

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
BACHARELADO EM CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS

MONOGRAFIA

**ESTRELAS: UMA ANÁLISE DA SEQUÊNCIA PRINCIPAL DO
DIAGRAMA H-R**

RAILSON CARNEIRO ALEXANDRINO RODRIGUES

CRUZ DAS ALMAS, 17 DE MAIO DE 2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
BACHARELADO EM CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS

**ESTRELAS: UMA ANÁLISE DA SEQUÊNCIA PRINCIPAL DO
DIAGRAMA H-R**

RAILSON CARNEIRO ALEXANDRINO RODRIGUES

Monografia apresentada ao curso de
Bacharelado em Ciências Exatas e
Tecnológicas como Trabalho de Conclusão de
Curso orientado pelo professor Kilder Leite
Ribeiro.

CRUZ DAS ALMAS, 17 DE MAIO DE 2013

FICHA CATALOGRÁFICA

R696e	<p>Rodrigues, Railson Carneiro Alexandrino. Estrelas: uma análise da sequência principal do Diagrama H-R / Railson Carneiro Alexandrino Rodrigues._ Cruz das Almas, BA, 2013. 65f.; il.</p> <p>Orientador: Kilder Leite Ribeiro.</p> <p>Monografia (Graduação) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas.</p> <p>1.Estrelas – Diagrama. 2.Astrofísica – Análise. I.Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas. II.Título.</p> <p>CDD: 523.01</p>
-------	---

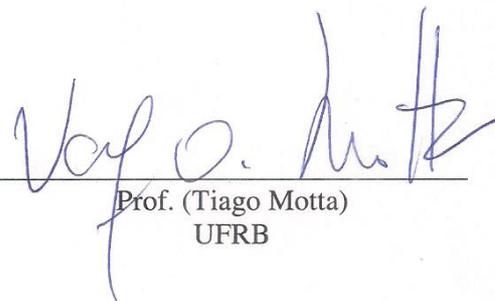
RAILSON CARNEIRO ALEXANDRINO RODRIGUES

ESTRELAS: UMA ANÁLISE DA SEQUÊNCIA PRINCIPAL DO DIAGRAMA H-R

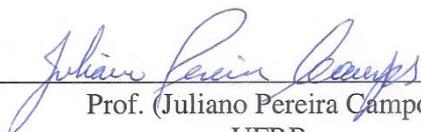
Cruz das Almas-BA, 17/05/2013.



Prof. Kilder Leite Ribeiro
UFRB
(Orientador)



Prof. (Tiago Motta)
UFRB



Prof. (Juliano Pereira Campos)
UFRB

DEDICATÓRIA

Dedico esta monografia aos meus pais por todo o apoio e suporte que me deram desde o início de minha jornada acadêmica. Bem como, a todos os leitores que se beneficiarem da leitura deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, pelo incentivo diário que me fornecem. Ao meu orientador, Kilder Leite Ribeiro, pela paciência e pelo direcionamento do trabalho a ser feito. Aos grandes cientistas do passado e do presente, por seus incríveis feitos que servem de base para a sociedade atual.

“O nitrogênio em nosso DNA, o cálcio em nossos dentes, o ferro em nosso sangue, o carbono em nossas tortas de maçãs, foram criados no interior de estrelas em colapso. Somos feitos do mesmo material das estrelas. Nós somos poeira das estrelas”.

Carl Sagan

Sumário

1 – INTRODUÇÃO	11
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 - Radiação Térmica	19
2.1.1 - Corpo negro.....	19
2.1.2 - Lei de Kirchooff da radiação térmica	20
2.1.3 - Lei de Stefan Boltzmann.....	21
2.1.4 - Lei de Wien.....	21
2.1.5 - Espectro do corpo negro.....	22
2.1.6 - Lei de Planck para a radiação de corpo negro.....	22
2.2 - Espectros atômicos	23
2.2.1 - Os postulados de Bohr	25
2.2.1.1 - Primeiro postulado	26
2.2.1.2 - Segundo postulado	28
2.2.1.3 – Dificuldades do modelo de Bohr	29
2.2.1.4 – Correção da massa	30
2.3 - Estrelas	30
2.3.1 - A Paralaxe estelar	31
2.3.2 - A fonte da energia das estrelas	33
2.3.3 – Brilho	34
2.3.4 - Temperatura Superficial	36
2.3.5 – Nomeação das estrelas	37
2.3.6 - Constelações	37
3 – O DIAGRAMA H-R	37
3.1 – A Sequência Principal.....	39
3.2 – O nascimento de uma estrela	40
3.3 – Evolução pós-Sequência Principal.....	40
3.4 – Anãs Brancas	42
3.5 – Estrela de Nêutrons.....	43
3.6 – Buracos Negros.....	43
4 – TRATAMENTO DE DADOS E METODOLOGIA DE ANÁLISE	43
4.1 – Objetos utilizados.....	44
4.2 – O Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) e a linearização dos dados.....	45
4.3 – Origin.....	45
4.4 – Características das retas ajustadas devido as faixas de massa das estrelas analisadas	46

4.4.1 - Estrelas com massa superior a $3M_{\odot}$	46
4.4.2 – Estrelas com massa entre $0,5M_{\odot}$ e $3M_{\odot}$	47
4.4.3 – Estrelas com massa inferior a $0,5M_{\odot}$	48
4.5 - Estimativa dos raios das estrelas.....	49
4.6 – Estimativa do tempo de vida das estrelas na Sequência Principal.....	50
5 – CONCLUSÕES	52
6 – APÊNDICES	54
6.1 – Estrelas na Bandeira do Brasil.....	54
6.2 – Lista de constelações.....	55
7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	62

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: As constelações da Ursa Maior e da Ursa Menor.....	11
Figura 2: Representação artística das constelações da Ursa maior e da Ursa menor. Nessa figura também vemos partes de outras constelações	12
Figura 3: A constelação de Órion.	13
Figura 4: Representação artística da Constelação de Órion	13
Figura 5: Representação das estações do ano, para um observador situado no espaço. .	14
Figura 6: Representação das estações do ano para um observador situado na Terra.	14
Figura 7: Representação artística do modelo geocêntrico.....	15
Figura 8: Luneta usada por Galileu Galilei.	17
Figura 9: Representação artística da paralaxe estelar	17
Figura 10: Dispersão da luz branca por um prisma.....	18
Figura 11: Modelo de corpo negro.	20
Figura 12: Espectro do corpo negro e representação da Lei de Wien.	22
Figura 13: Espectro contínuo, de emissão e de absorção.	24
Figura 14: Exemplo de espectrômetro.....	25
Figura 15: Representação esquemática da paralaxe estelar	31
Figura 16: Definição de Parsec. A figura está fora de escala.	32
Figura 17: Entendendo a paralaxe. A esquerda temos a visão a partir do olho esquerdo, enquanto que a direita temos a visão a partir do olho direito.	33
Figura 18: O diagrama H-R.	38
Figura 19: Nebulosa do esquimó, um exemplo de nebulosa planetária	41
Figura 20: Nebulosa do Caranguejo.	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Relação de estrelas da Sequência Principal com os valores de algumas características das mesmas.....	44
Tabela 2: Estrelas com massa superior a 3 massas solares, com os respectivos valores de x e de y conforme mostrado nas equações acima.....	46
Tabela 3: Estrelas com massa no intervalo entre 0,5 e 3 massas solares, com os respectivos valores de x e de y conforme mostrado nas equações acima.....	47
Tabela 4: Estrelas com massa inferior a 0,5 massas solares, com os respectivos valores de x e de y conforme mostrado nas equações acima.....	48
Tabela 1: Raios calculados das estrelas e a diferença percentual para os valores apresentados na tabela 1.....	50
Tabela 2: O tempo calculado de permanência das estrelas na Sequência Principal.....	51

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
BACHARELADO EM CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS

RESUMO

Estudar as estrelas é uma forma eficaz para entendermos alguns processos que ocorrem no Sol e vice-versa, daí a sua importância. Embora as estrelas estejam distribuídas ao longo de algumas regiões específicas do Diagrama de Hertzsprung-Russell ou Diagrama H-R, nesse trabalho, o enfoque restringiu-se a estrelas da sequência principal, da qual o Sol faz parte. Selecionamos algumas estrelas dessa região do Diagrama H-R e as dividimos em três categorias. Estas categorias foram determinadas por suas respectivas massas. Dessa forma, foi obtida uma relação empírica entre as massas e as luminosidades das estrelas, em cada uma dessas categorias. De posse disso, estimamos o tempo de vida de cada uma delas na sequência principal. Aplicando a Lei de Stefan Boltzmann para cada uma dessas estrelas selecionadas pudemos estimar o valor dos seus raios e dispoendo das suas magnitudes visuais e absolutas calculamos a que distância elas se encontram da Terra.

Palavras Chave: Estrelas, Sequência Principal, Diagrama H-R

1 - INTRODUÇÃO

Desde muito tempo os seres da nossa espécie tiveram a curiosidade de olhar para o Céu noturno. Eles ficaram vislumbrados com aqueles ‘pontinhos’ luminosos que serviam para atenuar a total escuridão da noite. Decorridas muitas observações, os antigos começaram a notar que havia alguns ‘pontinhos’ luminosos que efetuavam alguns movimentos relativamente aos outros, ora eles se adiantavam ora retrocediam. Esses ‘pontinhos’ luminosos que efetuavam tais movimentos relativamente aos outros que pareciam fixos (relativamente a eles mesmos) receberam o nome de planetas, que em grego pode ser traduzido como ‘errantes’[1]. Da antiguidade até o ano 1781, só eram conhecidos cinco planetas (com exceção da Terra)[2].

Como indicado no parágrafo acima, alguns ‘pontinhos’ luminosos visíveis no Céu noturno, quase todos que eram vistos, mantinham sua configuração em relação aos demais, enquanto que, outros, pouquíssimos, avançavam e retrocediam em relação aos mencionados anteriormente. Os ‘pontinhos’ que apresentavam esses movimentos de avanço e retrocesso, receberam o nome de planetas, enquanto que aqueles que não apresentavam esses movimentos, receberam o nome de estrelas.

Nas sucessivas observações dos fenômenos naturais, os antigos notaram que o Sol e os corpos celestes, de maneira geral pareciam sempre surgir a partir de uma localização geográfica[1], a qual denominaram leste. Apontando o braço direito na direção em que o Sol nasce, é possível determinar os quatro pontos cardeais. Considerando a configuração descrita acima, com o braço direito direcionado para o leste, o esquerdo indica o oeste, enquanto que a parte frontal indica o norte e a parte dorsal o sul.

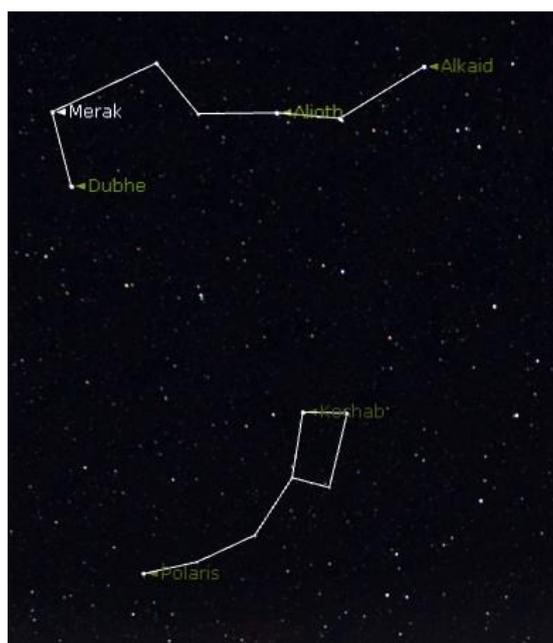


Figura 1: As constelações da Ursa Maior (acima) e da Ursa Menor (abaixo) [6].

Mas, os antigos não ficaram restritos a orientação geográfica pelo nascimento do Sol. Eles perceberam que as estrelas, de forma geral, forneciam informações importantes tanto de localização quanto das estações do ano, estas últimas eram muito importantes devido a questão do plantio.

Como foi dito no segundo parágrafo, as estrelas mantêm uma posição bem definida relativamente as outras estrelas¹. Aproveitando essa característica, os antigos perceberam que poderiam subdividir o Céu em algumas regiões, considerando não apenas uma estrela individualmente, mas sim um grupamento delas (as constelações)[1]. Dessa forma, ficava muito mais fácil estudar algumas regiões do Céu especificamente. Os antigos tinham uma imaginação incrível. Eles ‘viam’ no céu grandes animais, tais como as duas ursas (Ursa maior e Ursa menor), como pode ser visto nas figuras 1 e 2, os dois cães (Cão maior e Cão menor), o touro, o escorpião, entre outros. Viam também guerreiros lendários (Hércules e Perseu) e também um grande caçador (Órion), conforme pode ser visto nas figuras 3 e 4. Havia também algumas figuras legendárias, tais como o Sagitário, o Pégaso e o Centauro. Através das constelações gregas, conhecemos muito da sua mitologia².

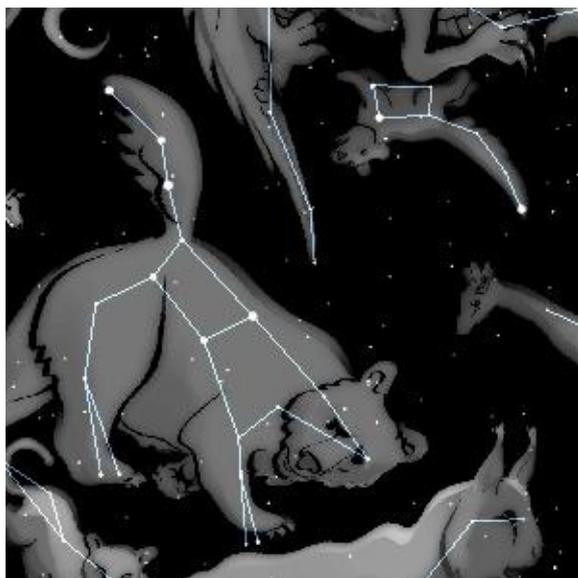


Figura 2: Representação artística das constelações da Ursa maior e da Ursa menor. Nessa figura também vemos partes de outras constelações[7].

A título de exemplo, a estrela Polar (que atualmente é a estrela Polaris, a qual está na cauda da Ursa menor), indica a posição geográfica norte para um observador que esteja no Hemisfério Norte[2]. Para quem está situado no Hemisfério Sul, uma referência para

¹ Apenas aparentemente. No decorrer de um intervalo de tempo relativamente longo é possível verificar as estrelas movendo-se umas em relação as outras. Com isso, os aspectos das constelações tendem a mudar com a passagem dos milênios.

