



CURSO DE ASTRONOMIA GERAL

IOTA



ASTROFÍSICA

**CCD
OBA**

CURSO DE ASTRONOMIA GERAL

versão iota – outubro de 2012

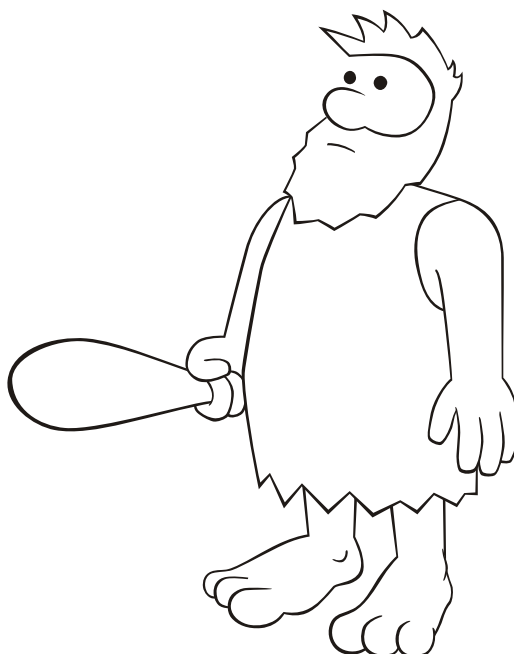
volume IV : astrofísica

escrito por:

Bruno L' Astorina
Felipe Augusto C. Pereira
Julio Campagnolo
Rafael Teixeira de Lima

e também por:

Alexandre Bagdonas
Fabício Caluza Machado
Felipe F. Villar Coelho
Raul Celistrino Teixeira
Thomas Ferreira de Lima



Centro de Controle de Doenças
Olimpíada Brasileira de Astronomia e Astronáutica

Todos os volumes desta obra são licenciados como Creative Commons (CC BY-SA 3.0). Isso significa que você é livre para copiar, distribuir, transmitir ou adaptar este trabalho, desde que citada a fonte (Curso de Astronomia Geral do CCD-OBA) e que qualquer trabalho derivado deste seja liberado com a mesma licença.

Sumário

I	Natureza das Coisas	7
1	Matéria	10
1.1	Elementos e átomos	11
1.2	Estruturas Atômicas	17
1.3	Nuvens Eletrônicas	20
1.3.1	Química das Nuvens	21
1.3.2	Física das Nuvens	24
2	Luz	26
2.1	As Ondas	29
2.2	Ondas Eletromagnéticas	33
2.3	Efeito Doppler	34
2.4	Efeito Fotoelétrico	35
3	Cores	37
3.1	Brilho, Matiz e Croma	38
3.2	Teoria Clássica	39
3.2.1	Cores Primárias	40
3.2.2	Cores Opostas	41
3.3	Tricromia	41
3.4	O que o olho pode ver	42
3.5	O que o olho não pode ver	44
II	Física	47
4	Corpo Negro	50
4.1	Cor das Estrelas	55
4.2	Índices de Cor	56
5	Espectros	59
5.1	Átomo de Bohr	61
6	Teoria Quântica	65
III	Estrelas	71
7	O Sol	73
7.0.1	Energia Solar	73
7.1	Interior Solar	76

7.2	Superfície Solar	78
8	Estrelas	83
8.1	Espectros Estelares	83
8.2	Classificações Espectrais	86
8.2.1	Classificação de Luminosidade	89
8.3	Diagrama HR	91
9	Evolução Estelar	93
9.1	Seqüência Principal	95
9.2	Gigantes Vermelhas e Anãs Brancas	97
9.3	Horizontais e Assintóticas	99
9.4	Supermassas e Buracos	100
10	Estrelas Binárias	105
10.1	Binárias Visuais	107
10.2	Binárias Espectroscópicas	108
10.3	Binárias Eclipsantes	110
11	Estrelas Variáveis	113
12	Aglomerados	115
13	Galáxia	117
IV	Rochas	121
14	Sistema Solar	125
14.1	Crescimento Populacional	125
14.2	Corpos Distantes	127
14.3	Quem é planeta?	129
14.4	Formação	130
15	Asteróides e Corpos Pequenos	132
15.1	Asteróides	132
15.2	Cometas	133
16	A Lua	135
16.1	Fissão	135
16.2	Captura	136
16.3	Acresção	136
16.4	Colisão	136

Prefácio

Intelectuais pelo mundo afora assumem como dado que seus modelos serão mais inteligentes, farão melhores sugestões, terão melhor apreensão da realidade dos seres humanos do que esses próprios seres humanos.

Paul Feyerabend, *Contra o Método*

Estas são as apostilas do Curso de Astronomia Geral do CCD-OBA, versão *ι*. Nosso objetivo principal, com o curso, é enriquecer a *formação* dos seus participantes. Por “*formação*”, referimo-nos a um processo que é, em sua essência, individual e único, composto amplamente pelo conjunto de experiências vividas por alguém. Citando Hans-Georg Gadamer, “Não é casual que a palavra *formação* se pareça, neste aspecto, ao grego *physis*. Como a natureza, a *formação* não conhece objetivos que lhe sejam exteriores.”

Isso quer dizer que a postura que procuraremos desenvolver se fundamenta na *autonomia intelectual*: cada indivíduo é senhor sobre a formação de seu próprio conhecimento. Tudo o que podemos fazer, enquanto organizadores do curso, é dar incentivo, buscando fornecer uma visão mais ampla a partir de nossas próprias experiências.

Convidamos para este curso pessoas que têm grande vontade de saber, esperamos fornecer conhecimento até elas saciarem essa vontade e, então, perceberem que ter aprendido aquilo tudo não faz sentido se, de alguma forma, não for passado adiante. Com isso o processo se retroalimenta, individual e coletivamente. Individual porque sempre aprendemos muito quando alguém nos ensina, mas aprendemos ainda mais quando nós ensinamos alguém, quando fazemos o esforço de pôr nosso conhecimento em frases organizadas e compreensíveis. Coletivamente porque os que aprenderem conosco agora estarão ensinando depois, como nós. Essa é precisamente a origem da CCD: ex-alunos da olimpíada que aprenderam muito, sozinhos e com a ajuda de livros, professores e astrônomos, e acabaram decidindo que precisavam escrever e organizar cursos com tudo o que sabiam. Dentre os autores desta versão *ι* do Curso, há nomes de pessoas que, um ano atrás, eram alunos felizes e curiosos pelo que viria a seguir.

Nesse contexto, a Astronomia, por mais encantadora e atraente que seja para a maioria de nós, não é pensada como um fim em si próprio, mas como um lugar de articulação de saberes. Mostramos, ao longo das apostilas, o quanto a astronomia tem a ver com o desenvolvimento da física, da química e da matemática; mas, mais do que isso, quais são suas relações com a história, a filosofia, as religiões, as diferentes expressões artísticas e, enfim, com as diferentes visões de mundo que surgiram aqui e ali ao longo das histórias humanas. Em suma, não queremos Astronomia pela Astronomia, mas Astronomia por Tudo!

Assim, pretendemos desenvolver uma visão melhor e mais completa do mundo natural e, através disso, do mundo humano também. Fazemos isso, em particular, buscando desenvolver as seguintes habilidades/características individuais:

- Articulação lógica e formal (que tem a ver com a LINGUAGEM)
- Capacidade de abstrair e imaginar (relacionado ao PENSAMENTO)

- Cultura Experimental (característica da CIÊNCIA)
- Reflexão crítica sobre o conhecimento (papel da FILOSOFIA)
- Contemplação estética (o que chamamos de ARTE)

O material está dividido em cinco volumes, na ordem em que os assuntos pareceram mais naturais para nós. O Volume I, *Céu*, discute tudo o que pode ser observado. Discute também algumas interpretações, míticas, poéticas e teóricas, sobre as observações. Toda a matemática desenvolvida nele, portanto, está ligada à geometria dos céus, a Geometria Esférica. Talvez seja o volume com conteúdo mais diferente do que normalmente é visto no colégio. O Volume II, *Medidas*, está mais ligado à idéia e à prática dos experimentos; sua introdução a como tratar dados experimentais é uma introdução à abordagem algébrica que virá nos volumes seguintes. Além disso, ele procura desenvolver uma intuição sobre as técnicas e medição e os instrumentos (em particular os telescópios) necessários para se desenvolver qualquer outro instrumento astronômico. O Volume III, *Mecânica*, é o primeiro que trata de física. Ele introduz a mecânica aprendida no colégio, mas com as intuições nascidas da nossa própria experiência. Discute também a física no contexto da mudança da visão sobre o universo nos séculos XVI e XVII, que culmina com o nascimento da Mecânica Celeste. Discute, finalmente, a construção da própria Mecânica Celeste, com uma abordagem geométrica (que é clássica mas também incomum nos estudos de física de hoje em dia) e procurando criar uma boa intuição sobre movimentos livres em campos gravitacionais. O Volume IV, *Astrofísica*, também fala de física, mas de um caráter bem diferente: da constituição material do mundo, do caráter da luz e das interações atômicas. Nesse sentido, é um volume bastante ligado à química. Ele culmina com o estudo detalhado, dos pontos de vista teórico, experimental e observacional, de alguns objetos de interesse astronômico, passando por estrelas e sua evolução, mas também por aglomerados, galáxias e asteróides. Por fim, o Volume V, *Universo*, trata principalmente de Cosmologia, ou seja, da discussão sobre o universo como um todo. Como não poderia deixar de ser, ele alterna entre discussões filosóficas e matemáticas densas, pontuadas por alguns *insights* poéticos. Na segunda parte, há dois capítulos discutindo sobre a situação atual da pesquisa em astronomia no Brasil – o que é especialmente interessante para quem tem alguma pretensão de estudar ciência na universidade.

Além dessas apostilas, enviaremos outros materiais, como referências e algumas atividades práticas ao longo do curso. Incentivamos que as façam, de forma a complementar o conteúdo das apostilas. Aplicaremos também uma ou duas provas para selecionar os estudantes para a *International Olympiad on Astronomy and Astrophysics* (IOAA) e para a *Olimpiada Latinoamericana de Astronomía y Astronáutica* (OLAA). Além disso, esperamos engajar os participantes em algumas práticas, ligadas à noção de responsabilidade intelectual discutida acima: ensinar colegas, em discussões de grupo, aulas preparatórias para a próxima OBA ou aulas motivadoras em colégios de baixa renda; observar o céu com outros, em clubes de astronomia amadora e em *star parties*; envolver-se em projetos de pesquisa, junto a astrônomos amadores, professores universitários ou membros do CCD; integrar-se, por fim, ao nosso próprio grupo.

A primeira olimpíada internacional de astronomia foi fundada em 1996; é dois anos mais antiga, portanto, que a sua versão brasileira. Desde a fundação da OBA, há o compromisso de enviar times anualmente à olimpíada internacional – pelo qual sempre foi necessário fazer uma seleção justa e eficiente para montar as equipes. Este curso nasceu dessa necessidade: precisávamos, afinal, fornecer bases de conhecimento necessária aos que tivessem as habilidades e os interesses necessários. Nossos objetivos, contudo, já ultrapassaram em muito os objetivos da seleção. É o que esperamos que fique claro ao longo das páginas que se seguem.

Sobre este Volume

Como o volume anterior, este Volume 4, Astrofísica, tratará de física. Mas numa perspectiva diferente: trataremos da constituição da matéria, não dos movimentos. Como é um assunto naturalmente mais complexo, a abordagem matemática será menos incisiva. Em vez disso, as discussões terão uma proximidade maior com temas de química.

O Volume tem mais ou menos a mesma estrutura que o de mecânica. A Unidade 1, Natureza das Coisas, mostra como surgiram os conceitos essenciais a serem debatidos. Assim, discute todas as noções importantes sobre Matéria (elementos químicos, moléculas, átomos prótons e elétrons), sobre Luz (como onda e como partícula) e sobre Cores. A Unidade 2, então, aborda as teorias básicas de física necessárias para compreender os estudos astrofísicos. Os três tópicos são raramente abordados na escola e, portanto, devem ser lidos com cuidado. São eles: a espectrometria, a teoria de corpos negros e a teoria quântica.

Depois disso, vamos aos temas propriamente astrofísicos, divididos em duas partes. a Unidade 3 trata das estrelas e conjuntos de estrelas (aglomerados e galáxias), retomando temas do Volume 1, agora do ponto de vista das teorias físicas sobre os objetos. São abordadas as teorias de evolução estelar e os modelos termodinâmicos de interiores de estrelas, para depois tratarmos de alguns objetos específicos interessantes. A Unidade 4, por sua vez, trata dos corpos rochosos do Sistema Solar, bem como deste sistema como um todo.

Algumas partes, em especial sobre estrelas duplas e asteróides, pressupõem que o leitor já tenha intuição sobre movimentos orbitais, conforme desenvolvido no Volume 3.

Unidade I

Natureza das Coisas

O universo não é apenas mais estranho do que imaginamos, é mais estranho do que podemos imaginar.

Werner Heisenberg

Do que são feitas as coisas do mundo? Elas têm algo em comum, algo além do que vemos a olho nu? O que compõe as coisas, em que proporções? Com que organização? Qual o fundamento, qual a estrutura da matéria? Essas perguntas são muito antigas nas tradições humanas de pensamento. Em geral, coincidem com uma certa superação dos mitos, em algumas sociedades; afinal, os deuses de uma mitologia não são nada mais que o reconhecimento das grandes forças da natureza, que regem toda a vida da sociedade: o Sol, a Lua, as águas, o Inverno, a reprodução das plantas, dos animais, etc. Na falta de figuras melhores, essas entidades são, na maioria das vezes, representadas por figuras humanas. Mas acontece que, em certas tradições, a representação da natureza passa a assumir graus mais complexos e mais abstratos de reflexão; em muitas dessas tradições (gregos, chineses, indianos, judeus, etc.), chegou-se a negar a representação mítica em favor de uma representação mais, digamos, unificada da natureza – buscando um *princípio fundamental* por trás dos fenômenos.

Capítulo 1

Matéria

Vejamos o caso dos gregos, que é o da nossa própria tradição. Eles tinham uma concepção de fundo que era a idéia de *PHYSIS*. Originária do verbo *physein*, brotar, seu sentido mais usual era algo como “tudo o que brota”, a *natureza como um todo*. Por volta do século VI a.C., pensadores gregos estavam negando a mitologia grega clássica – os deuses eram arbitrários demais; ali, estavam interessados em princípios fundamentais, ocultos sob as aparências, que formassem ou articulassem a *physis*. A seita dos pitagóricos, por exemplo, considerava as harmonias numéricas e geométricas as responsáveis pela organização do mundo.

Mais especificamente, articulou-se uma tradição que buscava *substâncias fundamentais*, a partir das quais tudo o mais seria formado. Tales de Mileto afirmava que a ÁGUA seria essa substância fundamental, já que ela pode tomar a forma de qualquer coisa. Seu aluno Anaximandro, porém, falava em uma substância *apeiron* (literalmente, *sem forma*), algo mais neutro, que não tivesse a propriedade de nenhum corpo material e, justamente por isso, pudesse ganhar as propriedades de qualquer um¹. Anaxímenes, aluno de Anaximandro, falava no AR, que, em diferentes concentrações, formaria os diferentes materiais. Xenófanes de Cólofon colocava a TERRA como matéria fundamental, de onde tudo vem e para onde tudo vai. Heráclito de Éfeso, ressaltando o caráter eternamente mutável das coisas do mundo (“uma água nunca passa duas vezes sob a mesma ponte”), coloca o FOGO como fundamento.

Enfim, Empédocles de Agrigento faz algo mais articulado. Baseado no princípio dos pares de opostos², articula sua TEORIA DOS QUATRO ELEMENTOS: água, ar, terra, fogo – a qual vimos no Volume 2. Essa teoria fez sucesso, ainda mais depois que Aristóteles a utilizou no seu livro *Physica*³, incorporando-a em seu modelo físico e cosmológico (associando os quatro elementos às quatro causas, por exemplo).

Essa investigação das substâncias fundamentais também foi praticada, de forma bastante parecida, em outras tradições culturais. Para os chineses, por exemplo, havia um só princípio para a Matéria (Qi) e outro para o vazio (Kung); mas essa matéria se manifestava sob *cinco formas fundamentais*: água, fogo, terra, metal e madeira. Cada um dos objetos era uma combinação de Qi em diferentes modos.

¹ Repare que o conceito de *apeiron* pode ser comparado ao nosso conceito de *células-tronco* (embora eles não tenham nenhuma conexão causal, apenas semelhança).

² A idéia é que existem diversos pares de características opostas: quente-frio, seco-úmido, amor-ódio... E qualquer coisa pode ser descrita em termos de qual sua posição em cada um dos pares: se ela é mais quente ou mais fria, mais seca ou mais úmida, se tem mais amor ou mais ódio. Assim, os quatro elementos são: o frio e seco, o frio e úmido, o quente e seco, o quente e úmido.

³ A *Physica*, em Aristóteles, é o saber responsável por estudar a *physis*, o mundo material, sensível.

Já os hindus pensavam em elementos diferentes, como os gregos; no caso deles, eram cinco, não quatro. Segue um fragmento de um texto hindu antigo sobre a criação do mundo:

Ao fim desse dia e dessa noite, quem dormia [Brahman] desperta; despertando, ele cria o pensamento, que existe e não existe.

Movida pela vontade de criar, a mente se modifica gerando o ÉTER [ou vácuo]; ele é dotado da capacidade de *vibração*.

Do éter modificado, por sua vez, nasce o VENTO puro e poderoso, que carrega todos os aromas; ele é dotado de *tangibilidade*.

Do vento, transformado, procede a LUZ brilhante, que ilumina e dissipa as trevas; ela tem a qualidade da *cor*.

Da luz, modificada, nasce a ÁGUA, que tem a qualidade do *sabor*. Da água nasce a TERRA, que tem por qualidade o *odor*. Eis o princípio da criação.

Em todo caso, a tradição filosófica grega se tornou quase inteiramente desconhecida na Idade Média européia – em especial no que diz respeito à composição da matéria. A tradição greco-romana de explicação de mundo foi substituída pela judaico-cristã, que também negava os deuses especializados, mas em prol de uma visão bastante diferente. Para esta tradição, a harmonia do mundo natural não era algo muito importante, talvez nem fizesse sentido; a idéia era que havia *um único* deus, que estava *fora* do mundo, que tinha criado todas as coisas *segundo a sua vontade*. A preocupação intelectual passaria a se concentrar muito mais no que esse Deus teria a dizer aos humanos do que em que substâncias ou whatever que comporia as coisas materiais.

De qualquer forma, no rastro da fundação das Universidades, no século XIII, a Europa sofreu uma forte inovação intelectual, com a recuperação, através dos árabes, dos textos clássicos gregos. Nos meios intelectuais, havia um nome que ecoava mais do que todos os outros: Aristóteles. Foi quando essas questões gregas se tornaram questões importantes no pensamento europeu cristão. No final da idade média, Aristóteles era definitivamente a maior autoridade. Seria justamente contra isso que se levantariam os renascentistas.

1.1 Elementos e átomos

No Volume III, discutimos como, a partir de Copérnico, a teoria dos movimentos celestes foi lentamente sendo abandonada, substituída por uma nova visão. O mesmo tipo de mudança ocorreu no pensamento sobre a composição da matéria. Assim, com a descoberta de cada vez mais textos gregos e romanos, foi ressuscitada uma escola filosófica grega meio marginalizada, fundada por Demócrito de Abdera: a *Escola Atomista*. Segundo a concepção dessa escola, a *physis* seria composta por apenas dois tipos de coisas: VAZIO (*kenos*; ou *vacuum* em latim) e de PARTÍCULAS INDIVISÍVEIS (in-divisíveis: *a-tomoi*) vagando por este vazio. Essas *partículas-átomo* existiriam sob diversas formas, e vagariam aleatoriamente pelo espaço vazio, se chocando, se agrupando e desagrupando, “*criando e dissolvendo mundos*”. A idéia proclamava duas coisas a que a tradição grega tinha horror: que a matéria vagava no vazio (ao contrário dos chineses, os gregos nunca admitiram a existência do vácuo, de um espaço onde não houvesse nada) e que as coisas se formavam aleatoriamente – isso era demasiadamente inaceitável para a perfeita e equânime razão grega. Por isso, a escola nunca foi muito valorizada na Grécia, embora sempre tivesse tido pequenos grupos seguidores – até mesmo no Império Romano, com Lucrécio.

Os renascentistas (e algumas gerações seguintes) tinham Aristóteles como um inimigo comum. Assim, nestes tempos, as idéias atomistas chegaram através dos textos de Lucrécio, e

passaram a ser cada vez mais populares entre os que se ocupavam de História Natural⁴, contra a teoria clássica dos quatro elementos (que expusemos no Volume III). Newton, por exemplo, era um atomista convicto, e considerava seu tratado *Óptica* muito mais importante que o *Principia* – naquele tratado, ele estabeleceu diversas leis da propagação e do espalhamento da luz, considerando-a como formada por pequenas partículas luminosas se propagando. Descartes, por outro lado, era mais moderado: embora não fosse inteiramente partidário do atomismo (como já vimos, ele não acreditava no vácuo, e para ele qualquer corpo poderia ser dividido até o infinito), explicava a constituição da matéria a partir de três tipos fundamentais de partículas (lembrem dos vértices que explicavam os movimentos orbitais?).

Paralelamente, havia o movimento dos alquimistas, que, desde a Idade Média, tratava de diversas misturas de substâncias, buscando, como objetivo último, transmutar elementos em ouro⁵. Os alquimistas viviam em um universo à parte da filosofia natural. Eles não estavam nas universidades e nas sociedades de conhecimento discutindo sobre a natureza do universo; antes, eram os farmacêuticos, curandeiros e bruxos, aqueles que sabiam de fato manipular as substâncias e produzir efeitos nas pessoas e nas coisas. Assim, enquanto os físicos e filósofos discutiam a composição do mundo na Academia, os alquimistas manipulavam a composição do mundo.

Entretanto, um aspecto importante da nova ciência que viria a nascer era justamente a fusão entre o conhecimento teórico do mundo, por um lado, e o conhecimento prático e a produção tecnológica, por outro. Assim, foi nesta época que começaram a surgir os tratados escritos de alquimia, cada vez com mais fundamentação filosófica e rejeitando a mais inocente alquimia anterior. Foi-se, então, constituindo a tradição da química moderna.

A alquimia era completamente fundamentada na idéia aristotélica de elemento. O que os alquimistas investigavam eram as transformações dos elementos. O mais famoso tratado alquímico é o de Paracelso, considerando por alguns o pai da medicina moderna. Nascido Philippus Aureolus Theophrastus Bombastus von Hohenheim⁶, em uma vila onde hoje é a Suíça, ele já pertence à geração dos alquimistas filósofos. Em 1509 (30 anos antes da publicação do *Revolutionibus* por Copérnico), com 16 anos, Phillip ingressou na Faculdade de Medicina da Universidade de Basel; como tal, estudou as Artes Liberais, conhecendo assim lógica, retórica, astronomia e os grandes textos do grande mestre, Aristóteles. Além disso, como todo médico da época, era também profundo conhecedor de astrologia. Contudo, a astrologia e a medicina tradicional grega-árabe não lhe eram suficientes; também dominava a alquimia e a transmutação de elementos.

Em seus tratados alquímicos, Paracelso defende os quatro elementos aristotélicos. Mas ele identificava, além disso, três princípios por trás das substâncias: *Sal*, *Enxofre* e *Mercúrio*, associados respectivamente a Corpo, Alma e Espírito. Como no corpo humano, o Sal é o que torna os corpos *coesos*, o Mercúrio é o que os torna *fluidos* e o Enxofre é o que os torna *combustíveis*. Nas palavras dele:

Uma espécie de Enxofre se encontra no ouro, outra na prata, uma terceira no chumbo

⁴ O termo grego para *historia* significa “conhecimento adquirido mediante investigação”, o que é diferente da filosofia, um conhecimento adquirido mediante reflexão, e diferente ainda do que viria a ser o conhecimento teológico cristão, adquirido por revelação. Dessa forma, até a referida época, e ainda por mais tempo na frente, o termo *história natural* era usado para designar o conhecimento investigativo sobre a natureza, o que incluía conhecimentos herbários, alquímicos, astronômicos... Da mesma forma, usava-se o termo *filosofia natural* para as grandes classificações, os grandes modelos cosmológicos, etc. Entretanto, como os resultados dessas investigações eram geralmente expressos na forma de narrações ou descrições ordenadas, o termo *história* passou a ser usado num sentido mais próximo ao nosso, para se referir ao “relato de fatos em ordem cronológica”.

⁵Na tradição chinesa, a alquimia se desenvolveu, prioritariamente, na busca de substância que garantiria juventude eterna.

⁶Nesta época, era comum assumir um novo nome, latino, em livros e na vida intelectual, em oposição ao nome de batismo, em língua vulgar. Assim, Phillip tornou-se Teofrastus Phillipus, e mais tarde ainda assumiu o título de Paracelsus, significando “igual ou maior que Celsus”. Celsus era um enciclopedista romano.

e outra ainda no estanho e assim por diante. Existe também uma outra espécie de Enxofre nas pedras, na cal, nas nascentes, nos sais. Não só existem muitos Enxofres, mas também muitos Sais. Existe um Sal nas pedras preciosas, um outro nos metais, um terceiro nas pedras, e outros mais nos sais, no ácido sulfúrico e no alume. As mesmas afirmações valem também para o Mercúrio.

De Paracelso, saltamos um século, para o filósofo natural inglês Robert Boyle. O ano é 1661, quando Boyle publicou seu segundo trabalho, “The Sceptical Chymist”. Nesta época, já haviam passado Tycho, Galileu e Kepler, e o universo aristotélico já havia sido destruído. Entre os filósofos naturais, misticismos como os de Kepler ou, mais ainda, como os de Paracelso, não eram mais aceitos. O próprio título da obra de Boyle indica sua opinião quanto aos alquimistas que o precederam. Na obra de Boyle não há uma teoria sobre elementos químicos, mas sim uma tentativa de conceitualização do que seria um elemento. Como explicitado neste trecho:

O que entendo por elementos (...) são certos corpos primários e simples, perfeitamente sem mistura, os quais, não sendo formados por quaisquer outros corpos, nem uns pelos outros, são os ingredientes dos quais todos os corpos perfeitamente misturados são feitos, e nos quais podem finalmente ser analisados.

É importante salientar que para Boyle não havia diferenças entre os corpos de diferentes elementos. A realidade deveria ser construída a partir de uma unidade singular: partículas unitárias, primárias e simples, que interagem formando os diferentes corpos que vemos macroscopicamente. Essa diferenciação entre o que é característica da substância e o que é característica do elemento lançou as bases para a criação da química moderna.

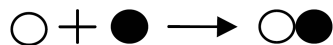
Nesta nova química de investigação experimental, os elementos se multiplicavam profusamente. A Enciclopédia de Diderot, de 1751, já apresentava 44 elementos diferentes! Entre eles ainda figuravam o ar, a água e o éter (então chamado quinta essência). A *água da chuva* era um novo elemento, diferente da água. Em substituição ao fogo, havia o *flogístico*, um princípio de queima presente em todos os corpos. Os sais eram quatro: *sal marinho*, *sal pedra*, *sal gema* e *sal amoníaco*, além do *ácido simples*, *ácido vitriolítico*, *ácido nítrico* e *ácido marinho*, do *enxofre simples*, *enxofre escuro*, *enxofre vivo* e *enxofre dos filósofos*, dos metais *ouro*, *cobre*, *ferro*, *alumina*. ... E ainda apareciam como elementos os princípios de *cristalização*, de *coagulação*, de *dissolução*, de *destilação*. ... Até *chifre-de-cervo* (o material do chifre) aparecia na tabela como um elemento distinto!

Com o passar do tempo, a tradição atômica de parte dos mecanicistas foi penetrando nas teorias químicas, fundindo-se à tradição dos elementos. Um marco foi o inglês John Dalton, com sua Lei das Proporções Definidas. Como quase todas as inovações químicas até o século XIX, a Lei de Dalton era inteiramente experimental.

O que se observava era o seguinte: se reagíssemos 12 g de carbono e 32 g de oxigênio, obteríamos, sempre, 43 g de gás carbônico. Primeiro ponto importante: as massas se conservam. Entretanto, se misturássemos 19 g de carbono, em vez de 12, com as mesmas 32 de oxigênio, continuariam se formando 43 g de gás carbônico, e sobrariam 7 g do carbono. Ou seja, as proporções de reação são fixas. 12 g de carbono reagem só com 32 de oxigênio; 24 g de carbono reagem com 64 g de oxigênio; 36 com 96, assim por diante. É diferente de um suco de garrafa que, quanto mais água se põe, mais transparente fica (mais diluído fica o extrato de suco). Isso porque o extrato do suco não se funde à água, apenas se mistura a ela; suas partículas ficam vagando entre as de água. As reações químicas – que têm como produto outra substância, não apenas “suco + água” – só acontecem em proporções definidas.

Melhor que a lei experimental, entretanto, é a interpretação; embora Dalton não negasse a idéia de elementos, ele era partidário do atomismo – e sua lei era um bom argumento a favor dos átomos. É como se em 32 g de oxigênio houvesse *tantas partículas* quanto em 12 g de carbono,

que se combinassem uma a uma; a maior massa de carbono indica que as partículas de carbono são mais pesadas. Assim, em 1803, Dalton propõe seu próprio modelo atômico: Cada substância é composta por um grande número de partículas esféricas indivisíveis; e o que diferencia os átomos de uma substância dos de outra são suas massas. Assim, uma reação química entre duas substâncias nada mais é que as combinações de suas partículas, uma a uma. Vamos usar a notação do Dalton: um círculo vazio para o oxigênio e um círculo cheio para o carbono. Assim, podemos escrever a transformação como



Essa notação facilitava especialmente a representação. Com ela, todas as substâncias existentes poderiam ser escritas, visualmente, como uma combinação de uns poucos elementos fundamentais! A idéia aqui é aquela de que existem elementos *primitivos* e *compostos*. Os primitivos (no nosso caso, e), são partículas indivisíveis, átomos, e devem ser em número pequeno na natureza; mas as diversas substâncias são formadas de partículas compostas – que depois ficariam conhecidas como MOLÉCULAS.

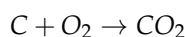
Alguns outros exemplos de elementos na notação de Dalton:

	1 Oxigênio		Gás Carbônico
	2 Hidrogênio		Amônia
	3 Nitrogênio		Água
	4 Carbono		Ácido Sulfúrico
	5 Enxofre		
	6 Fósforo		
	7 Ouro (Gold)		
	8 Platina		
	9 Prata (Silver)		
...			

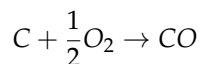
A tabela de elementos de Dalton, publicada em 1808, possuía 36 elementos fundamentais. Cinco anos depois, Berzelius publica uma nova tabela, com 47 elementos fundamentais e uma notação ainda mais prática: Cada elemento era representado pelas iniciais de seu nome latino. Para elementos compostos, as siglas eram justapostas, como fazia Dalton. É a notação que usamos até hoje.

Mas como saber quais são os elementos fundamentais? Pesquisando exaustivamente; reproduzindo o maior número possível de reações e comparando-as. Quanto maior a variedade de reações, maior a confiabilidade da escolha dos elementos fundamentais. A nossa escolha acima foi uma porcaria, porque foi baseada em uma única reação. Mas todos os químicos sabem que carbono e oxigênio podem também reagir de uma outra forma. Conseguimos reagir 16 g de oxigênio, a metade da proporção acima, com as 12 de carbono, em um sistema com alta temperatura⁷ e falta de oxigênio, obtendo um outro tipo de gás, muito mais tóxico e poluente. Isso já nos leva a uma modificação: temos que supor que as partículas do gás oxigênio sejam *formadas por dois átomos de oxigênio*. Assim, usando agora a notação de Berzelius (“O” como símbolo de um átomo de oxigênio e “C” como do carbono), as duas reações que descrevemos ficam:

⁷O processo de auto-ignição começa a 609°C e o novo composto se torna o produto predominante a 800°C.



e



O $\frac{1}{2}$ quer dizer que cada átomo de carbono reage com meia molécula de gás oxigênio. Como, na segunda reação, há duas vezes mais moléculas de carbono que de oxigênio, os átomos da molécula de oxigênio se separam, e fica um átomo com cada carbono. O gás tóxico da primeira reação é chamado de *monóxido de carbono*, e o gás carbônico agora será o *dióxido de carbono*.⁸

Não vamos mostrar todas as reações para determinar todos os elementos; isso tornaria este capítulo difícil de ser lido até o fim deste ano. Mas merecem ser citadas algumas das conclusões que hoje são consensuais.

Além do oxigênio, boa parte dos gases mais comuns (nitrogênio (N_2), hidrogênio (H_2)) possuem moléculas duplas de si mesmo. Outros (como hélio (He) e neônio (Ne)) têm moléculas de um só átomo. Claro, há também gases que são composições de átomos diferentes, como o gás carbônico (CO_2), a amônia (NH_3), o metano (CH_4) e o gás cianídrico (HCN).

Os metais mais famosos são, em sua maioria, elementos distintos: ouro (Au , latim *aurum*), prata (Ag , latim *argentum*⁹), cobre (Cu), ferro (Fe) e zinco (Zn). Portanto, desafortunadamente, não se podia transformar outros elementos em ouro, prata, cobre ou bronze¹⁰.

Os cristais são combinações de elementos simples, em geral; mas neles importa muito mais a forma como os átomos estão distribuídos: átomos de carbono, quando ordenados em colunas com camadas hexagonais, são *grafite*; quando em estrutura tetraédrica, são *diamante*.

Algumas outras substâncias que são elementos são o cloro (Cl), o flúor (F), o fósforo (P), o cálcio (Ca), o sódio (Na , *natrium*)... O enxofre (S , *sulfur*) ficou como nome para um só elemento, assim como o mercúrio (Hg , *hydrargyrum*¹¹).

Os sais são de fato muitos (produto de quaisquer reações entre ácidos e hidróxidos simples); o sal de cozinha, por exemplo, é chamado cloreto de sódio (NaCl). O ácido clorídrico passaria a ser escrito como HCl ; o ácido sulfúrico, como H_2SO_4 .

As substâncias que formam os tecidos dos seres vivos – proteínas, carboidratos, etc – são todas formadas por longas cadeias de carbono (assim: C-C-C-...), alguns deles ligados a oxigênios e hidrogênios¹² (a molécula de hemoglobina, por exemplo, tem 1252 carbonos!!¹³). Justamente por serem muito grandes, elas são todas retorcidas, e a *geometria* dessas moléculas, mais até que para os cristais, é fundamental para prever seu comportamento. Boa parte das proteínas do corpo tem formatos específicos para, literalmente, se encaixar em outras! Todo

⁸O monóxido de carbono é, no entanto, muito menos estável que o dióxido de carbono. Percebemos isso apenas pela exigência de temperaturas muito altas para obter o composto. O tipo de ligação que existe aí é a de dipolo induzido. Dessa forma, a molécula não se torna eletricamente neutra e tende a se ligar a outras muito mais facilmente. É por isso que é um gás tão tóxico; quando o respiramos, ele “gruda” diretamente com a hemoglobina do nosso sangue – que já não é eletricamente neutra para poder receber o oxigênio que nos mantém vivos. Com essa ligação, nosso sangue perde capacidade de transportar oxigênio, e nossas moléculas começam a sofrer danos sérios :S Se você não entendeu nada dessa nota, leia toda a Unidade e depois volte aqui.

⁹Sim, é daí que vem o nome Argentina; durante muito tempo os portos de lá foram responsáveis pelo escoamento clandestino de prata do Peru e do Alto Peru (hoje Bolívia). Depois das Reformas Bourbonicas (século XVIII), o recém-criado Vice Reino do Rio do Prata passou a ser um porto oficial de escoamento da produção, aumentando a riqueza oficial da província (que até então só tinha mesmo gado :P).

¹⁰O bronze é uma liga baseada no cobre, que é pouquíssimo resistente sozinho. Seres humanos fazem esta liga desde... bem, desde a Idade do Bronze. Geralmente a mistura é feita com estanho (Sn) ou zinco (Zn).

¹¹*Hydrargyrum* é o nome em grego para “prata líquida”.

¹²Essas moléculas são chamadas de compostos orgânicos.

¹³A hemoglobina pode ser escrita como $\text{C}_{2952}\text{H}_{4664}\text{O}_{832}\text{N}_{812}\text{S}_8\text{Fe}_4$.

mundo conhece, por exemplo, a estrutura espiral da molécula de DNA – as fitas são longas tiras de carbono, e os encaixes são sub-moléculas de quatro tipos. Aliás, pesquisar sobre as sub-moléculas do DNA pode ser uma tarefa interessante!

No total, são pouco mais do que cem tipos de átomos (tá, cem é um número grande, mas é bem menor que o das milhares e milhares de substâncias que existem), todos listados na Tabela Periódica, da qual falaremos melhor mais adiante.

Um outro exercício interessante é voltar ao início e rever os elementos dos antigos sob a ótica do nosso pensamento químico e da nossa visão de mundo. A *água*, por exemplo: para nós, ela tem moléculas com uma estrutura bem simples¹⁴: H_2O . O *ar atmosférico* é uma mistura de diversos gases (77% de N_2 , 21% de O_2 , 2% de CO_2 , Ne e outros gases). O *fogo* é resultado da queima (ou seja, da oxidação) de alguma substância, o que faz com que se libere gás quente, luz e calor. A *terra* fofa em que pisamos é resultado da erosão das rochas da crosta terrestre, ou seja, vários restos de sais, de minerais, misturados a substâncias orgânicas (fruto da decomposição feita pelos fungos e bactérias) e a algumas minhocas (são os túneis das minhocas que deixam a terra fofa).

Falamos, no início do nosso argumento, que os tipos de átomos se diferenciam, fundamentalmente, segundo Dalton, pela sua massa e que, a partir das reações, podemos medir essas massas umas com relação às outras. Retomemos nosso primeiro exemplo: 12g de carbono tendo que se misturar com 32g de oxigênio. Nesse caso, se dissermos que um átomo de carbono tem massa de, digamos, 12 U.M.A. (*Unidades de Massa Atômica* – unidade que acabamos de inventar), teremos que dizer que a molécula de oxigênio tem massa 32 U.M.A., e um átomo de oxigênio, portanto, 16 U.M.A. Nesse mesmo sistema, o átomo de nitrogênio tem massa 14, o de ferro 56 e o de ouro 197, com a coincidência impressionante de serem todos números inteiros! Ou seja, todas as massas atômicas são múltiplas da massa do hidrogênio, 1 U.M.A.! Um argumento muito similar vai aparecer daqui a pouco, e nos levar a outras boas conclusões.

Composições Químicas em Massa					
Do Universo ¹⁵		Da Terra		Do Corpo Humano ¹⁶	
H	60,4%	Fe	35%	O	65%
He	36,6%	O	30%	C	18%
O	1%	Si	15%	H	10%
Ne	0,7%	Mg	13%	N	4%
C	0,3%	Ni	2,4%	outros	3%
outros	1%	outros	4,6%		

- 1- Repare que o elemento mais abundante do Universo é justamente o primeiro da tabela periódica; o mais simples e mais leve. E que o segundo mais abundante também é o segundo mais leve, hehe. Por que isso acontece? De onde devem vir então os elementos químicos?
- 2- Repare também que os elementos que formam os planetas são bem mais pesados (e raros) no Universo. Se os planetas (pelo menos os similares à Terra) são formados dos elementos pesados, onde estão o hidrogênio e o hélio, que deveriam ser a maior parte da massa do sistema solar?

¹⁴O gás hidrogênio (hydros = água | gennein = gerar) tem esse nome justamente porque é um gás que, quando queimado (ou seja, quando posto a reagir com oxigênio, o gerador da oxidação), gera água.

¹⁵Sem contar Matéria Escura, Energia Escura e outras coisas pouco claras (he!) que constituem quase 95% dele...

¹⁶A quantidade maior de oxigênio em relação ao carbono deve-se à quantidade de água em nosso corpo.

- 3- Porque os elementos químicos da atmosfera são mais leves que os da crosta? Isso diz algo sobre o processo de formação de planetas? O que se deve esperar, por exemplo, da atmosfera de Mercúrio? E da de Júpiter?

1.2 Estruturas Atômicas

Na nossa descrição atômica, não tocamos ainda em uma pergunta fundamental: como os átomos, essas esferas maciças de diferentes tamanhos, ligam-se uns aos outros? Até agora, nossa descrição só falava superficialmente dos átomos: da diversidade deles, de alguns tipos interessantes deles, no máximo sobre a massa de cada um. Mas não nos ocorreu pensar como é cada átomo, que propriedades ele deve ter, se ele é só um bloco liso de matéria, ou se possui forma e estrutura específicas.

Voltando à Grécia, podemos encontrar referências à forma dos elementos em Platão (para quem a idéia de forma era bastante importante). Embora não fosse atomista, Platão parece pender um pouco para esta direção quando diz que cada um dos quatro elementos – mais o éter – corresponde a um dos cinco sólidos geométricos: o fogo corresponde ao tetraedro, que corta e fere com suas pontas agudas; a terra ao cubo, a forma mais compactável; a água ao icosaedro, o mais “arredondado”, responsável pela sua fluidez; o ar ao octaedro; o éter ao dodecaedro.

Mas Platão não tinha em mente, como Demócrito, a idéia de partículas duras e indivisíveis; pelo contrário, ressaltava que cada um desses sólidos é composto de triângulos retângulos, de dois tipos: os isósceles (ângulos 45-45-90) e os do tipo 30-60-90. Com esta visão de inspiração pitagórica, o filósofo justificava explicitamente a transmutação de elementos: os triângulos poderiam se rearranjar, transformando um elemento em outro. Não é à toa que essa idéia foi citada não poucas vezes entre os alquimistas medievais.

Entre os químicos modernos atomistas, a discussão sobre estruturas dos átomos veio em meados do século XIX, quando começaram a ser observados fenômenos elétricos nas reações químicas. Isso era estranho porque, apesar da comprovada atividade elétrica de diversas substâncias, todas elas eram, em condições normais, neutras. Em 1897, Thompson lançou seu próprio modelo sobre o átomo: os átomos, agora não tão indivisíveis assim, consistiriam em partículas negativas, batizadas de ELÉTRONS¹⁷, embebidas em um fluido, eletricamente positivo. A partir de experiências com tubos dos esquisitos raios catódicos, Thompson ainda conseguiu obter uma razão entre a massa e a carga deste elétron, mas sem obter separadamente as duas grandezas.

Menos de dez anos depois, o modelo foi superado graças aos experimentos de Rutherford, que consistiam em bombardear folhas de ouro com partículas positivas. Rutherford verificou que o número de partículas refletidas pela folha de ouro era ordens de grandeza maior que o esperado, considerando o modelo do átomo de Thompson (uma diferença da ordem de 10^{3515} vezes maior¹⁸). Para explicar tal discrepância entre o esperado e o observado experimentalmente, Rutherford bolou um modelo atômico com um núcleo muito pequeno e denso e elétrons orbitando-o. Exploraremos mais à frente as implicações de um tal modelo.

A demonstração definitiva sobre a “existência” dos elétrons veio somente em 1910, com um argumento muito bom lançado por Millikan. Ele fez um experimento com pequenas gotas de óleo eletrificadas, submetidas a um campo elétrico. Fazendo isso várias vezes, ele obtinha a carga elétrica de cada gota. Colocando em um gráfico, percebia-se o brilhantismo do argumento: as

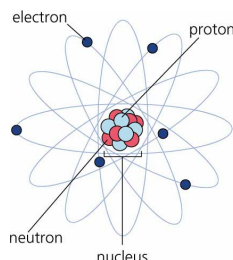
¹⁷A palavra grega *elektron* é o nome de uma pedra, o âmbar, que, atritada com lã de carneiro, passa a atrair pequenos objetos. Os próprios gregos conheciam o fenômeno. Daí, todos os fenômenos similares observados no futuro ficaram conhecidos como fenômenos *elétricos*.

¹⁸“Era quase tão incrível como se se disparasse um obus de 15 polegadas contra um lenço de papel e ele fosse defletido para trás, atingindo você”. Ernest Rutherford.

cargas se distribuíam em patamares discretos! Todas as gotas medidas tinham cargas que eram um múltiplo de uma carga fundamental. Afinal, o processo de eletrização de uma gota é um processo de doar ou arrancar-lhe cargas. Com esse resultado, fica provado que as cargas são discretas, isto é, que *existe um valor mínimo em que se podem dividir as cargas*, da mesma forma que o antigo átomo era a unidade mínima em que um objeto poderia ser dividido. Não só fica provada a existência da carga fundamental como tem-se um valor numérico para ela! É claro que o experimento de Millikan foi refeito várias vezes e o valor que ele encontrou foi sendo corrigido; hoje, temos para a carga do elétron o valor de $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C. Comparando esse resultado com o do experimento de Thompson, podemos ainda obter a massa do elétron; hoje, seu valor é de $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg.

Como dissemos, essa conclusão é muito semelhante à que enunciamos sobre as massas dos átomos. Usando o mesmo raciocínio de Millikan, seria bastante razoável criar um modelo em que exista uma partícula nuclear fundamental, de carga positiva¹⁹, que seja equivalente ao núcleo do hidrogênio, de massa 1 U.M.A. De fato, isso foi proposto por Rutherford em 1919, e a partícula, batizada de PRÓTON (*primeiro*, em grego). A massa do próton é três ordens de grandeza ($10^3 = 1000$ vezes) maior que a do elétron, o que nos permite medir a massa de um átomo com base somente na massa do seu núcleo.

O próton não dava conta de toda a massa do átomo. O átomo de carbono, por exemplo, tem massa 12 U.M.A., mas apenas seis elétrons; como um átomo deve ser neutro, ele deve ter somente seis prótons. Depois de mais e mais experiências, a conclusão foi que o núcleo continha outras partículas, com a mesma massa que os prótons, mas sem carga elétrica. Essas partículas, postuladas em 1932, foram batizadas de NÊUTRONS. Com elas, já temos a figura de átomo que é a divulgada por aí, a imagem “clássica” de átomos – que, entretanto, foi completamente formulada há pouco mais de 70 anos! Vamos explorá-la um pouco mais.



Podemos dizer que o modelo de Rutherford é o último modelo atômico associado à física clássica; os seguintes foram todos baseados na ou relacionados à mecânica quântica. Possivelmente por essa razão ele ainda é ensinado nas escolas como “verdadeiro”, e ainda é a imagem mais comum de átomo que as pessoas têm. Sua metáfora clássica, de fato, é inspiradora: *átomos são como sistemas solares em miniatura*. Os elétrons, negativos, são atraídos pelo núcleo positivo, como os planetas atraídos pelo Sol; mas, em vez de cair nos núcleos, os elétrons se mantêm orbitando-os, fazendo trajetórias elípticas em torno destes (como a força gravitacional, a eletromagnética também depende do quadrado da distância, como vimos no início do Volume III). Como no Sistema Solar, o núcleo concentra quase toda a massa do sistema, comprimida em uma pequena esfera, cujas dimensões são desprezíveis se comparadas aos raios das órbitas.

Hoje, estimamos que a densidade do núcleo é da ordem de 10^{18} kg/m^3 , mas seu raio não passa de meros 10^{-15} m. Muito pequeno e pesado. Se um núcleo atômico fosse do tamanho de uma

¹⁹É importante ressaltar que as denominações de carga “positiva” e “negativa” são apenas diferenciações de nomenclatura. As usamos apenas para dizer que o elétron e o próton têm cargas inversas. Dizer que o elétron é que é o negativo e o próton, positivo, é mera convenção.

bola de futebol²⁰, seu peso seria o do satélite marciano Deimos, ou de 10^{10} baleias azuis, ou 10^{12} elefantes. Mantendo ainda esse tamanho para o núcleo e colocando-o no centro de um campo de futebol (por exemplo, o Maracanã), teríamos que os dois elétrons mais próximos estariam nas arquibancadas. Se quiséssemos ter uma idéia melhor e diminuíssemos o núcleo ao tamanho de um grão de mostarda, a primeira camada de elétrons ainda teria um raio de cerca de 50 metros.

Essa metáfora do Sistema Solar tem, contudo, alguns problemas imediatos. Em primeiro lugar, os elétrons todos têm a mesma carga e, portanto, devem interagir muito fortemente entre si. A menos que a distância entre eles seja muito grande, suas forças de repulsão devem ser da mesma ordem de grandeza que a força de atração elétron-núcleo. Se é que esse tipo de configuração pode gerar órbitas fechadas e estáveis, elas seriam de um tipo muito diferente das órbitas keplerianas em torno do Sol, que têm perturbações bem pequenas dos planetas uns sobre os outros.

Mais ainda, há o problema da estabilidade na interação *entre* átomos. O modelo de cinética de gases da época falava (e ainda fala) de átomos e moléculas com alto grau de agitação, chocando-se o tempo todo umas com as outras. Como átomos poderiam passar por isso e ainda manter a estrutura de vários elétrons em torno de um só núcleo? Mais: átomos se juntam para formar moléculas, às vezes tão longas quanto as longas cadeias de carbono dos seres vivos. Com tantos elétrons tão próximos uns dos outros, é possível manter a integridade desses sistemas atômicos por muito tempo? É razoável acreditar que essas estruturas tão delicadas formem coisas tão estáveis quanto toda a matéria comum do universo?

Essas questões todas são muito difíceis de modelar e explicar, principalmente pouco tempo depois do modelo ter sido proposto. Mas as atenções foram concentradas por um problema mais específico na época: o modelo era instável à luz do eletromagnetismo clássico (=P). Segundo a teoria geral das cargas eletromagnéticas, cargas emitem radiação quando são aceleradas. Ora, um elétron orbitando um núcleo sofre constantemente aceleração centrípeta, portanto deve constantemente emitir radiação. Com isso, deve constantemente perder energia, e assim, em poucas voltas, espiralar na direção do núcleo e se fundir com ele, formando alguma partícula neutra (de fato, no modelo atual de partículas elementares, prótons e elétrons colidindo podem formar nêutrons). Fazendo as contas, estimamos que um sistema atômico com as características que estimamos para ele, segundo o eletromagnetismo clássico, deveria sobreviver por um tempo da ordem de 10^{-9} segundos.

Com isso, Niels Bohr publicou, em 1913 (vinte anos antes da descoberta do nêutron), um novo modelo atômico. No seu modelo, elétrons orbitavam o núcleo mas, mesmo assim, mantinham um nível fixo de energia – contrariando a teoria. Algo do gênero “se os elétrons da teoria teimam em não ficar no lugar, coloquemos um postulado que não deixa ele sair”. Mais esquisito que isso, os elétrons no seu modelo só podiam ocupar certos estados especiais, certos níveis de energia; isto é, só algumas poucas distâncias ao núcleo eram permitidas para suas órbitas. O Modelo de Bohr será discutido em detalhes alguns capítulos mais à frente, quando falarmos de espectros. Por enquanto, basta comentar que o modelo tinha que assumir postulados que fugiam completamente à teoria clássica. Ele foi um dos primeiros passos na direção da teoria quântica que viria mais tarde.

²⁰ A regra da FIFA diz que uma bola oficial não pode ultrapassar os 70 cm de circunferência. Isso dá cerca de 10 cm de raio, e cerca de $4000\text{cm}^3 = 4 \cdot 10^{-3}\text{m}^3$ de volume.

1.3 Nuvens Eletrônicas

A teoria quântica, quando já completa e consistente, envolveu outros postulados esquisitos e, com isso, uma maneira bastante diferente de encarar os objetos. Hoje, elétrons nem podem ser pensados como partículas – apesar de cada elétron ter uma carga e uma massa bem definidas, como Millikan mostrou e comentamos acima. Ao menos nos átomos, é melhor pensar no elétron como um *padrão de ondas* que envolve o núcleo; como uma nuvem de densidades que é estável e tem um formato bem definido. Voltando à nossa analogia, é como se mantivéssemos a bola de futebol com peso de Deimos no centro do Maracanã, e enchêssemos as arquibancadas com gelo seco ou fumaça, de forma que se formasse uma nuvem em forma de cúpula envolvendo, bem de longe, a pequena e superpesada bolinha.

Na verdade, as nuvens funcionam como a maioria dos quartos de hotel: cada uma delas pode ser compartilhada por até dois elétrons, desde que tenham sexos, ops, momentos angulares apontando em direções opostas (é isso aí, eles sequer são partículas, mas têm momento angular bem definido). Os dois elétrons mais próximos do núcleo compartilham uma nuvem esférica, conhecida como 1s (s de *sharp*). É o formato do átomo de hélio, por exemplo. Mas em um átomo com mais elétrons, eles se colocam em camadas mais distantes; o segundo par também ocupa uma nuvem esférica, a 2s, que está o dobro de distância do núcleo. O número 2 significa que essa nuvem (ou orbital) está no segundo nível de energia das linhas espectrais, que veremos mais à frente. É como se fossem os andares do hotel. Já o terceiro par, ainda no nível 2, ocupa uma nuvem em formato de haltere. Nesse nível, três pares de elétrons formam três halteres do mesmo tamanho, orientados segundo os eixos x, y e z. Eles formam o orbital 2p.

