

Deolinda Maria Barbosa Belece

As Cores do Universo



Departamento de Matemática Aplicada
Faculdade de Ciências da Universidade do Porto
Setembro / 2000

Deolinda Maria Barbosa Belece

As Cores do Universo



Departamento de Matemática Aplicada
Faculdade de Ciências da Universidade do Porto

Setembro / 2000

Deolinda Maria Barbosa Belece

As Cores do Universo



Dissertação 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 / 2000

Há muitas coisas que a ciência não entende, muitos mistérios por desvendar. (...) A maneira de pensar científica é a um tempo imaginativa e disciplinada. Isto é fundamental para o seu êxito. A ciência convida-nos a aceitar os factos, mesmo quando estes não se conformam com as nossas ideias preconcebidas. Aconselha-nos a pôr hipóteses alternativas e a ver qual se adapta melhor aos factos. Incita-nos a um equilíbrio delicado entre a abertura a novas ideias, por muito heréticas que sejam, e o exame mais rigoroso e mais céptico de tudo — ideias novas e sabedoria estabelecida.*

Carl Sagan

A presente dissertação foi orientada pela Sr.^a Prof.^a Doutora Maria Teresa Lago, a quem expresso os meus reconhecidos agradecimentos.

A apreciação crítica da matéria apresentada, sempre efectuada com a maior solicitude, simpatia e sapiência, constituiu um inestimável contributo para a realização deste projecto.

*Do livro, *Um Mundo Infestado de Demónios* de Carl Sagan, Gradiva — Publicações, L.^{da}, Lisboa, 1998, pág.^s 41 e 42.

RESUMOS

A Astronomia teve origem nas necessidades práticas do Homem. A sua base científica foi, e é ainda hoje, a observação, embora os métodos actualmente usados nada tenham em comum com as primeiras observações.

A evolução que se verificou nos métodos observacionais, foi consequência do progresso tecnológico e científico em diferentes áreas do Conhecimento, com destaque para a Física, a Química e a Matemática.

Importa salientar os estudos sobre a natureza da luz, suas propriedades e comportamento, pois esta constitui a fonte de informação fundamental sobre os corpos celestes. A construção de telescópios e detectores, com desempenhos superiores à visão humana, e o estabelecimento da análise espectral proporcionaram o alargamento do campo de investigação da Astronomia. Actualmente, são efectuadas observações em todas as regiões do espectro electromagnético, o que veio confirmar a relevância do trinómio luz-cor-informação.

No sentido de tornar acessíveis alguns fenómenos que ocorrem no Universo, reveste-se de especial importância a concretização de representações experimentais.

Na presente dissertação, organizada em seis capítulos, são abordados estes aspectos, inseridos na temática da cor, no contexto do Universo.

L'Astronomie a eu son origine dans les besoins pratiques de l'Homme. Sa base scientifique a été, et elle est encore à présent, l'observation, quoique les méthodes actuellement utilisées n'aient rien en commun avec les premières observations.

L'évolution de ces méthodes d'observation a été la conséquence du progrès technologique et scientifique en différents domaines de la connaissance, particulièrement la Physique, la Chimie et la Mathématique.

On doit relever les études sur la nature de la lumière, ses propriétés et son comportement, car elle constitue la source d'information fondamentale sur les corps célestes. La construction supérieur à la vision humaine et l'établissement de l'analyse spectrale ont procuré l'élargissement du champ de recherches de l'Astronomie. Actuellement, des observations sont effectuées en toutes régions du spectre électromagnétique, ce qui a confirmé l'importance du trinôme lumière-couleur-information.

La concrétisation des représentations expérimentales est particulièrement importante pour que quelques phénomènes qui arrivent dans l'Univers deviennent accessibles.

Dans cette dissertation, qui s'organise en six chapitres, ces aspects sont entanés, insérés dans la thématique de la couleur, dans le contexte de l'Univers.

Astronomy originated from the practical needs of man. Its scientific basis has been and still is observation; however, the present methods have nothing in common with the primitive observations.

Evolution in the methods of observation has occurred as a consequence of the technological and scientific progress in different areas of knowledge, particularly Physics, Chemistry and Mathematics.

We must emphasise the studies concerned with the nature of light and its properties and behaviour, as this is the fundamental source of information about the heavenly bodies. The use of telescopes and detectors, much more precise than human sight and establishment of the spectral analysis, made it possible to broaden the investigation field in Astronomy. Presently, observations are made in all regions of the electromagnetic spectrum, and this has confirmed the relevance of the trinomial light – colour – information.

In order to enable others to understand some of the phenomena that occur in the Universe it becomes particularly important to formulate representations of experimental practices.

The present dissertation has been organised into six chapters, and the aforementioned aspects are categorised according to colour themes in the context of the Universe.

Índice

Resumos	4
1 - Introdução	9
2 - A Natureza da Luz	11
3 - Observações Astronómicas	21
4 - A Cor	46
5 - Actividades Experimentais	63
6 - Conclusão	77
Apêndices	79
Lista de Figuras	84
Lista de Quadros e Tabelas	90
Fontes Bibliográficas	92

1. INTRODUÇÃO

Nos vastos céus estrelados
Que estão para além da razão,
Sob a regência de fados
Que ninguém sabe o que são,
Há sistemas infinitos,
Sóis, centros de mundos seus,
E cada Sol é um Deus.
Eternamente excluídos
Uns dos outros, cada um
É um Universo.

Fernando Pessoa, entreacto II em “Primeiro Fausto”

A Astronomia encerra, no seu objecto, uma das maiores aspirações do Homem: conhecer o Universo. A satisfação deste objectivo depende, entre outros factores, da capacidade interpretativa da informação que sob a forma de luz, os corpos celestes disponibilizam. Neste contexto, é importante salientar o estudo da luz, que talvez seja um dos capítulos mais fascinantes da História da Física, sobretudo pela repercussão que teve noutras áreas científicas, entre as quais se inclui a Astronomia.

Naturalmente que a análise da luz, em toda a sua plenitude, carece de instrumentação adequada a esse fim. Neste domínio, convém salientar os precursores dos actuais telescópios e respectivos equipamentos, como por exemplo, os detectores e os analisadores, que foram decisivos para a evolução que se verificou, desde o seu advento, na observação astronómica.

Entre os métodos observacionais utilizados destaca-se a análise espectroscópica da luz proveniente do corpo celeste, pois através dela é possível obter informações relativas ao estado físico desse objecto, ao seu movimento, à sua temperatura, densidade e composição química.

Tal como se reconhece que a luneta astronómica de Galileu assinala o início da Astronomia Moderna, também a radioastronomia e a astronomia espacial constituem marcos determinantes para o desenvolvimento do estudo do Universo. As observações astronómicas efectuadas em todas cores do espectro electromagnético, permitem hoje constatar que, a par da patenteada diversidade de objectos celestes, o Universo afigura-se invulgarmente dinâmico.

Tratando-se de uma dissertação com objectivos pedagógicos, a temática da cor é abordada de forma simples e concisa. Pelo mesmo motivo, considerou-se apropriada a inserção de um capítulo dedicado a actividades experimentais, que se crê serem motivadoras e elucidativas dos fenómenos em estudo.

2. A NATUREZA DA LUZ

Um dilúvio de luz cai da montanha:
Eis o dia! Eis o Sol!

Antero de Quental, “IgnotoDeo” em Antologia Poética

A relação entre o observador e o objecto só é possível em presença da luz. A luz permite a aquisição de informação sobre o mundo que nos rodeia. E, no caso particular da Astronomia, ela é basilar para o conhecimento do Universo.

Apesar da familiar convivência que, desde os tempos primordiais, o Homem com ela estabeleceu, a sua natureza permaneceu, durante séculos, imersa na obscuridade.

O estudo da natureza da luz, do seu comportamento e propriedades foi, e é ainda hoje, um assunto de fundamental interesse e fascínio.

Não causa estranheza que cedo se tenha colocado o problema da natureza da luz. Não obstante, foi percorrido um longo caminho até que algumas respostas fossem encontradas. Apesar de longo, esse foi um caminho fascinante na evolução do conhecimento científico, não apenas pela importância da luz por si mesma, mas também pela sua repercussão noutros sectores da Física.

O estudo da luz é marcado por duas importantes concepções: a corpuscular e a ondulatória.

Os primórdios da teoria corpuscular remontam à antiga Civilização Grega. Leucipes (V a.C.) descrevia a luz como sendo um fogo visual, constituído por minúsculos objectos feitos à imagem dos objectos reais, mas em proporções muito inferiores. Anaxágoras substituiu esses minúsculos objectos por corpúsculos, correspondendo a cada um uma dada propriedade, como por exemplo, a cor.

Outras correntes de pensamento, ligadas à Escola Pitagórica, insistiam em associar a luz ao órgão da visão, afirmando que o olho era a origem da luz. Saliente-se que esta visão sensitiva da luz ainda hoje persiste ao nível da linguagem corrente e, sobretudo, da linguagem poética.

Esta teoria acabaria por ser refutada de forma irreversível por Al-Hazem, alguns séculos mais tarde (séc. XI), com base em dados experimentais.

Mas a teoria corpuscular está indubitavelmente ligada a Isaac Newton, (séc. XVII).

A teoria corpuscular da luz assenta numa visão mecanicista da Natureza. Neste contexto, a luz seria constituída por corpúsculos de dimensões muitíssimo reduzidas, sujeitas à acção de forças de fraca intensidade, responsáveis pela mudança de direcção. Concordando com um dos factos ópticos da época, esses corpúsculos viajam em linha recta, no vácuo ou no ar, como aliás sucedia com qualquer partícula newtoniana.

Galileu já havia reparado que as experiências do quotidiano poderiam levar a concluir que a luz, não só se deslocava em linha recta, como também o fazia instantaneamente. Galileu analisou este problema na sua obra “Diálogos sobre Duas Novas Ciências”, publicada em 1638, na qual descreve uma experiência que, segundo ele, permitiria concluir que a velocidade da luz não era infinita, como se pensava. Galileu teve o mérito de formular o problema da determinação da velocidade da luz, embora não o tenha resolvido. Atendendo à técnica experimental disponível no seu tempo, dificilmente o conseguiria fazer. Esse feito estava reservado a A. Fizeau, que determinou, pela primeira vez, a velocidade de propagação da luz por meio de uma experiência terrestre, a qual ficou conhecida pelo “Método da Roda Dentada”. Tinham decorrido mais de duzentos anos após a experiência de Galileu.

Mas a prova experimental do valor finito da velocidade da luz fora já apresentada pelo astrónomo dinamarquês Rømer, em 1676, embora com menor precisão, por meio de observações astronómicas.

Tabela 2.1 – Primeiras determinações da velocidade de propagação da luz.

Rømer	1676	350000 km.s^{-1}	Observação astronómica (Satélites de Júpiter)
Bradley	1727	299000 km.s^{-1}	Observação astronómica (Estrela γ da constelação do Dragão)
A. Fizeau	1849	313000 km.s^{-1}	Observação Terrestre (Método da Roda Dentada)

Segundo consta, Newton não terá dado qualquer relevo à medição da velocidade da luz, apesar de esta comprovar um dos pressupostos da concepção corpuscular.

A teoria corpuscular explicava com facilidade o fenómeno da reflexão. O raio luminoso representava a direcção segundo a qual os corpúsculos se deslocavam. As partículas de luz, ao incidirem numa superfície reflectora, ficavam sujeitas à acção de forças repulsivas, perpendiculares à superfície de reflexão, tendo um comportamento em tudo idêntico ao da experiência mecânica da reflexão de bolas elásticas, lançadas de encontro a uma parede.

A refacção é também interpretada de acordo com a dinâmica newtoniana. Os corpúsculos, ao atingirem a superfície de refacção, ficavam sujeitos a forças atractivas, perpendiculares a essa superfície, o que ocasionava a alteração da sua velocidade de propagação. A direcção do movimento situar-se-ia algures entre a linha da trajectória original e a perpendicular. Com o aumento da velocidade, a inclinação da direcção do movimento também aumentava.

Perante superfícies simultaneamente reflectoras e refractoras, a explicação tornava-se naturalmente mais complexa.

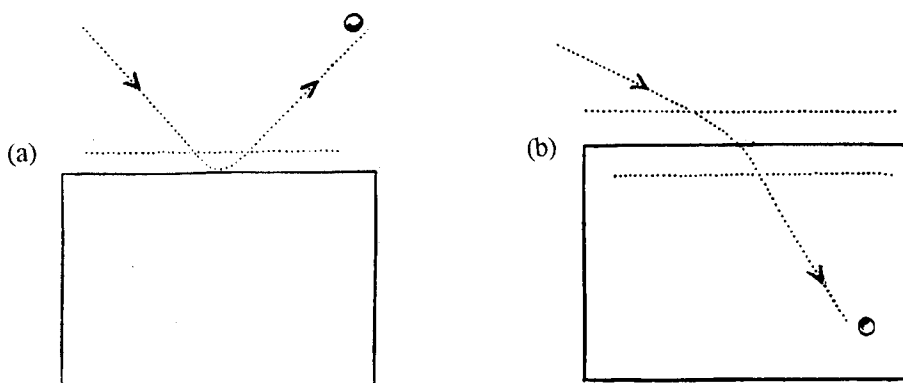


Figura 2.1 – Esquemas ilustrativos da reflexão (a) e da refacção (b) segundo a teoria corpuscular.

Efectivamente, a teoria corpuscular crescia em complexidade.

Em 1660, Newton observou a decomposição da luz do Sol, por intermédio de um prisma óptico, desvendando assim o enigma do arco-íris, ao qual desde tempos imemoriais, era atribuída uma origem divina.

Na linguagem corpuscular, este fenómeno óptico era explicado recorrendo a corpúsculos, pertencentes a cores diferentes, propagando-se à mesma velocidade no vazio, mas com velocidades diferentes no vidro e na água. A luz branca era entendida como sendo uma mistura de corpúsculos pertencentes a cores diferentes que, ao atravessarem o vidro ou a água, ficavam sujeitos a forças diferentes, de acordo com a sua cor, sendo refractados ao longo de trajectórias diferentes.

Newton mostrou que era possível obter-se, com a mesma facilidade, a luz branca a partir do seu espectro, o que veio reforçar a concepção de que os corpúsculos, pertencentes a cada cor, se comportavam como substâncias imutáveis.

Os estudos de Newton sobre a luz levaram-no a reconhecer a necessidade de associar à luz algumas propriedades inerentes às ondas. Apesar disso, continuou a admitir que a luz possuía natureza corpuscular.

A teoria corpuscular da luz perdurou por um século, contando com fervorosos defensores, mais acérrimos que o próprio Isaac Newton.

Contemporâneo de Newton, Christiaan Huygens defendeu uma natureza ondulatória para a luz. Segundo ele, a luz não era uma substância mas uma onda. Opinião idêntica expressara Leonardo da Vinci, um século antes, quando reparou nas semelhanças entre os ecos sonoros e a reflexão da luz.

A concepção ondulatória considerava que o raio luminoso representava a direcção segundo a qual um conjunto de ondas paralelas se propagava. Para Huygens, a luz só parecia propagar-se rectiligneamente, devido ao facto de o seu comprimento de onda ser muito pequeno, em comparação com as dimensões dos obstáculos e aberturas, que se interpunham no seu caminho.

A velocidade da luz correspondia à velocidade de propagação da onda, tal como sucedia nas ondas mecânicas. A dificuldade estava em explicar a propagação da luz sem um suporte material. Huygens resolveu o problema, admitindo a existência de uma substância hipotética, na qual o Universo estaria imerso — o éter.

O conceito de éter não era novo. Desde a época de Aristóteles que o éter fora postulado. Curiosamente, ao longo do tempo, as propriedades desse éter foram-se adequando às necessidades da Ciência.

As ondas luminosas, propagando-se no éter, reflectiam-se quando atingiam qualquer limite do meio de propagação ou refractavam-se quando mudavam de meio.

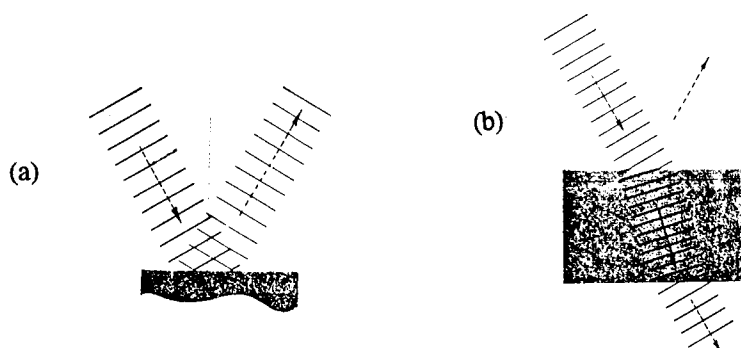


Figura 2.2 – Esquemas ilustrativos da reflexão (a) e da refacção (b) segundo a teoria ondulatória.

Na refacção, a velocidade de propagação da onda e o comprimento de onda sofriam alterações. Assim, se a velocidade diminuísse, o comprimento de onda também diminuía, e aumentava a inclinação da direcção de propagação da onda.

As experiências de Newton sobre a dispersão da luz foram interpretadas de acordo com a linguagem ondulatória. Segundo esta, a cores diferentes correspondiam comprimentos de onda diferentes. A luz branca era uma composição de ondas de todos esses comprimentos de onda.

A teoria ondulatória explicava os mesmos fenómenos que a teoria corpuscular: no entanto, no confronto de ideias, a concepção ondulatória foi relegada para segundo plano até ao início do século dezanove.

Por esta altura, Thomas Young realizou uma experiência que relançou a teoria ondulatória. A experiência da “dupla fenda”, como ficou sendo conhecida, forneceu provas convincentes de que a luz apresentava propriedades, que só poderiam ser explicadas em termos de ondas.

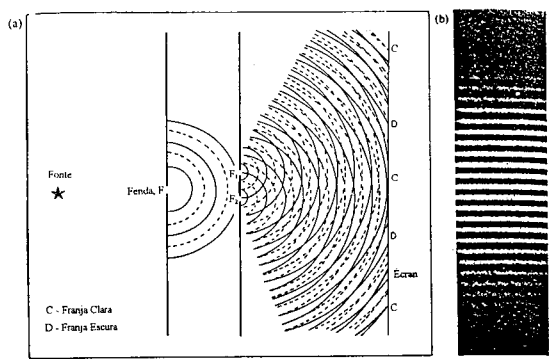


Figura 2.3 – Representação esquemática da experiência de Young (a); fotografia que mostra as franjas claras (interferência construtiva) e escuras (interferência destrutiva) patentes no écran (b).

Young não só mostrou os fenómenos da difracção e da interferência, como ainda determinou experimentalmente valores para comprimentos de onda da luz.

Tabela 2.2 – Comprimentos de onda da luz determinados por Young

$\lambda_{\text{vermelho}}$	$7,056 \times 10^{-5} \text{ cm}$
λ_{violeta}	$4,233 \times 10^{-5} \text{ cm}$

Ao divulgar estes resultados, Young encontrou a oposição cega dos defensores da teoria corpuscular.

Mas, os ventos já sopravam a favor da concepção ondulatória. E, em 1818, A. Fresnel apresentava as equações de onda para a luz. Na sequência da discussão que se lhe seguiu, Fresnel aceitou o desafio proposto por S. Poisson, adepto da teoria corpuscular, para realizar uma experiência, que demonstraria decisivamente o comportamento ondulatório da luz. Essa experiência consistia em interpor um pequeno disco opaco no trajecto da luz, prevendo-se a observação num écran, colocado atrás do disco, de um ponto luminoso. Fresnel provou que a previsão de Poisson estava correcta. Efectivamente, a luz era difractada pelo disco, dando origem a uma interferência construtiva no seu centro. Desta interferência resultava um ponto luminoso no centro da sombra que o disco projectava no écran. A experiência passou a ser conhecida por “ponto luminoso de Poisson”.

A teoria ondulatória era finalmente reconhecida.

Os estudos sobre a luz prosseguiram e, em 1820, Young e Fresnel, a propósito da polarização da luz, mostraram que se as ondas luminosas fossem transversais, e não longitudinais como se supunha, este fenómeno era cabalmente explicado.

As experiências de A. Fizeau e J. Foucault, em 1850, impediram que a teoria corpuscular resistisse por mais tempo, demonstrando a sua debilidade em relação à refacção. Esta teoria previa que a velocidade de propagação da luz na água era superior à velocidade da luz no ar. Os dados experimentais mostraram exactamente o contrário, indo ao encontro das previsões da teoria ondulatória de Fresnel.

Atravessava-se uma época de intensa actividade experimental, sobretudo nas áreas da electricidade e do magnetismo. Consequência desta actividade foi o estabelecimento da teoria electromagnética de Maxwell. No decurso da sua formulação matemática, Maxwell deduziu uma equação de onda, na qual figurava uma constante, cujo valor numérico igualava o valor da velocidade da luz. Anos antes, Michael Faraday, na sequência das suas experiências, comunicara que estava convicto da existência de uma estreita ligação entre a luz e o magnetismo. O resultado obtido por Maxwell permitiu-lhe formular a hipótese de que a luz consistia na oscilação de um campo electromagnético. Esse campo era formado por um campo eléctrico e outro magnético, perpendiculares entre si, e variando de forma solidária. As duas ondas transversais propagavam-se à mesma velocidade — a velocidade da luz. Decorria o ano de 1873.

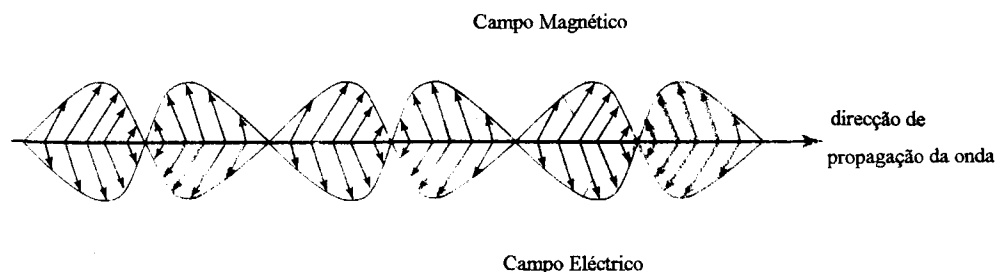


Figura 2.4 – Radiação electromagnética.

A comprovação experimental da hipótese, apresentada por Maxwell, surgiria catorze anos mais tarde por H. Hertz. Produzindo ondas electromagnéticas com um oscilador, Hertz mostrou que as ondas deslocavam-se com a velocidade da luz e apresentavam propriedades idênticas à luz, relativamente à reflexão, refacção, difracção, interferência e polarização. As ondas de rádio, as infravermelhas e ultravioletas, todas elas previstas pela teoria de Maxwell, eram já uma realidade.

O estudo da luz afastava-se da mecânica para se incorporar no electromagnetismo. A luz deixava de ser encarada como um elemento independente na Natureza, para o ser antes como um aspecto do fenómeno fundamental — o electromagnetismo. Contudo, persistia por resolver o problema do éter. Albert Michelson e Edward Morley dispuseram-se a provar a existência do éter. No entanto, os resultados das experiências foram repetidamente negativos. Assumir que o éter não tinha existência real era, na época, impensável.

No declinar do século dezanove, constatava-se a incapacidade dos modelos físicos para explicar os resultados de algumas experiências, entre as quais a da emissão de radiação pelo corpo negro e a do efeito fotoelétrico.

O conceito teórico do corpo negro foi introduzido por Gustav Kirchhoff, em 1882. Um corpo negro é definido como sendo um absorvente perfeito, isto é, um corpo com a capacidade de absorver toda a radiação que sobre ele incida, independentemente do comprimento de onda. Estando um corpo em equilíbrio térmico com o seu ambiente, naturalmente que emite tanta energia quanta a que absorve. O corpo negro é também um bom emissor.

A primeira descrição do efeito fotoelétrico deve-se a H. Hertz⁽¹⁾. Este efeito consiste basicamente na emissão de electrões de placas metálicas, quando estas são iluminadas por uma radiação suficientemente energética.