² No apêndice 2 encontra-se uma lista das 88 constelações definidas atualmente. As constelações gregas originais eram 48 e foram organizadas por Ptolomeu no seu livro *Almagesto*. Por essa razão, demos ênfase a expressão ‘constelações gregas’, bem como a sua mitologia.

localização é a constelação do Cruzeiro do Sul, a qual, estendendo mentalmente o ‘braço maior’ da cruz em quatro vezes e meia, temos a indicação da posição geográfica sul[2]. A constelação de Órion, para o Hemisfério Sul é a constelação representante do Verão, em outras palavras, quando Órion está visível no Céu noturno por grande parte da noite, os habitantes do Hemisfério Sul sabem que é verão. Como as estações são invertidas entre os Hemisférios da Terra³, Órion é a constelação que determina o inverno no Hemisfério Norte. Na figura 5 vemos uma representação das estações do ano, sob um aspecto de um observador situado no espaço, enquanto na figura 6 está representado sob o ponto de vista de um observador situado na Terra.

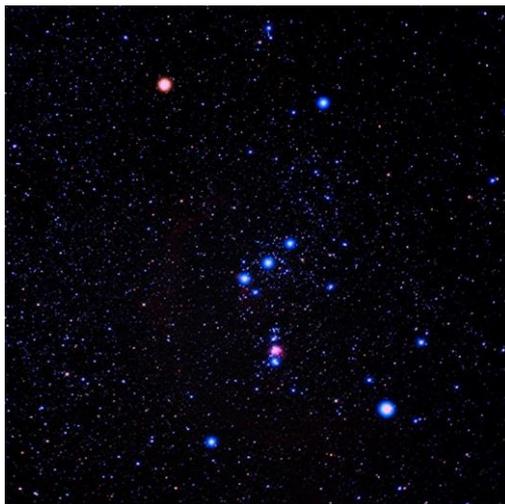


Figura 3: A constelação de Órion[8].

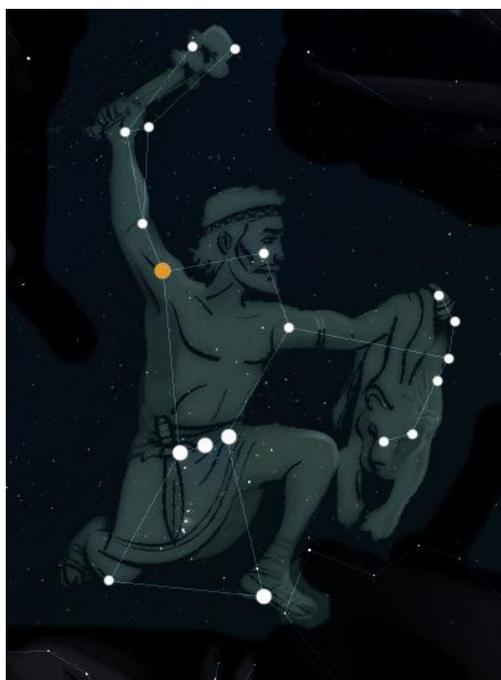


Figura 4: Representação artística da Constelação de Órion[9].

³ Quando é verão no Hemisfério Norte, é inverno no Hemisfério Sul. Quando é outono no Hemisfério Norte é primavera no Hemisfério Sul. Verão e inverno estão em oposição da mesma forma que primavera e outono nos dois Hemisférios.



Figura 5: Representação das estações do ano, para um observador situado no espaço[10].



Figura 6: Representação das estações do ano para um observador situado na Terra[11].

Os antigos não conseguiam notar o movimento relativo das estrelas, por essa razão elas não entraram na classe dos ‘astros errantes’, os planetas, conforme mencionado no segundo parágrafo. Por essa razão, eles supunham que todas estavam a igual distância da Terra. Como elas se deslocavam como um todo a uma taxa de aproximadamente 1° por dia, de modo que a cada dia surgem no Céu com aproximadamente quatro minutos de atraso com relação ao dia anterior⁴, eles imaginaram que as estrelas se distribuíam numa esfera, denominada esfera das estrelas fixas. Eles imaginavam que a Terra era o centro do Universo e a Lua, o Sol, os planetas (Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter e Saturno) e as estrelas fixas giravam ao seu redor,

⁴ Uma das hipóteses para explicar o fato da circunferência possuir 360° é a de que uma civilização antiga acreditava que o ano possuía 360 dias de modo que o Sol ‘percorreria’ 1° por dia, totalizando os 360° da circunferência em um ano exato. Adotando que um dia possui 24 horas exatas e que uma hora possui 60 minutos, então um dia tem $60 \times 24 = 1440$ minutos. Pegando esse resultado e dividindo por 360 obtemos o valor 4, que representa os quatro minutos de atraso com respeito ao dia anterior.

conforme pode ser visto na figura 7. Não é a toa que o nome do livro de Copérnico de 1543, onde ele propõe o Sol no Centro do Universo é: “Sobre as revoluções das esferas celestes”[2]. Nesse livro Copérnico faz exatamente uma mudança na forma como as esferas celestes ficariam distribuídas posicionando o Sol no centro e relegando a Terra e ser um mero planeta a orbitá-lo. Fica nítido aqui que o que Copérnico propôs foi algo no mínimo revolucionário, porém não inédito, pois já na antiguidade o astrônomo Aristarco de Samos havia proposto essa mesma ideia[1]. O livro de Copérnico também é conhecido com “O livro que ninguém leu”, fazendo uma alusão ao fato dele ter sido colocado no Índice da igreja como um livro cuja leitura era proibida⁵[2].

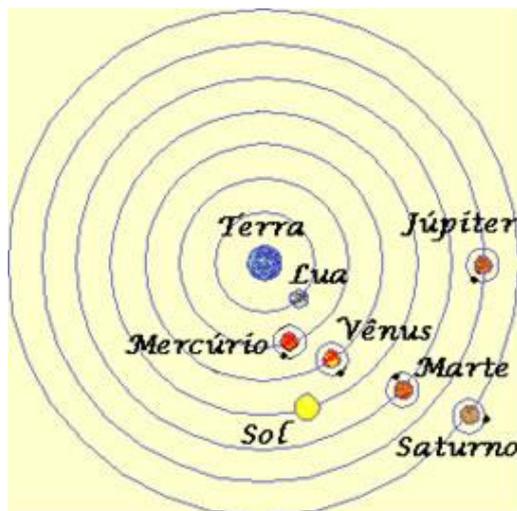


Figura 7: Representação artística do modelo geocêntrico[12].

Uma das razões pelas quais eles pensavam dessa forma, além de considerações filosóficas e religiosas, tinham embasamento na percepção do cotidiano. Ora, não sentimos a Terra girar, pelo contrário, vemos todos os dias os corpos celestes ‘nascerem’ a leste e se porem a oeste. Outro fator que eles levaram em consideração era que se a Terra orbitasse o Sol, seria possível notar o efeito de paralaxe⁶ estelar. Esse efeito nunca foi visto (até aquele momento) e servia de argumentação para o sistema geocêntrico (Terra sendo o centro do Universo).

Os primeiros astrônomos a se interessarem pelo diferente brilho das estrelas foram Hiparco de Nicéia (190-125 a.C.) e Cláudio Ptolomeu (90-168 d.C), este último é o autor do *Almagesto*, que foi a maior obra astronômica da Antiguidade[1]. Esses

⁵ O livro de Copérnico só foi colocado no Índice da igreja muito depois da publicação. Um dos editores mudou o prefácio escrito por Copérnico afim de não gerar conflito com a opinião do papa. Nesse novo prefácio é dado ênfase ao fato de que aquela nova maneira de abordar o problema do movimento dos corpos celestes era um mero artifício de cálculo, mas que não condizia com a realidade. De fato, em muitos aspectos os cálculos matemáticos eram bem mais simples se fosse utilizado o modelo copernicano do que o ptolomaico e inclusive os jesuítas passaram a utilizá-lo para fazer predições das posições dos planetas. Tudo isso passou a mudar quando algumas pessoas, tais como Giordano Bruno, que foi queimado vivo em praça pública pela inquisição, Kepler e Galileu começaram a coletar evidências e divulgar que o modelo de Copérnico não era um mero artifício matemático, mas que se tratava de uma realidade concreta. Esse foi o motivo pelo qual muito tempo depois de sua publicação sua leitura foi proibida. Copérnico recebeu uma cópia de seu livro impresso em seu leito de morte, no ano de 1543. Há quem diga que sua morte foi antecipada ao ter percebido que o prefácio que constava no livro impresso não era de sua autoria.

⁶ O desvio aparente da posição de um objeto pelo movimento do observador.

astrônomos dividiram as estrelas visíveis em seis categorias, as quais deram os nomes de magnitudes. De acordo com essa classificação, das 1022 estrelas até então catalogadas, somente 21 pertenceriam a primeira magnitude (mais brilhantes). No entanto, o principal interesse dos astrônomos era a descrição dos movimentos dos corpos celestes e não sobre a essência desses corpos. Aristóteles dividia o Cosmos em duas regiões, a saber, a região sublunar e a região supralunar. A primeira era formada pelos quatro elementos (Terra, Água, Ar e Fogo), com esse modelo, Aristóteles explicava que os corpos caem por estarem buscando o seu ‘lugar natural’. A segunda região era formada por outro tipo de elemento, que ele denominou de Éter ou Quintessência. Todos os corpos compostos por esse elemento eram perfeitos.

Por muito tempo, não foi feita mais nenhuma contribuição nessa área. Os astrônomos eram mais interessados em entender o movimento dos corpos celestes, sobretudo o dos planetas, isso explica o fato de que só no ano 1830 essa questão voltou a tona com o trabalho de William Herschell. Ele estava medindo o brilho das estrelas e descobriu que as de primeira magnitude, isto é, as mais brilhantes, possuem intensidade de brilho cem vezes maior que as de sexta magnitude. Nesta escala, o número 100 equivale a diferença de brilho entre cada cinco magnitudes[1]. Assim, a diferença de luminosidade entre certa magnitude e a imediatamente posterior corresponde a raiz quinta de 100 (2,512). Portanto, uma estrela de magnitude 1, por exemplo, é (2,512)¹ vezes mais luminosa que uma estrela de magnitude 2, (2,512)² vezes mais brilhante que uma de magnitude 3 e fornece (2,512)⁵ vezes, ou seja 100 vezes, que uma de sexta magnitude. Temos a seguinte equação:

$$m_{v_2} - m_{v_1} = 2,5 \log \left[\frac{I_{v_1}}{I_{v_2}} \right],$$

onde m_v é a magnitude da estrela na faixa do visível e I_v é a intensidade de luz emitida pela estrela também na faixa do visível. Nesse caso, temos a comparação entre duas estrelas.

Com o uso do telescópio, a Astronomia fez grandes avanços. Quando Galileu Galilei apontou a sua luneta para o Céu, que pode ser vista na figura 8, entre tantas descobertas como os quatro satélites de Júpiter, que são conhecidos como satélites galileanos⁷, a saber Io, Europa, Calisto e Ganimedes, as crateras da Lua, fases de Vênus e manchas solares, também viu uma quantidade enorme de estrelas que não era visível a olho nu. Num dos parágrafos acima, foi mencionado a paralaxe e que ela por não ter sido percebida pelos antigos era usada como argumento para a imobilidade da Terra, contudo, com o advento do telescópio foi possível detectar a paralaxe de algumas estrelas, na figura 9 vemos uma representação artística da paralaxe estelar. A primeira estrela que teve sua paralaxe detectada foi a 61 Cygni, a qual foi medida pelo astrônomo alemão Friedrich W. Bessel no ano de 1838, dessa forma, Bessel foi capaz de medir a distância entre o Sol e essa estrela[1]. A estrela de maior paralaxe observada até o

⁷ Inicialmente Galileu batizou os quatro satélites de Júpiter que ele havia avistado com a sua luneta de estrelas Mediceias em homenagem aos Médici.

momento é a Proxima Centauri, o que a configura como a estrela mais próxima ao Sol, estando a uma distância de 4,22 anos luz do Sol.



Figura 8: Luneta usada por Galileu Galilei[13].

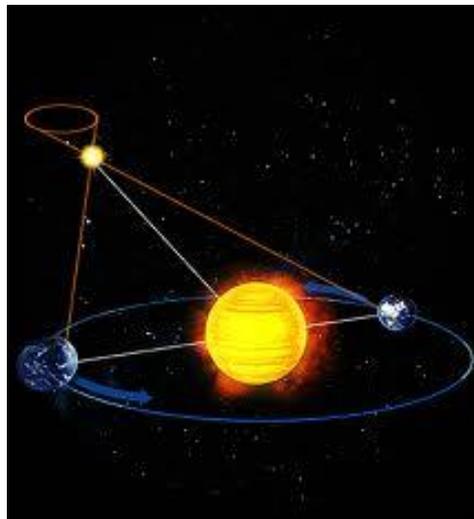


Figura 9: Representação artística da paralaxe estelar[14].

Uma forma de estudar as estrelas é analisando a luz que chega até a nós. Analisando essa luz, podemos saber quais são os elementos que estão na atmosfera da estrela (espectroscopia). Os astrônomos usam um prisma, ou espectroscópio para decompor a luz das estrelas, como pode ser visto na figura 10, e estudar a intensidade dos diferentes comprimentos de onda. Um espectro pode revelar o comprimento de onda no qual uma estrela é mais brilhante e assim é possível calcular a sua temperatura superficial. A grande maioria dos espectros é cruzada por várias linhas escuras, onde a luz de certos comprimentos de onda é absorvida entre nós e a estrela. Essas ‘linhas de absorção’ são causadas pelos átomos de diferentes elementos na atmosfera da própria estrela, que absorvem radiação de certas energias. Como cada elemento absorve ou emite comprimentos de onda específicos, é possível estudar a composição de estrelas, planetas e nebulosas[2]. Uma informação relevante é que o elemento químico Hélio, foi descoberto no Sol, através de técnicas espectroscópicas, por Robert Bunsen, famoso

pelo aparelho inventado por ele, o bico de Bunsen, e Gustav Robert Kirchhoff, não é a toa, pois Sol em grego é Helios.

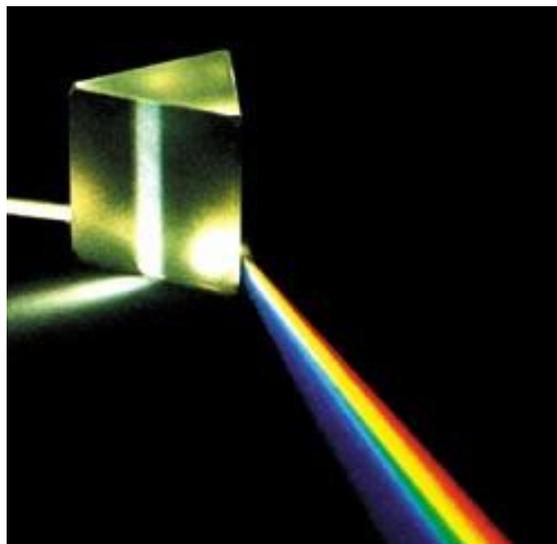


Figura 10: Dispersão da luz branca por um prisma[15].