Na Tabela Periódica, a ocupação do segundo nível vai acompanhando a segunda linha horizontal de elementos. O Lítio (Li), logo abaixo do Hidrogênio, têm três elétrons, que podem ocupar qualquer nível (andar), e qualquer orbital (quarto) dentro do nível. No seu nível de energia mais baixo, entretanto, os elétrons ocupam os níveis mais próximos do núcleo. Ou seja: dois na esfera 1s e um na esfera 2s. O elemento seguinte, Berílio (Be), possui quatro elétrons: as duas primeiras esferas completas. Daí seguimos um grande espaço em branco e vamos para o Boro (B), de cinco elétrons. A partir dele, os quartos-halteres do segundo andar começam a ser ocupados. São três halteres, um para cada par. Assim seguem ao Boro: Carbono (C), Nitrogênio (N), Oxigênio (O), Flúor (F) e, finalmente, Neônio (Ne), com 10 elétrons. Com isso, o segundo nível fica completo.

No hotel atômico, cada andar tem cópias (maiores) de todos os quartos do andar de baixo, e mais alguns novos modelos de quartos, mais exóticos, para mais hóspedes. Assim, o primeiro nível só possui o orbital esférico, enquanto o segundo nível possui um esférico e três halteres. O nível 3 então possui o 3s (elementos Sódio (Na) e Magnésio (Mg)), os três do tipo 3p (elementos entre Alumínio (Al) e Argônio (Ar)) e cinco orbitais de um novo tipo, 3d. Assim, cabem $2 + 6 + 10 = 18$ elétrons no terceiro nível.

Mas tem um porém neste hotel: os quartos exóticos são muito caros (cobram muita energia de seus elétrons), de forma que, em alguns casos, é mais econômico ficar num quarto simples de um andar superior. Vejamos o Argônio: 18 elétrons, com subníveis 1s, 2s, 2p, 3s e 3p completos. Entretanto, no elemento seguinte (o Potássio – K), o 19º elétron não ocupa nenhum 3d, mas sim o 4s! Só depois que o 4s está completo, isto é, para átomos com mais de 20 elétrons, é que o 3d começa a ser ocupado. Aí começa o pedaço central da tabela; na quarta linha, vamos do 3d¹ (Escândio - Sc) ao 3d¹⁰ (Zinco - Zn). Então preenchemos os halteres 4p.

A linha seguinte mantém o mesmo padrão: 5s, 4d, 5p. Depois 6s, e aí entra o quarto tipo de nuvem: as 4f. São 7 tipos de nuvem, correspondendo a 14 vagas. No total, o quarto nível comporta $2 + 6 + 10 + 14 = 32$ elétrons. São os elementos lantanídeos. Depois voltamos a 5d, 6p, e na linha seguinte: 7s, 5f, 6d, 7p. Poderíamos então perguntar pelo quinto tipo de orbital, que podemos chamar de 5g. Ele apareceria na linha seguinte se... a linha seguinte existisse!

O problema é que não podemos ter átomos com qualquer quantidade de prótons e elétrons; quando vão se aproximando da ordem dos cem prótons, os núcleos ficam instáveis, quebrando facilmente (e liberando um monte de energia com isso). Os japoneses de Hiroshima notaram de uma maneira particularmente desagradável a fragilidade dos elementos muito pesados, em especial do Urânio. Próximos deste, que é o elemento 92, existem vários elementos que só existem a partir do decaimento de outros elementos mais pesados, como Ac 89, Pa 91 e Np 93. Além disso, nenhum dos elementos a partir do Amerício (Am 95) existe na natureza; todos foram criados em laboratório e não existem por mais tempo que algumas frações de segundo. Repare que a maioria deles tem nome de cientistas consagrados recentes; veja, por exemplo, Einstênio (Es 99), Rutherfórdio (Rf 104) e Bóhrrio (Bh 107).

- 4- Escreva a relação de quartos de alguns átomos no nível fundamental, na ordem de ocupação, seguindo os exemplos:

N (07) - $1s^2 2s^2 2p^3$

Cr (24) - $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 4d^4$

(a) Gálio (Ga 31)

(b) Índigo (In 49)

(c) Tungstênio (W 74)

(d) Ouro (Au 79)

(e) Califórnio (Cf 98)

(f) Dozedozia (Dd 144)

1.3.1 Química das Nuvens

Já vimos que os núcleos atômicos são muito muito pequenos, se comparados às nuvens eletrônicas. Assim, embora quase toda a massa de um átomo se deva a seu núcleo, suas interações com outros átomos se devem quase que somente à sua eletrosfera. Mais que isso: quase que somente à camada mais externa da sua eletrosfera. Então, o que resta saber é se esses padrões de nuvens são estáveis. Pelo que nossas teorias indicam, parecem estáveis o suficiente para os átomos existirem aos montes por aí. Mas, na maioria dos casos, elas podem ficar ainda mais estáveis quando combinadas. Esse tipo de combinação, que junta átomos em MOLÉCULAS, é o que chamamos de *ligação química*.

Voltando à nossa prosaica analogia, o que podemos dizer é que elétrons se sentem muito solitários quando estão sozinhos em seus quartos. Mais que isso: gostam de ver andares inteiros preenchidos. Ou, numa linguagem mais séria: quando a nuvem mais externa é do tipo s ou p, o estado mais estável para o átomo é tendo estes orbitais completamente preenchidos. Isso é aprendido na escola de um modo mais místico, como a *regra do octeto*: “os átomos buscam ficar com oito elétrons na sua camada mais externa”.

Esse princípio vale para analisar a maior parte dos elementos das duas primeiras e das seis últimas colunas da tabela periódica. Assim, elementos da primeira coluna, cujas terminações são do tipo $Ns1$, onde N é o número do nível, tenderiam a capturar sete elétrons, ou, mais realisticamente, perder um. Ao passar pelo segundo processo, a camada mais externa passa a ser a de um nível abaixo, já completa. Na outra ponta, a penúltima coluna tem átomos com terminação eletrônica Ns^2Np^5 , que só precisam de um elétron a mais pra completar a lotação do N-ésimo andar.

Assim, se colocarmos para reagir uma quantidade de átomos de cloro (Cl) com outra quantidade de átomos de sódio (Na), o esperado é que cada átomo de cloro roube o elétron sobrando

dos sódios, deixando ambos estáveis. Com isso, entretanto, os cloros ficarão negativamente carregados (mais elétrons do que prótons) e os sódios, positivamente carregados (mais prótons que elétrons). Com isso, cloros e sódios tendem a grudar uns nos outros (fazendo o que chamamos de *ligação iônica*), formando moléculas dipolares conhecidas como Cloreto de Sódio (NaCl). Esse tipo de composto é bastante estável, devendo ser portanto bastante abundante. De fato, nós o conhecemos como sal de cozinha.

Assim, elementos dessas duas colunas fazem combinações estáveis e abundantes, e ainda com propriedades físicas parecidas - por isso são todos sais. Assim, temos fluoreto de sódio (NaF), cloreto de potássio (KCl), brometo de lítio (LiBr), etc. De forma bastante análoga, os elementos da segunda coluna (do tipo Ns^2) precisam perder dois elétrons, pela regra do octeto; assim, temos a proporção de dois átomos da penúltima coluna para um da segunda, o que nos leva a outros sais: cloreto de cálcio (CaCl_2), fluoreto de magnésio (MgF_2), etc.

Já os elementos da última coluna, como já têm sua última camada completa, raramente formam ligações químicas, porque são suficientemente estáveis sozinhos. Por isso têm o nome de *gases nobres*. Estes gases podem ser pensados como grandes astros do cinema: os outros átomos querem ser como eles.

As ligações iônicas só funcionam entre elementos cuja diferença de potencial é alta; basicamente entre elementos extremos da tabela. Para outras ligações, um tipo muito mais comum é a *ligação covalente*, em que elétrons são compartilhados entre átomos. Assim, cada elétron compartilhado passa a ocupar, simultaneamente, quartos em dois hotéis. É esse tipo de ligação que forma o gás hidrogênio (H_2): dois átomos compartilham entre eles seus únicos elétrons de forma que, virtualmente, cada um dos dois passa a possuir dois elétrons, tendo seu nível 1 preenchido e, com isso, sendo como um hélio. Outros gases “puros” se formam do mesmo jeito: os oxigênios, com seis elétrons na última camada, compartilham dois elétrons, formando O_2 ; já os nitrogênios, com cinco elétrons, compartilham três, formando N_2 . Carbonos talvez pudessem compartilhar quatro elétrons entre si, se isso fosse geometricamente possível.

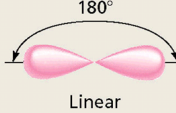
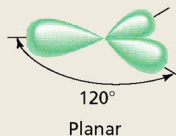
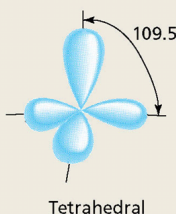
A essa altura, é importante notar que o hidrogênio, por ser o mais simples, é de longe o elemento mais abundante no universo. Assim, os compostos com hidrogênio, simples e leves, devem ser bastante abundantes na Terra e nas nuvens de gás universo afora. Citando as combinações com os primeiros elementos das colunas p, podemos verificar isso: metano (CH_4), amônia (NH_3), água (H_2O), ácido fluorídrico (HCl). De fato, quando se estuda compostos orgânicos, parte-se do pressuposto de que toda terminação livre de uma cadeia carbônica é preenchida por algum átomo de hidrogênio, como se ele fosse um ruído de fundo.

Vamos analisar melhor a geometria das ligações covalentes, analisando seu exemplo mais importante: as ligações do carbono. É justamente a necessidade de quatro ligações do carbono que o permite fazer ligações longas e estáveis, dando origem aos compostos orgânicos, daí sua importância. Mas vejamos: a lista de ocupação do carbono isolado, no estado mais estável, é $1s^2 2s^2 2p^2$. Mas a camada 2s está enterrada sob os halteres 2p, de forma que só dois elétrons, geometricamente falando, estão disponíveis para emparelhamento. Isso deixaria um haltere inteiro não-preenchido. Assim, um carbono em ligação passa necessariamente por duas transformações. A primeira é perder um elétron do 2s para o 2p, passando ao estado mais excitado $1s^2 2s^1 2p^3$, ou, separando mais detalhadamente:

$$1s^2 2s^1 2p_x^1 2p_y^1 2p_z^1$$

Assim, neste estado mais excitado (e mais adequado para ligações químicas), a esfera 2s e cada halter 2p têm um único elétron cada; cada um desses quartos está esperando um segundo elétron com spin oposto, para emparelhar e se estabilizar. Ótimo, mas ainda resta o problema da geometria esférica do 2s. Mas os quartos são nuvens eletrônicas, e nuvens podem se distorcer na presença de outras cargas. Essa deformação é o que chamamos de **HIBRIDIZAÇÃO DO CARBONO**: suas nuvens eletrônicas se tornam híbridas, misturadas. Assim, em carbonos saturados (que

fazem quatro ligações com quatro átomos diferentes), a esfera + três halteres se deformam em quatro semi-halteres, igualmente distantes entre si – tomando a forma de um tetraedro. E olha onde fomos reencontrar as formas dos elementos platônicos!

Important Hybrid Orbitals and Their Shapes				
Pure Atomic Orbitals of the Central Atom	Hybridization of the Central Atom	Number of Hybrid Orbitals	Shape of Hybrid Orbitals	Examples
s, p	sp	2	 Linear	BeCl_2
s, p, p	sp^2	3	 Planar	BF_3
s, p, p, p	sp^3	4	 Tetrahedral	$\text{CH}_4, \text{NH}_4^+$

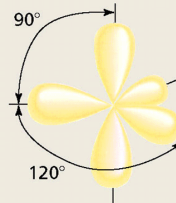
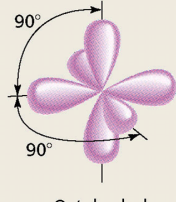
s, p, p, p, d	sp^3d	5	 Trigonal bipyramidal	PCl_5
s, p, p, p, d, d	sp^3d^2	6	 Octahedral	SF_6

Figura 1.1: Geometria das Hibridizações

Como toda lei química, a regra do octeto vale só pra uns 40% dos casos (60% são as exceções à regra). Mesmo elementos das colunas que estávamos analisando podem se hibridizar de maneiras mais exóticas. Veja, por exemplo, o caso do fósforo pentabromídeo, PBr_5 . Isso mesmo, um fósforo fazendo cinco ligações! Neste caso, sua última camada passa de $3s^2 3p_x^1 3p_y^1 3p_z^1$ para $3s^1 3p_x^1 3p_y^1 3p_z^1 d_{z^2}^1$, e seus elétrons se distribuem no formato de uma bipirâmide trigonal (dois tetraedros grudados por uma face). É uma ligação esquisita, com o fósforo num nível de energia não muito estável, mas o PBr_5 pode ser visto por aí, amarelo e reativo.

Mas as exceções à regra do octeto não são sempre bizarras assim; no geral, a regra não vale para nenhum dos elementos da parte central mais baixa da tabela (chamados, portanto, *elementos de transição*), cujos orbitais externos são do tipo d. Muitos deles inclusive têm mais de uma forma de ionização comum; um exemplo é o ferro, que pode tanto se estabilizar perdendo dois elétrons, como no óxido ferroso (FeO) ou perdendo três, como no óxido férrico (Fe_2O_3). Ambos são encontrados em abundância, tanto na Terra como em asteróides por aí.

Um outro tipo ainda comum de ligação entre elementos de transição são as *ligações metálicas*. Aqui a coisa fica ainda mais platônica: cada metal ou combinação de metais tem sua forma própria (qualquer um que esculpe pedras sabe disso), que funcionam como módulos de repetição infinitos, que chamamos de *estruturas cristalinas*. Nesta estrutura, os núcleos atômicos e seus elétrons mais próximos ficam fixos, de forma bastante simétrica, enquanto os elétrons mais externos fluem quase livremente de um átomo a outro, ao longo da estrutura. Se os pareamentos de elétrons de spins opostos podem ser comparados, como fizemos, à formação de casais, então as ligações metálicas são como imensos bacanais.

Por último, existem moléculas que, sob certas condições de temperatura e pressão, podem também formar cristais, valendo-se de *ligações intermoleculares*. O próprio sal de cozinha, graças à forte polaridade de suas moléculas, tende a ficar bastante condensado e formar estruturas. Quem nunca viu, procure ver pedras de sal grosso. Mas o exemplo mais forte de ligação intermolecular é aquele encontrado na água (em especial, nos cristais de gelo). Para entender sua estrutura cristalina, precisamos recorrer novamente à geometria. Com quatro elétrons nos orbitais 2p, o oxigênio com duas ligações se distribui em formato de um triângulo plano, com uma ligação (no caso, um H) em cada ponta, e uma terceira ponta livre com dois elétrons. Essa terceira ponta, negativa, contrasta com os hidrogênios positivos nas outras pontas, estabelecendo uma certa polaridade. Com isso, hidrogênios de outras moléculas são atraídos pelo pólo negativo, formando o que chamamos de *ponte de hidrogênio*. Assim, com ângulos de 120° entre cada ligação, as moléculas de água, quando congeladas, tendem a formar estruturas hexagonais, que produzem os padrões tão bonitos dos cristais de neve.

Para terminar o assunto, fiquemos com uma piada clássica, terminando por este volume a nossa analogia elétrons-pessoas:

- Como um elétron faz pra se suicidar?
- Pula de uma ponte de hidrogênio.

1.3.2 Física das Nuvens

Como vimos, o formalismo das nuvens eletrônicas consegue explicar de forma simples a maior parte das ligações entre os elementos e, assim, da formação das substâncias; em outras palavras, os modelos quânticos dos átomos dão o fundamento teórico da Química. Mas podemos ir mais além; além de fundamentar a Química, os modelos quânticos da matéria fundamentam também muitas das propriedades físicas que são observadas no cotidiano – todas as que dependem de propriedades da matéria.

Essa história começa na segunda metade do século XIX, no desenvolvimento da termodinâmica. Nas últimas décadas do século, cresceu a corrente que procurava explicar os fenômenos térmicos usando a idéia de átomos. Eram os chamados *atomistas*; um dos maiores advogados desta interpretação era Ludwig Boltzmann, quem ainda estudaremos. A idéia é a seguinte: a matéria é composta de átomos, constantemente agitados, seguindo movimentos aleatórios e se chocando uns com os outros. Nessa interpretação, a temperatura mede o grau de agitação dos átomos: quanto maior a temperatura de um corpo, maior a velocidade média de suas partículas. Os átomos só estão parados quando estão à temperatura do zero absoluto.

Havia também os que eram contra a idéia de átomo, os chamados *energicistas*. Muitos grandes físicos eram energicistas. Entretanto, conforme os modelos atômicos foram se aprimorando e se tornando instrumentos mais poderosos de explicação, o seu número de adeptos foi crescendo. Nas primeiras décadas do século XX, já estava estabelecida a vitória do atomismo na termodinâmica, ou seja, a vitória da idéia de explicar os fenômenos térmicos a partir de movimentos de muitas partículas. Dessa forma, hoje, o termo *termodinâmica* é visto quase como sinônimo de *mecânica estatística*.

A partir desse mote, e mesmo usando modelos atômicos relativamente simples (como o de Rutherford), podemos descrever os estados físicos dos objetos. Peguemos o gelo como exemplo: a temperaturas abaixo de zero Celsius, a agitação das suas moléculas é suficientemente pequena para que a estrutura cristalina de ligação dos átomos se mantenha. Nessa situação, as moléculas H_2O formam um cristal, SÓLIDO, com os núcleos formando estruturas hexagonais (graças ao formato natural da molécula de H_2O). Passando dessa temperatura, a agitação rompe a estrutura; o objeto perde a forma fixa, os átomos ficam livres em camadas que deslizam umas sobre outras, e temos água LÍQUIDA. Depois dos $100^\circ C$, a agitação é ainda maior que a tensão que o líquido pode suportar e as moléculas ficam inteiramente livres, sem conseguir ao menos manter seu volume: trata-se de um GÁS. Aquecendo mais ainda, a própria estabilidade atômica é ameaçada: a agitação dos elétrons vai fazendo com que eles se soltem, um a um. Mais que um gás de átomos, é um gás de núcleos e elétrons livres! – o que chamamos de PLASMA. Nas estrelas, as temperaturas são altas o suficiente para que quase toda matéria presente nelas esteja neste estado. Uma coisa interessante é que podemos associar cada um desses quatro elementos aos quatro estados da matéria: terra ao sólido, água ao líquido, ar ao gasoso, fogo ao plasma^{21 22}.

Outra importante classe de propriedades físicas a serem explicadas é a das propriedades elétricas. Por exemplo, existe uma distinção bem clara em materiais que conduzem bem a eletricidade, como metais, e materiais que não conduzem, como borracha. Revendo alguns parágrafos atrás, fica fácil explicar essa distinção: com elétrons livres e promíscuos, que podem facilmente se mover pela estrutura, fica fácil transmitir através de metais uma determinada concentração de carga. Mas diversas outras propriedades podem ser explicadas a partir das elétricas, como o atrito e as texturas dos corpos; ensaiamos algo neste sentido no capítulo de Mecânica de Newton, Volume III. Deixaremos ao leitor mais reflexões sobre a estrutura da matéria.

- 5- Explique a pressão exercida por um fluido (nas paredes de uma panela de pressão, por exemplo) em termos dos seus átomos. Se aumentarmos a temperatura desse fluido, como isso influencia a pressão exercida por ele?
- 6- Olhando a tabela periódica, o que você poderia dizer sobre os elementos que têm maior ponto de fusão e ponto de ebulição?

²¹ Apesar de existirem diferenças significativas entre o fogo e o plasma convencional, este é o estado mais próximo para se descrever o fogo.

²² Há há! O Condensado de Bose-Einstein ficou de fora!

Capítulo 2

Luz

Depois do Hug-Bug ter olhado para cima e ter seus olhos ofuscados por aquela bola branca que emanava calor e claridade, ele percebeu que aquele fenômeno era interessante.

Assim como a estrutura da matéria, como visto no capítulo passado, aquilo que impressionou o Hug-Bug também foi tema de várias (e acaloradas, com perdão do trocadilho) discussões. Mas até antes dessas discussões sobre a natureza da luz, nossos antepassados já tinham encontrado meios de aplicá-la a soluções de problemas diários! Podemos encontrar provas disso até na Bíblia, por exemplo: o livro do Êxodo (38:8) fala como Bezalel construiu uma pia e sua base (instrumentos cerimoniais) a partir dos “espelhos das mulheres” – acredita-se que essa passagem data de 1200 a.C. Esses instrumentos ópticos são os antepassados dos que temos hoje, claro, bem diferentes. Os espelhos daquela época eram feitos através do polimento do cobre, do bronze e, depois, de uma liga de cobre chamada, em latim, de *speculum*. Espelhos desse tipo já foram encontrados em sítios arqueológicos do Egito antigo, datando de 1900 a.C.

Nós bem sabemos que os gregos antigos tinham a mania de teorizar sobre as coisas (hoje a gente chama essa mania aí de filosofia). As idéias sobre a luz se desenvolveram juntamente com a concepção de estrutura da matéria. Adiante, começou-se a investigar não só a forma da luz como um material, mas também o seu comportamento que observamos. Euclides enunciou em seu livro *Catoptrics* algumas das leis que para nós são bem familiares: a propagação linear da luz e a lei da reflexão¹. Heron de Alexandria tentou explicar esses fenômenos dizendo que a luz percorre o menor caminho permitido entre dois pontos. Sabe-se também que nessa época já havia um conhecimento empírico sobre as propriedades refrativas dos meios e do comportamento de lentes – Aristófanes faz alusão a um vidro usado para queimar coisas através da luz do sol (claro, não nesses termos!), na sua peça *As Nuvens* (424 a.C.), e Platão fala sobre os objetos “se quebrarem” quando vistos através da água no seu tratado *A República*.

Estudada mesmo a refração só começou a ser com Cleomedes (50 d.C.) e Ptolomeu (130 d.C.) que tabelaram medidas para ângulos de incidência e refração através de vários meios. Até antes disso o filósofo romano Sêneca já havia notado que um copo cheio de água servia para amplificação de imagens.

O Império Romano do Ocidente ruiu, junto com a sua herança intelectual grega. Mas o Império do Oriente, com sede em Constantinopla (atual Istambul, na fronteira da Turquia com o continente europeu propriamente dito), continuava mantendo suas fortes raízes gregas. Todos os

¹Para pegar bem a diferença entre o conhecimento grego clássico do mundo e o conhecimento produzido no mundo helenístico, veja a analogia com os modelos de universo. Enquanto Aristóteles e seus contemporâneos discutiam conceitualmente modelos de universo centrados na Terra, no Sol, na Lua ou em alguma outra coisa, baseados em argumentos filosóficos muito fortes sobre a ordem que o mundo deveria ter, Ptolomeu estava mais preocupado com as previsões numéricas do comportamento dos céus. Daí que adotou o modelo conceitual aristotélico, por alguma preferência especial, e o munuiu com uma estrutura matemática (geométrica) precisa e que fazia previsões quantitativas. Para mais detalhes, ler Capítulo 1 do Volume Mecânica.

intelectuais que ainda restavam na Roma original e no ocidente afluíram pra lá, e não viram nascer na banda ocidental aquele tipo estranho de sociedade germânica e cristã que estava surgindo. De toda forma, o clima não era mais para continuar discussões sobre a natureza das coisas.

Mas foi neste Império Bizantino que os árabes no século VII, tendo passado por uma avassaladora reforma religiosa que varreu o mundo a partir da península arábica e lhes deu um domínio cultural que ia de um lado até o Rio Indo, do outro cobrindo toda a metade norte da África e a Península Ibérica, descobriram a cultura grega e a cultura helenística. Foi onde os velhos textos foram ressuscitados. A península ibérica (o chamado Califado de Córdoba) foi um dos grandes centros de saber daquele mundo; onde Platão e Aristóteles renasciam, de pele morena e religião muçulmana.

Durante suas peregrinações, os árabes redescobriram os tratados gregos antigos, e, com eles, boa parte do avanço dos estudos sobre o comportamento da luz. A óptica acabou caindo nas mãos de Al-Hazen, que tornou as leis da reflexão mais elaboradas, colocando os ângulos de reflexão e incidência no mesmo plano. Ele também estudou espelhos esféricos e parabólicos, além de dar uma descrição detalhada do olho humano.

O trabalho de Al-Hazen começou a ser descoberto pelos intelectuais ocidentais lá pelo século XIII, sendo até traduzido para o latim, influenciando o trabalho de, entre outros, Francis Bacon que viu o potencial de se usar lentes para corrigir problemas de visão ou até para a construção de instrumentos para a observação do céu (os telescópios). Bacon também teorizou sobre a maneira que a luz atravessa essas lentes. É interessante notar que, já pelo meio do século XIV, datam pinturas de monges usando óculos. É dessa época também o surgimento de um líquido de mercúrio que os alquimistas usavam para esfregar atrás de vidros para a construção de espelhos.

Cientes das potencialidades dos instrumentos ópticos conhecidos, os cientistas da época começaram a construir equipamentos a partir deles. Um importante acontecimento foi o desenvolvimento do telescópio.

No dia 2 de outubro de 1602, Hans Lippershey, um construtor de óculos holandês, tentou (sem sucesso) patentear o primeiro “óculo de perspectiva”, muito útil para navegação; há outros de seus contemporâneos que clamam igualmente a autoria (embora ele tenha sido consagrado como o inventor original). Quem logo tomou conhecimento disso foi o italiano Galileu Galilei, que prontamente construiu o seu próprio, retomando a antiga prática hug-buguiana de olhar para cima e ver o céu (agora com seus novos óculos). Johannes Kepler, o astrólogo alemão, também pegou a idéia, construindo uma versão modificada do original².

A partir de observações sobre o funcionamento desses aparelhos (o microscópio também havia sido inventado naquela época), Kepler chegou numa aproximação da lei da refração para ângulos pequenos, na qual ângulos de incidência e transmissão são proporcionais (aproximações empíricas dessa lei já não eram novidade, como a do árabe Ibn Sahl, 984, e a do inglês Thomas Harriot, 1602). No seu livro *Dioptrice* (1611), Kepler detalha o funcionamento dos telescópios Galileanos e Keplerianos, do microscópio, fala da sua aproximação da lei de refração e ainda faz um estudo sobre imagens virtuais, reais, inversão de imagens, ampliação e redução.

Depois da publicação do *Dioptrice*, o holandês Willerbrord Snellius (ou Willerbrord Snel van Royen) finalmente modela matematicamente, e não empiricamente, o problema. Conseguiu, portanto, descrever precisamente como raios de luz são redirecionados ao passarem de um meio para outro. Apesar de o trabalho de Snel não ter sido publicado, o francês René Descartes tomou conhecimento dele e publicou, sem seu livro *La Dioptrique* (1637), a formulação da lei que hoje nos é familiar: a lei dos senos. Descartes diz ter chegado a esse resultado a partir do seu modelo que dizia que a luz era uma “pressão” que era transmitida através de um meio elástico instantaneamente, como vemos no trecho a seguir:

²Kepler trocou a ocular côncava por uma convexa, do mesmo modo que Francisco Fontana, de Nápoles, havia feito com o microscópio. Para mais detalhes sobre a construção dos telescópios, ver unidade 4 do volume III.

(...) perceba a natureza que eu atribui a luz, quando disse que é nada além de certo movimento ou ação concebida num meio sutil, que preenche os poros de todos os corpos.

Outras deduções da lei dos senos (ou lei de Snel, ou ainda lei de Snel-Descartes) incluem a de Pierre de Fermat, que concluiria esta lei através do seu princípio do tempo mínimo: baseado no de Heron (que dizia que a luz percorria o caminho mínimo permitido entre dois pontos), Fermat disse que a luz não percorre o caminho mínimo, mas sim um caminho cujo tempo associado ao percurso seja mínimo.

Mas uma pergunta, uma bem importante, estava passando despercebida: dentro da nossa discussão sobre a composição do mundo: o que é luz?

Os atomistas gregos sugeriam que a luz também era formada por átomos, como todas as outras coisas. Com o retorno das idéias atomistas a idéia que a luz era uma partícula ganhou força, tendo Newton como um dos principais partidários dessa hipótese. Entretanto, existia outra corrente, que defendia que a luz consistia de ondas, esta visão tinha partidários igualmente fortes, como Robert Hooke³ e Christian Huygens⁴. Os argumentos dos que defendiam a interpretação “atomista” eram que a luz se propagava em linha reta, era refletida em interfaces e tinha sua trajetória desviada ao mudar de meio. Porém, todas essas propriedades também eram compartilhadas por ondas, e ainda mais: a luz se desviava para o lado contrario que deveria caso fosse uma partícula, quando mudava de meio. O que fez com que a hipótese da luz como partícula perder muita força, pois certos comportamentos – como os de interferência (o fato de dois raios de luz não se alterarem quando se cruzam) e os de difração (o “espalhamento” da luz ao passar por obstáculos), fenômenos muito bem explicados pelas interpretações ondulatórias de Huygens, faziam com que a idéia da luz ser uma onda fosse predominante.

Porém o golpe final a interpretação da luz como partícula se deu no século XVIII, com o experimento de fenda dupla, feito por Thomas Young. Após a luz passar por duas fendas muito pequenas, elas atingiam um anteparo e mostravam um padrão de interferência (semelhante ao que ocorria com o som ou ondas em líquidos), algo impossível de se prever com a interpretação como partícula⁵.

Além disso, uma das previsões mais importantes da teoria corpuscular era a de que a velocidade da luz num meio mais refringente (a água, por exemplo) deveria ser maior que num meio menos refringente (como o ar) – a teoria ondulatória previa justamente o contrário. A primeira mensuração de precisão confiável realizada foi a de Léon Foucault, confirmando a ondulatória.

A interpretação ondulatória acabou ganhando. A sua formulação final só veio no fim do século XIX, de um ramo inesperado, como costuma acontecer. Os modelos físicos sobre os fenômenos elétricos e magnéticos – que escapavam quase inteiramente à explicação mecânica do mundo – tiveram um enorme crescimento em numero de experiências diferentes e sistemáticas, bem como em teorias bem construídas sobre o assunto. As teorias sobre esses assuntos rapidamente caminharam para uma unificação, conforme foram sendo descobertos que correntes elétricas geravam efeitos magnéticos e vice-versa – desembocando, enfim, nas famosíssimas *Equações de Maxwell do Eletromagnetismo*. Essas equações são com muita frequência comparadas às Leis de Newton da Mecânica, em sua simplicidade, abrangência, mas mais importante: no seu papel como leis fundamentais de toda uma classe ampla de fenômenos que permeiam o universo.

As equações de Maxwell são como as de Newton em outro aspecto: elas admitem uma infinidade de fenômenos, dependendo das condições iniciais. Em outras palavras, são equações que admitem muitas funções como respostas – o mais importante papel delas não é dizer tudo o que

³O mesmo da lei das molas.

⁴Ele ajudou na formulação do cálculo e também fez várias descobertas em astronomia, como várias nebulosas interplanetárias e foi o primeiro a separar a nebulosa de Órion em várias estrelas, entre outras coisas.

⁵Esse tipo de experimento foi usado também para mostrar comportamentos ondulatórios em elétrons, no século XX! Isso será discutido mais à frente.

é possível, mas (i) limitar o que, em tese, não é possível, e (ii) dizer como certas coisas possíveis (e observadas) se comportam.

Mas isso não significa que cientistas envolvidos em certos debates não possam se aproveitar de certas derivações das equações para defender seus pontos de vista. De fato, uma solução muito interessante admitida pelas Equações de Maxwell é a seguinte: um campo elétrico, oscilando em um certo plano, que faz gerar um campo magnético oscilando no plano perpendicular, e esses dois campos conjuntos se propagando retilineamente!

Em 1888, Hertz conseguiu *gerar* as ONDAS ELETROMAGNÉTICAS previstas por Maxwell, que de fato se propagavam na velocidade da luz (eram o que chamamos de ondas de rádio). Daí a identificação: luz é uma onda eletromagnética! Para esclarecer a idéia, façamos uma discussão genérica sobre ondas.

2.1 As Ondas

Vamos então a uma descrição mais formal da idéia de onda.

Como vimos no Volume 2, a nossa tradição de como tratar problemas físicos envolve reduzir tudo à física de movimentos, isto é, fundamentar a física numa mecânica. É isso o que vamos fazer aqui, começando o nosso discurso sobre ondas com a idéia de movimento oscilatório.

O termo “oscilação” é bem genérico, e acho que todos têm alguma noção intuitiva sobre isso. O exemplo astronômico mais significativo do que poderíamos chamar de oscilação é o das estações do ano. Pense no calor e no frio como um par de opostos. Regularmente eles se alternam na dominância do tempo. O frio vem com toda a sua força, trazendo o vento, o gelo e a neve, e instaura os tempos do inverno. Mas justo quando atinge o seu máximo, começa a enfraquecer (senão o máximo não teria sido o máximo, haha), dando lugar ao calor, fazendo o Sol subir, derretendo o gelo, trazendo ares quentes e o verão.

Os chineses antigos foram especialmente sensíveis a essas oscilações da natureza. Eles nunca tiveram uma teoria de partículas indivisíveis, como a que discutimos no capítulo anterior; essa idéia de partícula indivisível não faria muito sentido na visão de mundo deles. Em vez disso, enxergavam a natureza como um jogo de dois princípios, um conjunto de oscilações entre dois pólos: o YIN, tudo o que é interior, escuro, frio, feminino, o espírito do vale; e o YANG, masculino, exterior, calor, luz e montanha. As estações do ano eram só um exemplo dessa oscilação; processos similares aconteciam com a vida da sociedade, com o corpo humano, com os sentimentos... Esse princípio chegou mesmo até a matemática: os ábacos chineses tinham pedrinhas vermelhas e pedrinhas negras, que se compensavam, quando se somavam (por exemplo, três vermelhas com uma preta equivalem a duas vermelhas). No Ocidente, as “pedrinhas pretas” só foram elaboradas muitos séculos mais tarde, sob o nome de *números negativos*.

Se quisermos uma expressão algébrica que descreva o comportamento da temperatura ao longo do tempo deve ser uma função periódica. As funções periódicas mais simples que temos à mão são as funções trigonométricas.⁶

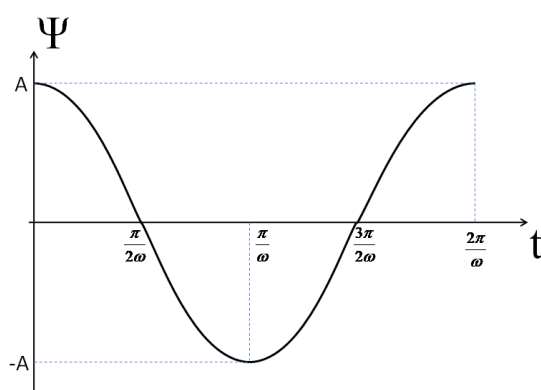
Vamos mudar para um exemplo mais mecânico: um pêndulo. Um pêndulo, em situação de repouso, permanece parado, vertical, com seu peso quase todo concentrado na ponta inferior. Até que alguém resolve puxá-lo para um lado, levantando um pouco o peso (o pêndulo só pode se mover em arcos de círculo). Soltando-o, o peso da extremidade faz com que ele caia e ganhe velocidade com isso, se dirigindo à posição de equilíbrio (onde o peso está o mais baixo possível). Contudo, a situação agora é outra: a gravidade o acelerou, de forma que, quando ele atinge sua posição original, sua velocidade é alta. Assim, ele passa da posição de equilíbrio, e começa a subir para o outro lado, desta vez sendo desacelerado para o outro lado. Ao atingir, do outro lado, a mesma altura para a qual ele foi puxado, sua velocidade volta a zero. Lá está ele então, suspenso

⁶Ver *Funções Trigonômétricas* no Apêndice B, do Volume III.

e imóvel, por um único instante. Prestes a cair novamente. Ele vai acelerar de novo, tendo o seu máximo de velocidade no mínimo de altura, para subir outra vez e repetir o movimento.

Pêndulos no nosso mundo só repetem essa oscilação poucas vezes, pois o atrito com o ar vai freando, fazendo com que ele suba menos a cada ciclo. Mas, numa situação ideal (a mesma do piso perfeitamente liso do Galileu e da inércia), o movimento continuaria para sempre, nesse conflito de dois princípios: por um lado a força (no caso, a gravidade) que tenta restaurá-lo à posição original, e por outro a sua inércia que tende a manter seu movimento, qualquer que ele seja. Ou, se preferir, um conflito permanente entre energia potencial e energia cinética.

Novamente, podemos descrever isso com gráficos e equações. Podemos medir a cada instante o ângulo que a haste do pêndulo faz com a vertical e fazer um gráfico de como esse ângulo varia ao longo do tempo. Se as oscilações forem pequenas, conseguimos uma curva que é muito simples:



Correspondente à seguinte função do ângulo ψ pelo tempo t :

$$\Psi(t) = A \cos(\omega t)$$

Essa função tem dois parâmetros, A e ω . A corresponde ao quanto o pêndulo se afasta da sua posição de equilíbrio (repare nos valores que o ângulo assume quando o cosseno é igual a 1 ou -1). Isso diz o quão “ampla” é a oscilação, e por isso é o que chamamos de **AMPLITUDE** da oscilação. No caso do pêndulo, a amplitude depende basicamente do tamanho do puxão que ele sofre, ou de qual é a altura de que ele cai na primeira vez.

Já ω mede as distâncias entre as cristas no gráfico. Repare que, tirando o máximo em zero, o primeiro máximo do gráfico ocorre quando $\omega t = 2\pi$, ou seja, quando $t = \frac{2\pi}{\omega}$. O segundo pico, quando $t = \frac{4\pi}{\omega}$, depois $t = \frac{6\pi}{\omega}$, etc. Ou seja, o tempo que leva para o padrão se repetir, o **PERÍODO** da oscilação, vale $T = \frac{2\pi}{\omega}$.

Ômega então é uma forma de medir o período da oscilação. Na verdade, é o inverso do período. Reescrevendo a equação, podemos olhar por esse outro lado: $\omega = \frac{2\pi}{T}$. Isso significa que ω é uma espécie de “velocidade”, que mede quão rápida a oscilação ocorre, ou quantas oscilações ocorrem por segundo. Isso é o que chamamos de **FREQÜÊNCIA** da oscilação (**FREQÜÊNCIA ANGULAR**, no caso).

Diferente da amplitude, que é bastante arbitrária, a frequência de uma oscilação é uma característica “natural” do sistema em questão, isto é, depende das características internas do sistema. No caso do pêndulo, por exemplo, pode-se mostrar que essa frequência depende somente do comprimento L da haste do pêndulo e do valor g da aceleração da gravidade, na forma $\omega = \sqrt{\frac{g}{L}}$.

Você pode mesmo testar isso empiricamente! Faça um pêndulo com barbante, e veja como varia a frequência da oscilação conforme se aumenta ou se diminui o comprimento do barbante; depois, vá até a Lua e verifique a variação da frequência com um valor diferente de g .

Há uma outra maneira de definir frequência, que será mais útil para nós. Em vez de medir a frequência em radianos/segundo (quantos radianos, desse cosseno da oscilação, se percorre em um segundo), podemos medir em ciclos/segundo (quantas oscilações completas acontecem por segundo). Essa frequência “linear”, que normalmente chamamos só de **FREQÜÊNCIA**, será mais usada por nós. Como durante um período, por definição, ocorre só um ciclo, então essa frequência é o inverso do período:

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

, e costuma ser medida em *Hertz* (1 Hertz = 1 s^{-1} – ver Análise Dimensional). A frequência “linear” e a frequência angular são só duas formas diferentes de descrever o mesmo conceito; do que vimos acima, dá pra ver que elas estão relacionadas de um modo bem simples: $\nu = 2\pi\omega$.

O conceito de onda é bem parecido com o de oscilação. Muitas pessoas, na verdade, gostam de definir ondas como “movimentos oscilatórios que se propagam pelo espaço”. Considere, por exemplo, você e um grupo de amigos na arquibancada de um estádio de futebol. Num dado momento, vocês começam a levantar e se sentar periodicamente. Cada um de vocês está executando um movimento oscilatório. Agora imagine que o estádio esteja cheio; as pessoas já estarão prontas para propagar a sua oscilação. Você levantar vai fazer com que a pessoa a seu lado levante logo depois, que vai fazer levantar também a próxima; e o movimento oscilatório de sentar e levantar vai se propagando ao longo da torcida - constituindo o famoso ritual do “Oôlaaah!”. Da mesma forma funcionam as ondas no mar, oscilações da água que se propagam até atingir a areia. Um barco parado sobre a água se move apenas subindo e descendo, oscilando segundo um cosseno, enquanto o padrão das ondas vai mudando sob ele.

Oscilações ocorrem em sistemas fechados, com limites bem definidos; ondas, por outro lado, funcionam em sistemas abertos, percorrem o espaço até não poderem mais. Muitas ondas são produzidas a partir da repetição de padrões oscilatórios localizados.

Considere por exemplo a produção do som, a partir de um diapasão ou de uma corda que vibra. A corda oscila presa entre suas duas extremidades. Em cada máximo dela, entretanto, ela agride o ar à sua volta, chutando as moléculas de ar para longe dela. Essas moléculas, subitamente jogadas como num arrastão, batem em outras moléculas, que acabam sofrendo o mesmo impacto e repassando para ainda outras moléculas. Cada molécula não vai muito longe nesse processo, mas o padrão gerado pela corda se propaga infinitamente, de molécula em molécula, de camada em camada de ar.

Ondas de som são, na verdade, ondas de pressão; em cada momento existe uma camada de ar em que as moléculas estão mais comprimidas que no entorno. Esse padrão continua se propagando até que, eventualmente, atinge um ouvido humano. Ouvidos humanos têm uma fina membrana, o tímpano, que é bastante sensível a variações de pressão no ar, a enxurradas de átomos empurrados pelo padrão. Quando a membrana é comprimida, nossos nervos são acionados, e aparece um som na nossa mente.

- 7- Se o som se propaga no ar, ele também se propaga em outros meios, como em sólidos ou líquidos? Se sim, ele se propaga melhor ou pior nesses outros meios?

Há uma diferença importante entre as ondas de som e as ondas do mar. Enquanto estas são oscilações que sobem e descem, perpendicularmente ao sentido da propagação, as ondas de som fazem as partículas oscilarem *no mesmo sentido* da propagação. Você pode visualizar isso com uma

mola de brinquedo daquelas bastante compridas. Mantenha a mola parada e esticada. Agora puxe a mola para cima; você gerará uma corcova que vai se propagar até a outra extremidade da mola. Cada ponto da mola vai então subir e descer. Mas se quiser fazer o análogo a ondas de pressão, você deve, em vez disso, empurrar a mola para a frente, comprimindo o início dela. Assim, a parte comprimida (mais escura) vai percorrer a mola toda, até a outra extremidade, e cada ponto da mola vai se comprimir quando a onda atingi-lo e descomprimir depois que ela passar.

Na verdade, ondas no mar são uma mistura dos dois tipos: há a propagação longitudinal de pressão e a oscilação transversal do líquido. Variações desse tipo, entretanto, não mudam o caráter geral do fenômeno, que é o que estamos discutindo.

Vamos agora à matematização do fenômeno. Como as oscilações, ondas também tem suas FREQUÊNCIAS características, que servem para identificar a “natureza” da onda. Notas musicais diferentes, por exemplo, correspondem a frequências diferentes das ondas sonoras. As AMPLITUDES de uma onda, por outro lado, dizem quanto de energia elas carregam (lembre-se da energia potencial do pêndulo; quanto maior a energia que você o dá levantando-o, maior é a amplitude). Caixas de som com um volume mais alto emitem ondas com amplitudes maiores.

Mas não basta caracterizar as oscilações que as ondas geram; é preciso também caracterizar sua propagação. É por isso que se fala em VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO das ondas (velocidade no sentido vetorial da palavra: com intensidade e direção). Uma onda sonora gerada por um diapásão, por exemplo, se propaga esfericamente em torno do diapásão. A intensidade da sua velocidade, por outro lado, só depende das características do meio em que ela vibra: sua densidade, sua temperatura, a quantidade de turbulências, etc.

Nas ondas, justamente pelo fato de que elas se propagam, existe uma correspondência entre seu padrão espacial e seu padrão temporal. Lembremos do calombo gerado na mola ou da onda do mar ou da ôla no estádio. Da mesma maneira que, para um ponto da mola (ou pro barquinho ou pro torcedor), há um período em que acontece a oscilação (o subir e descer) existe também um tamanho espacial dessa oscilação (uma largura). Se o “tamanho temporal” é medido pelo PERÍODO da onda, o “tamanho espacial” será medido por uma grandeza chamada COMPRIMENTO DE ONDA.

Vamos voltar ao exemplo mais simples, que use só um cosseno. Para isso, imagine uma corda esticada, presa em uma extremidade por um oscilador harmônico.

Cada ponto da corda oscilará como um cosseno, temporalmente, e terá a frequência de oscilação que é dada pelo oscilador no início da corda (no gráfico, a distância entre dois picos é um período). Por outro lado, se fixarmos um instante, o perfil inteiro da corda também é um cosseno! E, neste perfil, a distância entre dois picos é o comprimento de onda.

Se uma corda fosse amarrada em um peso pendurado em uma mola e este peso fosse colocado para oscilar, isto geraria uma onda que percorreria a corda. Essa onda (que chamamos de *onda harmônica*) é descrita pela seguinte função:

$$\Psi(x, t) = A \cos(\omega t + kx)$$

Olhe atentamente para ela e veja que ela reflete exatamente o que dissemos. Tomando uma posição específica, ou seja, fixando x , ela assume a cara de uma oscilação harmônica:

$$\Psi_x(t) = A \cos(\omega t + \text{const.})$$

(o x subscrito é só pra representar que essa é a função temporal para o ponto x). Já fixando um instante de tempo (t constante), ela fica como:

$$\Psi_t(x) = A \cos(kx + \text{const.})$$

k tem um significado análogo ao da frequência angular que definimos no início. Ou seja, da mesma forma que $\omega = \frac{2\pi}{T}$, também $k = \frac{2\pi}{\lambda}$.

A chave para relacionar comprimento de onda e período é a que relaciona a oscilação com sua propagação: a velocidade de propagação da onda. Ora, em um período de oscilação, a onda percorre um comprimento de onda. Então:

$$V = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{\lambda}{T}$$

Ou, se usarmos a frequência em vez do período:

$$v = \lambda \nu$$

- 8- Suponha que você esteja no mar, e meçamos, como 5 m/s, a velocidade da corrente. Se o espaço médio entre duas ondas, naquele dia, no lugar onde você estava, era de 70 m, e você acabou de ser atingido por uma onda, quanto tempo você deve esperar para ser atingido por outra?

2.2 Ondas Eletromagnéticas

Agora estamos prontos para entender melhor a idéia de onda eletromagnética: um campo elétrico que oscila senoidalmente, que gera por consequência um campo magnético no plano perpendicular. Esse padrão, misteriosamente gerado por processos eletrônicos da matéria, uma vez gerado continua se propagando espaço afora.

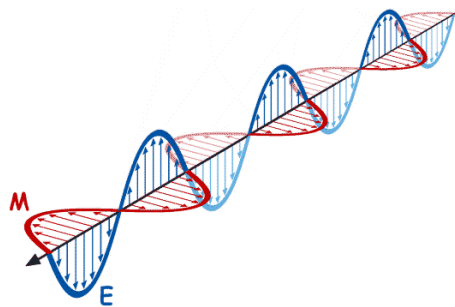


Figura 2.1: Onda eletromagnética.

Uma peculiaridade das ondas luminosas é que elas são um mecanismo autônomo. Como mencionado, uma onda sonora depende de seu meio para se propagar; sua velocidade de propagação depende basicamente das qualidades do meio. Se não houverem moléculas de ar em torno do diapasão, como sua vibração vai se propagar?

Ondas eletromagnéticas, aparentemente, não têm esse problema. Uma vez gerado o campo, ele vai se reproduzindo e se propagando *indefinidamente*; moléculas no caminho, pelo contrário, só atrapalham. Se você gritar em uma câmara de vácuo (enquanto seu corpo ainda não tiver explodido), ninguém o ouvirá do lado de fora; mas a luz que é produzida nas estrelas percorre parsecs e parsecs até chegar quase intacta a seus olhos.

Na verdade, a idéia de luz como onda eletromagnética levou a se postular a idéia de um ÉTER LUMINOSO, o meio que vibraria eletromagneticamente, permitindo a propagação da luz. Esse éter estaria espalhado por todo o espaço – na verdade, poderia ser identificado com ele: onde houver espaço, há éter, ou o espaço é o próprio éter.

Esse meio de propagação da luz, entretanto, teve que ser abandonado a partir das teorias da relatividade de Einstein – e a luz pensada como uma onda que se propaga sem meio mesmo. Mas nessa época as coisas ficaram muito esquisitas.

Uma das consequências estranhas dessa propagação sem meio é que, no vácuo, a luz se propaga sempre à mesma velocidade, independente da velocidade do observador (essa foi a idéia principal que levou à primeira das relatividades). Mas isso faz com que ondas de luz sejam inteiramente caracterizadas apenas pela sua amplitude e pela sua frequência (ou pelo comprimento de onda, que dá no mesmo). E, da mesma forma que diferentes frequências sonoras correspondem a diferentes notas, diferentes frequências luminosas correspondem a diferentes cores. Luz com frequência mais alta é mais azulada e, com frequência mais baixa, mais avermelhada. O assunto será melhor explorado no capítulo seguinte.

2.3 Efeito Doppler

Um dos importantes efeitos explicados pela hipótese ondulatória da luz é o muito famoso EFEITO DOPPLER. Ele consiste no fato de uma fonte de luz parecer mais avermelhada quando nos afastamos dela (*red shift*), e mais azulada quando nos aproximamos (*blue shift*). Ou um som parecer mais grave quando o emissor se afasta, e mais agudo quando se aproxima (Já ouviram o motor de um carro durante uma corrida?). De uma forma geral, o Efeito Doppler é a variação da frequência de uma onda, ocasionada pela existência de velocidade relativa entre o observador e a fonte de luz.

Vejamos isso com mais cuidado. Imagine uma fonte luminosa qualquer vindo na nossa direção. Essa fonte emite frentes de onda espaçadas de uma distância λ . Mas quando ela emite uma frente (ou se preferir, um pico da onda) ela já se deslocou, e essa frente acaba saindo mais próxima à frente anterior – o que diminui o comprimento da onda. Da mesma forma, quando a fonte se afasta, os picos ficam mais distantes. As figuras abaixo mostram frentes de onda emitidas por uma fonte parada e uma em movimento.

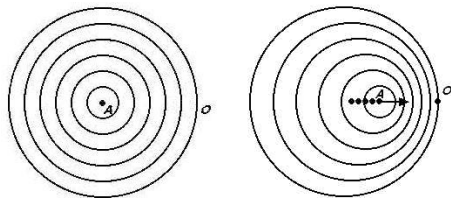


Figura 2.2: Fonte parada, e fonte em movimento. Podemos perceber que as frentes de onda, no caso da fonte parada, se propagam sempre de um mesmo ponto. Já no caso da fonte em movimento, elas saem cada uma de uma posição da fonte, e por isso o acúmulo de frentes de onda na direção de aproximação da fonte, e diminuição na região de afastamento.

Matematicamente, a idéia pode ser expressa do seguinte modo: seja uma fonte que se afasta com velocidade v , emitindo uma onda de luz que se propaga com velocidade c . Se considerarmos sempre velocidades pequenas em relação à velocidade da luz, como é usualmente o caso, temos que o caso do observador se aproximando da fonte, ou ambos em movimento, podem ser tratados da mesma maneira, considerando o observador parado e a fonte com velocidade v igual à velocidade relativa entre os dois⁷.

⁷Quando fazemos a dedução da fórmula que determina a variação do comprimento de onda como função dos movimentos da fonte e do observador para ondas mecânicas, temos que o movimento da fonte em relação ao observador é diferente do movimento do observador em relação à fonte, pois há, nesse caso, um referencial absoluto em relação ao qual deve-se medir as velocidades: é o MEIO no qual a onda se propaga. Então, a fonte andando em relação ao meio, ou

Neste caso, o observador mede as frentes de onda chegando distanciadas por um comprimento λ' , maior que o comprimento original λ , devido ao movimento relativo da fonte. Escrevendo o movimento da fonte durante um período como $\frac{v}{f}$ (f = frequência da onda emitida) temos: $\lambda' = \lambda + \frac{v}{f}$. Escrevendo $\lambda' - \lambda = \Delta\lambda$ e $f = \frac{c}{\lambda}$, temos $\Delta\lambda = \frac{v}{c} \cdot \lambda$ e portanto⁸:

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

Onde v_r é a velocidade relativa de afastamento, a componente da velocidade *na direção* do observador, se aproximando ou se afastando⁹.

Esse efeito é deveras importante em Astronomia, pois nos permite calcular a velocidade de aproximação ou afastamento de um corpo a partir do deslocamento das linhas do seu espectro. Veremos, logo a seguir, que toda estrela apresenta, superposto ao seu espectro de corpo negro, linhas de absorção, e a explicação disso. Portanto, se conhecemos do laboratório a verdadeira posição das linhas, o deslocamento que essas linhas apresentarem no espectro determinará a velocidade radial (a componente da velocidade na direção do movimento) da estrela. O desenho abaixo mostra a diferença entre a velocidade e a velocidade radial de uma estrela.