Os estudos da emissão de radiação pelo corpo negro conduziram Max Planck à formulação de uma hipótese, que se revelaria fundamental para o desenvolvimento da Mecânica Quântica. Nessa hipótese admitia-se que a energia radiante era absorvida em quanta de $h\nu$, representando ν a frequência e h uma constante.

Tendo por base as hipóteses de Planck, divulgadas em 1900, Albert Einstein apresentava, cinco anos mais tarde, a interpretação do efeito fotoelétrico, o que viria a restaurar a antiga controvérsia onda - partícula sobre a natureza da luz.

Einstein, ao atribuir à luz um carácter corpuscular, em que os antigos corpúsculos eram substituídos por quanta de energia — os fotões (que viajavam no espaço vazio à velocidade da luz), encontrou um modelo que estava em perfeita concordância com a experiência. O efeito fotoelétrico passou a ser compreendido com base na colisão entre um electrão do átomo metálico e um fotão, com energia suficiente para o extrair. A diferença entre a energia ($h\nu$) do fotão incidente e a energia mínima (W_o), necessária para que um electrão abandone o átomo a que pertence, surge sob a forma de energia cinética máxima do electrão ejectado.

Este efeito é descrito pela equação:

$$(0,5mv^2)_{\max} = h\nu - W_o$$

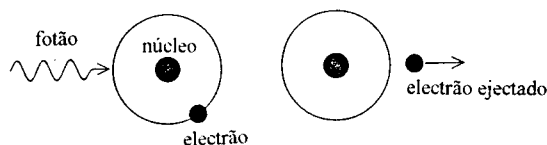


Figura 2.5 – Representação esquemática do efeito fotoelétrico.

⁽¹⁾ No artigo "On an Effect of Ultraviolet Light upon the Electric Discharge", de sua autoria, publicado em 1887.

Einstein postulou a quantificação da radiação e admitiu que cada fóton apresentava uma energia proporcional à sua frequência.

A teoria de Einstein despoletou enorme agitação no meio científico. Nos anos seguintes à publicação do seu trabalho, os resultados dos testes da sua equação fotoeléctrica criaram alguma confusão.

Finalmente, as experiências de Robert Millikan demonstraram a relação linear predita pela equação de Einstein. Os resultados foram publicados em 1916.

As experiências de Millikan dissiparam as dúvidas relativamente à equação fotoeléctrica, mas o mesmo não sucedeu com os quanta de energia.

A confirmação final surgiria em 1923, com as experiências de Arthur Compton. No efeito Compton constata-se que a radiação X, resultante da interacção com a matéria, apresenta um comprimento de onda superior ao da radiação X incidente.

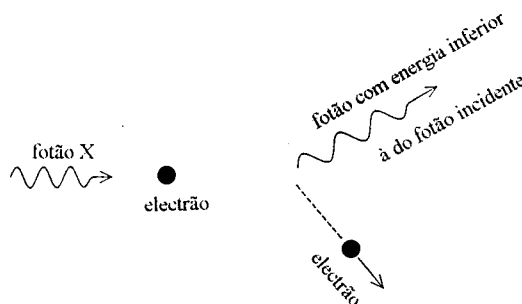


Figura 2.6 – Representação esquemática do efeito Compton.

Era agora claro que a luz apresentava um comportamento dual.

Einstein entendia que o meio mais simples e mais credível para construir um sistema realmente científico, era ter como ponto de partida factos observados e experimentais. Neste contexto, Einstein rejeitou o conceito de éter e aceitou como facto estabelecido e incontornável a constância da velocidade da luz.

Experiências subsequentes mostrariam que também a matéria apresenta uma faceta ondulatória. Nos anos 1927-28, Davison e Germer demonstraram a difracção de electrões, prevista por De Broglie, em 1924.

Gradualmente, todas as propriedades características das ondas luminosas foram demonstradas nos feixes de partículas, nomeadamente electrões e neutrões.

Actualmente, a luz é entendida como a probabilidade de vários fótons em movimento descreverem uma equação de onda. Um fóton é uma unidade de energia electromagnética, cujo momento linear (p) está relacionado com o comprimento de onda (λ) pela expressão

$$p\lambda = h$$

em que h é a constante de Planck.

A teoria que descreve esta nova concepção, conjugando as duas qualidades da luz, é denominada teoria electrodinâmica quântica. Para os físicos, esta é de todas as teorias físicas a que tem conseguido efectuar as previsões mais rigorosas.

Terá terminado o longo caminho na procura da natureza da luz ?

3. OBSERVAÇÕES ASTRONÓMICAS

Como vagos desejos indistintos
Surgem do escuro os astros, lentamente.

Antero de Quental, “Os Cativos” em Antologia Poética

A Astronomia é uma ciência de observação, sendo por isso crucial a aplicação de métodos e de técnicas de observação, que proporcionem informações cabais sobre os objectos celestes.

A Astronomia Moderna teve início com a luneta de Galileu. Desde então, a construção de telescópios jamais cessou. Gradualmente, melhores telescópios foram sendo projectados e aperfeiçoados, e com eles novas descobertas emergiram.

O progresso verificado noutras áreas do conhecimento contribuiu não só para o estabelecimento de técnicas de observação mais eficazes, mas também para a interpretação dos fenómenos observados.

Por último, a radioastronomia e a exploração espacial abriram novos horizontes na investigação astronómica, ao facultarem a observação em toda a gama de frequências do espectro electromagnético.

A evolução da Ciência está intimamente ligada ao desenvolvimento da instrumentação. A Astronomia é disso prova irrefutável.

Os antigos astrónomos dispunham fundamentalmente do seu olhar acutilante e perscrutador. Instrumentos não ópticos, como o astrolábio e o quadrante, constituíram durante séculos, preciosos auxiliares de observação.

Na Roma Antiga, já no final da República, eram utilizadas ampolas de vidro e bolas cheias de água para ampliar os objectos observados através delas. Séneca terá usado estes globos de água como auxiliares da sua visão deficiente. Contudo, as verdadeiras lentes seriam inventadas pelos Árabes. Tratavam-se de lentes biconvexas, constituídas por segmentos polidos de bolas de vidro. Os instrumentos ópticos implantar-se-iam a partir do século XVII.

À medida que os estudos sobre a luz e o órgão da visão prosseguiam, iam sendo construídos instrumentos destinados a demonstrar e aproveitar as propriedades da luz. Um desses instrumentos foi a luneta, cuja invenção terá ocorrido nos finais do século XVI. Desde então, as lunetas tornar-se-iam muito populares, embora fossem tidas como simples curiosidades.

Em 1609, Galileu Galilei recebe a notícia desta invenção. Prontamente, empenha-se na construção da sua própria luneta. Dirigindo-a para o céu, Galileu encetou meticulosas e contínuas observações, que conduziram ao desmoronamento da concepção geocêntrica de Ptolomeu, fervorosamente defendida na época.

A luneta astronómica de Galileu marca o início de uma nova era na Astronomia.

A luneta é um telescópio do tipo refractor, no qual são utilizadas apenas lentes. A luz é colectada por uma lente convergente – a objectiva –, sendo focada no plano focal comum ao da outra lente – a ocular ⁽¹⁾.

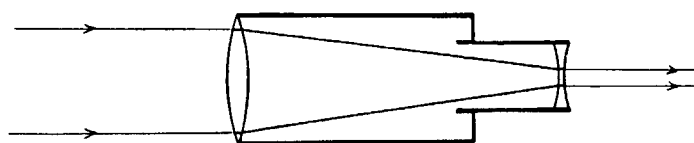


Figura 3.1 – Trajecto da luz no interior da luneta astronómica.

Um telescópio caracteriza-se pelos seguintes parâmetros: poder resolvente, poder ampliador e poder colector.

O poder resolvente permite medir a menor distância angular entre dois objectos no céu, distinguindo-se perfeitamente um do outro.

O poder ampliador mede o tamanho do objecto observado através do telescópio.

O poder colector, esse, mede a quantidade de luz captada pelo telescópio.

⁽¹⁾ Na luneta de Galileu esta lente é divergente. Nos telescópios refractores que se lhe seguiram, a ocular é uma lente convergente.

Esta última função é a mais importante, pois permite a observação de objectos de fraca intensidade. Obviamente que o poder colector será tanto maior, quanto maior for o diâmetro da objectiva, o que acarreta o aumento do tamanho do telescópio.



Figura 3.2 – Representação de uma das primeiras demonstrações de Galileu com a sua luneta.

O aperfeiçoamento no fabrico de lentes possibilitou a construção de telescópios de grandes dimensões, ainda durante o século XVII. No entanto, subsistiam dificuldades com o seu manuseamento e com a eliminação de aberrações, o que motivou os estudiosos na procura de alternativas. Entre esses estudiosos encontrava-se Isaac Newton.

A 11 de Janeiro de 1672, Newton apresenta o primeiro telescópio reflector. A principal inovação residia no facto de a entidade colectora ser um espelho côncavo, em vez de uma lente convergente. O engenho de Newton na orientação da luz, no interior do tubo óptico, permitiria ainda a redução significativa do tamanho do telescópio.



Figura 3.3 – Réplica do Telescópio de Newton.

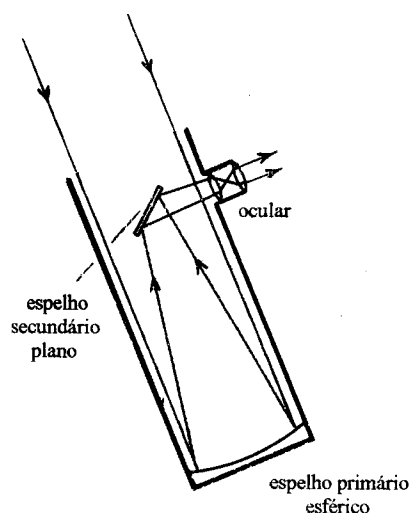


Figura 3.4 – Trajecto da luz no interior do telescópio newtoniano.

No mesmo ano, Nicolas Cassegrain apresenta a sua versão de telescópio reflector, no qual o espelho secundário é um espelho hiperbólico convexo.⁽¹⁾

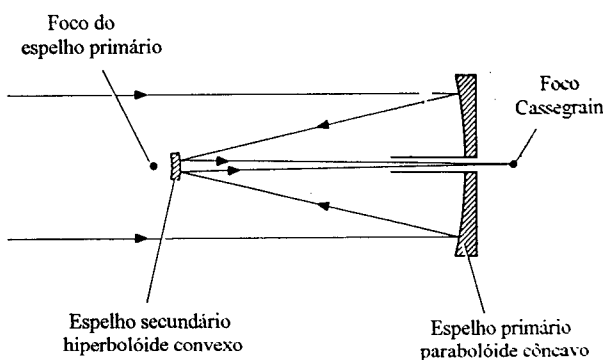


Figura 3.5 – Sistema óptico do telescópio Cassegrain.

No século seguinte, William Herschell construiria o mais potente instrumento óptico até então conhecido – um telescópio reflector de 12 m de comprimento e 1,2 m de diâmetro. As observações que com ele realizou, conferiram-lhe o estatuto de fundador da Astronomia Estelar.

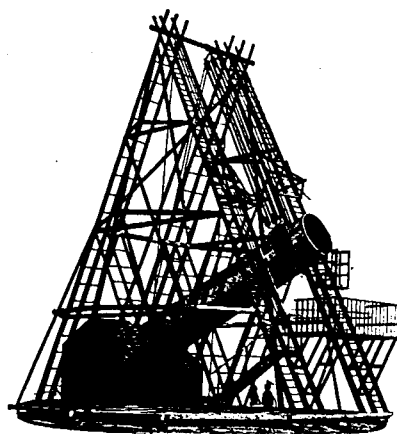


Figura 3.6 – Telescópio de Herschell.

Apesar do telescópio de Herschell, a preferência dos astrónomos continuou a recair nos telescópios refractores. Efectivamente, os telescópios reflectores também não estavam isentos de inconvenientes. O pouco desenvolvimento no fabrico de espelhos terá contribuído decisivamente para a secundarização a que aqueles telescópios foram votados. A situação inverter-se-ia no final do séc. XIX.

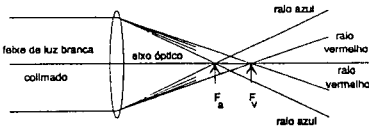
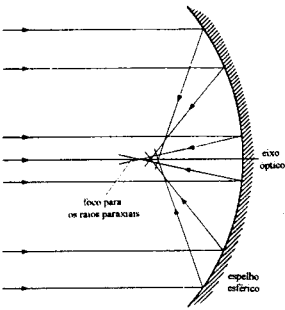
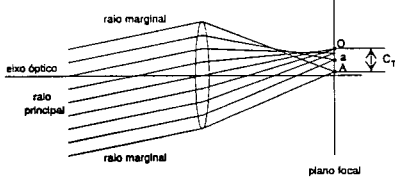
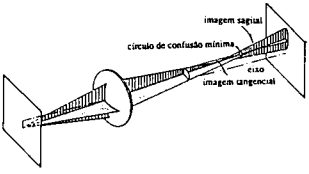
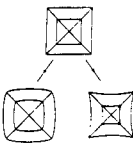
Nos quadros comparativos 3.1 e 3.3, é possível analisar as vantagens e inconvenientes dos dois tipos de telescópios, bem como a forma de correcção de distorções e aberrações, ilustradas no quadro 3.2, numa perspectiva actual.

⁽¹⁾ Actualmente, a maior parte dos telescópios ópticos são reflectores do tipo Cassegrain.

Quadro Comparativo 3.1 – Vantagens e Inconvenientes dos telescópios refractores e reflectores.

	Telescópio	
	Refractor	Reflector
Vantagens	• São resistentes • Pouco sensíveis a deslocamentos casuais da objectiva. • A superfície da lente não está em contacto com a atmosfera, pelo que raramente necessita de ser limpa. • Garante maior estabilidade da imagem, devido ao facto de o sistema óptico estar isolado do exterior.	• Não há aberração cromática • Os espelhos podem ter grandes dimensões, porque são suportados pela base. • Envolvem custos financeiros menores. • Precisam apenas de uma superfície polida.
Inconvenientes	• Aberração cromática • Nem toda a radiação atravessa a lente; depende do comprimento de onda. • O aumento da espessura da lente, aumenta a ocorrência de desvios transversais dos raios luminosos no interior da lente; provoca aberração esférica. • É difícil construir lentes sem imperfeições e com curvatura exactamente igual de ambos os lados. • A objectiva é suportada apenas nas extremidades, o que dificulta o seu manuseamento.	• O desalinhamento da óptica é de fácil ocorrência. • Nos telescópios de maiores dimensões, o tubo do telescópio é aberto e, por isso, a óptica necessita de limpeza frequente. • Sendo a luz redireccionada para o foco, através do espelho secundário, este introduz novos efeitos de difracção. • O espelho é particularmente sensível à variação das condições térmicas.

Quadro Ilustrado 3.2 – Aberrações e distorções que afectam as imagens obtidas por telescópios.

Aberrações e Distorções		
Telescópios	Esquema Ilustrativo	Notas Explicativas
Refractor	Aberração Cromática 	A aberração cromática ocorre pelo facto de o índice de refração do meio óptico variar com o comprimento de onda da radiação incidente. Como a distância focal é diferente para cada cor, as imagens associadas às diferentes cores formam-se em planos ligeiramente diferentes. Sendo assim, as imagens obtidas apresentam contornos coloridos.
Refractor e Reflector	Aberração Esférica 	Os raios luminosos incidentes são focados de acordo com a sua distância ao eixo óptico. Os raios luminosos que incidem perto do eixo principal (raios paraxiais) são focados num ponto (foco paraxial) e os restantes são focados a uma distância menor. A imagem resultante é uma mancha luminosa de forma circular.
Refractor e Reflector	Coma 	O objecto não se encontra na direcção do eixo óptico. O feixe de raios luminosos paralelos incide obliquamente, intersectando-se em pontos distintos do plano focal. A imagem apresenta uma forma semelhante à da cauda de um cometa.
Refractor e Reflector	Astigmatismo 	O objecto luminoso encontra-se muito afastado do eixo óptico. Os diferentes planos de incidência da radiação correspondem a diferentes focos. Entre as imagens formadas (tangencial e sagital) situa-se o círculo de confusão mínima, onde a imagem é mais nítida.
Refractor e Reflector	Curvatura do Campo	A imagem é focada numa superfície curva.
Refractor e Reflector	Distorção do Campo 	A ampliação da imagem não é uniforme, devido ao facto de os diferentes pontos se situarem a diferentes distâncias do eixo óptico. Este efeito só é importante, quando são observadas vastas áreas do céu.

Quadro Comparativo 3.3 – Correção de aberrações e distorções em telescópios.

	Telescópio	
	Refractor	Reflector
Aberração Cromática	O uso de lentes acromáticas reduz este efeito.	
Aberração Esférica	Corrige-se com lentes cujas faces não tenham curvatura constante.	Corrige-se com espelhos parabólicos.
Coma	A correção é efectuada, usando-se uma associação adequada de lentes e/ou trabalhando a superfície do espelho.	
Astigmatismo	Corrige-se, usando uma combinação de lentes acopladas à lente principal.	É significativo nos espelhos parabólicos. A correção é efectuada usando-se uma combinação de lentes, próximas do espelho secundário.
Curvatura do Campo	Ocorre sempre que o astigmatismo é totalmente removido.	
Distorção do Campo	A correção é efectuada, colocando-se sucessivas lentes depois da objectiva	A correção é conseguida, colocando-se a lente antes do plano focal.

O aperfeiçoamento destes valiosos instrumentos conduziu à construção de telescópios com características refractoras e reflectoras. No modelo de Bernard Schmidt, de 1930, o sistema óptico do telescópio é constituído por um espelho esférico e uma lente correctora. A lente é colocada no centro de curvatura do espelho, corrigindo a radiação e consequentemente a aberração esférica⁽¹⁾. O campo efectivo de visão é deste modo mais alargado e as distorções, provocadas pelo astigmatismo e coma, são menores. Os telescópios que utilizam este sistema óptico são denominados telescópios Schmidt.

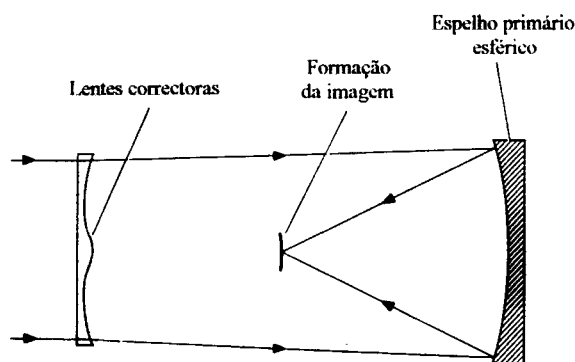


Figura 3.7 — Sistema óptico idealizado por Schmidt.



Figura 3.8 – Telescópio de Schmidt.

O telescópio Schmidt utiliza como detector a chapa fotográfica, a qual, quando convenientemente moldada, corrige ainda a curvatura do campo.

O uso da chapa fotográfica nos telescópios revolucionou o processo de detecção. A invenção da fotografia suscitou grande interesse junto dos astrónomos, pois de imediato lhe reconheceram propriedades de crucial importância para a observação astronómica, que não estavam ao alcance da visão humana.

A capacidade de registar diversos objectos em simultâneo, a fidelidade na reprodução e a permanência da imagem, são apenas algumas das propriedades que seduziram os astrónomos. Um dos maiores entusiastas desta técnica foi o físico e astrónomo Dominique Arago, que aquando da descoberta da fotografia, era o director das observações astronómicas do Observatório de Paris.

Desde a construção da câmara escura por Della Porta, em 1553, que se manifestara o interesse em fixar as imagens nela projectadas, mas as tentativas efectuadas pelos seus utilizadores, sobretudo pintores e desenhadores, resultaram infrutíferas. Paralelamente, mas sem qualquer ligação com estas

⁽¹⁾ Repare-se que, nos telescópios refractores, a função da lente é meramente a de focar a radiação.

tentativas, desenvolviam-se estudos sobre os possíveis efeitos químicos da luz, comprovados, segundo E.Hoppe⁽¹⁾, por Giorgius Fabricius, em 1566, ao verificar a acção da luz sobre o cloreto de prata. Mas, somente no início do século XIX, seriam efectuadas experiências conducentes a fixar as imagens formadas pela câmara escura, usando nitrato de prata ou cloreto de prata. Embora sem sucesso, estava dado o primeiro passo para a conjugação da produção de imagens e do seu registo por meio químico. Seria o químico Nicéphore Niepce que, em 1826, conseguiria esse feito. O seu processo fotográfico foi posteriormente melhorado, de forma significativa, pelo pintor Jacques Daguerre.

Por intermédio de Arago, Daguerre apresenta à Académica das Ciências de Paris, em 1839, o seu processo fotográfico — o daguerreótipo. O daguerreótipo rapidamente se popularizou, tendo sido sujeito nos anos subsequentes a sucessivos aperfeiçoamentos.

A obtenção de um daguerreótipo exigia uma placa de cobre muito limpa e polida, cujas dimensões estavam de acordo com as da câmara escura. Precedendo a colocação da placa na respectiva câmara, a sua superfície, coberta de prata, era exposta a vapores de iodo, formando-se sobre ela iodeto de prata. Após o tempo de exposição considerado conveniente, geralmente dez a quinze minutos, a placa era retirada e sujeita a vapores de mercúrio, para que a imagem fosse revelada. Seguia-se a lavagem a quente, com solução de cloreto de sódio, para remover o iodeto de prata sobranete. No daguerreótipo, as partes claras eram devidas ao mercúrio e as partes escuras, à prata.

O contraste claro-escuro no daguerreótipo era deficiente e a observação nítida da imagem só era possível em determinadas posições, relativamente à luz, devido ao espelhamento dos dois metais. Para além disso, a imagem acabava por desaparecer por atrito.

Hippolyte Fizeau resolveu este problema, ao utilizar como solução de lavagem tiosulfato de sódio com 2% de cloreto de ouro.

O tempo de exposição era outro dos inconvenientes. A descoberta de substâncias mais sensíveis à luz que o iodeto de prata, resolveu igualmente esta dificuldade. Fizeau e Foucault descobriram que o emprego de brometo de iodo reduzia substancialmente o tempo de exposição. Utilizando esta técnica, Fizeau e Foucault fotografaram o Sol pela primeira vez, em 1845 — o ano do apogeu do daguerreótipo.

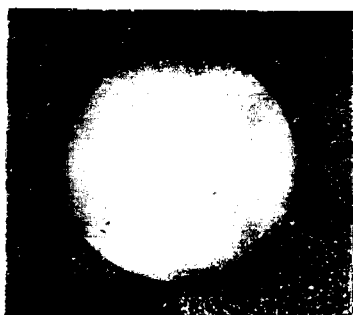


Figura 3.9 – Daguerreótipo do Sol realizado por Fizeau e Foucault.

⁽¹⁾ Hoppe E., Histoire de la Physique, Paris, 1928.

O processo fotográfico evoluiu rapidamente. Até ao fim do século XIX, foram efectuadas fotografias da Lua e do Sol e dos seus respectivos eclipses, de planetas, de estrelas e de constelações, de nebulosas e de cometas. A fotografia tornou-se uma ferramenta indispensável para a investigação astronómica.

A cor na fotografia astronómica deleita e fascina o observador comum. Para o astrónomo, ela constituiu também uma fonte de informação dos objectos celestes observados.

Os filmes geralmente usados na fotografia a cores incorporam, pelo menos, três emulsões de haletos de prata sensíveis às cores primárias da luz — o azul, o verde e o vermelho. Devido à correlação existente entre a cor e a temperatura, a escolha das emulsões com vista à correcta reprodução da cor do objecto, deverá considerar este aspecto. Embora de fácil utilização, estes filmes apresentam diversas limitações.

O primeiro processo de formação de imagem a cores foi apresentada por James C. Maxwell, em 1861. A técnica de Maxwell consistia basicamente em fotografar o objecto três vezes, sucessivamente com luz vermelha, verde e azul. A partir dos negativos resultantes, eram produzidos três positivos, a preto e branco. Os positivos assim formados eram projectados num écran branco, através de filtros de cor vermelha, verde ou azul. Por sobreposição, obtinha-se a imagem colorida.

