. No caso do conta gotas a perturbação consistiu num único impulso e no caso do vibrador a perturbação consistiu num grupo de impulsos porque houve repetição.

Ao produzir-se uma perturbação, algumas partículas da superfície da água começam a vibrar e obrigam partículas próximas a vibrar também. Isto acontece devido à existência de forças que actuam nas partículas perturbadas e tendem a restaurar-lhes a posição de equilíbrio, isto é, à *elasticidade* do meio e, ainda, à *inércia* das partículas do meio que tendem a executar um movimento oscilatório quando regressam à posição de equilíbrio, transformando energia potencial em cinética e vice-versa.

Substituindo a ponta simples pela ponta linear observaram-se ondas planas.

Quando se colocou o papelinho na água da tina verificou-se que se manteve no mesmo sítio, pelo que concluímos que durante a propagação de uma onda , não há transporte de matéria.

Ao ligar a tina de ondas verificámos que a distância entre duas cristas consecutivas é sempre a mesma. A esta distância chama-se comprimento de onda.

A velocidade de onda depende das propriedades do meio em que as ondas se propagam. No caso das ondas à superfície da água, a velocidade depende da profundidade. Portanto, águas de profundidades diferentes funcionam como meios distintos quanto à propagação das ondas.

Escola Básica 2,3/S de Mação

Clube das Ciências **2001/2002**

Nível de escolaridade: **8º ano e seguintes**

Actividade experimental Nº 2 – Reflexão

OBJECTIVO:

- Observar a reflexão de ondas num meio limitado bidimensional.

INTRODUÇÃO / PRESSUPOSTOS TEÓRICOS:

Numa tina de ondas podem produzir-se ondas rectilíneas e ondas circulares. Colocando obstáculos, há mudança de sentido e, em geral, mudança da direcção de propagação no mesmo meio (superfície da água), isto é, as ondas de água reflectem-se.

EQUIPAMENTO E MATERIAL:

- Caixa da tina de ondas
- Vibrador
- Vara de suporte (haste)
- Suporte com lente de projecção
- Tina (recipiente transparente)
- Suporte com espelho
- Garrafa de esguicho com água destilada
- Ponta simples 
- Ponta linear 
- Reflector plano
- Reflector curvo
- Pano de flanela

PROCEDIMENTOS:

1. Introduza a vara de suporte (haste) no furo existente na parte superior da caixa da tina, pelo lado roscado, e enrosque-o firmemente, rodando no sentido dos ponteiros de um relógio.
2. Monte o vibrador, fazendo passar a haste pelo furo existente no corpo deste.
3. Pelo mesmo processo, monte na haste, a lente de projecção e o espelho.
4. Rode o corpo da lente de projecção, de modo que esta fique horizontal, paralela à face superior da caixa da tina.
5. Coloque o recipiente transparente, vazio, sobre a lente condensadora existente na parte superior da caixa.
6. Deite água na tina, com o auxílio do esguicho, até cerca de 7 mm de altura.
7. Seleccione a ponta simples que simula uma fonte simples. A ponta vibrante (geradora de ondas circulares) deve apenas tocar a superfície da água (para isso ajusta-se a altura do vibrador até obter esta condição).
8. Ligue os fios do vibrador aos alvéolos marcados "RIPPLER SUPPLY", existentes no painel frontal.
9. Coloque o reflector plano.
10. Ligue a tina de ondas, accionando o interruptor da alavanca para a posição "ON".
11. Registe os resultados observados.
12. Altere a posição do reflector plano de forma a fazer variar o ângulo da crista incidente com o reflector e registe os resultados agora observados.
13. Substitua o reflector plano pelo reflector curvo, funcionando este como um espelho côncavo e observe a forma que têm as superfícies de onda destas ondas.
14. Faça variar a frequência e anote o observado.
15. Utilize o reflector curvo como um espelho convexo e observe a forma que têm as superfícies de onda destas ondas.
16. Faça variar a frequência e anote o observado.
17. Troque a ponta simples pela ponta linear (geradora de ondas planas) e repita os passos indicados com os números de 8 a 16 e registe os resultados observados.

RESULTADOS OBSERVADOS:

Registo das observações obtidas	Esquemas
Ponto11 Observa-se que: • Houve uma reflexão. • O ângulo que a crista da onda faz com o reflector é igual ao ângulo que a crista da onda reflectida faz com o reflector.	
Ponto12 Observa-se que: • O ângulo da crista incidente com o reflector altera a direcção da reflexão.	
Ponto13 Observa-se que: • Aparece uma mancha circular que em determinada posição fica reduzida a um pequeníssimo círculo a que se chama *foco*.	
Ponto14 Observa-se que: • Variando a frequência, o foco do espelho não se move.	
Ponto15 Observa-se que: • Não se formou nenhuma imagem.	
Ponto16 Observa-se que: • Variando a frequência, o foco do espelho não se move.	
Ponto17 Observa-se que: • Houve uma reflexão.	

• O ângulo que a crista da onda faz com o reflector é igual ao ângulo que a crista da onda reflectida faz com o reflector. • O ângulo da crista incidente com o reflector altera a direcção da reflexão. • Variando a frequência, o foco do espelho não se move.	

TÓPICOS DE DISCUSSÃO:

Com base nas observações realizadas e com a ajuda do manual escolar.

- identifique as ondas incidentes e as ondas reflectidas;
- verifique que o ângulo que a crista da onda incidente faz com o reflector é igual ao ângulo que a crista da onda reflectida faz com o reflector;
- indique o que observou no foco do espelho quando fez variar a frequência ao usar um reflector curvo.

DISCUSSÃO E CONCLUSÃO:

No esquema relativo ao ponto 12 estão assinaladas as ondas incidentes e as ondas reflectivas.

Verificámos experimentalmente (pontos 9 a 12) que o ângulo que a crista da onda incidente faz com o reflector é igual ao ângulo que a crista da onda reflectida faz com o reflector. Os ângulos medem-se em relação à normal ao espelho no ponto de incidência.

No esquema relativo ao ponto 11 representámos por i o ângulo que o raio de onda (recta perpendicular à superfície de onda e que indica a direcção de propagação) da onda incidente faz com a normal ON ao plano de incidência. Este ângulo, a que se chama ângulo de incidência, é igual ao ângulo i', por serem ângulos de lados perpendiculares e da mesma espécie (ambos agudos).

Seja r o ângulo que o raio de onda da onda reflectida faz com a normal ON ao plano de incidência. Este ângulo, a que se chama ângulo de reflexão, é igual a r'. Podemos concluir que são iguais os ângulos i e r e enunciar a Lei da Reflexão das ondas mecânicas: *o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão.*

Quando se usou um reflector curvo e se fez variar a frequência do vibrador, o foco do espelho não se moveu, pois ele é fixo.

Escola Básica 2,3/S de Mação

Clube das Ciências **2001/2002**

Nível de escolaridade: **8º ano e seguintes**

Actividade experimental Nº 3 – Refracção

OBJECTIVO:

- Observar a refracção de uma onda mecânica num meio limitado bidimensional.

INTRODUÇÃO / PRESSUPOSTOS TEÓRICOS:

No caso das ondas à superfície da água, a velocidade depende da profundidade. Quanto maior for esta, maior é a velocidade. Águas de profundidades diferentes funcionam como meios diferentes quanto à propagação das ondas à superfície da água. Se, numa região da tina de ondas, alterarmos a profundidade da água, podemos observar o comportamento das ondas quando passam de um meio para o outro.

EQUIPAMENTO E MATERIAL:

- Caixa da tina de ondas
- Vibrador
- Vara de suporte (haste)
- Suporte com lente de projecção
- Tina (recipiente transparente)
- Suporte com espelho
- Garrafa de esguicho com água destilada
- Ponta simples 
- Ponta linear 
- Placa de vidro colorida
- Pano de flanela

PROCEDIMENTOS:

1. Introduza a vara de suporte (haste) no furo existente na parte superior da caixa da tina, pelo lado roscado, e enrosque-o firmemente, rodando no sentido dos ponteiros de um relógio.
2. Monte o vibrador, fazendo passar a haste pelo furo existente no corpo deste.
3. Pelo mesmo processo, monte na haste, a lente de projecção e o espelho.
4. Rode o corpo da lente de projecção, de modo que esta fique horizontal, paralela à face superior da caixa da tina.
5. Coloque o recipiente transparente, vazio, sobre a lente condensadora existente na parte superior da caixa.
6. Coloque no fundo da tina a placa de vidro colorida (deve regular convenientemente a altura da água sobre a placa de vidro).
7. Deite água na tina, com o auxílio do esguicho, até cerca de 7 mm de altura.
8. Seleccione a ponta simples que simula uma fonte simples. A ponta vibrante deve apenas tocar a superfície da água (para isso ajusta-se a altura do vibrador até obter esta condição).
9. Ligue os fios do vibrador aos alvéolos marcados "RIPPLER SUPPLY", existentes no painel frontal.
10. Ligue a tina de ondas, accionando o interruptor da alavanca para a posição "ON".
11. Registe os resultados observados.
12. Faça variar a frequência e anote o observado.
13. Troque a ponta simples pela ponta linear e repita os passos indicados com os números de 9 a 12 e registe os resultados observados.

RESULTADOS OBSERVADOS:

Registo das observações obtidas	Esquemas
Ponto11 Observa-se que: • O gerador de ondas produz ondas circulares. • As superfícies de onda inflectem, isto é, "dobram" ao passar da zona de água mais alta para a zona de água mais baixa. • Quanto maior for a profundidade, menor é o amortecimento e, quanto menor for a profundidade, maior é a refrangência e melhor se observa a variação do comprimento de onda.	
Ponto12 • Não foi possível observar diferenças dignas de registo.	
Ponto13 Observa-se que: • O gerador de ondas produz ondas planas. • As superfícies de onda planas inflectem ao passar da zona de água mais alta para a zona de água mais baixa.	