A cor das estrelas depende da sua temperatura superficial, da mesma forma que uma barra de ferro aquecida num forno fica primeiro vermelha, depois amarela, até ficar branca. A quantidade de energia que aquece cada região da superfície de uma estrela controla a sua cor. No entanto, o tamanho das estrelas pode variar, e se uma estrela cresce em certa fase de seu ciclo de vida, sua área de superfície aumenta, e a quantidade de energia que aquece cada região da superfície cai. Dessa forma, uma estrela pode ficar maior e mais fria ao mesmo tempo. Marcando as relações entre luminosidade e cor (tipo espectral) no chamado diagrama de Hertzsprung-Russel⁸ ou simplesmente diagrama H-R, os astrônomos descobriram regras importantes para o estudo das estrelas[2].

As estrelas também se fizeram presente na obra literária de muitos poetas. William Shakespeare foi um deles e em uma de suas obras mais conhecida (*Romeu e Julieta*), ele escreveu: “...Qual é a luz que brilha através daquela janela? É o oriente, e Julieta é o Sol. Ergue-te, ó Sol resplandecente, e mata a Lua invejosa, que já está fraca e pálida de dor ao ver que tu, sua sacerdotisa, és muito mais bela do que ela própria ... Sou ousado de mais; não é para mim que ela fala. Duas das mais belas estrelas de todo o firmamento, quando têm alguma coisa a fazer, pedem aos olhos dela que brilhem nas suas esferas até que elas voltem. Oh! Se os seus olhos estivessem no firmamento e as estrelas no seu rosto! O esplendor da sua face envergonharia as estrelas do mesmo modo que a luz do dia faria envergonhar uma lâmpada. Se os seus olhos estivessem no Céu, lançariam, através das regiões etéreas, raios de tal esplendor que as aves cantariam, esquecendo que era noite. Vede como ela encosta a face à sua mão. Oh! Quem me dera ser a luva dessa mão, para poder tocar a sua face”.

⁸ O diagrama de Hertzsprung-Russel, ou simplesmente diagrama H-R, consiste numa idealização independente dos astrônomos Ejnar Hertzsprung e Henry Russel que consiste em relacionar as estrelas num gráfico no qual um dos eixos indica a luminosidade e no outro a cor ou tipo espectral. Para mais informações sobre o diagrama H-R, consulte o capítulo 3 dessa monografia.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - Radiação Térmica

A medida que uma barra de ferro vai aumentando de temperatura ela vai gradualmente mudando de cor, desde o vermelho até a luz branca. O calor emitido pela barra é transportado através de ‘raios’, esses raios invisíveis correspondem a um tipo de radiação que emitem (ou absorvem) os corpos aquecidos, esta se denomina **radiação térmica**[3].

A radiação térmica não ocorre apenas a temperaturas altas, ela também acontece na temperatura ambiente e a temperaturas mais baixas. A diferença consiste em que a medida que a temperatura decresce, diminui a intensidade da radiação e a composição espectral (tonalidade de cor) é diferente[3].

Sobre a radiação térmica podemos dizer que quanto mais se esquentar um corpo mais ele brilha e que a medida que se eleva a temperatura de um corpo, varia a cor da luz. Essas características mencionadas anteriormente constituem em dados puramente qualitativos, é necessário obter leis quantitativas[3], pois como diria Lord Kelvin, só podemos dizer que conhecemos um pouco de um determinado assunto se pudermos expressá-lo em forma matemática. Na busca destas leis quantitativas verificou-se que a energia emitida é composta por diferentes comprimentos de onda (ou frequência) da radiação, e que depende da natureza da superfície e de sua temperatura, por essa razão adotaram um corpo modelo (de referência) a partir do qual se estabeleceram as leis gerais da radiação térmica; conhecidas estas leis gerais, podem-se corrigi-las para cada caso particular. Este corpo foi idealizado por Kirchhoff, o qual o denominou de corpo negro[3].

2.1.1 - Corpo negro

Consideremos uma caixa com um pequeno orifício que se encontra dentro de outra caixa fechada, esta última sem orifício algum, elas começam a intercambiar energia e sua temperatura vai equilibrando pouco a pouco. No decorrer desse intercâmbio, através do orifício da caixa interior passa a radiação que leva o excesso de energia da parte mais quente para a mais fria. No caso em que a caixa exterior esteja a uma temperatura superior a caixa interior, o fluxo de energia está dirigido para a cavidade interior da caixa menor, a qual absorve toda a radiação do mesmo modo que o faz um corpo negro[3] [4]. Dessa forma em 1859 Kirchhoff chegou a noção de corpo negro e construiu seu modelo em forma de uma câmara com um furo pequeno. A energia que sai através deste furo para o exterior depende somente da temperatura do corpo negro[3].

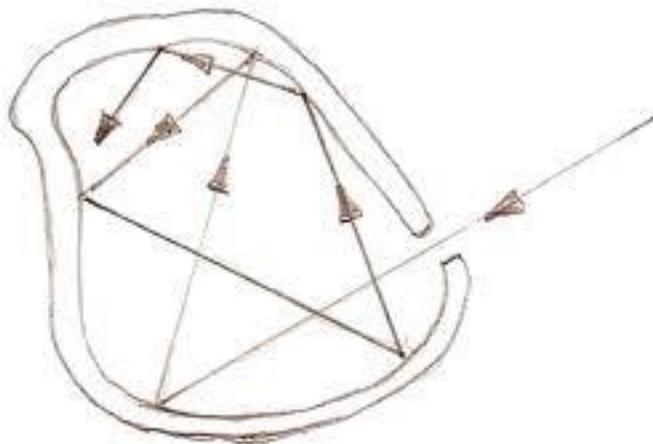


Figura 11: Modelo de corpo negro[16].

2.1.2 - Lei de Kirchhoff da radiação térmica

A fração de radiação absorvida por um corpo é denominada capacidade de absorção $a(\lambda, T)$. Cada corpo apresenta um valor particular dessa grandeza, pois ela depende dos materiais, além de que o poder de absorção de um corpo tem distintos valores para diferentes frequências de radiação que incide sobre ele.

Um corpo emite radiação, a maior parte dela invisível ao olho humano. Esta radiação é composta por ondas de diversas frequências. A fração de radiação emitida a uma frequência fixa é denominada capacidade de emissão ou emissividade $e(\lambda, T)$, esta também depende das características do corpo[3].

No ano de 1859 Kirchhoff enunciou o seguinte[3] [4]: No equilíbrio térmico a relação entre a emissividade $e(\lambda, T)$ e a capacidade de absorção $a(\lambda, T)$ é uma função universal ou espectral $\varepsilon(\lambda, T)$, que não depende da natureza dos corpos. Ou seja, se temos dois corpos a mesma temperatura, porém de formas diferentes e também materiais distintos, a relação mencionada é uma constante.

$$\frac{e(\lambda, T)}{a(\lambda, T)} = \varepsilon(\lambda, T) \quad (1)$$

O corpo negro incandescente deve entrar em equilíbrio térmico com os corpos mais frios que o rodeiam mediante a entrega de seu excesso de energia por intermédio da radiação. O espectro da radiação emitida é estudado no laboratório de modo que, experimentalmente consegue-se demonstrar que depende unicamente da temperatura do corpo negro[3].

O corpo negro é um absorvente perfeito de radiação: $a(\lambda, T) = 1$.

Assim: $e(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T)$

2.1.3 - Lei de Stefan-Boltzmann

Quando o físico austríaco Joseph Stefan estudava a radiação de corpo negro, tomou conhecimento dos experimentos realizados em 1865 por John Tyndall, o qual consistia na medição da emissão total da energia de um arame de platina a distintas temperaturas. Ao esquentar, o arame emite radiação. Pode-se considerar esta radiação como de corpo negro[3]. Tyndall encontrou que a 1200°C ($= 1473\text{K}$) a platina emitia 11,7 vezes mais energia que quando estava a temperatura de 525°C ($= 798\text{K}$). Stefan, em 1879, relacionou estas temperaturas absolutas

$$\frac{T}{T'} = \frac{1473}{798} = 1,846, \quad (2)$$

depois elevou esta quantidade a suas diferentes potências

$$\left(\frac{T}{T'}\right)^2 = 3,41; \left(\frac{T}{T'}\right)^3 = 6,29; \left(\frac{T}{T'}\right)^4 = 11,6. \quad (3)$$

Essa relação entre as energias emitidas e suas respectivas temperaturas elevadas a quarta potência se cumpria para todo par de energias e temperatura correspondentes, de onde se deduziu que a energia emitida é proporcional a temperatura absoluta elevada a quarta potência

$$E \propto T^4. \quad (4)$$

Ludwig Boltzmann em 1884 deduziu essa lei a partir de considerações termodinâmicas e eletromagnéticas.

A lei de Stefan Boltzmann diz: “A energia emitida por unidade de tempo e por unidade de área, isto é, a intensidade da radiação de um corpo negro é diretamente proporcional a quarta potência de sua temperatura absoluta”[3] [4].

$$I = \sigma T^4 \quad (5)$$

σ : é a constante de Stefan Boltzmann

$$\sigma = 5,717 \times 10^{-8} \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$$

A intensidade de radiação a que se refere a Lei de Stefan Boltzmann é a quantidade total que emite o corpo. Essa lei não diz nada sobre as propriedades da radiação para diferentes frequências. Quando o corpo emissor não é um corpo negro, a energia irradiada é menor que a energia de um corpo negro a mesma temperatura, de modo que podemos modificar a Lei de Stefan Boltzmann incorporando a emissividade ($0 < e < 1$)[3].

$$I = e\sigma T^4 \quad (6)$$

2.1.4 - Lei de Wien

A lei do deslocamento de Wien estabelece que a medida que a temperatura absoluta de um corpo aumenta, o máximo de sua distribuição de intensidade se desloca para comprimentos de onda mais curtos (ou para as zonas de frequências mais altas)[3][4].

$$\lambda_{max} \cdot T = cte \quad (7)$$

2.1.5 - Espectro do corpo negro

Em 1899, Lummer e Pringsheim depois de um processo experimental muito trabalhoso e preciso, chegaram a representar a intensidade da radiação em função do comprimento de onda (ou frequência) para distintas temperaturas[3].

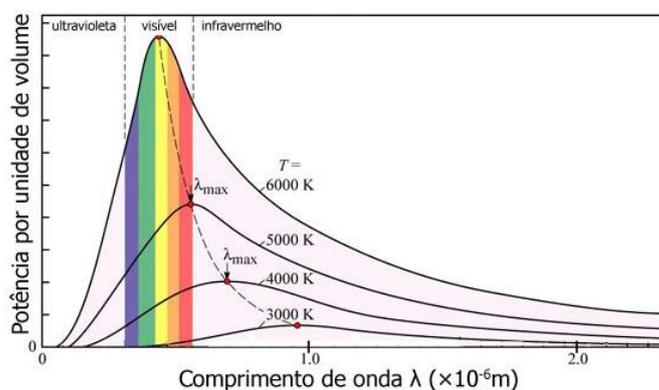


Figura 12: Espectro do corpo negro e representação da Lei de Wien[17].

2.1.6 - Lei de Planck para a radiação de corpo negro

A busca de uma equação para a radiação do corpo negro cativou muitos físicos, entre eles Max Planck. Até aquela época se conheciam duas leis que se complementavam, uma se encontrava restrita para baixas frequências e outra para altas frequências. Planck, depois de muitos esforços, conseguiu chegar a uma fórmula geral[3][4],

$$I_{(\lambda,T)} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1\right)}, \quad (8)$$

onde $h = 6,63 \times 10^{-34} J \cdot s$; é a constante de Planck, $c = 3 \times 10^8 m/s$; é a velocidade da luz no vácuo e $K = 1,38 \times 10^{-23}$; é a constante de Boltzmann.

A Termodinâmica exigia de Planck que, primeiramente, dividisse a energia em porções e, depois de realizar alguns cálculos, fazer o segundo passo que consiste em somar todas essas porções (integrar) para ter a energia total de radiação, este segundo passo Planck não deu; após o primeiro passo, ele se deu conta que aparecia a fórmula, que ele por suposição já conhecia, de modo que ele já possuía uma sustentação teórica para sua fórmula. Esta solução é muito forçada e injustificada dentro do contexto da física clássica. Posteriormente demonstrou-se que se Planck houvesse dado o segundo

passo retornaria inevitavelmente aos resultados obtidos pela física clássica. A genialidade de Planck consistiu na interpretação dos seus resultados, ele dizia que a divisão da energia em porções (tratamento estatístico) se devia ao fato de que os osciladores elétricos só podiam emitir ou absorver energia em “pacotes” de energia, os quais lhe nomeou de quantum. Agora, em lugar de dividir toda a energia da radiação em uma quantidade infinita de partes, isto é, em forma contínua, esta somente podia ser dividida em um número finito de porções (forma descontínua), cada uma delas associada a um oscilador. Deste modo, a radiação revela sua natureza descontínua, onde os *quanta* estão relacionados com a frequência segundo a equação,

$$E = hf . \quad (9)$$

A física clássica impede a obtenção da fórmula de Planck porque um de seus princípios fundamentais é o da continuidade da energia[3], o qual consiste em que, por exemplo, uma lâmpada emite energia luminosa continuamente semelhantemente ao Sol e um ciclista que desce por uma rampa aumenta em forma contínua sua velocidade e com isso sua energia. Caso os corpos adquirissem ou cedessem energia de forma não contínua, mas na forma de pacotes, a realidade mudaria bruscamente. Assim, a lâmpada acenderia e apagaria, o Sol lançaria uma porção de energia luminosa e se apagaria até o despejo seguinte e o ciclista desceria a empurrões, contudo isso nunca foi visto.

Todavia, para que a equação de Planck surja, é necessário supor que a energia é adquirida ou cedida em formas de pacotes de energia, isto é, em forma descontínua. Observamos a luz de forma contínua, pois o nosso olho possui uma ‘certa inércia’, denominada persistência retiniana⁹, não podendo registrar separadamente os fenômenos que ocorrem entre si muito depressa. Os *quanta* de energia que são emitidos pelas fontes de luz sucedem uns aos outros com grande rapidez, por essa razão as reações do olho a cada quantum de energia se confunde com uma sensação contínua de luz[3].