A técnica de Maxwell é ainda uma referência na actualidade. A prova-lo está o trabalho desenvolvido pelo cientista David F. Malin e a sua equipa⁽¹⁾.

Uma chapa fotográfica pode registar imagens de centenas de milhar de estrelas e galáxias; porém, além de a sua análise ser morosa, a qualidade de informação obtida é inferior à que resultaria da utilização, por exemplo, de fotomultiplicadores e CCDs (do inglês Charge-Coupled Devices).

Os fotomultiplicadores são dispositivos cujo princípio de funcionamento assenta no efeito fotoeléctrico. Estes detectores são constituídos por um conjunto de fotocátodos associados em série (Fig. 3.10). A radiação ao incidir no cátodo extrai electrões da sua superfície. Os electrões removidos dirigem-se para o dínodo mais próximo, provocando a extracção de outros electrões. Por sua vez, estes electrões vão embater no dínodo seguinte, que se encontra a um potencial mais elevado, provocando o mesmo efeito, e assim sucessivamente até ser atingido o ânodo. Em consequência deste processo em cadeia, chegam ao ânodo milhões de electrões. O sinal de saída é então medido e registado, correspondendo com grande precisão à intensidade da luz que incide no fotocátodo.

Em presença de demasiada luz, o fotomultiplicador é facilmente danificado. O mesmo não sucede com o dispositivo de transferência de carga ou CCD, que mesmo quando é exposto directamente à luz solar não sofre qualquer dano.

Os CCDs tiveram o seu advento na década de 1970 tendo, desde logo, alcançado a preferência dos astrónomos.

⁽¹⁾ David F. Malin, "A Universe of Colour", Scientific American, August 1993, page 58.

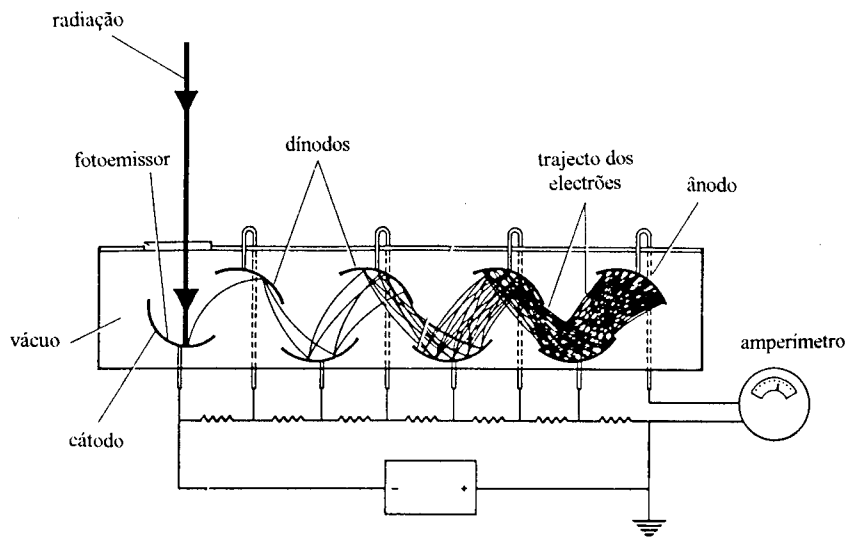


Figura 3.10 — Esquema de um fotomultiplicador.

A base de funcionamento dos CCDs também é o efeito fotoelétrico. Estes detectores são constituídos por uma superfície de díodos de silício, colocados sobre uma base de eléctrodos metálicos. O funcionamento de um CCD engloba duas fases: a fase de integração e a fase de leitura.

Na fase de integração, a radiação que incide no detector excita os electrões do material semiconductor. Estes electrões são, por sua vez, atraídos pelos eléctrodos positivos que se encontram sob cada elemento imagem ou pixel do CCD (Fig. 3.11). Como a camada isoladora impede os electrões de atingirem os eléctrodos, eles ficam armazenados nessa área durante o tempo de exposição.

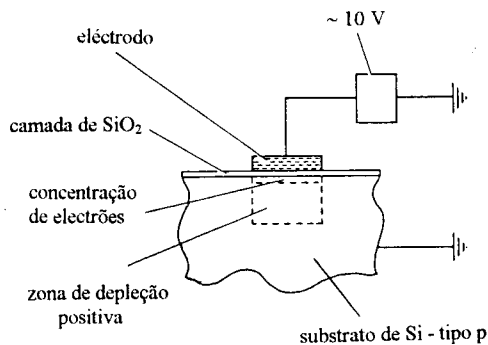


Figura 3.11 — Unidade base de um CCD.

O número de electrões armazenados é assim directamente proporcional à intensidade da luz incidente.

Após a integração, segue-se a fase de leitura que tem por finalidade determinar o número de electrões armazenados em cada pixel. Para que o processo de leitura se efective, é necessário estimular a ondulação do potencial positivo ao longo dos eléctrodos de cada linha e coluna de pixels. As variações de voltagem possibilitam a transferência de carga entre os pixels sem que ocorram perdas significativas.

O quadro seguinte descreve algumas particularidades dos detectores acima referidos.

Quadro Comparativo 3.4 – Parâmetros que avaliam a qualidade de um detector.

	Detectores		
	Chapa Fotográfica	Fotomultiplicador	CCD
Eficiência Quântica — Representa o quociente entre o número de fótons detectados e o número de fótons incidentes. O valor obtido é sempre inferior à unidade.	O valor médio é de cerca de 0,1% ; em chapas hipersensíveis pode atingir 0,8%.	O valor médio é de 30%	O valor médio é de 80%
Resposta Espectral — Corresponde à variação da sensibilidade do detector com o comprimento de onda da radiação incidente.	A sensibilidade espectral situa-se entre ~ 3000 Å e 1200 Å.	Boa resposta espectral na banda visível.	Boa resposta espectral na banda visível.
Resolução Espacial / Espectral — Relaciona-se com a capacidade que o detector tem de distinguir dois objectos numa imagem ou dois comprimentos de onda num espectro.	Apresenta a melhor resolução espacial. A resolução é função da emulsão usada.		
Linearidade e Ruído — Um detector é dito linear quando o número de fótons registado é proporcional ao número de fótons incidentes. — O ruído está associado à qualidade do sinal detectado. O ruído fotónico é determinado em função do número de fótons detectado.	A linearidade ocorre, quando a chapa está correctamente exposta.	É linear. Ruído praticamente nulo.	É linear. O ruído de leitura é elevado.

As chapas fotográficas são também usadas como detectores em espectroscópios – os espectrógrafos⁽¹⁾. Estes aparelhos permitem a observação e análise do espectro da luz que neles penetra. O elemento dispersor usado nos primeiros espectroscópios era um prisma de vidro ou de quartzo.

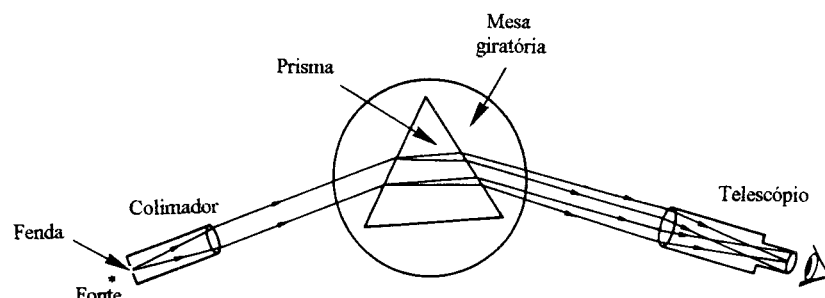


Figura 3.12 – Esquema do trajeto da luz no interior de um espectroscópio que usa como elemento dispersor um prisma.

Recorde-se que foi precisamente com um prisma de vidro que Isaac Newton decompôs, pela primeira vez, a luz branca obtendo o leque de cores que constitui o arco-íris. O espectro assim formado mostra que a luz branca é constituída por radiações monocromáticas, que experimentam diferentes velocidades ao atravessarem o vidro. Os espectroscópios actuais utilizam como elemento dispersor redes de difracção, cujo princípio de funcionamento assenta nos fenómenos de difracção e interferência da luz.

O século XIX traria novos desenvolvimentos à descoberta de Isaac Newton. Em 1802, William Wollaston reparou na existência de pequenas discontinuidades no espectro da luz visível, até então considerado contínuo. Mas seria Joseph Fraunhofer que, em 1814, com o seu espectroscópio, identificaria, sem margem para dúvida, riscas escuras no espectro solar. No decurso do seu estudo, Fraunhofer indentificou cerca de seiscentas riscas no espectro da luz solar. Hoje, são conhecidas muitas mais. Estas linhas são designadas *linhas de Fraunhofer* ou simplesmente *linhas espectrais*.

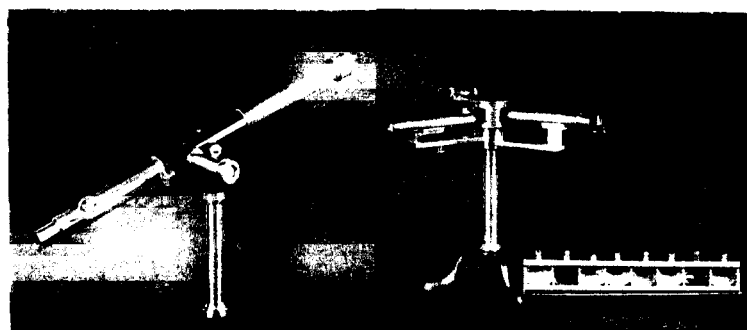


Figura 3.13 – Espectroscópios.

⁽¹⁾ Quando o registo é fotoeléctrico, o espectroscópio é denominado espectrómetro.

Os trabalhos dos físicos Robert Bunsen e Gustav Kirchhoff revelar-se-iam decisivos na interpretação das linhas de Fraunhofer. Graças ao queimador inventado por Bunsen, que reproduzia uma chama praticamente incolor, foi possível observar diferentes substâncias químicas, emitindo luz de diferentes cores, quando aquecidas.

Os resultados da análise dos espectros da luz emitida por substâncias aquecidas no bico de Bunsen foram surpreendentes. Cada espectro era constituído por um conjunto de riscas coloridas bem individualizadas. Além disso, não eram obtidos espectros iguais de substâncias diferentes.

Na sequência das suas experiências, Bunsen e Kirchhoff deduziram, em 1859, que cada elemento emite, em certas condições, um determinado espectro que lhe é característico.

Kirchhoff descobriu, também, que determinadas porções de luz eram absorvidas pelo vapor de sódio, quando aquela o atravessava, escurecendo algumas das linhas já presentes no espectro. Constatou ainda que não era apenas com o vapor de sódio que isto se verificava; qualquer substância produzia efeitos idênticos, desde que a temperatura do seu vapor fosse inferior à da fonte luminosa. Curiosamente, as riscas escuras no espectro de absorção correspondiam às linhas brilhantes, presentes no espectro de emissão correspondente.

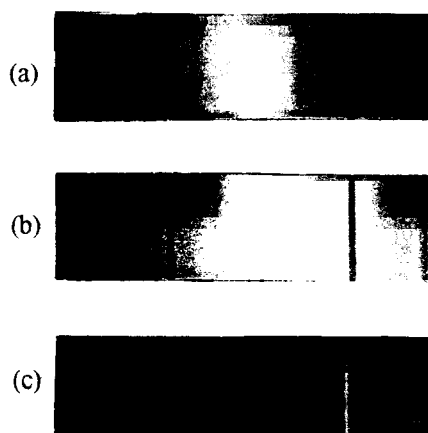


Figura 3.14 – Espectro contínuo (a), espectros de riscas de absorção (b) e de emissão (c).

Estava assim descoberto um método de análise extraordinariamente promissor – a espectroscopia.

Fazendo uso deste método, Angstroem, em 1826, verificou que algumas das riscas de Fraunhofer coincidiam exactamente com as linhas escuras que eram produzidas, quando a luz atravessava uma amostra de hidrogénio, nas condições descritas por Bunsen e Kirchhoff. Angstroem concluiu que existia hidrogénio no Sol.

Seis anos mais tarde, era descoberto no Sol um elemento cuja existência na Terra se desconhecia. Lockyer deu-lhe o nome de hélio. Só em 1895, o hélio seria encontrado na Terra num minério uranífero. No ano seguinte, a sua presença era detectada na atmosfera terrestre.

As estrelas apresentam geralmente um espectro contínuo, intercalado por numerosas riscas espectrais correspondendo, na sua maior parte, a absorções; mas é igualmente comum a presença de riscas de emissão. As particularidades observadas nos espectros estelares, nomeadamente no que concerne à intensidade do brilho, nitidez e número de riscas, estão relacionadas com a diferença e diversidade das propriedades físicas e químicas das estrelas. O primeiro astrónomo a analisar o espectro de estrelas foi Ângelo Secchi. No período compreendido entre 1863 e 1868, Secchi, utilizando espectroscópios visuais, estudou os espectros de cerca de 4000 estrelas e agrupou-as em quatro classes.

A publicação da obra de Secchi despertou imenso interesse junto da comunidade astronómica. Nos anos que se seguiram, e graças ao sucesso verificado no registo fotográfico de espectros, muitos astrónomos passaram a dedicar-se à sua análise, com destaque para Annie Jump Cannon e a sua equipa, no Observatório de Harvard. Neste observatório foram classificadas cerca de 225000 estrelas, usando um sistema concebido por Annie Cannon, que se baseava na relação entre as intensidades de determinadas riscas espectrais, especialmente as riscas do hidrogénio. Este imenso trabalho foi publicado entre 1918 e 1924, sob a designação de Catálogo de Henry Draper.

A classificação de Harvard tornou-se uma referência, tendo sido inclusivamente a base da actual classificação de espectros estelares ⁽¹⁾.

O estudo minucioso dos espectros dos corpos celestes permite a obtenção de variadíssimas informações. A título de exemplo, refiram-se alguns dados objectivos, que podem ser determinados por este processo: composição química, temperatura, densidade, intensidade do campo magnético e movimento do corpo celeste. Este último aspecto, baseia-se no desvio Doppler das linhas espectrais e constitui uma das mais eficazes aplicações da espectroscopia.

Verifica-se que, sempre que uma fonte emissora se move em relação a um observador, ocorre um desvio nas riscas espectrais dessa fonte, que é directamente proporcional à velocidade com que o corpo emissor se afasta ou aproxima do observador. O afastamento é traduzido pelo deslocamento das riscas espectrais no sentido do vermelho (maiores comprimentos de onda) e, no caso contrário, no sentido do azul (menores comprimentos de onda).

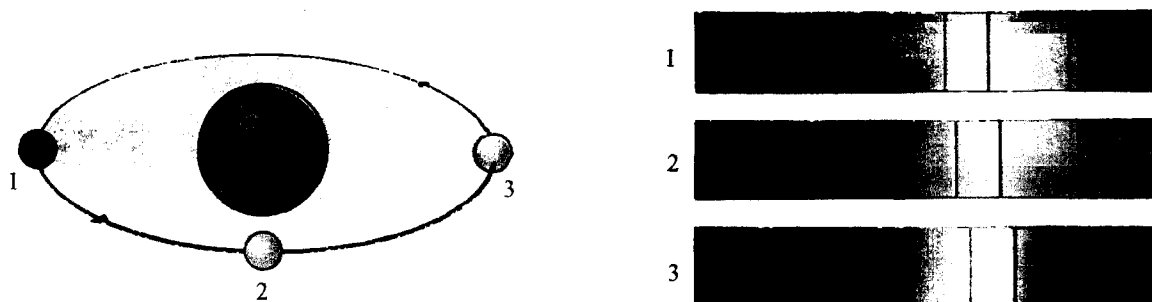


Figura 3.15 – Movimento da estrela de menor massa constituinte de um sistema binário. O seu movimento é revelado pelo desvio de Doppler: estrela movendo-se em direcção à Terra (1), posição em que não se afasta nem se aproxima (2) e a estrela afastando-se da Terra (3).

⁽¹⁾ Ver apêndice A

O efeito Doppler pode ser representado pela expressão matemática

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_o} = \frac{v_r}{c}$$

em que

$\Delta\lambda$ é a diferença entre o comprimento de onda observado (λ_{obs}) e o comprimento de onda que seria observado se a fonte estivesse em repouso (λ_o);

v_r é a velocidade radial de fonte, medida ao longo da linha de visão que une a fonte ao observador e

c é a velocidade da luz, no vácuo.

A análise do desvio das riscas espectrais tem proporcionado aos astrónomos importantes revelações, como por exemplo: a identificação de binários de estrelas, a compreensão da dinâmica das novas, a constatação do movimento dos gases quentes na superfície solar, a evidência do movimento de rotação do Sol, o estudo dos anéis de Saturno, a detecção de planetas extrasolares e a indicação de que os quasares são corpos extremamente distantes e em rápido movimento de recessão. Efectivamente, os astrónomos dispõem, actualmente, de técnicas espectroscópicas que lhes permitem analisar a luz em todas as suas vertentes.

Os estudos em torno do espectro do corpo-negro conduziram a importantes descobertas; entre elas, conta-se o estabelecimento das leis da radiação, que traduzem a relação existente entre a temperatura de um corpo e a radiação que emite.

As leis da radiação aplicam-se a um corpo-negro e a corpos que, embora de forma aproximada, com ele se identificam, como é o caso das estrelas.

A interpretação do espectro do corpo-negro constituiu um autêntico quebra-cabeças para os físicos. Em 1879, Joseph Stefan demonstrou que a energia total emitida pelo corpo-negro aumentava proporcionalmente à quarta potência da sua temperatura absoluta. Mais tarde, em 1894, Wilhelm Wien evidenciou que o comprimento de onda para o qual o poder emissivo era mais intenso, era inversamente proporcional à temperatura absoluta do corpo-negro.

As leis de Stefan e de Wien referem-se apenas a determinadas características da curva de energia espectral do corpo-negro. Foi necessário esperar por Max Planck e pela sua lei da radiação. A lei da radiação de Planck é a mais geral e a que traduz plenamente a curva de radiação do corpo-negro.

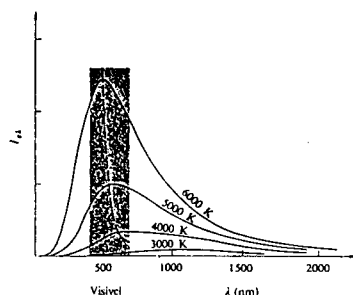


Figura 3.16 – Curvas de radiação do corpo negro.

A aplicação de qualquer uma destas leis ao Sol permite a determinação da sua temperatura superficial; embora, como seria de esperar, os valores obtidos não sejam exactamente concordantes. Concretamente, com a lei de Wien, verifica-se que o máximo de intensidade da luz solar situa-se na região azul-verde do espectro; a localização precisa do comprimento de onda permite a determinação da temperatura superficial do Sol — a sua temperatura de cor, T_c .

$$T_c = \frac{c}{\lambda_{\max}}$$

em que

c é uma constante, de valor 0,2898 cm.K e

$\lambda_{\max}$, o comprimento de onda correspondente ao máximo de intensidade da luz, expresso em centímetros.

Mas o Sol não emite somente na região visível do espectro electromagnético. Este astro emite todas as formas de energia radiante; porém, à superfície da Terra chegam apenas ondas de rádio e pequenas porções de radiação ultravioleta e infravermelha, para além da já referida luz visível.

Tabela 3.1 — Espectro electromagnético e a atmosfera terrestre.

Região do espectro	Comprimento de onda	Passagem da radiação através da atmosfera terrestre
Raios Gama	$< 10^{-11}$ m	Absorção parcial por N, O, N_2 , O_2 , O_3 e pelas outras moléculas de ar.
Raios X	10^{-11} a 10^{-8} m	Forte absorção por N, O, N_2 , O_2 , O_3 e pelas outras moléculas de ar.
Radiação Ultravioleta	10^{-8} a $3,1 \times 10^{-7}$ m	Absorção pelas moléculas de ar.
	$3,1 \times 10^{-7}$ a $3,9 \times 10^{-7}$ m	Fraca absorção.
Radiação Visível	$3,9 \times 10^{-7}$ a $7,6 \times 10^{-7}$ m	Transparente.
Radiação Infravermelha	$7,6 \times 10^{-7}$ a $1,5 \times 10^{-5}$ m	Faixas de absorção molecular por H_2O , CO_2 entre outras.
	$1,5 \times 10^{-5}$ a 10^{-3} m	Forte absorção molecular.
Ondas de Rádio	$> 10^{-3}$ m	Transparente numa faixa compreendida entre 1 cm e 20 m e para as ondas de 1 mm, 4,5 mm e 8 mm.

Muitos outros corpos celestes emitem também em diversos comprimentos de onda não visíveis. O desenvolvimento das técnicas de observação, durante o século XIX, possibilitou a observação desses corpos celestes em todas as frequências, proporcionando importantes conquistas no conhecimento do Universo. Foram construídos telescópios astronómicos, especificamente para cada região do espectro electromagnético — telescópios de infravermelho e de ultravioleta, de raios X, de raios γ e radiotelescópios.

O primeiro radiotelescópio foi construído por Globe Reber, em 1936. Os radiotelescópios recolhem e medem a energia das ondas rádio. Basicamente, um telescópio que opera na banda rádio, consta essencialmente de uma antena e de um radiorreceptor. A antena colecta a radiação que depois é transformada em sinal eléctrico. Este sinal eléctrico é então ampliado, detectado e integrado em tempo e frequência, sendo por último registado.



Figura 3.17 – Radiotelescópio.

Embora os radiotelescópios possam efectuar observações desde a superfície da Terra, a qualquer hora do dia ou da noite, apresentam, no entanto, pequenas resoluções angulares, quando comparadas com as obtidas pelos telescópios ópticos, visto que o poder resolvente diminui com o aumento do comprimento de onda. De facto, duas fontes pontuais só são distinguidas, se estiverem separadas por um ângulo (medido em radianos) superior a α ,

$$\alpha = \frac{1,22\lambda}{D}$$

em que

α é a distância angular mínima entre as duas fontes ou poder resolvente, em radianos;

λ é o comprimento de onda em que é efectuada a observação, em metros e

D é o diâmetro do telescópio, em metros.

É certo que a resolução pode ser melhorada, aumentando o diâmetro do telescópio; porém, não é fisicamente possível o fabrico de discos parabólicos suficientemente grandes para proporcionarem boas

resoluções. Os astrónomos resolveram esta limitação, recorrendo à interferometria. Esta técnica de observação consiste basicamente em colocar dois ou mais radiotelescópios de tamanho médio, distando entre si vários quilómetros, a operarem conjuntamente no estudo de um mesmo corpo emissor de rádio.

A situação mais simples envolve duas antenas orientáveis, separadas por uma dada distância, denominada base do interferómetro. As antenas colectam a radiação da mesma fonte, e os sinais eléctricos, por elas transmitidos, são conduzidos para um receptor comum, onde ocorrem interferências. Estas interferências podem ser construtivas ou destrutivas, dependendo do desfasamento temporal, verificado na recepção das ondas de rádio por cada telescópio. A resolução angular resultante é equivalente à que seria obtida por um hipotético disco parabólico, com um diâmetro igual à base do interferómetro.

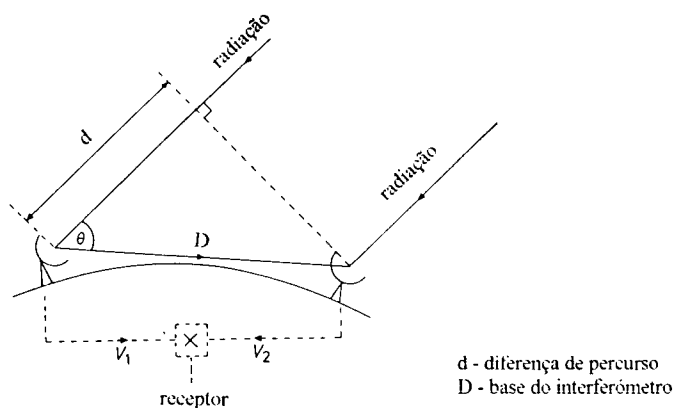


Figura 3.18 – Esquema de um radiointerferómetro de duas antenas.