TÓPICOS DE DISCUSSÃO:

Com base nas observações realizadas e com a ajuda do manual escolar.

- identifique as ondas incidentes e as ondas refractadas;
- compare o ângulo que a crista da onda incidente faz com a superfície de separação dos meios, com o ângulo que a crista da onda refractada faz com a referida superfície.

DISCUSSÃO E CONCLUSÃO:

As diferentes alturas de água na tina (cerca de 7 mm) e por cima da placa de vidro (à volta de 3mm) conferem à água propriedades diferentes e, por isso, velocidades de onda diferentes. É por esta razão que as ondas inflectem. As ondas refractam-se na superfície de separação de dois meios em que caminham com velocidades diferentes.

Pudemos concluir que quanto maior for a profundidade, menor é o amortecimento e, quanto menor for a profundidade, maior é a refrangência e melhor se observa a variação do comprimento de onda.

No esquema relativo ao ponto 13 estão assinaladas as ondas incidentes e as ondas refractadas, assim como os ângulos de incidência e de refracção. Ao compararmos estes dois ângulos pode concluir-se que o ângulo de incidência é maior do que o ângulo de refracção.

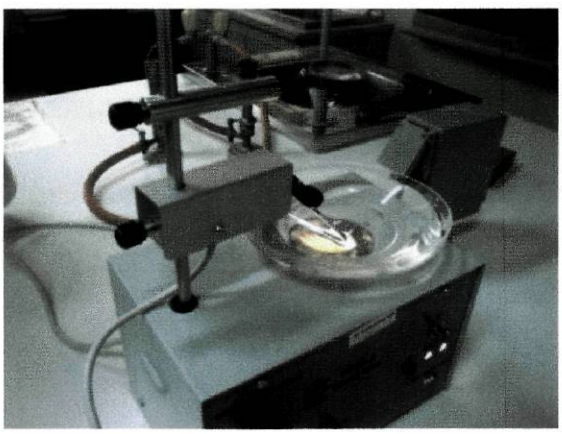




Figura 1 – Observação da refracção utilizando a ponta linear.



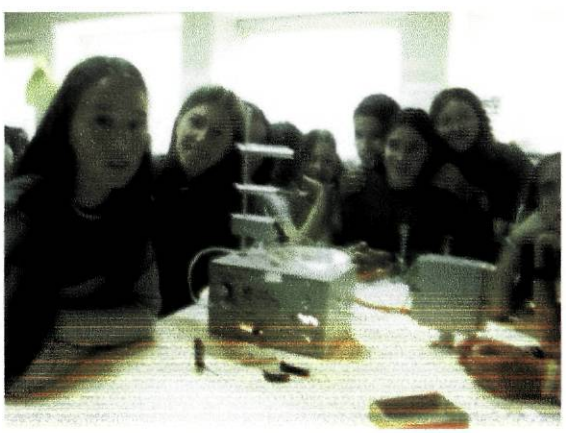


Figura 2 - Observação da refracção utilizando o anteparo com duas fendas.

Escola Básica 2,3/S de Mação

Clube das Ciências **2001/2002**

Nível de escolaridade: **11º e 12º anos**

Actividade experimental Nº 4 - Interferência

OBJECTIVOS:

- Produzir interferência de duas ondas sinusoidais de igual amplitude, provenientes de duas fontes coerentes.
- Observar as respectivas figuras de interferência.

INTRODUÇÃO / PRESSUPOSTOS TEÓRICOS:

Fontes com a mesma frequência e diferença de fase constante ao longo do tempo chamam-se fontes coerentes. Instalando, no vibrador, uma ponta dupla (permite obter duas fontes síncronas), estes constituem fontes coerentes com uma diferença de fase igual a zero e vão produzir ondas circulares que se sobrepõem, dando lugar a interferência. O Princípio da Sobreposição de Ondas permite prever o resultado.

Nos pontos da superfície da água atingidos por ondas em concordância de fase, a interferência é *construtiva*. Nos pontos atingidos por ondas em oposição de fase, a interferência é *destrutiva*.

As ondas provenientes das duas fontes têm a mesma amplitude e, por isso, ocorrem as seguintes situações:

a) as zonas mais claras correspondem aos pontos onde se encontram duas cristas provenientes das duas fontes, pois a amplitude é dupla da de qualquer uma das ondas. Da sobreposição de dois vales resultam zonas muito escuras, pela mesma razão. Quaisquer destes pontos designam-se por *ventres*. Um ponto que esteja equidistante das duas fontes ou que esteja a distâncias das fontes tais que difiram uma da outra de um número inteiro de comprimentos de onda, $n\lambda$, é um ventre. Os ventres constituem as chamadas *linhas ventrais*;

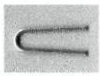
b) quando uma crista se encontra com um vale, a superfície da água não é perturbada (elongação nula), obtendo-se zonas cinzentas. Os pontos nestas

condições chamam-se *nodos*. Um ponto que esteja a distâncias das fontes tais que difiram uma da outra de $\frac{\lambda}{2}, \frac{3\lambda}{2}, \frac{5\lambda}{2}, \ldots$, quer dizer, de um número ímpar de meios comprimentos de onda, $(2n+1)\frac{\lambda}{2}$, é um nodo. Os nodos constituem as chamadas *linhas nodais*;

c) entre nodos e ventres, há pontos que vibram com amplitudes intermédias.

A propagação da energia faz-se ao longo das linhas ventrais.

EQUIPAMENTO E MATERIAL:

- Caixa da tina de ondas
- Vibrador
- Vara de suporte (haste)
- Suporte com lente de projecção
- Tina (recipiente transparente)
- Suporte com espelho
- Garrafa de esguicho com água destilada
- Ponta dupla 
- Pano de flanela

PROCEDIMENTOS:

1. Introduza a vara de suporte (haste) no furo existente na parte superior da caixa da tina, pelo lado roscado, e enrosque-o firmemente, rodando no sentido dos ponteiros de um relógio.
2. Monte o vibrador, fazendo passar a haste pelo furo existente no corpo deste.
3. Pelo mesmo processo, monte na haste, a lente de projecção e o espelho.
4. Rode o corpo da lente de projecção, de modo que esta fique horizontal, paralela à face superior da caixa da tina.

5. Coloque o recipiente transparente, vazio, sobre a lente condensadora existente na parte superior da caixa.
6. Deite água na tina, com o auxílio do esguicho, até cerca de 8 mm de altura.
7. Seleccione a ponta dupla que permite obter duas fontes síncronas. As pontas vibrantes devem estar imersas até à mesma profundidade superfície da água (para isso ajusta-se a altura do vibrador até obter esta condição).
8. Ligue os fios do vibrador aos alvéolos marcados "RIPPLER SUPPLY", existentes no painel frontal.
9. Ligue a tina de ondas, accionando o interruptor da alavanca para a posição "ON".
10. Registe os resultados observados.
11. Faça variar o comprimento das ondas produzidas e anote o observado.

RESULTADOS OBSERVADOS:

Registo das observações obtidas	Esquemas
Ponto10 Observa-se que: • Se formam ondas circulares que se sobrepõem. • Com uma ponta dupla a vibrar na superfície da água há interferência das ondas circulares formadas. • Na superfície da água existem algumas linhas fixas, muito nítidas, situadas na região vizinha da mediatriz do segmento que une as origens síncronas.	
Ponto11 Observa-se que: • O número de linhas nodais diminui à medida que o comprimento de onda aumenta.	

TÓPICOS DE DISCUSSÃO:

Com base nas observações realizadas e com a ajuda do manual escolar:

- identifique as linhas nodais e também as ondas móveis, de cristas e vales reforçados, a deslocarem-se entre as linhas nodais;
- indique de que modo o número de linhas nodais varia com o comprimento de onda.

DISCUSSÃO E CONCLUSÃO:

A ponta dupla instalada no vibrador constitui duas origens de movimentos vibratórios sinusoidais em fase, da mesma frequência (origens síncronas) tendo a mesma direcção e a mesma amplitude. Provocam na superfície da água contida na tina, a propagação de dois trens de ondas progressivas que interferem.

Conclui-se que o número de linhas nodais diminui à medida que o comprimento de onda aumenta.

Escola Básica 2,3/S de Mação

Clube das Ciências **2001/2002**

Nível de escolaridade: **11º e 12º anos**

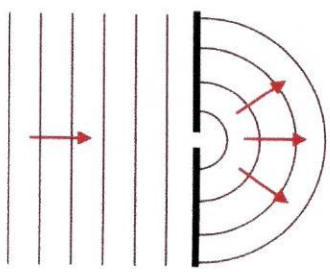
Actividade experimental Nº 5 - Difracção

OBJECTIVOS:

- Observar o fenómeno da difracção com ondas de água.
- Determinar as condições em que o fenómeno ocorre.

INTRODUÇÃO / PRESSUPOSTOS TEÓRICOS:

Fazendo incidir ondas rectilíneas em anteparos com fendas ou em pequenos obstáculos, observam-se desvios na propagação rectilínea, que caracterizam o fenómeno da difracção. Este fenómeno origina-se quando as ondas chegam a um orifício de dimensões semelhantes ao comprimento de onda da onda.