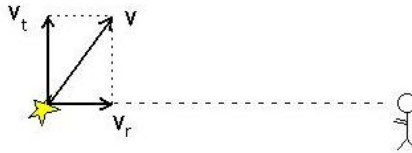


Figura 2.3: Composição da velocidade de uma estrela. A velocidade da mesma pode ser dividida em duas componentes: V_r , a velocidade radial, fica na direção da linha entre o observador e a estrela. Pode ser de aproximação, como no caso da figura, ou de afastamento. E V_t , a velocidade tangencial, é numa direção perpendicular à direção do observador e não influencia no Efeito Doppler. Só é detectada a partir da mudança da posição da estrela, ou do objeto, no céu, no decorrer do tempo. Agora é um bom momento par reler sobre Movimento Próprio (Volume I).

2.4 Efeito Fotoelétrico

Sabemos já descrever algumas características da luz, apenas pensando nela como onda, e isso é bem legal. Entretanto, na mesma época em que Maxwell corava a teoria ondulatória da luz, começavam a surgir fenômenos que não eram mais explicados por essa teoria. Tomemos como exemplo o chamado EFEITO FOTOELÉTRICO. Esse efeito consiste na perda de elétrons pela superfície de um metal, quando incidimos luz nessa mesma superfície. O experimento pode ser resumido da seguinte forma:

o observador, ou ambos são efeitos diferentes. No caso da luz, no entanto, não há um referencial absoluto em relação ao qual medir-se a velocidade da luz, mas pelo contrário ela vale $c = 299792458 \text{ m/s}$ em *qualquer referencial*.

⁸Essa fórmula é uma aproximação para velocidades bem menores que a da luz. A fórmula para o efeito Doppler relativístico, para qualquer velocidade da fonte, é dada por $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \sqrt{\frac{1+\frac{v}{c}}{1-\frac{v}{c}}} - 1$. Como dito, a velocidade da luz é constante em qualquer referencial. Esse fato experimental, que não concorda com a mecânica newtoniana tradicional (pois não podemos ter, com a lei da composição de velocidades de Galileu, um objeto movendo-se com a mesma velocidade em relação a alguém parado e a alguém em movimento), foi um dos fatos que levou ao desenvolvimento da Relatividade Especial de Einstein, em 1905. Por isso, a fórmula dada para o Efeito Doppler relativístico é uma só, conquanto seja usada no referencial do observador.

⁹No caso de aproximação, basta considerar v_r negativa, e assim também será negativo, ou seja, o comprimento aparente da onda irá *diminuir*, de acordo com o que foi dito no início da seção.

Dispõe-se de um pedaço de metal, e começa a se incidir luz de um determinado comprimento de onda no mesmo. Suponhamos que não estamos observando nada, ainda. Nesse caso, não importa quanto aumentarmos a INTENSIDADE (amplitude) da luz incidente no metal: Nenhum elétron será arrancado.

Começa-se, então, a variar a FREQUÊNCIA da luz. Acontece que, num dado momento, atentando ao fato de que estamos incidindo agora sempre luz com a mesma intensidade, há uma certa frequência a partir da qual os elétrons começam a ser soltos desse metal. Para qualquer frequência maior do que essa determinada frequência limite, não importa quão pouca luz esteja incidindo: elétrons serão arrancados. A intensidade da luz (a potência dessa luz, espalhada em uma determinada área) determina a QUANTIDADE de elétrons, não o fato de eles serem arrancados ou não. Além disso, os elétrons saem todos uma energia cinética menor que um certo valor limite, que depende da frequência da luz e do metal. Caso se varie a frequência dessa luz, todos os elétrons sairão com uma ENERGIA maior, mas a quantidade será, novamente, determinada pela intensidade.

Vamos entender porquê esse experimento contradiz o fato de que a luz é uma onda. Imagine um pacote de ondas incidindo em um elétron. Temos que a energia dessa onda está relacionada com a sua AMPLITUDE (lembra-se? O “tamanho” da vibração da onda, o valor do máximo de sua vibração), que por sua vez está relacionada com a INTENSIDADE da mesma. Nesse fenômeno, ao contrário, o que está relacionado com a energia que o elétron ganha, após ser retirado, é a FREQUÊNCIA da luz. A intensidade controla a quantidade de elétrons.

Foi assim que, para resolver o problema dos corpos negros¹⁰, Planck publicou em 1900 um trabalho postulando que a matéria não emite luz continuamente, mas em partes, em pacotes (*quantum*, em latim), cujo tamanho é proporcional à frequência da onda:

$$E = h \cdot f$$

E é a energia do pacote, f , a frequência da onda, e h é a constante que ficou conhecida como Constante de Planck, $h \approx 6,63 \cdot 10^{-34}$ J.s. O postulado ficou conhecido como LEI DE PLANCK, e os pacotes, em analogia com outras partículas, como FÓTONS (*photos* = luz, em grego), as partículas de luz.

Com a Lei de Planck, poderia se explicar agora o efeito fotoelétrico; e foi o que Einstein fez em 1905. A idéia dele era a seguinte: suponhamos que exista uma certa quantidade de energia necessária para se retirar um elétron de um átomo do metal. A essa energia foi dado o nome de “função-trabalho do metal”, dada por E_0 ; ela varia de metal para metal. Se a frequência da luz que incide no metal é tal que a energia de um fóton seja $E = hf < E_0$, então o elétron não é arrancado do átomo, não há energia suficiente para tal. Já se a frequência da luz for tal que um fóton qualquer tenha energia $E > E_0$, então o elétron é arrancado, e a energia restante do processo, não utilizada para retirar o elétron, $\Delta E = h \cdot f - E_0$, é a energia que fica com o elétron após sua retirada. Dessa forma, aumentar a intensidade da luz é aumentar a quantidade de fótons, mas manter cada um com a mesma energia; isso levará a um aumento na retirada de elétrons, mas todos saindo com a mesma energia de antes. Ainda, se a frequência for abaixo da necessária, não importa a quantidade dos *quanta* de luz, nenhum deles arrancará um elétron do metal. Einstein ganhou um Prêmio Nobel de Física por este trabalho (e não pela Teoria da Relatividade, como se costuma imaginar), e a partir disso, apesar do estrondoso sucesso das ondas de Maxwell, a idéia de luz como partícula voltou a ter peso no debate científico.

¹⁰Familiarizaremos-nos com este conceito no capítulo 4. Por ora, para os curiosos, podemos dizer que um corpo negro é definido como um corpo que não reflete luz alguma, e toda sua luz vem, portanto, de sua própria emissão.

Capítulo 3

Cores

O que origina as cores, que podem ser vistas como “tipos” diferentes de luz? O que diferencia a luz vermelha da verde, e esta da azul? Como Newton já havia discutido, é a **FREQÜÊNCIA** dessa luz que vai determinar a cor da mesma. Dessa forma, temos que a seqüência das cores, com os valores aproximados das freqüências da luz para cada uma delas, é dada a seguir.

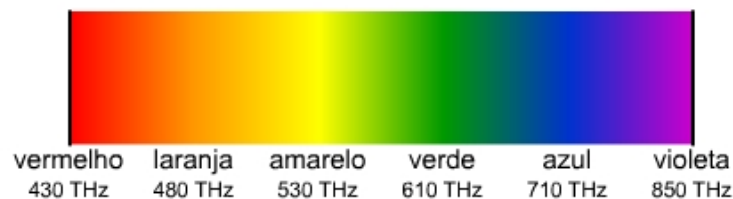


Figura 3.1: Espectro de Cores.

Temos, porém, que a luz, mesmo quando vinda de objetos razoavelmente distantes, como os planetas, chega até nós ao mesmo tempo: Um planeta, mesmo tendo muitas cores, tem sua imagem nitidamente observada aqui da Terra, e não a imagem no azul deslocada em relação à do vermelho, por exemplo. Vemos, portanto, um fato experimental que sustenta (ou seja, que torna verdadeira e possível de ser afirmada) a seguinte afirmação: A luz, seja de qualquer freqüência, propaga-se com a mesma velocidade, designada por c . O valor aproximado de c é 300000 km/s (um bom valor para c pode ser encontrado no *Google*, digitando-se “velocidade da luz”). Então, da fórmula $v = \lambda \cdot f$, temos que, para cada freqüência, temos um comprimento de onda que é tanto menor quanto maior for a freqüência dessa onda. Podemos, então, completar a gravura acima, fazendo constar também os comprimentos de onda dessa luz. Hum... Eu disse “podemos?” Vocês podem! Vocês têm a velocidade da luz, e as freqüências...

Repare, entretanto, que atribuir uma cor a cada comprimento de onda é claramente insuficiente para explicar o mundo das cores. O contrário, aliás, não pode ser feito: qual é o comprimento de onda marrom, ou cinza?

Em primeiro lugar, isso acontece porque não podemos fazer uma descrição das cores com referência exclusiva ao nosso mundo físico, sem levar em conta o funcionamento do olho e o processamento das informações que chegam a ele. Cores são um fenômeno perceptivo e mental,

muito mais que uma propriedade física de objetos. Um fenômeno que cada vez mais dá exemplos que só podem ser compreendidos levando-se em conta o processamento neural, e um fenômeno que não está associado de forma tão direta assim aos comprimentos de onda (sabe-se, por exemplo, que os neurônios que distinguem cores não são os mesmos que distinguem comprimentos de onda, de forma que é possível sofrer lesões que permitam continuar distinguindo comprimento de ondas mas enxergando em preto-e-branco!).

Além disso, mesmo sem entrarmos nos pormenores perceptivos, o comportamento físico do cotidiano não é tão simples. Diz-se que o que dá cor a um objeto são os comprimentos de onda que ele não absorve – em vez disso, reflete. Acontece que nenhum objeto na natureza reflete luz de apenas um comprimento de onda! Em geral, todos os objetos refletem luz de todas as frequências (exceto talvez algumas, específicas – veja capítulos seguintes), com diferentes distribuições de intensidade. Então, via de regra, nenhum objeto exhibe as cores correspondentes aos comprimentos de onda, que vemos por exemplo em um arco-íris ou com um prisma. Mesmo sem levar em conta a interação luz-cérebro, prever a cor de um objeto pelas suas propriedades ópticas é bem mais complicado do que parece.

De fato, nem sempre a melhor forma de construir conhecimento é partir de bases físicas ou mais fundamentais. Em primeiro lugar porque toda teoria é incompleta e, portanto, nunca é possível explicar todos os fenômenos do universo a partir de uma teoria. Em segundo porque, mesmo que em tese seja possível, nem sempre dá pra fazer na prática. Teorias físicas em geral só conseguem descrever bem sistemas muito simples (pontos materiais, esferas, etc); as coisas complicadas são frequentemente inviáveis. Por isso é que existem teorias diferentes sobre as mesmas coisas. Mesmo a química, que é muito fortemente baseada em física quântica, é uma teoria autônoma: estamos muito longe de reproduzir todos os resultados da química a partir de modelagem com física quântica.

Isso nos estimularia a tentar construir uma teoria autônoma das cores, que mantenha entretanto algumas pontes com as teorias físicas e fisiológicas subjacentes. Isso foi feito; existe uma teoria clássica das cores, sintetizada em uma obra de Wolfgang von Goethe¹: *Zur Farbenlehre* (*A Doutrina das Cores*), de 1810.

3.1 Brilho, Matiz e Croma

Antes de apresentar a teórica clássica, vamos apresentar um problema dela: o de se basear nas cores em si, como grandes categorias. Em vez disso, poderíamos ver certas características que as cores tem de forma diferenciada (da mesma maneira que caracterizamos o som). Precisamos fixar isso aqui para efeito do vocabulário usado no resto do texto. São elas:

- **BRILHO**: Mede a intensidade da cor. Branco, cinza e preto são três graus diferentes de luminosidade (ou três diferentes graus de brilho de azul, por exemplo).
- **SATURAÇÃO** ou **CROMA**: Mede o grau de cor da cor. Quanto mais croma, mais vívida é a cor vista. Conforme vai perdendo seu croma, a cor vai se tornando acinzentada.
- **MATIZ**: É o que distingue as diferentes cores. Esse parâmetro, diferente dos outros, não pode ser medido com uma régua de intensidade; diferentes valores de matiz correspondem a cores que nós diríamos qualitativamente diferentes.

A primeira vez que essa categorização foi usada talvez tenha sido por Albert Munsell (em *Munsell Book of Color*, 1915). O esquema é o da figura abaixo.

¹Johann Wolfgang von Goethe é muito mais famoso pelas suas obras literárias que pelas de investigação do mundo natural. Ele é considerado o pai do romance alemão. Sua obra mais famosa, o curto romance *Os Sofrimentos do Jovem Werther* devia ser lido por todos os adolescentes :P

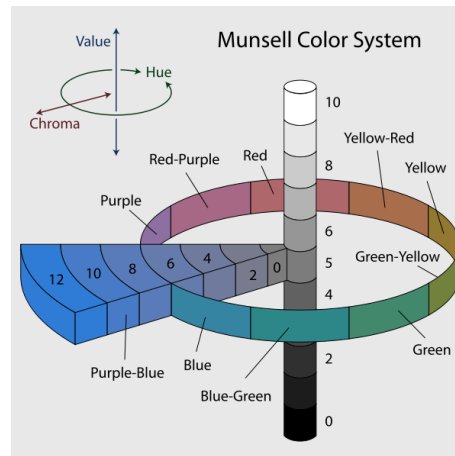


Figura 3.2: Sistema de Cores de Munsell. Brilho e Saturação são apresentados em eixos perpendiculares, e o Cromo em uma roda (a Roda de Cores de Goethe), perpendicular aos outros dois eixos.

Em geral, diferentes cores ganham diferentes nomes pelos seus matizes, mas não é sempre assim. No fundo, nomes de cores também são conceitos, e portanto gerados em ambientes culturais específicos, influenciados por combinações particulares de brilho, croma e matiz que sejam frequentes naquela cultura. Assim, podemos citar rosa e vermelho como cores que têm o mesmo matiz mas diferem apenas em croma, ou laranja e bege como cores que diferem apenas em luminosidade.

3.2 Teoria Clássica

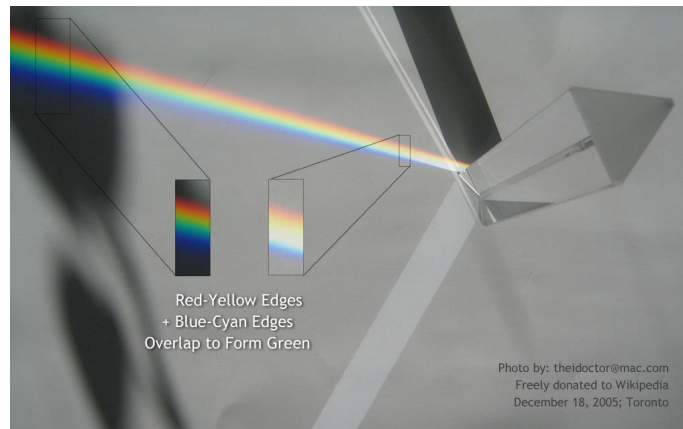
Foi o que Goethe fez com seu *Zur Farbenlehre* (*Da Doutrina das Cores*), de 1810, que acabou se tornando um dos maiores clássicos sobre o assunto (talvez porque Goethe seja o maior clássico do Romance Alemão :P). Uma análise mais detalhada deste livro fica para a próxima edição do curso. Podemos adiantar, entretanto, algumas informações.

Como um bom romântico, Goethe era bastante cético quanto às especulações teóricas dos cientistas. Ele mesmo se recusa a chamar seu trabalho de “teoria” (em alemão ele não usa o termo “theorie”, mas “lehre” - algo como “lição”, “aprendizado”). Ele rejeita tanto as teorias corpusculares quanto as ondulatórias da luz, ambas conceitualmente inferidas, e não percebidas diretamente pelos sentidos. Mas mais radical do que isso: em vez de conceber simplesmente a luz como uma “coisa” e o escuro como a ausência de luz, ele encara “luz” e “escuridão” como dois pólos que, ao interagirem, formam todas as coisas! – Nesse sentido, uma visão mais próxima da chinesa (yin e yang). É dessa interação entre luz e sombra que nasceriam, dentre outras coisas, as cores.

A oposição mais direta de Goethe era a Newton. Goethe dizia, não sem razão, que a clássica imagem do prisma do físico inglês estava *errada*. O que ele supunha como comportamento geral só acontecia em uma certa região, distante do prisma. Para Newton, as cores já faziam parte da luz branca, que nada mais era que a mistura de todas as partículas de diferentes cores. O que o prisma fazia era separar essas partículas, fazendo cada uma sair do prisma em uma direção diferente, fazendo sair do prisma um feixe “aberto” e com faixas de cores diferentes e bem definidas.

Mas não é exatamente o que acontece. Repare no que acontece com o feixe colorido logo que ele sai do prisma.

Logo que sai do prisma, o feixe continua com um núcleo branco, e com uma borda amarelo-



vermelha de um lado, e azul-ciano do outro. Essas bordas vão convergindo para cima do branco até sua mistura produzir o verde. Só bem depois do prisma é que a configuração newtoniana é atingida. Nessa dinâmica entre claro e escuro, então, “Amarelo é a luz que foi amortecida pela escuridão; Azul é a escuridão que foi clareada pela luz”.

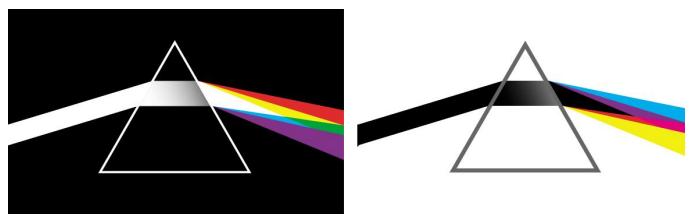


Figura 3.3: Repare que, enquanto a decomposição da luz gera as cores básicas RGB, a decomposição da escuridão gera CYM.

3.2.1 Cores Primárias

Um dos aspectos fundamentais da teoria clássica das cores, que aparece em Goethe, é o das CORES PRIMÁRIAS, que pode ser resumido como: todas as cores podem ser geradas a partir de uma combinação de três cores fundamentais.

Tradicionalmente (e em Goethe), essas três cores são amarelo, vermelho e azul. Todos nós aprendemos isso na escola. Amarelo e azul se combinam como verde, amarelo e vermelho, como laranja, e vermelho e azul, como roxo. Nessa “roda de cores” já aparecem todas as cores do arco-íris. É na forma de uma roda que Goethe representa suas cores, de fato.

Todos nós, entretanto, nos frustrávamos no colégio, quando íamos pintar com combinações de cores primárias. Primeiro porque a combinação nunca dava o que esperávamos; segundo, porque se combinássemos três ou mais cores, sempre chegávamos em algum cinza ou marrom bem nojento.

É que, por um lado, a combinação de duas cores é necessariamente mais escura e com menos croma (mais acinzentada) que as cores que a geraram. Por outro, devíamos saber que não é qualquer amarelo, vermelho e azul que serve. Como o próprio Goethe chama atenção, as cores primárias verdadeiras sequer podem ser encontradas na natureza: todo vermelho encontrado por aí é pelo menos um pouquinho contaminado das outras duas cores. Uma cor primária são algo tão abstrato quanto um gás ideal ou uma superfície sem atrito – o que não significa que ela não possa ser usada para descrever a natureza.

3.2.2 Cores Opostas

Certos matizes que, combinados, anulam seus cromas (gerando cinza). De fato, não existe um verde avermelhado, nem um azul amarelado. Essa lei é uma estratégia frequentemente usada na pintura e no design, quando se trata de combinar cores. Dada uma cor, dizemos que a cor que, combinada com aquela, gera cinza, é a sua **COR OPOSTA**.

Podemos entender a idéia das cores opostas em bases biológicas. A idéia é que as células que processam as cores, para distingui-las, comparam pólos opostos de cores: branco e preto, roxo e amarelo, verde e vermelho. Isso é o que explica certos fenômenos visuais do surgimento das cores opostas em objetos sem croma: perto de um sofá vermelho, um muro cinza é visto como esverdeado.

3.3 Tricromia

Repare que para estudar cores, podemos fazer basicamente dois tipos de experimento.

Um deles é tomar uma superfície perfeitamente neutra (sem croma), iluminando-a com diferentes luzes monocromáticas, combinando essas luzes. Isso nos permite estudar as cores a partir da luz (como se misturássemos os raios mesmo). Combinações desse tipo funcionariam numa lógica *aditiva*: dois raios diferentes combinados fornecem algo que é mais brilhante que a anterior (o que é óbvio, pois a quantidade total de luz é maior). Somando todas as cores, devemos ter branco, como já mostrava o disco de Newton.

Outro experimento é o de ter uma fonte de luz branca iluminando a mesma superfície sem croma, mas ir cobrindo esta superfície com pigmentos (giz, lápis, tinta); combinando os pigmentos, vemos que combinações podem ser feitas. Assim, estudamos pigmentos, em uma lógica *subtrativa*: quanto mais pigmentos colocamos sobre uma superfície, mais luz ele absorve, e menos ele reflete. Colocando todos os tipos de pigmento, o limite seria chegar em uma superfície negra.

Ao longo do século XIX, entretanto, novas pesquisas foram feitas, e outra base de cor foi adotada: a famosa RGB (red, green, blue). Vamos representar isso vetorialmente. Suponhamos que todo feixe de luz (com uma intensidade padrão) possa ser representado por um vetor da seguinte forma:

$$\vec{L} = a_R \vec{R} + a_G \vec{G} + a_B \vec{B}$$

onde a_R , a_G e a_B são quantidades, que variam entre 0 e 1, que expressam a quantidade de luz vermelha, verde e azul, respectivamente, contidas no feixe. Podemos representar, de forma mais simples, esse vetor por (a_R, a_G, a_B) , desde que lembremos a que cada posição corresponde. Falando em termos de álgebra linear, as cores primárias são uma base do espaço vetorial da luz.

Cada vetor desses pode ser associado com uma *cor* – que é o que vemos quando projetamos um determinado raio de luz em uma parede branca. Assim, o que chamamos de “cor azul” é o resultado de quando o feixe correspondente ao vetor $(0,0,1)$; “cor vermelha” é representada pelo vetor $(1,0,0)$; “cor verde”, pelo $(0,1,0)$. Outras combinações de valores descrevem outras cores mais sutis (“verde água”, “vinho”, “azul índigo”), e outras ainda que nem nome têm! Preto é representado por $(0,0,0)$; branco, por $(1,1,1)$.

De fato, é assim que os computadores trabalham com cores, e esse espaço vetorial é chamado de Sistema RGB (Red - Green - Blue). Mas em vez dos valores variarem de 0 a 1, eles variam de 0 a $2^8 = 256$ (que é a quantidade de disposições diferentes que um byte consegue armazenar²).

Fixemos então uma luz branca em uma superfície. Essa superfície terá um “pigmento azul” se ela absorver *toda* o vermelho e *toda* o verde, um “pigmento vermelho” se absorver todo o verde

²Um byte é composto de oito bits. Um bit tem duas conformações possíveis: corrente passando (1) e corrente não passando (0). Assim, um byte pode assumir a conformação de qualquer combinação de conformações dos oito bits, ou seja, $2^8 = 256$ conformações.

e todo o azul, etc. Por outro lado, um pigmento que absorva *somente* o verde terá uma cor que tem partes iguais de azul e de vermelho – é o que chamamos de MAGENTA. Um pigmento que só absorva vermelho será um pigmento igualmente verde e azul – CIANO. Um pigmento que só absorva o azul será verde e vermelho – AMARELO.

Em concordância com o modelo RGB, podemos dizer que as cores primárias dos pigmentos formam um sistema análogo, chamado CMY³ (Ciano - Magenta - Yellow). De fato, impressoras de computadores usam este sistema. Assim, cobrir uma superfície com quantidades iguais de pigmentos amarelo e ciano, por exemplo, faz com que todo o azul e todo o vermelho sejam absorvidos; ou seja, faz com que a superfície só reflita verde. E assim com todas as outras combinações que aprendemos na escola. Se misturarmos quantidades iguais dos três pigmentos primários, obtemos uma superfície que não reflete nenhuma luz, ou seja, preta.

3.4 O que o olho pode ver

A motivação para o sistema RGB veio das pesquisas em percepção do século XIX. Foi naquele século que se estabeleceu que nossos olhos funcionam com três tipos de células fotossensíveis, os CONES. Esses três cones são rapidamente associados a azul, verde e vermelho; mas isso não é muito apropriado, pois o processo de formação de cores é mais complexo, e ocorre em níveis superiores de processamento cerebral. Para usar uma nomenclatura mais neutra, falemos em cones S, M e L (short, middle e long wavelength).

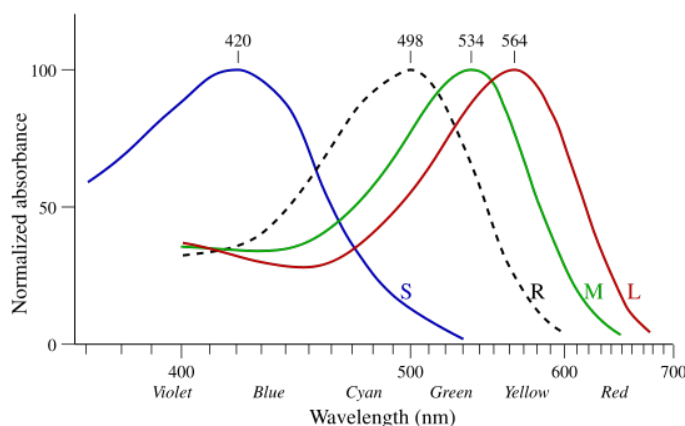


Figura 3.4: Absorbância (i.e., sensibilidade), por comprimento de onda, dos três tipos de cones oculares (L, M e S - long, middle e short wavelengths) e dos bastonetes (R - rod). Repare que os cones M e L se superpõem quase totalmente e ambos são distantes do cone S. Isso ajuda a explicar porque vemos estrelas vividamente azuis mas não vemos estrelas verdes. Fonte: <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cone-response.png>

Repare que os cones captam bandas de luz bem largas, e com grandes faixas de superposição. Assim, o “mapa das cores”, que contém todas as cores que podemos ver, deve ser mais complexo que a roda de Goethe ou mesmo o anel com tubinho de Munsell.

De fato, existe um “mapa das cores que podemos ver” gerado a partir dessas variáveis. A versão clássica deste mapa foi lançada pelo CIE⁴ em 1931. Esse mapa é uma superfície 3D, gerado

³Na verdade, impressoras usam o sistema CYMK: elas costumam ter um quarto cartucho só para tinta preta, por dois motivos. Primeiro que a combinação das três cores não dá um preto muito preto, mas uma coisa mais parecida com um marrom bem escuro (é difícil eliminar completamente o croma). Segundo que em geral texto é impresso com tinta preta, que é uma tinta muito mais fácil de produzir; assim, seria desperdício gastar bastante das três tintas coloridas para imprimir tanta coisa preta.

⁴ CIE é a *Commission Internationale de l'Éclairage*, ou Comissão Internacional de Iluminação. Ela foi estabelecida no

a partir de três variáveis: o fluxo total captado pelos três tipos de cone, S, M e L. Essas variáveis podem ser chamadas de, digamos, X, Y e Z.

Mas podemos reduzir esse mapa de 3D para 2D lembrando de um pequeno detalhe: não podemos dizer nada sobre a cor de um objeto olhando para o fluxo em um só filtro; precisamos comparar pelo menos dois, para eliminar a “quantidade” de luz (a luminosidade total).

Assim, vamos trocar as variáveis pelas suas versões normalizadas, isto é, divididas pelo brilho total.

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z}$$

Com isso, cria-se um vínculo entre as três variáveis: $x + y + z = 1$. Em outras palavras, uma delas pode ser eliminada, porque pode ser escrita em função das outras duas. Sem perda de generalidade, vamos eliminar z , pois $z = 1 - x - y$. Assim, podemos escrever todas as cores em função apenas de x e y (e de uma terceira variável, qualquer uma das maiúsculas, que vai dar a luminosidade da cor), isto é, em uma superfície 3D. O mapa gerado pela CIE foi algo assim.

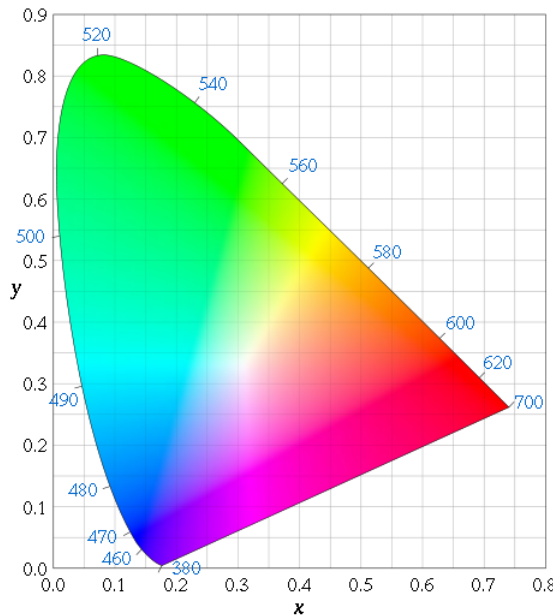


Figura 3.5: Todas as cores que podemos ver. Repare que essas são “cores falsas”, pois estão limitadas ao sistema de projeção de cores usado pela tela do seu computador, ou pela impressora de onde saiu esta folha.

Sem luminosidade, o diagrama mostra as cores variando em croma e matiz. Os comprimentos de onda “puros” são vistos na curva que faz a borda da superfície, desde o vermelho até o violeta (exceto a linha reta na parte de baixo). Neste diagrama, cada ponto é uma cor de luz diferente. As combinações de duas cores fazem uma reta que liga os dois pontos. Com isso, podemos entender as cores opostas, como um caso particular de combinação de cores em que o centro da linha coincide com o centro da superfície (o ponto branco/cinza/preto).

mesmo ano do mapa, 1931, em Viena, Áustria, com o objetivo de ser a autoridade internacional em luz e cores.

Mas o diagrama permite iluminar ainda o problema das cores primárias. Repare que três cores diferentes formam um triângulo no diagrama; o conjunto de cores que pode ser gerado por essas três é a área dentro deste triângulo. Entretanto, não existe nenhum triângulo cujos vértices estejam dentro da superfície e que, ao mesmo tempo, contenham todas as cores. Em outras palavras, *não existe nenhum conjunto de três cores que possa gerar todas as outras*.

De fato, o sistema RGB (e o CYM) são muito deficientes para gerar certas cores. Em particular, duas cores sempre geram uma mais escura e acinzentada que ambas, como dissemos. Assim, é difícil imprimir um laranja bastante vivo (com muito croma) em uma impressora comum; o resultado da combinação de amarelo e magenta sempre vai dar algo meio amarronzado. O mesmo pode-se dizer sobre tons de roxo. Isso sem falar em cores muito diferentes, como as cores metálicas (dourado, prateado, etc).

Em termos de design, isso é um problema a ser sempre enfrentado. Existem padrões de impressão que usam mais cores, como o sistema hexacromático CMYKOG, que adiciona pacotes específicos de tinta laranja e verde aos quatro tradicionais. Um hexágono (ou pentágono, se tirarmos o preto) no espaço de cores permite gerar de fato combinações muito mais sutis. Outro método que é usado é comprar pacotes de tintas específicas, que sejam muito presentes em certos trabalhos; tintas que podem ser produzidas quimicamente e para as quais isso é muito mais fácil que procurar as combinações que as geram. Tons terrosos (como ocre ou siena), metálicos (ouro, bronze, etc) ou cores de caramelo e cerveja são geralmente tratados dessa forma, no processo industrial de colorização.

3.5 O que o olho não pode ver

Agora que praticamente esgotamos as cores visíveis, podemos começar a investigar as cores invisíveis. Vamos voltar ao início: na decomposição de Newton da luz, saem outros raios de luz do prisma que não vemos – o que é explicado pela própria limitação biológica da nossa percepção, que implica também uma limitação no nosso conhecimento. Mas que não seja isso. Talvez a idéia mais interessante em termos epistemológicos trazida pelo telescópio e pelo microscópio é que o homem pode fazer aparelhos que complementem e amplifiquem seus sentidos biológicos. Se desde o nascimento da ciência moderna já conseguimos enxergar objetos cada vez menores e os cada vez mais distantes, podemos também buscar enxergar cada vez mais para um lado e para o outro do espectro eletromagnético: comprimentos de onda mais longos que o da luz vermelha, e mais curtos que os da luz violeta.

A “luz estendida” já é conhecida pelo menos desde 1801, quando o físico Johann Ritter, fazendo experimentos com prismas e luz solar, percebeu que a fita fotossensível queimava ainda mais rápido à esquerda da luz violeta! Foi o que ficou conhecido como LUZ ULTRAVIOLETA. William Herschel (o mesmo das galáxias do Volume I), mais ou menos na mesma época, constatou algo parecido na outra extremidade do espectro de cores. Ele manteve um termômetro na região após a luz vermelha, e o termômetro continuava sendo aquecido. Era então a LUZ INFRAVermelha. Bem mais tarde, conseguiu-se descobrir que diversos animais na natureza enxergam certas bandas infravermelhas e/ ou ultravioletas.

Mas a teoria da onda eletromagnética permitia ir ainda muito mais longe: ela não fazia nenhuma limitação sobre o comprimento das suas ondas. Poder-se-ia conseguir ondas muito longas, com comprimentos de centímetros, metros ou mesmo quilômetros! Foi o que Hertz conseguiu produzir, que ficaram conhecidas como as ONDAS DE RÁDIO. Hoje essas ondas de rádio podem ser geradas pelas antenas de transmissão de estações de rádio e televisão, e detectada pela antena da sua casa. Justamente por serem de grande comprimento de onda, estas ondas podem percorrer grandes distâncias na atmosfera terrestre, sendo úteis, portanto, para as telecomunicações.

Por outro lado, poder-se ia conseguir também ondas com comprimento de onda ainda menores, e ainda mais energéticas. Foi essa a interpretação dada à misteriosa RADIAÇÃO X dos Röntgen, 1895. Os Raios X foram descobertos quase por acaso, pelo seu efeito mais conhecido: atravessar facilmente os tecidos biológicos e ser absorvido somente pelos ossos – permitindo fotografias do interior de corpos humanos. Eles foram usados muito intensamente pelo casal Röntgen e suas cobaias. Morreram todos de câncer, coitados. Raios X muito energéticos e, por isso, são altamente perigosos para o corpo, devendo o operador de uma máquina de emissão de raios-X permanecer atrás de um aparato de chumbo quando das descargas (uma exposição muito freqüente levaria a um destino infeliz e rápido).

E RAIOS GAMA ainda mais energéticos que os raios X, foram identificados em decaimentos de substâncias radioativas. Emitidos em explosões atômicas, modificam o DNA, causando mutações e câncer em seres vivos, além de altas exposições causarem destruição de vários tecidos diferentes do corpo.

Ainda há a radiação em MICROONDAS gerada pelos aparelhos de microondas. Trata-se de radiação numa faixa exata, destinada a ser absorvida pela água, dando energia à mesma e esquentando-a é por isso, portanto, que um prato de vidro pode ficar o tempo que for em um forno microondas, que não esquentaria: ele não contém água. É o alimento que esquentar, esquentando o prato.

Colocando tudo em ordem decrescente de comprimentos de onda, obtemos o que costumamos chamar *o espectro das ondas eletromagnéticas*:

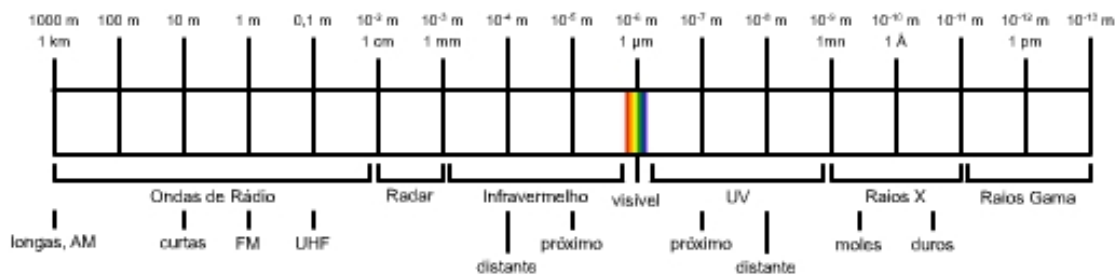


Figura 3.6: O Espectro Eletromagnético.

É importante dizer também o que *não* faz parte do espectro eletromagnético. Os raios catódicos, que Thomson usou para o seu modelo atômico, não se revelaram variações dessas ondas eletromagnéticas, por um motivo simples: luz não é curvada por campos eletromagnéticos, diferente dos raios catódicos; depois se descobriu que eles eram feixes de elétrons.

- 9- A faixa das ondas de rádio é largamente utilizada para a transmissão de informações, que são depois decodificadas pelos nossos aparelhos de rádio e televisão, e transformados em ondas sonoras e/ou imagens na tela da televisão (que são, simplificada, formadas por elétrons colidindo com a tela da televisão). Isto é percebido com maior facilidade no caso do rádio, pois sintonizamos as estações a partir da freqüência da onda de rádio que ela emite (93,7 MHz, por exemplo: $93,7 \cdot 10^6$ Hz). Calcule o comprimento de onda da sua rádio preferida, e atente para a ordem de grandeza da mesma (tem o tamanho comparável à distância Terra-Lua? A países, edifícios? Micróbios? Átomos?).
- 10- Um aparelho de microondas emite radiação com comprimento de onda de 12 cm. Calcule a freqüência de vibração da molécula de água. Se, num microondas típico, 500 mL de água fervem em 5 minutos, partindo da temperatura ambiente, e sabendo que são necessários

4200 J para esquentar 1 L de água de 1°C , estime a quantidade de fótons emitidos por segundo pelo forno microondas. Despreze dissipações de energia.

- 11- Imagine um carrinho pequeno, movido a energia solar, cuja aparelhagem tenha um rendimento de 70 % - ou seja, apenas 30 % da energia se perde da placa até o motor. Quantos fótons (considere a luz amarela do Sol) são necessários para acelerar o carrinho a uma velocidade de 20 m/s?

Unidade II

Física

Eu não gosto dela, e me arrependo de algum dia ter tido qualquer coisa a ver com isso.

Max Planck sobre Mecânica Quântica

Teoria interessante – não faz nenhum sentido.

Groucho Marx sobre Mecânica Quântica

Como começamos a discutir na Unidade anterior, a transformação na visão de mundo produzida na física, na virada do século XIX para o XX, foi talvez a mais radical, e certamente a mais dramática, desde a os físicos (que estudavam a *physis*) gregos. Foi também nessa transição, e largamente possibilitada apenas por ela, que surgiu uma ciência física dos astros – a Astrofísica. Por isso não podemos de deixar de dar atenção a esta transição.

O próprio Auguste Comte, quem estabeleceu no final do século XIX os critérios para a cientificidade das teorias – critérios que foram ferozmente adotados, e ferozmente abandonados décadas mais tarde – já assinalava a impossibilidade de estudar, *cientificamente*, a natureza e a composição dos corpos celestes. Isso antes de Kirchhoff estabelecer as bases da análise espectroscópica.

Deixando a discussão para outro momento, apresentemos aqui algumas citações interessantes de um artigo a respeito⁵:

O fato de que uma parcela, ainda que numericamente minoritária e institucionalmente marginal (não se deve esquecer que boa parte dos primeiros “astrofísicos” ou eram físicos ou eram astrônomos amadores), da comunidade científica do início dos anos 60 do século XIX tomou, rápida e seguramente, a decisão de empregar o espectrômetro em suas pesquisas astronômicas, é indício de que eles não estavam muito preocupados com a cientificidade, ou não, das questões que lhes interessavam. Mais importante para eles era assegurar condições mínimas de pesquisa. Em outras palavras, essas “condições mínimas” significariam autonomia; não seria mais necessário ficar, a quase todo instante, argumentando em favor da cientificidade das *questões astrofísicas*.

Diferentemente do que afirma Comte, a astrofísica é uma disciplina científica genuinamente experimental e que lança mão de técnicas laboratoriais da mesma forma que a física e a química. Assim, o astrofísico não é um mero observador que se limita a anotar os movimentos dos astros celestes, anotações que se prestariam ao cálculo das posições e tempos futuros desses mesmos astros. Ao levar para dentro do observatório técnicas que eram já comuns entre os físicos e os químicos, os astrofísicos obrigaram a transformação do observatório em laboratório. Transformação que custou muito esforço na medida em que muitos preconceitos tiveram que ser abandonados.

⁵Antonio Augusto Passos Videira. *A Criação da Astrofísica na Segunda Metade do Século XIX*. Publicação especial do Observatório Nacional. No 04, 1995. Para adquirir uma cópia do artigo, telefone para o Observatório Nacional, setor de reprodução, e peça uma cópia. Eles enviam para a sua casa gratuitamente! (O mesmo vale para qualquer publicação do Observatório Nacional).

Capítulo 4

Corpo Negro

Quando a luz chega a um determinado corpo, este corpo interage com a luz e três coisas diferentes podem acontecer com cada fóton que chega: ele pode ser REFLETIDO, mudando sua direção de propagação; pode ser ABSORVIDO, e sua energia passa então a estar contida no corpo, seja na forma de vibração das moléculas (temperatura), seja em elétrons em camadas mais energéticas dos átomos, conforme visto no estudo anterior; e pode simplesmente passar sem que nada lhe aconteça (dizemos que o corpo é TRANSPARENTE a tal fóton). Cada corpo interage com a luz de uma forma específica, absorvendo mais em certos comprimentos de onda, refletindo mais em outros, sendo mais ou menos transparente a determinadas faixas do espectro da luz... A Física Quântica tem grande sucesso em explicar, a partir da constituição de cada corpo, o porquê da interação com cada comprimento de onda ser como é, mas discutir isso foge aos nossos objetivos.

Alguns exemplos do dia-a-dia nos mostram essa diversidade de comportamentos dos corpos. O vidro, por exemplo, costuma deixar passar a maior parte da luz visível que passa por ele, mas reflete boa parte da radiação infravermelha; uma camisa azul é azul porque reflete, para todas as direções, a luz azul que chega nela, e porque absorve as outras frequências da luz visível. Uma camisa é branca porque reflete luz de boa parte dos comprimentos de onda entre o vermelho e o violeta; já uma camisa preta é mais quente porque absorve a maior parte da luz.

Para estudarmos melhor esses fenômenos de radiação, é útil fazermos uma abstração: imaginemos um corpo que *absorva toda a radiação que incide nele*. Podemos estender essa definição se estende a todos os comprimentos de onda, mesmo os não percebidos pelo olho humano. Não refletindo nada da radiação, ele não teria, a princípio, cor nenhuma – chamaremos esse corpo, portanto, de CORPO NEGRO.

Entretanto, um corpo, mesmo um negro, não pode ficar absorvendo energia sem se livrar dela; ninguém nunca viu o metal do carro derretendo porque foi deixado ao sol vários dias seguidos. De fato, um corpo a uma temperatura maior do que a do meio em que ele está perde energia para esse meio. Esse é um princípio da Termodinâmica conhecido como “Lei zero da Termodinâmica”. Um corpo pode perder energia de duas formas: pelo contato com outro corpo, passando diretamente calor para ele, processo conhecido como CONDUÇÃO¹; ou emitindo radiação eletromagnética, processo conhecido como, é claro, RADIAÇÃO. Este último caso é bem mais útil para o nosso propósito; como os astros não estão “encostados” em nada, mas imersos no vácuo,

¹ Para os que gostam das explicações da dinâmica dos átomos e moléculas, o mecanismo é o seguinte: um corpo mais quente tem moléculas com um grau de agitação maior. Colocado junto com um corpo mais frio, mais moléculas do primeiro vão se chocar com as do segundo, e assim aumentar a agitação deste. Assim, corpos com moléculas muito grandes, que são mais difíceis de serem agitadas (é o caso das moléculas orgânicas em geral) são ditos *maus condutores* de calor. Esquentando a ponta de uma mesa de madeira, por exemplo, você vai estragar as moléculas daquela ponta (queimá-la) antes que o calor seja sentido na outra ponta. Já corpos com estruturas muito simétricas, como os metais, são *bons condutores*; suas moléculas entram facilmente em ressonância umas com as outras.

eles só podem perder calor da segunda forma.²

É um fato experimental que todos os corpos que têm uma determinada temperatura emitem radiação. Isso não contraria o enunciado da Lei zero da Termodinâmica acima, pois, se o meio em que ele está for mais quente que ele, esse meio emitirá mais energia e, portanto, no balanço, o corpo ganhará energia do meio (a quantidade de energia que ele recebe do meio é maior do que a que ele emite). E, dentre todos os corpos, os corpos negros são especiais: Dado que um corpo negro não reflete nada da radiação incidente em sua superfície, nem deixa passar luz alguma por ele (são perfeitamente opacos), toda a radiação que emerge de sua superfície é emitida pelo próprio corpo, e não vinda do meio externo.³

Podemos, agora, entender o porquê de estarmos estudando uma definição abstrata como a de um corpo negro. As estrelas são claramente não-transparentes: não se pode ver nada através de uma estrela. Além disso, mesmo que elas refletissem uma parte da luz que chega até elas, a quantidade de luz emitida pelas mesmas é muito, muito maior do que a luz refletida e, portanto, uma medida do espectro dessas estrelas nos mostraria quase somente a luz emitida pela estrela (e, na verdade, ela reflete mesmo muito pouco da pouca luz que chega até ela). Uma estrela é, assim, um dos corpos conhecidos que mais se aproximam da definição de corpo negro dada acima. Melhor que ele, só o próprio universo :S Propaganda gratuita da lista de cosmologia.

Um fato muito interessante sobre esses corpos, que têm sua radiação parecida com a radiação de um corpo negro, é que a forma do seu espectro é uma função somente da temperatura. Por “forma” do espectro de um corpo, nos referimos ao perfil gráfico do fluxo por comprimento de onda, isto é, é quanta luz esse corpo emite por área, em cada comprimento de onda. Então, dados dois corpos negros, não importa sua forma, sua cor, o material de que eles são constituídos: *se eles estiverem numa mesma temperatura, terão o mesmo espectro*. No final do século XIX e início do XX, muitos físicos importantes tentaram encontrar uma explicação para a forma do espectro desses corpos e as derivações da mecânica clássica se mostravam cada vez menos capazes de fazê-lo. Max Planck, conforme discutido na unidade anterior, propôs a quantização da radiação como forma de se resolver o problema da emissão de radiação pelos corpos negros, inaugurando uma nova forma revolucionária de se descrever a realidade, a já muito citada física quântica. A fórmula a que ele chegou, com essa hipótese (publicada em 1900), foi a DISTRIBUIÇÃO DE PLANCK:

$$I_T(\lambda) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$

Na equação, $I_T(\lambda)$ é a intensidade de radiação com comprimento de onda λ , saída de um corpo com temperatura T . Uma equação feia e assustadora; uma ótima oportunidade para aprender a ler equações, principalmente se forem feias e assustadoras. Primeiro passo: identificar todas as letras que aparecem. $c = 299792458 \approx 3 \cdot 10^8$ m/s é a velocidade da luz; $h = 6.626068 \cdot 10^{-34}$

² Você bem poderia se perguntar: “Ora, mas se uma estrela não está encostada em nada, então ela está no vácuo; Não podemos, portanto, associar uma temperatura ao meio em volta dela, pois não há partículas para serem agitadas! Como sabemos, então, que ela perde temperatura?”, e teria sido uma ótima pergunta! De fato, os conceitos de vácuo e temperatura, nesse caso, já não podem ser vistos do ponto de vista simplificado que estabelecemos até agora. Há formas de se generalizar o conceito de temperatura para um espaço sem massa, por exemplo, analisando o espectro da radiação eletromagnética, a luz, que se propaga por esse espaço; A Física Quântica tem muito a nos dizer sobre o vácuo, também (por exemplo, o princípio da incerteza implica que o vácuo absoluto não pode existir!) e, portanto, a afirmação feita acima pode ainda se manter válida. Para nossos propósitos, podemos aceitar como mais um princípio que, no caso de um corpo com temperatura estar cercado de vácuo no sentido que estamos tratando aqui, ele vai perder energia na forma de radiação para esse espaço.

³ A definição de corpo negro, na verdade, envolve mais uma exigência: A de que o corpo deve estar em equilíbrio térmico com seu meio, ou seja, à mesma temperatura de seu meio (com o conceito mais geral de temperatura, discutido na nota anterior). Essa exigência, porém, acaba não tornando o espectro das estrelas muito diferente do de um corpo negro. Isto é, apesar de elas serem corpos altamente fora do equilíbrio térmico com seu meio, emitindo muito mais energia do que absorvendo, as leis continuam válidas, com um grau de aproximação muito bom, para a descrição das mesmas.

$m^2.kg/s$ é a constante de Planck; $k = 1.3806503 \cdot 10^{-23} m^2.kg.s^{-2}.K^{-1}$ é a constante de Boltzmann; e $e = 2,718281828459045235360287...$ é mais um dos números irracionais muito úteis em equações em geral, tais como π . Enfim, como esperávamos, só existem dois parâmetros variáveis na equação: a temperatura T e o comprimento de onda λ . Ou seja, se fizermos um gráfico da distribuição do brilho pelos comprimentos de onda, a curva só ficará diferente se variarmos a temperatura, conforme o que já sabemos de fato.

Uma coisa que ajuda na interpretação de equações feias é tentar conseguir aproximações dela pra certos conjuntos de valores. Repare, por exemplo, que para comprimentos de onda muito longos ou para temperaturas muito altas, o expoente da equação torna-se muito pequeno, e podemos aproximar⁴ $e^{hc/\lambda kT} \approx 1 + \frac{hc}{\lambda kT}$ e, com isso, ficamos com o que é conhecido como DISTRIBUIÇÃO DE RAYLEIGH-JEANS:

$$I_T(\lambda) = \frac{2ckT}{\lambda^4}$$

Que de fato é uma equação muito mais simples: é uma função que é potência do comprimento de onda ($I_T \propto \lambda^{-4}$) e, mais ainda, é *linear* na temperatura! Ou seja, para altas temperaturas as intensidades de radiação parecem aumentar linearmente conforme se aumenta a temperatura, e, por outro lado, lá pras bandas do infravermelho e comprimentos mais baixos esse comportamento linear já pode ser visto para amplas faixas de temperatura (para observações em radio, SÓ se usa a distribuição de Rayleigh-Jeans, porque o erro da aproximação é completamente desprezível).

Outro detalhe é que a Constante de Planck não aparece na equação de Rayleigh-Jeans. Ela, de fato, não tem nenhuma conexão especial com a teoria quântica que será desenvolvida daqui a dois capítulos. Na verdade, é uma distribuição inteiramente dedutível de postulados clássicos, e foi de fato deduzida como uma distribuição de radiação de corpos negros pouco tempo antes de Planck publicar seu trabalho.

Embora esta distribuição caia muito bem para os dados de comprimentos de onda longos, ela fica muito absurda para comprimentos de onda curtos. De fato, quanto menor o comprimento de onda, menor ainda a sua quarta potência, e maior a intensidade luminosa. É uma função estritamente crescente e não-limitada: ou seja, para qualquer valor I correspondente a um certo λ , sempre existe I maior para λ menor. Com λ s cada vez menores, I tende a infinito!!! Mas isso quer dizer que todo corpo deveria emitir radiação tendendo a infinito pra comprimentos de onda cada vez menores (e mais energéticos), ou seja, a radiação total emitida pelo corpo também seria infinita, bem como a energia emitida!! Essa aberração para altas frequências ficou conhecida como a *catástrofe ultravioleta*; na virada do século XIX para o XX, ela apareceu em um discurso de Lord Kelvin como um dos dois únicos problemas que faltavam ser resolvidos para *terminar* a física! :O

Uma outra “aproximação” da distribuição de Planck, que também foi uma outra distribuição deduzida, por outras considerações teóricas, para descrever corpos negros, é a obtida para comprimentos de onda muito baixos. Neste caso, quando $\frac{hc}{\lambda} \gg kT$, a segunda fração da equação pode ser bem aproximada por uma exponencial negativa:

$$\frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \approx e^{-hc/\lambda kT}$$

E, obtemos então a DISTRIBUIÇÃO DE WIEN, publicada em 1896 na seguinte forma:

$$I_T(\lambda) = \frac{C_1}{\lambda^5} e^{-\frac{C_2}{\lambda T}}$$

Novamente, na época do trabalho de Wien, não existia constante de Planck. O trabalho dele na verdade dava argumentos termodinâmicos refinados para provar a relação de potência

⁴Essa aproximação vem da Série de Taylor. Se quiser saber o que é a série de Taylor, pesquise ou pergunte-nos.

entre intensidade e comprimento de onda e o decaimento exponencial da função intensidade. Nós é que, encarando esta distribuição como uma aproximação da de Planck, escrevemos as constantes desta em função de outras constantes mais fundamentais: $C_1 = 2\pi hc^2$ e $C_2 = \frac{hc}{k}$. A distribuição caía muito bem no ultravioleta, mas para comprimentos mais baixos era pouco acurada. Planck na verdade escreveu sua lei como uma modificação da distribuição de Wien, para melhorar a descrição dos dados mais ao vermelho. O título do artigo em que Planck apresenta sua distribuição, inclusive, é “Sobre um aperfeiçoamento da equação de Wien para o espectro”.