2.2 - Espectros atômicos

Já na segunda metade do século XIX, era sabido que gases a baixa pressão emitem luz quando sua temperatura era elevada o suficiente ou se fossem submetidos a uma diferença de potencial elétrico muito alta. Quando esta luz passa por um prisma, ela é dividida em um padrão de linhas de cores separadas, o qual sempre é o mesmo para um determinado gás, mas diferente dos padrões conhecidos para os demais gases. Este

⁹ É devido a persistência retiniana que podemos assistir filmes a partir da movimentação rápida dos fotogramas. Denomina-se fotograma cada uma das imagens impressas quimicamente no filme cinematográfico. Fotografados por uma câmara a uma cadência constante (desde 1929 padronizada em 24 por segundo) e depois projetados no mesmo ritmo, em registro e sobre uma tela, os fotogramas produzem no espectador a ilusão de movimento. Isto se deve à incapacidade do cérebro humano de processar separadamente as imagens formadas na retina e transmitidas pelo nervo óptico, quando percebidas sequencialmente acima de uma determinada velocidade. Esta persistência da visão faz com que nossa percepção misture as imagens de forma contínua, dando a sensação de movimento natural.

padrão de linhas é denominado espectro. O arco íris é um espectro da luz branca que contém todas as frequências do espectro visível[3].

O estudo das linhas espectrais é de grande importância já que permite identificar os elementos. Foi dessa forma que se descobriu no Sol um elemento ainda não conhecido na Terra o qual denominaram de Hélio, que no grego significa Sol. Discorreremos sobre dois tipos de espectros, o espectro contínuo e o espectro discreto. Na figura 12 está uma representação ilustrativa desses dois tipos de espectros.

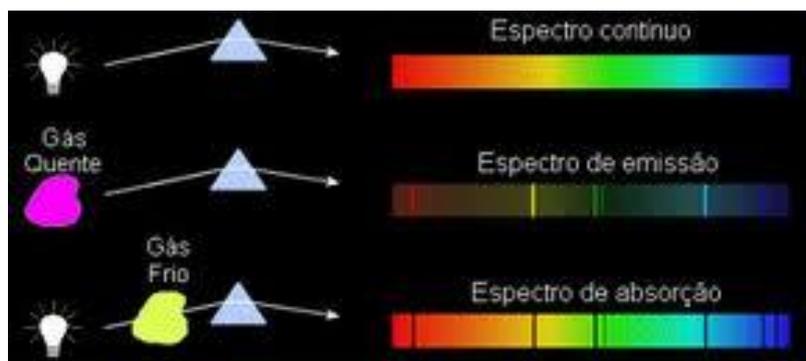


Figura 13: Espectro contínuo, de emissão e de absorção[18].

Espectro Contínuo: É produzido por objetos a temperaturas altas, como por exemplo, uma estrela ou um sólido incandescente. A luz por eles emitida apresenta todas as cores.[3]

Espectro Discreto: Este tipo de espectro depende da composição química dos corpos que o emitem, enquanto que o espectro contínuo depende somente da temperatura do corpo[3]. Ele pode ser subdividido em outros dois, a saber:

- Espectro de emissão: Os corpos a determinadas temperaturas emitem radiação, porém não em todos os comprimentos de onda, mas sim em comprimentos de onda “próprios” ou característicos. Desse modo, sob o aspecto visual aparecem linhas de emissão brilhantes em um fundo escuro. Através dos comprimentos de onda “próprios” cada elemento fica caracterizado[3].
- Espectro de absorção: É o espectro que surge, por exemplo, quando fazemos incidir uma luz incandescente sobre um gás de temperatura baixa e em seguida essa luz atravessa um prisma. Nesse caso, o espectro resultante apresenta certas interrupções dadas por linhas escuras entre cores brilhantes, estas linhas são denominadas linhas de absorção[3].

As bandas do espectro de emissão e do de absorção para o mesmo elemento coincidem como se um espectro fosse o negativo do outro.

O aparelho utilizado para determinar o espectro de qualquer elemento é chamado de espectrômetro ou espectrógrafo, na figura 13 vemos um espectrômetro.



Figura 14: Exemplo de espectrômetro[19].

Ao tomar o espectro do elemento mais simples, o hidrogênio, verificou-se que os comprimentos de onda das linhas começavam a diminuir convergindo ao limite de uma série, porém era muito difícil observar experimentalmente as linhas da série em determinadas regiões, pois a separação era muito pequena e, além disso, se encontrava na região ultravioleta do espectro[3].

Johann J. Balmer, físico e matemático suíço, em 1885 descobriu a seguinte equação

$$\lambda = 3646 \times 10^{-8} \left(\frac{n^2}{n^2 - 4} \right) \text{ cm} ,$$

onde n representa o número da linha que se deseja achar e, além disso, $n \geq 3$. Essa equação prediz corretamente as nove primeiras linhas do espectro do hidrogênio.

Outro cientista, Johannes R. Rydberg, físico sueco, em 1890, também estudou a caracterização do espectro de hidrogênio, contudo ele propôs trabalhar não com o comprimento de onda, mas sim com o seu inverso, o qual é denominado de número de onda ($\kappa \equiv 1/\lambda$) determinando que:

$$\kappa = R_H \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right); R_H \approx 109,677581 \text{ cm}^{-1}$$

onde n_f e n_i , são números inteiros e R_H é a constante de Rydberg para o hidrogênio.

Era preciso, contudo, explicar a equação acima e deduzir suas consequências nos átomos, em outras palavras, era preciso obtê-la teoricamente. Porém, as ideias da física clássica não podiam explicar os dados experimentais[3].

2.2.1 - Os postulados de Bohr

Após o experimento de Rutherford do bombardeamento de uma folha de ouro por partículas alfa, no ano de 1911, constatou-se que tanto a carga positiva do átomo quanto a sua massa ficava concentrada no seu núcleo¹⁰. Para explicar os resultados experimentais, Rutherford propôs que os elétrons orbitavam o núcleo em órbitas bem definidas, do mesmo modo que os planetas orbitam o Sol. Todavia, a partir da teoria eletromagnética, uma carga elétrica sujeita a uma aceleração emite radiação perdendo sua energia, isso, contudo não acontece com os elétrons nos átomos. Esse era um problema que precisava de uma explicação urgente e acabou conduzindo a formulação de uma teoria nova. Niels Bohr em 1913 teve a ideia de incluir no modelo proposto por Rutherford a teoria quântica de Planck e Einstein, de modo que os elétrons não perdessem energia em forma contínua e assim caíssem no núcleo, mas sim que os elétrons estariam confinados em certos níveis energéticos e orbitais estáveis, conhecidos como estados estacionários.[3]

2.2.1.1 - Primeiro postulado

O elétron pode mover-se somente em certos estados estacionários (órbitas) que não variam com o tempo e apesar do movimento do elétron ser acelerado ele não emite energia.

Pode-se dizer que dessa forma Bohr livrou-se de um dos principais problemas a respeito da estabilidade atômica, pois segundo as teorias clássicas das ondas eletromagnéticas, partículas carregadas sujeitas a uma aceleração deveriam emitir radiação.

Sabe-se da eletrostática que a força produzida pela interação de duas cargas q_1 e q_2 separadas por uma distância d estando elas imersas no vácuo é dada por:

$$F_{el} = K \frac{q_1 q_2}{d^2} , \quad (10)$$

onde K é a constante de Coulomb cujo valor no Sistema Internacional de Unidades (SI) é $K = 8,988 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$.

O movimento do elétron deveria ser em forma circular e não de forma elíptica como acreditavam até então. Dessa forma, a interação entre o núcleo de um hidrogenóide de carga $(+Ze)$, onde Z é o número atômico e o elétron (e^-) cumpre as leis da mecânica clássica para o movimento circunferencial. Seja v o módulo da velocidade constante, nesse caso a força elétrica faz o papel da força centrípeta, então:

$$F_{el} = F_{cp}$$

¹⁰ A carga positiva fica totalmente concentrada no núcleo do átomo. A massa não totalmente, pois os elétrons também possuem massa, embora seu valor seja muitíssimo inferior a massa do próton e do nêutron, que são as partículas que constituem o núcleo atômico.

$$\frac{K(Ze)(e^-)}{r^2} = \frac{mv^2}{r}. \quad (11)$$

Bohr afirmava que em um estado estacionário, o elétron, ao mover-se por uma órbita circular deve possuir um momento angular com valor discreto, isto é, quantizado[3][4]:

$$L = mvr = n\hbar,$$

em que $n=1, 2, 3, \dots$ e $\hbar = h/2\pi$, sendo h a constante de Planck.

A imposição de Bohr, de que o momento angular deve ser um múltiplo natural de \hbar parece ter sido feita forçosamente para que o resultado obtido fosse favorável, contudo, a partir da ideia de De Broglie, ela passa a ter fundamento[3][4].

Ao se estabelecer uma onda estacionária sobre o perímetro da órbita circular ($2\pi r$), deve-se fazer de tal que contenha um número inteiro de comprimentos de onda:

$$2\pi r = n\lambda \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

se n não fosse um inteiro, as posições dos nós mudariam a cada volta e a onda não seria estacionária. A equação de De Broglie é dada por:

$$p = \frac{h}{\lambda}, \quad (12)$$

porém

$$2\pi r = n \frac{h}{p} = \frac{nh}{mv} \quad (13)$$

dividindo ambos os lados da equação por 2π e lembrando que a constante $\hbar = h/2\pi$. Para isso basta multiplicar e dividir o termo após a igualdade por 2π . Assim:

$$r = \frac{n}{mv} \hbar, \quad (14)$$

multiplicando ambos os membros por mv :

$$L = mvr = n\hbar, \quad (15)$$

a partir da ideia de De Broglie a imposição ‘forçada’ de Niels Bohr pode ser obtida diretamente, o que facilita a aceitação dessa nova forma de compreensão da estrutura atômica.

Substituindo o valor de r dado na equação 14 na equação 11 após a multiplicação de ambos os membros dessa equação por r :

$$\frac{K(Ze)(e^-)}{r} = mv^2 \implies v^2 = \frac{K(Ze)(e^-)}{mr}$$

$$v^2 = \frac{K(Ze)(e^-)}{m \frac{n\hbar}{mv}} \Rightarrow v_n = \frac{KZe^2}{n\hbar} \quad (16)$$

$$r = \frac{n\hbar}{m \frac{KZe^2}{n\hbar}} \Rightarrow r_n = \frac{n^2 \hbar^2}{KZe^2 m}, \quad (17)$$

onde r_n e v_n são o raio e a rapidez do elétron quando este ocupa a n -ésima órbita.

De igual modo podemos obter a Energia para a n -ésima órbita

$$E_{n(\text{total})} = E_{n(\text{cinética})} + E_{n(\text{potencial})} \quad (18)$$

$$E_{n(\text{total})} = \frac{mv_n^2}{2} - \frac{(Ze)e}{r_n}, \quad (19)$$

Mas, $mv_n^2 = \frac{Ze^2}{r_n}$ e $r_n = \frac{n^2 \hbar^2}{KZe^2 m}$, substituindo na equação acima:

$$E_{n(\text{total})} = -\frac{Ze^2}{2r_n} = \left(\frac{e^4 m}{2\hbar^2} \right) \frac{Z^2 K}{n^2}. \quad (20)$$

Dispondo dessas equações podemos usá-las para algumas situações particulares, quer dizer, podemos aplicá-las para o átomo de hidrogênio, por exemplo, nesse caso fazemos $Z=1$.

$$r_n = \frac{n^2 \hbar^2}{Ke^2 m}, \quad (21)$$

quando $n=1$, o elétron se encontra no primeiro nível

$$r_1 = a_0 = \frac{\hbar^2}{mKe^2} = 0,53\text{Å} = 0,053\text{nm} \quad (22)$$

que é chamado de raio de Bohr[3].

Logo, vê-se que o raio de qualquer nível n , pode ser escrito em função do primeiro pela simples relação: $r_n = n^2 a_0$ e a equação da energia pode ser reescrita como: $E_n = -\frac{Ke^2}{2a_0} \left(\frac{1}{n^2} \right)$ substituindo os valores nessa última relação temos:

$$E_n = -\frac{13,6}{n^2}; \text{ em eV (elétron - volt)}$$

O nível estacionário mais baixo ($n=1$) é denominado de estado fundamental ou nível basal cuja energia é $E_1=-13,6$ e. O segundo estado, é o primeiro estado excitado ($n=2$), o qual possui energia $E_2=-3,4$ eV e assim por diante[3][4].

2.2.1.2 - Segundo Postulado

Esse postulado está intimamente ligado com a teoria quântica de Planck-Einstein e diz que quando um átomo passa de um estado estacionário para outro emite ou absorve um quantum de energia[3]. A absorção é produzida quando o átomo passa de um estado de menor energia a um estado de maior energia enquanto que a emissão ocorre quando o átomo passa de um estado de maior energia para um estado de menor energia.

Esses saltos devido a emissão ou absorção das ondas eletromagnéticas pelo átomo faz com que sua energia varie de forma proporcional a sua frequência, isto é:

$$\Delta E = |E_i - E_f| = hf \quad (23)$$

$$-\frac{E_1}{n_i^2} - \left(-\frac{E_1}{n_f^2}\right) = hf \Rightarrow \frac{E_1}{h} \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2}\right) = f \quad (24)$$

Caso ΔE seja negativa significa que um fóton foi emitido se, contudo ΔE for positiva um fóton foi absorvido.

Podemos expressar a equação anterior em termos do comprimento de onda, sabendo que se cumpre: $c = \lambda f$.

$$\frac{c}{\lambda} = \frac{E_1}{h} \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2}\right) \quad (25)$$

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{Ke^2}{2a_0hc} \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2}\right) \quad (26)$$

Em fins de 1913, Bohr demonstrou que o valor de $Ke^2/2a_0hc$ se aproxima da constante de Rydberg (R_H) dando assim o resultado mais importante que a teoria quântica já demonstrara até então.

2.2.1.3 - Dificuldades do modelo de Bohr

O modelo atômico de Bohr funcionava muito bem para o átomo de hidrogênio. Porém ao realizar medições dos espectros para átomos de outros elementos se observou que muitas das linhas da série de Balmer, junto com outras, não eram linhas únicas, mostrando que algo andava mal neste modelo[3].

Em 1916 W. Wilson e A. Sommerfeld sugeriram que as órbitas eletrônicas poderiam ser elípticas, com o núcleo em um foco da elipse. Neste novo contexto o que é quantizado é a orientação das órbitas no espaço, além disso, admitiram as mudanças relativísticas da massa do elétron enquanto viaja a altas velocidades ao redor do núcleo. Com a aplicação da teoria relativística ao elétron aliada as órbitas Keplerianas, tanto a velocidade quanto a massa do elétron eram variáveis e sua energia é função do semi eixo maior, mas não da excentricidade, pelo que se o elétron se encontra em qualquer

nível vai a ter a mesma energia; então para não entrar em contradição com o que postulou Bohr, propôs que a trajetória não é uma elipse perfeita, mas que vem determinada pelo movimento de precessão do eixo maior, similarmente ao movimento do periélio de Mercúrio.[3]

2.2.1.4 - Correção da massa

Quando Bohr propôs seu modelo atômico, achou o valor de $R_H = 109,737 \text{ cm}^{-1}$ enquanto que o valor experimental de Rydberg era $R_H = 109,677581 \text{ cm}^{-1}$ que pode aparentar uma diferença muito pequena, porém ao nível das linhas espectrais é uma demasiada diferença[3].