EQUIPAMENTO E MATERIAL:

- Caixa da tina de ondas
- Vibrador
- Vara de suporte (haste)
- Suporte com lente de projecção
- Tina (recipiente transparente)

- Suporte com espelho
- Garrafa de esguicho com água destilada
- Ponta linear 
- Anteparos de diversos comprimentos
- Anteparo com três fendas
- Pano de flanela

PROCEDIMENTOS:

1. Introduza a vara de suporte (haste) no furo existente na parte superior da caixa da tina, pelo lado roscado, e enrosque-o firmemente, rodando no sentido dos ponteiros de um relógio.
2. Monte o vibrador, fazendo passar a haste pelo furo existente no corpo deste.
3. Pelo mesmo processo, monte na haste, a lente de projecção e o espelho.
4. Rode o corpo da lente de projecção, de modo que esta fique horizontal, paralela à face superior da caixa da tina.
5. Coloque o recipiente transparente, vazio, sobre a lente condensadora existente na parte superior da caixa.
6. Deite água na tina, com o auxílio do esguicho, até cerca de 8 mm de altura.
7. Seleccione a ponta linear que permite obter ondas planas. A ponta vibrante deve apenas tocar na superfície da água (para isso ajusta-se a altura do vibrador até obter esta condição).
8. Ligue os fios do vibrador aos alvéolos marcados "RIPPLER SUPPLY", existentes no painel frontal.
9. Ligue a tina de ondas, accionando o interruptor da alavanca para a posição "ON".
10. Coloque, na tina, dois anteparos de forma a constituir uma fenda.
11. Registe os resultados observados.
12. Proceda de forma a obter uma abertura mais larga.
13. Registe os resultados observados.
14. Substitua os anteparos por outro com três fendas e registe o resultado observado.

RESULTADOS OBSERVADOS:

Registo das observações obtidas	Esquemas
Ponto11 Observa-se que: • Quando uma superfície de onda atinge um obstáculo com um orifício suficientemente pequeno dá-se a difracção das ondas. O orifício funciona como um novo gerador de ondas. • A difracção de ondas através de um orifício só é apreciável com orifícios suficientemente pequenos.	
Ponto13 Observa-se que: • Mantendo o comprimento de onda anterior, a difracção é menos acentuada. • Se a largura da fenda for muito grande em relação ao comprimento de onda, verificamos que só a partir dos bordos as ondas se encurvam, dando a impressão de que se originam aí ondas circulares.	
Ponto14 Observa-se que: • Há interferência das ondas difractadas.	

TÓPICOS DE DISCUSSÃO:

Com base nas observações realizadas e com a ajuda de alguns manuais escolares:

- relacione o comprimento de onda com a largura da fenda;
- indique em que situação a difracção é menos acentuada.

DISCUSSÃO E CONCLUSÃO:

Chegámos à conclusão que as ondas se propagam em linha recta mas quando passam por uma fenda, "espalham-se". Cada onda produz uma nova onda com a mesma frequência e o mesmo comprimento de onda, sendo este fenómeno conhecido como difracção.

A difracção de ondas através de uma fenda só é apreciável com fendas de tamanho próximo do comprimento de onda.

Parte da onda que atravessa a fenda passa a propagar-se noutras direcções, isto é, nem toda ela se propaga na direcção original.

A difracção é menos acentuada para fendas mais largas.

Se em vez de uma fenda as ondas forem obrigadas a passar por três fendas contíguas, sofrem difracção em cada uma destas fendas. As ondas resultantes cruzam-se, interferindo umas com as outras. Verificámos que há pontos onde as três ondas se somam e pontos onde as três ondas se anulam, produzindo um padrão regular chamado figura de interferência.

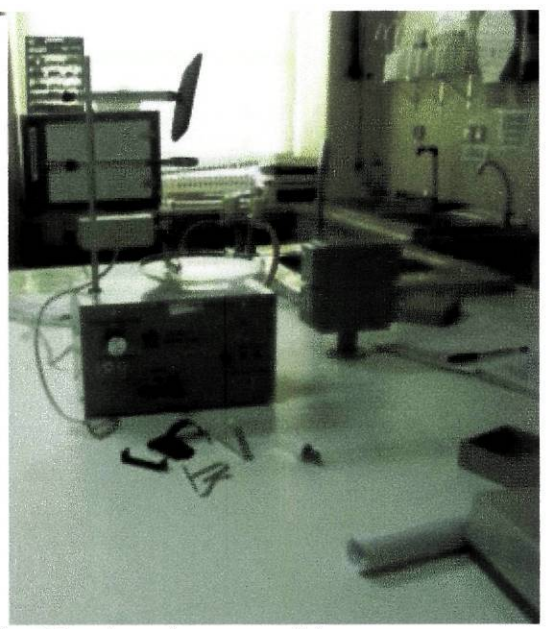


Figura 1 – Tina de ondas e acessórios.

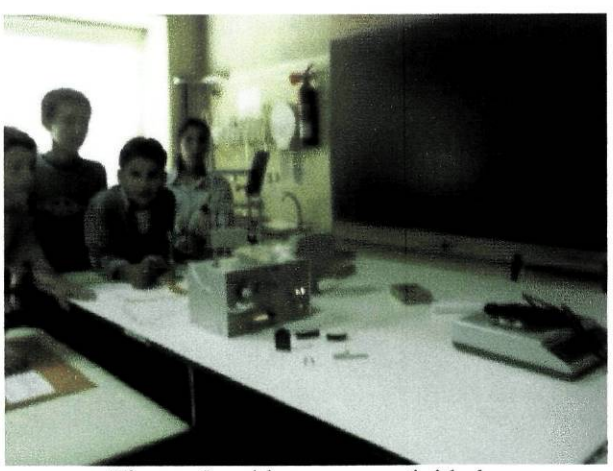


Figura 2 – Alunos em actividade.

ANEXO B

Escola Básica 2,3 João Roiz de Castelo Branco

Ano lectivo 2002/2003

Nível de escolaridade: 8º ano

Actividade experimental Nº 1 – Difracção de uma fonte circular e de duas fendas

OBJECTIVOS:

- Observar o fenómeno da difracção produzido por um feixe laser ao incidir numa fenda circular.
- Observar o fenómeno da difracção produzido por um feixe laser ao incidir em duas fendas e a interferência causada pelas duas fendas.

INTRODUÇÃO / PRESSUPOSTOS TEÓRICOS:

Difracção é o nome que geralmente é dado aos fenómenos associados aos desvios da propagação da luz quando encontram um objecto no seu trajecto.

O efeito de difracção é observado em todos os tipos de ondas. Estes efeitos são mais apreciáveis quando os obstáculos ou aberturas são de dimensões comparáveis ao comprimento de onda. Para isso iremos usar um aparelho capaz de produzir feixes laser que têm um comprimento de onda bem definido (λ =635 *nm*).

A palavra **laser** (**l**ight **a**mplification by **s**timulated **e**misson of **r**adition) significa ampliação da luz por emissão estimulada de radiação.

O feixe laser, vulgarmente designado por raio laser, corresponde a um feixe de radiação monocromática, muito estreito e intenso, concentrando elevada quantidade de energia.

O fenómeno da difracção está associado ao da interferência quando a luz atravessa dois orifícios muito próximos.

A difracção da luz laser num orifício produz um diagrama com uma zona central brilhante rodeada por vários anéis. A interferência é o resultado da sobreposição de ondas de duas frentes de onda. Este fenómeno verifica-se quando observamos o Sol através de um tecido de cambraia ou de voile.

EQUIPAMENTO E MATERIAL:

- Um laser com um comprimento de onda igual a 635 *nm*.
- Um caixilho de slide contendo um cartão com um orifício circular muito pequeno.
- Um caixilho de slide contendo um cartão com dois orifícios circulares muito pequenos e muito próximos.
- Folha de papel branco A_3.
- Fita métrica.
- Tábuas e suportes de madeira.
- Suporte do alvo.

PROCEDIMENTOS:

1. Com a alimentação do transformador de corrente desligada, ligue as bananas positiva e negativa e o fio de terra (fio verde) nos orifícios com a cor correspondente a cada uma das bananas.
2. Ligue a alimentação, accionando o interruptor da esquerda para a posição "ON".
3. Com a corrente muito baixa (0,10 Amperes) regule a voltagem para 5 Volts.
4. Aumente a intensidade da corrente para cerca de 0,29 Amperes.
5. Coloque o alvo a 3,40 metros do cartão.
6. Coloque o cartão com um orifício num caixilho de slide a 20 cm do laser.
7. Retire a tampa do compartimento da lente.
8. Ligue o laser (interruptor da direita).
9. Mova o caixilho do slide, onde se encontra o cartão, lateralmente até que o feixe de laser bata inteiramente no orifício.
10. Esboce o teste padrão gerado pela luz laser que vê projectado no alvo.
11. Registe os resultados observados.

12. Repita a experiência substituindo o cartão de um orifício pelo cartão de dois orifícios.

13. Esboce o teste padrão gerado pela luz laser que vê projectado no alvo.
14. Registe os resultados observados.

NOTA: Estas observações devem ser feitas numa sala escura.



CUIDADO! Nunca olhar directamente para o feixe de laser, nem para uma superfície polida que o possa reflectir. Retirar ou tapar superfícies polidas que possam reflectir o feixe laser.

RESULTADOS OBSERVADOS:

Quando se utilizou o cartão com um orifício observou-se, no alvo, uma zona central larga e brilhante rodeada por anéis menos brilhantes. Esta imagem corresponde ao teste padrão de difracção criado por um orifício circular. Por dificuldade em obter uma fotografia da imagem obtida, nestes resultados, utilizou-se a figura 1 (semelhante à obtida) que foi retirada da Internet e que corresponde ao esboço do teste padrão projectado no alvo.

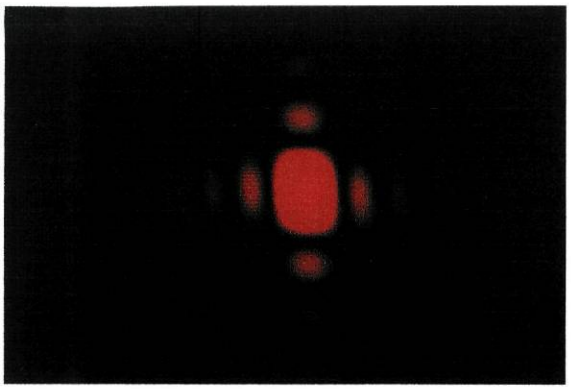


Figura 1 – Teste padrão de difracção criado por um orifício circular.