A radiointerferometria apresenta outras vantagens, como o aumento do poder colector e a localização exacta das fontes rádio. Contudo, mesmo os melhores radiointerferómetros são inadequados para estudar corpos distantes, pelo que foi criada a Interferometria de Linha de Base Muito Longa (VLBI - Very Large Baseline Interferometry). Este tipo de interferometria é idêntico ao anterior, mas a distância entre os radiotelescópios é muito maior, chegando a atingir milhares de quilómetros. Os radiotelescópios que participam nesta técnica são independentes, existindo uma unidade que efectua a coordenação da observação obtida em cada telescópio. Embora a combinação em tempo real seja inviabilizada, verifica-se um aumento significativo do poder resolvente, devido às linhas de base muito longas. Efectivamente, esta técnica permite a obtenção de resoluções da ordem de grandeza de milionésimos de segundos de arco, valor que ultrapassa em muito as resoluções alcançadas por telescópios ópticos e, obviamente, a resolução de radiotelescópios singulares. Presentemente, está em curso a execução de VLBI, usando toda a superfície terrestre, o que proporciona uma base igual ao diâmetro da Terra.

As observações efectuadas à superfície da Terra com telescópios ópticos são afectadas pela turbulência e absorção atmosférica. A cuidadosa escolha na localização dos telescópios melhora a qualidade óptica da imagem, mas a observação de objectos celestes que emitam em bandas de radiação

absorvidas pela atmosfera, só é conseguida colocando os telescópios fora da sua acção. Os observatórios aerotransportados podem levar os telescópios até altitudes de cerca de vinte quilómetros, recolhendo aí informações mais vastas na região infravermelha. Balões cheios de hélio ascendem a altitudes próximas de cinquenta quilómetros, transportando instrumentos que efectuem medições nas bandas infravermelha e ultravioleta. Os foguetões de sondagem, ao poderem atingir os cem ou mais quilómetros de altitude, detectam facilmente os raios X.

No final da década de 1950, foram lançados os primeiros satélites destinados à exploração astronómica. Desde então, potentes e sofisticados telescópios têm sido elevados a altitudes em que é possível registar informações em todos os comprimentos de onda do espectro electromagnético.

A radiação gama apresenta os comprimentos de onda mais curtos do espectro electromagnético, sendo por isso a mais energética. Os raios gama foram identificados, pela primeira vez, pelo físico Paul Villard, em 1900, no decurso das suas experiências com substâncias radioactivas. Mas a origem cósmica só seria detectada por satélite, em 1967. Os raios gama resultam geralmente da desexcitação de núcleos atómicos, mas podem também ser produzidos por outros processos, entre os quais o da aniquilação matéria-antimatéria, o da colisão entre partículas, e pelo processo sincrotrão.

O Universo visto pelos raios γ afigura-se invulgarmente dinâmico. Sabe-se que os núcleos de galáxias extremamente activas são importantes fontes de raios γ . É actualmente aceite que a emissão gama dos núcleos destas galáxias é produzida pela acreção de gás num buraco negro massivo. Os raios X e os fotões ultravioleta que abundam no disco de acreção, são difundidos e projectados para as altas energias gama, por electrões extremamente rápidos. É igualmente provável que algumas emissões gama sejam produzidas nos jactos provenientes dos núcleos galácticos.

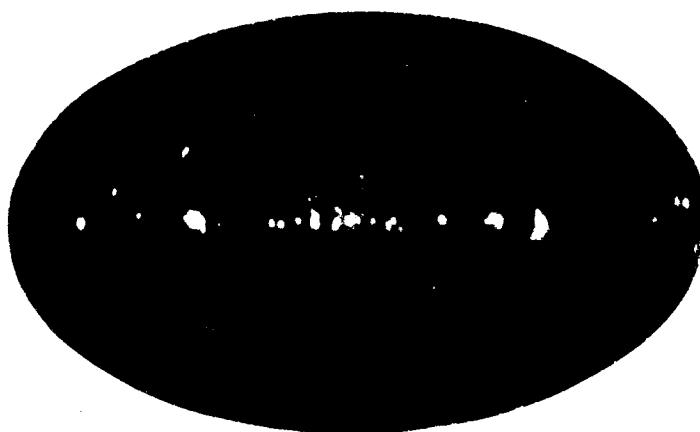


Figura 3.19 – Mapa do céu em raios gama.

A astronomia de raios gama tem sido particularmente útil, na localização de núcleos radioactivos, na identificação de locais onde os elementos estão a ser sintetizados e no estudo das estrelas de neutrões.

Várias fontes de raios gama são também bons emissores de raios X, como é o caso dos quasares e alguns pulsares. A descoberta dos raios X pelo físico Wilhelm Roentgen, em 1895, teve uma extraordinária repercussão no desenvolvimento de diversificadas áreas do conhecimento científico, entre as quais a Astronomia.

As observações no domínio dos raios X têm contribuído para o desenvolvimento do estudo das estrelas nas suas derradeiras etapas de evolução e, em particular, de supernovas e de sistemas binários de estrelas. A astronomia X tem também sido o principal veículo de investigação da possível existência de buracos negros.

No cosmos, os raios X são principalmente produzidos pela radiação térmica de um plasma, composto por electrões livres e núcleos atómicos, aquecido a temperaturas iguais ou superiores a um milhão de graus. As atmosferas exteriores das estrelas reúnem estas condições sendo, por isso, fontes emissoras de raios X. Como exemplo, observe-se o Sol: o mecanismo de produção de energia tem lugar no seu centro; as reacções nucleares de fusão que aí ocorrem libertam raios gama, que no seu trajecto até à superfície vão sofrendo interacções, das quais geralmente resulta a emissão de quanta de energias menores. Na região contígua ao centro do Sol, a energia transmite-se pelo processo radiativo, passando de seguida a ser transmitida por convecção. Finalmente, a radiação atinge a atmosfera solar que compreende a fotosfera, a cromosfera e a corona.

A fotosfera é a superfície visível do Sol, onde tem origem praticamente toda a radiação solar. Esta camada da atmosfera é a que apresenta a temperatura mais baixa (Fig. 3.20). Penetrando na cromosfera, a temperatura volta a subir. Esta região é muito turbulenta, multiplicando-se as manifestações da actividade solar, entre as quais se destacam as flares — explosões acompanhadas de libertação de energia e de partículas. Verifica-se que durante estas explosões há um aumento significativo da emissão de radiação ultravioleta, raios X e ondas de rádio, havendo também a emissão de radiação visível e, por vezes, de raios gama, que têm origem na interacção entre as partículas libertadas durante a explosão. A última camada da atmosfera solar — a corona — é extraordinariamente quente, rarefeita e sem limite exterior definido. A corona é transparente à radiação visível, que é difundida e polarizada pelos electrões livres que nela existem; emite ondas de rádio métricas e raios X, cuja emissão particularmente intensa a distingue.

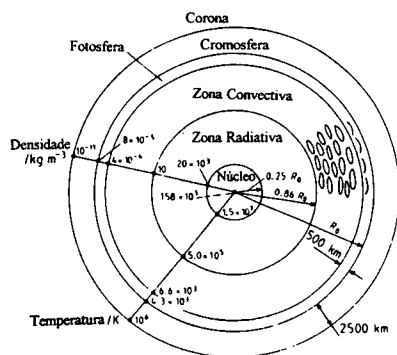


Figura 3.20 – Camadas do interior do Sol e da sua atmosfera.

A radiação cujos comprimentos de onda se situam entre os raios X e a banda visível é a radiação ultravioleta. Esta radiação invisível é conhecida desde 1801, e a sua descoberta é atribuída ao físico Johann Ritter.

Os raios ultravioletas fornecem importantes informações sobre a actividade energética dos astros. O emissor ultravioleta mais próximo da Terra é o Sol, sendo por isso o objecto preferencial de estudo. Porém, praticamente todo o tipo de objectos celestes têm sido estudados no domínio ultravioleta. Saliente-se o estudo de cometas, dos planetas gigantes, a observação do gás e poeira existentes entre as estrelas e galáxias, os ventos estelares cujo estudo tem contribuído para o estabelecimento de teorias sobre a origem e evolução estelar, o estudo da interacção de estrelas binárias, as supernovas e também quasares e galáxias activas.

Contígua aos raios ultravioletas situa-se a banda visível. A região visível é a faixa mais estreita do espectro electromagnético. Apesar disso, a astronomia óptica é especialmente importante sobretudo pela quantidade de informação que obtém do Universo, através de uma simples observação.

São inúmeros os corpos celestes estudados pela astronomia óptica. Entre esses objectos celestes saliente-se o Sol, a Lua e vários planetas, asteróides, cometas, estrelas, nebulosas e galáxias. As estrelas continuam a captar as atenções dos astrónomos ópticos, atendendo à sua repercussão na investigação das características da Galáxia.

Actualmente, é no campo dos estudos extragalácticos que a astronomia na banda visível se tem distinguido. Para lá da Via Láctea, os telescópios ópticos têm revelado um universo imenso, onde existe uma variedade de objectos.

Outra região do espectro electromagnético que tem contribuído para o conhecimento do Universo, é a que concerne à radiação infravermelha. Foi William Herschell que, em 1800, descobriu que o espectro da luz visível se prolongava para lá da extremidade vermelha. Posteriormente, em 1850, o físico Macedónio Malloni demonstraria que esta radiação invisível possuía todas as propriedades da luz branca, embora apresentasse comprimento de onda superior e não impressionasse o olho humano.

A astronomia infravermelha tem sido essencial no estudo de nuvens de poeira interestelar, visíveis nesta região do espectro. Intimamente associados às nuvens de poeiras estão os complexos moleculares. O estudo destas nuvens no infravermelho tem permitido aos astrónomos construir modelos de processos de formação estelar, assim como inferir a taxa de formação estelar dentro da Galáxia.

As estrelas recentemente formadas irradiam na banda infravermelha e as estrelas mais velhas, nomeadamente as gigantes vermelhas e as supergigantes, apresentam picos de emissão no infravermelho. Estas gigantes estão usualmente rodeadas por anéis de poeira, sendo esta que reemite o fluxo estelar no comprimento de onda infravermelho.

Aos telescópios de infravermelho deve-se igualmente a detecção de correntes de partículas em torno do sistema solar, a descoberta de cometas, entre outros registos de relevo para a Astronomia.

A elaboração de mapas detalhados de regiões nucleares da Galáxia tem também contribuído para o estudo desta activa região. Outras galáxias, sobretudo as activas, estão a ser estudadas nesta

região do espectro electromagnético.

Actualmente, um dos mais importantes campos de observação para os astrónomos de infravermelho longínquo, é a radiação cósmica de fundo, a reminiscência da origem do Universo.

Não obstante a importante contribuição dada pelas observações nas diferentes bandas do espectro electromagnético, já referidas, é à região das ondas de rádio que se deve os enormes progressos verificados na segunda metade do século XX.

As ondas de rádio foram decisivas na confirmação da teoria electromagnética de Maxwell. A sua produção laboratorial foi conseguida, pela primeira vez, por Heinrich Hertz, em 1888. Do ponto de vista astronómico, a primeira detecção de emissão rádio de origem cósmica ocorreu em 1931, por Karl Jansky.

As ondas de rádio e microondas têm a particularidade de atravessarem, sem qualquer dificuldade, a poeira interestelar e as atmosferas planetárias. Em consequência, a observação nestas bandas realiza-se a qualquer hora do dia ou da noite, e é totalmente indiferente às condições atmosféricas.

Os dados observacionais em radioastronomia são obtidos através da recolha da radiação rádio proveniente de fontes cósmicas, bem como pelo envio de impulsos de ondas de rádio para o espaço, que ao serem reflectidos pelos corpos celestes, regressam à Terra sendo então registados. Este último processo é um método de investigação que tem alcançado vários êxitos, como por exemplo, a determinação da distância a que Vénus se encontra da Terra, a determinação do período de rotação e do raio de Vénus, e a obtenção de radiomapas da sua superfície.

As emissões cósmicas de ondas de rádio podem ser o resultado da aceleração de partículas, com carga eléctrica, num gás quente e, neste caso, são designadas por emissões térmicas; mas podem também ser produzidas pela aceleração de partículas, carregadas electricamente por um campo magnético, sendo denominadas emissões não térmicas ou sincrotrão. Há ainda um outro tipo de emissão rádio: a das riscas espectrais, que é caracterizada por se concentrar numa estreita faixa, correspondente a um comprimento de onda específico.

A emissão rádio de riscas espectrais proporcionou a detecção de hidrogénio neutro no meio interestelar. A característica risca de 21 cm do átomo de hidrogénio foi prevista, teoricamente, em 1944, por Van der Hulst, mas a sua confirmação só ocorreria em 1951, pelos físicos de Harvard, H. Ewen e E. Purcell. A distribuição de hidrogénio neutro na Galáxia permite o estudo da sua estrutura em espiral e a estrutura das nuvens de hidrogénio nela existentes.

Diversas moléculas produzem igualmente riscas na banda rádio; pela sua importância, refira-se o monóxido de carbono, que emite no comprimento de onda 2,6 mm.

Corpos celestes como o Sol, a Lua e planetas próximos têm sido estudados na banda rádio.

A radioastronomia é também o método privilegiado para estudar os meteoritos que atravessam a atmosfera terrestre.

A descoberta dos pulsares veio confirmar a existência das estrelas de neutrões. O pulsar da

nebulosa do Caranguejo, que resultou da supernova que explodiu em 1504, é um bom exemplo. Mas, a mais importante descoberta efectuada pela radioastronomia terá sido, provavelmente, a dos quasares. Esta descoberta resultou da incessante procura de radioestrelas. Os quasares são as fontes de rádio mais intensas de que se tem conhecimento.

Os quasares e as radiogaláxias são objectos de estudo extremamente apelativos para os radioastrónomos. Observações ópticas do desvio para o vermelho das linhas espectrais mostram que estes objectos estão a retroceder a altas velocidades, implicando a existência de vastas distâncias cosmológicas.

Usando de todos os meios ao seu dispor, os astrónomos continuam a perscrutar os mistérios do Universo.

4. A COR

Millhões e milhões de astros
Dormiam há séculos
Na esperança da luz não os acordar.

José Gomes Ferreira, XVII em Memória - I

A cor constitui um meio de investigação praticamente inesgotável. Os astrónomos com os seus potentes e sofisticados telescópios observam todas as cores, recolhendo diversificadas informações sobre os corpos celestes.

Apesar da evolução científica a que se tem assistido nas últimas décadas, a capacidade que o ser humano tem de perceber cores distintas não está ainda cabalmente explicada. A visão humana está confinada a uma estreita banda do espectro electromagnético, compreendida entre cerca de 3800 e 7800 Å, sendo particularmente sensível às radiações de comprimento de onda, 5500 a 5700 Å (Fig. 4.1).

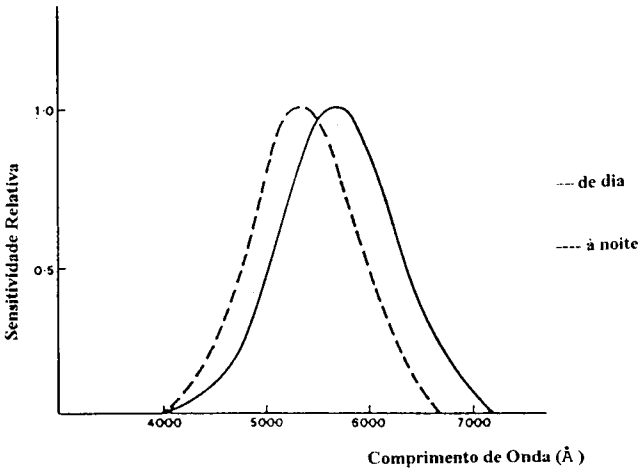


Figura 4.1 — Curvas de sensibilidade do olho humano à luz visível.

O órgão de visão é uma janela para o mundo, porém exígua para o Universo. Não obstante, mesmo a olho nu, é possível notar que as estrelas não apresentam uniformidade quanto à cor. A cor das estrelas está intimamente relacionada com a sua temperatura superficial, à semelhança do que sucede com um corpo negro.

Determinando o fluxo total emergente de uma estrela, isto é, a energia da radiação que atravessa um elemento de área unitária da superfície da estrela, por unidade de tempo, e combinando esta informação com a lei de Stefan-Boltzmann, obtém-se a temperatura efectiva da estrela, T_{ef}

$$T_{ef} = (f_{*} / \sigma)^{1/4}$$

em que

f_{*} representa o fluxo total emergente da estrela e

σ é a constante de Stefan-Boltzmann, $5,67 \times 10^{-6} \text{ erg.s}^{-1}.\text{cm}^{-2}.\text{K}^{-4}$.

A temperatura efectiva da estrela é assim definida como sendo a temperatura do corpo negro que emite um fluxo total igual ao fluxo total emergente da estrela.

Conhecendo as características do espectro de uma dada estrela e a sua temperatura efectiva, atribui-se-lhe uma classe ou tipo espectral.

A actual classificação de espectros estelares compreende uma sequência de dez classes, designadas pelas letras O, B, A, F, G, K, M, R, N, S, que corresponde a uma ordenação decrescente de temperatura efectiva. Cada uma das classes espectrais está ainda numericamente dividida em dez

subcategorias. Estas subdivisões são indicadas anexando um algarismo à letra que representa a classe espectral, desde o zero (temperatura mais elevada) até ao nove (temperatura mais baixa).

Conclui-se que a classes espectrais diferentes equivalem diferentes temperaturas efectivas, o que é visualmente indicado pela cor da estrela. O quadro 4.1 contém alguns exemplos.

Quadro 4.1 – Classes espectrais e temperatura efectiva

Classe Espectral	Cor	Temperatura Efectiva	Estrela (exemplos)
O	branco-azulado	$\geq 25000\text{ K}$	$\lambda\text{ Cep}$, 10 Lac
B	branco-azulado	11000 a 25000 K	$\beta\text{ Ori A}$, $\alpha\text{ Vir}$
A	branco	7500 a 10000 K	$\alpha\text{ CMa A}$, $\alpha\text{ Lyr}$
F	branco-amarelado	6000 a 7500 K	$\alpha\text{ Car}$, $\alpha\text{ CMi A}$
G	amarelo	5000 a 6000 K	Sol , $\alpha\text{ Aur}$
K	laranja	3500 a 5000 K	$\sigma\text{ Dra}$, $\alpha\text{ Tau}$
M	vermelho	$\leq 3500\text{ K}$	$\alpha\text{ Ori}$, $\alpha\text{ Sco A}$

Naturalmente que a análise rigorosa da cor das estrelas e das suas subtis variações não é efectuada visualmente, mas antes com recurso a instrumentação adequada. Os astrónomos actuais possuem dispositivos de observação, de detecção e de análise que lhes proporcionam informações inalcançáveis pelo olho humano.

A interacção da radiação com a matéria existente no meio interestelar e na própria atmosfera, constitui um dos obstáculos com que se defronta a astronomia óptica. A presença de matéria interestelar é muito menos óbvia do que a presença de estrelas. Efectivamente, trata-se de um meio predominantemente heterogéneo e globalmente pouco denso, constituído por gases e poeiras.

O advento da astronomia nas bandas de infravermelho e de rádio traria importantes desenvolvimentos no estudo da natureza do meio interestelar, pois verificou-se que as poeiras são transparentes a estas radiações. Actualmente, a astronomia interestelar é um dos domínios de pesquisa mais interessante e relevante para a compreensão do Universo.

As poeiras interestelares absorvem e difundem a luz das estrelas, o que se traduz pelo seu obscurecimento; este efeito conjunto é denominado extinção interestelar.

A extinção interestelar está intimamente relacionada com a espessura óptica do material que se interpõe entre a fonte emissora e o observador. Considerando a observação de uma estrela através da poeira interestelar, como está representado no esquema da fig. 4.2, a espessura óptica ao longo do percurso d , $\tau(d)$ é dada pela expressão

$$\tau(d) = \bar{n} \cdot C_{\text{ext}} \cdot d$$

em que

$\bar{n}$ é o número de grãos de poeira por cm^3 , ao longo do percurso d ;

C_{ext} , a área efectiva de extinção⁽¹⁾ e

d , a distância que separa o observador da estrela.

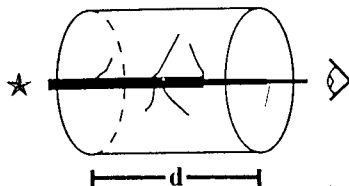


Figura 4.2 — Observação de uma estrela através da poeira.

A espessura óptica pode ser directamente relacionada com o decréscimo verificado na intensidade da luz. Assim, e para um dado comprimento de onda, λ ,

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\tau}$$

em que

I é a intensidade da radiação observada, num dado λ ;

I_0 , a intensidade na proximidade da fonte, no mesmo λ e

τ a espessura óptica.

A extinção interestelar é usualmente expressa em magnitudes

$$A = m - m_0$$

sendo:

A , a extinção interestelar ;

m , a magnitude aparente e

m_0 , a magnitude na ausência de poeira interestelar.

Desenvolvendo esta igualdade, obtém-se a expressão para a extinção interestelar ao longo do percurso d

$$A(d) = -2,5 \log \frac{I}{I_0} \quad \Leftrightarrow$$

$$A(d) = -2,5 \log e^{-\tau(d)} \quad \Leftrightarrow$$

$$A(d) = \tau(d) 2,5 \log e \quad \Leftrightarrow$$

$$A(d) = 1,086 \bar{n} \cdot C_{\text{ext}} \cdot d$$

⁽¹⁾ É igual ao produto entre o factor de eficiência de extinção, Q_{ext} e a área dos grãos de poeira, considerados esféricos, πr^2 ,
 $Q_{\text{ext}} = Q_{\text{absorção}} + Q_{\text{difusão}}$

Outro efeito resultante da interação da radiação estelar com as poeiras é o avermelhamento: os grãos de poeira, de dimensões ligeiramente inferiores aos comprimentos de onda da luz branca, difundem eficazmente a luz azul, provocando, deste modo, o avermelhamento da estrela.

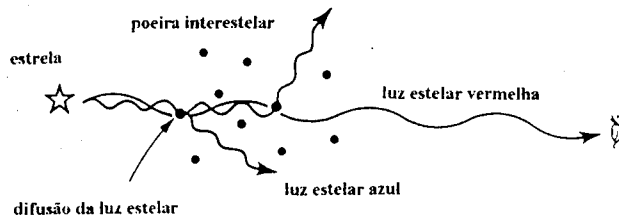


Figura 4.3 — Esquema ilustrativo do efeito de avermelhamento.

O avermelhamento é assim uma forma de inferir a existência de poeira. A medida do avermelhamento de uma estrela pela poeira é indicado, pelo excesso de cor, que representa a diferença, em magnitudes, pela qual o índice de cor observado, azul menos o visual, excede o valor admitido para uma estrela do seu tipo espectral:

$$E_{B-V} = (B - V) - (B - V)_0$$

em que

E_{B-V} é o excesso de cor ;

$(B - V)$, o índice de cor observado e

$(B - V)_0$, a diferença entre as magnitudes absolutas ou cor intrínseca.

O avermelhamento é uma consequência do facto da extinção interestelar variar com o comprimento de onda, mais precisamente, ser-lhe inversamente proporcional.

Os grãos de poeira, ao absorverem a luz em determinadas direcções e não noutras, originam a polarização da luz estelar, que é igualmente um acontecimento frequente.

A difusão da luz estelar pela poeira conduz ainda a fenómenos de reflexão comumente observados em diversas nebulosas.