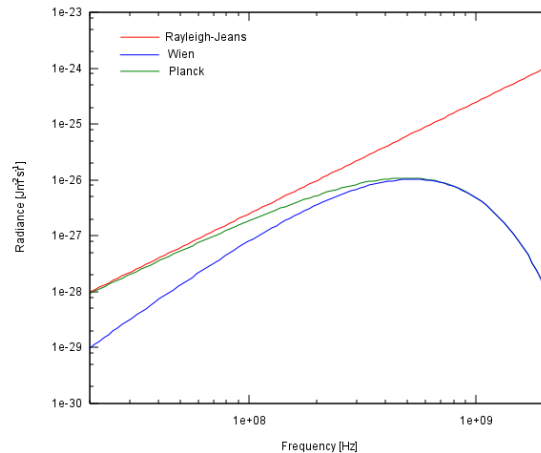


Figura 4.1: Comparação gráfica entre as distribuições de Rayleigh-Jeans, Wien e Planck. Repare que, enquanto a curva de Wien se ajusta bem no pico mas vai se distanciando da de Planck para baixas frequências, a de Rayleigh-Jeans é uma boa aproximação para estas mesmas baixas frequências. Fonte: Wikipédia.

Voltando à análise da Distribuição de Planck, passemos à análise gráfica:

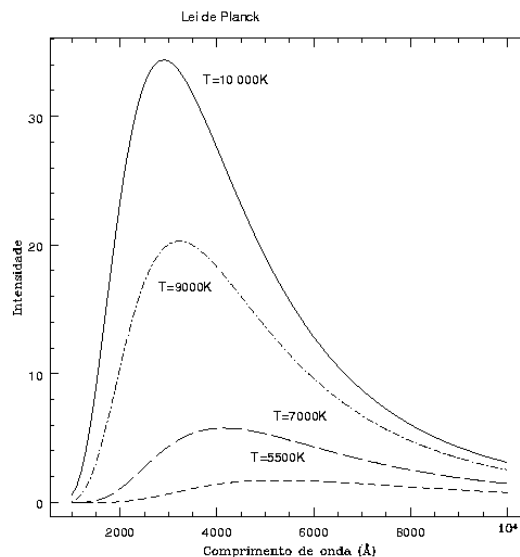


Figura 4.2: Curvas de Planck para várias temperaturas diferentes, mostrando a intensidade da radiação por comprimento de onda. Note que todas as curvas apresentam um máximo, que corresponde a comprimentos de onda diferentes para temperaturas diferentes.

O gráfico traz ainda mais informações que a função algébrica. Vemos que os corpos têm um

pico de emissão, e que, quanto maior a temperatura do corpo, menor é o comprimento de onda em que está o pico. Algebricamente, podemos deduzir da equação:

$$\lambda_{\max} T = \text{const.} \approx 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ K.m}$$

resultado conhecido como LEI DE WIEN. Isso significa que, à medida que você esquentar um corpo negro, ele vai emitindo mais radiação, e o pico da emissão vai se deslocando para frequências mais altas. À temperatura ambiente ($\sim 300\text{K}$), o pico fica na região do infravermelho próximo. Se o material esquentar muito, ele vai ficando avermelhado – é seu pico de emissão aproximando-se do visível. Isso é observado quando esquentamos metais em altos fornos, ou mesmo quando utilizamos resistências elétricas para esquentar água ou um alimento: O metal se torna vermelho-brasa. Se você esquentar ainda mais, ele passará por emissão de luz amarela, esbranquiçada (o que significa que ele está emitindo bastante em todos os comprimentos de onda do visível), até talvez adquirir, a temperaturas muito altas, tons azulados. O amarelado e, às vezes, o esbranquiçado, podem ser observados nos fornos de fundição de metais que apresentam alta temperatura de fusão, bem como nas nossas lâmpadas incandescentes⁵. Para os astrônomos, esse fato significa algo que todos já sabemos: estrelas azuis são mais quentes que amarelas, as quais por sua vez são mais quentes que as vermelhas.

12- Porque, então, vemos como azuis as estrelas que têm seu pico de emissão no ultravioleta?

Um terceiro aspecto a se notar é que as curvas nunca se cruzam. Isto é, uma estrela mais quente emite mais radiação em *todas* as frequências – uma estrela azul emite mais luz vermelha que uma estrela vermelha. Sabendo isso, fica óbvio constatar que o fluxo total de luz que um corpo negro emite (isto é, a área abaixo do gráfico, ou o fluxo integrado em todos os comprimentos de onda) aumenta (muito) com o aumento da temperatura. Calculando essa área, descobrimos a LEI DE STEFAN-BOLTZMANN

$$F_S = \sigma T^4$$

onde F_S é o fluxo na superfície da estrela, e $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ é a *constante de Stefan-Boltzmann*.

Neste ponto, temos de estabelecer uma distinção importante entre duas grandezas definidas que representam coisas diferentes. O fluxo F_S mostrado logo acima, é somente o fluxo na superfície de um corpo que tem seu espectro dado pela luz emitida por ele, tal como um corpo negro: uma estrela, um metal quente, nosso corpo⁶. Já o fluxo discutido no capítulo Medidas de Brilho do volume Medidas é um fluxo de luz de uma fonte, com a medida feita a uma distância qualquer, e de qualquer origem: refletida, ou emitida. Este último, portanto, em geral *não pode ser relacionado diretamente com a temperatura do corpo que o emite*, pois ele depende da distância que estamos do corpo. No caso do Sol, por exemplo, o fluxo que nós recebemos aqui da Terra é muito maior que o fluxo recebido em Plutão (quanto menor? Calcule!), mas o Sol tem a mesma temperatura, visto de cada um deles. O fluxo que relacionaremos com a temperatura de nossa estrela é unicamente o fluxo que é medido *em sua superfície*, quanto de luz sai em cada unidade de área, na superfície do Sol. De outro modo, podemos falar do fluxo de um corpo que está refletindo luz de um outro corpo; o fluxo a uma distância qualquer, nesse caso, é a quantidade

⁵ Como o próprio nome diz, as lâmpadas amarelas em forma de pêra geram luz por incandescência, energia térmica; pelo aquecimento de um pequeno filamento metálico, geralmente tungstênio. Para gerar luz amarela, portanto, a temperatura do filamento tem que atingir valores bastante altos. Já as *lâmpadas fluorescentes*, muito mais frias, geram radiação de uma forma completamente diferente: pela excitação dos elétrons dos átomos do vapor de mercúrio, que fica confinado naquele êmbolo.

⁶ Nosso corpo só pode ser aproximado de um corpo negro nas emissões em infravermelho; na faixa do visível, quase toda a luz é refletida.

total de luz refletida por esse corpo, dividida pela área em que essa luz se espalha. Essa luz já não precisa ter (e, na grande maioria dos casos, não tem) nenhuma característica da radiação de corpo negro, pois é uma luz refletida, não emitida pelo corpo. Então, podemos falar do fluxo da Lua medido aqui da Terra, ou do fluxo de um planeta qualquer, simplesmente como o brilho desse planeta, mesmo que os espectros desses corpos sejam muito diferentes dos espectros de um corpo negro a qualquer temperatura.

Quanto ao fluxo de uma estrela em sua superfície, sabemos que ele é dado pela luminosidade total da estrela, bem como pela sua área superficial; sabemos também que ele se relaciona com sua temperatura da superfície pela lei de Stefan-Boltzmann. Então, temos a seguinte relação:

$$F_S = \frac{L}{4\pi R^2} \rightarrow L = F_S \cdot 4\pi R^2$$

Que, junto com a lei de Stefan-Boltzmann, fica

$$L = F_S \cdot 4\pi R^2 = 4\pi\sigma T^4 R^2$$

Uma fórmula que relaciona o raio, a luminosidade e a temperatura da superfície de uma estrela. Ela será bastante útil nos nossos estudos de Evolução Estelar.

- 13- **(IAO 99)** Uma estrela tem seu máximo em 2 000 Å e outra tem seu máximo em 10000 Å. Qual estrela emite mais em 2 000 Å? E em 10 000 Å? Qual a razão entre os fluxos superficiais dessas estrelas? (Considere as estrelas como corpos negros)
- 14- Calcule o pico de emissão de calor de um ser humano normal. E de um ser humano com febre.
- 15- Estime a temperatura de uma lâmpada incandescente.
- 16- O Sol emite 80% da sua radiação na faixa que vai de 3000 a 7000 Å, com pico em 4700 Å. Calcule a temperatura da fotosfera solar. Pense que relação isso tem com qual é a faixa de luz visível para nós, animais terrestres.
- 17- Duas estrelas de mesmo raio têm o mesmo fluxo quando vistas aqui da Terra. Sabendo que uma está duas vezes mais longe, qual a razão de suas temperaturas?

4.1 Cor das Estrelas

Assim, se acreditamos que as curvas de emissão de luz das estrelas são como curvas de corpos negros, acreditamos que podemos entender bem como são as cores das estrelas e a que propriedades físicas elas estão relacionadas. Vimos bastante disso até agora, mas não o suficiente para responder a todas as perguntas. Por exemplo, o que você diria se eu perguntasse se você já viu alguma estrela verde? Você provavelmente vai dizer que não. E pode *existir* uma estrela verde?

No capítulo de cores, aprendemos que devemos ser cuidadosos com o uso da idéia de existência, porque cores não são algo que existem nos objetos, mas que existem na relação dos nossos olhos com os objetos. Assim, o adequado seria perguntar se poderíamos ver estrelas como verde - ao que a resposta é não.

Para entender isso, devemos rever os perfis dos três tipos de cone dos nossos olhos, como mostrado no capítulo 3. Repare que os cones S têm um pico bem mais distante dos outros dois. Assim, uma estrela que tenha seu máximo no azul estimula quase exclusivamente os cones S. Por outro lado, uma estrela que tenha seu pico no verde ou amarelo estimula quase igualmente

os cones verde e vermelho. Como estrelas são vistas muito pouco brilhantes, isso ainda diminui a cor que elas podem exibir, e todas aparecem mais ou menos brancas. Além disso, a curva de Planck cai muito rápido para comprimentos de onda menores que o do pico, de forma que estrelas com pico no vermelho devem estimular ainda muito mais os cones L que os M, dando a impressão de estrelas alaranjadas, ou avermelhadas.

Podemos ver tudo isso com mais precisão relembando que, no capítulo 3, construímos um mapa de tudo o que os olhos podem ver. Podemos, assim, integrar as curvas de corpo negro e desenhar, no mapa, em que ponto cai cada estrela. O resultado é a curva que aparece na figura abaixo: nesta curva, cada ponto representa a cor de um corpo negro de uma temperatura diferente.

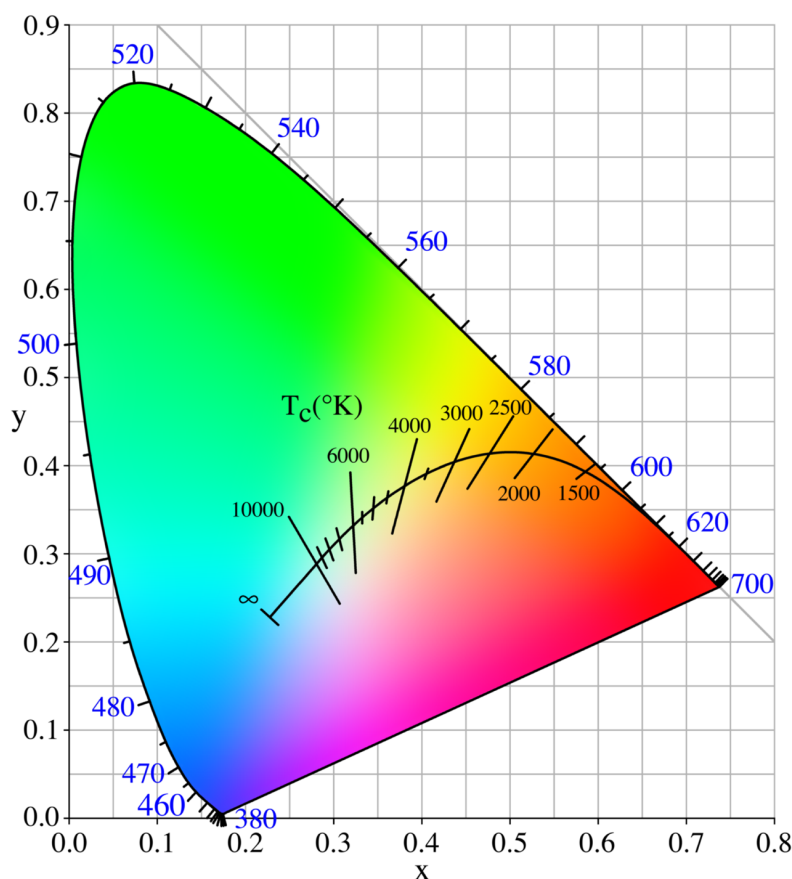


Figura 4.3: Pontos no mapa de cores, representando corpos negros. Cada ponto corresponde a uma das Curvas de Planck com uma determinada temperatura. Note que a curva passa do azul para o laranja através do branco, sem se aproximar do verde. Mais detalhes em http://en.wikipedia.org/wiki/Planckian_locus. Fonte: Wikipedia.

Assim, fica mais fácil responder à pergunta: não há estrelas verdes porque nenhuma temperatura de corpo negro corresponde a um ponto no verde.

4.2 Índices de Cor

À parte da visão biológica das cores, os astrônomos também encontraram uma forma de descrevê-las e quantificá-las. Pelo que vimos até agora, a cor da estrela está relacionada com a

sua curva de emissão, e nós precisamos de todo seu espectro para estudá-la.

Entretanto, às vezes podemos querer ter acesso a essas informações, mesmo sem contar com o espectro todo da estrela. A maioria dos detectores profissionais não distingue fótons de diferentes cores, eles simplesmente medem o fluxo incidente, seja ele de fótons azuis, verdes, vermelhos ou todos misturados (branco). Para recuperar a informação cromática em imagens, utilizam-se filtros. Filtros são posicionados antes do feixe de luz atingir o detector, de modo que este vê apenas a radiação que o atravessa. Um filtro faz com que apenas fótons de certa cor (isto é, dentro de uma faixa ao redor de um certo λ central) atinjam o detector, bloqueando a passagem de fótons fora da sua faixa de transmissão, como um óculos de Sol.

Um sistema de filtros comum usado em diversos instrumentos é o sistema UBV: O filtro U (ultravioleta) com $\lambda_{central} = 3600$, o filtro B (blue, azul) com $\lambda_{central} = 4400$ e o filtro V (visual) com $\lambda_{central} = 5500$.

Mas se quisermos encontrar o pico de emissão da estrela (e com isso determinarmos sua temperatura), será que seriam necessários dezenas de filtros, para compararmos o fluxo da estrela em vários comprimentos?

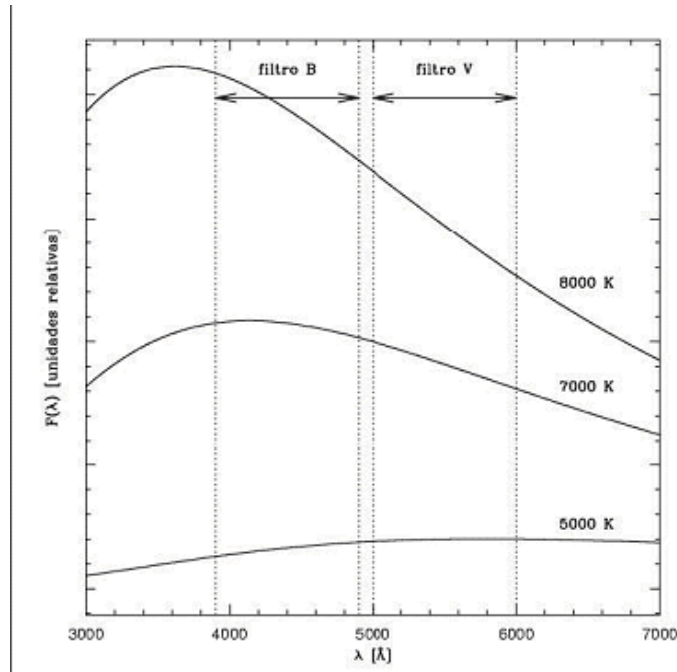


Figura 4.4: Na figura acima planckianas de temperatura 5000, 7000 e 8000 K, as barras verticais indicam as faixas cobertas por filtros B e V.

Vendo a figura, percebemos que não são necessários filtros em vários comprimentos para diferenciarmos a forma das curvas. Por exemplo, se duas estrelas tiverem o mesmo fluxo em V, aquela que tiver o maior fluxo em B será a mais quente. Ou seja, podemos fazer isso através da razão F_B/F_V dos fluxos contidos nessas faixas!

Sabendo da relação entre a temperatura da estrela e a razão dos fluxos nos filtros, podemos definir o **índice de cor** de uma estrela como a razão F_B/F_V .

Na prática, o log da razão entre os fluxos facilita a visualização dessa relação. Assim, é natural definirmos a magnitude de uma estrela em um certo filtro:

$$m_V = -2,5 \cdot \log F_V + \text{const.}$$

E o índice de cor B-V pode ser definido como a diferença entre essas magnitudes:

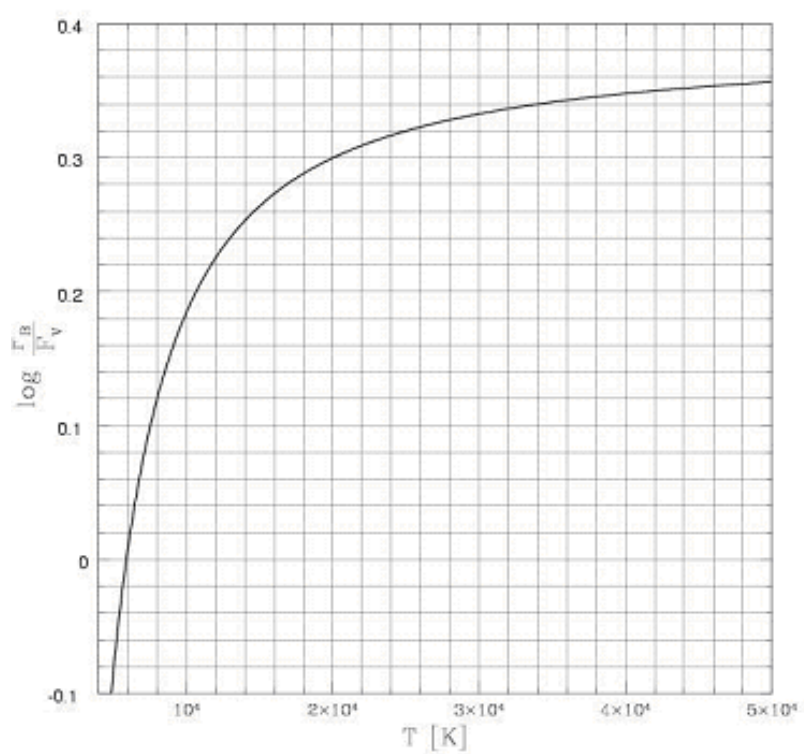


Figura 4.5: Relação entre a razão dos fluxos nos filtros B e V e a temperatura de um corpo negro. Quanto mais quente um corpo, mais azul ele é.

$$m_B - m_V = -2,5 \log \frac{F_B}{F_V}$$

Capítulo 5

Espectros

Estabelecemos, no capítulo anterior, relações entre a luminosidade total, a temperatura, o raio e a distância de uma estrela, a partir das leis gerais de emissão de um corpo negro. A radiação de corpo negro foi um dos problemas que motivou o desenvolvimento inicial da Mecânica Quântica. Entretanto, outro fenômeno, estudado na segunda metade do século XIX por um físico chamado Fraunhofer, também permaneceu mal explicado até o surgimento daquela nova forma de enxergar o mundo físico: a interação de átomos específicos com a luz.

A radiação de corpo negro pode ser emitida por sólidos, líquidos ou gases, desde que muito densos. A alta densidade é fundamental para tal fenômeno, pois as moléculas da substância interagem fortemente umas com as outras, trocando energia e momento constantemente. Fraunhofer, no entanto, fez observações da radiação emitida por elementos químicos no estado gasoso. Neste estado, os átomos, ou moléculas, estão distantes entre si, e podemos estudar a interação dos mesmos com a luz – estamos interessados na emissão e absorção – como se fossem isolados. Fraunhofer fez duas observações fundamentais:

- Um gás, quando mais quente que seu meio, emite luz em comprimentos de onda específicos, linhas discretas, e não em todos os comprimentos de onda. Seu espectro, então, apresenta *linhas de emissão específicas*, sendo chamado *espectro de emissão*.
- Se um gás se encontra entre uma fonte de luz quente e o observador, este gás absorverá luz somente em determinadas faixas discretas do espectro, e não no contínuo. Este espectro medido, então, contínuo a não ser por linhas escuras de absorção, é chamado *espectro de absorção*. As linhas em que este gás absorve, além disso, são as mesmas em que ele emitiria se estivesse mais quente que o meio, como discutido no item anterior.

De fato, as linhas de cada substância química, e de cada elemento químico, são características dessa substância e, portanto, funcionam como um identificador da mesma: Numa amostra de gás que está emitindo luz, podemos, a partir da análise de seu espectro, determinar quais moléculas estão presentes ali. Este método de análise é conhecido como ESPECTROMETRIA, e apresenta uma infinidade de aplicações científicas e tecnológicas: inferência da estrutura molecular de substâncias, medidas da presença de compostos químicos em determinadas misturas (por exemplo, proporção de poluentes no ar das grandes cidades), etc.

Como cada tipo de átomo tem um certo número de elétrons, as transições possíveis diferem de um tipo de átomo para outro; *cada elemento produz uma combinação única de comprimentos de onda*, que funciona como uma impressão digital deste. Podemos, então, medir em laboratório os espectros dos vários elementos, e conseguir assim um verdadeiro catálogo para, depois, caso tivermos um espectro de emissão ou absorção, podermos identificar os elementos que lá estão.

Voltando à questão da diferença entre o espectro de um corpo negro e o de um gás pouco denso, podemos formular a explicação em termos um pouco mais precisos, agora. Acontece que,

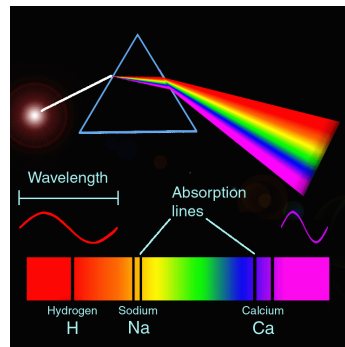


Figura 5.1: Prisma decompondo a luz, mostrando o princípio de funcionamento de um espectrógrafo. o prisma curva a luz diferentemente, dependendo da cor (da frequência, ou do comprimento de onda) da mesma. Abaixo, um espectro de absorção, gerado por luz de todos os comprimentos de onda passando por uma região de gás frio.

quando átomos interagem com outros, as linhas ficam mais largas; no caso de sólidos e líquidos, as interações entre os átomos são muito fortes. Assim, em corpos desse tipo, como são os corpos negros, as linhas se alargam tanto que ficam indistinguíveis, e assim vemos a banda de emissão contínua, e essa emissão é realmente descrita pelas leis de corpo negro já enunciadas.

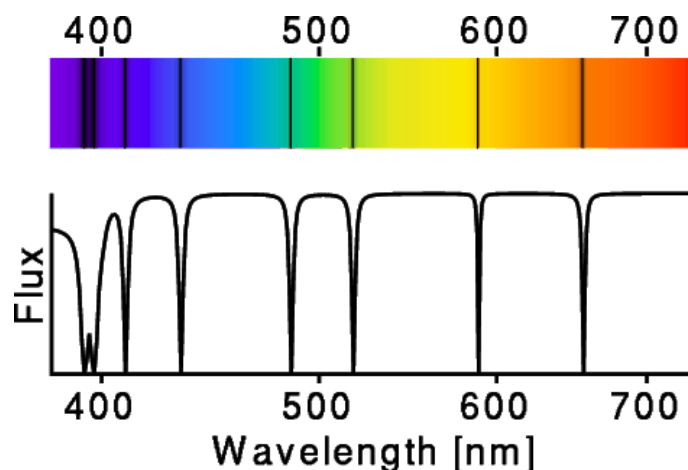


Figura 5.2: Linhas de absorção, e sua representação gráfica. Percebemos que as linhas escuras correspondem a uma diminuição no fluxo naquela linha.

A posição das linhas espectrais é importante, mas não é a única fonte de informação dada pelos espectros. A profundidade e a largura das linhas também traz informações importantes. Vejamos um fenômeno que pode causar alargamento de linha. A velocidade de uma estrela, como já visto, desloca a linha em uma dada direção, mas sem alterar sua largura, ela é deslocada como um todo. Imagine, porém, uma estrela em rotação. Cada ponto de sua superfície, portanto, teria uma velocidade diferente em relação ao observador: Haveria pontos que estariam se aproximando mais, e pontos que estariam se afastando mais, do que o movimento médio da estrela (tente, com o auxílio de uma bola em rotação, entender tal fenômeno: Perceba que, se o eixo de rotação estiver perpendicular à sua linha de visão, “em pé”, de um lado da bola pontos se aproximarão de você, e do outro lado pontos se afastarão).

18- **(IAO 97)** Se uma estrela está se afastando da Terra a uma velocidade muito alta, seu

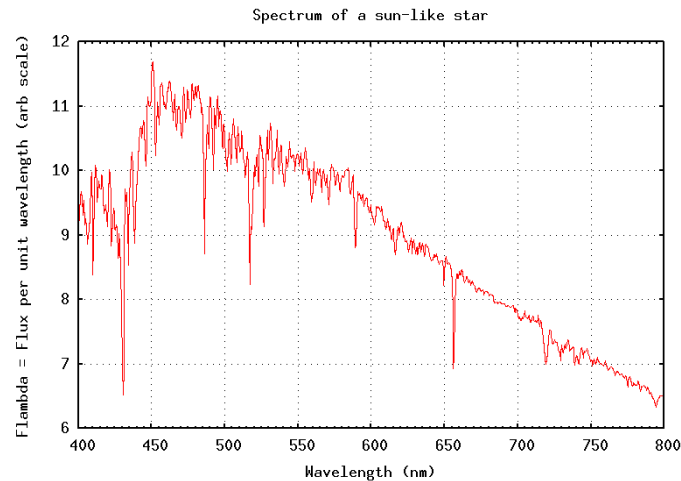


Figura 5.3: Espectro de uma estrela de verdade: o perfil dominante é uma curva de corpo negro, mas há diversas linhas de absorção e algumas de emissão. Cada linha possui largura e profundidade diferentes; ambos os parâmetros podem fornecer informações importantes.

espectro contínuo parecerá mais quente ou mais frio? Explique.

- 19- No espectro da Nova de 1934, na constelação do Hércules, as linhas de absorção se deslocaram para o violeta. A linha H_γ ($\lambda = 4241 \text{ \AA}$) foi deslocada em $10,1 \text{ \AA}$. Qual a velocidade do gás expulso da estrela, que provocou o surgimento dessas linhas de absorção?
- 20- Se uma estrela se afasta da Terra com uma velocidade radial (na direção da nossa vista) de $160,9 \text{ km/s}$, qual a nova posição da linha CaI ($4226 \text{ \AA}$)? Sabendo que essa linha é muito forte no espectro dessa estrela, qual seu tipo espectral? E se sua velocidade for tangencial à nossa linha de visada, como podemos detectar o movimento da estrela?
- 21- Usando a teoria atômica, explique por que as linhas se alargam muito em fluidos muito densos.
- 22- Imagine uma estrela de raio igual ao raio do Sol, $R = 696000 \text{ Km}$, e uma velocidade de rotação de 30 dias, quando medida no seu equador. Calcule a largura $\Delta\lambda$ causada pelo Efeito Doppler na linha de CaI , $4226 \text{ \AA}$.
- 23- Pensando nas moléculas de uma estrela e no Efeito Doppler, você conseguiria sugerir alguns fenômenos físicos que pudessem ser medidos através da largura das linhas espectrais?

5.1 Átomo de Bohr

A Física Clássica falhou completamente em tentar explicar o porquê dos espectros observados. Bohr, em 1905, propôs um modelo atômico ligeiramente modificado, como já vimos. Com esse novo modelo, ele pretendia resolver dois problemas: a estranha estabilidade do átomo e a existência das linhas de Fraunhofer. Por simplicidade, seu modelo se resumia a explicar o hidrogênio ou qualquer outro átomo que só tem um elétron. Em seu modelo atômico, Bohr fez os seguintes postulados:

- O elétron se move em uma *órbita circular* em torno do núcleo, sob influência da *atração eletrostática (coulombiana)*¹ entre eles, obedecendo às leis da mecânica clássica.
- O elétron só pode estar em órbitas cujo *momento angular* seja um *múltiplo inteiro* da constante de Planck dividida por 2π .
- Apesar de ser constantemente acelerado, o elétron não emite radiação quando está em uma órbita permitida, permanecendo com energia constante.
- Se um elétron mudar para uma órbita de menor momento angular (e menor energia), ele emitirá um fóton com frequência dada por $\Delta E = hf$, onde ΔE é a diferença de energia entre as órbitas. Para mudar para uma órbita de maior momento angular (e maior energia), ele precisa absorver um fóton com a frequência (a energia) correspondente.

O primeiro postulado assume de vez a analogia entre a força eletromagnética e a gravitacional; é um postulado que confirma o modelo de Rutherford, já construído sobre essa similaridade: se os dois tipos de força têm a mesma dependência da distância, é concebível que elétrons tenham órbitas elípticas (no caso do Bohr, circulares, para facilitar) em torno do núcleo atômico, da mesma forma que planetas em torno do Sol. Portanto, para tratar o modelo de Bohr, podemos começar usando o mesmo tipo de análise que usamos na dedução das Leis de Kepler, no capítulo 14 do Volume II. Assim, a energia potencial elétrica do elétron é dada por

$$E_P = \frac{-kZe^2}{r}$$

onde e é a carga do elétron, Z é o número de prótons no núcleo e k é a constante de proporcionalidade da interação coulombiana (análoga ao G da força gravitacional). Logo, a energia total desse elétron é dada por:

$$E_t = \frac{mv^2}{2} - \frac{kZe^2}{r}$$

Por outro lado, como a órbita é circular, a força resultante é centrípeta e, portanto:

$$\frac{kZe^2}{r^2} = \frac{mv^2}{r} \therefore mv^2 = \frac{kZe^2}{r}$$

A energia fica com a forma:

$$E_t = -\frac{kZe^2}{2r}$$

Isto é, como função apenas do raio (e de constantes do sistema).

Mas o segundo postulado começa a trazer inovações: a idéia é usar a quantização da radiação feita por Planck e Einstein para gerar uma quantização das órbitas (o motivo de se fazer isso é explicado no terceiro e quarto postulados). Segundo essa regra, só poderiam existir órbitas com certos momentos angulares² ($L = mvr$), certos raios bem definidos. Usando o segundo postulado, e a expressão da força centrípeta:

$$\frac{nh}{2\pi} = mvr \therefore \frac{nh}{2\pi} = mr\sqrt{\frac{kZe^2}{mr}} = e\sqrt{mkZr}$$

onde n pode assumir qualquer valor natural (1,2,3...).

¹ A lei de Coulomb é uma lei do início dos estudos elétricos; de uma forma modificada, nós a apresentamos na lista da física básica: a atração elétrica entre dois corpos (parados) é proporcional ao produto das cargas dos dois corpos e ao inverso do quadrado da distância entre eles. A força de Coulomb foi feita descaradamente em analogia à força gravitacional Newtoniana.

² Se o conceito de momento angular não é familiar, leia Capítulo 7 do Volume II.

Temos então que os raios orbitais permitidos são da forma:

$$r = \frac{n^2 h^2}{4\pi^2 m k Z e^2} = C_1 n^2$$

E as energias orbitais permitidas:

$$E_t = -\frac{2\pi^2 m k^2 Z^2 e^4}{h^2 n^2} = C_2 \frac{1}{n^2}$$

Novamente, temos equações com muitos termos, mas todos (menos um) constantes. O raio e a energia só dependem de n , que é um número natural! Com isso, chegamos no resultado de que só pode haver certos valores específicos para os raios orbitais dos elétrons. O terceiro postulado diz que essas órbitas são estáveis, a despeito da radiação das cargas aceleradas (é o tipo de prática dos físicos chamada *na marra*: se a teoria não prevê isso, impõe na marra).

Idealmente, esperamos que o elétron tenda a ocupar então órbita com menor energia ($n = 1$), o chamado *nível fundamental*. Contudo, colisões com outros átomos e radiação pelo meio tendem a dar energia para os elétrons, levando-os a níveis mais altos – *níveis excitados*. Mas como apenas certas energias são possíveis, se passa luz por um certo grupo de átomos de hidrogênio, apenas alguns comprimentos de onda serão absorvidos. Do mesmo modo, quando um elétron volta ao nível fundamental (ou a qualquer nível menos excitado), ele emite um fóton em um dos comprimentos de onda possíveis. É o que diz o quarto postulado. Tratando mais formalmente: seja um elétron passando de um nível inicial n_i para um nível final n_f . A diferença de energia dessa transição é

$$\Delta E = C_2 \left(\frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{n_f^2} \right)$$

Que é a energia do fóton liberado, $\Delta E = hf = \frac{hc}{\lambda}$. Substituindo na equação acima, chegamos na FÓRMULA DE RYDBERG:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{n_f^2} \right)$$

Mas a equação de Rydberg foi obtida experimentalmente, comparando as linhas espectrais do hidrogênio! E o valor numérico de R é exatamente o valor da combinação de todas aquelas constantes da equação de cima! Essa é a vantagem do procedimento na marra: escolhendo os postulados certos, conseguir a descrição teórica de fenômenos observacionais muito estranhos. Com essa descrição, ficam resolvidos os problemas das linhas espectrais, e a quantização ganha cada vez mais importância como princípio de uma nova física.

Repare, na figura 5.4, que a diferença de energia entre o primeiro e o segundo nível é muito maior que a diferença entre o segundo e o terceiro, que é muito maior que entre o terceiro e o quarto, e assim por diante. Ou seja, todas as linhas que são transições do nível fundamental para qualquer outro superior ficam próximas (no caso, todas são ultravioleta), formando uma série de linhas (a série de Lyman). Depois, já na região do visível, vêm as linhas das transições do segundo nível para cima, formando a chamada SÉRIE DE BALMER (mais famosa justamente por ficar no visível). As outras séries, linhas bem menos energéticas, ficam todas no infravermelho.

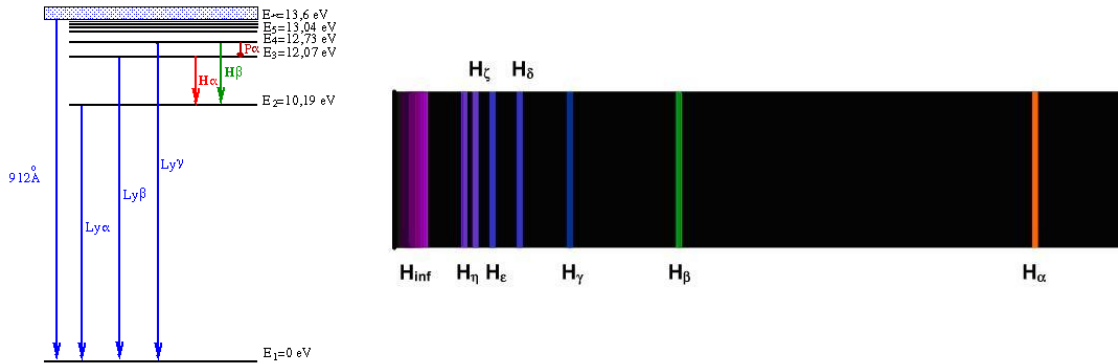


Figura 5.4: Gráfico mostrando várias possibilidades de transição entre camadas eletrônicas do elemento e as Linhas de Balmer do Hidrogênio, num espectro de emissão.

Abaixo, temos uma tabela com os valores de comprimento de onda da série de Balmer. A notação usual é a seguinte: H_α é a transição do segundo para o terceiro níveis (ou do terceiro para o segundo, como na figura.); H_β , do segundo para o quarto; H_γ , do segundo para o quinto. ... H_∞ é uma região em que existe uma leva absorção contínua: quando o elétron consegue energia suficiente para escapar da atração no núcleo (na fórmula, quando n_f tende a infinito).

Série de Balmer	
H_{α}	6563 Å
H_{β}	4861 Å
H_{γ}	4340 Å
H_{δ}	4100 Å
H_{ϵ}	3970 Å
H_{∞}	3646 Å

Todos os átomos apresentam tal quantização dos seus níveis de energia, todos eles apresentam um conjunto de linhas espectrais. O modelo de Bohr, no entanto, falha completamente na descrição de átomos ou íons que apresentam mais de um elétron em sua eletrosfera. Isto porque, para átomos de mais de um elétron, a interação entre elétrons também tem de ser levada em conta – e, junto com ela, restrições mais sutis, como o princípio da exclusão de Pauli. A Mecânica Quântica posterior, desenvolvida a partir de 1926, já conseguia descrever satisfatoriamente a presença de todas as linhas nos espectros dos diferentes elementos químicos; com isso, podemos dizer que os espectros de emissão e absorção são razoavelmente entendidos hoje em dia.



Figura 5.5: Espectro do Anel.

Capítulo 6

Teoria Quântica

Se os fenômenos de difração e interferência só faziam sentido pensando a luz como onda, o efeito fotoelétrico e a radiação de corpo negro estavam exigindo que ela fosse encarada como propagação de fótons, de partículas. Para você, que leu todos os capítulos até aqui, talvez isso não seja um problema tão grande: se a ciência consiste em criar modelos que expliquem e organizem a realidade, não há tanto problema em usar dois modelos diferentes para descrever a luz... Acontece que não foi assim que a ciência moderna se constituiu historicamente. Desde o início da nossa *física* (Galileu, Kepler, Newton, etc.), acreditava-se na ciência como o modo de buscar a *verdade objetiva*, independente dos seres humanos, que existe por si. Essa ainda é a imagem mais difundida de ciência, é a que está no senso comum; um dos nossos objetivos, nessas listas, é desfazer essa imagem. Essa visão “objetivista” começou a mudar no início do século XX, e tem muito a ver com a crise de que estamos falando: quando precisávamos de duas teorias contraditórias para explicar o que é a luz; duas teorias aparentemente verdadeiras, mas contraditórias? A luz não pode ser partícula e onda ao mesmo tempo! O que é, então, a realidade das coisas?!

Antes de encarar o problema filosófico sobre o conhecimento da verdade, continuemos seguindo a evolução dos resultados físicos associados. O primeiro questionamento: se achamos comportamentos de partículas em algo que supúnhamos ser uma onda, porque não esperar o contrário: comportamentos, em partículas, associados a ondas? Esta sugestão nasce com a tese de doutoramento do físico (e ex-historiador) francês Louis de Broglie. Ele postulou que partículas materiais (prótons, elétrons, etc.) possuem um certo comprimento de onda, a partir do qual propriedades ondulatórias devem aparecer. Este comprimento de onda, em conformidade com a energia dos fótons de Planck, é dado por:

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

onde p é a quantidade de movimento da partícula e h é a constante de Planck. De Broglie postulou desta forma baseado na quantização do átomo de Bohr e também na analogia ótico-mecânica¹. Não demorou para a hipótese de De Broglie ser comprovada experimentalmente² com a difração de elétrons em uma rede cristalina, o que rendeu o Nobel a G.P. Thomson (o filho do descobridor do elétron)³. Com isso, a dualidade onda-partícula deixa de ser um problema exclusivo da luz, disseminando-se para toda a matéria. :S

¹ Existe uma certa tradição em comparar certas equações na mecânica a outras bastante similares da ótica geométrica.

² A essa altura, já temos que usar esses termos mais cuidadosamente. Quando dizemos que uma hipótese teórica nova foi comprovada experimentalmente, isso significa que ela previa um certo resultado experimental que foi de fato verificado em laboratório. Nesse caso, tratava-se de prever um resultado teórico *que não era previsto pela teoria clássica*.

³ Vejam a ironia, o pai ganha o Nobel por mostrar que elétrons são partículas, e o filho o ganha por mostrar que também são ondas! Hahahaha...

Era nessa mesma época que o modelo atômico estava sendo mais refinado; Bohr fez a última modificação em 1913. A estabilidade dos elétrons devia estar associada a esses fenômenos estranhos; Bohr estava especialmente preocupado com a coerência entre esses fenômenos não-explicados pela física clássica⁴. Como é comum nos meios científicos, outros físicos se juntaram a ele em suas investigações; mas nesse caso, o trabalho em grupo foi especialmente frutífero. Começou com dois alunos alemães que iam passar os verões com Bohr, na Universidade de Copenhague, para estudar com ele: Werner Heisenberg e Wolfgang Pauli. Eles estavam num bom caminho, construindo teorias que funcionavam muito bem, mas que ninguém compreendia.

Após um prolongado período de reflexão conjunta com o próprio Bohr, Heisenberg resgatou um ponto de vista subjetivo que, de tanto ser oprimido pela concepção clássica da física, acabou completamente esquecido: quando vemos os rastros de um elétron numa câmara de bolhas, não vemos os elétrons, só as bolhas. Existe uma subjetividade inerente a todo processo de conhecimento, que ele estava em vias de recuperar. Explico melhor: suponha que queiramos medir a velocidade, ou a posição de um corpo qualquer. Para que façamos isso, devemos ter uma fonte de luz; seus raios saem dessa fonte, refletem-se na bolinha, e chegam aos nossos olhos – assim, vemos o movimento da bolinha. O simples fato de observarmos um objeto já implica uma interação física entre ele e nós. Para ficar mais claro, suponhamos que nosso objeto seja um elétron. Sabemos que, se a luz que incidir nele tiver uma frequência muito alta, ele será muito perturbado, isto é, pode ter um acréscimo muito grande na sua velocidade. Então, se quisermos medir a velocidade de um elétron, mandaremos raios de luz com a menor frequência possível, para “distorcer” menos a velocidade “real” do elétron. Por outro lado, ondas com frequência muito baixa têm um comprimento de onda muito grande; para a posição do elétron, só é possível saber que ele está na região da crista da onda de luz – ou seja, a medida da posição é muito pouco precisa, com comprimentos de onda muito grandes. Uma precisão maior nessa medida implica uma precisão menor na da velocidade; uma maior na velocidade, outra menor na posição. Repare que isso não depende da precisão dos instrumentos empregados na medição; é uma incerteza *inerente a toda forma de medição*.

Assim, Heisenberg publicou, em 1927, o que ficaria conhecido como PRINCÍPIO DA INCERTEZA⁵: o produto da incerteza do momento pela incerteza da posição não pode ser menor que a constante de Planck:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq h$$

Sendo p o momento linear de um objeto qualquer, e x sua posição. Como a constante de Planck é muito pequena (da ordem de 10^{-34} , como vimos mais acima), esse tipo de efeito é completamente desprezível na escala do nosso mundo comum; é só nesse mundo “grande” que podemos supor desprezível a interação da luz que nos permite conhecer os objetos e, assim, supor que possamos conhecer uma realidade física independente do observador (com um observador absolutamente imparcial). Mas isso não é desprezível na escala atômica, o que dá à constante de Planck um novo status: o da quantidade que define o limite entre o domínio da física clássica e o da *física quântica* que estava nascendo.

Subjetividade inseparável do observador e diferença entre mundo microscópico e macroscópico: dois ingredientes fundamentais para as idéias que Bohr, Heisenberg e Pauli vinham desenvolvendo. Pouco tempo depois, eles tinham oficializado, finalmente, sua própria interpretação da mecânica quântica: a muito famosa *interpretação de Copenhague*. A questão é a seguinte: desde que nascemos, vamos sedimentando conceitos sobre o mundo, baseados nas nossas experiências e na forma que nossa cultura o enxerga. Assim, aprendemos cedo que o espaço e que o tempo

⁴Chamamos de *Física Clássica* o conjunto de teorias físicas que atingiram seu ápice no final do século XIX: isto inclui a Mecânica Newtoniana, a Termodinâmica e o Eletromagnetismo de Maxwell.

⁵Segundo a Declaração Universal dos Direitos do Físico: “Todo Físico tem o direito de invocar o princípio da incerteza quando for questionado por engenheiros, filósofos, advogados, dramaturgos, jogadores de futebol, etc...”

são absolutos, ou seja, os mesmos para qualquer pessoa; vemos que os objetos são permanentes nesse espaço e nesse tempo; que eles não aparecem e depois desaparecem⁶. Quando notamos que as árvores passam lá fora e dissemos isso a nosso pai, ele provavelmente soltou uma risada e disse “nah, nós é que estamos passando; isso é só impressão dos seus olhos”. Ou seja, desde que as concepções da Ciência Moderna (desde Newton, mais ou menos) foram fixadas na nossa cultura, aprendemos quando crianças a diferenciar o que é “real” do que é “ilusão dos sentidos”. A estrutura do nosso pensamento é, nesse sentido, *clássica*: todas as nossas impressões e imagens do mundo são baseadas nos nossos conceitos clássicos. Porém, certas experiências nos forçaram a dizer que a medida do espaço e do tempo dependia do estado de movimento e dos corpos próximos de quem observava – o que levou Einstein a reformular a mecânica com a *Teoria da Relatividade*. Outras experiências mostravam comportamentos estranhos dos elétrons e da luz, que por muitas vezes eram contraditórios, *segundo nosso pensamento clássico*. Mesmo que criemos outros modelos, nossa mente continua sendo moldada pelos conceitos clássicos; e tudo de que conseguimos fazer imagem (*imaginar*) são objetos clássicos. Assim, a luz, em certas situações, *se parece mais* com o nosso modelo clássico de onda, e em outras, com o nosso modelo clássico de partícula. Isso nos remete ao PRINCÍPIO DA COMPLEMENTARIDADE do Bohr: *Duas afirmações profundamente contraditórias podem ser profundamente complementares*. A contradição entre explicar os objetos como ondas ou como partículas é quase que necessária, pois deriva das próprias limitações do conhecimento humano. Nenhum dos modelos é a luz (esta, nossa imaginação não acessa diretamente); mas cada um deles, a seu modo, expressa algo sobre a “realidade” da luz. É nesse sentido que dizemos que ela é, ao mesmo tempo, onda e partícula.

A Interpretação de Copenhagen ainda é a interpretação mais aceita entre os físicos; mas ela já foi muito criticada por ter servido como uma barreira a construções conceituais mais complexas, algo como “aceite sua limitação e não pergunte muito; continue fazendo as contas”. Entretanto, mais importante que a interpretação foram suas consequências para a epistemologia⁷. A necessária vinculação de toda teoria à sua produção por mentes humanas (inseridas em uma cultura específica e em uma época específica) nunca mais foi esquecida. A limitação natural do conhecimento também foi uma idéia que se difundiu rapidamente, graças a outras conclusões, vindas de diversas partes. Igualmente, foi colocada a questão dos limites de validade de qualquer concepção científica (a mecânica newtoniana só vale até escalas em que a constante de Planck não é desprezível). Se hoje falamos de teorias científicas como *criações humanas, variadas e limitadas*, e não mais como a *Verdade descoberta pelo homem*; se concebemos uma ciência chinesa tão válida quanto a nossa, ocidental; se sabemos reconhecer as qualidades da Astronomia Aristotélica, e não achamos mais que eles tinham um conhecimento inferior porque acreditavam na Terra no centro do Universo, boa parte de tudo isso se deve, pelo menos de início, às reflexões de Copenhagen.

Quanto à teoria quântica em si, ela é razoavelmente independente de suas interpretações, permitindo inclusive um ponto de vista como a famosa interpretação de Paul Dirac: “*Shut up and calculate*”. Independente das limitações da nossa imaginação, podemos descrever os fenômenos matematicamente, porque a matemática é apenas uma forma de expressar relações lógicas. Pensando nisso, não podemos nos esquecer que, na época de Bohr, havia outras pessoas desenvolvendo os resultados quânticos de outras formas.

Erwin Schrödinger não gostava dos saltos quânticos e das outras coisas “obscuras”, e tentava dar uma formulação matemática coerente. Em 1926, ao preparar um colóquio sobre a teoria de De Broglie (pois ele e seus colegas não a entendiam muito bem), insistindo na analogia ótico-mecânica, chegou à formulação da *mecânica ondulatória*, sua versão da nova teoria. Em sua teoria,

⁶ Piaget, um psicólogo suíço que pesquisou o aprendizado desses conceitos mais fundamentais, relata experiências em que se mostra para um bebê um objeto que ele quer muito. Ele então fica agitado, e seguindo-o com os olhos. Quando se esconde esse objeto atrás de uma placa, por exemplo, o bebê subitamente passa a agir como se o objeto *nunca tivesse existido*.

⁷ Epistemologia é uma área da filosofia, e consiste na investigação das condições para o conhecimento (seja esse conhecimento de que tipo for).

ele prevê a existência da função de onda, que é uma função geralmente complexa (isto é, que envolve números imaginários). Porém, ele não sabia o que ela representava. Primeiramente que ela estivesse relacionada com a densidade de carga do elétron, ou seja, ele interpretou os elétrons como nuvens, padrões de interferência de ondas (podendo muitas vezes ocupar o espaço todo :S). Mais tarde, Max Born sugeriu que sua equação estava ligada à função densidade de probabilidade da partícula, a partir da qual era possível obter as probabilidades de se medir a posição ou o momento da partícula – em conformidade com o princípio de incerteza.

Por outro lado, o próprio grupo de Copenhague fazia avanços no formalismo da teoria. Wolfgang Pauli, por exemplo, já em 1925, publicou o PRINCÍPIO DA EXCLUSÃO: Duas partículas iguais de um determinado tipo (chamadas de *férmions* – categoria que inclui elétrons, prótons e nêutrons, mas não fótons, por exemplo) não podem ocupar o mesmo estado quântico (isto é, de mesma energia, momento angular total, momento angular em uma dada direção e spin^8) em um sistema. Assim, em cada uma das nuvens de probabilidade em torno de um átomo⁹, em cada orbital, só podem permanecer, no máximo, dois elétrons – desde que tenham spins opostos. Vocês verão isso melhor nas aulas de química. E verão como isso é importante até na evolução das estrelas.

A teoria de Schrödinger inicialmente era uma tentativa completamente diferente da que Heisenberg e seus companheiros estavam bolando, mas com o passar do tempo, foi ficando claro que eram duas formulações teóricas equivalentes. Paul Dirac foi um dos que mostraram essa equivalência, além de ter unido e generalizado as duas, inserindo até a relatividade restrita!

Após o formalismo matemático da mecânica quântica ser bem estabelecido, ainda restavam muitas dúvidas conceituais: como, exatamente, o ato de medir ou observar afeta o sistema (o chamado colapso da função de onda); em que ponto se dava a transição do mundo quântico para o clássico (ambas questões explicitadas no “experimento” do GATO DE SCHRÖDINGER – pesquisem); a estranha não-localidade mostrada pelas equações da mecânica quântica (uma medição em um local afeta o universo como um todo, de forma aparentemente imediata), explicitado pelo paradoxo EPR.

Certos problemas sobre medições ainda persistem, principalmente se tivermos um cuidado que Copenhague não teve: considerarmos o medidor também como um sistema quântico – daí o problema passa a ser uma interação de dois sistemas quânticos! Sobre a não-localidade, esta se mostrou sendo verdadeira, ou seja, a “ação fantasmagórica à distância”, como apelidaram Einstein e seus colegas, é um fato ainda hoje verificado.

Apesar de ser, sem dúvidas, a teoria mais testada e comprovada até agora, a mecânica quântica ainda não possui grande consenso sobre a sua interpretação. Como dissemos, a interpretação de Copenhague ainda é mais aceita, mas de forma alguma é a única, e tem perdido força com o tempo. Fechando a lista, damos alguns outros exemplos de interpretações:

- *Interpretação Estatística*: diz que os resultados da mecânica quântica só fazem sentido se aplicados para sistemas de muitas partículas, o que faz com que os problemas das nuvens de probabilidade e do paradoxo do gato de Schrödinger deixem de ser um problema: não faz sentido falar dessas coisas para uma partícula sozinha.
- *Interpretação de Bohm*: ela supõe que a função de onda é uma entidade real (isto é, ela não é uma formulação matemática usada meramente para resolver o problema, como, por exemplo, a interpretação probabilística considera) e não-local, é um desenvolvimento das teorias de De Broglie. Esta é uma interpretação que insere variáveis escondidas, o que

⁸O spin é um momento angular intrínseco, porém não se trata de uma rotação em torno do próprio eixo, como muitos exemplificam. Sua origem é explicada ao se usar mecânica quântica relativística.

⁹Uma nuvem de probabilidade de um elétron é uma região, em torno do núcleo atômico e a cada ponto dessa região está associada uma probabilidade do elétron ser encontrado ali. Os objetos quânticos são descritos como funções de probabilidade pela equação de Schrödinger. Isso é necessário pelo próprio Princípio de Incerteza, que impede uma descrição exata das posições.

resolve todos os problemas dos paradoxos da quântica. Nela a dualidade onda-partícula é resolvida postulando que tanto a partícula e a onda existem juntas.

- *Interpretação Relacional*: Esta interpretação, seguindo as idéias da relatividade restrita, considera que o ato de medição consiste em uma relação entre observador-observado, isto é, nosso sistema quântico pode estar em estados diferentes para observadores diferentes.
- *Interpretação dos Universos Paralelos*: Para resolver o problema do colapso da função de onda e do paradoxo EPR, sugeriu-se uma outra interpretação do ato de medir: a partir da medição, nosso universo se separa em vários, sendo que em cada um nosso sistema está (e estava) em cada uma das possibilidades de medição. Logo, não temos um “colapso” da função de onda, apenas tomamos um caminho de universo dentre todos os universos possíveis, sendo todos não conectados (isto é, eles não se influenciam entre si).