Quando se utilizou o cartão com dois orifícios observaram-se, no alvo, duas zonas mais brilhantes rodeadas por anéis que interferiam entre si. A imagem obtida corresponde à interferência criada pelos dois orifícios circulares em que houve sobreposição de ondas.

TÓPICOS DE DISCUSSÃO:

Compare os resultados obtidos quando usou o cartão com um orifício e quando usou o cartão com dois orifícios.

DISCUSSÃO E CONCLUSÃO:

Nesta actividade foi possível observar a difracção através de uma fenda circular e a interferência através de duas fendas circulares.

Pudemos concluir que quando um feixe luminoso (laser) passa numa única abertura, gera difracção formando-se um ponto brilhante no centro do alvo e vários anéis cuja intensidade diminui ao afastarem-se do centro. Ao passar por dois orifícios a luz difracta-se, propagando-se em todas as direcções. No alvo surgiram zonas de máxima intensidade luminosa e zonas de mínima intensidade luminosa, que se devem à interferência das ondas luminosas que o atingem.

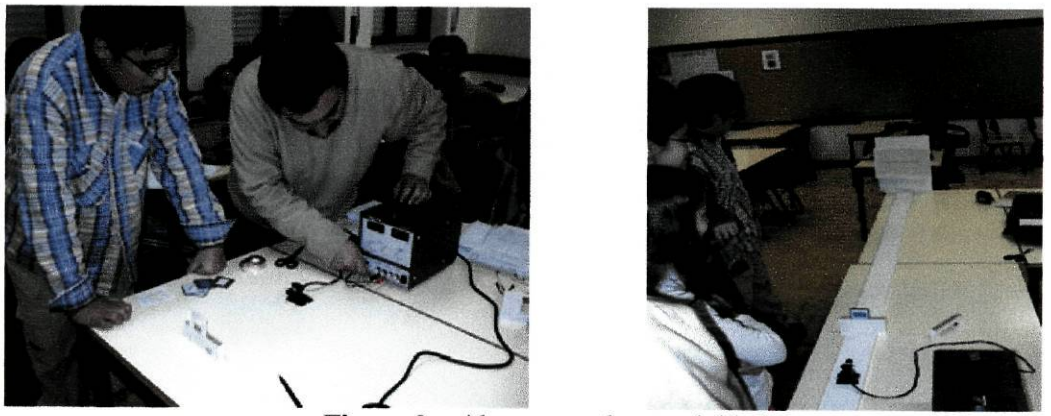


Figura 2 – Alunos em plena actividade.



Figura 3 – Observação da difracção.

178

Escola Básica 2,3 João Roiz de Castelo Branco

Ano lectivo 2002/2003

Nível de escolaridade: 8º ano Disciplina: Matemática

Actividade experimental Nº 2 – Medir o diâmetro de um cabelo

OBJECTIVOS:

- Observar o padrão de difracção produzido por um feixe laser ao incidir num cabelo humano.
- Medir o diâmetro de um cabelo humano recorrendo à difracção do feixe luminoso do laser.
- Resolver equações literais.
- Discutir o processo usado na resolução de um problema.

INTRODUÇÃO / PRESSUPOSTOS TEÓRICOS:

Iremos usar um aparelho capaz de produzir feixes laser que têm um comprimento de onda bem definido (λ=635 *nm*), o que nos permite medir diâmetros muito pequenos, como é o caso do diâmetro do cabelo, pela técnica da difracção. Existe um princípio muito útil para medir objectos muito pequenos, conhecido por Princípio de Babinet, que nos indica que o teste padrão de difracção para uma abertura é o mesmo que o teste padrão para um objecto opaco (cabelo) iluminado da mesma forma.

A palavra **laser** (**l**ight **a**mplification by **s**timulated **e**misson of **r**adition) significa ampliação da luz por emissão estimulada de radiação.

O feixe laser, vulgarmente designado por raio laser, corresponde a um feixe de radiação monocromática, muito estreito e intenso, concentrando elevada quantidade de energia.

A luz laser difractada pelo feixe laser num cabelo humano origina um conjunto de máximas e mínimos que podem ser observados no alvo ou na parede. A condição para um mínimo de difracção é dada por $\sin\theta = 1{,}22\frac{\lambda}{D}$, atendendo a que se trata de um

ângulo muito pequeno podemos usar a fórmula $\theta = 1{,}22\frac{\lambda}{D}$, onde λ é o comprimento de onda do laser e D é o diâmetro do cabelo.

A equação $\theta = 1{,}22\frac{\lambda}{D}$ é uma equação literal. Dá-se o nome de equação literal a uma equação onde aparece uma ou mais letras para além da incógnita. Para resolvermos uma equação literal, decide-se qual é a incógnita e considera-se as outras letras como se fossem números (parâmetros).

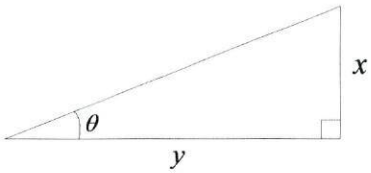


Figura 1 – Representação do ângulo θ.

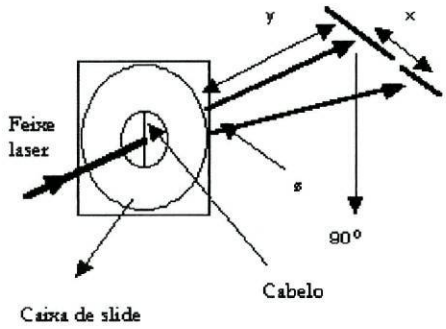
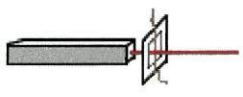


Figura 2 – Esquema do raio laser ao incidir no cabelo.

Podemos usar $\theta = \frac{x}{y}$, porque $tg\theta \approx \theta$. A porção de espaço entre a linha que aponta ao mínimo de difracção e a linha que aponta à região central é dada pelo ângulo θ sendo x a distância do centro do máximo central (região clara mais brilhante) ao primeiro mínimo (primeira região escura) para um ou outro lado do máximo central e y a distância do cabelo ao alvo.

EQUIPAMENTO E MATERIAL:

- Um laser com um comprimento de onda igual a 635 *nm*.
- Um caixilho de slide contendo um cabelo esticado na vertical.



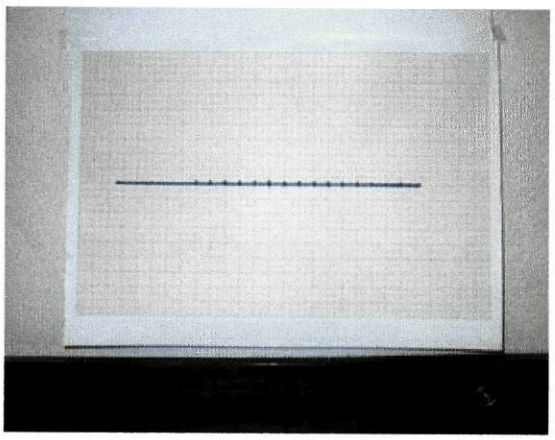
- Folha de papel milimétrico
- Fita métrica.
- Tábuas e suportes de madeira.
- Suporte do alvo.

PROCEDIMENTOS:

1. Com a alimentação desligada, do transformador de corrente, ligue as bananas positiva e negativa e o fio de terra (fio verde) nos orifícios com a cor correspondente a cada uma das bananas.
2. Ligue a alimentação, accionando o interruptor da esquerda para a posição "ON".
3. Com a corrente muito baixa (0,10 Amperes) regule a voltagem para 5 Volts.
4. Aumente a intensidade da corrente para cerca de 0,29 Amperes.



5. Coloque o alvo a 1,97 metros do cabelo.



6. Coloque um cabelo humano esticado num caixilho de slide a 20 cm do laser.
7. Retire a tampa do compartimento da lente.
8. Ligue o laser (interruptor da direita).
9. Mova o caixilho do slide, onde se encontra o cabelo, lateralmente até que o feixe de laser bata inteiramente no cabelo
10. Esboce o teste padrão gerado pela luz laser que vê projectado no alvo.

11. Registe os resultados observados, medindo no alvo o primeiro mínimo para um lado ou para o outro do ponto central muito brilhante.
12. Repita a experiência usando cabelos de vários colegas.



CUIDADO! Nunca olhar directamente para o feixe de laser, nem para uma superfície polida que o possa reflectir. Retirar ou tapar superfícies polidas que possam reflectir o feixe laser.

NOTA: Estas medições devem ser feitas numa sala escura.

RESULTADOS OBSERVADOS:

No alvo observou-se uma linha horizontal com pontos claros e escuros diminuindo a sua intensidade do centro para a periferia. Esta linha horizontal corresponde ao teste padrão de difracção criado por um cabelo humano. Por dificuldade em obter uma fotografia da imagem formada, nestes resultados, utilizou-se a figura 3 (semelhante à obtida) que foi retirada da Internet e que corresponde ao esboço do teste padrão projectado no alvo.