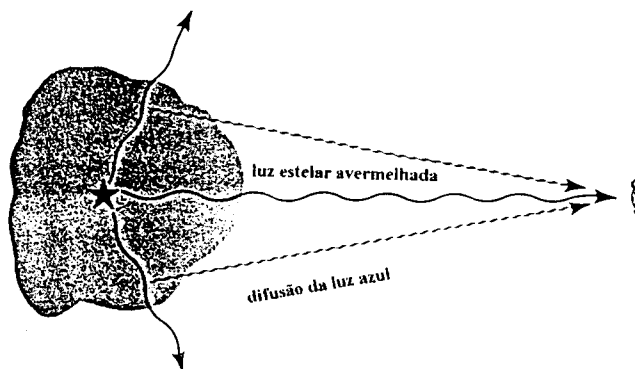


Figura 4.4 — Reflexão da luz numa nebulosa.

A análise de situações concretas permitirá um melhor entendimento de alguns dos aspectos atrás mencionados.

No enxame de estrelas, as Plêiades, observa-se intensa nebulosidade circundando as estrelas. Esta nebulosidade tem origem nas poeiras que reflectem e difundem a luz das estrelas do enxame.

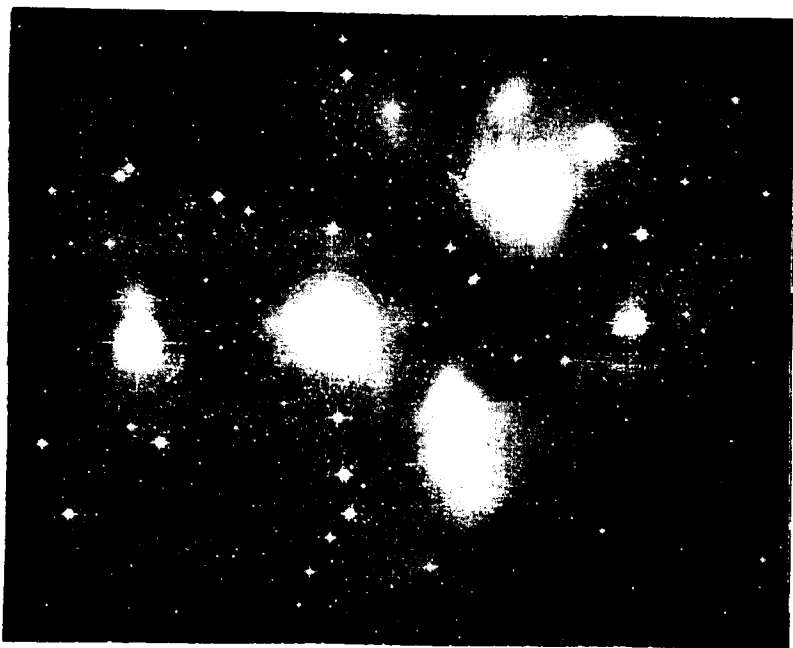


Figura 4.5 — As Plêiades (M45).

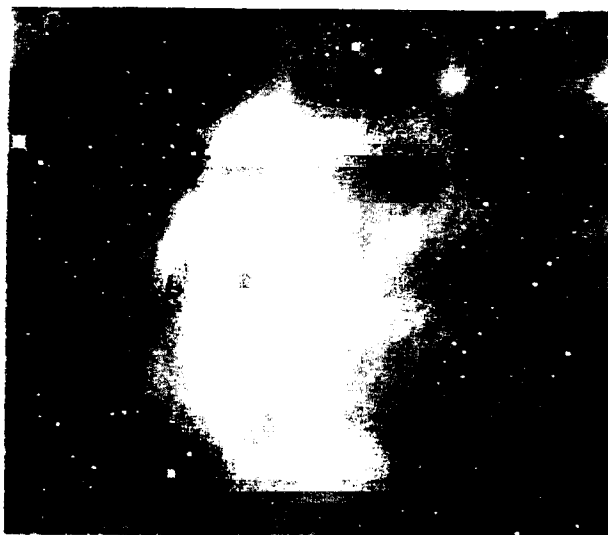


Figura 4.6 — Pormenor da nebulosidade em M45.

Na constelação Sagitário situa-se a nebulosa do Trevo (Fig. 4.7). São visíveis as faixas escuras de poeira que ocultam estrelas. Algumas destas estrelas emitem radiação ultravioleta que se propaga na nuvem, excitando, e até ionizando, os átomos dos gases nela contidos. O gás mais abundante na nuvem é o hidrogénio, o qual na vizinhança de estrelas muito quentes é mantido ionizado. Os electrões efectuem a desexcitação, experimentando uma série de transições permitidas com emissão de luz. A luz vermelha, que se observa, assinala a presença de hidrogénio, podendo também significar a presença de azoto. A luz azul da nebulosa é devida à difusão da luz das estrelas, que não são suficientemente quentes para provocarem a fluorescência dos gases.



Figura 4.7 — Nebulosa do Trevo (M20).

A região do céu, luminosa mas difusa, situada na constelação Oríon, que foi observada e descrita por Christiaan Huygens, em 1656, é actualmente conhecida como a nebulosa de Oríon.

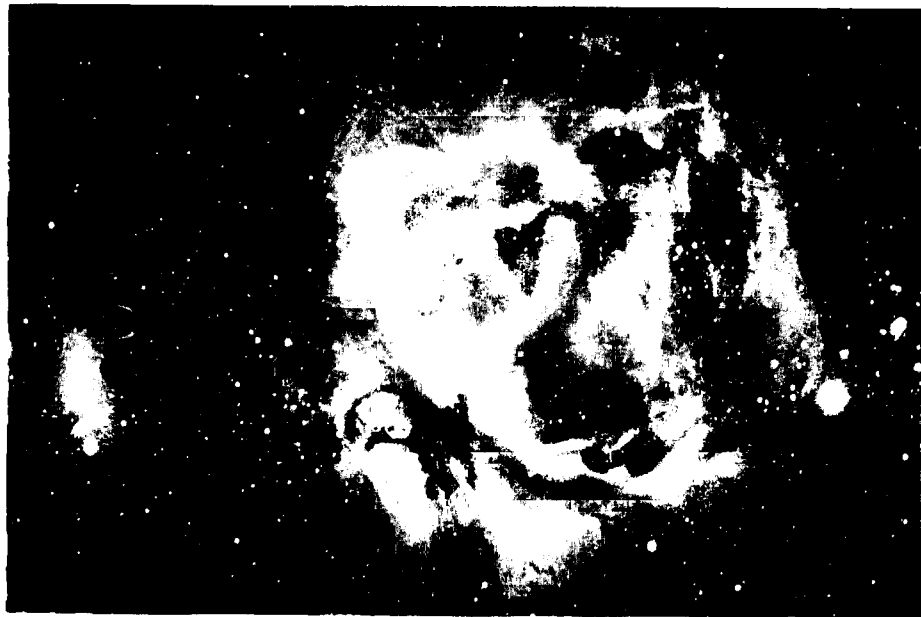


Figura 4.8 – Nebulosa de Oríon (M42).

O espectro desta gigantesca nuvem de gases e poeiras foi estudado pelo astrónomo William Huggins, em 1864. O espectro revelou linhas brilhantes bem individualizadas contra um fundo negro, como aliás seria de esperar de um gás quente (Fig. 4.9). Essas linhas brilhantes são principalmente riscas do hidrogénio e do oxigénio em diferentes estados de ionização. No entanto, é também detectada a presença de outros elementos.

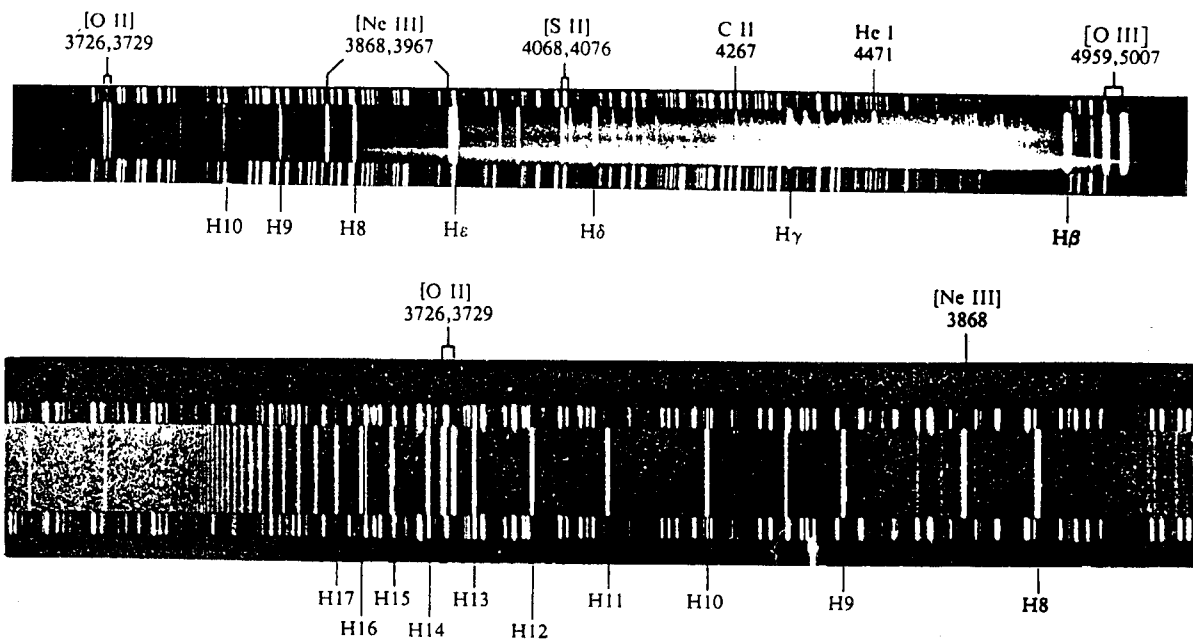


Figura 4.9 – Espectro da Nebulosa de Oríon.

O oxigénio apresenta um par de riscas nos comprimentos de onda 3726 Å e 3729 Å na banda ultravioleta, correspondente ao oxigénio mononegativo, e outro par de riscas em 4959Å e 5007 Å, situado no verde da região visível, e que pertencem ao oxigénio duplamente ionizado. Estas riscas são denominadas “riscas proibidas”⁽¹⁾. De início, estas riscas não foram atribuídas ao oxigénio, mas a um hipotético elemento, desconhecido na Terra — o nebulio. O desenvolvimento da espectroscopia teórica permitiu posteriormente uma análise detalhada do espectro, conduzindo ao reconhecimento de que se estava perante transições « proibidas ». Efectivamente, as intensas riscas verdes do oxigénio duplamente ionizado correspondem a transições de intercombinação singleto - tripleto, que violam a regra de selecção que estabelece que a adição geométrica dos vectores de spin dos electrões isolados não deve, de modo algum, variar.

As linhas presentes nos espectros atómicos são devidas à ocorrência de transições electromagnéticas entre os estados próprios de energia do átomo. Estas transições, não arbitrarias, correspondem à emissão ou absorção de fótons com energia igual à diferença entre dois estados energéticos. As condições impostas à variação dos números quânticos, que caracterizam esses estados e explicam as transições, são denominadas regras de selecção. A mecânica quântica forneceu os argumentos teóricos às regras de selecção, que na sua génese tiveram um suporte exclusivamente empírico. Considerando, como exemplo, as transições eléctricas dipolares, refira-se que as regras de selecção a que obedecem são:

$$\Delta j = 0, \pm 1 ; \text{ sendo impossível a transição } 0 \rightarrow 0$$

$$\Delta m = 0, \pm 1$$

em que

Δ representa a diferença entre os valores relativos aos estados inicial e final do átomo,

j é o número quântico de momento angular total e

m é o número quântico magnético.

Quando uma transição dipolar é proibida por uma regra de selecção, o átomo permanecerá longo tempo no estado excitado, possuindo grande reserva de energia. O tempo de vida médio de um estado excitado como este poderá situar-se entre 10^{-3} e 1 s, o que significa que é 10^5 a 10^8 vezes superior ao tempo de vida médio para uma transição dipolar usual. Estes estados relativamente estáveis são denominados estados metaestáveis. A ocorrência de emissão espontânea impõe que o átomo não possa sofrer colisões durante a sua permanência no estado metaestável.

Conclui-se assim que, para se verificar o aparecimento de riscas «proibidas», é necessário que a transição se processe para um nível superior, que seja metaestável, e que o meio possua densidades de matéria e de radiação muitíssimo pequenas. Corpos celestes, como a nebulosa de Oríon, possuem indubitavelmente as condições ideais para a concretização destas transições.

⁽¹⁾ Nestes casos, o elemento ionizado é indicado entre parênteses rectos.

Métodos sofisticados são actualmente utilizados para calcular a densidade e a temperatura de regiões de hidrogénio ionizado, bem como a sua composição química, tendo por base as “riscas proibidas”.

A nebulosa de Orion é uma região de intensa formação estelar; observações no infravermelho próximo revelam as estrelas que a nebulosa oculta.

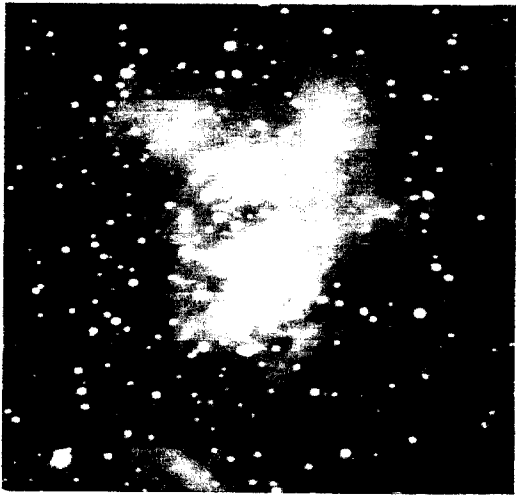


Figura 4.10 — Região da nebulosa de Orion vista no infravermelho próximo.
No código de cor, o azul representa zonas quentes e o vermelho, as zonas mais frias.

As estrelas percorrem várias etapas ao longo da sua vida. Assim, finda a fase inicial de proto-estrela, as estrelas ingressam, de acordo com a sua massa, na sequência principal (Fig. 4.11). A permanência nesta fase de equilíbrio é muito longa, sendo determinada pela massa da estrela. A massa da estrela define igualmente a evolução pós-sequência principal. Quando uma estrela do tipo solar termina a fase da sequência principal, evolui sucessivamente para as fases de gigante vermelha, ramo horizontal, ramo assintótico das gigantes, nebulosa planetária e, por último, anã (Fig. 4.12).

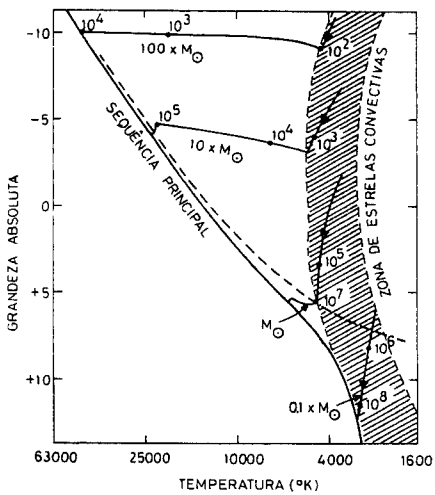


Figura 4.11 — Trajectória evolutiva das proto-estrelas para a sequência principal.

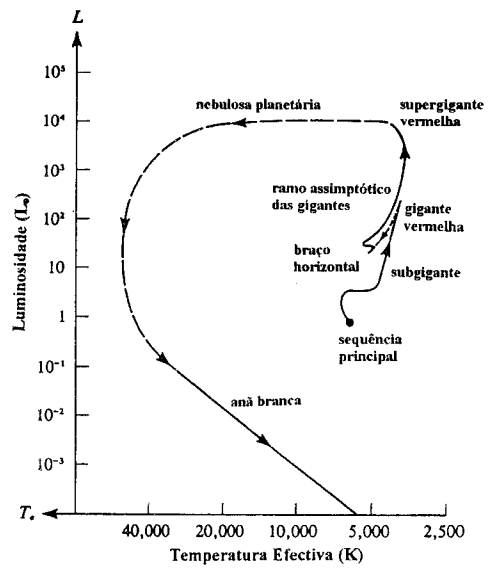


Figura 4.12 — Trajectória evolutiva de uma estrela do tipo solar.

Estima-se que o Sol se encontra à cerca de 5 mil milhões de anos na sequência principal, devendo aí permanecer aproximadamente o mesmo tempo. Este longo período de estabilidade resulta do equilíbrio alcançado entre as forças de contracção gravitacionais e as forças de pressão exercidas pela radiação, que é produzida nas reacções de fusão do hidrogénio. Estas reacções decorrem no centro das estrelas, originando hélio, neutrinos e fotões gama. Durante a estadia na sequência principal, praticamente não ocorrem alterações no raio e na luminosidade ⁽¹⁾ da estrela.

À medida que o núcleo vai sendo enriquecido em hélio, a zona de fusão do hidrogénio é gradualmente impelida para as regiões limítrofes, mais frias, acabando mesmo por inviabilizar a realização das reacções termonucleares. Em consequência, a estrela contrai-se na tentativa de restabelecer o equilíbrio perdido. Dá-se então início à evolução pós-sequência principal.

Ao contrair-se, o núcleo arrasta consigo a camada de hidrogénio que o envolve, verificando-se um rápido aumento da produção de energia que, ao ser absorvida pelas regiões contíguas, obriga a estrela a expandir-se. O aumento do raio conduz, de acordo com a equação

$$L = (4 \pi R^2)(\sigma T_{ef}^4)$$

em que

L é a luminosidade ;

R , o raio da estrela ;

σ , a constante de Stefan-Boltzann e

T_{ef} , a temperatura efectiva.

a um aumento da luminosidade, enquanto que a temperatura efectiva diminui.

A estrela transformou-se numa Gigante Vermelha. Esta fase de instabilidade termina logo que o núcleo atinja temperaturas suficientemente elevadas para que a combustão do hélio se processe — “flash” do hélio. O efeito do “flash” do hélio inverte o processo de expansão das camadas exteriores. A temperatura superficial aumenta, mas a luminosidade decresce graças à diminuição do raio. A estrela é conduzida para uma nova fase da sua evolução: o Ramo Horizontal.

Durante a permanência nesta fase de estabilidade, a luminosidade da estrela é mantida à custa da fusão do hélio. Assim que a combustão do hélio termina, a estrela passa novamente por uma fase de instabilidade denominada Ramo Assimptótico das Gigantes.

As forças de contracção gravitacionais voltam a dominar e a estrela desenvolve mecanismos similares aos descritos na fase de gigante vermelha, com a particularidade de agora existir um núcleo de carbono e oxigénio ⁽²⁾. Este processo conduz a um rápido aumento do fluxo de energia e, por conseguinte,

⁽¹⁾ A luminosidade é definida como a quantidade total de energia libertada pela estrela por unidade de tempo.

⁽²⁾ A relação entre as quantidades de carbono -12 e oxigénio -16, produzidas na fusão do hélio depende da massa da estrela; uma estrela do tipo solar terá um núcleo constituído essencialmente por carbono.

à expansão da estrela que desta vez devolve a maior parte das camadas exteriores ao meio interestelar. Após esta expansão, resta apenas um pequeno núcleo, constituído quase exclusivamente por carbono que, pelo facto de ser demasiado pequeno, é incapaz de despoletar os mecanismos conducentes ao aumento da temperatura necessária à combustão do carbono. Esta é a fase da Nebulosa Planetária.

Da estrela inicial resta apenas esse núcleo pequeno e muito denso — a anã branca —, rodeado por um invólucro gasoso, que gradualmente se afasta. À medida que as camadas que rodeiam a anã se afastam, esta vai arrefecendo progressivamente, libertando as reservas de energia térmica decorrentes do seu processo evolutivo. O arrefecimento é extremamente lento e, quando finalmente termina, a estrela deixa de ser visível, tornando-se numa anã preta. Este é o final previsto para o Sol.

Regressando à nebulosa de Oríon, refira-se que outros aspectos relevantes deste corpo celeste são patenteados nas bandas rádio e microondas. A emissão no comprimento de onda 2,6 mm, característica do monóxido de carbono, CO, mostra a existência de uma nuvem de gás molecular em torno do Cinturão e da Espada de Oríon. Os mapas de CO permitem estudar a dimensão, a massa e a estrutura das nuvens moleculares.

No óptico (Fig. 4.13), a cor avermelhada predominante deve-se sobretudo ao hidrogénio ionizado. Embora o hidrogénio seja a espécie mais abundante, a nebulosa possui outros elementos químicos, como se constata pelo respectivo espectro, e que contribuem, com as suas emissões, para a diversidade cromática exibida por este corpo celeste. Na imagem da figura 4.14, podem apreciar-se as quatro estrelas que formam o Trapézio e iluminam por fluorescência os gases da nebulosa. A cor verde assinala a presença de oxigénio, enquanto que o vermelho dos contornos provém do hidrogénio e também do azoto.

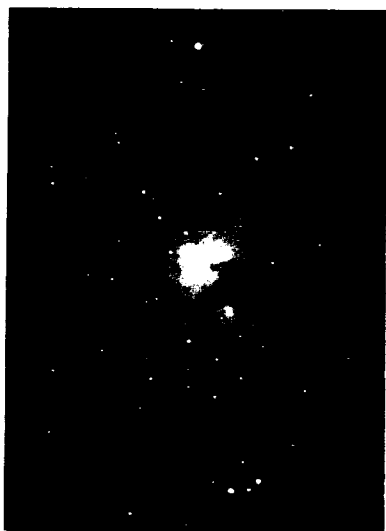


Figura 4.13 — Nebulosa de Oríon.



Figura 4.14 — Região central da Nebulosa de Oríon.

As cores patentes na nebulosa de Oríon podem também ser observadas nas derradeiras etapas da vida de uma estrela. Na figura 4.15 está representada uma nebulosa planetária, que corresponde ao penúltimo estágio de uma estrela de pequena massa. A estrela em lenta agonia vai perdendo a sua massa, contribuindo, para isso, os fortes ventos que se fazem sentir. As cores da matéria ejetada dependem das temperaturas atingidas em consequência da emissão luminosa da estrela agonizante. O verde corresponde a emissões do oxigénio ionizado e o vermelho, ao hidrogénio.

As estrelas maciças têm um final esplendoroso. Neste caso, a ejeção lenta de matéria dá lugar a uma violenta explosão — é o fenómeno da Supernova. Após a explosão, a matéria da estrela expande-se no espaço, a grande velocidade. A matéria ejetada permanece luminosa por muito tempo. A nebulosa do Caranguejo, situada na constelação do Touro, é o que resta da supernova observada pelos astrónomos chineses e japoneses, em 1054.

A nebulosa do Caranguejo apresenta uma estrutura central homogénea, ladeada por um complexo sistema filamentar.



Figura 4.15 — Nebulosa planetária da Hélice, na constelação do Aquário.



Figura 4.16 – Nebulosa do Caranguejo (M1).

A análise espectroscópica dos filamentos revelou que na sua composição química abunda o hidrogénio entre muitos outros elementos químicos. O espectro da região central, amorfa, é contínuo, sendo a luz fortemente polarizada.

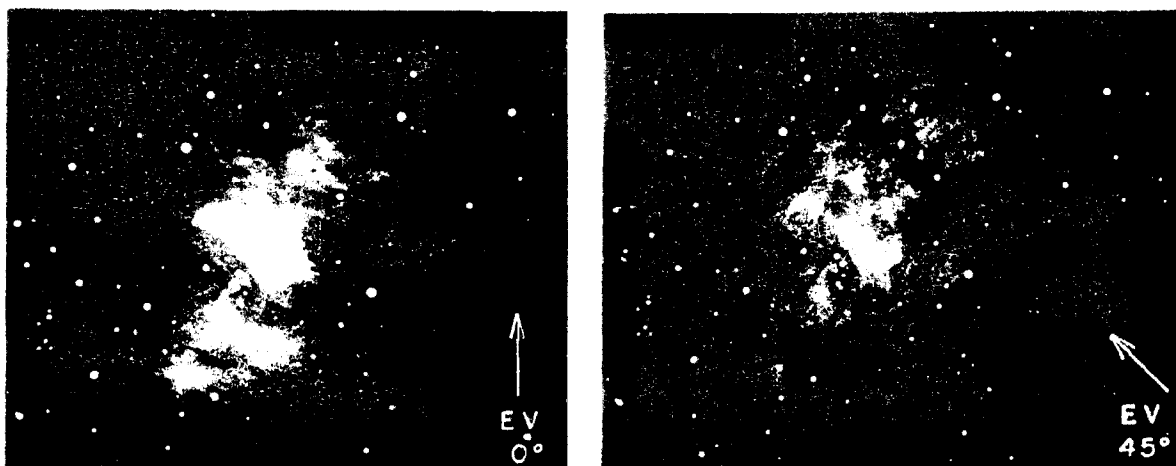


Figura 4.17 – M1 em luz polarizada. A direcção da polarização é indicada pelo vector.