Unidade III

Estrelas

Capítulo 7

O Sol

7.0.1 Energia Solar

O Sol é a principal fonte de energia terrestre. Da radiação solar que chega na Terra, aproximadamente 30% é refletida de volta para o espaço. Quase 50% é absorvida pela atmosfera, pela superfície terrestre e pelos oceanos e convertida em calor. Cerca de 20% participa nos ciclos hidrológicos (evaporação, precipitação e circulação da água) e resta uma pequena fração causadora de ventos e de ondas do mar, sendo uma fração ainda menor a que se incorpora à biomassa do planeta, através do processo de fotossíntese, nas folhas verdes das plantas. Foi essa pequeníssima fração, incorporada nos seres vivos, que deu lugar, nos últimos 600 milhões de anos, através de complexos fenômenos bioquímicos, geológicos, mecânicos, aos combustíveis fósseis: petróleo, carvão mineral e gás natural.

Portanto, com algumas poucas exceções, como o calor proveniente do centro da Terra, a energia nuclear e a energia das marés, *todas* as formas de energia que utilizamos na Terra têm sua origem direta ou indireta nas radiações solares. Em outras palavras, as fontes de energia são, em última instância, derivadas da energia do Sol.

Entretanto, o que nós costumamos entender por energia solar é o aproveitamento direto da energia gerada pelo Sol, que hoje é, sem dúvida, uma das alternativas energéticas mais promissoras: a Terra recebe do Sol dez mil vezes mais energia que o atual consumo mundial de eletricidade, e a quantidade de sol que incide na terra durante dez dias é equivalente a todas as reservas de combustíveis fósseis existentes, além de ser inesgotável na escala terrestre de tempo, tanto como fonte de calor quanto de luz.

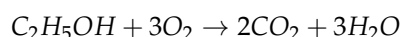
- 24- A frequência de pico da curva de emissão de luz do Sol é a do amarelo, 4700 Å. Calcule, com isso, sua temperatura efetiva.
- 25- O raio do Sol é conhecido desde 1673, quando foi descoberto o valor da distância da Terra ao Sol a partir de métodos geométricos (a paralaxe geocêntrica de Marte). Ora, sabendo que a distância da Terra ao Sol é de $1,5 \cdot 10^8$ Km, e o diâmetro angular do Sol (ângulo determinado pelo seu diâmetro no céu) é de 30' de arco, calcule seu raio. A partir desse valor e da temperatura do Sol, calcule a potência (quantidade de energia por segundo) emitida por ele. A quantas lâmpadas de 100 Watts corresponde essa potência?
- 26- Se você calculou o valor da potência emitida pelo Sol no exercício acima, deve ter constatado que ela é realmente alta! Essa quantidade de energia é tanta que a um ser humano não parece nada óbvio (e, veremos, não é mesmo) a resposta à seguinte pergunta: de onde provém tanta energia? Qual é o combustível que alimenta o Sol?

- 27- Sabemos que a massa do Sol é de $2 \cdot 10^{30}$ Kg. Dada a tabela abaixo, da quantidade de energia liberada por grama de matéria queimada, de cada um dos combustíveis relacionados, calcule o tempo máximo de vida do Sol caso sua energia viesse da queima de cada um dos referidos combustíveis. (Considere que a potência do Sol é a mesma desde sua origem.)

Produto	Energia liberada na queima (J/g)
Pólvora	4.200
Açúcar comum (sacarose)	16.720
Álcool (etanol)	23.000
Gás Natural (metano)	29.380
Carvão (hulha seca)	35.750
Gasolina (octano)	48.000
Hidrogênio	142.000

Hoje em dia, há métodos relativamente seguros de datação de fósseis de seres vivos, com um erro pequeno na determinação da idade do fóssil (há quanto tempo o animal morreu). Assim, partir da análise de fósseis e demais evidências geológicas (marcas que a vida em eras passadas deixou na estrutura do nosso planeta, nas camadas do solo, nas rochas), sabe-se que a vida na Terra tem, ao menos, 3,5 bilhões de anos de existência – e há pelo menos 350 milhões de anos na forma de florestas razoavelmente parecidas com as atuais¹. Disso devemos supor que, ao menos nos últimos 300 ou 400 milhões de anos, a luminosidade do Sol não tenha variado significativamente. A partir das respostas do exercício anterior, vemos logo que a queima comum de combustíveis – mesmo a do hidrogênio, a mais energética que conhecemos – é muito insuficiente para ter sustentado o sol durante tanto tempo.

Tecnicamente, “queima” é um tipo particular de reação química. Uma certa substância (o combustível) reage com oxigênio, é desmontada em gás carbônico e água, e a energia da estrutura anterior da molécula é liberada como calor e luz. A queima (ou combustão) do álcool, C_2H_5OH , por exemplo, ocorre da seguinte maneira:



Parece, contudo, que a energia de estrutura das moléculas, apesar de bastante alta, não é suficiente para justificar toda energia emitida pelo Sol. Mas o que mais poderia servir?

Integrando uma esfera de densidade constante², encontramos que a energia potencial gravitacional armazenada na esfera é

$$U = -\frac{3M^2G}{5R} \quad (7.1)$$

- 28- Usando valores conhecidos para a massa e o raio solares, estime a quantidade de energia potencial armazenada no Sol.

- 29- Comparando com a luminosidade solar, estime quanto tempo de vida o Sol terá.

Repare que, como em todas as reações químicas, os átomos se rearranjaram em outras moléculas – mas cada átomo continua a ser o que é. Mas sabemos que, pelo menos desde o fim

¹A data corresponde ao início do período geológico conhecido como *carbonífero*, quando os primeiros ecossistemas vegetais começaram a virar sedimentos para formar o carvão mineral que temos hoje.

²Não faremos isso aqui, mas isso pode ser visto em http://en.wikipedia.org/wiki/Kelvin-Helmholtz_mechanism

do século XIX, os átomos não são mais tidos como indivisíveis; eles têm elétrons flutuando em uma camada externa, e um núcleo composto de prótons e nêutrons. Aaaaaahh, e se então reagíssemos os núcleos, recombinando prótons e nêutrons e transformando elementos químicos, será que teríamos energia para sustentar uma estrela?

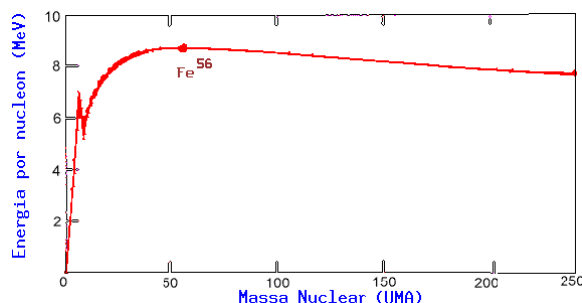


Figura 7.1: Energia de ligação dos átomos.

O gráfico 7.1 mostra a quantidade de energia de ligação por quantidade de núcleons (próton ou nêutron) em um núcleo atômico. Essa é a energia associada ao agrupamento das partículas do núcleo atômico, e que varia bastante de núcleo para núcleo. O aumento da energia de ligação para baixos valores de número de massa, por exemplo, indica que energia será liberada se dois nuclídeos de baixa massa se combinarem. A razão disso se relaciona com a segunda equação mais citada na história³

$$E = mc^2$$

publicada por Einstein em 1905, junto com sua Teoria da Relatividade Restrita. Ela diz que massa (m) pode ser transformada em energia (E), e energia pode ser condensada em massa. c é a velocidade da luz, que vale $3 \cdot 10^8$ m/s. Ou seja, em última análise, o que se conserva no universo não são a massa nem a energia, mas a massa e a energia juntas! Uma pode ser transformada na outra, e suas quantidades são relacionadas a partir da fórmula acima. E como a velocidade da luz ao quadrado é um número realmente grande, uma pequena quantidade de massa concentra muita, muita energia!

Assim, quatro prótons (quatro núcleos de hidrogênio) têm 0,7% mais massa que os dois prótons e dois nêutrons de um núcleo de hélio. Três núcleos de hélio (seis prótons e seis nêutrons), por sua vez, têm mais energia condensada que os mesmos seis prótons e seis nêutrons em um núcleo de carbono; e assim até o ferro. Para elementos maiores que o ferro, ocorre o oposto; um átomo de cádmio (112) é mais energético que dois de ferro (56). Na época em que se terminava de montar a estrutura atômica, seguindo os esforços para a Segunda Guerra Mundial, começou a se pesquisar a factibilidade de quebrar núcleos de elementos frágeis como o urânio, para gerar liberação de energia descontrolada; os americanos conseguiram primeiro, e duas cidades japonesas, Hiroshima e Nagasaki, testemunharam o poder energético das reações nucleares.

Mas não é nem um pouco razoável pensar que o Sol seja inteiro composto de um elemento tão raro quanto o urânio; e pelo contrário, as linhas espectrais do Sol indicam que ele seja composto, em sua maior parte, por hidrogênio e hélio. Daí a hipótese sobre a produção de energia solar: quatro átomos de hidrogênio, os mais leves de toda a tabela periódica, são fundidos em um átomo de hélio, e diferença de energia entre os dois estados é liberada e chega até nós. A queima (queima agora significando reação nuclear de fusão, e não mais reação química de combustão), é processada em um núcleo, onde a temperatura chega à ordem dos 10 milhões K, e a pressão,

³Nosso palpite é que o primeiro lugar ainda fica com $E = mc^2$.

170 milhões de atmosferas terrestres!!⁴ É desse NÚCLEO do Sol – como do núcleo de outra estrela qualquer – que se produz toda a energia emanada do astro.

- 30- A partir da potência do Sol, calcule a massa que ele transforma em energia por segundo. Considerando que um átomo de Hélio tem 0,7% de massa a menos do que os 4 átomos de Hidrogênio, e com a massa do Sol dada logo atrás no texto, calcule o tempo máximo que ele poderia ficar emitindo energia, considerando que ele possa queimar toda a sua massa (o que não é realmente verdade, como veremos adiante). Essa fonte de energia é agora viável?
- 31- Calcule a quantidade de energia que seu corpo armazena na forma de massa. Descubra o valor do gasto mensal de energia em sua casa, considere uma cidade com 100 000 habitantes, cada casa gastando a mesma quantidade de energia que a sua (e com o mesmo número de pessoas que a sua, também), e calcule por quanto tempo a energia armazenada em seu corpo sustentaria essa cidade. Conclua que você tem, dentro de si, a capacidade de resolver o problema da crise energética mundial!

7.1 Interior Solar

Já sabemos como a energia é produzida no Sol. Agora, como ela chega até nós, ou seja, como a mesma é transmitida do núcleo até chegar à Terra? A pergunta pode ser formulada de uma forma mais genérica: “Por que mecanismos físicos a energia pode ser transmitida de um ponto a outro do espaço?”. Se um corpo está quente, como é que seu calor se distribui na região em torno dele? A panela quente esquenta seu cabo; o Sol esquenta a Terra; o ar-condicionado, fixo em um canto da sala, da sala, abaixa a temperatura do ar de todo o recinto. Quais os processos que ocorrem aí?

O cabo da panela esquentando é um exemplo de transmissão de calor por CONDUÇÃO: partículas mais quentes e, portanto, com maior energia cinética, colidem com as moléculas mais frias de sua vizinhança, transmitindo parte de sua energia cinética a elas. Então, queimamos a mão ao tocar esse cabo muito quente, e sentimos os pés frios, em contato com o chão, que rouba o calor deles. Nessa forma de transmissão do calor, as partículas não saem do lugar. Há um deslocamento da energia sem mudança na distribuição da matéria (a panela, e suas partículas, ficam paradas, assim como os átomos do ar ou da sua mão ao ser queimada).

No caso do resfriamento de uma sala por um aparelho de ar condicionado, contudo, outra forma de transmissão de calor aparece e passa a ser preponderante. A condução existe, mas as partículas também se movem, e, obviamente, com elas sua energia. O movimento da matéria é o que causa o “movimento” da energia. No caso do ar condicionado, o ar próximo ao aparelho, ao ser resfriado, tem sua densidade aumentada, tendendo a descer ao chão da sala. Da mesma forma, o ar quente do chão tende a subir; lá em cima, ele é resfriado pelo ar-condicionado, até estar mais frio que o ar de baixo e então descer. Esse ciclo é conhecido como CONVECÇÃO; e costuma ocorrer em fluidos (líquidos e gases), quando a variação de temperatura causa uma variação na densidade, e alguma força – gravidade, por exemplo – faz com que o fluido se movimente. É um dos principais processos de circulação do ar ambiente.

⁴De fato, a temperatura extrema necessária para a ativação de tal reação é o fator limitante de sua utilização para fins humanos. Não conseguimos ainda isolar a matéria (o hidrogênio a ser fundido) a tais temperaturas – nenhum recipiente material suportaria tal calor sem vaporizar e ter suas moléculas decompostas, o que hoje se tenta é o isolamento com campos magnéticos (ainda sem sucessos consideráveis). No entanto, a fusão de hidrogênio já é aproveitada de uma forma que não necessita – pela própria atividade onde é usada – de controle algum: a *Bomba de Hidrogênio*. Uma vez ativada, a bomba gera calor descontroladamente, causando grande destruição até que toda a energia tenha sido liberada.

Entretanto, mesmo quando um corpo está completamente isolado de outros, ele ainda assim pode transmitir calor. A energia do Sol, por exemplo, chega até nós sem haver praticamente matéria entre a Terra e nossa estrela. Já vimos que, nesse caso, o transporte de energia se dá através dos fótons que, como vimos, têm uma energia diretamente proporcional à sua frequência. Este modo de transporte é conhecido por RADIAÇÃO, e já foi bem discutido na unidade de Estrutura da Matéria.

Tendo discutido as principais formas de transmissão de energia, estamos aptos, agora, a entender como a energia sai do núcleo do Sol e chega até nós. Há um modelo de descrição do transporte de energia que é bem aceito atualmente, e é esse modelo (essa visão de como o Sol é estruturado) que iremos discutir. Podemos dividir nossa estrela em camadas, dentro das quais o transporte de energia acontece, majoritariamente, de alguma das três formas apresentadas acima.

Logo acima do NÚCLEO, onde as reações nucleares são processadas, a transmissão de energia ocorre na forma radiativa. A CAMADA RADIATIVA constitui uma importante parte do interior solar. Os fótons são produzidos nas interações atômicas, e fluem em direção ao exterior. Só que nessa região as pressões e temperaturas ainda são elevadas; imagine uma partícula tentando andar num meio com muitas, mas muitas outras partículas em alta velocidade. Com certeza ela irá colidir a cada momento, fazendo um caminho de zigue-zague completamente aleatório, assim na camada radiativa os fótons que chegam do núcleo rapidamente são absorvidos por um elétron e logo em seguida são reemitidos em uma direção qualquer e logo em seguida é reabsorvido e reemitido por várias vezes. Então deveríamos imaginar que os fótons ficassem nesse movimento indefinidamente, porém, pela pressão da radiação que emerge do núcleo, esses fótons são lentamente empurrados para fora – e levando muito tempo para tal. Para você ter uma idéia, um fóton produzido no núcleo demora em média 2 milhões de anos para chegar à superfície solar!!

Num dado momento, porém, o interior do Sol começa a ficar mais opaco do que até então, o que significa que a matéria absorve muito mais os fótons do que o muito que já absorvia antes. Assim, o fluxo de radiação nessa região fica prejudicado, e a energia encontra dificuldades para ser escoada, acumulando-se ali. Um fluido (o plasma, que é um estado da matéria em que os átomos estão separados de seus elétrons) muito quente embaixo de outro não-tão-quente-assim – dá para imaginar o que vai acontecer, não? O plasma quente sobe, por estar menos denso, libera sua energia (esfria), e depois desce. A camada onde isso ocorre é denominada CAMADA CONVECTIVA. Não significa que o transporte por radiação tenha deixado de existir, mas que ele divide espaço com o transporte convectivo. Essa camada corresponde aos últimos 15% do raio do Sol; e as pressões e temperaturas já são bem mais baixas.

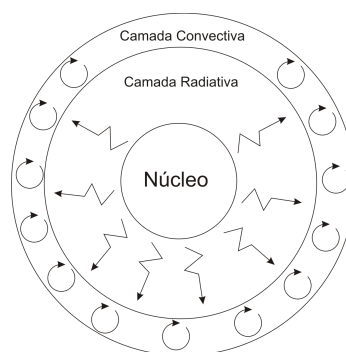


Figura 7.2: Esquema do transporte de energia no interior do Sol.

O processo convectivo forma colunas de convecção. O gás quente sobe pelo interior da coluna, quando chega na superfície libera os fótons e esfria, então desce pelas laterais da coluna

(semelhante ao que acontece com a água quando ela ferve). Isso faz com que, quando observamos o Sol com grande aumento, vejamos ele com uma superfície toda granulada, que são apenas os topos das colunas convectivas, as GRANULAÇÕES.

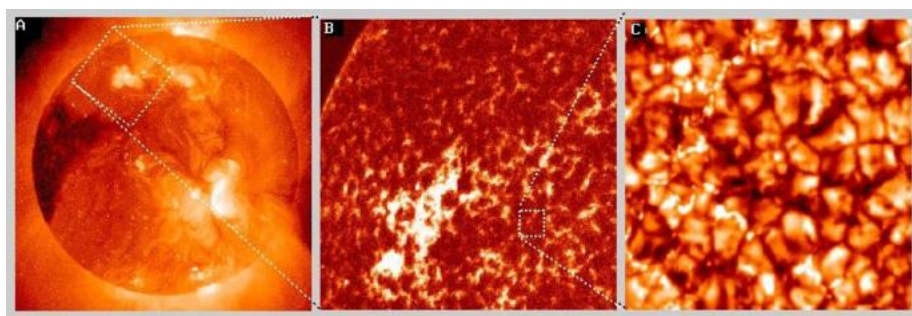


Figura 7.3: Fotos mostrando as granulações no Sol. Seu centro é mais brilhante pois o gás nesse ponto é mais quente, então ele esfria e se desloca para as laterais, tornando-se mais escuro. A duração média de uma granulação é de cerca de 6 minutos.

7.2 Superfície Solar

Porém, nada disso que foi discutido acima (exceto pelas granulações⁵) jamais foi observado por astrônomo algum, é apenas resultado de suas contas e modelos. O Sol é quente demais para que qualquer sonda viaje ao seu interior e observe qualquer um desses processos diretamente. O que observamos diretamente é a FOTOSFERA, a “superfície” da estrela. Dessa forma, todas as informações que obtemos da luz proveniente de uma estrela – linhas de absorção, pico de emissão da curva de corpo negro, temperatura efetiva – diz respeito à fotosfera. No caso do Sol, conforme seus cálculos no início do capítulo, a temperatura efetiva (da fotosfera) é de 5700 K (lembrando que o núcleo está a 10 milhões Kelvin!), com pico de emissão no amarelo.

A fotosfera é palco de alguns fenômenos interessantes, observados cá da Terra. Um exemplo, o mais evidente, são as MANCHAS SOLARES. Elas são pequenas manchas escuras que observamos no Sol. O fato de serem escuras não quer dizer que elas não emitam luz, mas que apenas estão a uma temperatura mais baixa (algo como 3800K, contra os já famosos 5700K médios da superfície), sendo ofuscadas pelas regiões vizinhas. Algo curioso sobre essas manchas é que elas obedecem a um CICLO DE 11 ANOS, passando por períodos de máxima e de mínima aparição; esse ciclo está relacionado com o ciclo de atividade magnética do Sol.

Na década de 1840, o cientista alemão Heinrich Schwabe descobriu que o número de manchas aumenta, e depois diminui, em um ciclo de 11 anos. As posições e a quantidade delas variam. As manchas estão concentradas em dois cinturões, uma ao norte e outra ao sul do equador solar. Quando o número de manchas está em seu mínimo, os cinturões se situam perto do equador, e quando estão em seu máximo, os cinturões ficam mais perto dos pólos.

A explicação foi proposta pelo casal BABCOCK, que propôs um modelo fenomenológico para a chamada teoria do dínamo, que além de explicar a existência de manchas, explica o ciclo solar e outros fenômenos solares como as violentas erupções. Esta teoria depende basicamente do conhecimento de dois processos ocorridos no interior solar e que ainda não são muito bem compreendidos pelos cientistas: a ROTAÇÃO DIFERENCIAL do Sol⁶ e o turbulento movimento do

⁵ As granulações são possíveis de serem observadas pelo fato de que a fotosfera não é totalmente opaca, ela é semi-transparente, assim como a nossa atmosfera.

⁶Rotação diferencial: Normalmente estamos acostumados, em nossa vida cotidiana, com rotação de um corpo rígido. Essa é a rotação de um CD por exemplo, ou uma bola, ou de um Ventilador de teto. Nesse caso, quanto mais longe do

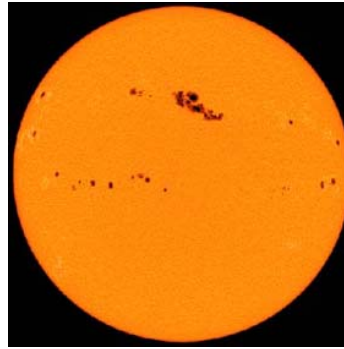


Figura 7.4: Manchas solares (Fonte: www.spaceweather.com)

gás nas colunas convectivas.

Segundo a explicação proposta pelo casal, no início do ciclo solar o campo magnético solar seria em sua maior parte polar, orientado de um pólo a outro (figura 7.5 (a)). No entanto, qualquer fluido que conduz bem a eletricidade congela o campo magnético que o permeia, isto é, o campo magnético passa a acompanhar todas as deformações do fluido. Assim o campo magnético do Sol que passa pelo plasma da fotosfera está congelado e acompanha todo o movimento desta.

Com a rotação diferencial, o campo magnético que está congelado acompanha o movimento diferencial e vai se enrolado em torno do Sol, esticando-se paralelamente ao equador (b). Pelas “forças de Arquimedes” os campos sobem para a superfície e alguns acabam emergindo. Nos pontos em que eles emergem, impedem a convecção, assim o gás naquela região não permite que o gás reaquecido suba, tornando a região mais fria que o gás que a cerca e conseqüentemente mais escura, formando as manchas solares (c).

A circulação fotosférica tende a arrastar as manchas que se movem mais a frente no sentido da rotação para o equador e as que se movem mais para trás na direção dos pólos. Quando as manchas de polaridades opostas se encontram, neutralizam-se e a energia liberada no processo serve para dinamizar as grandes erupções solares (veremos sobre elas mais a frente).

Conforme as manchas vão se neutralizando elas desaparecem e geralmente sobrevivem apenas as manchas que vem mais atrás, restabelecendo o campo magnético polar inicial do Sol, porém com polaridade invertida do campo inicial.

A fotosfera também é responsável por um efeito chamado escurecimento de limbo. Esse efeito observacional provoca o escurecimento dos bordos do disco solar. Isso é causado pela baixa temperatura da fotosfera que absorve e espalha parte da energia proveniente do núcleo solar. Observe a figura 7.6:

Uma aproximação matemática para o escurecimento é dada pela relação:

$$I_{\theta} = I_0(1 - \omega(1 - \cos \theta))$$

onde temos a intensidade do brilho (I) em função de θ que é o ângulo entre a normal à superfície do Sol e ω o coeficiente de escurecimento (sempre menor que 1 e geralmente 0,3).

Flares e protuberâncias são outros fenômenos que, tais como as manchas solares, causam flutuações na temperatura da fotosfera (e em sua cor, portanto), e oferecem um campo interes-

centro de rotação, maior a velocidade linear do ponto. Isso quer dizer que se eu pedisse para você colocar seu dedinho bem no centro de um ventilador de teto girando a máxima potência, talvez você até colocaria, mas se eu pedisse para você colocar seu dedinho bem na ponta, você com certeza não faria. (Se você tiver coragem por favor não faça, senão você vai ficar sem dedinho!). Já no Sol, isso é um pouco diferente; ele não é um corpo sólido, as camadas próximas do equador giram mais depressa que as próximas ao pólo – fenômeno conhecido como rotação diferencial. Assim, não existe um período de rotação do Sol, em cada latitude ele tem um valor.

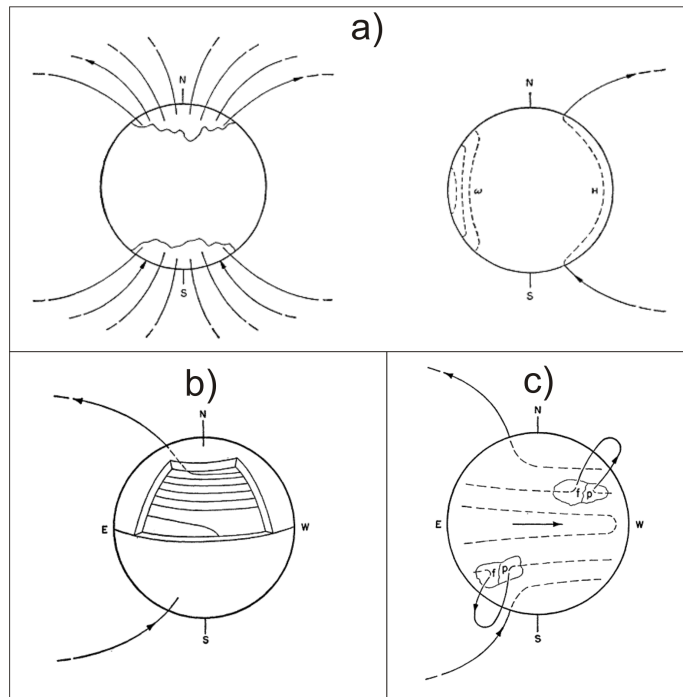


Figura 7.5: Esquema do modelo de dínamo proposto pelo casal Babcock para o ciclo solar de 11 anos. Figuras retiradas do próprio artigo publicado pelo casal no *Astrophysical Journal*, em 1961.

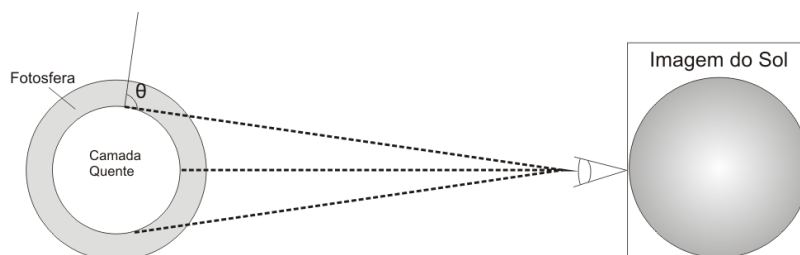


Figura 7.6: Esquema do escurecimento de limbo. Repare que quando nossa visada se afasta do centro do disco, maior será a camada de fotosfera que a luz terá que atravessar, assim haverá uma maior absorção de luz, escurecendo as bordas do disco.

sante de pesquisa aos interessados (o que, traduzindo, significa que não vamos falar mais sobre isso... Somente os curiosos terão sua recompensa!).

- 32- Que diâmetro angular deve ter uma mancha solar para que seu diâmetro linear ("real") seja igual ao da Terra?
- 33- Se uma mancha solar visível tem um diâmetro de $0,7''$ [$0,7$ segundo de arco], qual seu diâmetro linear?
- 34- As distâncias entre as manchas do Sol são fixas? (*Dica: Pense na rotação diferencial do Sol*).
- 35- No equador a velocidade angular média de rotação é de $14,37^\circ$ por dia. Durante 25,05 dias uma mancha visível percorreu um arco de $361,5^\circ$. Qual a velocidade em quilômetros por hora desta mancha em relação aos gases que a rodeiam.

- 36- Se o período de uma mancha solar a latitude de 45° é igual a 28,09 dias, qual o período sinódico (vide Volume Observacional) dessa mancha, visto por nós.

Acima da fotosfera, ainda existe uma outra estrutura, com densidade muito baixa, e cerca de 300 km de espessura: a CROMOSFERA. Por ser muito rarefeita, ela é ofuscada pela fotosfera. Em dias de eclipse total, porém, no curto período de tempo em que o disco do Sol fica encoberto, ela aparece como uma aura vermelha, graças às suas linhas *de emissão* nessa coloração – principalmente linhas $H\alpha$. Linhas de emissão significa haver aí um gás mais quente do que a fotosfera (?!), portanto emitindo luz mais do que absorvendo. De fato, estranhamente, a temperatura da cromosfera vai subindo à medida em que nos afastamos da fotosfera, chegando a 40.000K no topo! Devido a esse fato, a base da fotosfera é chamada de ZONA DE INVERSÃO, pois a partir daquele ponto o perfil de variação da temperatura em função do raio muda.

Além da fotosfera ainda existe gás muito rarefeito, espalhado por uma região com diâmetro de três raios solares – uma atmosfera da estrela, diríamos. Nos eclipses, a COROA solar aparece como uma grande neblina disforme em torno do disco. Apesar de ser a camada mais externa, ela possui uma temperatura muito alta, chegando a 2 milhões de kelvin! O fenômeno ainda é motivo de discussões na comunidade científica, e o modelo mais próximo de explicá-lo fala de transporte de calor pelo campo magnético solar.

- 37- Calcule qual seria o pico de emissão da coroa, supondo que sua curva de emissão fosse a de um corpo negro.

Com explosões, jatos e toda a alta atividade superficial do Sol, ele acaba sempre expulsando gás para a coroa, e daí espaço afora – fenômeno conhecido como VENTO SOLAR⁷. É claro que a taxa de perda de massa não é constante; o Sol tem mais vento quanto mais turbulenta estiver sua atmosfera, sendo mais um exemplo do ciclo de 11 anos do campo magnético do Sol: quando o campo é mais forte, as partículas ficam mais carregadas eletricamente, o que torna a atmosfera mais turbulenta. Com um vento muito intenso, muitas partículas caem na atmosfera da Terra, e são levadas para os pólos pelo campo magnético do nosso planeta. E quando elas interagem com as partículas da nossa atmosfera (mais especificamente as da *ionosfera* – aquela camada que tem partículas carregadas, por onde se espalham as ondas de rádio), produzem as auroras polares, que são as emissões luminosas provocadas por essa interação. Quer saber mais sobre elas, pesquise!!!

- 38- Temos registro histórico de que em 1938 ao Sol passou por um período de atividade magnética muito forte, o que, claro, veio acompanhado de muitas manchas solares. Se olharmos para o Sol hoje, devemos esperar encontrar muitas manchas ou não?
- 39- Porque na União Soviética foram vistas muito mais auroras boreais em 1937 do que em 1933?
- 40- Da mesma forma que existem as *auroras boreais* no Ártico, isto é, no círculo polar do Norte, existem também as *auroras austrais*, no círculo polar do Sul. Porque as auroras austrais são bem menos conhecidas? (Dica: Na Antártida só mora *pingüim*!)
- 41- Sabendo que o preço da energia elétrica é de 0,44 R\$/kWh (reais por quilowatt-hora), quanto dinheiro você economizaria por mês se tivesse na sua casa uma placa de captador solar do tamanho de um livro? Daí dá pra ter uma idéia da eficiência de se produzir energia solar.

⁷ O vento estelar é o análogo do vento solar, em uma outra estrela qualquer. Sabemos que há estrelas com ventos solares muito mais intensos do que o Sol. Você conseguiria imaginar quais as causas para tais efeitos?

- 42- O quanto de energia a menos recebe a sua cidade no inverno que no verão?
- 43- Desconsiderando atmosfera, calcule a temperatura superficial média de um planeta que esteja a uma distância R do Sol. Considere que o albedo superficial seja 0,5. A partir de onde a água seria sempre gasosa?

Discutimos, neste capítulo, em linhas gerais, um modelo físico atual que tenta explicar as características observadas no comportamento do nosso Sol. Ocorre, porém, que esta descrição é de um Sol atual, em plena fase de queima de Hidrogênio em Hélio, estável e mantenedor da vida na Terra. O Hidrogênio, apesar de existir em grande quantidade no Sol, um dia se esgotará. De fato, a fusão desse elemento acabará antes de que todo o Hidrogênio do Sol seja consumido, pois as camadas mais externas não participam desse processo. Calcula-se que a fusão deste combustível durará aproximadamente mais 5 bilhões de anos, além dos 5 bilhões que, estima-se, o Sol já tenha gasto na fusão.

- 44- Como estará a composição química do Sol quando a queima do Hidrogênio cessar? Quais os possíveis caminhos que vocês imaginam para esse Sol, considerando sua nova situação química? No diagrama HR, há estrelas gigantes vermelhas e anãs brancas com a massa aproximadamente igual à do Sol. Porque será que existe essa diferença entre essas estrelas, dado que elas têm a mesma massa? O Sol teria alguma relação com esses outros tipos de estrela?

O Sol é a única estrela próxima o suficiente para que sejam detectados nela efeitos tais como as manchas na fotosfera, a existência de coroa ou cromosfera (de fato, o Sol é praticamente a única estrela da qual conseguimos detectar um diâmetro, e a única em cuja superfície podemos resolver detalhes: A menos de algumas poucas supergigantes vermelhas relativamente próximas a nós, como Betelgeuse, as estrelas aparecem, mesmo aos telescópios de maior resolução disponíveis atualmente, como fontes pontuais de luz, sem dimensão angular), mas atualmente acredita-se que tais efeitos possam aparecer na grande maioria das estrelas que observamos no céu. Nesse sentido, o Sol nos ajuda a entender muito da estrutura das estrelas de uma forma geral, por se tratar de um exemplo muito mais próximo do que qualquer outro.

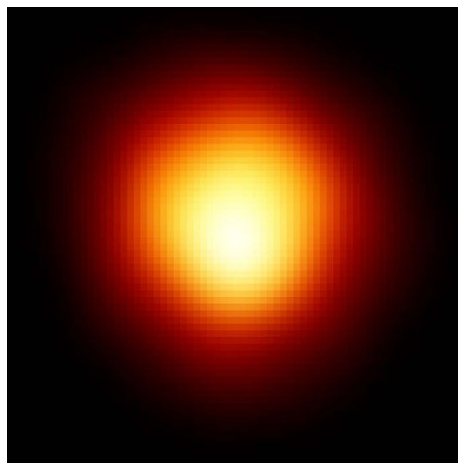


Figura 7.7: Superfície da estrela Betelgeuse, em imagem ultravioleta tirada pelo telescópio Hubble. Veja o artigo original: *First image of the surface of a star with the hubble space telescope* (<http://iopscience.iop.org/1538-4357/463/1/L29/pdf/5023.pdf>)

Capítulo 8

Estrelas

Agora que já estudamos as principais ideias sobre a estrutura da matéria e a natureza da luz, bem como as principais técnicas de análise de luz relacionadas à composição química, podemos nos perguntar sobre uma “natureza das estrelas”. Do ponto de vista observacional, nossa principal ferramenta será, claro, a espectroscopia. Da teoria física tiraremos algumas das teorias modernas sobre a constituição da matéria, principalmente da primeira metade do século XX. Vejamos o que conseguimos até o final.

8.1 Espectros Estelares

Como os espectros fornecem informação química a partir da decomposição da luz, eles são um instrumento perfeito para a astronomia. De fato, eles foram usados muito cedo: Fraunhofer apontou em 1812 seu espectrógrafo para o Sol; em 1820, já contava mais de 500 linhas escuras nesse espectro. De fato, o elemento químico Hélio foi descoberto no Sol (daí seu nome, originado de *Helium*, palavra que designa o Sol em grego), a partir de linhas que não correspondiam a nenhum elemento conhecido na Terra. Só mais tarde é que ele foi identificado em nossa atmosfera como o gás nobre mais abundante.

Aqui vai a figura de um espectro típico de uma estrela.

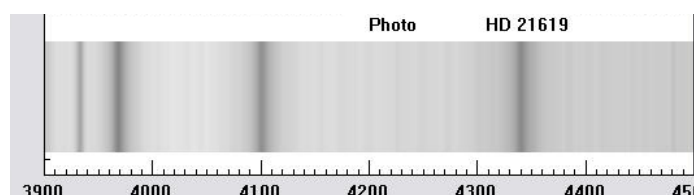


Figura 8.1: Espectro de uma estrela. Eixo horizontal em Angstroms.

A primeira estranheza nele é o fato de haver linhas de absorção e não de emissão. Afinal, é esperado que as estrelas sejam bastante quentes, e de qualquer forma mais quentes que seu meio circundante. Como vimos no capítulo 5.1, linhas de absorção são geradas por massas de gás frio que se interpõem entre a fonte e o observador.

Isso ocorre porque uma estrela é bastante densa, comportando-se tal como um corpo negro. Entretanto, o gás na fotosfera vai se tornando rapidamente rarefeito e bem mais frio; os fótons que saem com distribuição de corpo negro passam a ser absorvidos nas frequências de transição dos átomos presentes. De fato, olhando mais atentamente para os espectros estelares, podemos reparar que a intensidade do brilho de fundo, por trás das linhas escuras, não é uniforme: ela

possui um pico, em lugares diferentes dependendo da estrela. É por cima desse padrão luminoso, gerado pelo interior da estrela, que se impõem as linhas de absorção, geradas pela superfície.

Com os aparelhos eletrônicos de hoje em dia, podemos visualizar melhor esse efeito. Em vez colocar uma fita fotossensível por trás do prisma, colocamos um fotossensor eletrônico, como um CCD. Assim, cada pixel do sensor, que receberá um comprimento de onda diferente, poderá dizer a intensidade de luz recebida naquele comprimento. Dessa forma, podemos fazer um gráfico de intensidade por comprimento de onda. Ele formará algo como o gráfico 8.2: uma curva de corpo negro (o brilho do fundo) com uma curva de rachaduras (as linhas de absorção).

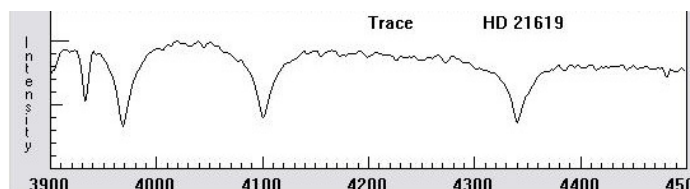


Figura 8.2: Gráfico do espectro de uma estrela. Repare na correspondência entre esse espectro e o da figura anterior.

Que tipo de gás pode se impor entre as estrelas e nós? O mais óbvio são os gases da atmosfera. Se for assim, então as linhas dos espectros estelares não serviriam para estudar a composição química das estrelas, mas apenas da nossa atmosfera. De fato, o espectro atmosférico é bem conhecido e fácil de obter: grosso modo, basta apontar o espectrômetro para alguma área azul do céu diurno¹. Então, quando passarmos a luz de uma estrela pelo prisma, basta subtraírmos (ou ignorarmos) os conhecidos efeitos atmosféricos - ou, em uma alternativa contemporânea, medir espectros a partir de satélites em órbita - e ver se sobram linhas. E sobram.

Podemos também responsabilizar a absorção da luz pela matéria no espaço interestelar. Neste caso, deveria haver alguma espécie de proporcionalidade entre a distância da estrela e a intensidade dessas linhas. Com efeito, quando se tenta relacionar a absorção com a distância da estrela, descobre-se certas regiões do espectro (em particular para grandes comprimentos de onda - vermelho e infravermelho) em que uma parte da absorção aumenta com a distância da estrela. Mas o efeito não é suficiente para explicar todas as linhas; muito da absorção medida não depende em absoluto da distância.

A relação encontrada mais tarde foi, entretanto, entre as linhas e a temperatura da estrela. Colocamos alguns espectros reais de estrelas logo abaixo.

Podemos observar que, à medida que a temperatura aumenta (ela está anotada ao lado dos gráficos), o pico da emissão se desloca, como era de se esperar. Cada gráfico está normalizado, de modo que o pico de sua emissão corresponde ao 1 na escala vertical. Dessa forma, a lei que relaciona o fluxo com a temperatura não pode ser verificada, a escala não é a mesma para todas as estrelas. O gráfico se parece muito com a emissão de um corpo negro, à exceção das linhas em que a emissão é menor, as linhas de absorção.

Essa relação com a temperatura da estrela é um feliz indício de que essas linhas de absorção são produzidas na própria estrela, permitindo nossas investigações químicas. Hoje, colocamos a responsabilidade pelas linhas sobre uma fina camada de gás superficial das estrelas: a *fotosfera*.

45- Dissemos anteriormente que os espectros podem nos dizer a composição química das estrelas.

Mas as linhas são geradas apenas pelos átomos da fotosfera! Como resolver esse impasse?!

¹Na verdade não é tão simples: esse espectro viria com linhas da atmosfera, do Sol e, se houver, do meio entre o Sol e a Terra. Mas como veremos, é possível descontar esses efeitos com relativa facilidade.

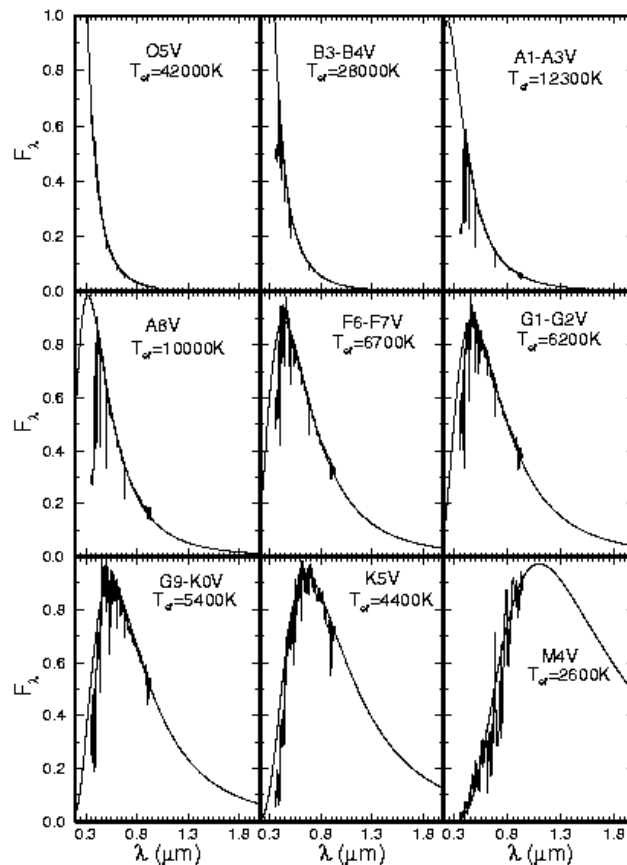


Figura 8.3: Espectro de estrelas de diferentes temperaturas.

Não se deixe enganar: apesar da grande variação de linhas, a composição química das estrelas não varia muito; em geral, todas têm algo em torno de 90% de hidrogênio (o elemento mais simples e, portanto, o mais abundante no universo), 10% de hélio, e 1 a 2% de metais (na linguagem dos astrofísicos, *metais* são todos os outros elementos além do hidrogênio e do hélio).

Nos perguntando sobre a natureza das linhas espectrais estelares, nos demos conta de como calcular a temperatura superficial das estrelas: olhando sua cor ou, mais precisamente, calculando a partir do pico de emissão de corpo negro (conforme feito no capítulo 4) ou, mais realisticamente, através dos índices de cor (seção 4.2). Conhecendo a temperatura, podemos calcular o fluxo de luz na superfície da estrela. Conhecendo o fluxo, podemos compará-lo com a luminosidade total da estrela (que pode ser sabida a partir da magnitude aparente e da distância à estrela, medida por paralaxe ou outra técnica) e obter o raio da mesma. Repare que a luminosidade, por um lado, e a temperatura / cor / fluxo superficial, por outro, foram medidos independentemente. A princípio, não há porque supor que essas duas grandezas, cor e brilho, estejam relacionadas: pode haver estrelas pouco brilhantes e azuis ou muito brilhantes e vermelhas. Relacionando a cor e o brilho obtemos o raio da estrela, que a princípio pode ser qualquer: podemos ter estrelas de quaisquer cores e quaisquer raios. Talvez uma correlação entre essas grandezas pudesse dar indicações adicionais sobre a natureza das estrelas. Examinaremos a questão mais detidamente, mas não sem antes enfrentar um problema de classificação.

Precisamos fazer mais uma ressalva a esse assunto: as intensidades das linhas de absorção das estrelas não são determinadas *unicamente* pela sua temperatura. Como veremos, estrelas de

mesma composição química, quando a temperaturas diferentes, apresentam espectros diferentes, como consequência da energização e ionização dos elementos químicos, que ocorrem cada um em uma faixa de temperatura. Há, porém, estrelas com composições químicas ligeiramente diferentes. Podemos também, então, classificar as estrelas quanto à sua METALICIDADE, ou presença de metais. Estrelas com grande metalicidade apresentam grande proporção relativa de metais em sua composição. Essa proporção indica como era a nuvem de gás da qual se originou a estrela, e na próxima lista veremos que isso pode nos ajudar a estabelecer uma ordem no aparecimento das estrelas. Poderemos falar de estrelas de *primeira* e *segunda geração*. Contentemo-nos, por enquanto, em conhecer o fato de que a composição química das estrelas pode apresentar ligeiras variações.

8.2 Classificações Espectrais

Uma prática muito comum na produção de conhecimento é, sempre que se tem um dado conjunto de objetos a serem estudados (uma população de animais, um conjunto de estrelas, álgebras de Lie), tentar classificá-los com base em alguma propriedade que os diferenciem, que os separem em outros grupos. Apesar de este tipo de postura parecer simplesmente descritiva, para efeito de catalogação, muitas vezes o processo de separação em grupos de características comuns nos permite identificar, nesses grupos, outras características comuns que não eram evidentes antes, e assim obter correlações entre propriedades desses objetos, e até mesmo leis que envolvam essas propriedades. Era a idéia do método de análise (literalmente, divisão) de Aristóteles.

Uma das primeiras classificações foi de 1868, do frei Ângelo Secchi, astrônomo jesuíta e italiano. Baseado na temperatura das estrelas, ele as dividiu em quatro classes, notando as linhas típicas de cada classe:

- Tipo I: Branco-azuladas. Espectro quase contínuo, com poucas linhas, as algumas de hidrogênio muito intensas. Exemplos: Vega, Sirius, Altair, Bellatrix. Era a classe mais numerosa.
- Tipo II: Amarelas. Linhas de hidrogênio mais fracas, mas muitas linhas de Ferro e Magnésio. Exemplos: Sol, Arcturus e Capella; classe um pouco menos numerosa.
- Tipo III: Vermelho-alaranjadas. Diversas linhas metálicas, alternadas a zonas com matizes escuras. Exemplos: Betelgeuse, Antares e poucas outras.
- Tipo IV: Vermelho profundo. Linhas fortes de carbono (C^2 , CH , CN , etc.), mas com poucas linhas metálicas. Exemplos: apenas estrelas fracas e pouco conhecidas, como R Leporis (a *Estrela Carmin de Hind*), observada pelo britânico J. R. Hind poucas décadas antes, em 1845, ou Y Canis Venaticorum (*La Superba*), descoberta pelo próprio Secchi.

Em 1877, Secchi adicionou a Classe V, estrelas com linhas de emissão (!), como Navi (*gamma Cas*) e Sheliak (*beta Lyr*).

O alemão Hermann Carl Vogel, do Observatório de Potsdam, nomeava as classes III e IV como IIIa e IIIb, porque não acreditava que as diferenças entre essas estrelas eram suficientes para fazerem parte de classes distintas. Ele acreditava que as estrelas iam esfriando (e se avermelhando) com a idade². Na Inglaterra, Norman Lockyer, o fundador da revista *Nature*, fez outra classificação baseada em temperatura, mas que variava de 1 a 10. Ele acreditava que as estrelas nasciam frias, depois esquentavam e voltavam a resfriar; assim, as estrelas subiam da classe 1 para a 10 e depois desciam novamente da 10 para 1. Nos Estados Unidos, por outro lado, o time de Edward Pickering, do Observatório de Harvard, também trabalhou em algumas classificações.

²A ideia era de seu antigo orientador, Karl Zollner

O time de Pickering, que incluía diversas mulheres, como a famosa Henrietta Leavitt, estava trabalhando em um catálogo sistemático de espectros estelares. O resultado foi o *Draper Catalogue of Stellar Spectra*, publicado em 1890. Os espectros do catálogo seguiam uma classificação similar à de Secchi mas mais detalhada, baseada principalmente na intensidade de linhas de hidrogênio (o que, como vimos, era um indicativo razoável da temperatura). Assim, as numerosas estrelas do tipo I foram divididas em classes de A a D; as do tipo II, nas classes E a L; as do tipo III se tornaram a classe M e as do tipo IV, da classe N. Além disso, havia algumas classes adicionais: O eram as estrelas com linhas de emissão (a classe V de Secchi), P os espectros de nebulosas planetárias e Q para as estrelas que não se encaixavam nas outras classes. Em uma nova classificação, sete anos depois, Antonia Maury (que também era do time) passou a classe B (linhas de hidrogênio mais estreitas) para a frente da classe A (linhas mais largas); as do tipo B pareciam mais quentes. Já na classificação de 1901, de Annie Cannon, a estranha classe O foi colocada à frente de todas as outras, pois elas eram ainda mais brilhantes. Por outro lado, várias classes intermediárias foram engolidas, restando apenas B, A, G, K, M. É importante lembrar que as teorias sobre corpo negro também estavam sendo desenvolvidas nesta época, e com isso também as estimativas de temperatura das estrelas.

Enfim, diversos meios de classificar as estrelas foram propostos, mas o catálogo do time de Harvard era bastante completo, possuindo algo da ordem das centenas de milhares de espectros classificados. Em 1910, na reunião da União Internacional para Estudos Solares, a comunidade de astrônomos discutiu para escolher uma das classificações como padrão. A classificação escolhida acabou sendo a de Harvard mesmo, seguindo a tendência do eixo científico se mover da Europa para os Estados Unidos (então já há décadas a maior economia do mundo). Por isso, para referência, deixamos aqui uma tabela com essa classificação³.

A figura 8.4 mostra alguns espectros típicos dessas classes espectrais.

Essas classes podem ser divididas em subclasses. Ainda no trabalho de 1901, Annie Cannon usou números de 0 a 9 para fazer subclasses. Assim, um espectro F5G seria um que fica a meio caminho entre F e G; já um A2B fica a dois pontos de distância de A e 8 pontos (cinco vezes mais) de B, enquanto um K9M fica dez vezes mais distante de K que de M. Mas em 1912, ela mesma renomeou as classes em uma linguagem que nós acharíamos menos estranha, fazendo subclasses que variassem mesmo entre 0 e 9. Assim, estrelas das classes A, A2B, F5G e K9M viraram A0, A2, F5 e K9, respectivamente. É assim que usamos até hoje (experimente olhar a classe de uma estrela na Wikipedia).

Além disso, há algumas classes alternativas, determinadas a partir de estrelas mais específicas. A classe N para estrelas carbonadas (o antigo grupo Secchi IV) continuou sendo usada, junto a uma nova classe R, para outras estrelas carbonadas menos vermelhas. Havia ainda a classe S, com linhas de óxidos moleculares (TiO, ZrO, LaO), associadas aos processos S⁵. No outro extremo do espectro, há ainda a classe W, para as estrelas supergigantes Wolf-Rayet⁶. As frases mnemônicas são usualmente estendidas para essas classes⁷.

As classes R e N foram recentemente condensadas em uma única classe C para estrelas carbonadas; sua faixa de temperaturas é compatível com as temperaturas das classes K e M. Há

³Para decorar a ordem das classes, há algumas frases mnemônicas particularmente ridículas. A mais clássica é: *Oh! Be A Fine Girl, Kiss Me!* Antigos aprendizes criaram uma ainda mais tosca: *OBA! Frango Grelhado Kom Molho!* Se você tiver sugestão de alguma frase melhor ou menos ridícula, envie-nos!

⁴As cores aqui diferem das convencionalmente apresentadas em livros de astronomia, mas são baseadas no que nós realmente vemos quando vemos tais estrelas a olho nu, ou como veríamos sem a atmosfera. Discutimos ligeiramente o assunto no final do capítulo de Corpo Negro. A fonte é <http://www.vendian.org/mncharity/dir3/starcolor/>

⁵Os S-process vêm de slow-neutron-capture-process, processos de fusão nuclear que acabam produzindo diversos elementos mais pesados que o Ferro. Discutiremos melhor ainda os processos nucleares em geral.

⁶*Estrelas Wolf-Rayet* são supergigantes com alta perda de massa e um curioso perfil de linhas de absorção e emissão.