Arnold Sommerfield, físico alemão, sugeriu que a massa m do elétron deveria ser substituída pela massa μ do sistema, formada pela massa do núcleo M e a massa do elétron m (a massa reduzida do sistema). Isso levava em consideração também o movimento do núcleo o qual Bohr considerou como estacionário. A massa reduzida é dada por:

$$\mu = \frac{mM}{m + M}, \quad (27)$$

e a constante de Rydberg fica dada por:

$$R_H = \frac{Ke^2}{2a_0hc} = \frac{Ke^2}{2\frac{\hbar^2}{mKe^2}hc} = Ke^2 \frac{2mKe^2\pi^2}{h^3c} = \frac{2\pi^2K^2e^4m}{h^3c}. \quad (28)$$

Como $K = 1/4\pi\epsilon_0$, com ϵ_0 sendo a constante dielétrica do vácuo. Fazendo essa substituição temos:

$$R_H = \frac{e^4m}{8\epsilon_0^2h^3c}, \quad (29)$$

substituindo m pela massa reduzida μ , obtemos:

$$R_H = \frac{e^4\mu}{8\epsilon_0^2h^3c}. \quad (30)$$

Sommerfield substituiu os dados correspondentes nessa última equação e achou uma constante de Rydberg mais precisa de valor: $R_H = 109,677560 \text{ cm}^{-1}$ [3].

2.3 - Estrelas

Durante muito tempo os astrônomos se dedicaram a estudar o movimento dos planetas. Suas observações os conduziram a produzir arquiteturas cósmicas admiráveis. No entanto, a fixidez das estrelas e o brilho não muito intenso da grande maioria delas não lhes despertavam a mesma paixão[1]. A enorme distância que nos separa delas

não permitiam que seus segredos fossem revelados a olho nu ou com pequenos telescópios. Alguns, no entanto, como Aristarco, imaginavam que as estrelas eram ‘Sóis’ extremamente distantes. Essa conjectura começou a ganhar credibilidade quando a partir da distância e do brilho aparente das estrelas verificou-se que elas tinham uma potência luminosa da ordem de grandeza da do Sol, além disso, a determinação das massas das estrelas em sistemas duplos levou a conclusão que de fato as estrelas eram outros sóis[1]. O estudo do Sol, a estrela mais próxima de nós, permitiu decifrar as mensagens trazidas pela luz das estrelas.

2.3.1 - A Paralaxe estelar

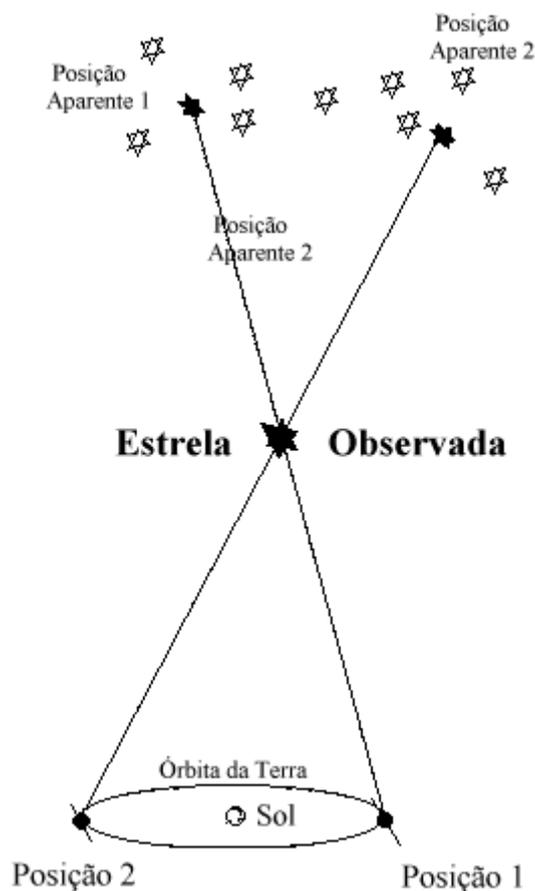


Figura 15: Representação esquemática da paralaxe estelar[20].

A paralaxe pode ser usada para medir a distância das estrelas. Ele consiste em observar o desvio aparente das estrelas na abóbada celeste devido ao movimento da Terra ao redor do Sol. Essas estrelas que aparentam desviar-se das demais são aquelas que se encontram mais próximo de nós, enquanto que as outras acabam atuando como plano de fundo, como pode ser visto na figura 15. Dessa forma fica claro que é impossível medir a distância de todas as estrelas por esse método.

A paralaxe das estrelas só foi detectada devido ao grande aperfeiçoamento dos telescópios. As primeiras estrelas que tiveram suas paralaxes medidas foram 61 Cygni, por F. Bessel e Vega, por W. Struve, ambas em 1838[1]. É interessante ressaltar que já

na antiguidade o efeito da paralaxe era conhecido e como ele não era detectado para as estrelas, os antigos imaginavam que a Terra não se movia ao redor do Sol, do contrário, seria possível observar a paralaxe das estrelas. O que os antigos não sabiam é que as estrelas estão inimaginavelmente longe de nós, de tal forma que a olho nu é impossível observar a paralaxe, até mesmo da estrela mais próxima. A razão disso é simples e será explicada em seguida.

O limite de acuidade visual humano é de $1'$ de arco, ou seja ($1/60^\circ$). Isso significa que para que tenhamos a capacidade de distinguir um objeto como um corpo que possui dimensões definidas, ele deve estar a uma distância dos nossos olhos tal que o nosso ângulo de visão seja maior que o limite de acuidade visual mencionado acima. Caso o ângulo de visão seja menos do que esse limite, observamos o corpo meramente como um ponto. Acontece que, tomando como referência a distância Terra-Sol, defini-se uma unidade de distância conhecida como parsec, que representa a abreviação de paralaxe de um segundo de arco. O parsec é definido (como o seu nome indica) como a distância a que deve estar situado um observador para ver o raio da órbita da Terra ao redor do Sol sob um ângulo de $1''$ de arco, ou seja ($1/3600^\circ$). O valor do parsec é de aproximadamente 3,26 anos luz. Na figura 16 é mostrado como o parsec é definido. Como a distância da estrela mais próxima de nós (com exceção do Sol) é de 4,2 anos luz (Proxima Centauri), nota-se que era impossível com a vista desarmada¹¹ observar a paralaxe de qualquer estrela. É importante destacar que a medida da paralaxe das estrelas foi um bom teste para corroborar com o fato da Terra orbitar o Sol.

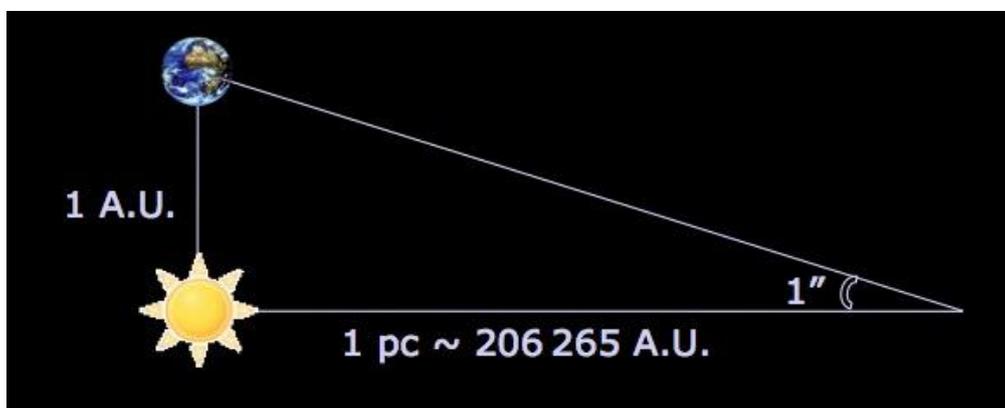


Figura 16: Definição de Parsec. A figura está fora de escala[21].

Podemos entender a técnica da paralaxe com um experimento bem simples, como pode ser visto na figura 17. Estendamos o nosso dedo polegar para cima, com o braço esticado horizontalmente a frente do nosso rosto; em seguida abrimos apenas um dos nossos olhos e observamos atentamente ao dedo polegar projetado contra a paisagem mais distante. Fixado essa imagem em nossa mente, abrimos o outro olho que estava fechado e fechamos o olho que se encontrava aberto e observamos novamente o polegar projetado contra a paisagem mais distante. Nota-se que embora o polegar não tenha realizado nenhum movimento (nosso corpo permaneceu em repouso relativamente

¹¹ Desprovida de um instrumento óptico adequado.

a Terra) percebemos que é como se ele tivesse deslocado nessa transição, pois cada olho observa uma paisagem de fundo diferente. Nesse exemplo, os nossos olhos fazem o papel da Terra em dois pontos diferentes da sua órbita, observando uma estrela próxima (o dedo polegar) contra as estrelas de fundo (a paisagem)[1].

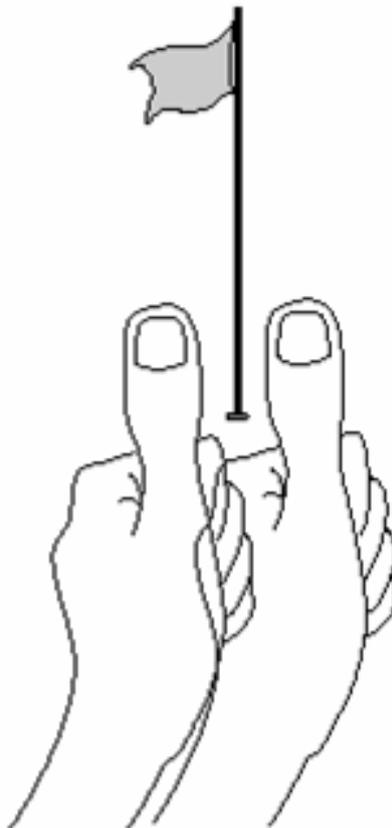


Figura 17: Entendendo a paralaxe. [22].

2.3.2 - A fonte da energia das estrelas

A partir do princípio de conservação da energia, estabelecido primeiramente por Julius Meyer em 1842, a questão da fonte energética do Sol passou a exigir uma resposta. Naquela época, o melhor combustível até então conhecido era o carvão mineral, portanto não é de se estranhar terem imaginado que o combustível que mantinha o Sol funcionando era o carvão mineral. Os cálculos mostravam que se assim o fosse, o Sol teria combustível suficiente para brilhar entre 6000 e 10000 anos, de modo que um Sol movido a combustível normal não poderia durar mais que a história humana escrita[1][5]. Para desvencilhar-se dessa dificuldade, Hermann Von Helmholtz, que também foi um dos envolvidos no enunciado da primeira Lei da Termodinâmica, por volta de 1847, propôs que a energia luminosa do Sol provinha da sua gravidade. O gás, ao cair para o centro, transformava a energia gravitacional em energia térmica, que por sua vez era irradiada em forma de luz[1]. Esse processo poderia manter o Sol por cerca de 30 milhões de anos. Lord Kelvin calculou que para as estrelas de maneira

geral, esse processo de obtenção de energia das estrelas era capaz de fazer as estrelas brilharem por um período que varia entre 20 e 100 milhões de anos. A idade da Terra, estimada naquela época era de 40 milhões de anos. Como a ordem de grandeza dos valores era compatível, essa forma de obtenção de energia conseguia responder a datação da Terra que se tinha naquele momento e por isso foi aceita[5]. Dessa forma, era a força da gravidade que acionava o mecanismo de reposição da energia perdida pelo Sol[1][5].

Atualmente sabe-se que a Terra é muito mais velha do que se imaginava. As rochas mais antigas do Sistema Solar, os meteoritos e as rochas lunares têm 4,56 bilhões de anos. Era preciso encontrar um mecanismo energético 100 vezes mais eficiente que a contração gravitacional.

A Teoria da Relatividade Restrita de Einstein foi formulada em 1905 e prevê a obtenção de energia a partir da aniquilação da matéria obedecendo a seguinte equação:

$$E = mc^2$$

onde m é a massa aniquilada e c a velocidade da luz.

Em 1920 Sir Arthur Eddington, o mesmo que chefiou uma expedição para analisar o Eclipse Solar para testar a Teoria da Relatividade Geral¹², mostrou que a aniquilação da matéria poderia explicar a produção de energia solar. Na verdade, Eddington mostrou que não pela ‘total’ aniquilação de matéria, mas sim, de parte dela. No ano de 1932, James Chadwick descobriu o nêutron, resolvendo o problema da massa do núcleo atômico e lançando as bases para solucionar o problema da estabilidade nuclear. Com a descoberta do nêutron foi possível testar a hipótese de Eddington. A massa de um átomo de hélio-4 (4,0026 unidades de massa atômica) é 0,7% menor que a soma das massas dos dois prótons e dois nêutrons (1,0078 unidades de massa atômica cada um). Essa diferença seria devido a massa jogada para fora do átomo na forma de energia, no momento em que essas quatro partículas se unissem para formar o núcleo do átomo de Hélio[1][5].

2.3.3 - Brilho

No século XIX, descobriu-se que o olho humano responde logaritmicamente a intensidade de luz. Pogson propôs um sistema de magnitudes de acordo com o de Hiparco. Temos a seguinte relação[1]:

$$m_v = -2,5 \log I_v + cte \quad (31)$$

¹² Eddington foi de fato o astrônomo que liderou esse projeto, porém, havia dois lugares no globo terrestre que permitiam observar o eclipse da melhor maneira, um deles era a Ilha do Príncipe na África e outro era a cidade de Sobral no estado do Ceará no Brasil. Eddington foi com a expedição para a Ilha do Príncipe, contudo, esta não obteve muitos resultados, pois lá estava nublado quando do eclipse, porém no Brasil não estava.

onde m_v é a magnitude¹³ da estrela na faixa do visível e I_v é a intensidade de luz emitida pela estrela também na faixa do visível.

A diferença de magnitude entre duas estrelas é portanto:

$$m_{v_2} - m_{v_1} = 2,5[\log I_{v_1} - \log I_{v_2}] \quad (32)$$

essa é uma relação que estabelece a comparação das magnitudes de duas estrelas e da suas intensidades de luz na faixa do visível. Percebemos que a constante que apareceria para as duas estrelas é cancelada devido a subtração. A equação acima ainda pode ser escrita de outra forma levando em consideração a propriedade da diferença de logaritmos na mesma base.

$$m_{v_2} - m_{v_1} = 2,5 \log \left[\frac{I_{v_1}}{I_{v_2}} \right] \quad (33) .$$

O padrão de referência é a estrela Vega (alfa lyrae), a qual se adota como tendo magnitude nula[1].

Uma estrela 100 vezes mais fraca que outra possui uma magnitude 5 a mais que ela. Outra forma de dizer isso é que, se duas estrelas forem idênticas e uma estiver a uma distância 10 vezes maior que a outra, sua magnitude aparente será 5 unidades maior que a mais próxima, pois a intensidade de luz cai com o inverso do quadrado da distância.