Geralmente, a polarização é produzida pelo alinhamento de grãos de poeira interestelar, mas neste caso verifica-se que a polarização é demasiado intensa para ser explicada por este meio. Além disso, a emissão rádio da nebulosa sofre polarização e, como se sabe, a poeira não afecta as ondas de rádio. Ora, a polarização das ondas de rádio é uma característica da radiação do tipo sincrotrão. Esta radiação é produzida na aceleração do electrão, de elevada energia, na presença de campos magnéticos

intensos. A análise minuciosa da radiação rádio revelou ainda a presença de um pulsar na nebulosa do Caranguejo. As imagens em raios-x põem em evidência este objecto.

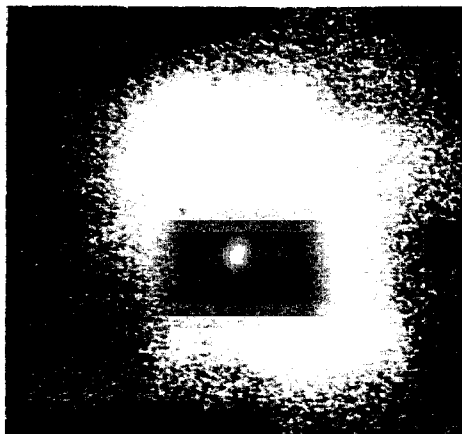


Figura 4.18 — Pulsar da nebulosa do Caranguejo (período 33 ms) visto em raios-x.

No código de cor, o pulsar está representado a branco.

A observação deste pulsar constituiu um importante pilar na validação do modelo desenvolvido para as supernovas. Segundo este, os pulsares são simplesmente estrelas de neutrões em rotação rápida, remanescentes de supernovas do tipo II.

A última supernova observada na Galáxia data de 1604. Contudo, têm sido avistadas diversas supernovas noutras galáxias. Na noite de 23 de Fevereiro de 1987, os astrónomos puderam observar o fenómeno na Grande Nuvem de Magalhães — a galáxia mais próxima da Via Láctea.

A Galáxia faz parte de um enxame galáctico, denominado Grupo Local, onde sobressai a galáxia espiral Andrómeda, M31, observável a olho nu. Através do telescópio, distingue-se a sua estrutura em espiral. Estudos na banda rádio confirmam e detalham a estrutura espiral desta galáxia.

Observações em diferentes regiões do espectro electromagnético continuam a fornecer informações sobre Andrómeda.

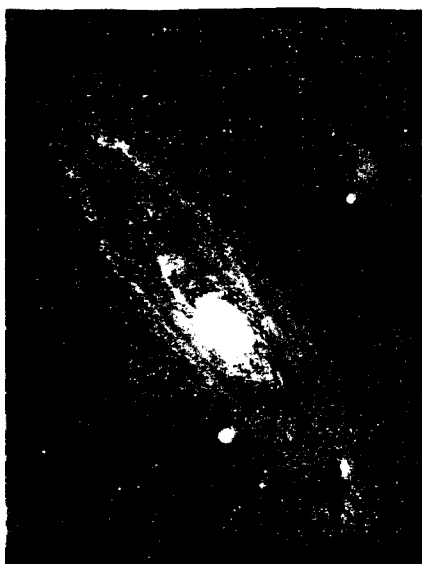


Figura 4.19 — Galáxia Andrómeda.

São visíveis os braços espirais
e a poeira entre eles.



Figura 4.20 — M31 em infravermelho, colocando em evidência a poeira, no plano da galáxia.

Figura 4.21 — Região central de M31 em Raios-X.
No código de cor, as regiões onde a emissão é mais intensa, estão representadas a vermelho.

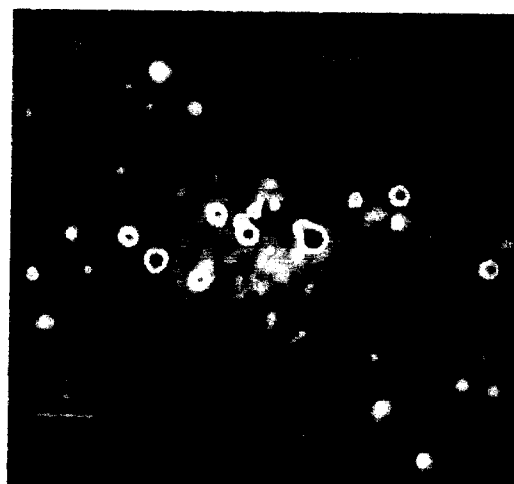


Figura 4.22 — Região nordeste de M31 em Rádio.
No código de cor, o vermelho representa as emissões mais intensas e o azul, as emissões mais débeis.

5. ACTIVIDADES EXPERIMENTAIS

Gostei muito da luz. Gostei de vê-la
de todas as maneiras,
da luz do pirilampo à fria luz da estrela,
do fogo dos incêndios à chama das fogueiras.
Gostei muito de a ver quando cintila
na face de um cristal,
quando trespassa, em lâmina tranquila,
a poeirenta névoa de um pinhal,
quando esta salta, nas águas, em cintilações de cobra,
desfeita em pedrarias de lapidado ceptro,
quando incide num prisma e se desdobra
nas sete cores do espectro.

António Gedeão, "Saudades da Terra" em Poesias Completas

A recriação de fenómenos naturais e a intervenção que sobre eles pode ter o experimentador, ao fazer variar as condições da experiência, constitui um precioso auxílio para a compreensão da essência do fenómeno observado.

As experiências apresentadas são relativas à luz.

Actividade Experimental 1 — Dispersão da Luz Solar

1.1 Nota Introdutória

Em tempos já muito distantes, a paleta de cores que constitui o arco-íris era encarada como sendo uma mensagem divina. Somente no séc.XVII, o génio de Isaac Newton conseguiu desmistificar este fenómeno natural, ao obter a decomposição da luz solar (branca) na gama de cores do arco-íris, por intermédio de um prisma óptico. Estava demonstrada a dispersão da luz.

A incidência da luz numa gota de água ocasiona a sua refacção e dispersão; no interior da gota as radiações monocromáticas reflectem-se e emergem dela de forma divergente. A sequência de cores observada está relacionada com a diferente velocidade de propagação, que cada uma das radiações monocromáticas experimenta na água. Assim, a luz violeta é a que sofre o maior desvio, porque a sua velocidade de propagação é a menor. A velocidade experimentada pela luz num dado meio depende do índice de refacção desse meio.

Na presente experiência propõe-se a obtenção da dispersão da luz branca, usando um balão cheio de água.

1.2 A Experiência

1.2.1 Material e Reagentes

Balão de vidro de fundo redondo

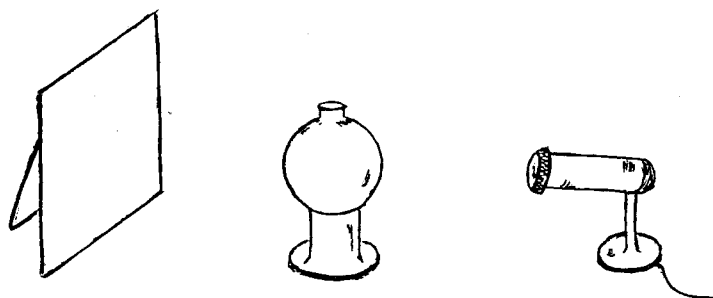
Suporte para o balão

Fonte de luz branca, com diafragma incorporado

Écran

Água

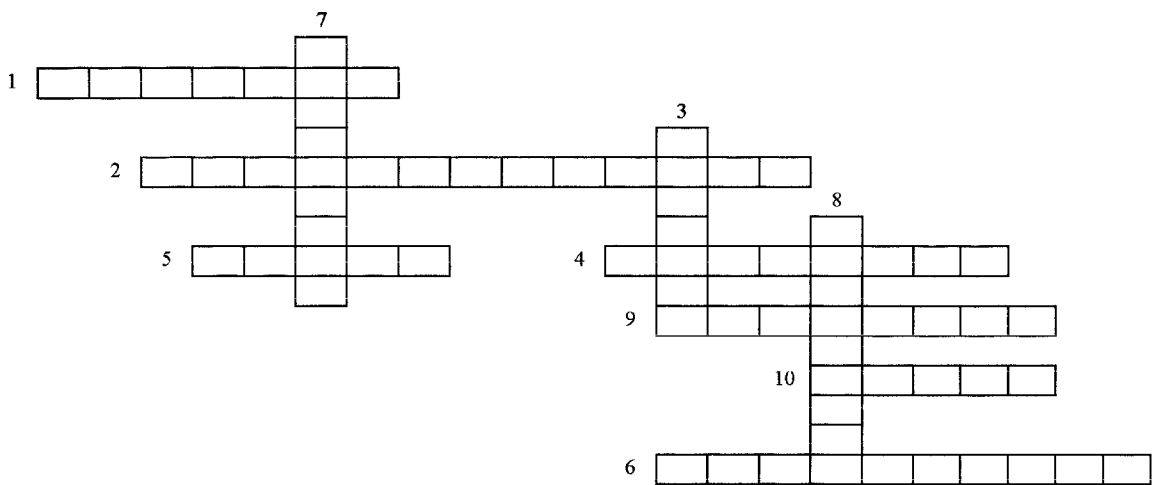
1.2.2 Ilustração da Montagem



1.3 Aplicação de Conceitos

Crucigrama Interpretativo

- 1 - Esta é a banda mais estreita do espectro electromagnético.
- 2 - Nome que designa a luz branca pelo facto de ela ser uma mistura de radiações monocromáticas.
- 3 - No espectro da luz visível, esta é a radiação mais energética.
- 4 - Na dispersão da luz branca observa-se que esta radiação é a que sofre o menor desvio.
- 5 - A velocidade de propagação da luz neste meio é menor do que a velocidade de propagação no ar.
- 6 - Na refacção, a mudança de direcção está associada a alterações nesta grandeza física.
- 7 - Para um mesmo meio, verifica-se que esta grandeza é tanto menor quanto menor for o seu índice de refacção.
- 8 - Quando a luz proveniente da estrela penetra na atmosfera terrestre, sofre várias vezes este fenómeno e descreve uma trajectória curvilínea.
- 9 - Em consequência do facto descrito em 8, a estrela é vista pelo observador nesta posição que não é real.
- 10 - A ausência desta na Lua inviabiliza a formação do arco-íris.



Actividade Experimental 2 — Difusão e Avermelhamento da Luz

2.1 Nota Introdutória

Em consequência das características da superfície reflectora, a luz que nela incide pode ser reemitida, propagando-se em todas as direcções — é o fenómeno da difusão da luz. Mas, para além da difusão, a luz branca na sua interacção com a matéria, pode também ser absorvida, refractada e difractada. A ocorrência destes fenómenos ópticos depende da natureza e dimensão das partículas, do índice de refacção e, naturalmente, do comprimento de onda da radiação.

A existência, no meio interestelar, de matéria capaz de absorver e difundir a luz é confirmada pelo efeito de avermelhamento. Este efeito tem origem na interacção da luz estelar com a poeira. Os grãos de poeira, ao absorverem e difundirem a luz azul mais fortemente do que a luz vermelha, fazem com que as estrelas, quando observadas através do meio interestelar, aparentem ser mais vermelhas do que realmente são.

Nesta experiência será utilizada uma dispersão coloidal muito diluída, por forma a que a espessura óptica seja pequena e, deste modo, seja observada a difusão da radiação. As partículas em suspensão terão um comportamento idêntico ao dos grãos de poeira interestelar: a componente azul da luz branca será filtrada selectivamente, enquanto que a luz vermelha é transmitida.

2.2 A Experiência

2.2.1 Material e Reagentes

Balão de fundo redondo

Suporte para o balão

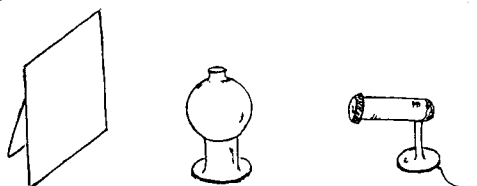
Fonte de luz branca, com diafragma incorporado

Écran

Água

Leite

2.2.2 Ilustração da Montagem



2.3 Sugestões

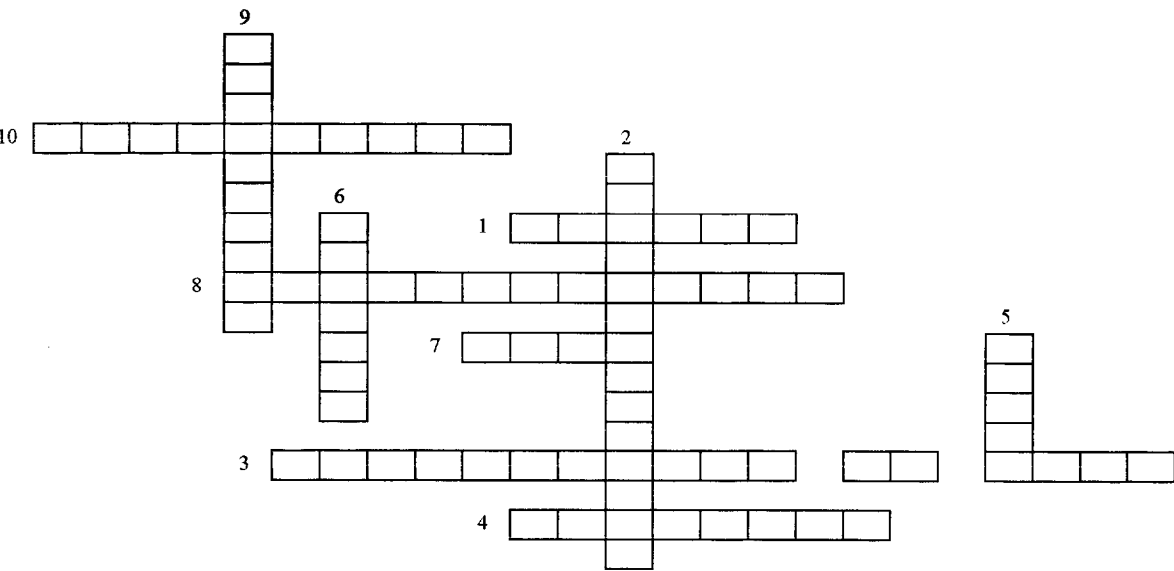
Usando um material polarizador, poder-se-á observar a polarização da luz (embora parcial) produzida pela difusão da luz.

Aumentando gradualmente a quantidade de leite, a espessura óptica aumenta, até que deixa de ser possível a observação de radiação visível no écran.

2.4 Aplicação de Conceitos

Crucigrama Interpretativo

- 1 - O obscurecimento da luz das estrelas é causado pelos aglomerados deste material.
- 2 - Este efeito resulta da interacção dos grãos de poeira com a radiação estelar.
- 3 - A extinção interestelar é inversamente proporcional a esta característica da radiação.
- 4 - Observações no infravermelho permitem ver estes corpos celestes, que se ocultam por detrás das densas nuvens de gás e poeira.
- 5 - A completa obscuridade das nuvens frias de hidrogénio neutro só é dissipada, quando são efectuadas observações nesta região do espectro electromagnético.
- 6 - Esta denominação é usada para indicar que a luz está-se a propagar em todas as direcções.
- 7 - Os grãos de poeira difundem mais eficazmente esta cor.
- 8 - Os grãos de poeira causam extinção e polarização da luz estelar e emitem esta radiação.
- 9 - O estudo da intensidade da emissão deste elemento, no comprimento de onda de 21 cm, nas nuvens de matéria interestelar, tem sido muito frutuoso.
- 10 - Este poder do meio é geralmente caracterizado pela espessura óptica.



Actividade Experimental 3 – Polarização da Luz

3.1 Nota Introdutória

A radiação electromagnética é caracterizada pela oscilação periódica de um campo eléctrico e de um campo magnético. Quando a luz está polarizada, os campos eléctrico e magnético vibram cada um deles num plano específico. O plano de oscilação do campo eléctrico é considerado o plano de polarização; este é perpendicular ao campo magnético.

A luz natural não é polarizada, pois não privilegia nenhuma direcção de propagação. No entanto, a luz é passível de ser polarizada de diversas maneiras. Por vezes, produz-se a sua polarização, quando se reflecte numa superfície lisa ou durante a sua difusão por uma grande quantidade de partículas. A luz estelar é frequentemente polarizada na sua passagem através das nuvens de poeira.

A polarização da luz pode igualmente ser conseguida utilizando polarizadores, como o prisma de Nicol e películas polaróides.

Soluções de açúcares fazem rodar o plano da luz polarizada que as atravessa; o ângulo de rotação depende da concentração e do comprimento do trajecto luminoso dentro da solução.

Na realização desta experiência será usada uma solução aquosa de sacarose.

3.2 A Experiência

3.2.1 Material e Reagentes

Tina de vidro

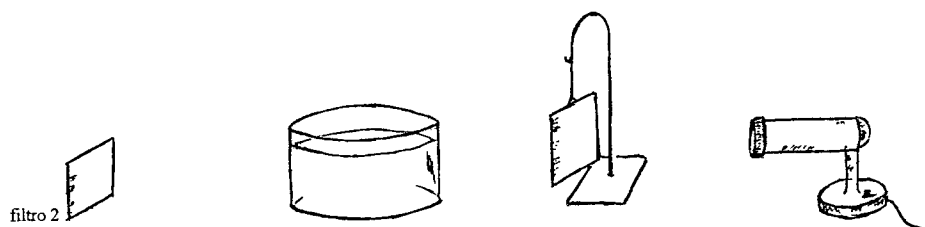
Fonte de luz branca, com diafragma incorporado

2 filtros polarizadores

1 suporte para polarizador

Solução aquosa de sacarose, $1,0 \text{ mol.dm}^{-3}$

3.2.2 Ilustração da Montagem

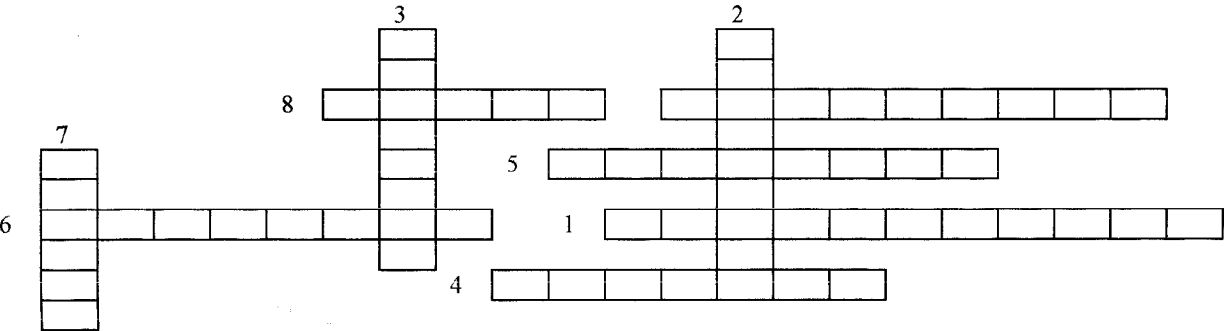


Nota: O observador deverá rodar o filtro 2.

3.3 Aplicação de Conceitos

Crucigrama Interpretativo

- 1 - Este fenómeno resulta da transversalidade das ondas luminosas.
- 2 - A luz solar depois de difundida por estas entidades estruturais, que existem no ar, é parcialmente polarizada.
- 3 - A polarização é usada no estudo da natureza das superfícies destes corpos celestes.
- 4 - A polarização pode ocorrer durante este fenómeno óptico, provocado por grande quantidade de partículas.
- 5 - Estas substâncias em solução aquosa rodam o plano da luz polarizada.
- 6 - A luz destes corpos celestes é muitas vezes polarizada.
- 7 - As nuvens deste material polarizam a luz que as atravessa.
- 8 - O plano da luz polarizada é o deste vector.



Actividade Experimental 4 – Efeitos Químicos da Luz

4.1 Nota Introdutória

No Universo ocorrem reacções químicas que são desencadeadas pela luz. Reacções fotoquímicas estão na base da produção de alguns hidrocarbonetos. São também comuns as reacções de fotodissociação. É reconhecida a importância, na atmosfera terrestre, dos processos fotoquímicos que envolvem o ozono.

Nesta actividade observar-se-á a influência da luz nos sais de prata. Verificar-se-á que perante a luz vermelha, os sais de prata não se alteram, o mesmo não sucedendo com a luz branca e azul, sendo perfeitamente visível a redução dos cations prata a prata metálica. Os sais de prata, que serão sujeitos à acção da luz, serão obtidos a partir de reacções de precipitação que envolvem soluções aquosas de sais.

4.2 A Experiência

4.2.1 Material e Reagentes

4 tubos de ensaio (comp.= 16 cm, diâm.= 1,3 cm)

Suporte para tubos de ensaio

Fonte de luz branca

Filtros azul e vermelho

Papel de chumbo

Frascos conta-gotas contendo

AgNO_3 (aq) 2,0 mol.dm⁻³

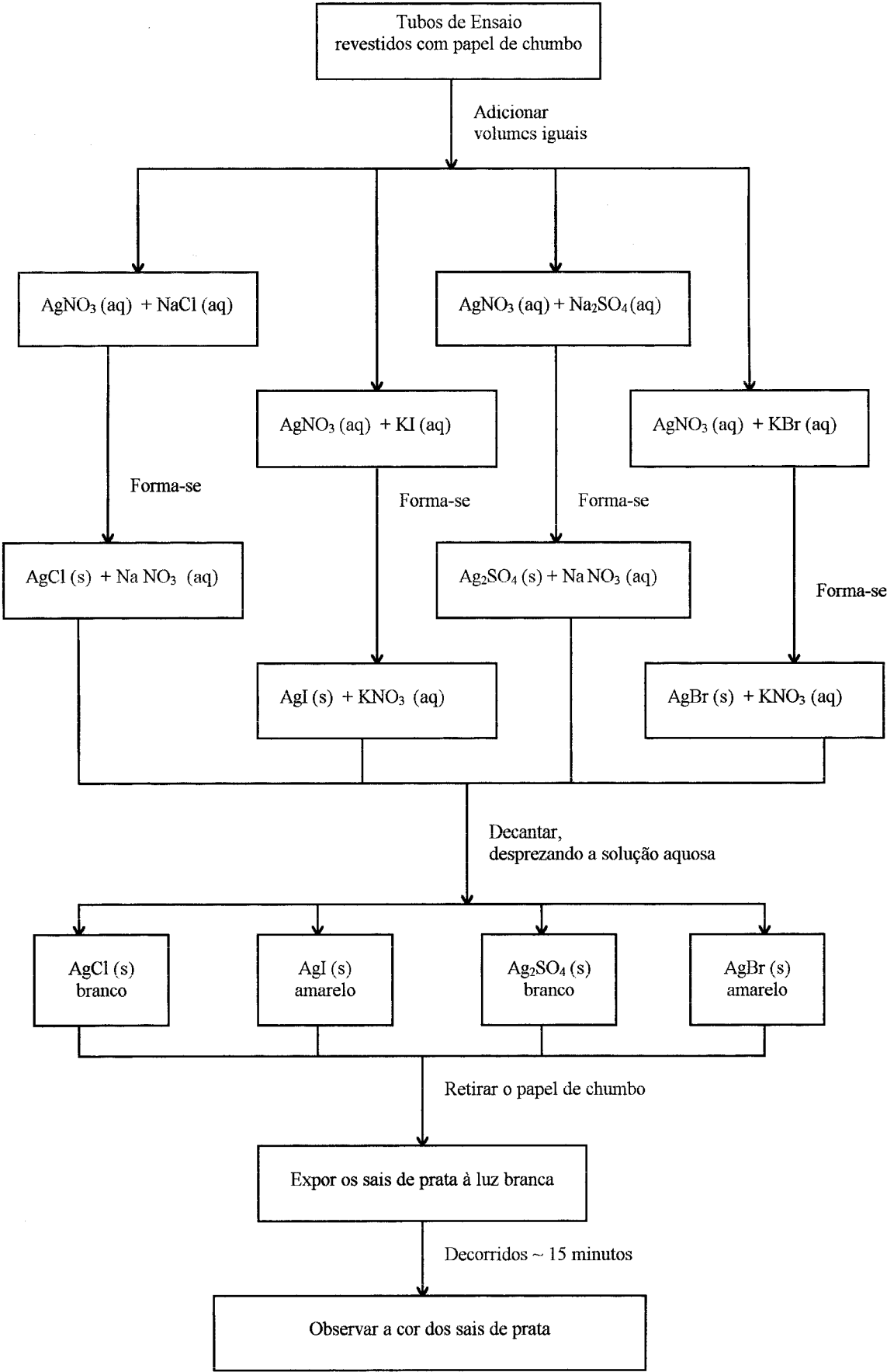
NaCl (aq) 2,0 mol.dm⁻³

KI (aq) 2,0 mol.dm⁻³

Na_2SO_4 (aq) 2,0 mol.dm⁻³

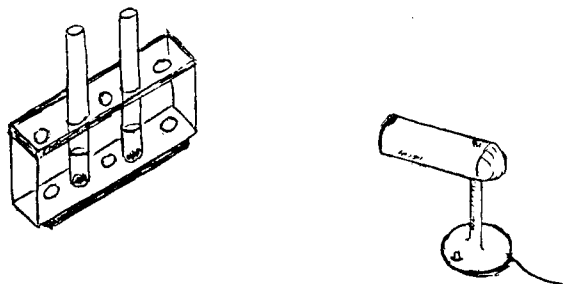
KBr (aq) 2,0 mol.dm⁻³

4.2.2 Diagrama de Fluxo



Nota: Repetir o procedimento, usando luz vermelha e luz azul.