⁷A frase tradicional pode ser reescrita como *WOw! Be A Fine Girl, Kiss Me Right Now! Smack!* e a nossa frase, ainda mais tosca: *WOBA! Frango Grelhado Kom Molho Rose Na Salada!*

	Temperatura	Cor Visível ⁴	Características Espectrais	Exemplos
O	40 000 a 20 000 K	azul	Linhas de emissão diversas, linhas HeII fortes, HI médias e espectro intenso em UV	Mintaka, Alnitak (duas das três marias)
B	20 000 a 10 000 K	azul esbranquiçado	Linhas fortes de H e He neutros (HI e HeI)	Rigel (α Ori), Spica (α Vir), Algol A
A	10 000 a 7500 K	azul mais esbranquiçado	Linhas HI muito fortes	Sirius (α CMA), Vega (α Lyrae)
F	7500 a 6000 K	branco	Linhas CaII muito fortes e linhas de metais ionizados. HI fracas, mas ainda visíveis	Polaris (α UMi), Canopus (α Car), Procyon (α CMi)
G	6000 a 5000 K	branco amarelado	Linhas fortes de metais ionizados e neutros, HI bem fraco	Sol, Capella (α Aur), Alfa centauri A
K	5000 a 3500 K	amarelo-laranja	Linhas metálicas dominantes e um contínuo azul fraco	Arcturus (α Boo), Aldebaran (α Tau), Alfa centauri B
M	3500 a 2000 K	vermelho-laranja	Bandas moleculares muito fortes, como óxido de titânio (TiO). Linha CaI (4226 Å) dominante e HI ausente	Betelgeuse (β Ori), Antares (α Sco), Próxima Centauri, Estrela de Barnard

Tabela 8.1: Classificação espectral de Harvard, ordenada segundo a temperatura das estrelas – forma como é atualmente utilizada. Fontes: Kepler de Oliveira e Wikipedia.

também alguns que usam a classe L, abaixo da M. As classes S (processo S), P (nebulosas planetárias) e Q (agora não mais para estrelas estranhas quaisquer, mas para novas) ainda são usadas. As *anãs brancas*⁸, geralmente são classificadas como D (de *dwarf*), que podem ser DA, DB, DQ... Por fim, há as interessantes classes T e Y, com temperaturas realmente mais baixas (entre 700 e 1300 K), que são *anãs marrons*. A razão pela qual elas não faziam parte das classificações originais é que elas são muito fracas, com o pico no infravermelho! As anãs marrons só começaram a ser observadas com os telescópios espaciais, uma vez que a atmosfera terrestre absorve boa parte da luz nesta faixa⁹.

A razão para a intensidade das linhas estar relacionada à temperatura das estrelas, que é também a razão para as letras na classificação de Harvard terem ficado na ordem bizarra em que ficaram, foi desenvolvida apenas na década de 1920, com as teorias sobre dissociação molecular e ionização atômica, que estudamos nas primeiras unidades deste volume. Repare, na classificação de Harvard, que tanto as estrelas de temperatura mais alta (tipo O) quanto as de temperatura mais baixa (tipos K e M) têm linhas de hidrogênio bastante fracas; o máximo de intensidade delas (tipo A) fica em um nível intermediário. O mesmo vale para as linhas de todos os outros elementos, como podemos ver no gráfico 8.5. A explicação atômica para isso é simples: em temperaturas muito baixas, os átomos estão quase todos no estado fundamental, e há poucas colisões que os excitam, pouca energia absorvida; em temperaturas mais altas, o hidrogênio está quase todo ionizado. Em ambos os casos (classes F, G ou classe O, no caso do hidrogênio), há pouca absorção nessas bandas e as linhas são fracas. Assim, mais do que a composição química da fotosfera estelar, o que os espectros contam é a temperatura em que elas estão.

⁸Falaremos mais adiante sobre anãs brancas e anãs marrons.

⁹Veja capítulo de Atmosfera no Volume 2

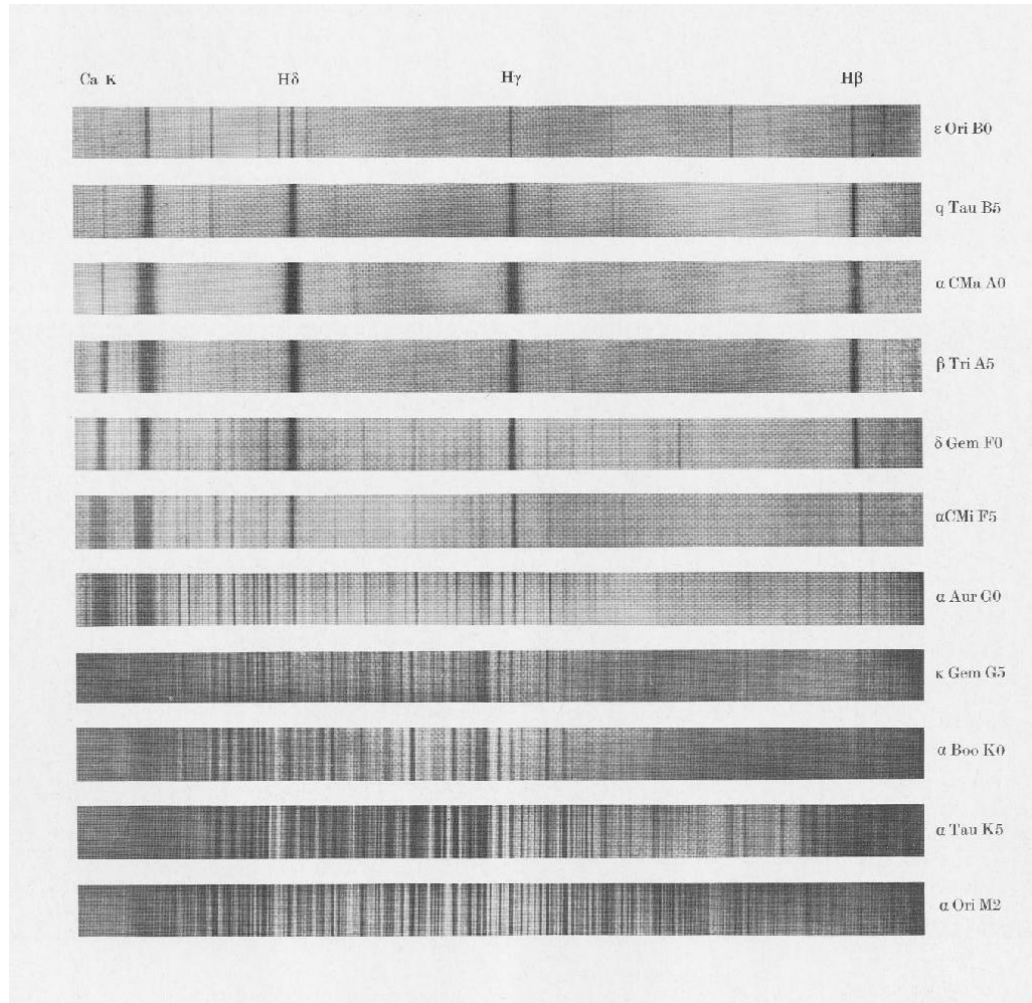


Figura 8.4: Espectros de várias estrelas diferentes. O nome da estrela está à direita do seu espectro, seguido da classificação de Harvard para essa estrela. Acima das linhas mais evidentes, está o elemento químico relacionado a elas, com a contagem da linha quando o elemento apresenta mais de uma.

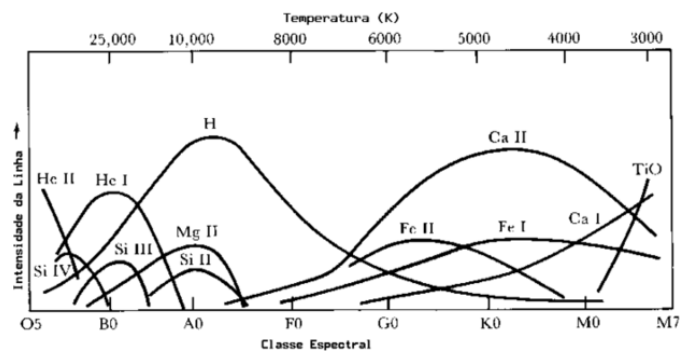


Figura 8.5: Intensidade das linhas de absorção de cada elemento e íon como função da classe espectral (ou, equivalentemente, como função da temperatura da superfície da estrela).

8.2.1 Classificação de Luminosidade

Houve ainda um aperfeiçoamento da classificação de Harvard, adicionando um segundo eixo nela: o da luminosidade das estrelas. Isso foi feito pela primeira vez em 1943, por astrônomos do *Yerkes Observatory*, nos EUA, como William Wilson Morgan, Phillip C. Keenan e Edith Kellman. A ideia é engenhosa e antecipa alguns assuntos das próximas seções.

Para explicar, precisamos investigar um detalhe simples mas importante sobre as linhas espectrais. De acordo com os modelos de emissão atômica, a absorção acontece apenas para alguns valores específicos de comprimento de onda, e não ocorre para valores um pouquinho maiores ou menores. Assim, as linhas deveriam ser exatamente linhas, incrivelmente finas e, portanto, invisíveis. Mas as linhas que vemos nos espectros são (às vezes bastante) largas.

Isso acontece porque os átomos nunca estão parados. Eles possuem o movimento térmico natural (desde que estejam a temperaturas acima de 0 K) e sofrem pressão por razões diversas. Assim, cada vez que um átomo emite ou absorve um fóton, ele pode fazê-lo com um comprimento de onda deslocado, por conta do nosso velho amigo, o Efeito Doppler. Assim, diversos átomos independentes, com velocidades de módulos diferentes e em todas as direções vão acumulando pequenos *red-* e *blueshifts*, com vários valores, distribuindo-se de uma maneira que poderíamos aproximar por uma gaussiana. Em particular, gases com átomos mais agitados tendem a ter linhas mais largas.

Assim, comparando estrelas com o mesmo fluxo superficial (mesma cor e temperatura da fotosfera) mas com raios (e, portanto, luminosidades) diferentes, a estrela com raio maior tende a ser menos densa, ao menos na sua superfície. Nas estrelas mais densas, há mais interações, a pressão é maior, assim como a gama de velocidades dos átomos, os desvios espectrais e as larguras das linhas. Veja na figura 8.6.

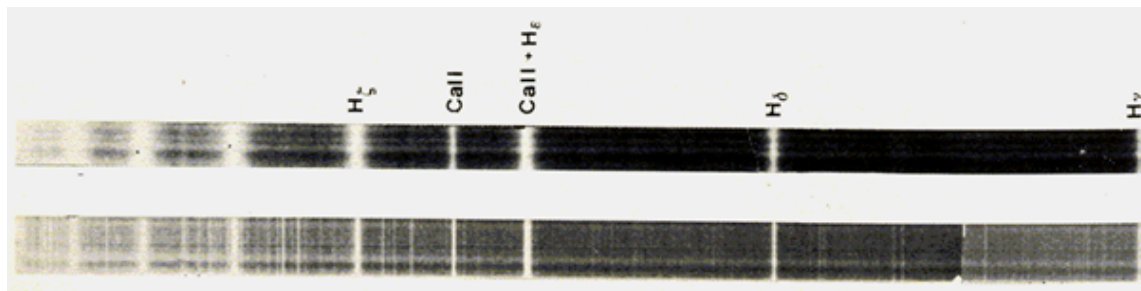


Figura 8.6: Comparação de dois espectros diferentes: uma estrela normal acima e uma supergigante abaixo. Note a diferença na largura das linhas entre ambas. Fonte: <http://xoomer.virgilio.it/hrtrace/YerkesSp.htm>

A percepção da largura das linhas espectrais não era uma ideia nova. Ainda no final do século XIX, Antonia Maury (aquela da equipe de Pickering em Harvard) havia proposto indexar os tipos espectrais com as letras a, b e c, dependendo da largura de suas linhas espectrais. Em 1914, Arnold Kohlschütter e Walter Adams, do Observatório de Mount Wilson, encontraram uma forte correlação entre a luminosidade das estrelas e as razões entre as intensidades de algumas linhas. Desde então, passou-se a usar o espectro para encontrar a luminosidade de novas estrelas (sem isso, precisaríamos de medidas precisas das distâncias estelares, usando-as junto com as magnitudes aparentes).

Por fim, as classes da equipe de Yerkes eram:

I Supergigantes

II Gigantes Luminosas

III Gigantes

IV Subgigantes

V Seqüência Principal

VI Subanãs

VII Anãs

Hoje adiciona-se a classe 0, para hipergigantes como η Carinae (especialmente estudada pelo astrônomo brasileiro Augusto Damineli) ou a Estrela da Pistola (que ganha esse nome por causa da Nebulosa da Pistola, que ela ilumina).

A Classificação de Yerkes é utilizada até hoje, junto com as classes de Harvard. Assim, se dizemos que o Sol é uma estrela G2V, isso significa que ele é uma estrela amarela (com $T \sim 5800$ K) e que é da seqüência principal; Aldebaran, K5III, é gigante e vermelha, com $T \sim 4100$ K. Procure algumas classes espectrais na Wikipedia ou no Stellarium e divirta-se.

8.3 Diagrama HR

Depois dessa grande volta pelas classificações, podemos voltar à pergunta não-respondida do início: existe alguma relação entre a temperatura / cor / fluxo superficial e a luminosidade / raio?

Para responder a isso, nada melhor do que dispor de muitos dados espectrais e de luminosidade e plotá-los em um gráfico. Foi o que fizeram, de forma independente, o dinamarquês Ejnar Hertzsprung, em um artigo de 1905, e o americano Henry Russel, em uma apresentação de 1912 para a *Royal Astronomical Society*. Hertzsprung o fez para estrelas das Plêiades e das Híades; como essas estrelas estariam todas à mesma distância da Terra, era possível tomar a magnitude aparente como proporcional à luminosidade. Russel, que trabalhava com a determinação de paralaxes estelares, fez o diagrama para estrelas genéricas. O resultado que eles encontraram foi algo parecido com o seguinte gráfico:

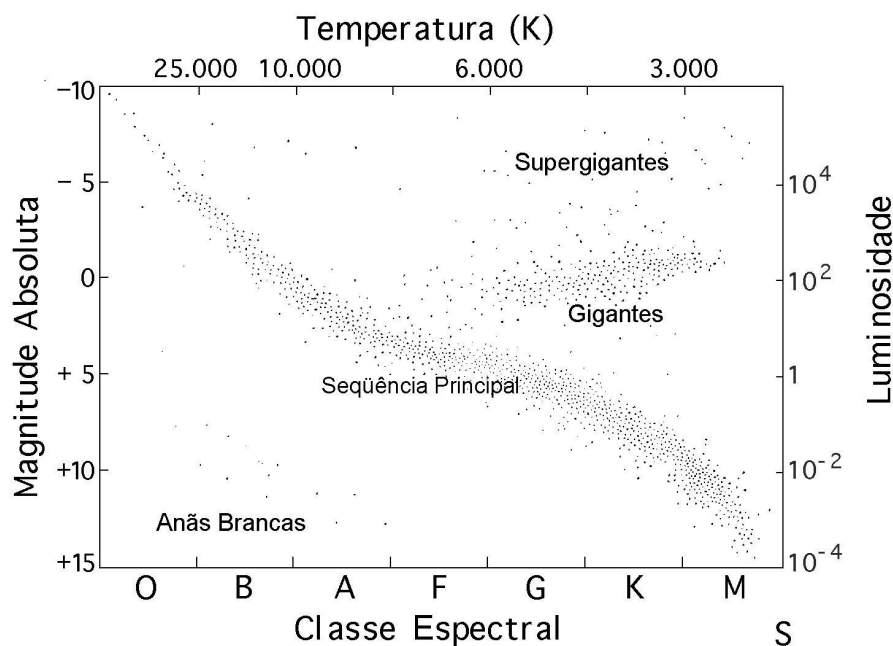


Figura 8.7: Diagrama HR, mostrando uma distribuição não-homogênea das estrelas com relação às características temperatura e luminosidade. A luminosidade está medida em relação à luminosidade do Sol: Assim, 10^2 significa que a estrela tem luminosidade 100 vezes maior que a do Sol. Note também que, conforme discutido, quando a luminosidade é multiplicada de 100, a magnitude absoluta *diminui* 5 unidades.

Nesse diagrama, salta os olhos o fato de as estrelas se distribuírem apenas em pequenas regiões. A maioria das estrelas se localiza na diagonal inversa do diagrama; isto é, quanto maior sua luminosidade, mais alta a temperatura. Há também um grupo relativamente numeroso de estrelas na parte superior do diagrama, chamado grupo das GIGANTES VERMELHAS (estrelas muito luminosas e vermelhas, e por isso grandes, como pode ser calculado da fórmula que relaciona a luminosidade, a temperatura e o raio da estrela), e um outro grupo, no canto esquerdo de baixo, um grupo mais tênue, o das ANÃS BRANCAS.

Essa inusitada correlação levou quase imediatamente a modelos físicos (termodinâmicos, mecânicos, nucleares) do funcionamento das estrelas e de sua evolução. O gráfico foi imortalizado em todos os cursos básicos de astronomia como o DIAGRAMA HR; os modelos é que veremos na próxima seção.

46- Localize as seguintes estrelas no Diagrama HR: o *Sol*; *Sirius A* e *Sirius B*; *Canopus*; *Betelgeuse* e *Rigel*; α *Centauri A*, α *Centauri B* e *Proxima Centauri*; *Acrux*; *Polaris*; e a *Estrela de Barnard* (Resposta no próximo capítulo).

47- Uma estrela O8 V possui magnitude aparente +1. Calcule a distância da estrela à Terra.¹⁰

¹⁰Se você não leu o capítulo de medidas de brilho no Volume 3 é altamente recomendável que o leia.

Capítulo 9

Evolução Estelar

Estamos em uma vasta região no espaço, preenchida por algum gás difuso, provavelmente hidrogênio. A temperatura das redondezas é algo entre 10 e 20 K, e as moléculas erram pela imensidão livre. Então algo anormal acontece, talvez uma explosão não muito distante, ou a aproximação de algum grande objeto; com isso, uma onda de pressão desce comprimindo o gás. As moléculas são lançadas umas contra as outras, e os choques entre elas aumentam consideravelmente, aumentando assim a temperatura. Começam a se formar pequenos aglomerados de dezenas de átomos; esses aglomerados também vão se aglomerando, juntando centenas, e milhares, e milhares de milhares de moléculas. A partir de um certo tamanho, a força gravitacional começa a ser significativa: as bolotas passam a atrair os gases à sua volta, o que aumenta ainda mais a massa daquelas, e as faz atrair mais e mais gás. Então as aglomerações de gás – não mais que poucas centenas por toda a nuvem – já são muito mais densas que a nuvem ao redor, e começam a tomar forma esférica. Não obstante isso, um disco mais denso surge em torno das esferas, de gás mais externo, achatado pela rotação. A temperatura já ultrapassa os 2000 K, e a região passa a ser visível no infravermelho. O hidrogênio já perdeu sua forma molecular, e os elétrons estão todos livres dos núcleos atômicos, que tendem a se assentar no centro. Muito gás ainda cai na esfera, e sua massa ainda aumentará em muitas vezes. Logo a densidade supera o limite a partir do qual os fótons começam a ficar aprisionados no gás – o que aumenta ainda mais aceleradamente a temperatura. A agitação dos núcleos atômicos no centro cresce, e começa a estabilizar a contração gravitacional; o processo, contudo, está longe do fim.

Das 20 000 UAs iniciais, o diâmetro da bola já já diminuiu para menos de 1 UA. A temperatura chega em 4000 K na superfície e 5 000 000 K no núcleo. A pressão gravitacional continua aumentando, bem como a absorção de fótons pelos núcleos e a frequência dos choques entre esses núcleos. Quando a temperatura nuclear atinge 10 milhões K, os choques são tão fortes que núcleos de hidrogênio começam a se quebrar e a se fundir, formando deutério. A energia liberada em cada uma dessas fusões é enorme, o que só acelera o aumento da temperatura. A opacidade da superfície se quebra, e dela brotam feixes de infravermelho. As moléculas de deutério, já numerosas, começam a se fundir também, e formar hélio – processo que libera ainda mais energia. A pressão gravitacional enfim não é mais capaz de suportar a pressão da energia liberada, e dois jatos de gás saem dos pólos da esfera. A nuvem densa agora não ganhará mais massa, e logo estabilizará a pressão interna. A energia produzida nas fusões chegará enfim à superfície, e a nuvem voltará a liberar luz visível; terá nascido uma estrela.

Essa, pode-se dizer, é a essência da uma estrela: um gás que se mantém sob duelo constante da pressão de reações nucleares, que tende a espalhar o gás, contra pressão gravitacional, que tende a comprimi-lo. Portanto, segundo essa visão, entender o comportamento de uma estrela é entender como funcionam os processos gravitacionais (coisa que exploramos bastante no Volume de Mecânica Celeste) e entender como são as reações nucleares nos núcleos das estrelas.

Este capítulo é uma das consolidações dos estudos astrofísicos: no intrincado e conhecido modelo astrofísico de evolução estelar. Este modelo será puxado aqui a partir de duas pontas,

uma observacional (o diagrama HR), vindo do capítulo anterior, e uma física (as reações nucleares do Sol).

Quando construímos um modelo físico para o Sol, no capítulo 7, mostramos que a hipótese mais plausível para a produção de energia do nosso Astro Central é a fusão de átomos leves. Por uma aplicação do Princípio Copernicano (segundo o qual o nosso Sol deve ser igual, em essência, a todas as outras estrelas), estendemos este mecanismo para a produção de energia de todas as outras estrelas. Miríades de átomos fortemente agitados num núcleo estelar que, eventualmente, se chocam e se unem, formando um composto mais estável. A esse respeito, deixaremos momentaneamente a palavra com Edgar Morin, em *O Método*¹:

A formação do carbono exige a ligação de três núcleos de hélio em condições extraordinariamente improváveis de temperatura e encontro. Dois núcleos de hélio que se encontram fogem um do outro em menos de um milionésimo de segundo. Somente se, em um tempo tão breve, aparecer para este par um terceiro núcleo de hélio é que haverá uma ligação do par, ligando-se também a este último núcleo, constituindo assim a tríade estável do núcleo do carbono. In abstracto, o nascimento de um átomo de carbono só poderia resultar de um fabuloso acaso. Mas, situando-se no coração desta usina em chamas que são as estrelas (constituídos [estes corações] em sua maioria de hélio), onde as temperaturas de reação permanecem sob controle durante um tempo bastante longo, então concebe-se que se produziu ali um número extraordinário de colisões de núcleos de hélio ao acaso e que, entre essas colisões, há uma minoria de colisões produtoras de carbono. Existe assim, uma probabilidade local e temporal para que se forme no coração de uma estrela o muito improvável núcleo de carbono. Uma vez constituídos, estes núcleos muito fortemente coerentes vão resistir a inúmeras colisões e forças de ruptura e poderão sobreviver a inúmeras eventualidades.

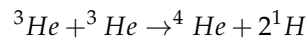
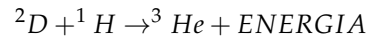
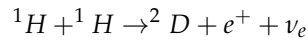
O exemplo é citado no livro de Morin em meio a uma discussão de porque existem objetos complexos no universo, se a Segunda Lei da Termodinâmica aponta a tendência justamente contrária: o calor se homogeneizará. Embora os átomos pesados sejam sempre muito menos prováveis, quando há um número tão grande de colisões, eles acabam se formando, mesmo que em mínimas quantidades. Contudo, uma vez formadas, elas também são muito mais estáveis e portanto sobrevivem a todas as colisões que acontecem. Com o tempo, eles vão por isso *acumulando-se* nas estrelas, como Hélio se acumula no Sol, em meio ao caos dos hidrogênios. Esse tipo de formação de coisas mais complexas opera em diversos outros níveis; Morin continua assim o parágrafo:

Beneficiando-se assim de uma seleção física natural, este carbono improvável/necessário, que dispõe de qualidades associativas muito ricas, torna possível, em condições locais determinadas, a constituição de moléculas de aminoácidos que, por sua vez, vão encontrar em células vivas as condições ao mesmo tempo improváveis e necessárias para a sua fabricação.

Voltaremos a esse assunto da complexidade no capítulo de cosmologia. Mas permaneçamos nas reações nucleares das estrelas. Segundo os modelos da física nuclear, as reações de fusão de hidrogênio acontecem em mais de uma fase. Primeiro dois núcleos H precisam se unir, com um próton transmutando-se em nêutron, formando-se assim o semi-estável núcleo de *deutério* (D) ou *hidrogênio pesado* (seu núcleo possui um próton e um nêutron). Logo, um deutério deve encontrar um terceiro núcleo de hidrogênio, formando *Hélio-3* (um caroço de hélio menor, com um nêutron em vez de dois). É aqui que é liberada quase toda a energia da reação. O Hélio-3, um pouco

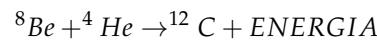
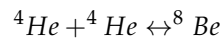
¹ Morin, Edgar. *O Método 1: A natureza da natureza*. Porto Alegre: Sulina, 2005. pp.76,77

mais estável, precisa então colidir com outro Hélio-3 para roubar-lhe o nêutron e produzir Hélio-4, deixando dois novos prótons prontos para novas reações. Escrevendo em notação de reações nucleares, fica assim:

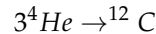
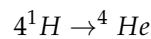


O número acima nos elementos é o número de partículas (prótons e nêutrons) de cada núcleo. As outras partículas não mencionadas são restos de reação: um antielétron e^+ e um neutrino ν_e ².

As reações do Carbono funcionam de maneira análoga: dois núcleos de hélio-4 unem-se formando berílio e, rapidamente, um terceiro hélio deve aparecer, formando o núcleo de carbono:



A seta dupla na primeira reação indica que ela é facilmente reversível, que o Berílio se desfaz de volta em dois Hélios em $2,6 \cdot 10^{-6}$ segundos, se não encontrar o terceiro Hélio. Podemos também escrever as equações omitindo os passos intermediários:



Lembremos que os núcleos de hidrogênio são prótons livres e os núcleos de hélio correspondem à radiação α , conhecida na radioatividade. Por essa razão, a primeira seqüência de reações, em que entram seis prótons e voltam dois, é conhecida como CICLO PRÓTON-PRÓTON (ou p-p); a segunda, PROCESSO TRIPLO- α .

9.1 Seqüência Principal

A narrativa de criação que empreendemos no início do capítulo deixa indicado o que confirmaremos ao longo das páginas seguintes: que a característica fundamental para se determinar a evolução de uma certa estrela é sua massa. Considerações cosmológicas nos levam a imaginar que as nuvens de gás pelo universo não sejam muito diferentes entre si: tenham aproximadamente a mesma temperatura (a não ser que estejam próximas de estrelas) e a mesma composição química, de hidrogênio, o elemento mais simples e mais abundante no Universo. Na formação da esfera de gás, portanto, o fundamental é saber *quanto* gás se aglomerou, qual a massa da esfera gasosa em formação. Em uma primeira aproximação, as pequenas variações químicas e

² Essa é uma reação-padrão da física de partículas: quando um próton se transforma em um nêutron, ele deve liberar outras duas partículas residuais, por questão de conservação. A MASSA é conservada na reação: a massa do próton é parecida com a do nêutron; para conservar a CARGA ELÉTRICA, deve ser liberada uma partícula com pouca massa e toda a carga do próton: um antielétron ou *pósitron* (que tem massa igual à do elétron, mas carga oposta). Entretanto, a liberação do pósitron exige que se libere uma segunda partícula, com quase nenhuma massa, nenhuma carga, mas que saia em alta velocidade, conservando a QUANTIDADE DE MOVIMENTO. Foi assim que foi previsto teoricamente o *neutrino*, que não demorou a ser detectado em laboratório. Por uma dessas felizes coincidências do trabalho científico, passou a se observar neutrinos vindos do Sol!! As observações dessa estranha partícula que tinha sido prevista para resolver um problema teórico, deram mais confiabilidade simultaneamente ao modelo de energia do Sol e à própria existência do neutrino.

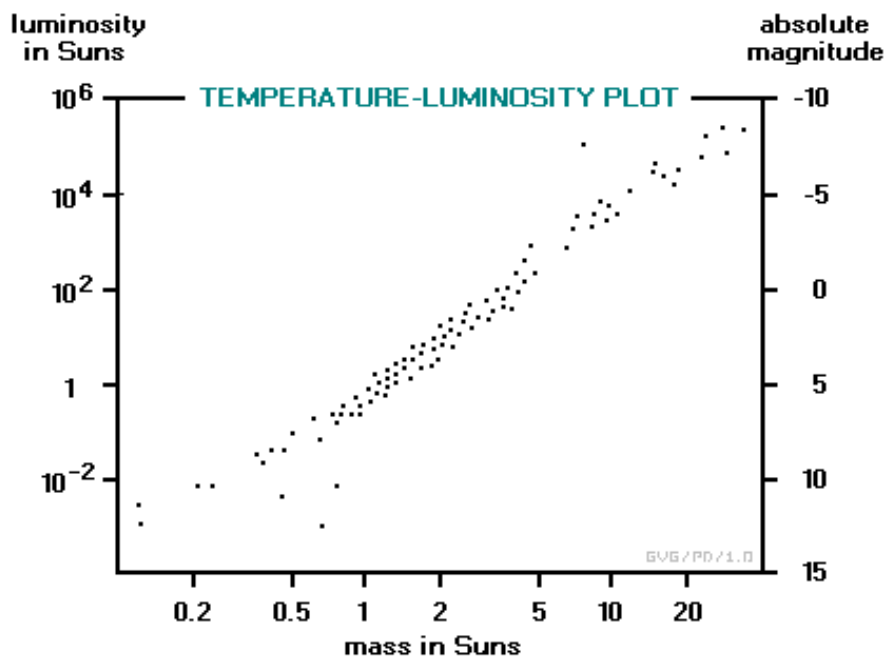
outras características iniciais da nuvem como rotação e campo magnético podem ser desprezados. Aqui, nesta etapa, o mais importante é saber a massa da nuvem por si só, embora as outras características também possam ser importantes quando tratarmos de outros temas.

Falando de massa de uma estrela, será que na galáxia podemos encontrar qualquer estrela de qualquer massa? De cara, supomos que exista pelo menos um limite inferior: é estranho imaginar estrelas do tamanho de pessoas, ou mesmo de planetas. Se a ignição inicial da estrela acontece graças às altas pressões centrais devidas à contração gravitacional, podemos argumentar que nuvens com massa muito baixa não conseguem atingir as temperaturas necessárias pra a fusão – antes disso, a pressão térmica é suficiente para contrabalançar a contração gravitacional. De fato, pode-se calcular teoricamente esse limite, que é algo em torno de $0,08 M_{\odot}$. Provavelmente muitas estrelas fracassadas, fetos que não vingam, nascem por aí. Eles são conhecidos como ANÃS MARRONS.

Além disso, é de se esperar que, numa galáxia qualquer, as estrelas de baixa massa sejam muito mais numerosas que as de alta massa. A diferença é realmente grande: na Via Láctea, para cada estrela de $50 M_{\odot}$ que se forma, formam-se 200 de $10 M_{\odot}$, 400 de $3 M_{\odot}$ e 100.000 estrelas de uma massa solar!!

Dadas as condições e a distribuição de massas, passemos à questão fundamental: quais são as relações entre a massa de uma estrela e suas características observáveis? O que nossa intuição física tem a dizer sobre isso?

Se as estrelas obtêm sua energia quebrando núcleos atômicos, é de se esperar que, quanto maior a massa da estrela, maior o número de átomos a serem quebrados, maior a pressão no núcleo, maior a taxa de reações e, portanto, maior a energia liberada pela estrela, maior sua luminosidade. De fato, isso possui confirmação experimental: se distribuirmos estrelas em um gráfico de massa *versus* luminosidade, obtemos:



Que, embora não esteja tão evidente neste gráfico, corresponde a uma expressão do tipo:

$$L \propto M^P$$

Isto é, L é proporcional a M^P , à P -ésima potência da massa M . Essa potência P também

depende da massa (M): para estrelas médias, como o Sol, $P = 4$ (a luminosidade é proporcional a M à quarta potência). P vale 3 para estrelas grandes, e 2,5 para estrelas pequenas. Esse é um ponto importante na descrição da evolução estelar: a luminosidade de uma estrela, sua taxa de reação, seu “metabolismo”, depende *somente* da massa inicial. Tomando um diagrama HR, podemos desenhar neles linhas quase horizontais que indicam também as massas das estrelas!³

Por outro lado, uma massa maior implica uma produção energética maior e, portanto, uma temperatura maior em toda a estrela. – e uma curva de corpo negro mais quente⁴. Ou seja, a temperatura *também* é condicionada pela massa. Assim, quanto maior a massa inicial da estrela, maiores sua luminosidade e sua temperatura. Com um modelo como esse, em que todas as estrelas produzem energia da mesma forma (queimando hidrogênio em hélio), usando sua própria massa como combustível, chegamos à previsão de que, se fizermos um diagrama HR das estrelas, esperaríamos que elas se dispusessem numa faixa diagonal inversa no diagrama HR. Mas, God!, elas estão! De fato, 90% das estrelas estão numa faixa desse tipo, que havíamos batizado de SEQUÊNCIA PRINCIPAL.

- 48- Desenhe em um diagrama HR linhas que marcam estrelas com a mesma massa.
- 49- Desenhe em um diagrama HR linhas que marcam estrelas com o mesmo raio.
- 50- Qual o raio de uma estrela que tenha a mesma luminosidade do Sol, mas que seja da banda O? E de uma que seja da banda M?

9.2 Gigantes Vermelhas e Anãs Brancas

Estendendo o modelo de queima solar para todas as estrelas, já conseguimos explicar o comportamento de 90% delas no diagrama HR! Mas e quanto aos outros 10%? A produção de energia dessas outras estrelas deve ser diferente... Mas não muito diferente: não parece ser muito provável que existam estrelas com constituições físicas muito díspares. Além disso, como vimos, não conhecemos muitas outras fontes de energia, além de fusão nuclear, que possam sustentar uma massa de gás muito grande, e produzir uma luminosidade como as das estrelas... Pode ser que sejam fusões de outros átomos, mais pesados... Uma resposta pode vir do princípio fundamental da produção de energia: alguma hora, o combustível sempre acaba. O que deve acontecer com as estrelas quando acaba o combustível delas?

Antes disso, podemos estimar o *tempo máximo de vida* das estrelas. Quanto maior a massa da estrela, mais hidrogênio ela terá para queimar, porém a taxa de reações nucleares cresce também com a massa, dependendo do quadrado, do cubo e até da quarta potência da massa. Portanto a taxa de reações cresce muito mais rápido que a massa, fazendo com que estrelas de maior massa demorem menos tempo para queimar seu hidrogênio. Matematicamente:

$$T_{vida} = \frac{\text{reserva de energia}}{\text{gasto de energia}} \propto \frac{\text{massa de hidrogênio}}{\text{luminosidade}} \propto \frac{M}{M^P} = M^{1-P}$$

O primeiro fator é preponderante, e o *tempo de vida de uma estrela na sequência principal é inversamente proporcional à sua massa*. Para o Sol, esse tempo é estimado 10^{10} (10 bilhões) de anos. Como

³ Muita atenção, essa relação só é válida para as estrelas da sequência principal!!!! Quando a estrela sai da sequência principal sua luminosidade muda drasticamente, mesmo sem variação grande na massa.

⁴ Na verdade, há uma falha nesse argumento: a temperatura que define a curva de corpo negro é a temperatura *da superfície da estrela*. O caso é que a temperatura como um todo aumenta no interior, mas isso aumenta a agitação dos átomos, e aumenta o raio da estrela, “diluindo” mais a energia produzida. Em termos matemáticos, $L = 4\pi R^2 \sigma T_{sup}^4$. Com um L maior, temos também um R maior; mas como R aumenta muito pouco com L , ainda assim a temperatura é maior para estrelas com mais massa.

a Terra foi formada há 4,5 bilhões de anos, parece que restam ainda uns cinco bilhões de anos de funcionamento normal do Sol (teremos de deixar a Terra bem antes, em 500, no máximo 800 milhões de anos, quando sairmos da zona de habitabilidade – e não houver mais água líquida em nossa superfície). Por outro lado, uma estrela de $100 M_{\odot}$ dura apenas... hum... vocês podem calcular isso! Além do mais, nunca foi observado o estágio final de uma estrela de $0,2 M_{\odot}$, por exemplo, porque a idade do universo não foi suficiente para estrelas dessa massa deixarem de funcionar como estrelas de sequência principal.

- 51- Estime o tamanho máximo que uma estrela deve ter para abrigar vida como a nossa, em algum planeta da sua zona habitável. E para se gerar vida unicelular? (suponha que o processo leve aproximadamente o mesmo tempo que levou na Terra, onde as primeiras bactérias e algas surgiram na Terra há 3,5 bilhões de anos).

Para tentarmos imaginar como deve se comportar a estrela depois que acaba seu combustível, observemos o que acontece com o seu produto. Na verdade, não precisamos esperar o combustível acabar, apenas observar as assimetrias. Como o hélio é mais massivo que o hidrogênio, ele deve tender a se concentrar no centro, formando um núcleo que possui cada vez mais deste elemento e menos hidrogênio. Este último, empurrado para as camadas acima do hélio, vai formando uma camada mais externa, recobrando o núcleo. Essa camada que envolve o núcleo é onde estão os hidrogênios mais quentes; ela, por isso, passa a ser a região produtora de energia. O núcleo, cada vez mais um mero depósito de hélio, vai se contraindo levemente graças à sua própria pressão gravitacional. Com isso, sua temperatura sobe, levantando junto sua taxa de reação (do hidrogênio que ainda sobrou lá) e o tamanho da sua zona radiativa – aumentando o raio da estrela⁵. Repare que, como o caroço se contrai e aumenta sua taxa de reações, a luminosidade da estrela *aumenta*, enquanto suas camadas externas incham.

Em estrelas com uma rotação apreciável ou um campo magnético digno, há mecanismos que permitem a mistura desses elementos e retardam o processo. Mas nenhum processo de mistura é completamente eficiente; sempre há resíduos não-misturados que se acumulam. Para estrelas normais, a vida boa da Sequência Principal dura até que 10% do hidrogênio da estrela tenha sido queimado. Quando isso acontecer, quase nenhum combustível terá restado no caroço-depósito central, e sua massa ultrapassará um limiar crítico; começa um colapso gravitacional do núcleo, acompanhado por uma rápida expansão das camadas externas. A energia continua sendo produzida em uma casca de hidrogênio, com uma taxa ainda maior (pois mais interna). A superfície da estrela terá aumentado muito; e enquanto a temperatura do núcleo cresce fortemente, a da fotosfera diminui. Interessantemente, a estrela torna-se mais luminosa, mas também mais avermelhada (com menor fluxo superficial). Com isso, resolvemos o problema de um dos grandes grupos: a estrela migra para uma região superior do diagrama HR, iniciando uma nova fase da sua vida: a de GIGANTE VERMELHA.

Essa fase da vida estelar dura relativamente pouco: no caso do Sol, será algo em torno de 10^8 anos, 100 vezes menor que seu tempo na sequência principal. Ele vai então estar queimando hidrogênio em uma casca em volta do núcleo, produzindo mais hélio nessa camada, e aumentando cada vez mais a temperatura da região central. As camadas externas se expandem mais e mais, e a estrela fica mais gigante e mais vermelha. Com isso, a fotosfera do Sol deve chegar à órbita de Vênus (sic!), planeta que será engolido na ocasião.

A partir de então, existem dois destinos possíveis. O primeiro deles é o do envelhecimento natural: o caroço continua se contraindo, sua temperatura aumentando, a casca externa se expandindo. Conforme o núcleo vai se contraindo, a conservação do momento angular exige que a rotação da estrela vá aumentando. Isso acontece até que, na superfície da estrela, a aceleração

⁵É esse gradual aumento do raio que vai empurrando para fora a zona de habitabilidade.

centrífuga seja tão grande quanto a gravidade naquele ponto, e a estrela começa a expelir massa em uma chuva suave, perdendo gás para o meio externo. Esse gás se espalha esfericamente, formando uma NEBULOSA PLANETÁRIA⁶. Trata-se de um processo lento e gradual, perturbado de vez em quando por flares que expõem partes internas das estrelas, aumentando momentaneamente sua luminosidade.

Quanto ao núcleo, sua contração não pode durar para sempre. Quando a densidade já é muito alta, a repulsão entre os elétrons⁷ impede o núcleo de se condensar mais. A temperatura dele continua aumentando e expulsando para ainda mais longe as outras camadas, até que todo o hidrogênio do envelope tenha queimado ou expulso, quando sobra um caroço muito quente e morto – uma ANÃ BRANCA. (E com isso explicamos o terceiro grupo!). Com o tempo, a radiação remanescente no núcleo vai se esvaindo. Esse núcleo vai se resfriando, até se tornar uma *anã negra*.

- 52- Segundo esse modelo, os três grupos do diagrama HR têm uma sequência em que são percorridos: sequência principal, gigante vermelha e anã branca. O que quer dizer, em termos de evolução, o fato de existirem poucas estrelas entre a sequência principal e as gigantes vermelhas, em um diagrama HR?
- 53- Se todas as estrelas da sequência principal se tornam gigantes vermelhas um dia, porque o primeiro grupo tem muito mais estrelas que o segundo? Quantas estrelas espera-se encontrar a mais no primeiro grupo do que no segundo?
- 54- Em diagramas mais detalhados, podemos distinguir melhor certos outros grupos de estrelas, como as do ramo horizontal e as do ramo assintótico. Em contrapartida, a sequência principal é sempre muito bem distinguível, e tem muito mais estrelas que esses grupos. Por que? (*Dica 1: o tempo de vida durante o ramo horizontal é 10 vezes menor que o durante a sequência principal*)

Com esse modelo, já conseguimos explicar, em linhas gerais, a distribuição de estrelas do diagrama HR. Foi assim que esse diagrama levou às primeiras ideias sobre evolução estelar. Esses foram os primeiros modelos, do início do século XX; desde então, muita coisa nova já foi desenvolvida. Se, por um lado, os modelos físicos já são muito mais consistentes nos detalhes, por outro, o enorme aumento do número de estrelas catalogadas permitiu um diagrama HR com mais estrelas, mostrando outros agrupamentos menores – que, por sua vez, podiam ser ainda explicados pelos refinamentos no modelo teórico. É desses refinamentos que vamos tratar a partir daqui.

9.3 Horizontais e Assintóticas

O segundo destino que uma estrela pode ter, depois de ter se tornado uma gigante vermelha, é bem mais animador: se a massa da estrela for maior que meia massa solar ($0,5 M_{\odot}$), a temperatura do núcleo chega aos 100 milhões K, o que dispara uma outra reação nuclear: a queima de hélio em carbono. No momento em que se iniciam as novas reações, muita energia é produzida, de forma concentrada. O núcleo se expande e as camadas externas se retraem. A estrela atinge um novo equilíbrio, queimando hidrogênio em hélio numa camada externa, e hélio em carbono no núcleo. Ela agora é um pouco maior e mais luminosa. No diagrama HR, ocupa uma região logo acima da sequência principal, quase paralela a essa: o RAMO HORIZONTAL. Um sopro de juventude, e a estrela volta à vida ativa.

⁶O nome desse tipo de nebulosa deve-se ao fato delas serem muito grandes e esféricas, e terem sido, portanto, confundidas com discos planetários nas suas primeiras observações, na época dos telescópios toscos.

⁷Não estamos falando de repulsão eletromagnética, mas da que é descrita pelo Princípio de Exclusão de Pauli.

Durante o ramo horizontal, é comum que a estrela passe por uma fase de *estrela variável*. As maiores, dos tipos F, G e K, e magnitude absoluta entre -2 e -6, são chamadas de CEFÉIDAS⁸ (em homenagem à *δ Cephei*); as menores, com magnitude em torno de 0,5, de RR LYRAE. A variação periódica de brilho delas deve-se à chamada *zona de ionização parcial* dos átomos. Há uma certa camada de átomos, que em um dado momento perdem seus elétrons, e ficam ionizados. Sua energia cinética aumenta, e eles tendem a ocupar uma região mais alta da estrela, aumentando o raio estelar. Contudo, mais afastados do núcleo, desionizam-se e, com menor energia, voltam ao patamar inicial, para logo ionizarem-se outra vez. Repare que esse evento só causa efeitos perceptíveis nessa faixa de temperatura: em estrelas mais quentes, a faixa de ionização está muito próxima à fotosfera, e essa expansão levanta uma camada muito pequena da estrela; em estrelas muito frias, a camada está muito próxima ao núcleo, e a pressão térmica não é suficiente para levantar todas as outras camadas. O fato é que essa variação é espantosamente regular em uma variável, de forma que elas são usadas como bons medidores de distâncias de aglomerados e galáxias! As cefeidas têm período de pulsação entre 1 e 100 dias, e variação de brilho entre 0,5 e 3,5 magnitudes. Já as RR Lyrae têm um período menor que um dia, e variação de brilho de menos que uma magnitude.

O desenvolvimento estelar na fase de ramo horizontal é semelhante ao na sequência principal: desta vez, é o carbono que vai progressivamente se acumulando no núcleo, o que gerará logo uma nova contração. Passado pouco menos de um bilhão de anos (dez vezes menos tempo que na sequência principal), acontece outro colapso. Como o carbono é mais massivo que o hélio, o colapso é mais forte, e a gigante é ainda maior. Agora ela passa a fazer parte de um ramo paralelo ao das gigantes vermelhas, com uma subida ainda mais acentuada na direção das vermelhas: é o RAMO ASSINTÓTICO DAS GIGANTES.

Para o Sol, cuja superfície estará beirando a órbita de Júpiter, é o fim definitivo: suas camadas externas vão embora de vez, se expandido a uma velocidade entre 30 e 60 km/s, dissipando-se para formar uma nebulosa planetária, e deixando de resto um núcleo na forma de uma anã branca de carbono. Estrelas mais massivas ainda agonizam um pouco mais antes de morrer: o vento estelar torna-se muito intenso, e muitas chegam a passar por instabilidades térmicas, numa nova fase estrela pulsante, a das *Variáveis Mira* – nome dado graças à *Mira Ceti*, da Baleia (*Cetus*)⁹ – mas isso só é prenúncio de uma ejeção ainda mais violenta das camadas externas, e de uma morte ainda mais radical.

- 55- A nuvem que formou o Sol com certeza não era formada apenas de hidrogênio e hélio; se fosse, não teria se formado um planeta de silicatos como o nosso, nem seres feitos de carbono como nós. De onde vieram, então, os elementos que formaram os planetas do Sistema Solar? E depois que o Sol morrer, como ele vai contribuir para a composição química do universo? O que acontecerá com o gás da sua nebulosa planetária? Cenas dos próximos capítulos. . . Aguardem! Hiar hiar hiar

9.4 Supermassas e Buracos

As estrelas mais massivas (acima de $8 M_{\odot}$) formam um grupo à parte no diagrama HR e na história evolutiva das estrelas. As *supergigantes*, termo pelo qual são genericamente denominadas, já começam com uma pressão muito grande no núcleo. Depois de poucos milhões de anos (lembre-se que estrelas grandes não duram muito), a pressão já é naturalmente suficiente para

⁸Falaremos um pouco a mais sobre estas estrelas no capítulo 11.

⁹ O Período destas é muito maior que o das *Cefeidas* e *RR Lyrae*, algo da ordem de centenas de anos. E, no caso, de Mira Ceti, sua magnitude aparente varia entre 2,5 e 9,2 !!

queimar o hélio, sem ter que se passar pela deslegante fase de gigante vermelha. Assim, sua trajetória evolutiva é uma linha quase horizontal no diagrama HR, saindo do topo da sequência principal e indo na direção do vermelho. E se a pressão é grande o suficiente para queimar hélio sem passar por gigante vermelha, é claro que o processo não pára por aí. Logo a temperatura no núcleo atinge os 300 milhões K, e o carbono também é queimado, produzindo oxigênio (^{16}O) e neônio (^{20}Ne). Chegando a 1 bilhão K, atingimos a fase de produção de silício (^{28}Si), depois enxofre (^{32}S), argônio (^{36}Ar), cálcio (^{40}Ca), titânio (^{44}Ti) e cromo (^{48}Cr); a 4.5 bilhões K, ferro (^{56}Fe). Cada elemento novo gera uma nova camada de queima, e aumenta a concentração no núcleo, elevando a temperatura central, possibilitando uma queima nova. No final, são várias camadas queimando elementos simultaneamente; a estrela já tem um raio de pelo menos 100 $R_{\odot}$ – bem avermelhada, portanto. Tudo isso acontece antes que uma estrela média sequer tenha tempo de sair da sequência principal.

No entanto, sabemos do gráfico de energia por núcleon, da lista passada, que o ferro é o elemento menos energético de todos. A partir dele, a fusão de núcleos não produz mais energia, mas sim absorve. Como a estrela poderá sustentar-se, a partir de então?? Ela passou um tempo da ordem de 10 milhões de anos queimando apenas hidrogênio na sequência principal, depois 950 mil anos queimando hélio, 300 anos queimando carbono, seis meses queimando oxigênio e dois dias fazendo o silício virar ferro!! As pressões e temperaturas são tão absurdas quanto a taxa de reação do último elemento. Com o núcleo de ferro se compactando, é deflagrada a crise: os átomos de ferro se fundem em cobalto e níquel, e começam a *absorver* a pouca energia que ainda se produz! Em *alguns milissegundos*, a estrela toda desaba sobre si mesma e a pressão cresce numa velocidade inigualável. Chega-se ao limite de repulsão eletrônica das anãs brancas. A contração pára bruscamente. A matéria que vinha caindo atrás ricocheteia no novo núcleo rígido. Uma onda de choque destrói toda a estrela em poucos segundos: uma SUPERNOVA. Um fim trágico. Uma vida rápida, mas intensa. Todos os diversos elementos pesados se espalham na explosão. Ainda nela, elementos ainda mais pesados (até o urânio) são produzidos. Nenhuma outra estrela média terá contribuído tanto para o enriquecimento químico do universo como essa.

Com uma explosão desse nível, nem a pressão de repulsão dos elétrons é suficiente para segurar o colapso do núcleo. Os elétrons são lançados para dentro dos núcleos, fundindo-se com os prótons, formando nêutrons. Neutrinos são liberados no processo, e levam embora a quantidade de movimento dos elétrons, acelerando ainda mais a explosão da supernova. A repulsão dos nêutrons é menor, o que permite que o núcleo morto se estabilize com um raio menor – em torno de 20 km! Ele será uma ESTRELA DE NÊUTRONS, com uma massa em torno de $1,4 M_{\odot}$.

Entretanto, se a massa do caroço restante for maior que $2,5 M_{\odot}$, nem a pressão dos nêutrons é capaz de segurar o colapso, que continua, continua, continua... Até que o volume chegue nas ordens de grandeza onde imperam as regras quânticas, e nossa descrição vai ficando precária... Abaixo de um limite ainda menor, o volume do núcleo ultrapassa os limites do princípio de incerteza, e sequer podemos dizer qualquer coisa sobre a posição ou o tamanho daquele núcleo... Como não prevemos nenhuma interação física que possa frear o colapso, tendemos a afirmar que a massa toda colapsa num ponto de densidade infinita; mas para sermos rigorosos, devemos respeitar a nossa fronteira de ignorância, parando no limite a partir do qual a nossa física não é adequada. Afinal, abaixo desse limite, não sabemos de que possíveis interações podem acontecer – mais, não sabemos nem se faz sentido falar em interação, ou em gravidade!

Nosso limite de ignorância fica ainda maior se pensarmos no aspecto observável dessa situação: a de o corpo não possuir um raio. Na prática, o raio de um corpo define o valor máximo de campo gravitacional sob o qual se pode estar submetido. Na Terra, por exemplo, sabemos que nenhum corpo é acelerado por um valor maior que 10 m/s^2 ; cavando um túnel para se aproximar do centro da Terra, a massa “abaixo de você” diminui, o que faz g diminuir, até que, se aproximando do núcleo da Terra, com quase nenhuma massa atraindo você, g tende a zero.

Mas numa situação em que não há raio, ou seja, a massa está concentrada toda em um volume abaixo do mensurável – um ponto, consideremos – não há limite para a intensidade do campo. Quanto mais próximo do ponto você estiver, maior vai ser a aceleração sofrida por você e esse valor tende a infinito quando sua distância ao ponto tende a zero. Falando em outros termos, não existe uma velocidade de escape máxima; quanto mais próximo do ponto, maior a velocidade de escape. Assim, existe naturalmente uma distância-limite R_{sch} na qual a velocidade de escape é igual à velocidade da luz! Essa distância

$$c = \sqrt{\frac{2GM}{R_{sch}}} \therefore R_{sch} = \frac{2GM}{c^2}$$

é chamada **RAIO DE SCHWARZCHILD**. Ou seja, não enxergamos nada que esteja a uma distância menor que o Raio de Schwarzschild, porque a luz não tem velocidade suficiente para escapar dali e chegar aos nossos olhos! E como a luz é nossa única informação e, em princípio, nada viaja mais rápido que a luz, o Raio de Schwarzschild é um limite para as nossas informações, um limite de conhecimento – por isso, o limiar determinado por esse limite é chamado *horizonte de eventos*. Apenas uma grande esfera absolutamente negra, em que qualquer corpo que entre não pode ser mais de maneira nenhuma observado. É o famoso **BURACO NEGRO**.

- 56- O que aconteceria com a Terra se o Sol subitamente virasse um buraco negro?
- 57- Calcule o Raio de Schwarzschild para o Sol. Para a Terra. Para você. Agora deixe as elucubrações e calcule o Raio de Schwarzschild para algo que realmente pode virar um buraco negro, como Eta Carinae. Qual deve ser um valor razoável para horizontes de eventos de estrelas de grande massa?
- 58- As anãs brancas têm massa em torno de $0,6 M_{\odot}$, e raio em torno de 10 000 km. Já as estrelas de nêutrons têm massa de $1,4 M_{\odot}$ e raio de 20 km (isso mesmo). Calcule a densidade dos dois corpos. Compare essa densidade com a densidade de outros corpos densos. Qual a massa de uma colher de chá de anã branca? E de uma de estrela de nêutrons?