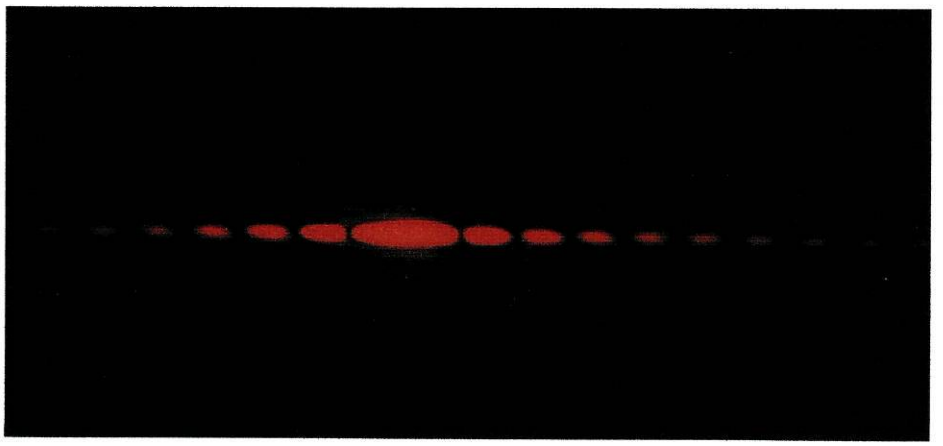


Figura 3 – Teste padrão de difracção criado por um cabelo humano.

De $\theta = \frac{x}{y}$ vem $\theta = \frac{1}{197} \Leftrightarrow \theta = 5{,}076142 \times 10^{-3}$ cm

De $\theta = 1{,}22\frac{\lambda}{D}$ vem $5{,}076142 \times 10^{-3} = 1{,}22\frac{0{,}0000635}{D}$

$D = 0{,}0152615$ cm ($\approx 0{,}15$ mm)

Para o cabelo de:

Nome	x (cm)	θ (cm)	D (mm)
Inês Fernandinho	1	$5{,}076142 \times 10^{-3}$	$\approx 0{,}15$
Sara	1,1	$5{,}583756 \times 10^{-3}$	$\approx 0{,}13$
Guilherme	0,9	$4{,}568527 \times 10^{-3}$	$\approx 0{,}16$
Cátia Afonso	1,3	$6{,}598984 \times 10^{-3}$	$\approx 0{,}11$
Filipe Dinis	1,2	$6{,}091370 \times 10^{-3}$	$\approx 0{,}12$

TÓPICOS DE DISCUSSÃO:

Compare os resultados obtidos quando usou os cinco cabelos diferentes.

DISCUSSÃO E CONCLUSÃO:

Nesta actividade foi possível observar que o ponto central é muito brilhante devido ao feixe de laser ser mais largo do que o cabelo e assim a luz contorna-o e bate no alvo directamente.

O padrão de difracção produzido por um feixe laser, quando utilizámos o cabelo em vez do cartão com uma fenda, é muito semelhante ao obtido nesta situação.

Pudemos concluir que o diâmetro do cabelo humano é muito reduzido, na ordem de 0,1 mm (100 micrómetros).

Concluiu-se, ainda, que quanto maior for a distância entre os mínimos ($2x$) menor será o diâmetro do cabelo.

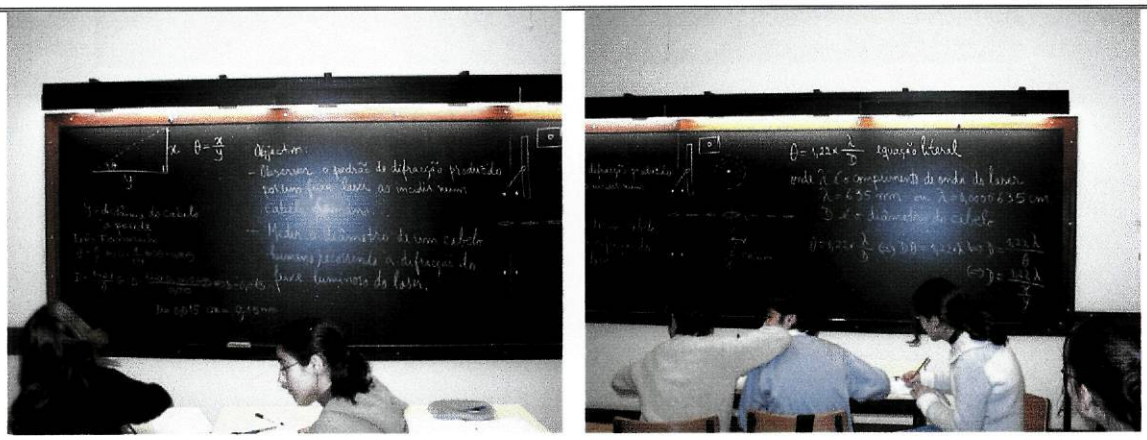


Figura 4 – Explicação teórica e cálculos do diâmetro do cabelo.



Figura 5 – Raio laser a incidir num cabelo e medição do primeiro mínimo no alvo.

Escola Básica 2,3 João Roiz de Castelo Branco

Ano lectivo 2002/2003

Nível de escolaridade: 8º ano

Actividade experimental Nº 3 – Simulação da turbulência atmosférica

OBJECTIVOS:

- Observar o efeito simulado da turbulência atmosférica na propagação de um feixe laser quando este incide numa fenda circular.

INTRODUÇÃO / PRESSUPOSTOS TEÓRICOS:

As imagens das estrelas e observações na superfície da Terra são muito diferentes das esperadas pelas previsões da óptica geométrica e ondulatória. Isto é devido à existência de uma atmosfera que deve ser atravessada pela luz dos astros antes desta luz chegar à objectiva do telescópio. O que ocorre essencialmente é que a atmosfera apresenta variações locais de temperatura, que estão associadas ao seu movimento (turbulência atmosférica), apresentando pois densidades diferentes e variáveis. Ao atravessar camadas de ar de diferentes densidades, a luz é refractada de forma diferente e a direcção dos raios varia. Além disso, a direcção da superfície entre camadas de densidades diferentes varia, o que é outro factor importante para o desvio diferenciado dos raios de luz. Como resultado deste efeito, os fotões provenientes de uma qualquer fonte são refractados.

Para simular a fonte de turbulência vamos usar uma caixa de CD com cola tendo esta várias espessuras.

EQUIPAMENTO E MATERIAL:

- Um laser com um comprimento de onda igual a 635 *nm*.
- Um caixilho de slide contendo um cartão com um orifício circular muito pequeno.
- Uma caixa de CD cheia de cola com várias espessuras.
- Folha de papel branco A_3.
- Fita métrica.
- Tábuas e suportes de madeira.
- Suporte do alvo.

PROCEDIMENTOS:

1. Com a alimentação desligada, do transformador de corrente, ligue as bananas positiva e negativa e o fio de terra (fio verde) nos orifícios com a cor correspondente a cada uma das bananas.
2. Ligue a alimentação, accionando o interruptor da esquerda para a posição "ON".
3. Com a corrente muito baixa (0,10 Amperes) regule a voltagem para 5 Volts.
4. Aumente a intensidade da corrente para cerca de 0,29 Amperes.
5. Coloque o alvo a 3,50 metros do cartão.
6. Coloque o cartão com um orifício num caixilho de slide a 20 cm do laser.
7. Retire a tampa do compartimento da lente.
8. Ligue o laser (interruptor da direita).
9. Mova o caixilho do slide, onde se encontra o cartão, lateralmente até que o feixe de laser bata inteiramente no orifício.
10. Coloque a caixa de CD entre o feixe laser e o cartão e agite a caixa.
11. Registe os resultados observados.

NOTA: Estas observações devem ser feitas numa sala escura.



CUIDADO! Nunca olhar directamente para o feixe de laser, nem para uma superfície polida que o possa reflectir. Retirar ou tapar superfícies polidas que possam reflectir o feixe laser.

RESULTADOS OBSERVADOS:

Quando se utilizou o cartão com um orifício observou-se, no alvo, uma zona central larga e brilhante rodeada por anéis menos brilhantes. Ao colocarmos a caixa de CD entre o feixe laser e o cartão, deixámos de observar a imagem anterior com nitidez e começámos a vê-la a tremeluzir e ligeiramente aumentada.

TÓPICOS DE DISCUSSÃO:

Compare os resultados obtidos quando usou apenas o cartão com um orifício e quando usou entre este e o feixe laser a caixa de CD.

DISCUSSÃO E CONCLUSÃO:

Nesta actividade foi possível observar, inicialmente, a difracção através de uma fenda circular e posteriormente o efeito simulado da turbulência atmosférica na imagem.

Concluímos que o fenómeno da difracção foi afectado pela turbulência atmosférica, simulada pela caixa do CD.

O efeito da atmosfera originou um ligeiro aumento da imagem.

ANEXO C

O EFEITO DA ATMOSFERA NAS OBSERVAÇÕES ASTRONÓMICAS

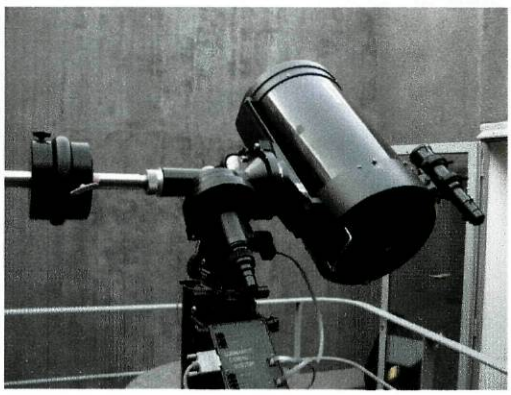
Centro de Astrofísica
da Universidade do Porto

OBJECTIVOS:

- Medir o seeing;
- Observar a refracção atmosférica diferencial;
- Observar speckles.

MATERIAL E EQUIPAMENTO:

- Telescópio Celestron CG-11, do tipo Schmidt- Cassegrin com abertura de 11", isto é, 279 mm e razão focal efectiva f/10, com montagem equatorial alemã automatizada nos dois eixos



- Câmara CCD ST-7, câmara CCD refrigerada
- Lente Barlow (2")
- Pequena câmara de vídeo (Webcam)
- Máquina fotográfica digital

DESCRIÇÃO:

DATA: 31 de Janeiro de 2003

HORA: Início – 17H00

Terminus – 24H00

LOCAL: Observatório do Centro de Astrofísica da Universidade do Porto

INTERVENIENTES: Doutor Paulo Garcia, Mestrandos António Paralta e Jorge Carlos Sousa

Esta observação foi supervisionada pelo Doutor Paulo Garcia tendo colaborado comigo o colega de Mestrado, Jorge Carlos Sousa, por ter mais experiência e estar mais familiarizado com este telescópio. Depois de montado e calibrado o referido telescópio começámos por observar as estrelas Pleiades apresentadas na figura 1.