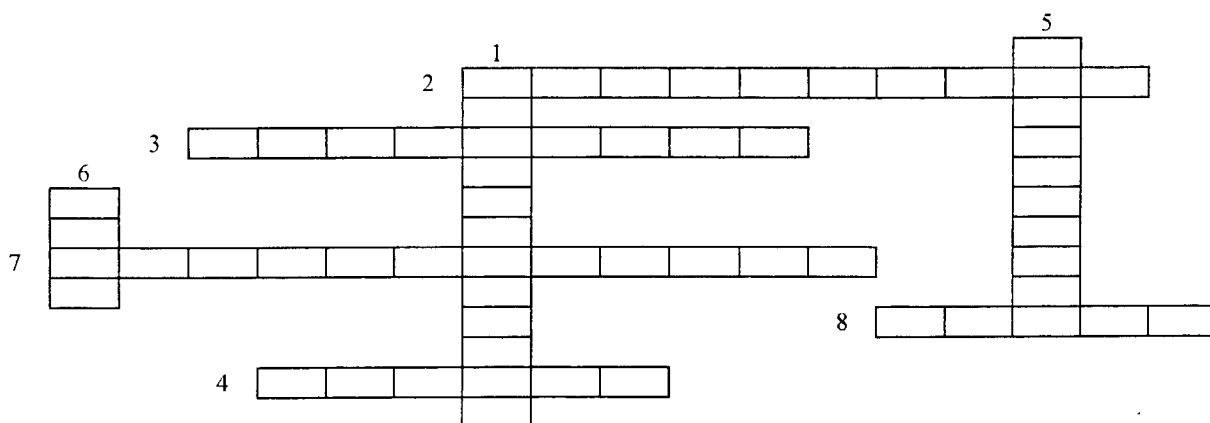
4.3 Ilustração da Montagem



4.4 Aplicação de Conceitos

Crucigrama Interpretativo

- 1 - As reacções químicas desencadeadas pela luz são assim designadas.
- 2 - A redução dos sais de prata pela luz é usada nesta técnica.
- 3 - Os iões prata, ao serem reduzidos, captam estas partículas elementares.
- 4 - No Universo, o acetileno pode ser obtido através da fotólise deste alcano.
- 5 - Reacções fotoquímicas a partir do azoto e do metano produzem este elemento.
- 6 - A fotodissociação, na atmosfera terrestre, desta substância repõe o hidrogénio e o oxigénio elementares.
- 7 - O oxigénio elementar dissocia-se por acção desta radiação.
- 8 - É na estratosfera que se encontra esta substância, responsável pela filtração da radiação ultravioleta.



Actividade Experimental 5 — Produção de Luz

5.1 Nota Introdutória

As estrelas são as principais fontes de radiação electromagnética do Universo. As elevadas temperaturas que se fazem sentir no seu interior, proporcionam a ocorrência de reacções nucleares que produzem raios gama. No seu percurso até à superfície da estrela, os raios gama sofrem interacções que podem dar origem a outros tipos de radiação. Estas estrelas são corpos muito quentes, mas existem outras fontes luminosas, ditas « frias », que emitem luz devido ao fenómeno de luminescência.

A luminescência tem origem nas mudanças de energia produzidas dentro do corpo radiante. Neste, a energia adquirida pelos electrões dos átomos impulsiona-os para níveis energéticos superiores; no seu regresso ao estado fundamental emitem geralmente radiação electromagnética na região visível.

As nebulosas de emissão fazem parte do grupo de corpos celestes em que ocorre o fenómeno de luminescência. Este mesmo fenómeno pode ser observado na atmosfera de planetas, quando a luz do Sol ioniza os gases; como exemplos, refiram-se a Terra e Vénus. São também conhecidas as reacções químicas que produzem luz sem qualquer acompanhamento de calor — quimiluminescência.

Nesta actividade, propõe-se a observação da luminescência química.

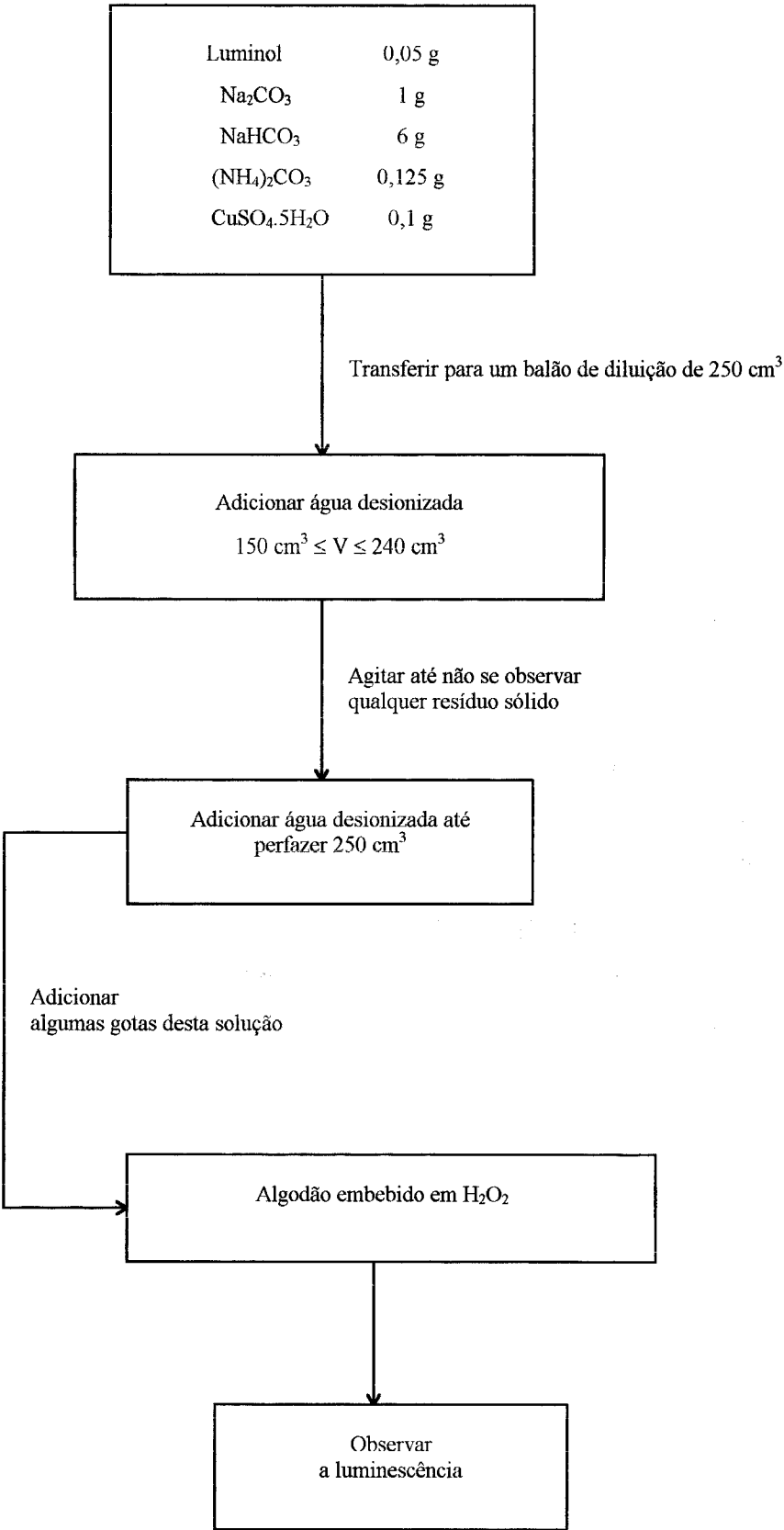
5.2 A Experiência

5.2.1 Material e Reagentes

Balão de diluição de 250 cm ³	Luminol
Balança Analítica	Na ₂ CO ₃
Espátulas	NaHCO ₃
Papel de filtro ou vidro de relógio	(NH ₄) ₂ CO ₃
Funil de pós	CuSO ₄ ·5H ₂ O
Esguicho	H ₂ O ₂ 140 vol. ⁽¹⁾
Placa de Petri	H ₂ O
Vareta	
Pipeta Pasteur	
Algodão hidrófilo	

⁽¹⁾ Pode ser usada H₂O₂ a 30 vol.

5.2.2 Diagrama de Fluxo



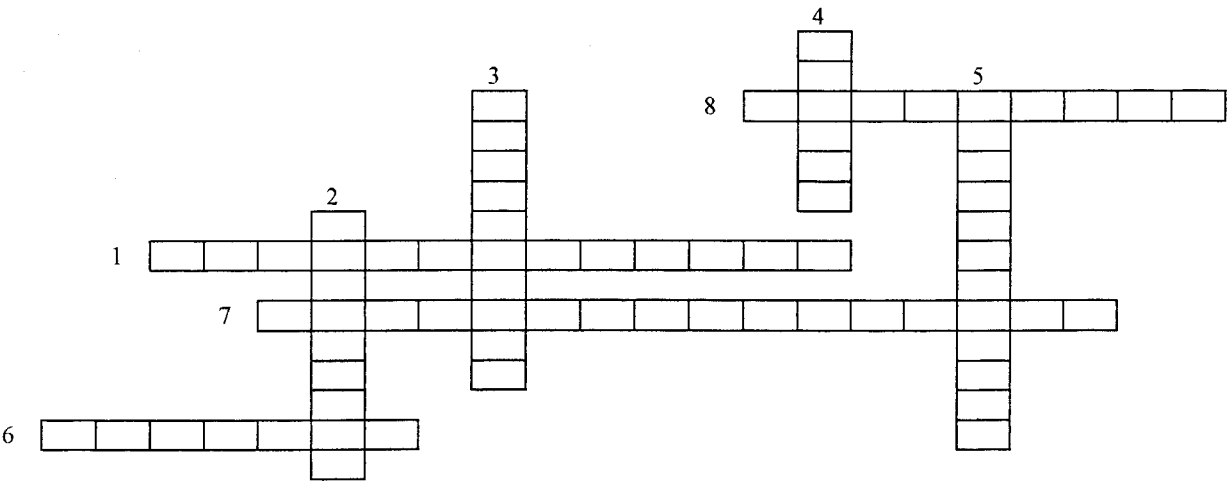
5.2.3 Ilustração da Montagem



5.3 Aplicação de Conceitos

Crucigrama Interpretativo

- 1 - A fosforescência juntamente com esta constituem os dois tipos de luminescência.
- 2 - Quando a luz do Sol atinge a atmosfera terrestre e provoca este efeito nos gases aí existentes, ocorre a luminescência.
- 3 - A luminescência do ar durante esta parte do dia é mais intensa do que durante a noite.
- 4 - A luminescência do céu nocturno é uma limitação para a observação desta característica dos objectos celestes.
- 5 - Num corpo com esta propriedade, a energia existente provém de dentro do próprio corpo ou de uma fonte exterior.
- 6 - A luminescência é frequente nestas nebulosas.
- 7 - Esta designação aplica-se à luminescência química dos organismos vivos.
- 8 - A luminescência química existe em organismos vivos, como por exemplo neste.



6. CONCLUSÃO

Nos últimos anos, tornou-se notório o crescente interesse que o público em geral, e em particular a população estudantil, tem demonstrado pela Astronomia.

De facto, nunca a Ciência esteve tão perto do cidadão. Livros, revistas e vídeos, de qualidade reconhecida, ocupam os escaparates das livrarias. Iniciativas, como a “Astronomia no Verão” do projecto “Ciência Viva” e os “Clubes de Astronomia”, em plena actividade em diversas escolas, vão cimentando o gosto por esta área do saber. Neste contexto, é também de salientar as actividades desenvolvidas pelas Associações de Astrónomos Amadores e pelos Centros de Astrofísica.

Orientada por esta realidade, a presente dissertação foi pensada e elaborada, por forma a constituir mais um elemento de informação e de estudo nesta área científica. Estando-se perante um tema muito vasto, certamente que o leitor encontrará nela matéria para posterior desenvolvimento, quiçá motivação para novos projectos.

APÊNDICES

Apêndice A

1) A classificação de Ângelo Secchi compreende quatro classes, como mostra a tabela seguinte:

Tabela A.1 – Classificação Espectral de A. Secchi

Classe Espectral	Características do Espectro
I - Branco	Contém apenas linhas espectrais do hidrogénio.
II - Amarelo	Semelhante ao do Sol.
III - Vermelho	Apresenta alguma semelhança com o espectro do Sol, mas contém riscas de absorção desviadas para o vermelho.
IV - Muito Vermelho	Possui fortes bandas completamente diferentes das apresentadas na classe III, com desvio para o violeta.

2) A classificação espectral de Harvard compreende sete classes que se subdividem segundo o sistema decimal, conforme é indicado na tabela seguinte:

Tabela A.2 – Classificação Espectral de Harvard

Classes espectrais	Subclasses	Características do Espectro
O	contém 5; desde O5 até O9 inclusivé	Ricas do hélio e do azoto ionizados aparecem juntamente com as riscas do hidrogénio.
B	contém 10; desde B0 até B9 inclusivé	As riscas mais intensas são as do hélio neutro, as quais enfraquecem a partir da classe B2, quase desaparecendo para B9. Em contrapartida as riscas do hidogénio aumentam de intensidade através das subdivisões.
A	contém 10; desde A0 até A9 inclusivé	As riscas do hidrogénio atingem o máximo de intensidade para A2.
F	contém 10; desde F0 até F9 inclusivé	As riscas do hidrogénio diminuem, enquanto a intensidade das riscas dos metais aumentam, sobretudo as riscas H e K do cálcio ionizado.
G	contém 10; desde G0 até G9 inclusivé	As ricas dos metais são proeminentes.
K	contém 10; desde K0 até K9 inclusivé	As riscas dos metais ultrapassam em intensidade as riscas do hidrogénio. Aparecem bandas de moléculas como por exemplo de cianogénio.
M	contém 10; desde M0 até M9 inclusivé	As bandas do óxido de titânio, TiO, tornam-se cada vez mais proeminentes atingindo o seu máximo para M7.

3) A classificação mais recente é a de Yerkes — Sistema MKK. Em relação à classificação anterior são introduzidas mais três classes espectrais e um segundo parâmetro respeitante à luminosidade. Todas as classes possuem dez subdivisões.

Tabela A.3.1 – Classificação Espectral de Yerkes

Classes Espectrais	Subclasses	Características do Espectro
O	O0 a O9	Riscas de hélio - HeII, silício - SiIV e azoto - NIII, entre outras; presença fraca ou mesmo ausência de hidrogénio - H.
B	B0 a B9	Predominam as riscas de hélio - HeI, silício - SiIII, oxigénio - OII e hidrogénio - HI.
A	A0 a A9	As riscas de hidrogénio - HI são dominantes; é também característica a presença de riscas de magnésio - MgII e de cálcio - CaII.
F	F0 a F9	As riscas de hidrogénio - HI são mais fracas que nas estrelas da classe A; são comuns as riscas de cálcio - CaII e de ferro - FeII.
G	G0 a G9	As riscas de cálcio - CaII são dominantes; sobressaem ainda as riscas de ferro - FeII e de hidrogénio - H.
K	K0 a K9	Numerosas riscas de ferro - FeI, de cálcio - CaI e de titânio - TiI, entre outras; presença de riscas de cálcio - CaII e de hidrogénio - H, embora esta última seja fraca.
M	M0 a M9	Bandas moleculares de óxido de titânio, TiO e riscas de cálcio - CaI.
R e N	R0 a R9 N0 a N9	Bandas moleculares de CN, CH, C ₂ ; ausência de óxido de titânio, TiO; presença de riscas de metais neutros como nas estrelas das classes K e M.
S	S0 a S9	Bandas moleculares de óxidos de zircónio e de lantânio, ZrO e LaO, respectivamente; riscas de metais neutros como nas estrelas das classes K e M.

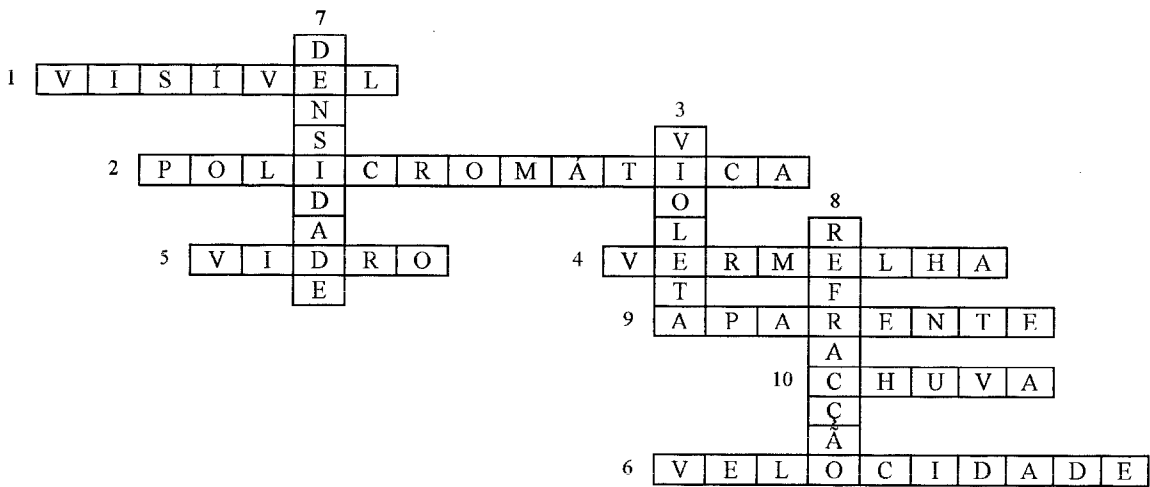
Tabela A.3.2. – Sistema MKK, Classes de Luminosidade

Classes de Luminosidade	Tipo de Estrela	Exemplos
Ia	Supergigantes mais brilhantes	Deneb - A2 Ia, Rigel - B8 Ia
Ib	Supergigantes menos brilhantes	Antares - M1 Ib
II	Gigantes brilhantes	Hadar - B1 II
III	Gigantes	Capella - G8 III, Aldebaran - K5 III
IV	Subgigantes	Achernar - B3 IV, Procyon - F5 IV
V	Estrelas da sequência principal	Sol - G2 V, Sirius - A1 V

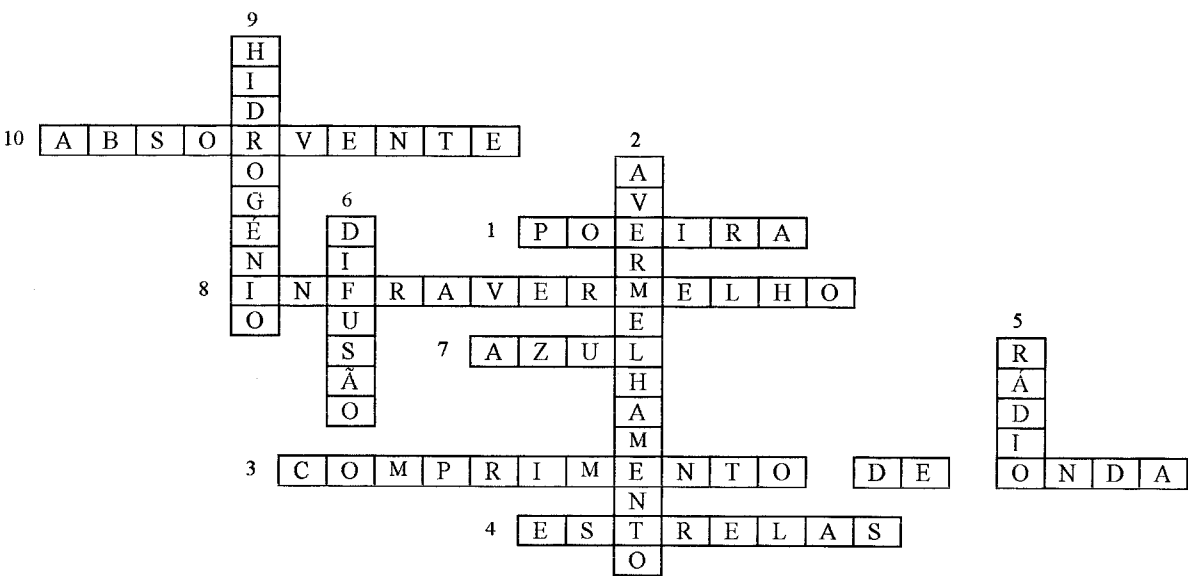
Apêndice B

Solução dos Crucigramas Interpretativos

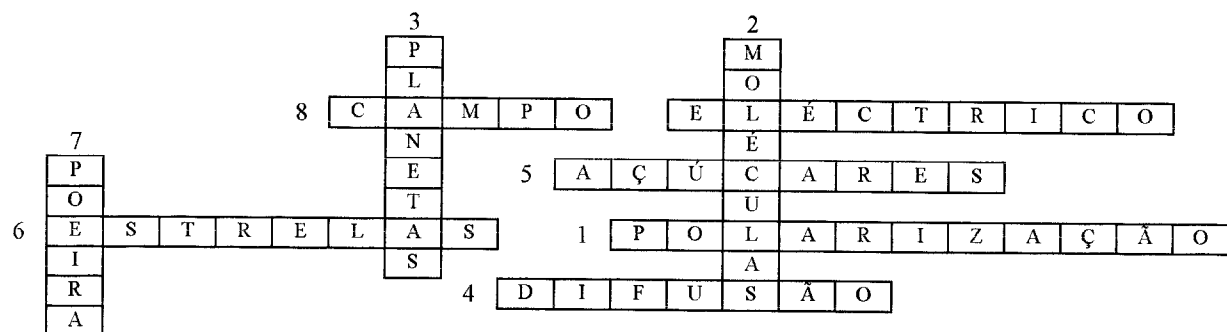
Pág. 66



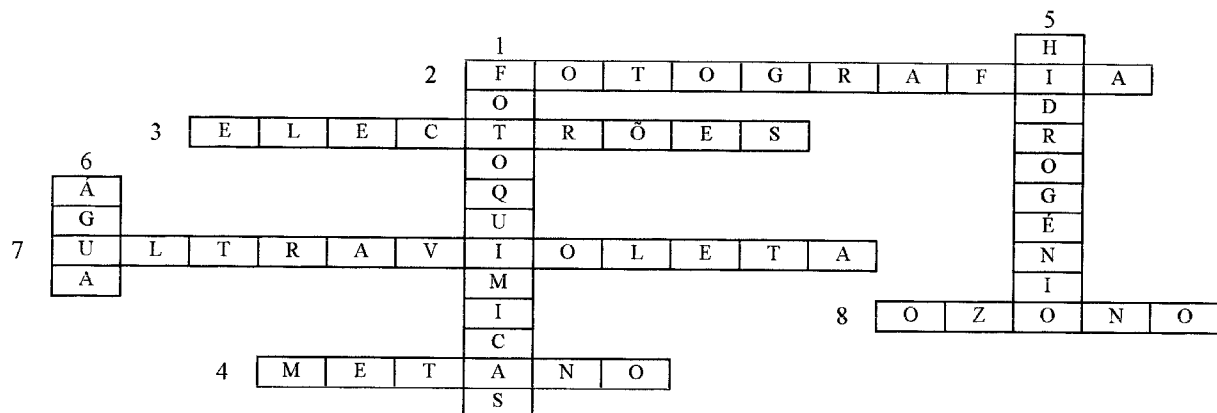
Pág. 68



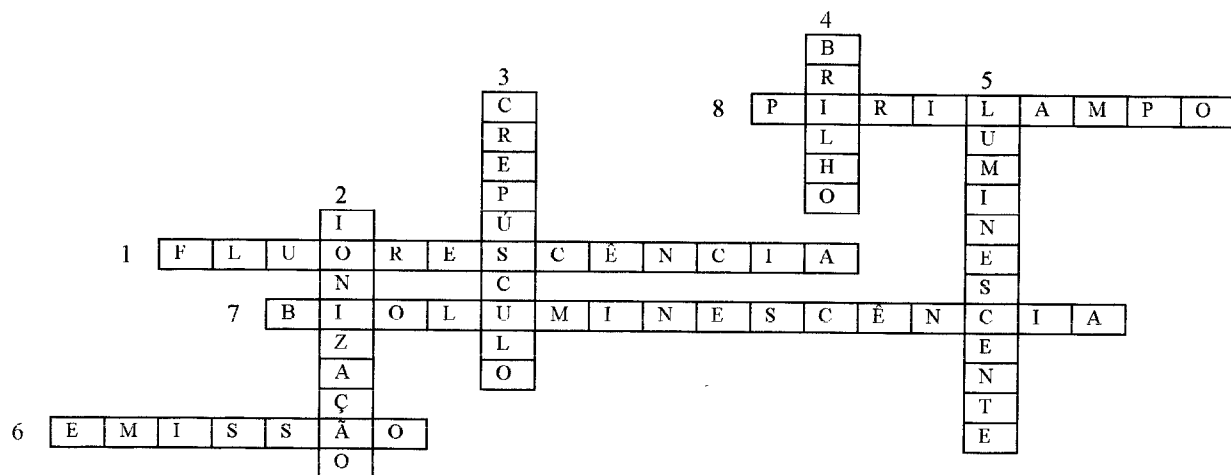
Pág. 70



Pág. 73



Pág. 76



LISTA DE FIGURAS

Pág. 14 – Fig. 2.1.