Talvez a supernova mais famosa da história tenha sido a que ocorreu em 4 de julho do ano 1054 d.C. na constelação do Touro. Nessa época, os europeus estavam muito ocupados com suas questões eclesásticas medievais (foi nesse mesmo ano que a Igreja Católica Romana e a Ortodoxa Grega se separaram definitivamente), então o fenômeno passou despercebido por lá. Em compensação, a prática astronômica chinesa era bem mais desenvolvida, e os chineses registraram detalhadamente a explosão. Segundo seus relatos, essa “estrela hóspede” (*ge ching*) podia ser vista durante o dia, brilhando quatro vezes mais que Vênus (isto é, com magnitude -6)! A supernova pôde ser vista sob a claridade do Sol durante 23 dias, e foi vista à noite a olho nu por 656 dias (quase dois anos). O que sobrou da explosão para nós foi a famosa Nebulosa do Caranguejo, formada pelo gás expelido no evento. Essa nebulosa é o objeto M1 (primeiro no Catálogo de Messier¹⁰).

Mas agora que já conhecemos o que acontece com a estrela em sua vida, podemos nos perguntar: e *limite superior* para a massa de uma estrela, existe? Também. As estrelas por volta das 70 ou 80 $M_{\odot}$ já são bastante instáveis, e passam por uma longa fase como estrelas variáveis. Além disso, como a produção de energia é muito intensa, a radiação exerce uma pressão tal que expulsa muito gás para fora da estrela, isto é, gera um vento muito intenso. Dentre elas, são conhecidas as **WOLF-RAYET**, que têm uma característica incrível: não tem linhas de hidrogênio no seu espectro! Descobriu-se com o tempo que a explicação para isso é que o vento foi tão forte que expulsou toda a camada externa de H, deixando a casca de Hélio exposta!! De todo modo, para

¹⁰Este catálogo está como apêndice no Volume 1

nuvens acima de $100 M_{\odot}$, a pressão de radiação rapidamente expulsa bastante gás, e a estrela passa a ter uma massa menor que $100 M_{\odot}$. Assim, nenhuma consegue ultrapassar esse limite por muito tempo.

- 59- Lembam o exercício do capítulo anterior envolvendo diagrama HR? Aqui está a resposta: (figura 9.1).

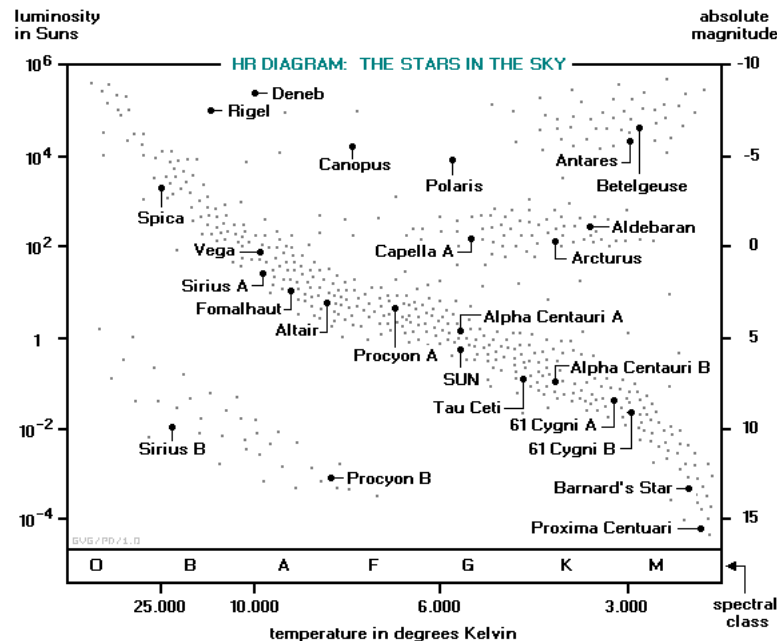


Figura 9.1

Agora diga em que fase de sua evolução está cada uma dessas estrelas (ou, bem, da maioria delas), estime suas massas, e descreva sua evolução daqui para frente. Para ajudar um pouco, aqui vai um diagrama HR com algumas linhas de evolução (figura 9.2):

A evolução dos sistemas duplos é bem mais complexa que a das estrelas isoladas, porque temos que levar em conta as interações entre as estrelas componentes. Só pra citar um exemplo, vamos falar de outro tipo de supernovas, as do tipo Ia (as que estamos acostumados a nos referir são do tipo II). Elas ocorrem em sistemas binários em que uma das componentes já é uma anã branca, com massa próxima do seu limite máximo. A outra estrela vai evoluindo segundo seu curso natural, e se expandindo para entrar em um ramo vermelho. Só que, eventualmente, esta última se expande tanto que suas camadas externas acabam invadindo a zona de atração gravitacional da anã branca; e esta passa a roubar massa da companheira. Aí a massa da anã branca aumenta de massa além do limite, até a pressão gravitacional romper a pressão dos elétrons. Ela colapsa subitamente, até a temperatura de queima de carbono. Com uma contração tão violenta, a queima ocorre de forma explosiva, gerando uma explosão que atinge uma luminosidade de $10^{10} L_{\odot}$! – muito mais brilhantes que as supernovas tipo II. Nestes casos, não sobra nenhum tipo de núcleo depois da explosão. Essas explosões são quase sempre da mesma maneira, motivo pelo qual são usadas para medir distâncias a certas galáxias. Mas isso é assunto para o próximo capítulo.

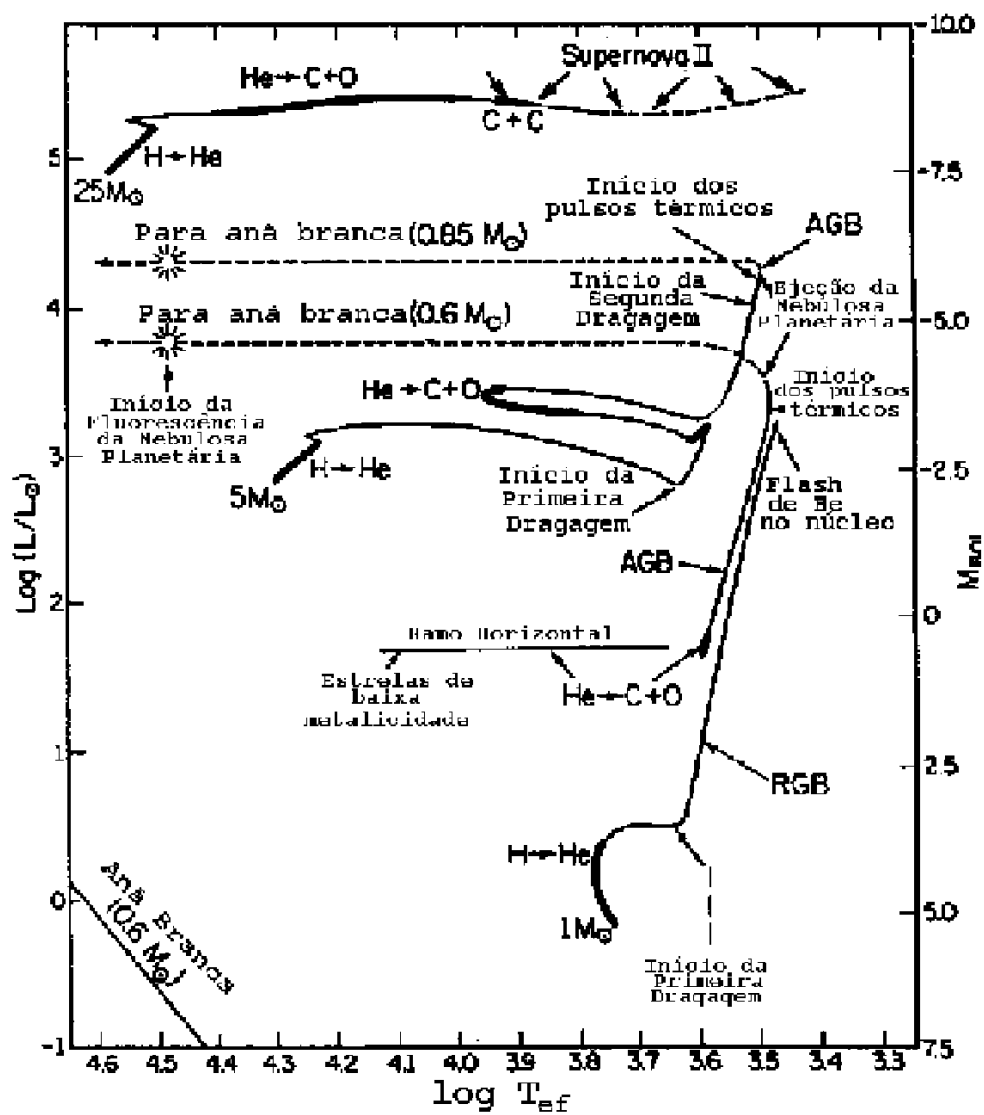


Figura 9.2: Evolução de algumas estrelas no diagrama HR

Capítulo 10

Estrelas Binárias

Para começar com algo simples e familiar, pensemos em um tipo particular de estrela. Até aqui falamos de estrelas solitárias, que não interagem com nenhuma outra estrela. Porém com a maioria das estrelas não é assim. Elas interagem gravitacionalmente com outra ou outras estrelas a ponto de estas orbitarem uma à outra, formando um sistema múltiplo de estrelas. Estima-se que 70% das estrelas sejam sistemas duplos ou múltiplos. Neste capítulo vamos tratar desses sistemas de estrelas, mais especificadamente dos sistemas duplos.

Em 1783 o astrônomo John Goodricke havia observado que o brilho da estrela Algol (β Persei) por algumas horas havia caído para $1/3$ do seu valor normal e isso se repetia com um período de cerca de 3 dias. Essa observação já havia sido feita por Geminiano Montanari em 1669. Porém o que nenhum deles sabia era que isso se tratava de um efeito provocado pelo fato de que Algol era uma estrela binária, onde uma estrela eclipsava a outra.

A primeira binária descoberta (cujo descobridor realmente descobriu que se tratava de duas estrelas interagindo gravitacionalmente) foi a estrela Castor (α Geminorum) por William Herschel, em 1804.

É importante ressaltar que não bastam duas estrelas estarem próximas no céu para que elas sejam consideradas binárias, isso pode ser apenas um efeito de projeção, elas podem estar muito distantes uma da outra, porém apenas na mesma direção, mas as estrelas devem estar fortemente ligadas gravitacionalmente.

Existem algumas formas de observar sistemas binários:

- *Visualmente*: Quando podemos observá-las por um telescópio. Neste caso, antes de qualquer análise, temos que nos certificar de que realmente é uma estrela dupla, e não duas estrelas independentes que estejam na mesma direção. Para isto, basta acompanhar o movimento de uma em torno da outra, se houver.
- *Astrometricamente*: Quando uma das estrelas não pode ser observada por ser muito fraca e sua existência é determinada por ondulações no movimento da companheira mais brilhante. O sistema Sirius era um exemplo deste tipo de binária até a observação da companheira mais fraca, uma anã branca, feita em 1862 por Alvan Grahan Clarck Jr.
- *Por eclipses*: Se as órbitas estão de perfil para nós, podemos ver uma estrela eclipsar a outra; e esse fenômeno já confundiu os astrônomos. O primeiro sistema duplo detectado dessa forma foi Algol (β Persei); mas por causa da variação de brilho, ele foi tido como uma estrela de brilho variável. Só mais tarde é que se descobriu tratar-se de uma binária eclipsante, e até hoje as estrelas similares são conhecidas como do tipo Algol.
- *Por espectroscopia*: Esse é o tipo mais interessante. Imagine um sistema duplo com a órbita de perfil em relação a nós (ou pelo menos com alguma inclinação). Já deu pra perceber que

as estrelas têm de estar sempre opostas em relação ao CM, não? Pois bem, no momento que uma das estrelas estiver se aproximando de nós, ou seja, com a velocidade orbital na nossa direção, a outra vai estar no sentido oposto – com a velocidade totalmente radial, afastando-se. Nesse momento, cada uma das linhas do espectro do sistema se duplica: uma desviada para o vermelho, outra, para o azul. Depois de certo tempo, as estrelas já vão ter se movido nas órbitas, até ficarem na direção perpendicular à nossa linha de visada, isto é, com velocidade completamente tangencial. Aí as linhas espectrais voltam às suas posições originais. Depois de mais tempo, portanto, as linhas voltam a se desviar, mas agora com as estrelas trocadas. E assim, pelo Efeito Doppler, não só descobrimos uma estrela dupla como ficamos sabendo das velocidades orbitais das suas componentes. Com isso temos a razão entre suas massas.

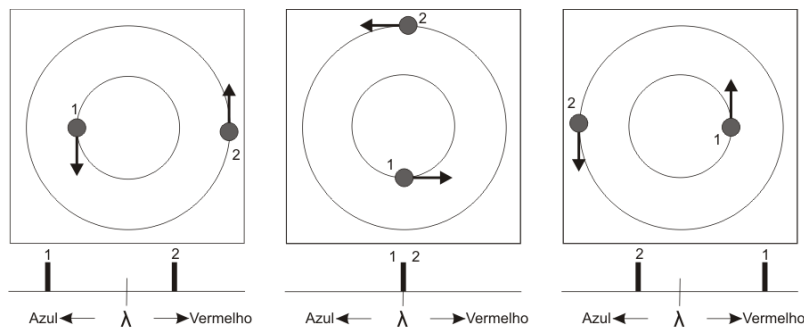


Figura 10.1: Binárias Espectroscópicas.

O principal efeito da atração gravitacional das estrelas é, ambas irão orbitar um centro de massa comum, estando sempre opostas por ele. No volume de Mecânica Celeste, começamos a tratar desses objetos: sejam duas estrelas de massas M_1 e M_2 , distantes de a_1 e a_2 do centro de massa comum. Por definição de centro de massa:

$$M_1 a_1 = M_2 a_2$$

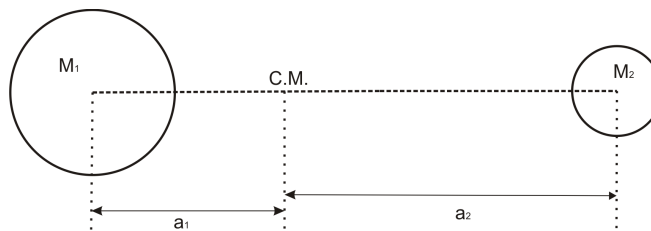


Figura 10.2: Duas estrelas de massas M_1 e M_2 orbitando um centro de massa C.M. a diferentes distâncias a_1 e a_2 .

Repare que, como a distância entre as duas estrelas é fixa (igual a $a_1 + a_2$), o período delas nas órbitas em torno do centro de massa é o mesmo pras duas; e se tomarmos uma delas como fixa, a outra parece descrever uma órbita circular em torno da primeira. Daí podemos aplicar a terceira lei de Kepler:

$$M_1 + M_2 = \frac{(a_1 + a_2)^3}{P^2}$$

Se as unidades forem massas solares, UA e anos ($K=1$).

10.1 Binárias Visuais

Para as binárias visuais podemos facilmente utilizar a relação acima para encontrar a massa do sistema. Fixamos uma estrela e observamos o movimento da outra em torno desta. Com a observação do movimento da estrela podemos medir qual o tamanho angular do semi-eixo maior da órbita relativa entre ambas as estrelas¹ ($a_1 + a_2$), e tendo o período observado, podemos encontrar a massa do sistema.

Mas a determinação do semi-eixo maior do sistema não é algo tão simples assim. O problema é que a órbita visual é uma projeção em um plano (o plano tangente à esfera celeste naquele ponto, ou o plano perpendicular à linha de visada) da órbita “real” de uma estrela em relação à outra. Observe o sistema Castor (α *geminorum*), abaixo:

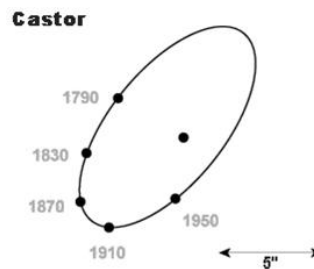


Figura 10.3: Sistema Binário Castor.

Assim, teríamos que levar em conta a inclinação da órbita em dois eixos: o eixo horizontal do plano de visada (se a órbita está inclinada “para frente” ou “para trás”), e o eixo vertical (se a órbita está inclinada “para a direita” ou “para a esquerda”). Mas não temos nenhum parâmetro para calcular também essas inclinações a priori. E sequer sabemos a “direção” do eixo maior da órbita na figura.

Contudo, podemos nos aproveitar de um detalhe trivial, tão trivial que nem é notado. Repare que precisamos estabelecer um ponto de referência para a projeção, um ponto cuja projeção é tomada como padrão: aqueles que se projetam de forma diferente deste são os que geram a “imagem distorcida”, a de “inclinação” em relação à projeção. O mais natural, supõe-se, é tomar o centro da figura como padrão.

Assim, imaginemos a elipse que representa a órbita relativa real, fixa no seu centro, com um plano de visada também fixo. E imagine que, como dito no penúltimo parágrafo, ela gira em torno de seus eixos, gerando diferentes projeções (se preferir, pode tomar a órbita toda como fixa e variar a posição do plano de visada, com este preso em uma esfera centrada no centro da elipse). Para todas as inclinações, o centro da elipse real continua sendo projetado no mesmo lugar. Sabendo disto, não é difícil demonstrar uma propriedade, esta sim, interessante: o centro da elipse real é também o centro de todas as elipses aparentes, de todas as projeções possíveis.

Tendo esta propriedade em mãos, tudo fica mais simples. Desenhemos, manualmente, o eixo maior e o eixo menor da elipse aparente, encontrando seu centro (que corresponde ao centro da elipse real). Ora, a estrela maior marca um dos focos da elipse real, e os focos são pontos sobre o eixo maior! Logo, precisamos apenas ligar o centro da elipse aparente à estrela e prolongar a reta, para encontrarmos a projeção do eixo maior real na elipse aparente! Então perpendicular a ele estará o eixo menor.

¹ Observando de um referencial que esteja parado em relação ao sistema binário como um todo, a descrição dos movimentos deveriam ser duas elipses em torno de um centro de massa comum. Entretanto, não temos nenhum referencial para encontrar um referencial deste, a priori; o que fazemos então é tomar o referencial da estrela mais brilhante do sistema, traçando a órbita relativa da estrela secundária em torno dela.

10.2 Binárias Espectroscópicas

Para as binárias espectroscópicas podemos calcular os parâmetros orbitais partindo das velocidades radiais dos objetos.

Como vimos, o movimento orbital das estrelas nesse sistema causa efeito Doppler nas linhas do espectro da estrela, fazendo com que essas linhas executem um movimento de vai-e-vem no espectro (figura 10.2). Como vimos anteriormente neste volume temos:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c}$$

Com isso podemos estabelecer as velocidades radiais de cada componente do sistema segundo os desvios das linhas no espectro. Mas como as estrelas estão em órbita, sua velocidade radial varia com o tempo, mesmo que a órbita seja circular. Assim poderíamos estabelecer uma curva das velocidades radiais das componentes em função do tempo. Observe o exemplo abaixo:

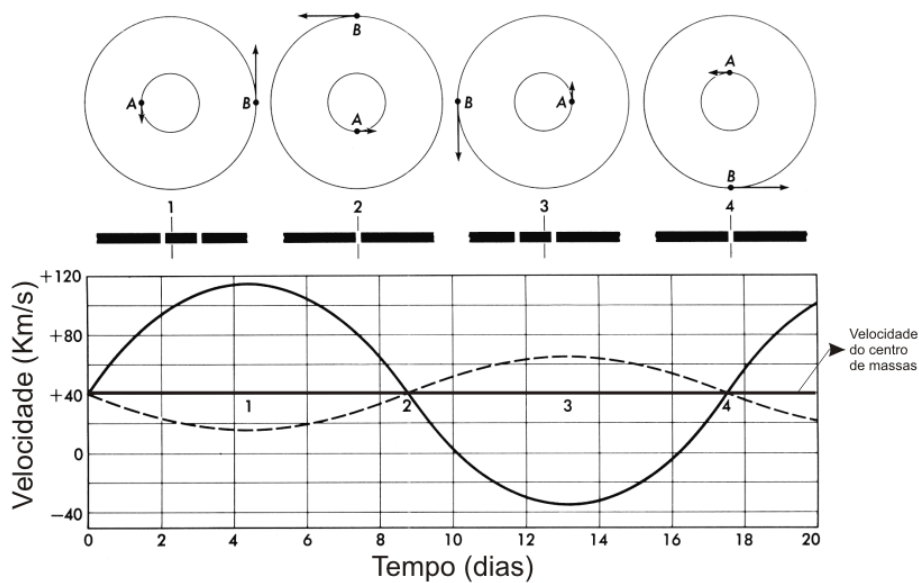


Figura 10.4: Esquema mostrando a curva de velocidades para as duas componentes de um sistema binário.

De uma curva de velocidades assim podemos tirar uma informação logo de início, a velocidade do centro de massas do sistema, que é a linha que passa pelos pontos onde as duas curvas se interceptam, ou seja, no nosso exemplo acima, da figura, a velocidade do centro de massas é 40 km/s.

Agora vamos analisar as curvas. Quando a velocidade radial está em seu máximo, podemos dizer que toda a velocidade orbital da estrela está na forma de velocidade radial (isso apresenta só um pequeno problema com relação à inclinação do sistema em relação à visada, que estaremos discutindo mais afundo daqui a pouco). Então partindo da relação:

$$v = \frac{2\pi a}{P}$$

Como temos que $P_1 = P_2$ temos que:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{a_1}{a_2} = \frac{M_2}{M_1}$$

Assim obtemos que a velocidade orbital de uma estrela é inversamente proporcional à sua massa.

Então sabendo o período da binária, e tomando as velocidades orbitais obtidas a partir do gráfico, conseguimos encontrar os semi-eixos maiores das órbitas.

Então pela relação encontrada no início do capítulo temos:

$$\frac{(a_1 + a_2)}{M_1 + M_2} = P^2$$

Para P em anos, M em massas solares e a em UAs.

Assim como temos a relação entre as massas, e os semi-eixos maiores podemos tranquilamente calcular as massas partindo exclusivamente do gráfico.

Só repare, esse é o limite inferior das massas, pois consideramos que não há inclinação entre o sistema e nossa linha visada. Porém, sabendo a inclinação do sistema podemos encontrar as massas reais, sabendo que:

$$v_{med} = v \sin i$$

$$a_{med} = a \sin i$$

Partindo disso e das relações acima temos:

$$\frac{(M_1 + M_2)_{real}}{(M_1 + M_2)_{med}} = \frac{(a_1 + a_2)^3}{(a_1 + a_2)_{med}^3} = \frac{1}{\sin^3 i}$$

Porém até agora só tratamos de velocidades orbitais constantes, ou seja, órbitas circulares. Se as órbitas forem elípticas o que acontece?

Em uma órbita elíptica a velocidade orbital do corpo não é constante, alterando a forma da curva de velocidades.

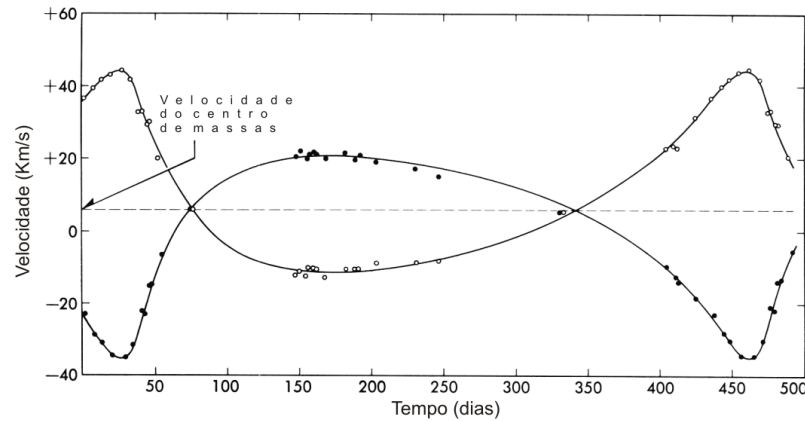


Figura 10.5: Curva de velocidades para as duas componentes do sistema f Cygni.

Além da forma do gráfico ter se alterado como um todo, percebemos que as velocidades máxima de aproximação e de afastamento de cada corpo não são mais iguais. Isso nos trás um primeiro problema referente à determinação das massas do sistema: qual velocidade usar nas relações encontradas acima?

Uma saída é tomar a velocidade orbital média do corpo como sendo a média aritmética dos módulos das velocidades máxima de aproximação e afastamento (depois de descontada a velocidade do centro de massas). É lógico, isto é apenas uma aproximação, e os resultados virão de maneira aproximada, porém teremos uma aproximação razoável para o sistema.

Agora também a disposição do eixo maior será importante para a construção do gráfico. Então com essas características podemos encontrar de que forma o sistema está disposto em relação ao nosso. Vejamos os casos abaixo:

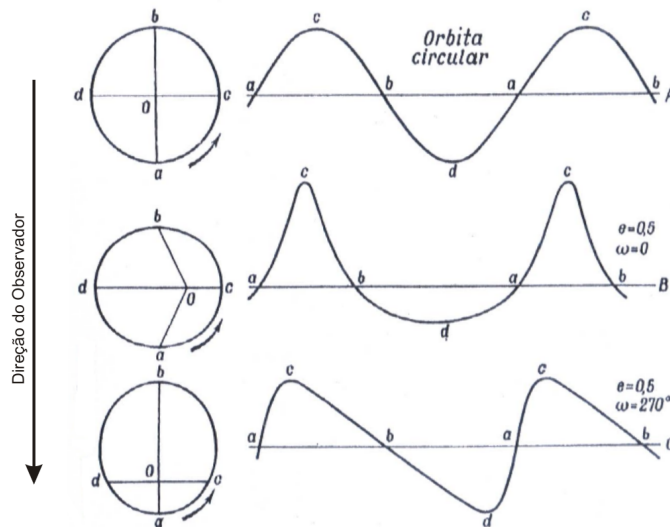


Figura 10.6: Esquemas mostrando as curvas de velocidades para 3 binárias espectroscópicas.

O primeiro gráfico (A) trata de uma órbita circular, até aqui tudo bem, mas o segundo e o terceiro tratam de órbitas elípticas que, conforme estão dispostas, tem-se uma curva de velocidades diferente. No segundo gráfico (B), temos uma elipse com o eixo menor apontado para o observador. Obtemos um padrão de curvas. No terceiro (C), a elipse está com o eixo maior apontado para o observador, mudando totalmente o padrão de curvas do gráfico. Assim, comparando as curvas de velocidade de uma binária qualquer com os casos especiais acima podemos verificar qual a situação do sistema em relação à Terra.

10.3 Binárias Eclipsantes

Para estrelas binárias eclipsantes, uma característica observacional importante é a variação do seu brilho no tempo – mais precisamente o gráfico disso, chamado de CURVA DE LUZ.

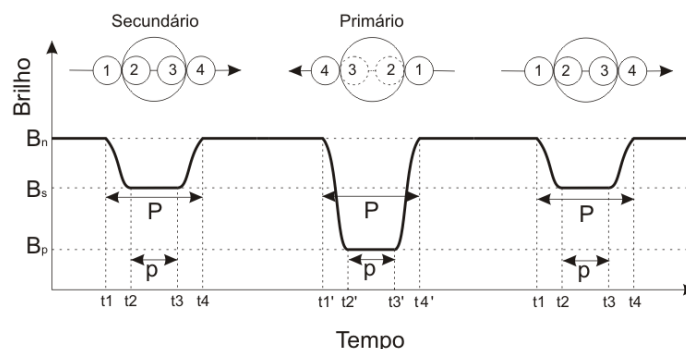
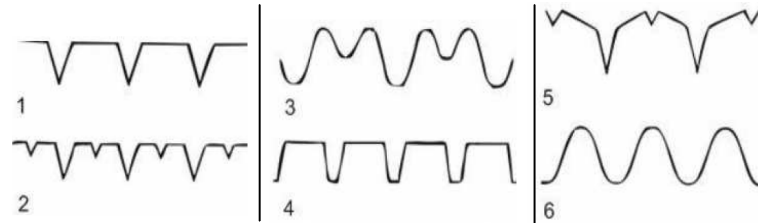


Figura 10.7: Exemplo de curva de luz para uma binária eclipsante com eclipse central. Neste exemplo a estrela menor é a mais quente. Repare que os períodos de eclipse p e P são iguais tanto para o eclipse primário quanto para o secundário.

Como é de se imaginar, as curvas de luz de uma binária são periódicas e podem nos trazer diversas informações sobre o sistema. Além do período, algo óbvio no gráfico 10.7, primeiramente a simples forma do gráfico pode nos trazer muita informação, como, por exemplo, de que forma o eclipse acontece. Observe as 6 situações da figura seguinte.



- 1 Observe que há apenas um eclipse (“buraco” na curva de luz). Isso é um indício de que o satélite é escuro, portanto a única diminuição de intensidade da luz ocorre quando o satélite escuro passa em frente da estrela principal. Neste caso, a luz do patamar é devida exclusivamente à estrela principal. A forma pontiaguda do eclipse indica que as estrelas primária e companheira possuem raios semelhantes, e portanto o eclipse não é anular.
- 2 Eclipses duplos mostram que o satélite é luminoso.
- 3 Eclipses duplos em que estrelas de diferente luminosidade estão praticamente tangentes entre si. Isto é evidenciado devido a falta de um “patamar”. A proximidade das estrelas evidencia o efeito da força de maré, que deforma as estrelas tornando-a oblatas. A meio do caminho entre o eclipse primário e o secundário ocorre o ponto de maior luminosidade (já que as estrelas estão com seus lados de maior área visíveis). A forma é semelhante à curva de luz da estrela Beta Lyrae.
- 4 O satélite é escuro, como na situação 1, o que é evidenciado pela detecção de apenas um eclipse. Porém, o patamar inferior (um segundo patamar), durante os eclipses, sugere que a estrela satélite passa um tempo passando em frente da estrela principal. Isso ocorre em eclipses anulares. Comparando o tempo que demora para a luminosidade diminuir com o tempo em que se fica em luminosidade mínima, é possível estimar a razão entre os raios das estrelas. E comparando o tempo total do eclipse com o período orbital, pode-se comparar os raios com a distância entre as estrelas.
- 5 A situação é a mesma que a 2. Porém, no lugar de um patamar superior, vemos que a luminosidade do sistema aumenta depois do eclipse primário até o secundário. Isso ocorre devido ao fato da estrela secundária, além da própria luminosidade, refletir a luz da estrela principal na face apontada para esta, o que cria um efeito de fase, já que uma das faces da estrela será mais brilhante que a outra. A forma é semelhante à curva de luz da estrela Beta Persei, ou Algol.
- 6 Eclipses duplos de estrelas quase tangentes e praticamente iguais entre si como um todo, criando uma curva praticamente senoidal.

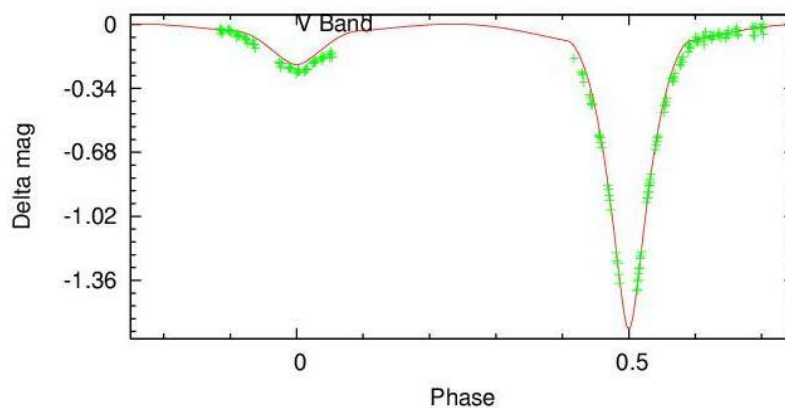
Feito isso, vamos voltar a analisar os nossos sistemas da figura 10.7. De cara sabemos que se trata de dois objetos luminosos, pois acontecem dois eclipses diferentes. Também percebemos que as duas estrelas possuem raios diferentes e que os eclipses são centrais, já que vemos regiões planas no fundo de cada vale.

Além disso, o fato do eclipse primário ser mais fundo que o secundário nos revela que a estrela menor é mais quente. Pense bem: quando vemos as duas estrelas a área total que estará

emitindo será a soma das áreas das duas estrelas. Já durante os eclipses, uma dessas áreas é escondida e sempre será a área da estrela menor, uma hora pela estrela menor escondendo uma área equivalente à sua da estrela maior, outra por ela estar se escondendo atrás da estrela maior.

Como vimos neste mesmo volume, um objeto mais quente emite mais em uma mesma área que um mais frio. Assim como temos um déficit maior quando a estrela menor se esconde, logo teremos que numa mesma área ela emite mais que a estrela maior, assim é mais quente.

- 60- Quais dessas técnicas podem ser utilizadas para a detecção de exoplanetas, isto é, de planetas que orbitem outras estrelas?
- 61- Encontre o raio aproximado da órbita da componente menor de uma binária eclipsante em função do raio da componente maior, período de eclipse e período total do sistema. Considere o semi-eixo maior da órbita muito maior que o raio da componente maior.
- 62- Calcule razão entre as massas das estrelas de cada um dos seguintes sistemas:
- (a) Sirius A e Sirius B estão a uma distância angular no céu de $7,5''$. A distância do Sol a Sirius é de 2,67 parsecs (medida por paralaxe). O período observado do sistema é de 50 anos. Suponha que a distância de Sirius B ao centro de massa seja o dobro da de Sirius A (Depois de concluir os cálculos, veja pelos seus tipos espectrais se essa estimativa foi boa).
 - (b) Um sistema binário espectroscópico tem um período de 17,5 dias. As velocidades orbitais das estrelas, medidas por Efeito Doppler, são 75 e 25 km/s.
 - (c) O período da binária eclipsante abaixo é de 10,2 dias.



Capítulo 11

Estrelas Variáveis

Em 1784, John Goodricke observou uma estrela na constelação de Cepheus por várias noites. Nestas observações ele descobriu que o brilho dessa estrela variava de forma bem regular em aproximadamente 5 dias. Esta foi a primeira estrela do tipo CEFÉIDA descoberta.

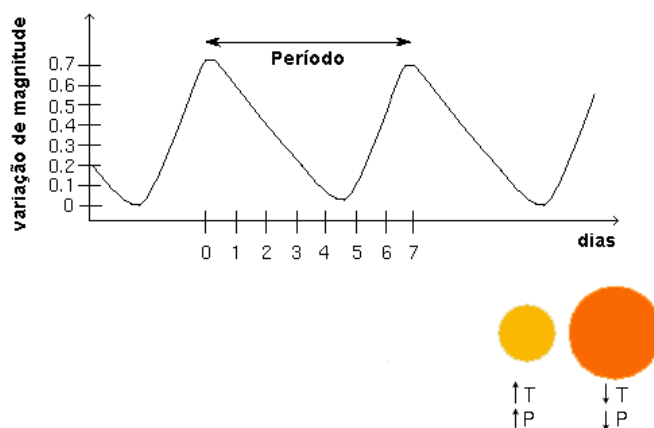


Figura 11.1: Esquema mostrando a variação da magnitude de uma cefeida. Repare que quando o raio da estrela aumenta, sua temperatura superficial e a pressão caem, mas mesmo assim o aumento do raio é tão grande que compensa essas diminuições e torna o brilho da estrela maior.

A variação periódica de brilho delas deve-se à chamada zona de ionização parcial dos átomos. Há uma certa camada de átomos, que em um dado momento perdem seus elétrons, e ficam ionizados. Sua energia cinética aumenta, e eles tendem a ocupar uma região mais alta da estrela, aumentando o raio estelar. Contudo, mais afastados do núcleo, desionizam-se e, com menor energia, voltam ao patamar inicial, para logo ionizarem-se outra vez. Repare que esse evento só causa efeitos perceptíveis em uma certa faixa de temperatura (tipos F, G e K): em estrelas mais quentes, a faixa de ionização está muito próxima à fotosfera, e essa expansão levanta uma camada muito pequena da estrela; em estrelas muito frias, a camada está muito próxima ao núcleo, e a pressão térmica não é suficiente para levantar todas as outras camadas.

Uma propriedade muito importante dessa variação é a relação período-luminosidade, que foi descoberta por Henrietta Leavitt, em 1908 no Harvard College Observatory (E.U.A.), quando esta estudava cefeidas nas Nuvens de Magalhães. Ela notou um padrão que envolvia o brilho e o período das cefeidas. Quanto mais brilhante era a estrela maior era o seu período.

Através do tratamento de dados daquela amostra de estrelas, ela chegou a uma relação clara

que envolvia o período e a magnitude absoluta das cefeidas:

$$M = -2,85 \cdot \log P - 1,43$$

onde M é a magnitude absoluta e P é o período, em dias. Ou, em termos gráficos:

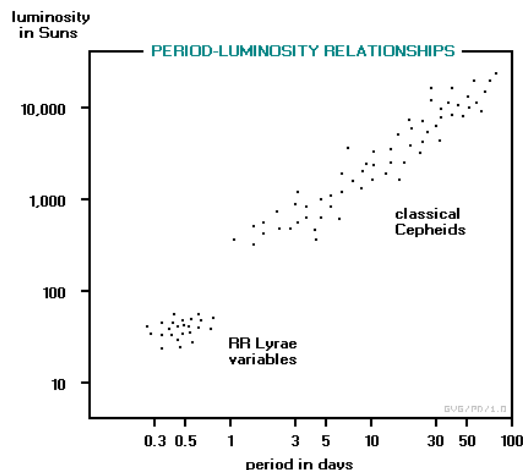


Figura 11.2: Gráfico mostrando a relação período-luminosidade para as Cefeidas e RR Lyrae.

Esta relação é uma ferramenta importantíssima para encontrar a distância de objetos como aglomerados e galáxias até nós.

O período de variação de uma cefeida é extremamente fácil de se medir, logo diretamente tiramos a magnitude absoluta da estrela pela relação período-luminosidade. Então espera, se temos a magnitude absoluta e podemos medir a magnitude aparente da estrela podemos facilmente encontrar a distância que a cefeida está de nós¹.

Essa ferramenta é tão importante que foi utilizada no século passado para resolver uma discussão cosmológica que foi denominada de "O Grande Debate"².

- 63- Dissemos que a relação período luminosidade foi descoberta nas Nuvens de Magalhães. Por que esta relação foi descoberta primeiro com as cefeidas lá e não com as cefeidas da Via-Láctea?

As RR LYRAE são as primas menores das cefeidas, com período em geral menor que um dia. Elas são suficientemente menos brilhantes para que não as consigamos distinguir em galáxias, além de que sua variação de brilho é bem menor do que nas cefeidas; mas justamente por serem menores, são mais abundantes e, portanto, mais fáceis de se achar em objetos um pouco mais próximos. Enquanto as cefeidas costumam ser usadas para indicar distâncias de galáxias autônomas, as RR Lyrae, são o principal marcador para os aglomerados globulares.

¹Se você não faz ideia do que fazer, leia o capítulo de medidas de brilho do Volume 3

²Aqui Hubble usou as cefeidas na galáxia de Andrômeda para calcular a distância desta até nós. Foi aí que realmente conseguiu-se mostrar que ela não era apenas uma nebulosa da Via-Láctea, mas sim era uma galáxia inteira. Para mais detalhes sobre esta discussão existe um capítulo inteiro sobre ela no Volume 5 (Cosmologia)

Capítulo 12

Aglomerados

Em geral as estrelas encontram-se sozinhas ou em sistemas de poucas estrelas. Mas podem acontecer casos em que uma nuvem de gás formou várias estrelas e estas, por sua proximidade interagem gravitacionalmente. Assim que se formam os aglomerados de estrelas.

A graça dos aglomerados para os estudos astrofísicos (principalmente sobre evolução estelar) é que se tratam de uma amostra de estrelas de tamanhos diversificados, mas todas com a mesma idade, composição química – já que todos pertencem a uma mesma nuvem original – e distância até nós; ou seja, de uma amostra de objetos que se diferenciam unicamente pela sua massa.

Como a massa é um fator determinante para a evolução de uma estrela, embora as estrelas tenham uma mesma idade, por suas massas diferentes elas podem estar em estágios de vida diferentes. Isso gera uma propriedade interessante nos aglomerados: parte das estrelas estará na sequência principal, mas outra parte já terá saído desta fase da vida e estará na fase das gigantes vermelhas. Olhando no Diagrama HR de um aglomerado podemos ver exatamente quais estrelas estão abandonando a sequência principal. Olhe o diagrama abaixo:

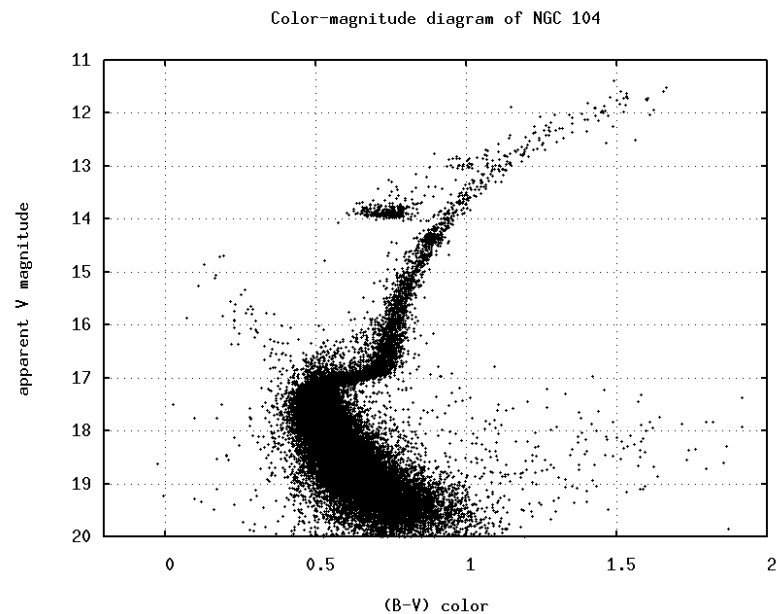


Figura 12.1: Diagrama HR do aglomerado NGC 104.

Na figura 12.1 é possível notar que na base as estrelas estão todas na sequência principal, mas

a partir de um certo ponto quase todas as estrelas saíram da sequência principal. Este ponto em que as estrelas estão saindo é chamado de **TURNOFF POINT**, ou simplesmente **PONTO DE SAÍDA**.

Com a determinação deste ponto de saída podemos determinar a idade do aglomerado!

- 64- Como podemos utilizar o Diagrama HR para determinar a idade do aglomerado?
- 65- Porque os aglomerados mais velhos possuem menos gás, se as estrelas sempre nascem e depois morrem e expelem todo o gás?
- 66- Comparando-se dois aglomerados, percebe-se que um é mais azulado e outro é mais avermelhado. O que podemos dizer sobre as idades dos dois aglomerados?

Capítulo 13

Galáxia

Existe outro fator a se considerar ao observar estrelas no disco da galáxia: a absorção interestelar pelo gás e pelas nebulosas difusas. A grande quantidade de poeira no disco galáctico (10% da massa da Via Láctea) impede que se vejam muitas das estrelas, e atrapalha decisivamente a aplicação das técnicas estatísticas¹

Da mesma forma, a absorção de luz das cefeidas diminui sua magnitude aparente, fazendo-as parecer mais distantes e o avermelhamento interestelar prejudica as estimativas por paralaxe espectroscópica (ou servem para descobrir onde há mais poeira). Assim, 90% dos aglomerados globulares descem suas distâncias para abaixo de 30.000 pc, e a distância do Sol ao centro, para 8.500 pc.

Em 1852 o professor Stephen Alexander (1806-1883), publica um trabalho no qual defende a estrutura da Via Láctea como sendo de uma espiral com quatro braços. Se as nebulosas espirais fossem parecidas com a Via Láctea no formato, seria lógico afirmar que se tratava de objetos externos a ela.

Quando se passou a fazer observações em comprimentos de ondas longos, como rádio e infravermelho, que conseguem passar pela poeira, pôde-se determinar a forma do disco da Via Láctea. Além de seu diâmetro ficar reduzido a 25.000 pc, observou-se evidências do que já se desconfiava: que nossa Galáxia tinha braços, era uma espiral, como muitas das nebulosas já observadas, e como a Nebulosa de Andrômeda.

Assim, podemos identificar as seguintes regiões na Via Láctea: um NÚCLEO ou BOJO, com diâmetro de 2 kpc²; um DISCO com braços, diâmetro de 25 kpc e espessura de 0,3 kpc; um HALO elíptico de 30 kpc de diâmetro, por onde os aglomerados globulares se espalham.

Embora não exista um consenso quanto ao número de braços da Via Láctea, na maioria das vezes fala-se em cinco. No sentido de rotação, são: de *Perseus*, de *Cygnus* (cisne), de *Centaurus*, de *Sagittarius*, e de *Orion*, onde está o Sol. Atualmente, os braços são entendidos como ondas de densidade que percorrem a circunferência do disco. Quando essas ondas passam por uma região, elas aceleram a formação estelar nela, e vemos uma população jovem e brilhante. Já nas regiões de rarefação, existem menos estrelas (as mais quentes já morreram), e o gás é menos luminoso, quase todo HI. O Sol se encontra a uma distância bastante específica do centro galáctico; a essa distância, seu período de rotação é igual ao período da onda de densidade, de forma que ele nunca esteve fora e nunca sairá do seu braço. Esse detalhe é fundamental para que não haja muitas catástrofes estelares por aqui, e para que a vida tenha podido se desenvolver na Terra.

Supõe-se que a formação dos aglomerados globulares date da época da formação da própria galáxia; o gás que não fora achatado no disco acabaria tendo formado pequenas condensações

¹Veja os métodos empregados por William Herschel no capítulo sobre a Via Láctea, volume Céu.

²1kpc = 1000 pc.

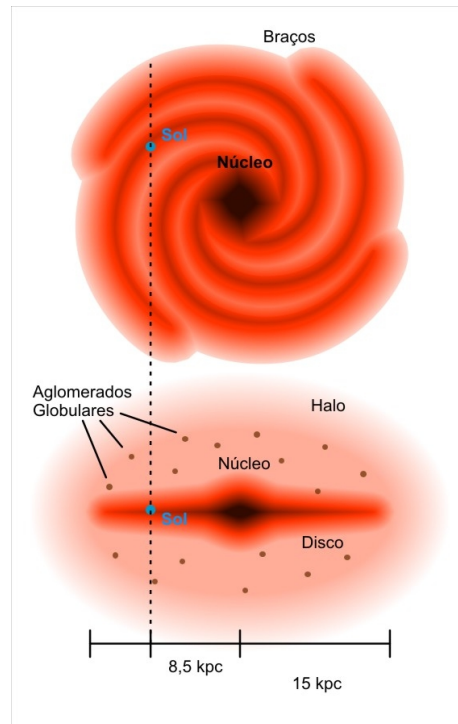


Figura 13.1: Em resumo, eis a nossa concepção atual de Via Láctea: vista de perfil e de frente.

menores em torno do disco – o que explica esses aglomerados parecerem tão antigos. Além disso, ao que tudo indica, o bojo possui muito mais matéria do que o que podemos observar. Já voltamos a isso.

- 67- Lembram dos sistemas de coordenadas? Existe um sistema muito útil para estudar a distribuição de estrelas nas galáxias: o sistema galáctico (que nome original...), cujas coordenadas são a latitude galáctica β , medida perpendicularmente ao disco da Via Láctea; e na longitude galáctica l , contada sobre a faixa, a partir do centro galáctico ($\alpha = 17\text{ h } 42\text{ min}$, $\delta = -28^\circ 55'$). Sendo assim, quais as coordenadas galácticas do ponto vernal? E qual a inclinação entre o plano galáctico e o plano do Sistema Solar?
- 68- A Via Láctea nos aparece como um círculo máximo no céu porque estamos no disco dela. Como seria vista nossa galáxia no céu de um observador que estivesse fora do disco galáctico? E se ele estivesse em um dos pólos da galáxia (logo acima ou abaixo do bojo)? E se ele estivesse em um aglomerado globular?

Com essa anatomia, deve ser fácil deduzir que as estrelas não estão aleatoriamente distribuídas pela Galáxia. Pra esse ponto se criou o conceito de POPULAÇÕES ESTELARES: diferentes populações habitam diferentes regiões da Galáxia. A divisão básica é: População do Tipo I, estrelas jovens e azuis, preferencialmente no disco; e População do Tipo II, mais velha e avermelhada, tipicamente no bojo e nos aglomerados globulares. Mas podemos fazer uma classificação mais refinada:

	Idade (10^9 anos)	Altura Média ³	Tipos de Objetos
I Jovem	8	120 pc	Gás e poeira, estrelas O e B, proto-estrelas, aglomerados abertos.
I Velha	10	160 pc	
II Disco	17	400 pc	Novas, RR Lyrae.
II Meia-Idade	25	700 pc	Estrelas de alta velocidade (halo), variáveis Mira.
II Extrema	75	2000 pc	

- 69- O que você pode dizer sobre as composições químicas das populações? E o que isso tem a ver com a evolução da galáxia? Trace um modelo simplificado de evolução de uma galáxia, incluindo a mudança na sua cor e na sua composição química.
- 70- Se o Sol fosse uma estrela tipo II, quais seriam as chances do planeta Terra existir? E dos seres vivos existirem?

Hoje em dia, o mapa da região da nossa galáxia é o seguinte: Via Láctea e Andrômeda são duas grandes espirais que formam uma espécie de “galáxia dupla”, separadas por 670 kpc. Cada uma delas é orbitada por várias pequenas galáxias-satélite; no caso da Via Láctea, os satélites mais visíveis são as irregulares Nuvens de Magalhães – a GNM a 50 kpc e a PNM a 70 kpc. As duas grandes espirais e seus satélites, que são cerca de vinte, formam o GRUPO LOCAL DE GALÁXIAS.

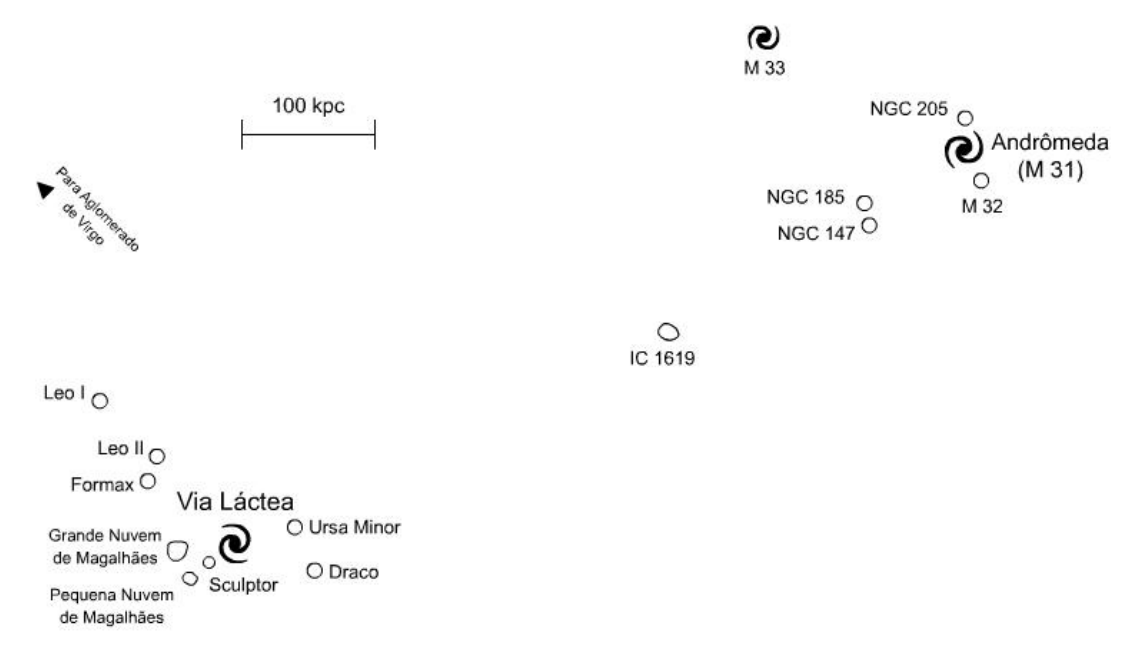


Figura 13.2: O Grupo Local.

Mas o próprio Grupo Local está na periferia do SUPERAGLOMERADO LOCAL, que é formado por vários sistemas múltiplos e aglomerados de galáxias. O Grupo Local está muito próximo do *Aglomerado de Virgo*, que tem 2500 galáxias :S, e na direção do qual estamos caindo a uma velocidade de algumas centenas de km/s. O Superaglomerado Local é constituído de uns cinqüenta aglomerados de galáxias, tem uma massa de $10^{15} M_{SOL}$, e o formato de uma parede com 40 Mpc (=40 000 kpc) de diâmetro e 10 Mpc de espessura.

³em Relação ao Disco

No centro dos grandes aglomerados existem galáxias elípticas gigantes, as *galáxias cD* (o nome talvez seja por elas serem arredondadas :P), cada uma em geral com mais de um núcleo, e com halo de até 1 Mpc de diâmetro!

Da mesma forma que existe gás espalhado pela galáxia, existe alguma quantidade de gás (bem menor que dentro das galáxias, obviamente) espalhado nos aglomerados de galáxias, geralmente expulsos por supernovas muito intensas. Esse gás costuma ser muito quente (emitindo grandes doses de raios X), e possui linhas de Ferro XXV (ionizado 24 vezes!!!) o.O.

Os superaglomerados formam grandes estruturas em forma de paredes ou de filamentos, separados por gigantescos vazios – em maior escala, essas estruturas parecem esponjas. Essa, espera-se, é a cara do universo em grande escala.