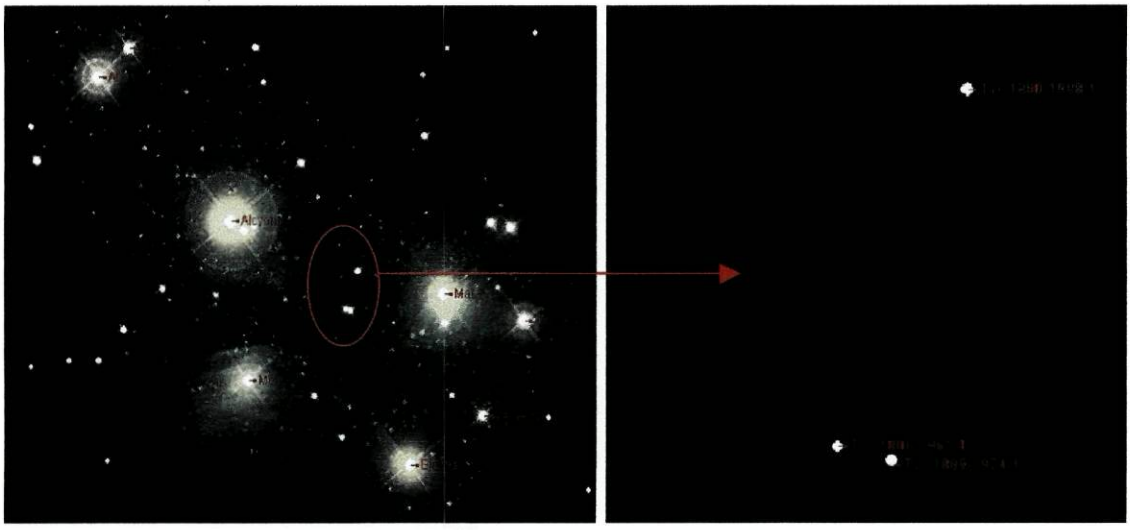


Figura 1 – A imagem da esquerda foi obtida com o programa starry night e mostra as estrelas Pleiades. A imagem da direita foi obtida pelo telescópio Celestron CG-11 usando um CCD.

1. Medição da escala do telescópio.

1.1. Medição da distância entre as estrelas.

Com o programa starry night foi possível obter as coordenadas assinaladas na figura 2.

Com as coordenadas equatoriais celestes (δ,α), onde α representa a ascensão recta e δ a declinação, iremos calcular a separação das duas estrelas.

Estrela A – TYC 1800-1961-1 $\alpha_A = 3h\ 46.267m$ $\delta_A = 24°11.391'$ m=8.31

Estrela B – TYC 1800-1974-1 $\alpha_B = 3h\ 46.229m$ $\delta_B = 24°11.797'$ m=8.43

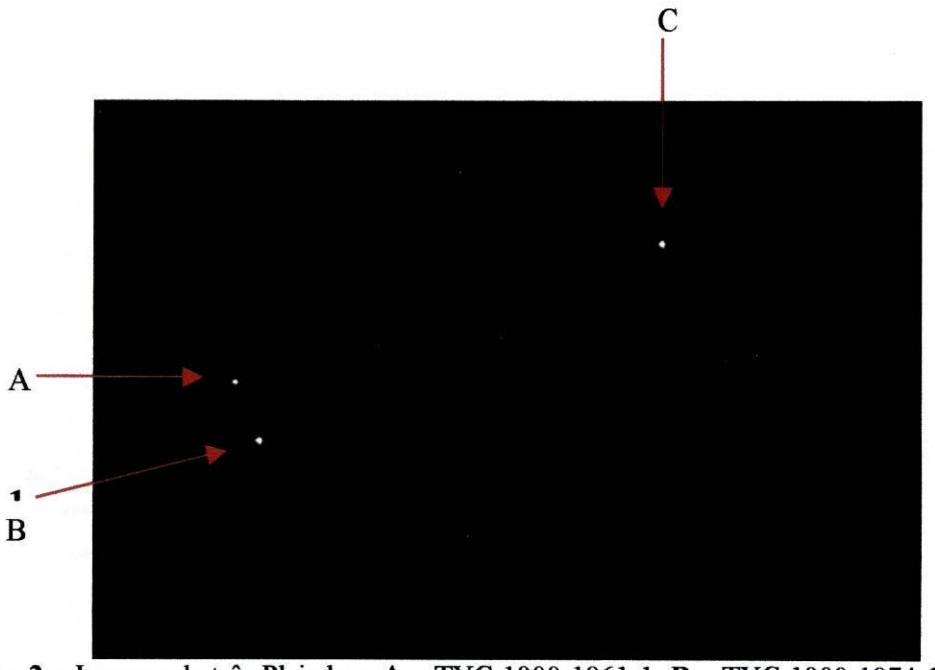


Figura 2 – Imagem de três Pleiades: **A** – TYC 1800-1961-1; **B** – TYC 1800-1974-1 e **C** - TYC 1800-1908-1.

A separação das duas estrelas (d):

$$\Delta\delta = \delta_B - \delta_A$$

$$\Delta\delta = 24°11{,}797' - 24°11{,}391'$$

$$\Delta\delta = 0{,}406' = 0{,}406' \times 60'' = 24{,}36''$$

$$\Delta\alpha = (\alpha_A - \alpha_B) \times \cos\left(\frac{\delta_A + \delta_B}{2}\right)$$

$$\Delta\alpha = (3h46{,}267\,\text{min} - 3h46{,}229\,\text{min}) \times \cos\left(\frac{24{,}18985 + 24{,}19661}{2}\right)$$

$$\Delta\alpha = 0{,}038 \times \cos 24{,}19$$

$$\Delta\alpha = 0{,}038 \times 0{,}912 = 0{,}035\,\text{min}$$

$$\Delta\alpha = 0{,}035 \times 15' = 0{,}525 \times 60'' = 31{,}5''$$

$$d = \sqrt{\Delta^2\alpha + \Delta^2\delta} = \sqrt{(31{,}5)^2 + (24{,}36)^2} = \sqrt{1585{,}659}$$

$$d \approx 39{,}820''$$

1.2. Medição da distância entre as estrelas em pixels.

As coordenadas dos centróides das duas estrelas determinados com o programa CADET por ajuste gaussiano são:

A=(130,531; 256,444) B=(152,812; 310,225)

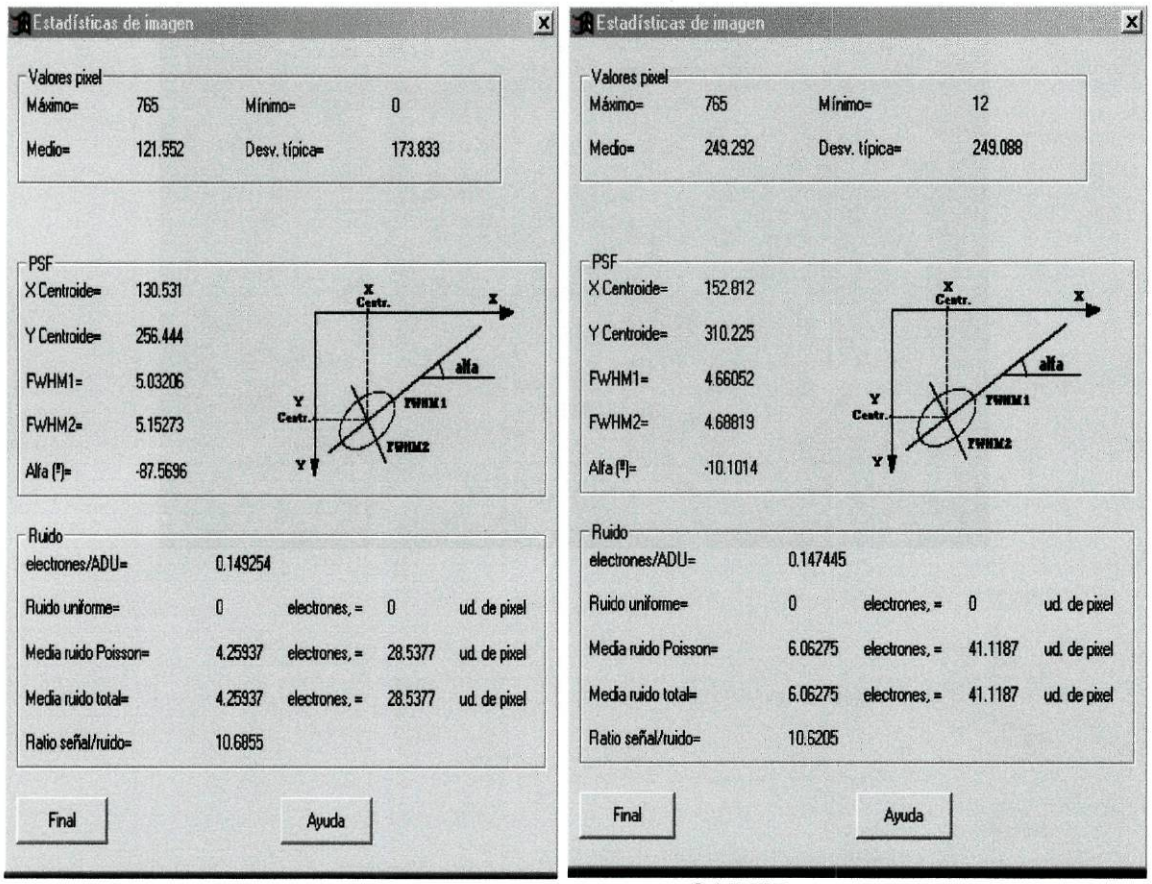


Figura 3 – Imagens de écrans obtidos com o programa CADET.