Para comparar o brilho verdadeiro das estrelas devemos colocá-las, todas, a mesma distância. Convencionou-se que essa distância é 10 parsecs ou 32,6 anos-luz. A magnitude que a estrela teria nessa situação é denominada magnitude absoluta. A magnitude visual absoluta do Sol é $M_v = +4,83$. Por essa razão alguns se referem a ele como estrela de quinta grandeza. Existe uma expressão que nos possibilita obter a magnitude absoluta (M) a partir da aparente (m) e da distância (r) da estrela em parsecs[1],

$$M = m + 5 - 5 \log r , \quad (34)$$

isolando a magnitude aparente na expressão acima obtemos:

$$m = M - 5 + 5 \log r .$$

Como aplicação dessas equações, podemos pegar a estrela Sírius (alfa canis majoris), a estrela mais brilhante do Céu noturno. Sírius possui $M_v = 1,41$ e está a 2,7pc [1]. Calculando a magnitude visual de Sírius, temos

$$m = 1,41 - 5 + 5 \log 2,7$$

$$m = -1,43 .$$

¹³ A magnitude é a grandeza que representa o brilho dos corpos, pois, além das estrelas, os planetas e a Lua também apresentam um valor de magnitude. Quanto menor for a magnitude do corpo celeste mais brilhante ele é.

Através da magnitude absoluta de Sírius e do Sol, podemos saber quantas vezes Sírius é mais brilhante, ou seja,

$$M_{Sol} - M_{Sírius} = 2,5 \log \left[\frac{I_{Sírius}}{I_{Sol}} \right] = \log \left[\frac{I_{Sírius}}{I_{Sol}} \right] = \frac{M_{Sol} - M_{Sírius}}{2,5}$$

$$\Rightarrow \frac{I_{Sírius}}{I_{Sol}} = 10^{\frac{M_{Sol} - M_{Sírius}}{2,5}},$$

por fim,

$$\frac{I_{Sírius}}{I_{Sol}} = 10^{\frac{4,83 - 1,41}{2,5}} \cong 23,3,$$

ou seja, a estrela Sírius é aproximadamente 23 vezes mais brilhante que o Sol (na faixa do visível).

Da equação encontrada acima podemos substituir os dados da estrela Sírius, que referem-se a essa estrela em particular, por dados genéricos, assim

$$\frac{I_{Star}}{I_{Sol}} = 10^{\frac{M_{Sol} - M_{Star}}{2,5}},$$

onde o índice 'star' indica que pode ser qualquer estrela.

2.3.4 - Temperatura Superficial

A radiação emitida pelas estrelas é semelhante a de um corpo negro. Um objeto emite como um corpo negro quando está em equilíbrio termodinâmico[1]. Assim, podemos considerar uma estrela, que está em equilíbrio térmico, com um corpo negro.

A medida da intensidade luminosa em dois comprimentos de onda é suficiente para fornecer a temperatura do corpo emissor. A temperatura medida por esse método é chamada de temperatura de cor e só tem sentido (o que costumamos usar) se o corpo estiver próximo do equilíbrio termodinâmico.

Outra forma de determinar a temperatura de um corpo que esteja próximo do equilíbrio termodinâmico é através da integral da curva de Planck[1]:

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4 \quad (35)$$

onde R é o raio da estrela, T a sua temperatura efetiva (ou superficial), σ é a constante de Stefan-Boltzmann e L é a luminosidade da estrela. Essa luminosidade leva em consideração toda a faixa de comprimentos de onda, não apenas no visível. O interessante desse método é fornecer uma forma de calcular o raio das estrelas.

Há ainda outro método para medir a temperatura das estrelas, porém, ele é mais complexo. Ele consiste em analisar as linhas espectrais que aparecem quando a luz da estrela é dispersada por um espectrógrafo. Como foi discutido na parte dos espectros,

observa-se algumas linhas escuras; estas são provenientes pela absorção da luz, pelos átomos e moléculas que passam de um nível energético mais baixo para um mais elevado. Acontece, porém, que a razão de intensidade de linhas espectrais provenientes de dois níveis de energia diferentes indica a temperatura[1].

Angelo Secchi, em 1863, classificou as estrelas em sete tipos espectrais básicos: O, B, A, F, G, K, M. Para memorizar essa sequência costuma-se usar a frase: ‘Oh Be A Fine Girl Kiss Me’[1][5]. Existem também subdivisões entre os tipos espectrais. Essas divisões vão de zero a nove (em geral). Ou seja, a classe espectral O se subdivide em: O₀, O₁, O₂, O₃,... O₉. [1]

A massa das estrelas só pode ser medida em circunstâncias especiais. Quando duas estrelas estão ligadas gravitacionalmente em um sistema duplo podemos a massa das estrelas nessa configuração devido ao efeito Doppler sofrido pelas linhas espectrais, quando uma estrela gira ao redor da outra[1].

2.3.5 - Nomeação das estrelas

As estrelas possuem uma variedade de designações e podem ter vários apelidos. As mais brilhantes são rotuladas com letras gregas seguida do nome da constelação a que fazem parte em latim, como exemplo, tomemos a estrela mais brilhante da constelação do cão maior, seu nome científico é *alfa canis majoris*. Algumas estrelas brilhantes têm nomes próprios como, por exemplo, Sírius e Vega, outras estrelas, fracas, são rotuladas com números como, por exemplo, 61 Cigny[2].

Para os ditos objetos do Céu profundo, tais como aglomerados de estrelas, nebulosas e galáxias, existe um sistema de nomenclatura diferente, tais como os números de Messier e do NGC (New General Catalogue)[2].

2.3.6 - Constelações

Em meados do ano 150 d.C. o astrônomo e geógrafo Ptolomeu produziu um catálogo de estrelas dividido em 48 constelações. No final do século XVI e decorrer do século XVII outras constelações foram adicionadas algumas no extremo sul do céu e outras para preencherem algumas lacunas nas constelações gregas[2].

Ao todo, existem 88 constelações no Céu, com nomes e limites definidos pela União Astronômica Internacional. Todas as estrelas dentro dos limites de uma constelação pertencem a ela, independentemente de fazerem parte ou não da figura traçada[2].

No apêndice 2, encontra-se a lista das 88 constelações com uma breve descrição sobre o que cada uma representa.

3 - O diagrama H-R

Quando isoladas, podemos dizer pouco a respeito das estrelas, mas, quando olhadas em conjunto podemos obter informações preciosas sobre elas. No início do século XX, Ejnar Hertzsprung e Henry Russel, independentemente, representaram graficamente luminosidade versus temperatura efetiva das estrelas conhecidas. Esse gráfico, ou diagrama, ficou conhecido como diagrama H-R[1][2][5]. No diagrama H-R, convencionou-se que a temperatura cresce para a esquerda e a luminosidade para cima.

As estrelas não se distribuem igualmente nele, mas se concentram em algumas partes. A maior parte das estrelas está alinhada ao longo de uma estreita faixa na diagonal que vai do extremo superior esquerdo (estrelas quentes e muito luminosas) até o extremo inferior direito (estrelas frias e pouco luminosas). Essa faixa é dita *Sequência Principal*. O que determina onde uma estrela se localiza na sequência principal é a sua massa[1][5].

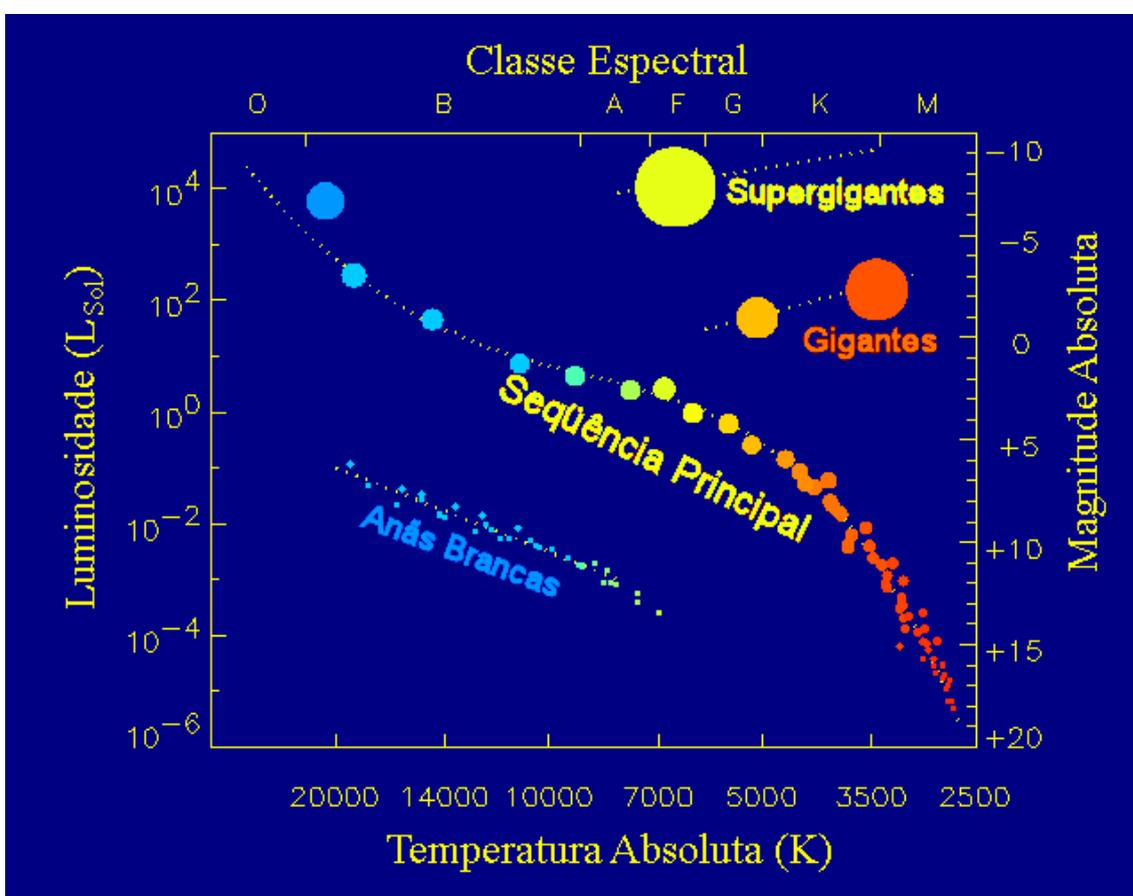


Figura 18: O diagrama H-R[23].

Além da Sequência Principal, temos outras regiões nas quais as estrelas se localizam. Acima da sequência principal, na região superior direita (frias e luminosas). Estas são chamadas gigantes. Outras localizam-se ainda mais acima no topo do diagrama e são, por consequência, mais luminosas: são as chamadas supergigantes. Há também aquelas que se concentram no canto inferior esquerdo (quentes e pouco luminosas) que são chamadas anãs brancas, estas, contudo não são necessariamente brancas[5].

A Sequência Principal possui algumas peculiaridades que a torna uma região interessante para estudos, como por exemplo:

1. Aproximadamente 90% das estrelas encontram-se nessa região;
2. A massa das estrelas cresce no mesmo sentido da luminosidade;
3. A massa é o parâmetro fundamental das estrelas dessa região.

Em virtude do terceiro item, na sequência principal podemos omitir, sem grandes perdas, as diferenças de composição química, rotação e campos magnéticos. Dessa forma a confecção de um modelo físico para essas estrelas é mais simples, do que as das demais regiões do diagrama H-R.

A relação entre as massas e as luminosidades das estrelas pode ser expressa através de[1][5]:

$$\frac{L}{L_{\odot}} = \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^{\alpha}, \quad (36)$$

onde o símbolo \odot refere-se a unidades solares, e o parâmetro α depende dos intervalos em que consideramos que estejam as massas das estrelas. Na referência bibliográfica [5], temos os seguintes intervalos:

- $\alpha = 2,5$ para estrelas com massa inferior a $0,5M_{\odot}$;
- $\alpha = 4$ para estrelas com uma massa entre $0,5$ e $3M_{\odot}$;
- $\alpha = 3$ para estrelas com massa maior que $3M_{\odot}$.

3.1 - A Sequência Principal

Através do balanço de energia podemos estimar o tempo de vida das estrelas na Sequência Principal do diagrama H-R. O tempo de vida é proporcional a reserva de energia e esta por sua vez é proporcional a massa da estrela, enquanto que o gasto é proporcional a luminosidade[1]:

$$t_{star\ SP} = t_{vida\ \odot} \left(\frac{M_{\odot}}{M} \right)^{\alpha-1}, \quad (37)$$

onde $t_{star\ SP}$ é o tempo de vida da estrela na sequência principal, $t_{vida\ \odot}$ é o tempo de vida do Sol na Sequência Principal, M_{\odot} é a massa do Sol, M é a massa da estrela e α é um parâmetro de ajuste que depende dos intervalos em que consideramos que estejam as massas das estrelas, conforme já foi delineado linhas acima.

A massa determina o quanto a estrela vive na Sequência Principal. Uma pergunta que pode ser feita é por que as estrelas ficam aglomeradas nessa região? A razão para isso parece ser a mesma pela qual vemos mais carros em pontos da rua onde o trânsito é mais lento, ou seja, é mais fácil encontrá-los onde eles passam mais tempo. Instintivamente somos levados a crer que se 90% das estrelas estão na sequência Principal, elas passam ai 90% de sua vida. Como o Sol pertence a Sequência Principal,

podemos tentar entender o porquê disso, analisando-o. Daí, conclui-se que as estrelas que pertencem a sequência principal possuem como fonte de energia a fusão do hidrogênio. Além disso, é na fusão nuclear do hidrogênio que é obtido maior energia[1].

As outras regiões do diagrama H-R correspondem a outras fases da vida das estrelas, onde a disponibilidade de energia é bem menor. Um estudo metucioso dessas outras regiões envolvem cálculos muito mais complexos do que os que são feitos na Sequência Principal[1].

3.2 - O nascimento de uma estrela

Novas estrelas são criadas pelo colapso de vastas nuvens de gás e poeira dentro de galáxias. Esses colapsos podem ser provocados pela gravidade de estrelas próximas, ondas de choque de uma explosão de supernova ou a mera rotação lenta e regular de uma galáxia espiral. Dependendo do tamanho da nuvem e de outros fatores, estrelas podem nascer em grandes aglomerados, ou em grupos menores[2]. A medida que a nuvem se desintegra, ela se adensa e se aquece. Qualquer movimento aleatório na nuvem inicial cresce até que ela se torna um disco achatado e giratório. Cada vez mais material é sugado pela gravidade da parte central da nuvem, chamada protoestrela, que se aquece até começar a brilhar[2]. A evolução desse processo também é regida pela massa. Para massas inferiores a $0,08M_{\odot}$ a compactação vai aumentando até que a matéria se resfrie atingindo o estado sólido, desse modo temos a formação dos planetas[1]. Quando a massa é superior a $0,08M_{\odot}$ a temperatura aumenta continuamente até atingir 10 milhões K, nessa temperatura inicia-se a fusão do hidrogênio e tem-se uma nova estrela[1].