Unidade IV

Rochas

O trabalho astronômico sempre foi um trabalho de luz: observar pontos ou regiões luminosas no céu, ora marcando suas posições, formatos e deslocamentos, ora estudando as propriedades físicas dessa luz. Mais do que isso, o mundo astronômico sempre foi um mundo de luz, distante, que era apenas placidamente observado.

Mas o estágio de exploração espacial que alcançamos nos últimos quarenta anos levou tudo a um nível epistemológico distinto. Tudo começou com a corrida espacial e seu pódio final: a chegada à Lua. Pela primeira vez na prática (embora desde a época de Galileu em teoria), um objeto celeste, um daqueles padrões luminosos que aparece no céu noturno, transformou-se em *terra*, em algo que pode ser pisado, tocado, esfregado; algo tátil, duro e concreto (claro que as roupas dos astronautas limitavam seriamente suas experiências táteis).

Hoje em dia, quase todos os planetas, além de vários de seus satélites e dos asteróides, já foram visitados por sondas. Sondas são aparelhos humanos que são lançados na direção da Esfera Celeste com o objetivo de atingir algum objeto astronômico. Essas sondas se encarregam de cercar seus objetos, olhá-los por todos os ângulos, tirar inúmeras fotografias, medir pressão, temperatura, etc., e muitas vezes mesmo a petulância de pegar pedaços pra trazer pra nós. Assim, estudamos objetos astronômicos com a mesma concretude de objetos geológicos – não é à toa que muito do trabalho dos astrônomos que estudam asteróides é feito em conjunto com geólogos e mineralogistas. É a extensão da geologia para os céus \o/. É sobre essa nova perspectiva física do céu que discutiremos nesta unidade.

Mas se essa “telurização” do espaço fora concretizada pela primeira vez naquele evento, ela já era assim concebida há muito tempo – pelo menos desde que Galileu afirmava a existência das montanhas e mares na Lua. Ainda em um estágio fraco disso, porque tudo o que ele estava fazendo era interpretar convenientemente formas que ele apenas podia ver. Um novo estágio foi alcançado com a espectroscopia: a idéia de que a decomposição da luz que vem de um objeto nos informa a composição química deste. Hoje, de fato, todos os estudos geológicos do céu têm a espectroscopia como grande chave.

Contudo, estudar espectros de corpos do Sistema Solar é consideravelmente mais complicado que estudar espectros de estrelas. Em primeiro lugar, porque espectros ficam muito complicados com elementos químicos complexos. O espectro do hidrogênio vimos que é muito simples: tomamos seu único elétron e, a partir de poucos postulados, deduzimos todos os níveis de energia possíveis. Já para o Hélio, não fizemos as contas, pois a interação entre os dois elétrons geram efeitos bem mais complicados. Na prática, os físicos mal conseguem calcular as linhas para elementos com mais que uns poucos elétrons (mais ou menos como os problemas de muitos corpos na mecânica). Mas pelo menos podemos medir as linhas desses elementos em laboratório, tabelar e assim comparar com os simples espectros das estrelas, compostas majoritariamente por hidrogênio e hélio, mas também com alguns traços de outros elementos simples.

Mas passemos dos elementos soltos às moléculas simples. Vejamos o caso da água. Além das transições eletrônicas do hidrogênio e do oxigênio (ligeiramente modificadas, já que os níveis de energia são modificados quando há ligações químicas), há ainda as mudanças de energia causadas pela vibração da molécula (vibração dos braços O-H e do ângulo da molécula) e pela sua possível rotação. Para hidrocarbonetos, com muitos braços C-H, muitas diferentes combinações

de vibração são possíveis, além de várias torções, dobras, etc. e das transições dos elétrons do carbono em pelo menos duas condições diferentes ($-\text{CH}_2-$ e $-\text{CH}_3$), isso sem levar em conta possíveis carbonos insaturados. Coloque um radical amina ($-\text{NH}_2$) e entra uma coleção nova inteira de linhas de transição eletrônica e de vibração.

Quando vamos tratar de estruturas minerais, a coisa fica ainda mais complicada: são elementos com muitos elétrons, que podem ocupar diversos orbitais com energias diferentes (afetada diretamente pela estrutura cristalina do mineral). Além disso, os elétrons podem ainda ficar oscilando entre diferentes íons (como entre Fe^{2+} e Fe^{3+} , por exemplo), ou simplesmente se desprenderem dos seus átomos. Junte-se a isso as impurezas no material, que distorcem as estruturas cristalinas e adicionam novos elementos à mistura, além de todos os efeitos gerados pelo intemperismo na superfície do mineral, e ficamos com uma situação beirando o enlouquecedor.

Junta-se a este um segundo problema, que é o dos pequenos corpos do sistema solar serem pequenos corpos.

Na verdade, poder-se-ia dizer que essa “concretude do céu” tem raízes muito mais antigas. Faz muito tempo que são conhecidas as pedras que caem dos céus e abrem buracos em florestas por aí. É o que denominamos de METEORITOS⁴. Eles podem possuir vários tamanhos, alguns chegando a vários metros e podendo pesar várias toneladas.

Quanto à forma de coleta os meteoritos são divididos em duas categorias: METEORITOS DE QUEDA e METEORITOS ACHADOS. Os primeiros são aqueles que são coletados depois que sua queda foi vista, e os outros são aqueles que foram... *achados*.

Quanto à composição química os meteoritos podem ser METÁLICOS (Fe e Ni), ROCHOSOS ou METÁLICO-ROCHOSOS. Os rochosos são a maioria absoluta entre os meteoritos de queda, e os ferrosos entre os achados. Isso ocorre porque o meteorito rochoso produz um espetáculo piro-técnico mais intenso durante a queda, enquanto o ferroso é mais resistente ao desgaste natural na superfície. A composição do meteorito também está relacionada à sua origem, quanto a isso um dos tipos mais importantes são os meteoritos *rochosos condriticos carbonáceos*, que representam o tipo mais antigo de meteoritos, com aproximadamente 4,5 bilhões de anos, e não parecem ter sofrido alteração desde a época de sua formação. Por isso são preciosas relíquias da Nebulosa Solar Primitiva.

Outro meteorito importante é o ALH84001⁵ que é um dos 30 meteoritos que, se acredita, foram arrancados de Marte por colisões de asteróides. Cientistas da NASA acreditam terem encontrado evidências indiretas de possíveis fósseis microscópicos que poderiam ter se desenvolvido em Marte.

⁴não confunda meteoritos com meteoros ou meteoróides! METEORO é a faixa de luz produzida quando alguma matéria do sistema solar entra na atmosfera da Terra e se desintegra, geralmente não deixando vestígios sólidos (se a pedra sobreviver à passagem e atingir a superfície, aí sim será um “meteorito”). METEORÓIDE é o corpo pequeno que gira ao redor do Sol, ainda no espaço interplanetário

⁵Sua denominação vem do fato de ter sido o meteorito número 001, coletado em 1984, na região chamada Allan Hills, na Antártica.

Capítulo 14

Sistema Solar

A idéia de um sistema solar é relativamente nova. Cinco dos atuais planetas (Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter e Saturno) são visíveis no céu desarmado desde sempre, conforme pudemos discutir no Volume 1. Eles foram concebidos, descritos, explicados e simbolizados de muitas maneiras; a nossa maneira de encará-los (compreendidos em um Sistema regido gravitacionalmente pelo Sol) é aceita desde a Revolução Copernicana, como vimos em detalhes no Volume Mecânica. Desde então, a família foi crescendo e se multiplicando.

14.1 Crescimento Populacional

O primeiro planeta invisível a olho nu a ser encontrado foi *Urano*, descoberto em 1781 por William Herschel (o mesmo do catálogo NGC e das galáxias). O nome foi dado por Bode (o mesmo da lei de Titius e Bode): se Saturno, o mais lento e distante no céu, fora nomeado como o pai de Júpiter, então o novo planeta, ainda mais lento e distante, deveria receber o nome do pai de Saturno.

A descoberta de Urano deu novo crédito à Lei de Titius-Böde (como visto na Unidade 2 do Capítulo 2), levando à busca intensa do planeta perdido em torno de 2,8 UA. Até que, 20 anos depois de Urano, o pequeno *Ceres* foi encontrado em 1801. Contudo, passados mais quinze meses, um segundo corpo, *Pallas*, foi encontrado na mesma região por Olbers (o mesmo do paradoxo do céu iluminado – ver Volume 5). Ao contrário dos outros planetas, Ceres e Pallas não podiam ser resolvidos como discos; mesmo com os melhores telescópios da época, continuavam aparecendo como pontos brilhantes. Nesse sentido, eram indistinguíveis de estrelas, a não ser pelo seu rapidíssimo movimento próprio. Por isso, Herschel sugeriu que fossem chamados ASTERÓIDES, ou “similares a estrelas (astera)”.

Mais cinco anos e, em 1807, dois novos companheiros foram encontrados na região: *Juno* e *Vesta*. Então houve um grande intervalo, até que o quinto irmão, *Astraea*, foi encontrado meio século depois, em 1845. Seguido a ele, muitos novos foram descobertos, a uma velocidade crescente¹. Em 1868, mais de cem pequenos corpos deste tipo já eram conhecidos. Então foi se tornando consensual que aqueles corpos, tão pequenos e numerosos, não mereciam ser chamados de planetas. O termo proposto por Herschel 50 anos antes acabou pegando, levando ainda à expressão CINTURÃO DE ASTERÓIDES para designar o conjunto.

No ano seguinte a *Astraea*, era a vez de recebermos um novo gigante ao sistema: *Netuno*, ainda mais distante e ainda mais azul, foi encontrado graças a perturbações nas efemérides de Urano. Então nosso sistema passou a contar com oito planetas: quatro pequenos e quatro

¹De fato, até hoje muitos asteróides são descobertos todo ano, em velocidade ainda crescente! Veja o vídeo que ilustra as descobertas de 1980 a 2011 em <http://youtu.be/ONUSP23cmAE>

grandes, separados por um cinturão de algumas centenas de corpos muito pequenos².

Os planetas também eram centros de seus próprios sistemas, como versões menores do Sistema Solar – a começar pelo exemplo da Terra com sua Lua. Mas para além desta, faziam séculos que encontrar satélites dos planetas era algo relativamente comum. Quem inaugurou isso foi Galileu, em 1609, com as quatro *Luas Galileanas* de Júpiter. Huygens encontrou Titã, de Saturno, em 1655. Cassini encontrou quatro em Saturno: *Jápeto* (1671), *Rhea* (1672), *Tétis* e *Dione* (1684). Herschel viu mais duas de Saturno (Mimas e Enceladus) um século depois, em 1789, mas não sem antes ter encontrado Urano e duas de suas luas, *Titânia* e *Oberon* (embora ninguém conseguisse ver essas luas sem ser nos super-telescópios do Herschel).

A empresa continuou em meados do século XIX, quando Titânia e Oberon finalmente puderam ser melhor enxergados; além disso, logo vieram mais duas luas uranianas: *Ariel* e *Umbriel*, por William Lassell. A idéia de nomear as luas de Urano com nomes de personagens de Shakespeare veio de John Herschel, filho do grande astrônomo. Até hoje, as luas de urano só recebem nome de personagens de Shakespeare ou do outro poeta inglês Alexander Pope.

Uma suposta segunda lua da Terra foi observada três vezes em 1846, no Observatório de Toulouse, mas nunca confirmada depois disso. William Lassell ainda encontrou *Hyperion* (1848), uma oitava lua para Saturno, e *Tritão* (1846), a primeira lua do novato Netuno. Asaph Hall, nos EUA, encontrou em 1877 *Fobos* e *Deimos*, os dois pequenos demônios que acompanham Marte. William Barnard (o mesmo da Estrela de Barnard) encontrou *Amalthea* (1892), a primeira lua de Júpiter depois das observadas por Galileu; enquanto isso, Edward Pickering encontrava a nona lua de Saturno, *Phoebe* (1899). Logo nos primeiros anos do século XX, mais quatro luas de Júpiter foram encontradas, fazendo-o ultrapassar Saturno.

A configuração do Sistema Solar não mudou muito na primeira metade do século XX, embora todas as ciências tenham se transformado de maneira quase irreconhecível³. A maior mudança foi a descoberta do nono planeta, *Plutão*, em 1930. Não poderia receber nome mais adequado, se tratando de um mundo tão frio e distante. Plutão foi o planeta mais distante até 1979, quando cruzou a órbita de Netuno e ficou em uma posição interior a ela, de onde só saiu em 1999 (quando a maioria de nós já tinha nascido).

Contudo, com os grandes avanços tecnológicos do século passado (inclusive no ramo dos telescópios), o negócio de observar novos satélites e novas luas explodiu. Entre 1960 e 2000 foram 7 novas luas de Júpiter, 24 de Saturno, 16 de Urano e 6 de Netuno – sem contar as observações detalhadas dos anéis de poeira de cada um dos quatro. Poeira, alias, foi muito observada também, no sistema solar interno.

Com asteróides, a mudança foi muito mais chocante: hoje temos cerca de 400.000 (!) asteróides conhecidos. Claro que nem todos os asteróides possuem nomes próprios; eles passaram a ser denominados por um número, dado na ordem em que são “descobertos”⁴. Assim, Ceres virou 1 Ceres; Pallas virou 2 Pallas e assim sucessivamente.

Além disso, a empresa de descoberta e nomeação de asteróides estendeu-se também para fora do Cinturão. O primeiro troiano⁵, 588 Aquiles, foi encontrado no início do século. O primeiro

² Os quatro planetas pequenos têm massas da ordem da massa terrestre, 10^{24} kg, e raios de até 6000 km. Os quatro grandes têm massas cem a mil vezes maiores (10^{26} kg para Netuno e 10^{27} kg para Urano), com raios de 30.000 (Netuno) a 70.000 km. Já entre os pequenos têm Ceres como seu maior companheiro; sua massa é um milésimo da massa terrestre (10^{21} kg) e seu raio, um décimo (500 km).

³ Pense por exemplo na Mecânica Quântica para a Química e a Física Fundamental, nos novos approaches da Biologia (biologia molecular e biologia evolutiva), no surgimento da Psicologia, das Ciências Sociais, da Cosmologia Física

⁴ Numa época em que muitos novos corpos são descobertos todo ano, precisamos definir melhor a palavra “descobrir”: se trata-se de “ser observado pela primeira vez”, “ser publicado”, “ser reconhecido pela comunidade científica” ou alguma outra coisa. Muitos corpos falsos já foram e continuam sendo encontrados (é natural que isso aconteça); então um critério mais confiável seria um que se aproximasse da terceira coisa. De fato, para efeito de corpos do Sistema Solar, considera-se descoberto um corpo no momento em que seus elementos orbitais (a , e , i , Ω e ω) são identificados.

⁵ Para definição de troianos e centauros, ver Volume 2.

centauro, 944 Hidalgo, é de 1920. A partir do meio do século vieram os primeiros asteróides internos ao cinturão, que chegavam a cruzar a órbita da Terra (hoje eles são chamados de NEOs – *Near Earth Objects* – e são esses que eventualmente podem nos matar): dessa época são 1566 Icarus (1949) e 1620 Geographus (1951). Hoje são XXX troianos conhecidos, YYY Centauros e ZZZ NEOs

- 71- Apesar de o Cinturão de Asteróides parecer denso, graças às ilustrações e produções de Hollywood, ele não é. Para se ter uma idéia, imagine uma escala do Sistema Solar onde a órbita de Júpiter caiba num campo de futebol. Qual seria o tamanho de um asteróide comum nesta escala (considere asteróides com raios de 30 km)? Considere também que existam cerca de um milhão de asteróides. Pense porque nunca foi um problema uma nave atravessar o Cinturão.

14.2 Corpos Distantes

A última mudança estrutural no Sistema Solar é sobre o que vem na sua parte mais distante. Isso devia poder explicar a origem dos COMETAS, que são, há bastante tempo, conhecidos transeuntes do Sistema Solar. Diferente dos outros corpos, os cometas habitam órbitas instáveis e são compostos de materiais altamente voláteis (que formam as suas longas caudas, toda vez que se aproximam do Sol). Vendo por esse lado, é razoável supor que eles devem vir de um reservatório frio e distante, sendo eventualmente perturbados por qualquer coisa e, assim, jogados em direção ao Sol. Essa hipótese foi aventada pela primeira vez em 1932 e depois reavivada em 1950. Isso hoje corresponde ao que entendemos como NUVEM DE OORT, uma grande nuvem esférica com raio de 1 ano-luz, formada de pequenos corpos de gelo e poeira e envolvendo o Sistema Solar.

Enquanto a Nuvem de Oort parece uma origem factível para os cometas de período longo como o Hale-Bopp, que demoram séculos para retornar, ela não pode explicar a origem de cometas de período curto como o Halley (76 anos). Deve haver então algum tipo de reservatório mais próximo. De fato, ao longo da segunda metade do século XX, o número de cometas de curto período conhecidos também aumentou desmedidamente. Em 1980, o astrônomo uruguaio Julio Fernandez (que ainda é bastante atuante na comunidade astronômica internacional) lançou a hipótese de um cinturão de cometas entre 35 e 50 UA (A órbita de Netuno fica em 30 UA).

Desde então começou a busca. Mas foi só em 1992 que foi encontrado o primeiro OBJETO TRANSNETUNIANO (TNO, em inglês): o 15760.1992.QB₁. Um segundo corpo naquela região foi descoberto seis meses depois: 1993 FW. Um novo tipo de descoberta em massa começava a acontecer, de forma similar ao que havia acontecido dois séculos antes com os asteróides. O novo cinturão ficaria conhecido como CINTURÃO DE KUIPER (e seus objetos, também chamados KBO – *Kuiper Belt Objects*). Mas então já estávamos na época das varreduras sistemáticas em vez de observações isoladas (em particular porque os computadores podem fazer o trabalho bruto). Foram tiradas fotos do céu em toda a região da eclíptica, comparando-as e procurando pontos luminosos que mostrassem algum movimento. Assim, novos transnetunianos foram descobertos às centenas por vez.

Muitos deles foram encontrados aprisionados em órbitas ressonantes com Netuno. Mas lembremo-nos que esse é o caso de Plutão! Diversos outros corpos foram sendo descobertos na mesma ressonância 3:2 em que Plutão está (o que corresponde a um semi-eixo maior de cerca de 40 UA e um período de cerca de 250 anos); por isso, foram batizados de PLUTINOS. Hoje são cerca de 200 plutinos conhecidos. Há ainda os aprisionados em diversas ressonâncias (3:5, 4:7) até os da ressonância 1:2 (em 48 UA e com 330 anos de período), conhecidos como TWOTINOS. Entre essas duas regiões se situa o que chamamos de *Cinturão de Kuiper Clássico*, também conhecido como CUBEWANOS (nome inglês dado graças ao primeiro transnetuniano, Q B 1).

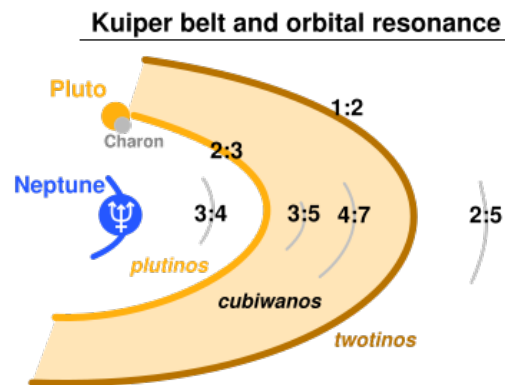


Figura 14.1

Para além do cinturão clássico (mal foi descoberto e já virou clássico), há ainda o que chamam de DISCO ESPALHADO (*scattered disk*), que é um prolongamento do Cinturão, com corpos apresentando uma variação cada vez maior de inclinação orbital. A concepção atual é que o disco espalhado se expande por muitos UA, com inclinações orbitais cada vez maiores, em uma transição contínua até a Nuvem de Oort, esférica.

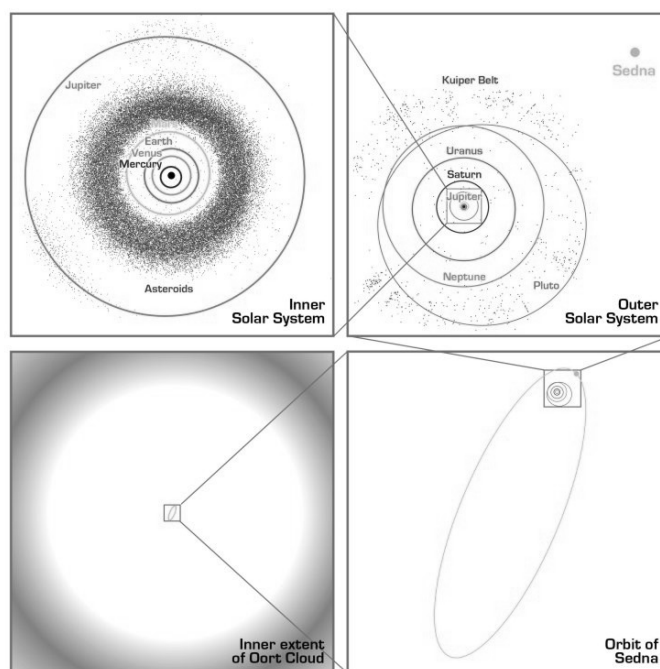


Figura 14.2: Sistema Solar em diferentes escalas. Fonte: Wikipédia

Com a rápida descoberta de todos esses corpos, a posição de Plutão como o nono planeta foi sendo crescentemente questionada (como a de Ceres e Pallas havia sido, no passado). A posição e características orbitais de Plutão não eram mais nenhum diferencial desde que os Plutinos começaram a ser descobertos. O fato de Plutão ter um satélite, *Caronte*, também não era uma vantagem especial (já eram conhecidos diversos asteróides e outros corpos pequenos que pos-

suíam satélites). A única coisa que se podia dizer a favor do nono planeta é que ele era bem mais massivo que os outros objetos transnetunianos. Mas sequer esse status foi mantido por muito tempo.

Em 2002, foi descoberto *50000 Quaoar*; seu nome foi dado a partir da deidade criadora dos índios Tongva, da América do Norte. Seu diâmetro foi estimado em 1280 km, metade do diâmetro de Plutão (2320 km). Já nesta época houve algum rumor de chamar Quaoar de planeta; seu número de catálogo, inclusive, foi ligeiramente roubado para ser um número redondo, em homenagem ao seu incomum tamanho (Algo parecido havia acontecido poucos anos antes com outro objeto do Cinturão de Kuiper, o *20000 Varuna*).

Se houve rumores em 2002, houve escândalo em 2004, na descoberta de *90377 Sedna*. Sobre ele, jornais anunciavam bombasticamente a descoberta do décimo planeta. Sua estimativa de diâmetro era de 1700 km, ainda mais próximo dos 2300 de Plutão (e quase o dobro dos 1000 km de Ceres). A órbita de Sedna é muito maior e mais excêntrica, como pode ser visto na figura assim; mesmo vindo de tão distante, entretanto, seu tamanho é próximo ao de Plutão. Que muitos outros corpos, então, não poderiam existir por lá, tão grandes quanto ou ainda maiores que aqueles dois?

A controvérsia sobre Sedna nem tivera tempo de esfriar, quando foi anunciada, em Julho de 2005, a descoberta de um TNO ainda maior! De tão popular, esse objeto ganhou um nome popular-provisório, Xena. Sua descoberta foi anunciada no mesmo dia do anúncio de *136472 Makemake* e dois dias depois de *XXXX Haumea* (quase uma corrida entre diferentes grupos de pesquisa, pela descoberta de grandes corpos transnetunianos). Xena tem um semi-eixo maior de 97 UA (quase três vezes o de Plutão), e medidas de seu brilho asseguraram um diâmetro de... 2400 km, 4% maior que o de Plutão! As observações seguintes, em Outubro, trouxeram ainda um brinde, com um resultado ainda mais fortes: Xena tinha um satélite, que aparecia para nos informar sua massa (via terceira lei de Kepler). Isso foi feito em Junho de 2007, levando ao resultado de $(1,66 \pm 0,02) \cdot 10^{22}$ kg, 27% maior que a massa de Plutão. Depois daí, não havia fuga para a discussão sobre o status de Plutão. Quando teve seus elementos orbitais determinados, Xena foi batizada oficialmente com o nome de *136199 Eris*, a deusa da discórdia⁶! Seu satélite, então, ficou conhecido como *Dysnomia* (desregramento, em grego).

14.3 Quem é planeta?

Enfim, em sua reunião trienal de 2006, a IAU (*Internacional Astronomical Union*) resolveu encarar frontalmente a controversa questão. Depois de longas e acaloradas discussões (e não sem muitas controvérsias, que ainda permanecem entre os astrônomos), ficou definido que, para receber o nome de PLANETA, um corpo deve obedecer a três critérios:

- (a) Orbitar o Sol.
- (b) Ser grande o suficiente para ser aproximadamente esférico.
- (c) Ter limpado a sua vizinhança orbital de objetos menores.

Os corpos que obedecem aos dois primeiros critérios, mas não ao terceiro, passaram a ser chamados de PLANETAS ANÕES. Os que obedecem só ao primeiro critério ficam sendo chamados de PEQUENOS CORPOS DO SISTEMA SOLAR. Na mesma resolução, ainda ficou definido o termo “satélite”: em sistemas de múltiplos corpos que orbitam uma estrela, se o centro de massa do sistema estiver abaixo da superfície de um dos corpos, este é dito corpo principal do sistema, e os

⁶Uma parte importante dos autores deste material se considera membro de uma religião conhecida como *Discordianismo*, que tem Eris como sua grande personagem de adoração. Para mais detalhes, veja o artigo sobre Discordianismo na Wikipédia.

outros são ditos *satélites*. Caso contrário, o sistema é dito um corpo duplo, ou triplo, ou múltiplo. Plutão e Caronte, por exemplo, são um planeta-anão duplo, já que Caronte tem massa igual à metade da de Plutão.

Assim, o número oficial de *planetas clássicos* voltou a oito: quatro terrestres e quatro gigantes. Já o grupo de planetas anões incluía, inicialmente, três: o recém-ex-planeta Plutão, o antigo ex-planeta e atual asteroide Ceres e a toda-poderosa Eris. Mas esse número prometia crescer rápido. O elemento dificultador aqui é que, para deixar de ser um mero corpo pequeno e alçar-se à posição de planeta anão, o corpo precisa ter seu certificado de esfericidade, expedido pela IAU. E nem sempre é fácil verificar a esfericidade de um corpo, ainda mais se tratado de corpos tão pequenos e distantes quanto os do Cinturão de Kuiper. De qualquer forma, dois novos planetas anões foram aceitos em 2008: os já mencionados Makemake (nome de um deus rapanui, da Ilha de Páscoa) e Haumea (deusa havaiana da fertilidade). A lista de candidatos é ainda bastante extensa, incluindo Sedna, Quaoar, Varuna, além de três plutinos, dois cubewanos, dois objetos do disco espalhado e ainda Caronte, cujo status de duplinha de Plutão não parece ter sido inteiramente reconhecido pela IAU.

14.4 Formação

Diante de tudo isso, temos vários ingredientes para responder à pergunta cosmogônica feita desde Hug-Bug: como nosso Sistema regido pelo Sol se formou? Temos milhares de corpos espalhados por aí, telescópios e espectrógrafos apontados para todos eles, sondas voando por aí perscrutando-os, modelos complexos de dinâmica orbital, bem como de química e geologia.

Nossa hipótese fundamental, entretanto, é a antiga hipótese nebular: os corpos ativos e bem definidos se formaram de nuvens difusas de moléculas simples e espalhadas pelo vazio. No caso, nossa nuvem foi o que sobrou da formação estelar do próprio Sol. Uma vez que o Sol entrou em operação (ou, em uma linguagem mais clássica, fez-se a luz), a pressão da luz foi direcionando a acreção de matéria, varrendo as moléculas mais leves para mais longe.

Então deu-se início ao longo e caótico processo de matéria agregar matéria. As primeiras glebas de matéria eram o que chamamos de *planetesimais*. Além de funcionarem como polos gravitacionais e químicos, eles interagiam e colidiam, acelerando ainda mais a acreção de matéria.

De acordo com a maior parte dos modelos, os primeiros corpos a se formar teriam sido Saturno e Júpiter (talvez Saturno tenha surgido primeiro e estimulado a formação de Júpiter). Seu crescimento rápido foi estimulado por diversos fatores, como a abundância de material no disco (afinal, eles foram os primeiros a concentrar matéria) e a composição química de sua região do disco (como água, amônia e metano, que têm como arma as poderosas pontes de hidrogênio). Se o Sol era o rei do Sistema, nossos dois gigantes foram seus príncipes regentes.

Júpiter e Saturno tiveram dois papéis principais na formação do Sistema. O primeiro foi o de acretar mais massa que qualquer outra coisa, limpando muito rapidamente a região ao redor deles e engolindo qualquer planetesimal que passasse pelas redondezas. O segundo foi o de travar o interior do Sistema Solar, por uma extensão de três ou quatro UA. Nessa região, os planetesimais não poderiam mais errar por aí e formar seus próprios corpos maiores; em vez disso, eles foram presos aos trilhos de ressonância construtiva dos gigantes, e eliminados dos trilhos de ressonância destrutiva. Foi assim que herdamos nos dias de hoje o grande cemitério de planetesimais conhecido como Cinturão de Asteróides. Justamente por terem permanecido quase intactos é que eles são importantes para o estudo do sistema solar primitivo.

Abaixo das faixas de ressonância, o processo de crescimento dos planetas continuou normalmente, mas com elementos pesados, cuja acreção era mais difícil. Para além de Júpiter e Saturno, dois outros gigantes um pouco menores foram formados. Para além deles, o disco se tornava mais rarefeito e mais exclusivamente povoado de elementos voláteis; nessas condições, formaram-se apenas pequenas bolotas de gelo e poeira.

Hoje, passados bilhões de anos, vemos dois grupos distintos de planetas. O primeiro tipo possui quatro representantes (Mercúrio, Vênus, Terra e Marte), de massa da ordem de 10^{24} kg, sólidos, compostos basicamente de silicatos – são chamados de PLANETAS TELÚRICOS⁷. Eles ocupam a região mais interna do Sistema – o mais ao Sol está em 0,4 UA; e o mais distante, 1,5 UA. O segundo grupo é composto também por quatro corpos (Júpiter, Saturno, Urano e Netuno), mas bem maiores ($\sim 10^{27}$ kg), compostos de substâncias mais voláteis (como hidrogênio, nitrogênio, amônia e metano), e por isso gasosos – PLANETAS GIGANTES GASOSOS, dizendo melhor. Muitos dos gigantes gasosos possuem luas com tamanhos compatíveis com os planetas telúricos! A distância média entre os planetas gasosos é significativamente maior; o mais próximo está em 5,2 UA, e o mais distante, 30 UA.

Os dois grupos de planetas são separados pela zona de material espalhado em faixas de ressonância, o *Cinturão de Asteróides*. Uma zona similar, mas com corpos bem mais espalhados, é a do *Cinturão de Kuiper*, que se estende além de Netuno. Estes são compostos principalmente de água, metano e gás carbônico congelados.

⁷ Do latim tellure, terra, solo. Esses quatro planetas também são chamados planetas terrestres, que é a tradução literal.

Capítulo 15

Asteróides e Corpos Pequenos

15.1 Asteróides

Asteróides são fragmentos rochosos que orbitam ao redor do Sol, a maioria na eclíptica e num largo anel entre Marte e Júpiter chamado CINTURÃO DOS ASTERÓIDES. Um asteróide grande tem tipicamente algumas centenas de km. Há ainda várias dezenas de asteróides chamados Troianos que descrevem a mesma órbita de Júpiter, porém formam dois grupos, um 60° na frente, outro 60° atrás desse planeta¹.

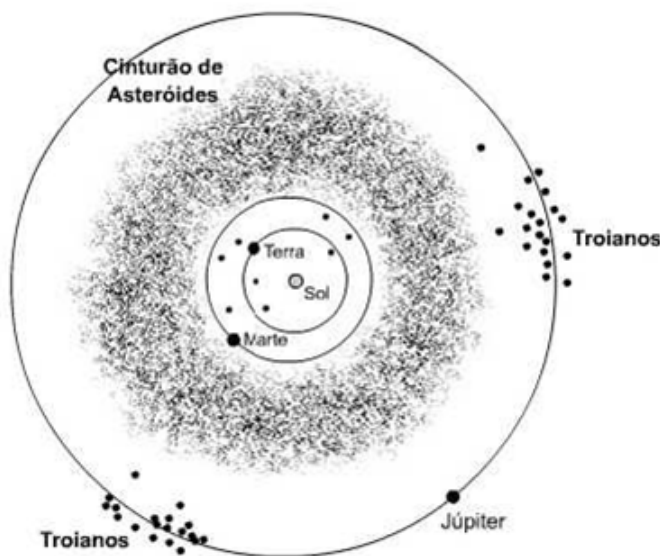


Figura 15.1: Asteroides Troianos

Dentre os asteróides do Cinturão, alguns nos saltam os olhos. CERES é o maior e mais famosos deles, e tem um raio médio de 1025 km. Apenas seis asteróides do Cinturão têm raio acima de 500 km. VESTA talvez seja o segundo mais famoso, não só por ser o mais brilhante (apesar de sua magnitude ser em torno de 6, no limite do que podemos ver a olho nu). Esse brilho todo se deve ao fato de Vesta ser composto de materiais vulcânicos, que são muito reluzentes. Ele é

¹Esses pontos são chamados pontos de Lagrange L4 e L5 e são pontos orbitais estáveis, para mais informações, pesquise na internet!

praticamente o único asteróide composto de basalto² – mineral que é formado a partir de magma – o que deve indicar, de alguma maneira, uma forte atividade geológica no seu passado. Bom, além desses, vale citar um que não é muito famoso, mas bem interessante: Ida tem 50 km de raio, e é *Orbitado* por outro asteróide, DACTYL, de 1,5 km. Uma foto do conjunto pode ser vista em http://en.wikipedia.org/wiki/Image:243_ida.jpg

Outra informação interessante sobre o Cinturão de Asteróides é que ele não é totalmente preenchido, mas apresenta lacunas chamadas FALHAS DE KIRKWOOD. Essas lacunas correspondem a órbitas instáveis devido a um efeito de ressonância com Júpiter (a perturbação gravitacional de Júpiter torna-se cumulativa nessas órbitas, devido a uma relação entre os períodos orbitais), caso algum asteróide eventualmente ocupe alguma dessas órbitas, rapidamente será expulso dela.

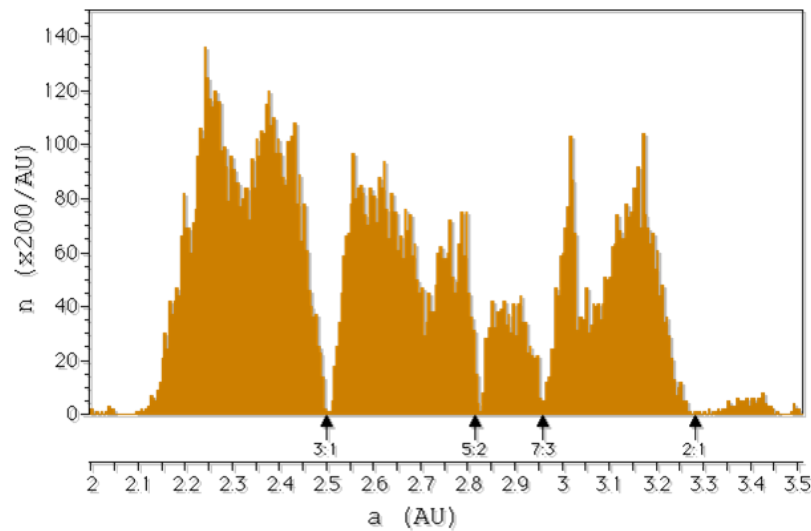


Figura 15.2: Falhas de Kirkwood: Histograma com o número de asteróides em diversas órbitas. Destaque para as quatro principais falhas.

Essa pode ser uma possível explicação para a origem de alguns asteróides com órbitas ex-cêntricas que cruzam a órbita de Marte, da Terra e de Vênus. Os que cruzam a órbita da Terra suscitam preocupação, pois podem colidir com o nosso Planeta.

15.2 Cometas

Os Cometas constituem outro conjuntos de objetos que povoam o Sistema Solar. Suas órbitas possuem uma grande excentricidade e diferentes tamanhos. Quando estão próximos do Sol podem tornar-se visíveis a olho nu e ser um fenômeno bonito, além de impressionante. Já na Antiguidade eles eram observados, mas eram interpretados como mensageiros anunciando a morte de reis ou nobres, ou a vinda de desgraças.

São feitos de uma mistura de gelo e poeira, como uma bola de gelo sujo. À medida que se aproximam do Sol, parte do gelo sublima, formando uma nuvem de gás e poeira ao redor do cometa, chamada coma. A parte sólida e gelada no interior é o núcleo, este chamado de NÚCLEO SÓLIDO, deve-se notar que tendo apenas 5 a 10 km, não pode ser observado diretamente e o ponto ou pequena região de brilho mais intenso é o NÚCLEO FOTOMÉTRICO.

A COMA que circunda o núcleo fotométrico é uma nebulosidade difusa, com forma aproximadamente esférica. Seu diâmetro tem tipicamente algumas centenas de milhares de quilômetros.

² Asteróides são geralmente compostos de carbono, silicatos ou, em menor escala, metais. Ao que parece, todos os outros pequenos asteróides basálticos são pedaços que se desprenderam de Vesta.

A coma é tão rarefeita que, através dela, podemos enxergar as estrelas de fundo mais brilhantes.

Como se a matéria da coma escoasse para uma direção, formam-se as CAUDAS. Uma cauda bem desenvolvida pode chegar a ter 1 UA. Existem dois tipos de cauda: a cauda de Tipo I é reta, estreita e azulada; a cauda de Tipo II é curva, larga e amarelada. Um cometa pode apresentar apenas uma das caudas, mas frequentemente apresenta as duas. A cauda azulada é constituída de gases ionizados pela radiação ultravioleta do Sol, principalmente CO^+ , N^{+2} , e CO^{+2} , que brilham por fluorescência, emitindo luz azul. Esses gases ionizados seguem as partículas ionizadas expelidas pelo Sol, o vento Solar. A cauda amarelada é constituída de grãos de poeira empurrados pela PRESSÃO DE RADIAÇÃO do Sol³, e brilham porque refletem a luz solar. O encurvamento maior ou menor da cauda se deve à predominância menor ou maior da pressão de radiação.

Ao contrário do que pode parecer, a cauda não aponta no sentido oposto ao movimento, como acontece com raposas e aviões; ela aponta na direção oposta à do Sol! A cauda de poeira, com inércia maior, possui uma leve curvatura na direção oposta ao movimento. Isso significa que, quando um cometa está se afastando do Sol, ele corre “para dentro” da sua cauda. Claro, isso faz a cauda ficar um pouco menor.



Os cometas se dividem em dois grupos: os COMETAS DE CURTO PERÍODO, com período orbital < 200 anos e com órbitas geralmente perto da eclíptica. Acredita-se que esses cometas vêm do CINTURÃO DE KUIPER. Os cometas com período orbital > 200 anos são os COMETAS DE LONGO PERÍODO, possuem órbitas muito maiores e que não se restringem às proximidades da eclíptica. Presume-se que esses cometas estão hibernados numa espécie de concha ao redor do Sistema Solar entre 50 mil e 100 mil UA, chamada NUVEM DE OORT, eventualmente, a interação gravitacional com uma estrela próxima perturbaria a órbita de algum cometa, fazendo com que ele fosse lançado para as partes mais internas do sistema solar.

³Embora não sintamos, a luz exerce pressão ao incidir na matéria. O efeito se torna perceptível em grãos de poeira micrométricos, pois essa força é proporcional à seção reta (área vista pelo fluxo de radiação) do grão, ou seja, proporcional ao quadrado do raio do grão e a força de atração gravitacional é proporcional ao volume do grão, ou seja, ao cubo de seu raio. Portanto a razão entre as duas forças é inversamente proporcional ao raio do grão, havendo um tamanho crítico abaixo do qual os grãos sofrem mais a repulsão da radiação do que a atração do Sol.

Capítulo 16

A Lua

Olhar para a Lua pode nos trazer mais perguntas do que geralmente percebemos, por exemplo: por que a Lua é tão grande? Pode parecer uma pergunta retardada, mas se pararmos para pensar a Lua é enorme! Numa relação Planeta-Satélite, os satélites naturais são muito menores que o planeta em questão e no caso Terra-Lua, o diâmetro lunar é $1/4$ do diâmetro terrestre! Como pode? Em casos como Júpiter, os satélites são partículas irrisórias frente ao corpo central.

Diante dessa indagação, poderíamos fazer um paralelo entre as luas dos demais planetas do sistema solar e a nossa Lua. A resposta para esse paralelo é de que a Lua não é um satélite! Exatamente isso, a Lua, na verdade não é um satélite, mas sim um planeta irmão. Se a Lua fosse um satélite natural, o centro da sua órbita iria coincidir com o centro de massa da Terra, mas isso não ocorre de fato. O centro da órbita lunar está localizado na Terra, mas não no centro, o que faz com que a Terra e a Lua, juntas, formem um sistema binário.

Bem... Sendo a Lua um planeta irmão da Terra, como ela surgiu? Seria um asteroide capturado? Seria um pedaço da Terra desprendido? Seria o resultado de um impacto? Será que elas se formaram juntas?

Vamos primeiro analisar sucintamente a Lua como um todo para depois ver quão coerente cada hipótese de criação é e então começar a refiná-la a fim de chegar a explicações razoáveis.

Primeiro vamos analisar a superfície. Dá pra perceber que a face lunar é repleta de crateras e de planícies mais escuras, que chamamos de mares. A melhor explicação para esses mares talvez seja a de magma expelido, que se solidificou rápido, transformando-se em basalto. Sendo assim, podemos dizer que a composição interna da Lua se assemelha à da Terra. Outro aspecto é a direção do movimento lunar que é o mesmo que a Terra desenvolve em torno do Sol. E outro aspecto é que no interior da Lua há menos ferro que no interior da Terra. Sabendo disso, vamos às hipóteses.

16.1 Fissão

Essa hipótese trabalha a idéia de que a Lua se originou da Terra através da rápida rotação. Assim, pelo momento angular da Terra, a Lua teria sido “cuspida” para o espaço. Nesse caso, se considera que a Terra era fluida. O primeiro a propor essa idéia foi um dos filhos de Darwin, George Howard Darwin em 1878. De acordo com essa hipótese, haveria uma “cicatriz” na Terra pela Lua, que se acreditava ser o atual Oceano Pacífico. Até aí a hipótese é interessante, mas começam a surgir os problemas. Primeiro seria o plano de rotação, já que a Lua seria ejetada pelo equador, ela teria que se mover muito próximo do equador também, mas isso não acontece, já que o plano de órbita da Lua oscila entre 18 e 28 graus pelo equador. O segundo problema era o da concentração de ferro na Lua ser diferente da concentração da Terra, já que as duas tiveram a mesma origem.

- 72- Elabore um argumento que defenda a teoria da fissão da Lua resolvendo o problema da concentração de Ferro em cada corpo.

16.2 Captura

Uma das hipóteses que eram simpáticas à resolução de alguns problemas das divergências entre Terra e Lua era a teoria da Captura, proposta inicialmente pelo alemão H. Gerstenkom em 1955. Ele dizia que a Lua teria sido formada em outra parte do Sistema Solar e depois capturada pela Terra através da gravidade terrestre. Essa hipótese explicava as diferenças de ferro e a os aspectos físicos diferentes, mas com o passar dos tempos os cálculos foram sendo feitos e a conclusão era de que a probabilidade dessa captura acontecer era remota, pois teria de haver condições ideais para o êxito da atração.

- 73- Em qual das áreas seria mais provável a formação da Lua: Cinturão de Asteróides (entre Marte e Júpiter), Cinturão de Kuiper ou Nuvem de Oort? Por quê?

16.3 Acresção

Pelas rochas coletadas nas missões Apollo e depois datadas aqui na Terra, foi proposta a teoria de que a Terra e a Lua foram formadas juntas, já que as idades das rochas lunares e as mais antigas rochas terrestres possuem praticamente a mesma datação. Nessa hipótese, assim como os demais corpos do Sistema Solar, a Lua teria sido formada pela aglutinação de matéria que sobrou da formação do Sol. Apesar de ser uma hipótese aparentemente lógica, havia pontos que não condiziam com ela, como as densidades e composições químicas diferentes entre a Terra e a Lua.

16.4 Colisão

Por volta de 1975 cientistas americanos ligados a Universidade de Harvard e ao Instituto de Ciências Planetárias de Tucson, no Arizona, propuseram a hipótese mais aceita até hoje sobre a formação da nossa companheira milenar. De acordo com a proposta levantada, a Lua seria o resultado bem sucedido de uma colisão de um planetóide, com uma massa do porte de Marte, com a proto-Terra ainda na época da formação do Sistema Solar. Muito foi discutido sobre essa hipótese, por que essa colisão não poderia ter sido uma colisão qualquer, então com base nos dados das órbitas atuais da Terra e da Lua, foi extraído a explicação de que no choque deste planetóide, viajando a uma velocidade relativamente rápida, com a Terra teria sido meio que de raspão, fazendo com que houvesse a ejeção de parte da proto-Terra e desse outro corpo celeste para o espaço. Após isso o material exposto voltaria a colidir com a Terra e depois essa massa de matéria planetária iria orbitar a Terra em forma de um disco de acreção, de onde aos poucos ira se aglutinando, formando a nossa Lua. Onde tudo isso, de acordo com especialistas teria se passado num período aproximado de uma semana e concluem que esse impacto foi tão importante que, talvez, se ele não tivesse ocorrido, a raça humana poderia não existir, alias, a vida nesse planeta poderia ser completamente diferente, se é que existiria vida sem esse choque. . .

Índice Remissivo

- éter luminoso, 33
- índice
 - de cor, 57
- Alexander Pope, 126
- Alexander, Stephen, 117
- Algol, 105
 - estrelas do tipo, 105
- alquimistas, 12
- anã branca, 88, 99
- anã marrom, 88
- anã negra, 99
- Anaxímenes de Mileto, ar, 10
- Anaximandro de Mileto, apeiron, 10
- Andrômeda
 - Nebulosa de, 117
- Argentina, 15
- Aristóteles
 - Physica*, 10
 - método analítico, 86
- atomismo
 - clássico grego, 11
 - de Descartes, 12
 - de Newton, 12
 - do sec. XIX, 25
- Babcock, 78
- Barnard, William, 126
- basalto, 133
- Berzelius, notação de, 14
- Bohr
 - modelo atômico, 19
 - princípio da complementaridade, 67
- bola de futebol (oficial), 19
- Boyle, Robert
 - The Sceptical Chymist*, 13
- buraco negro, 102
- byte, 41
- Caronte, 128
- Cassini
 - descoberta de luas, 126
- Castor, 105
- catástrofe ultravioleta, 52
- Ceres, 132
 - descoberta, 125
- ciclo próton-próton, 95
- Cinturão de Asteróides, 132
- combustíveis, 74
- cometa, 133
 - cauda, 134
 - coma, 133
- compostos orgânicos, 15
- condução, 76
- convecção, 76
- cor
 - brilho, 38
 - cor oposta, 41
 - cor primária, 40
 - matiz, 38
 - saturação/croma, 38
- corpo negro, 50
- corpos pequenos
 - Kuiper Belt Objects*, 127
 - Near Earth Objects*, 127
 - Trans Neptunian Objects*, 127
 - Centauros, 127
 - Cubewanos e Twotinos, 127
 - Troianos, 126
- Dactyl, 133
- Dalton
 - Lei das Proporções Definidas, 13
 - modelo atômico, 14
- De Broglie, Louis, 65
- Descartes
 - La Dioptrique*, 27
- deutério, 94
- Diagrama HR, 92, 115
- Diderot
 - Enciclopédia, 13
- Discordianismo, 129
- efeito doppler, 34, 90, 106
- efeito fotoelétrico, 35

- elétrons, 17
- elementos chineses, 10
- elementos gregos, 10
- elementos hindus, 11
- Empédocles de Agrigento, 10
- energicismo, 25
- Eris / Xena, 129
- espectro do anel, 64
- espectro eletromagnético, 45
 - infravermelho, 44
 - microondas, 45
 - rádio, 44
 - raio x, 45
 - raios gama, 45
 - ultravioleta, 44
- espectro luminoso
 - de absorção, 59
 - de emissão, 59
- espectrometria, 59
- estrela
 - β Persei, 105
- estrela de nêutrons, 101
- fóton, 36
- física clássica, 66
- Falhas de Kirkwood, 133
- foi assim que provavelmente se formaram as
 - Falhas de Kirkwood, estudadas no Volume 3, 130
- fotosfera, 84
- fusão nuclear, 75
- gaussiana, 90
- gigante vermelha, 98
- Goethe
 - Werther, 38
 - Doutrina das Cores*, 38
 - Wolfgang von, 38
- Goodricke, John, 105
- Hall, Asaph, 126
- Haumea, 130
- Heisenberg
 - princípio de incerteza, 66
- Heráclito de Éfeso, fogo, 10
- Herschel, John
 - nomes shakesperianos, 126
- Herschel, William
 - descoberta de luas, 126
 - descoberta de Urano, 125
 - descoberta do IR, 44
 - nome 'asteróide', 125
 - vazio no Cisne, 117
- hibridização, 22
- hidrogênio, 16
- história e filosofia natural, 12
- Hooke, Robert, 28
- Hug-Bug, 26
- Huygens, Christian, 28
 - descoberta de Titã, 126
- IAU, 129
- Ida, 133
- infravermelho, 44
- Kepler
 - Dioptrice*, 27
- Kuiper
 - Cinturão de, 134
- Lagrange
 - pontos de, 132
- Lassell, William, 126
- ligação intermolecular, 24
- ligação química, 21
 - covalente, 22
 - iônica, 22
 - metálica, 24
- Lippershey, Hans, 27
- Makemake, 130
- Maxwell
 - equações de, 28
- meteoritos, meteoros e meteoróides, 124
- Millikan
 - experimento de, 17
- Mira Ceti, 100
- molécula, 14
- momento angular, 62
- Montanari, Geminiano, 105
- Munsell, 38
- nêutron, 18
- nebulosa planetária, 99
- Netuno
 - descoberta, 125
- nuvens eletrônicas, 20
- observatório
 - de Mount Wilson, 90
 - de Potsdam, 86
 - de Toulouse, 126
 - Yerkes, 89

- OLAA, 31
- Olbers
 - descoberta de Pallas, 125
- onda
 - amplitude, 32
 - comprimento de onda, 32
 - frequência, 32
 - velocidade de propagação, 32
- onda, tipos
 - do mar, 32
 - eletromagnética, 33
 - harmônica, 32
 - som, 31
- Oort
 - Nuvem de, 134
- oscilação
 - frequência, 31
 - frequência angular, 30
 - período, 30
- pêndulo, 29
- Pallas
 - descoberta, 125
- Paracelso, 12
 - três princípios, 12
- Pauli
 - princípio da exclusão, 68
- physis, 10
- Pickering, Edward, 86, 126
- Planck
 - constante de, 52, 62
 - distribuição de, 51
 - lei de, 36
- planetas anões, 129
- planetesimais, 130
- Platão
 - elementos e sólidos regulares, 17
- Plutão
 - descoberta de, 126
- ponto de saída, 116
- próton, 18
- pressão de radiação, 134
- princípio do caminho mínimo de Heron, 28
- princípio do tempo mínimo de Fermat, 28
- processo triplo- α , 95
- processos de fusão
 - processo S, 87
- Quaoar e Varuna, 129
- Röntgen, 45
- rádio, ondas de, 44
- radiação, 77
- raios x, 45
- ramo assintótico, 100
- ramo horizontal, 99
- Rayleigh-Jeans, distribuição de, 52
- regra do octeto, 21
- Ritter
 - experimento do UV, 44
- Rutherford
 - experimento das folhas de ouro, 17
 - modelo atômico, 17
- Rydberg
 - equação de, 63
- série espectral
 - Balmer, 63
 - Lyman, 63
- satélites
 - definição, 130
- Schrödinger
 - Erwin, 67
 - gato de, 68
- Schwabe
 - Heinrich, 78
- Schwarzschild, raio de, 102
- Secchi, Angelo, 86
- Sedna, 129
- seqüência principal de estrelas, 95
- Shakespeare, 126
- Sirius, 105
- sistema de cores
 - CMYKOG, 44
 - CYMK, 42
 - RGB, 41
- Sistema galáctico, 118
- Snel
 - Lei de, 28
 - Willebrord, 27
- Stefan-Boltzmann
 - constante de, 54
 - lei de, 54
- supernova
 - comum (tipo II), 101
 - tipo Ia, 103
- Supernova de 1054, 102
- Tales de Mileto, água, 10
- termodinâmica
 - lei zero, 50
 - segunda lei, 94

Thompson

experimento dos raios catódicos, 17

Thompson (filho)

difração de elétrons, 65

turnoff point, 116

ultravioleta, 44

Vesta, 132

descoberta, 125

Vogel, Hermann Carl, 86

Wien

distribuição de, 52

lei de, 54

Wolf-Rayet, 87

Wolf-Rayet, estrelas, 102

Xenófanes de Cólofon, terra, 10

Yin e Yang, 29

Young

experimento da dupla fenda, 28