Distância em pixels:

$$d_{AB} = \sqrt{(x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2} = \sqrt{(130{,}531 - 152{,}812)^2 + (256{,}444 - 310{,}225)^2}$$

$$d_{AB} = \sqrt{496{,}442 + 2892{,}395} \approx 58{,}21$$

1.3. Determinação da escala

$$Escala = \frac{39{,}82}{58{,}21} = 0{,}684'' / pixel$$

2. Medição do seeing.

Ajuste de uma estrela a uma gaussiana.

Utilizou-se o programa CADET para fazer um ajuste de uma gaussiana à imagem da estrela.

FWHM da estrela A = 5,032 pixeis.

$$Seeing = 5{,}032 \times 0{,}684 \approx 3{,}44''$$

$$\boxed{Seeing \approx 3{,}44''}$$

3. Observação da refracção atmosférica diferencial

O índice de refracção do ar tem uma dependência do comprimento de onda da luz. Comprimentos de onda maiores são menos refractados. O feixe colorido vermelho é menos desviado porque tem um comprimento de onda maior (750 *nm*) e o feixe colorido azul é mais desviado porque tem um comprimento de onda menor (400 *nm*).

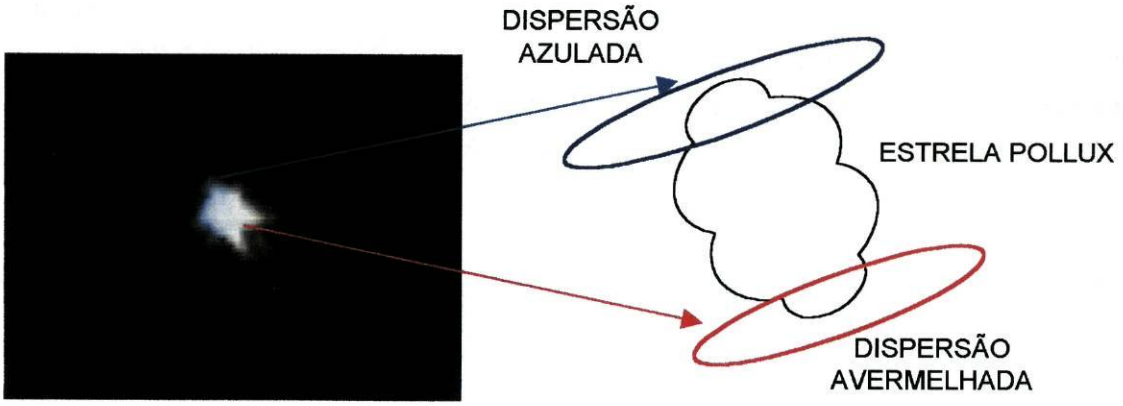


Figura 4 – Dispersão da luz da Pollux

4. Observação de speckles

Pudemos observar imagens em constante movimento apresentando uma agitação constante – speckles, o que se traduz numa má visibilidade do local de observação. As speckles resultam da interferência das frentes de ondas distorcidas pela turbulência.

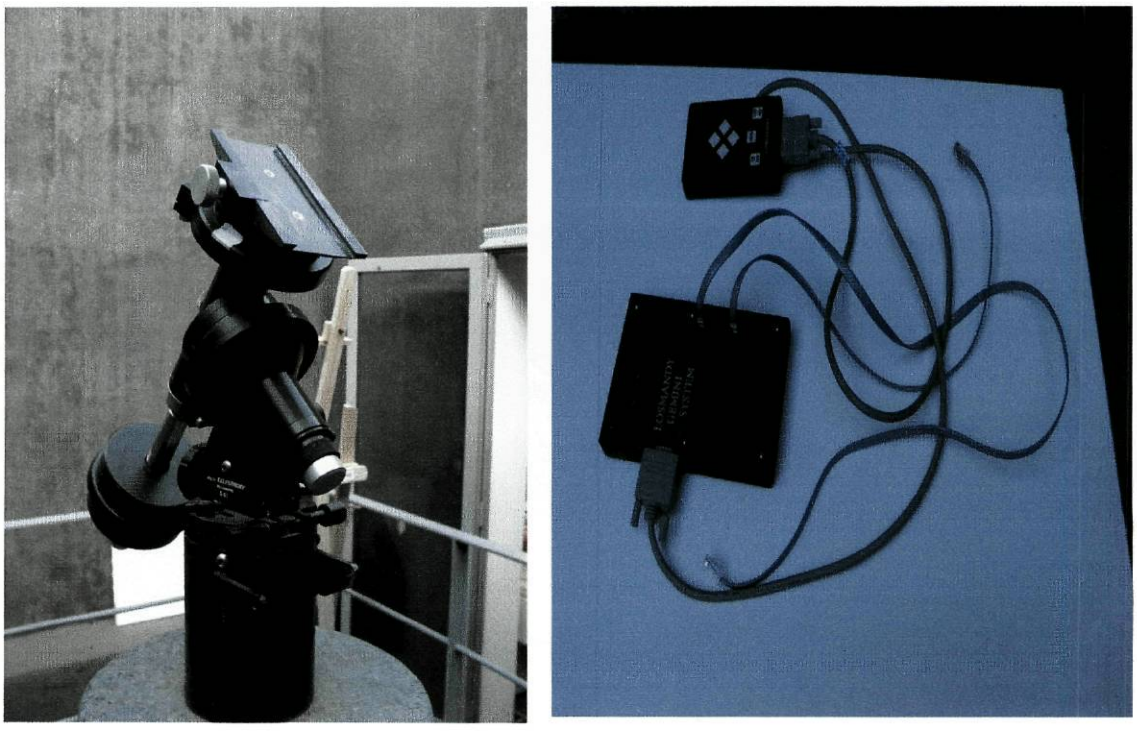


Figura 5 – Montagem do telescópio

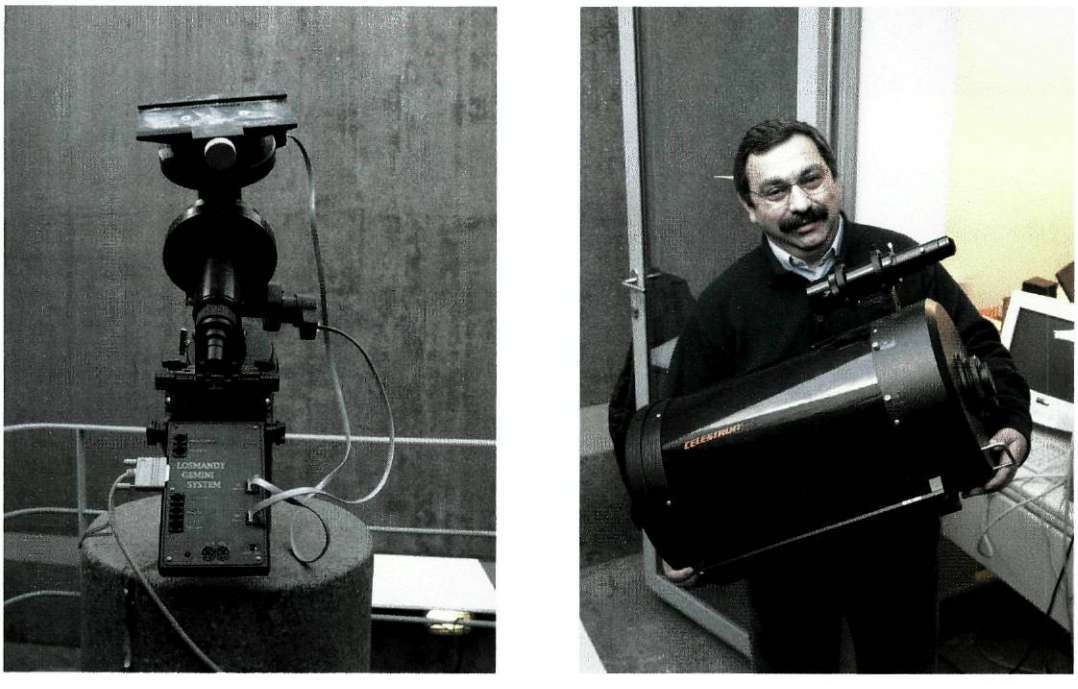


Figura 6 – Montagem do telescópio no CAUP

CRÉDITOS DAS IMAGENS

CAPÍTULO 2

Figura 1: Retirada de http://www.physics.edu/waves/wavestypes.html (acedido a 20/01/02)

Figuras 2 e 3: Retiradas de *Física 11º Ano* de Maria Teresa Marques Sá

Figura 5: Retirada do software do computador pessoal

Figura 6: Retirada e adaptada de *Física na nossa vida 8º Ano* de Mª Margarida R. D. Rodrigues

CAPÍTULO 3

Figuras 1, 6 e 12: Retiradas de *Física 11º Ano* de Maria Teresa Marques Sá

Figuras 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 13 e 14: Retiradas de *Fundamentals of Physics* de Halliday Resnick

CAPÍTULO 4

Figura 1: Retirada de http://www.gem51.com

Figura 3: Retirada de http://www.lpl.arizona.edu/

CAPÍTULO 5

Figura 1: Retirada de *A Nova Enciclopédia das Ciências* de Peter Cattermole (Círculo de Leitores)

Figura 2: Retirada de http://fisica.ufpr.br/

Figura 3: Retirada de *Física na nossa vida 8º Ano* de Maria Margarida R. D. Rodrigues

Figuras 4 e 5: Retiradas de *Astronomy: Principles and Practice* de A. E. Roy e Clarke

Figura 6: Retirada de *Curso de Astronomia* de Pavel Bakulin

Figura 7: Retirada de *Méthodes physiques de l'observation* de Pierre Léna

CAPÍTULO 6

Figura 1, 3: Retirada de *Adaptative Optics for Astronomical Telescopes* de John W. Hardy

Figura 2: Retirada de http://fisica.ufpr.br/

Figura 4: Retirada de http://www.eurekalert.org/pub_releases/2002-01/llnl-lsc010402.php

CAPÍTULO 7

Figuras 1, 6, 7, 8, 9, 10 e 11: Retiradas de http://www.gemini.edu/

Figura 2: Retirada de http://www.jpl.nasa.gov/releases/2002/release_2002_118.html

Figuras 3, 4 e 5: Retiradas de http://www.cfht.hawaii.edu/

Figuras 12, 13 e 14: Retiradas de http://www.eso.org/

BIBLIOGRAFIA

ALMEIDA, Guilherme de 1999, *Roteiro do céu*, 3ª edição, Plátano Edições Técnicas, Lisboa.