As estrelas jovens continuam cercadas por uma grande nuvem de poeira e gás. Uma parte dela espirala e agrega-se na própria estrela[2]. Muitas estrelas jovens desenvolvem um campo magnético que captura material e o lança em jatos a partir dos polos. A pressão da radiação também pode bastar para dispensar elementos mais pesados como o hidrogênio[2]. Nesse ínterim, a própria estrela continua a se desintegrar, e pode passar por um período de pulsação e instabilidade, chamado ‘T Tauri’[2], antes de se estabelecer como uma estrela da Sequência Principal.

3.3 - Evolução pós-Sequência Principal

O jogo entre a força gravitacional, de fora para dentro, comprimindo a estrela, e a de pressão, de dentro para fora, resistindo ao colapso, determina o ritmo de evolução das estrelas. Em 1942, o físico brasileiro Mário Schenberg e seu colega indiano, Chandrashekar, mostraram que o Sol não consegue usar todo o estoque de hidrogênio[1]. Após 10 bilhões de anos na Sequência Principal, ele terá queimado 10% de suas reservas energéticas. A partir desse momento é necessário outro mecanismo para que a estrela não entre em colapso. As estrelas passam então a fundir o hélio que geraram por toda a vida e talvez outros elementos mais pesados. Essas mudanças na provisão de energia da estrela a tornam instável, fazendo-a inchar até um tamanho muito maior ao que tinha quando estava na Sequência Principal[2]. Estrelas como o Sol

tornam-se gigantes vermelhas, mas as de maior massa podem se tornar supergigantes de qualquer cor[2].

O hélio é o elemento mais pesado que uma estrela como o Sol pode queimar, e sua exaustão marca a agonia da estrela. A medida que as cascas em combustão de hidrogênio e hélio se deslocam para fora, a instabilidade aumenta, as camadas externas se dissipam criando envoltórios fulgurantes de uma nebulosa planetária, assim chamada por sua semelhança com discos fantasmagóricos em forma de planeta[2]. Na figura 17 é mostrada a nebulosa do esquimó, que é um exemplo de nebulosa planetária.



Figura 19: Nebulosa do esquimó, um exemplo de nebulosa planetária[24].

Para uma estrela com oito vezes a massa do Sol, a queima do hélio não é o fim. A fusão de elementos cada vez mais pesados pode continuar em seu núcleo[2]. Ela desenvolve uma estrutura em camadas como uma cebola. Contudo, cada nova camada queima por um tempo menor e produz menor energia que a sua antecessora. Por fim, a sequência chega ao ferro, um elemento cuja fusão absorve mais energia do que libera. Quando a estrela tenta fundir o ferro, sua fonte de energia é sustada, e, sem pressão externa para sustentá-lo, o núcleo em camadas desaba sob a própria gravidade[2]. O ricochete da onda de choque despedaça a estrela, o que é denominado de supernova, e por um breve tempo permite que a fusão forme elementos mais pesados[2].

Quando uma estrela se torna supernova, a maior parte do seu material é fragmentada pelo espaço circundante formando um remanescente com um aspecto similar a nebulosa planetária. O mais famoso remanescente de supernova é a nebulosa

do Caranguejo, que pode ser vista na figura 18, criada por uma explosão estelar registrada por astrônomos chineses e nativos americanos em 1054 d.C[2]. Por ser composto de gases muito quentes, o remanescente de supernova muitas vezes emite a maior parte de sua radiação como raios X. Ao se espalhar pelo espaço, o gás quente carrega elementos pesados da supernova. Estes podem colidir com outras nuvens interestelares de gás, e até provocar uma nova geração de estrelas[2].

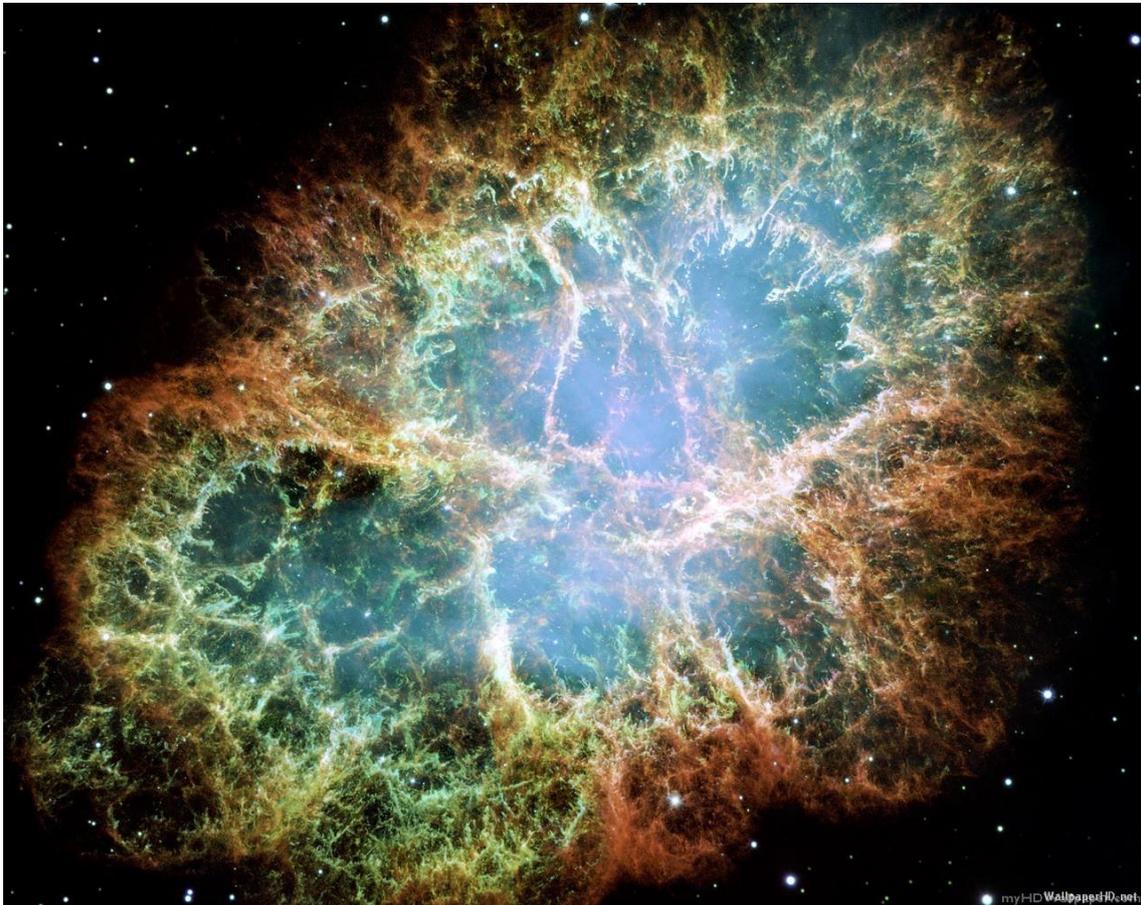


Figura 20: Nebulosa do Caranguejo[25].

3.4 - Anãs Brancas

Depois que uma estrela como o Sol desprende suas camadas externas como uma nebulosa planetária, só resta a região do núcleo. Em geral, este é uma bola de matéria densa, quente, com cerca do tamanho da Terra e brilho intenso. Essa anã branca tem temperaturas de superfície de 100 mil °C, mas, dado seu tamanho, é muito difícil avistá-la[2]. A maioria está destinada a desaparecer em milhões de anos, tornando-se anãs negras. A maioria está destinada a desaparecer em milhões de anos, tornando-se anãs negras. Mas, anãs brancas em sistemas binários próximos têm por vezes gravidade suficiente para atrair material de suas estrelas companheiras. Em consequência a anã branca pode se tornar uma variável cataclísmica¹⁴[2].

¹⁴ Nem todas as estrelas têm uma magnitude constante. Muitas são variáveis, cujo brilho altera-se em ciclos que podem durar horas ou anos, ou ser imprevisíveis. As variáveis cataclísmicas são imprevisíveis.

Os cálculos mostram que uma anã branca pode ter no máximo $1,4 M_{\odot}$, este é o limite de Chandrasekar. Ela é sustentada pela pressão de degenerescência dos elétrons[1].

3.5 - Estrelas de Nêutrons

Uma supernova deixa um núcleo de grande massa, cuja gravidade é tão forte que destrói os átomos individuais da estrela. Prótons e elétrons se combinam, deixando uma bola de nêutrons que gira rápido e cessa de se desintegrar quando tem o tamanho de uma cidade[2]. O campo magnético da estrela de nêutron torna-se muito forte, canalizando sua radiação para dois feixes que emergem dos polos magnéticos da estrela. As estrelas de nêutrons foram postuladas pelo físico russo Lev Landau na década de 30[1]. Eles foram detectados com a descoberta do primeiro pulsar¹⁵ em 1967[2].

3.6 - Buracos negros

Quando o núcleo de uma estrela é realmente pesado, seu colapso não para numa estrela de nêutrons. Estes, por sua vez, se partem nos quarks que compõem o núcleo, tornando-o tão denso que sua gravidade não deixa nem a luz escapar, dando origem a um buraco negro.

Pierre Simon de Laplace, físico, matemático e astrônomo francês, em 1795 foi o primeiro a perceber que, se a densidade de um corpo aumentasse o suficiente, nem a luz seria capaz de escapar deste. Essa ideia é o primeiro registro conhecido do conceito de buraco negro.

Do ponto de vista da Relatividade Geral, o buraco negro aparece na solução de Schwarzschild¹⁶, em 1916, das equações do campo gravitacional externo a uma massa. No entanto, foi só na década de 1960 que os buracos negros passaram a chamar a atenção dos astrônomos devido a descoberta dos quasares¹⁷.

4 – Tratamento de dados e metodologia de análise

Elas são vistas normalmente em sistemas binários fechados, onde a estrela de maior massa evoluiu numa anã branca e a de menor massa está em sua fase gigante. Nesses casos, a gravidade da anã branca pode arrancar material da companheira para si. A estrela anã forma uma atmosfera quente e densa que pode enfim explodir em fusão nuclear. O ciclo pode se repetir muitas vezes a intervalos não necessariamente previsíveis[2].

¹⁵ Estrela de nêutrons que emite pulsos de ondas de rádio e outras radiações a medida que gira em torno do seu eixo[2].

¹⁶ Karl Schwarzschild, físico e astrônomo alemão que se alistou e lutou pelo exército alemão durante a primeira guerra mundial, onde veio a morrer em 1916 em decorrência de uma doença de pele possivelmente contraída enquanto lutava na Rússia.

¹⁷ Núcleo intensamente luminoso de uma galáxia distante, causado ao que se supõe por gás ultraquente circulando em torno de um grande buraco negro[2].

4.1 – Objetos utilizados

Foram utilizadas estrelas que pertencem a Sequência Principal do diagrama H-R de variados tipos espectrais e luminosidades. Foram selecionadas 36 estrelas da Sequência Principal, onde 16 delas são tais que as suas massas são superiores a três massas solares, outras 16 possuem uma massa entre 3 e 0,5 massas solares e finalmente 4 estrelas com massa inferior a 0,5 massas solares.

Tabela 1: Relação de estrelas selecionadas da sequência principal com os valores de algumas características das mesmas.

Estrelas	Massa (M_{\odot})	Luminosidade (L_{\odot})	Raio (R_{\odot})	Temperatura (K)
AE Aurigae[26]	17	30000	5	30000
Zeta Ophiuchi[27]	20	91000	8,5	34000
Theta1 Orionis C[28]	40	500000	18	38000
41 Arietis[29]	3,1	160		11900
Alpha Arae[30]	9,6	5800	4,5	18044
Beta Canis Minoris[31]	3,5	195	3,5	11772
Delta Antilae[32]	3,35	200		11117
Epsilon Apodis[33]	6,15	1614	3,9	17050
Lambda Crucis[34]	5	790		15800
Nu1 Arae[35]	6,24	1963	4,5	18100
Regulus[36]	3,8	288	3,65	12460
Sigma Arietis[37]	3,84	301	3	13121
Upsilon Orionis[38]	20,6	39800	6,68	31560
Zeta Canis Majoris[39]	7,7	3603	3,9	18700
Phi Orionis[28]	18	20000	7,4	30000
Pi Andromedae A[28]	6,5	800	3,8	16400
Vega[40]	2,135	40,12	2,362	9602
Sirius[41]	2,02	25,4	1,711	9940
Beta Pictoris[28]	2,1	20	1,7	8620
Fomalhaut[42]	1,92	16,63	1,842	8590
Altair[43]	1,79	10,6	1,63	7750
Procyon A[44]	1,42	6,93	2,048	6530
Gamma Virginis[28]	1,7	6	1,3	
Eta Arietis[28]	1,3	2,5	1,2	6540
Alpha Centauri A[45]	1,1	1519	1,227	5790
Tau Ceti[46]	0,783	0,52	0,793	5344
Alpha Centauri B[47]	0,907	0,5	0,865	5260
61 Cygni A[28]	0,69	0,16	0,74	4410
Alpha Mensae[28]	0,93	0,79	0,93	5610
70 Ophiuchi A[28]	0,78	0,4	0,85	5240
61 Cygni B[48]	0,63	0,085	0,595	4077
Sigma Draconis[49]	0,83	0,428	0,778	5299
Gliese 185[28]	0,47	0,063	0,63	3920
EZ Aquarii A[28]	0,21	0,0079	0,32	3120
Proxima Centauri[50]	0,123	0,0017	0,141	3042
Van Biesbroeck's star[28]	0,1	0,0008	0,13	2660

4.2 – O Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) e a linearização dos dados

Após a realização de medidas, fixando uma variável independente, a qual representaremos por 'x' e outra variável dependente, a qual representaremos por 'y', onde $y = f(x)$. Através de procedimentos estatísticos é possível determinar uma curva que melhor ajuste os dados experimentais. O MMQ consiste na determinação de uma reta que ajuste os dados obtidos. Para entendê-lo devemos recordar que uma reta é representada por dois parâmetros, a saber, o coeficiente angular, que representa a inclinação da reta e o coeficiente linear, que representa o valor da ordenada quando a reta cruza o eixo das ordenadas, 'y'.

Pelo método dos mínimos quadrados, o coeficiente angular da reta gerada é dado por:

$$\frac{\sum x_i \sum y_i - n \sum (x_i \cdot y_i)}{(\sum x_i)^2 - n \sum x_i^2}, \quad (38)$$

enquanto que o Coeficiente linear dessa mesma reta é dado por:

$$\frac{\sum (x_i \cdot y_i) \sum x_i - \sum x_i^2 \sum y_i}{(\sum x_i)^2 - n \sum x_i^2}, \quad (39)$$

onde x_i é a coordenada x do i-ésimo dado experimental, y_i é a coordenada y do i-ésimo dado experimental, e n é o número de dados.