Adaptado de CANTOR, Geoffrey, « Criticism of the Projectile Theory of Light », *Physics Education*, March 1981, Fig.^s 1 e 2.

Pág. 15 – Fig. 2.2.

Adaptado de HOLTON, G., RUTHERFORD, J. and WATSON, F.(sob a direcção de) — *Projecto Física*, vol.4, traduzido do inglês por Maria Teresa L. Martins, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1985, p. 12.

Pág. 16 – Fig. 2.3.

Adaptado de COX, G.A. , « Thomas Young 1773 – 1829 », *Physics Education*, September 1973, Fig. 3.

Pág. 17 – Fig. 2.4.

Adaptado de KAUFMANN, J. William and COMINS, Neil F. — *Discovering the Universe*, 4th ed., W. H. Freeman and Company, New York, 1996, Fig. 3-4.

Pág. 18 – Fig. 2.5.

Adaptado de FEINBERG, Gerald, « Light », *Scientific American*, September 1968, p. 57.

Pág. 19 – Fig. 2.6.

Adaptado de FEINBERG, Gerald, « Light », *Scientific American*, September 1968, p. 57.

Pág. 23 – Fig. 3.1.

Adaptado de Enciclopédia Vida e Ciência, O Universo, Círculo de Leitores, Lda, Lisboa, 1985, p. 32

Pág. 24 – Fig. 3.2.

Astronomia – Instrumentos e Métodos, Edições Orbis, S.A., Barcelona, 1994, p. 46.

Pág. 24 – Fig. 3.3

SEGRELLES, Vicente e CUNILLERA, António — *Invenções que Revolucionaram o Mundo*, tradução de Daniel A. Gonçalves, Livraria Civilização Editora, Porto, 1984, p. 14.

Pág. 24 – Fig. 3.4.

Adaptado de Enciclopédia Vida e Ciência, O Universo, Círculo de Leitores, Lda, Lisboa, 1985, p. 32.

Pág. 25 – Fig. 3.5.

Adaptado de KITCHIN, C. R. — *Astrophysical Techniques*, Adam Hilger Ltd, Bristol, 1984, Fig. 1.1.37.

Pág. 25 – Fig. 3.6.

Ann Ronan Picture Library, Enciclopédia Vida e Ciência, O Universo, Círculo de Leitores, Lda, Lisboa, 1985, p. 30.

Pág. 27 – Quadro Ilustrado 3.2.

Esquemas de Aberração Cromática, Coma e Astigmatismo.

Adaptado de BERNARDO, Luís Miguel — *Um olhar sobre a Luz*, Departamento de Física da Faculdade de Ciências da Univ. do Porto, Porto, 1995, pp III.45, III.47, III.48, respectivamente.

Esquemas de Aberração Esférica e Distorção do Campo.

Adaptado de KITCHIN, C. R. — *Astrophysical Techniques*, Adam Hilger Ltd, Bristol, 1984, Fig.^s 1.1.28 e 1.1.33, respectivamente.

Pág. 29 – Fig.3.7.

Adaptado de KITCHIN, C. R. — *Astrophysical Techniques*, Adam Hilger Ltd, Bristol, 1984, Fig. 1.1.44.

Pág. 29 – Fig.3.8.

Dr.E. I. Robson / Science Photo Library, Enciclopédia Vida e Ciência, *O Universo*, Círculo de Leitores, Lda., Lisboa, 1985, p. 36.

Pág. 30 – Fig. 3.9.

MAURY, Jean-Pierre, « Léon Foucault, l'artisan de la science », *Ciel et Espace*, Février 1996, p. 66.

Pág. 32 – Fig. 3.10.

Adaptado de KITCHIN, C. R. — *Astrophysical Techniques*, Adam Hilger Ltd, Bristol, 1984, Fig. 1.1.9.

Pág. 32 – Fig. 3.11.

Adaptado de KITCHIN, C. R. — *Astrophysical Techniques*, Adam Hilger Ltd, Bristol, 1984, Fig. 1.1.13.

Pág. 34 – Fig. 3.12.

Adaptado de MCGILLIVRAY, Donald — *Physics and Astronomy*, Macmillan Press Ltd., London, 1987, Fig. 1.4.

Pág. 34 – Fig. 3.13.

SANTOS, Vitor Correia (coordenador) — *Memórias da Physica*, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 1998, p. 125.

Pág. 35 – Fig. 3.14.

Adaptado de KAUFMANN, J. William and COMINS, Neil F. — *Discovering the Universe*, 4th ed., W. H. Freeman and Company, New York, 1996, Fig. 4-11.

Pág. 36 – Fig. 3.15.

Adaptado de Enciclopédia Vida e Ciência, *O Universo*, Círculo de Leitores, Lda, Lisboa, 1985, p. 64.

Pág. 37 – Fig. 3.16.

Adaptado de HECHT, Eugene — *Óptica*, trad. port. de José M. Rebordão, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1991, Fig. 13.1.

Pág. 39 – Fig. 3.17.

S. Brunier, *Ciel et Espace*, Octobre, 1996, p. 11.

Pág. 40 – Fig. 3.18.

Adaptado de BOOTH, R. S., « Recent developments in radioastronomy — part 1 », September 1980, Fig. 3.

Pág. 41 – Fig. 3.19.

NASA / GSFC, *Ciel & Espace*, Mai 2000, p. 16.

Pág. 42 – Fig. 3.20.

Adaptado de LAWLOR, S. McKenna -, « The sun and solar flares », *Physics Education*, July 1982, Fig. 1.

Pág. 48 – Fig. 4.1.

Adaptado de MCGILLIVRAY, Donald — *Physics and Astronomy*, Macmillan Press Ltd., London, 1987, Fig. 4.7.

Pág. 50 – Fig. 4.2.

Adaptado de ELMGREEN, Debra Meloy — *Galaxies & Galactic Structure*, Prentice Hall Inc., New Jersey, 1998, Fig. 4.2.

Pág. 51 – Fig. 4.3.

Adaptado de SHU, H. Frank — *The Physical Universe, an introduction to Astronomy*, University Science Books, California, 1982, Fig. 11.3.

Pág. 51 – Fig. 4.4.

Adaptado de SHU, H. Frank — *The Physical Universe, an introduction to Astronomy*, University Science Books, California, 1982, Fig. 11.7.

Pág. 52 – Fig. 4.5.

ROBINSON, M. Rowan -, — *Universe*, Longman Group Ltd, London, 1990, Fig. 13.3: David Malin, Anglo-Australian Observatory.

Pág. 52 – Fig. 4.6.

ROBINSON, M. Rowan -, — *Universe*, Longman Group Ltd, London, 1990, Fig. 13.4: Mount Wilson Observatory.

Pág. 53 – Fig. 4.7.

AAO / D. Malin, Les Dossier de Science & Vie Junior, n.º 23, p. 92.

Pág. 54 – Fig. 4.8.

M. Sisk, Ciel et Espace, November 1997, p. 78.

Pág. 54 – Fig. 4.9.

SHU, H. Frank — *The Physical Universe, an introduction to Astronomy*, University Science Books, California, 1982, Fig. 11.11.

Pág. 56 – Fig. 4.10.

ROBINSON, M. Rowan - , — *Universe*, Longman Group Ltd, London, 1990, Fig. 8.8: Mark McCaughrean.

Pág. 56 – Fig. 4.11.

SANTOS, Filipe Duarte, « Formação, Evolução e Colapso de uma estrela », Colóquio / Ciências, Fevereiro de 1988, Fig. 3.

Pág. 56 – Fig. 4.12.

Adaptado de SHU, H. Frank — *The Physical Universe, an introduction to Astronomy*, University Science Books, California, 1982, Fig. 10.8.

Pág. 58 – Fig. 4.13.

CHONION, Laurent et VENTALON, Yves, Club de Brassac-les-Mines, Ciel & Espace, Mars 2000, p. 82.

Pág. 58 – Fig. 4.14.

Reeves, Hubert — *Poeira de Estrelas*, trad. port. de Joaquim C. M. da Silva, Gradiva — Publicações, L.^{da}, Lisboa, 1995, p. 91: California Institute of Technology.

Pág. 59 – Fig. 4.15.

Reeves, Hubert — *Poeira de Estrelas*, trad. port. de Joaquim C. M. da Silva, Gradiva — Publicações, L.^{da}, Lisboa, 1995, p. 115: David Malin, Anglo-Australian Telescope Board.

Pág. 60 – Fig. 4.16.

ROBINSON, M. Rowan - , — *Universe*, Longman Group Ltd, London, 1990, Fig. 12.1: Lick Observatory.

Pág. 60 – Fig. 4.17.

Adaptado de SHU, H. Frank — *The Physical Universe, an introduction to Astronomy*, University Science Books, California, 1982, Fig. 11.12.

Pág. 61 – Fig. 4.18.

ROBINSON, M. Rowan - , — *Universe*, Longman Group Ltd, London, 1990, Fig. 12.17: Fred Seward, Center for Astrophysics, Cambridge, Mass.

Pág. 61 – Fig. 4.19.

ROBINSON, M. Rowan - , — *Universe*, Longman Group Ltd, London, 1990, Fig. 16.2a: Lick Observatory.

Pág. 62 – Fig. 4.20.

M. Haas/D.Lempke/Isophot/MPIA, Ciel & Espace, Décembre 1998, p. 21.

Pág. 62 – Fig. 4.21.

ROBINSON, M. Rowan - , — *Universe*, Longman Group Ltd, London, 1990, Fig. 16.4b: IPAC, California Institute of Tecnology.

Pág. 62 – Fig. 4.22.

ROBINSON, M. Rowan - , — *Universe*, Longman Group Ltd, London, 1990, Fig. 16.4d: Robert Braun.

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Pág. 13 – Tabela 2.1 – Primeiras determinações da velocidade de propagação da luz.

Pág. 16 – Tabela 2.2 – Comprimentos de onda da luz determinados por Young.

Pág. 26 – Quadro Comparativo 3.1 – Vantagens e Inconvenientes dos telescópios refractores e reflectores.

Pág. 27 – Quadro Ilustrado 3.2 – Aberrações e distorções que afectam as imagens obtidas por telescópios.

Pág. 28 – Quadro Comparativo 3.3 – Correção de aberrações e distorções em telescópios.

Pág. 33 – Quadro Comparativo 3.4 – Parâmetros que avaliam a qualidade de um detector.

Pág. 49 – Quadro 4.1 – Classes espectrais e temperatura efectiva.

Pág. 80 – Tabela A.1 – Classificação Espectral de A. Secchi.

Pág. 80 – Tabela A.2 – Classificação Espectral de Harvard.

Pág. 81 – Tabela A.3.1 – Classificação Espectral de Yerkes.

Pág. 81 – Tabela A.3.2. – Sistema MKK, Classes de Luminosidade.

FONTES BIBLIOGRÁFICAS

LIVROS

- BOWERS, Richard and DEEMING, Terry — *Astrophysics II*, Jones and Bartlett Publishers Inc., Boston, 1984.
- CARVALHO, Rómulo de — *A História da Fotografia*, Atlântida, Coimbra, 1952.
- CHPOLSKI, Edouard — *Physique Atomique*, tome II, trad. franc. de Oleg Partchevski, Éditions Mir, Moscou, 1978.
- DIAS, José J. C. Teixeira — *Química Quântica*, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1982.
- DITCHBURN, R. W. — *Light*, London Blackie & Son Limited, Glasgow, 1963.
- ELMEGREEN, Debra Meloy — *Galaxies & Galactic Structure*, Prentice Hall Inc., New Jersey, 1998.
- FEYNMAN, Richard — *QED - A estranha teoria da luz*, trad. port. de Ana M.^a Ovídio Baptista, Gradiva — Publicações, L^{da}, Lisboa, 1988.
- GIBERT, Armando — *Origens Históricas da Física Moderna*, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1982.
- HAIST, Grant — *Modern Photographie Processing*, vol. 2, John Wiley and Sons, New York, 1979
- HECHT, Eugene — *Óptica*, trad. port. de José M. Rebordão, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1991.
- HOLTON, G., RUTHERFORD, J. and WATSON, F. (sob a direcção de) — *Projecto Física*, vol. 4, traduzido do inglês por Maria Teresa L. Martins, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1985.
- HOSKIN, Michael (editor) — *The Cambridge Illustrated History of Astronomy*, Cambridge University Press, Cambridge, 1997.
- KALER, James B. — *Astronomy I*, Harper Collins College Publishers, New York, 1994.
- KARTTUNEN, H., and others (editors) — *Fundamental Astronomy*, 3rd ed., Springer, New York, 1996.
- KAUFMANN, J. William and COMINS, Neil F. — *Discovering the Universe*, 4th ed., W. H. Freeman and Company, New York, 1996.
- KITCHIN, C. R. — *Astrophysical Techniques*, Adam Hilger Ltd, Bristol, 1984.
- MAIA, Hernâni L. e RAMOS, Joaquim J. M., (editores) — *A Evolução Cósmica e a Origem da Vida*, Livraria Almedina, Coimbra, 1985.
- MCGILLIVRAY, Donald — *Physics and Astronomy*, Macmillan Press Ltd., London, 1987
- MINNAERT, M. — *The nature of Light & Colour in the open air*, Dover Publications Inc., New York, 1954.
- PARK, David — *Introduction to the Quantum Theory*, 3th ed., Mcgraw-Hill Inc., New York, 1992.
- ROBINSON, M. Rowan - , — *Universe*, Longman Group Ltd, London, 1990.
- SANTOS, Vítor Correia (coordenador) — *Memórias da Physica*, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 1998.

SHU, H. Frank — *The Physical Universe, an introduction to Astronomy*, University Science Books, California, 1982.

TIPLER, Paul A. — *Física para cientistas e engenheiros*, vol. 4, 3.^a ed., traduzido do inglês por Horacio Macedo, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, 1995.

VASCONCELOS, Ernesto — *Astronomia Fotográfica*, Coleção Biblioteca do Povo e das Escolas, Lisboa, 1886.

WALKER, Jearl — *The Flying Circus of Physics*, John Wiley & Sons Inc., New York, 1975.

WHITFIELD, Richard C. — *Spectroscopy in Chemistry*, Longmans, Green & Co Ltd, London, 1969.

SEBENTAS

BERNARDO, Luís Miguel — *Um olhar sobre a Luz*, Departamento de Física da Faculdade de Ciências da Univ. do Porto, Porto, 1995.

CARVALHO, Jorge P. Maurício — *História da Astronomia*, Centro de Astrofísica, Faculdade de Ciências da Univ. do Porto, Porto, 1999.

GAMEIRO, Filipe — *Telescópios & Instrumentação*, Centro de Astrofísica, Faculdade de Ciências da Univ. do Porto, Porto, 1999.

SANTOS, F. Duarte — *Lições de Mecânica Quântica*, Lab. de Física da Univ. de Lisboa, Lisboa, 1970.

PUBLICAÇÕES PERIÓDICAS PORTUGUESAS

* Artigos de Revistas de Cultura e de Divulgação Científicas

LEQUEUX, J., « A Química Interstelar », Sociedade Portuguesa de Química (trad. port.), Abril 1984.

MAYER, R., « Grandes Etapas do Conhecimento em Oftalmologia », Omnia (trad. port.), Novembro de 1989.

PROVIDÊNCIA, João, « Grandes Correntes da Física Setecentista », Colóquio / Ciências, Maio de 1998

SANTOS, Filipe Duarte, « Formação, Evolução e Colapso de uma estrela », Colóquio / Ciências, Fevereiro de 1988.

« O Big Bang e as Forças Fundamentais da Física », Colóquio / Ciências, Novembro de 1998.

PUBLICAÇÕES PERIÓDICAS ESTRANGEIRAS

★ Artigos de Revistas de Cultura e de Divulgação Científicas

- BEICHMAN, Charles A. and RIDGWAY, Stephen, « Adaptive Optics and Interferometry », *Physics Today*, April 1991.
- BEYNON, J., « Visual acuity and the eye », *Physics Education*, September, 1985.
- BOOTH, R. S., « Recent developments in radioastronomy — part 1 », September 1980.
« Recent developments in radioastronomy — part 2 », November 1980.
- BOWYER, Stuart and MALINA, Roger, « Extreme ultraviolet images of the Cosmos », *Physics World*, January 1994.
- CANTOR, Geoffrey, « Newton's telescope », *Physics Education*, September 1977.
« Criticism of the Projectile Theory of Light », *Physics Education*, March 1981
- CASOLI, Fabienne, « Univers — Éloge de la poussière », *Ciel et Espace*, Juin 1997.
- COX, G.A., « Thomas Young 1773 – 1829 », *Physics Education*, September 1973.
- DISNEY, Michael, « Un regard nouveau sur les quasars », *Pour La Science* (versão francesa da revista *Scientific American*), Août 1998.
- EDWARDS, S. J., « The science of colour », *Physics Education*, June 1975.
- FEINBERG, Gerald, « Light », *Scientific American*, September 1968.
- FISHMAN, Gerald J. and HARTMANN, Dieter H., « Gamma-Ray Bursts », *Scientific American*, July 1997.
- GAVIN, Maurice, « Cosmic Rainbows: the Revival of Amateur Spectroscopy », *Sky & Telescope*, August 1999.
- GEHRLS, Neil and PAUL, Jacques, « The New Gamma-Ray Astronomy », *Physics Today*, February 1998.
- GEHRLS, Neil and others, « The Compton Gamma Ray Observatory », *Scientific American*, December 1993.
- GILLET, Frederick and HOUCK, James, « The Decade of Infrared Astronomy », *Physics Today*, April 1990.
- GUNN, Alastair, « Jodrell Bank », *Astronomy Now*, September 1999.
- HAWES, Joan L., « Matter for Illumination », *Physics Education*, May 1981.
- HENAREJOS, Philippe, « Astronomie X : les richesses d'un ciel invisible », *Ciel et Espace*, Janvier 1997.
- HILL, Trevor and others, « Radio Interferometry », *Physics Education*, November 1993.
- JAVAN, Ali, « The Optical Properties of Materials », *Scientific American*, September 1968.
- KHALATBARI, Azar, « La lumière messagère des étoiles », *Ciel et Espace*, Août 1997.
- KELLERMANN, Kenneth I. and HEESCHEN, David S., « Radioastronomy in the 1990s », *Physics Today*, April 1991.
- LAMBOURNE, Robert, « The Doppler effect in astronomy », *Physics Education*, January 1997.

- LANG, Kenneth R., « SOHO Reveals the Secrets of the Sun », *Scientific American*, March 1997.
- LASOTA, Jean-Pierre, « Unmasking Black Holes », *Scientific American*, May 1999.
- LAWLOR, S. McKenna -, « The sun and solar flares », *Physics Education*, July 1982.
- MALIN, David F., « A Universe of Color », *Scientific American*, August 1993.
- MAURY, Jean-Pierre, « Léon Foucault, l'artisan de la science », *Ciel et Espace*, Février 1996.
- MILLS, H. R., « Problems and projects from astronomy », *Physics Education*, November 1991.
- NASSAU, Kurt, « The Causes of Color », *Scientific American*, October 1980.
- OSTER, Gerald, « The Chemical Effects of Light », *Scientific American*, September 1968.
- PARNELL, Clare, « Peeling back the Sun », *Physics Education*, May 1999.
- PAUL, Jacques, « L'astronomie X fait sa revolution », *Ciel & Espace*, Mars 1999.
- POWELL, Corey, « Inconstant Cosmos », *Scientific American*, May 1993.
- REES, Martin J., « Black Holes in Galacyic Centers », *Scientific American*, November 1990.
- RAYMONT, G. Branduardi -, « The x-ray sky », *Physics Education*, November 1995.
- ROBSON, E. I., « Recent advances in infrared astronomy », *Physics Education*, March 1980.
- SOKER, Noan, « Planetary Nebulae », *Scientific American*, May 1992.
- STEINFATT, Manfred F. D., « Revealing the mechanism of Luminol-Type Chemiluminescence », *Bull. Soc. Chim. Belg.* vol. 94 / n.º 6 / 1985.
- SURDIN, V., « The eye and the sky », *Quantum*, January / February 2000.
- TERRANCE, Gregory, « In Cyber Color » *Astronomy*, April 2000.
- TRIMBLE, Virginia « Looking Backward », *Sky & Telescope*, January, 2000.
- VEILLEUX, Sylvian and others, « Colossal Galactic Explosions », *Scientific American*, February 1996.
- WATSON, F. G., « Recent developments in optical astronomy », *Physics Education*, July 1980.
- WILLMORE, A. P., « Recent developments in x-ray astronomy », *Physics Education*, March 1980.