ALTARAC, Sandrine 1999, *Interferometrie des taveleures: optimisation des parametres observationnels. Application au contrôle en temps reel de l'instrument SPID,* Thèse de doctorat, Université Lyon I, Lyon, França.

ALVES, José Matias 2002, *Enigmat – Princípios da Reorganização Curricular - 3º Ciclo do Ensino Básico*, 1ª edição, Asa Editores, Lisboa.

BAKULIN, Pavel, KONONOVITCH, Eduard & MOROZ, Vassili 1988, *Curso de Astronomia*, traduzido do russo por Anatoli Kutchumov, Editora Mir.

CATTERMOLE, Peter 1996, *A Terra e o Sistema Solar*, A Nova Enciclopédia das Ciências, Círculo de Leitores, Companhia Editora do Minho, SA, Portugal.

CLARK, Stuart 1996, *A Astrofísica*, A Nova Enciclopédia das Ciências, Círculo de Leitores, Companhia Editora do Minho, SA, Portugal.

DEKKER, A. J. den & BOS, A. van den 1997, *Resolution: a survey*, Volume 14, Nº 3, Journal of the Optical Society of America/A.

DEUS, Jorge Dias de, PIMENTA, Mário, NORONHA, Ana, PEÑA, Teresa & BROGUEIRA Pedro 1992, *Introdução à Física*, Editora McGraw-Hill de Portugal, L.da, Portugal.

ENRÍQUEZ, David Galadí & CABELLO, Jordi Gutiérrez 2001, *Astronomía General*, Ediciones Omega, S. A., Barcelona, Espanha.

FERREIRA, Máximo 2001, *O pequeno livro da Astronomia*, 1ª edição, Editorial Bizâncio, Lisboa.

FERREIRA, Máximo & ALMEIDA, Guilherme de 1993, *Introdução à Astronomia e às Observações Astronómicas*, Plátano Edições Técnicas, Lisboa.

FIOLHAIS, Carlos, FIOLHAIS, Manuel, GIL, Victor, PAIVA, João & VENTURA, Graça 1999, *Física 8*, Gradiva Escolar, Lisboa.

FIOLHAIS, Carlos, VALADARES, Jorge, SILVA, Luís & TEODORO, Vitor Duarte 1995, *Física 11º ano*, Didáctica Editora, Lisboa.

GAMEIRO, Jorge Filipe da Silva, *Apontamentos de Telescópios e Instrumentação*, Mestrado em Ensino da Astronomia 1º Ano/1º Semestre do ano lectivo de 2000/2001.

HALLIDAY, David, RESNICK, Robert & MERRILL, John 1977, *Fundamentals of Physics,* third edition extended, John Wiley & Sons, New York.

HARDY, John W. 1998, *Adaptative Optics for astronomical telescopes*, Oxford University Press.

ÍNDIAS, Maria Amélia Cutileiro 1999, *Curso de Física II*, Editora McGraw-Hill de Portugal, L.^{da}, Alfragide, Portugal.

KARTTUNEN, H., KRÖGER, P., OJA, H., POUTANEN, M. & DONNER, K. J. 1996, *Fundamental Astronomy*, third edition, Spinger-Verlag, New York.

KERVELLA, Pierre 2002, *Interférométrie optique avec le VLT application aux etoiles céphéides,* Thèse de doctorat, Université Paris VII, Paris, França.

LE LOUARN, Miska 2000, *Étoiles Laser pour les grands télescopes: effet de cône et implications astrophysiques*, Thèse de doctorat, Université Lyon I, Lyon, França.

LÉNA, Pierre & BLANCHARD, Alain 1990, *Lumières une introduction aux phénomènes optiques*, InterEditions, Paris, França.

LÉNA, Pierre, LEBRUN, François & MIGNARD, François 1996, *Méthodes physiques de l'observation*, deuxième édition, CNRS Éditions, Paris, França.

LIMA, João José F. G. A., *Apontamentos de Tópicos Fundamentais em Astronomia*, Mestrado em Ensino da Astronomia 1º Ano/1º Semestre do ano lectivo de 2000/2001.

LIMA, Mário, RIBEIRO, Catarina, DUARTE, Sandra, FELGUEIRAS, Sandra & SALVADOR, Vanda 2002, *Enigmat – O Ensino-Aprendizagem da Matemática*, 1ª edição, Asa Editores, Lisboa.

MINNAERT, M. G. J. 1993, *Light and Color in the Outdoors*, Spinger-Verlag, New York.

MOCHÉ, Dinah L. 2002, *Astronomia*, 1ª edição, tradução de Máximo Ferreira, Gradiva.

NEVES, Maria Augusta Ferreira & FARIA, Maria Luísa Monteiro 1999, *Matemática 8º ano* (2ª Parte),1ª edição, Porto Editora, Porto.

PEREIRA, Alda & GONÇALVES, Conceição 1994, *Eu gosto de Física*, Texto Editora, Lisboa.

RIDPATH, Ian 1997, *Dictionary of Astronomy*, Oxford University Press, New York.

RODDIER, François 1999, *Adaptative Optics in Astronomy*, Cambridge University Press.

RODRIGUES, M. Margarida R. D. & DIAS Fernando Morão Lopes 2001, *Física na Nossa Vida*, 1ª edição, Porto Editora, Porto.

ROY, A. E & CLARKE, D. 1988, *Astronomy: Principles and Practice*, third edition, Adam Hilger, Bristol and Philadelphia.

SÁ, Maria Teresa Marques de 1995, *Física 11º Ano*, 1ª edição, Texto Editora, Lisboa.

SAHA, Swapan K. 2002, *Modern optical astronomy: technology and impact of interferometry*, Reviews of Modern Physics, 74, 551.

SAINT-JACQUES, David 1998, *Astronomical seeing in space and time – a study of atmospheric turbulence in Spain and England*, Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy, University of Cambridge.

SCHROEDER, Daniel J. 2000, *Astronomical Optics*, second edition, Academic Press.

TRIPLER, Paul A. 2000, *Física*, 4ª edição, Volume 2, traduzido por Horácio Macedo e Ronaldo de Biasi, Livros Técnicos e Científicos, Brasil.

VIANA, Pedro Teixeira Pereira, *Apontamentos de Astronomia Galáctica e Extragaláctica*, Mestrado em Ensino da Astronomia 1º Ano/2º Semestre do ano lectivo de 2000/2001.

WILSON, R. N. 1996, *Reflecting Telescope Optics I*, Spinger-Verlag, New York.

Legislação

Lei nº46/86, de 14 de Outubro [Lei de Bases do Sistema Educativo].

Decreto-Lei nº 6/2001, de 18 de Janeiro [Reorganização Curricular do Ensino Básico].

Despacho Normativo nº 30/2001, de 19 de Julho[Avaliação das aprendizagens dos alunos].

Decreto-Lei nº 240/2001, de 30 de Agosto [Perfil Geral do Professor e do Educador].

Programas

Física e Química A – 10º Ano, Fevereiro de 2001

Física e Química B – 10º Ano, Maio de 2001

A Matemática na Educação Básica – Lisboa, 1999

Matemática A - 11º Ano, Novembro de 2000

Ciências Físicas e Naturais – Orientações curriculares para o 3º Ciclo do Ensino Básico (2001)

Química – 12º Ano, (2001)

Física - 12º Ano, (2001)

Sites

http://planetquest.jpl.nasa.gov/resources/resources_index.html

http://www.geocities.com/CapeCanaveral/Campus/4847/sky/seeing.htm

http://www.eso.org/

http://ojps.aip.org/ajp/

http://www.ifa.hawaii.edu/ao/other/other.html

http://olbin.jpl.nasa.gov/

http://www.seds.org/billa/bigeyes.html

http://www.starrynight.com

http://www.terra.es/personal2/oscarcj/introeng.htm

http://www.physics.nwu.edu/ugrad/vpl/waves/wavestypes.html

http://www.gmi.edu/~drussel/Demos/SHO/mass.html

http://nautilus.fis.uc.pt/

http://www.exploratorium.edu/xref/phonomena/simple_harmonic_motion.html

http://geocities.yahoo.com.br/saladefisica6/

http://electron9.phys.utk.edu/135/modules/m9/oscillations.htm

http://www.physics.nwu.edu/ugrad/vpl/waves/wavestypes.html

http://www.gmi.edu/~drussel/Demos/SHO/mass.html

http://nautilus.fis.uc.pt/

http://www.exploratorium.edu/xref/phonomena/simple_harmonic_motion.html

http://geocities.yahoo.com.br/saladefisica6/

http://electron9.phys.utk.edu/135/modules/m9/oscillations.htm

http://osvaldao.freeyellow.com/astronomo.htm

http://www.gemini.edu/gallery/observing/gal_center.html