Na literatura temos a seguinte relação (equação 36)

$$\frac{L}{L_{\odot}} = \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^{\alpha},$$

a qual, para linearizá-la, aplicando o método dos mínimos quadrados, aplicamos o logaritmo decimal de ambos os lados dessa equação:

$$\log \left(\frac{L}{L_{\odot}} \right) = \alpha \cdot \log \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right),$$

em que fazemos as seguintes substituições:

$$y = \log \frac{L}{L_{\odot}} \quad e \quad x = \log \frac{M}{M_{\odot}},$$

resultando em:

$$y = \alpha \cdot x$$

4.3 – Origin

Origin é um software gráfico para análise de dados e estatística desenvolvido pela Originlab para execução em plataforma Windows. O programa importa dados de instrumentos de medida, processa-os estatisticamente, tais como estatística descritiva e

regressão, ajusta os dados experimentais de modo a evidenciar as características do fenômeno observado e procura a melhor curva que representa os dados coletados.

4.4 – Características das retas ajustadas devido as faixas de massa das estrelas analisadas.

4.4.1 – Estrelas com massa superior a $3M_{\odot}$

Tabela 2: Estrelas com massa superior a 3 massas solares, com os respectivos valores de x e de y conforme mostrado nas equações acima.

Estrelas	$x = \log \frac{M}{M_{\odot}}$	$y = \log \frac{L}{L_{\odot}}$
AE Aurigae	1,2304	4,4771
Zeta Ophiuchi	1,3010	4,3674
Theta1 Orionis C	1,6021	4,6990
41 Arietis	0,4914	2,2041
Alpha Arae	0,9823	3,7634
Beta Canis Minoris	0,5441	2,2900
Delta Antilae	0,5250	2,3010
Epsilon Apodis	0,7889	3,2079
Lambda Crucis	0,6990	2,8976
Nu1 Arae	0,7952	3,2929
Regulus	0,5798	2,4594
Sigma Arietis	0,5843	2,4786
Upsilon Orionis	1,3139	4,5999
Zeta Canis Majoris	0,8865	3,5567
Phi Orionis	1,2553	4,3010
Pi Andromedae A	0,8129	2,9031

Aplicando o Método dos Mínimos quadrados, obtemos que a reta que melhor ajusta os valores encontrados possui como características:

O Coeficiente angular é: 3,4238

O coeficiente linear é: -0,2775.

O Software Origin é muito usado para análise e traçado de curvas de ajuste de dados. Todavia, os métodos usados pelo programa para a linearização dos dados (que é o nosso caso), não é bem especificado.

A reta de ajuste dos dados fornecida pelo programa Origin possui as seguintes características:

Coeficiente Angular: 2,57148

Coeficiente Linear: 1,04938

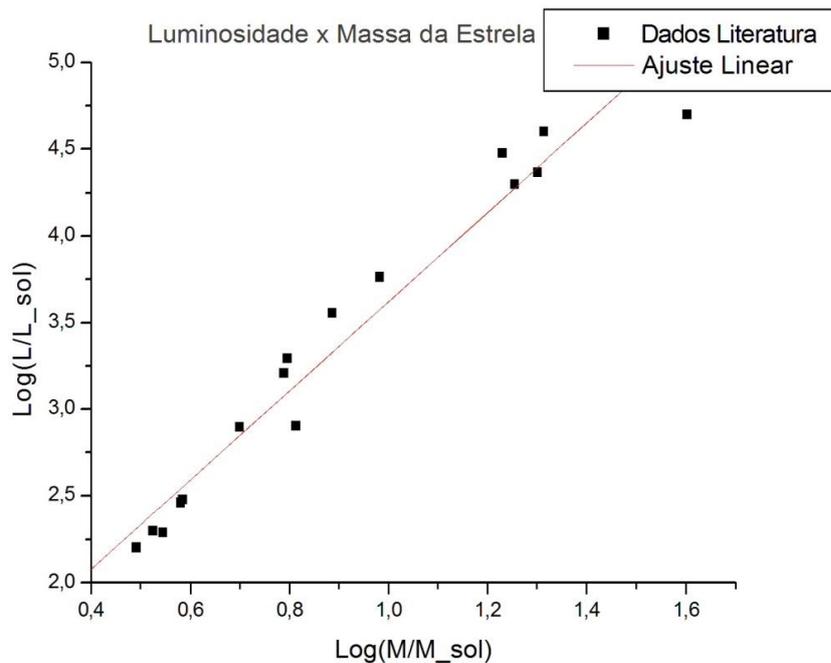


Gráfico 1: Gráfico gerado pelo programa Origin, para a linearização dos dados das estrelas com massa superior a 3 massas solares.

4.4.2 – Estrelas com massa entre $0,5M_{\odot}$ e $3M_{\odot}$

Tabela 3: Estrelas com massa no intervalo entre 0,5 e 3 massas solares, com os respectivos valores de x e de y conforme mostrado nas equações acima.

Estrelas	$x = \log \frac{M}{M_{\odot}}$	$y = \log \frac{L}{L_{\odot}}$
Vega	0,3294	1,6034
Sirius	0,3054	1,4048
Beta Pictoris	0,3222	1,3010
Fomalhaut	0,2833	1,2209
Altair	0,2529	1,0253
Procyon A	0,1523	0,8407
Gamma Virginis	0,2304	0,7782
Eta Arietis	0,1139	0,3979
Alpha Centauri A	0,0414	0,1816
Tau Ceti	-0,1062	-0,2840
Alpha Centauri B	-0,0424	-0,3010
61 Cygni A	-0,1549	-0,8153
Alpha Mensae	-0,0315	-0,1024
70 Ophiuchi A	-0,1079	-0,3979
61 Cygni B	-0,2007	-1,0706
Sigma Draconis	-0,0604	-0,3686

Aplicando o Método dos Mínimos quadrados, obtemos que a reta que melhor ajusta os valores encontrados possui como características:

O Coeficiente angular é: 4,4728

O coeficiente linear é: -0,03264 ,

a reta de ajuste dos dados fornecida pelo programa Origin possui as seguintes características:

Coeficiente Angular: 4,47278

Coeficiente Linear: -0,03264

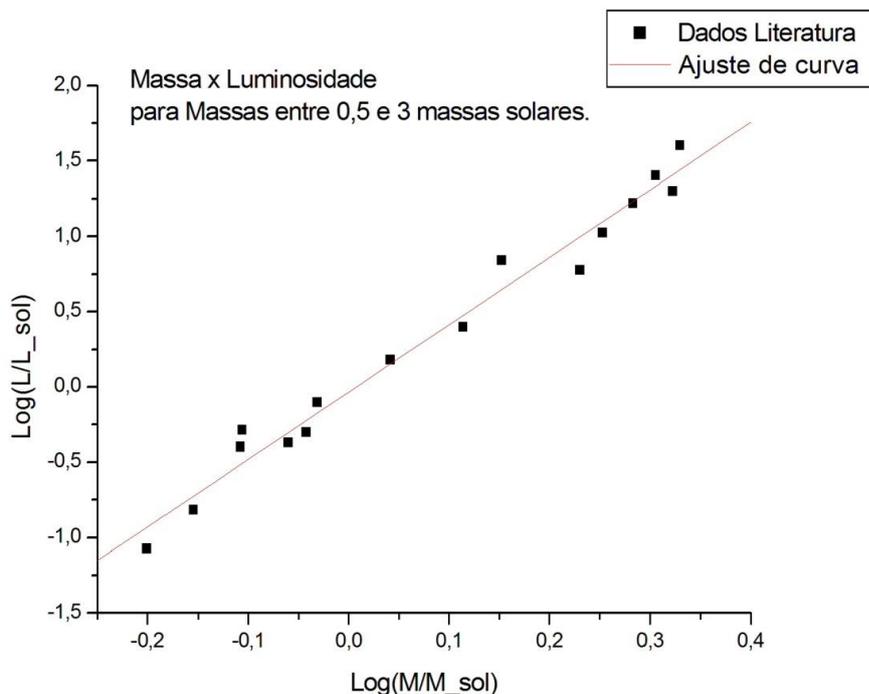


Gráfico 2: Gráfico gerado pelo programa Origin para a linearização dos dados para estrelas com massa entre 0,5 e 3 massas solares.

4.4.3 – Estrelas com massa inferior a $0,5M_{\odot}$

Tabela 4: Estrelas com massa inferior a 0,5 massas solares, com os respectivos valores de x e de y conforme mostrado nas equações acima.

Estrelas	$x = \log \frac{M}{M_{\odot}}$	$y = \log \frac{L}{L_{\odot}}$
Gliese 185	-0,3279	-1,2007
EZ Aquarii A	-0,6778	-2,1024
Proxima Centauri	-0,9101	-2,7696
Van Biesbroeck's star	-1,0000	-3,0969

Aplicando o Método dos Mínimos quadrados, obtemos que a reta que melhor ajusta os valores encontrados possui como características:

O Coeficiente angular é: 2,7699

O Coeficiente linear é: -0,2671 ,

a reta de ajuste dos dados fornecida pelo programa Origin possui as seguintes características:

O Coeficiente angular é: 2,78804

O coeficiente linear é: -0,26006

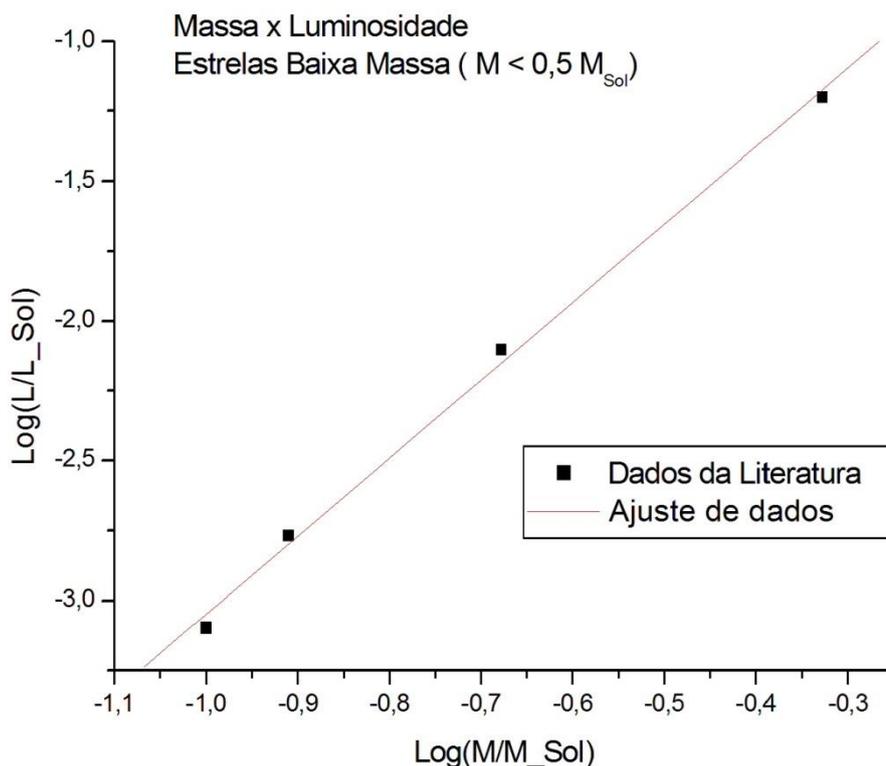


Gráfico 3: Gráfico gerado pelo programa Origin para a linearização dos dados das estrelas de massa inferior a 0,5 massas solares.

4.5 – Estimativa dos raios das estrelas

Pela Lei de Stefan-Boltzmann é possível calcular o raio das estrelas desde que conheçamos a luminosidade e a temperatura efetiva delas.

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4 ,$$

$$R = \frac{1}{2\sqrt{\pi\sigma}} \frac{\sqrt{L}}{T^2} . \quad (40)$$

Levando em conta que a luminosidade e o raio das estrelas são dados em função da luminosidade e do raio do Sol, cujos valores são:

$$L_{\odot} = 3,9 \times 10^{26} \text{ W} \quad e \quad R_{\odot} = 6,96 \times 10^8 \text{ m} ,$$

substituindo também o valor de π e de σ (a constante de Stefan-Boltzmann)

$$R = 3,362 \times 10^7 \frac{\sqrt{L}}{T^2} \quad (41)$$

Cuja unidade de medida é: R_{\odot}

Tabela 5: Raios calculados das estrelas e a diferença percentual para os valores apresentados na tabela 1.

Nome da estrela	Raio Calculado x R_{\odot}	Diferença Percentual para valores conhecidos
AE Aurigae	6,47	29,4%.
Zeta Ophiuchi	8,7	2,35%.
Theta1 Orionis C	16,4	8,56%.
41 Arietis	3,00	
Alpha Arae	7,86	74,7%.
Beta Canis Minoris	3,38	3,43%
Delta Antilae	3,85	
Epsilon Apodis	4,65	16,1%.
Lambda Crucis	3,79	
Nu1 Arae	4,55	1,1%.
Regulus	3,68	0,82%.
Sigma Aietis	3,39	13%
Upsilon Orionis	6,73	0,75%.
Zeta Canis Majoris	3,9	47,9%.
Phi Orionis	7,4	40,2%.
Pi Andromedae A	3,54	73,4%.
Vega	2,31	2,2%.
Sirius	1,71	0,058%.
Beta Pictorius	2,02	15,84%.
Fomalhaut	1,85	0,54%.
Altair	1,82	12,27%.
Procyon A	2,08	1,56%.
Gamma Virginis	1,57	20,77%.
Eta Arietis	1,24	3,33%.
Alpha Centauri A	1,23	1,05%.
Tau Ceti	0,85	7,19%.
Alpha centauri B	0,86	0,58%.
61 Cygni A	0,69	6,76%.
Alpha Mensae	0,94	1,06%.
70 Ophiuchi A	0,77	9,41%.
61 Cygni B	0,59	0,84%.
Sigma Draconis	0,78	0,26%.
Gliese 185	0,55	12,70%.
EZ Aquarii A	0,31	3,13%.
Proxima Centauri	0,15	6,38%.
Van Biesbroeck's star	0,13	0,00%.

4.6 – Estimativa do tempo de vida das estrelas na Sequência Principal

Quanto ao tempo de vida de cada estrela na sequência principal, usamos a equação 37:

$$t_{star\ SP} = t_{vida\ \odot} \left(\frac{M_{\odot}}{M} \right)^{\alpha-1},$$

onde $t_{star\ SP}$ é o tempo de vida da estrela na sequência principal, $t_{vida\ \odot}$ é o tempo de vida do Sol na Sequência Principal, M_{\odot} é a massa do Sol, M é a massa da estrela e α é o coeficiente angular calculado para as estrelas nos distintos intervalos de massa.

Por razões de comodidade, essa equação pode ser reescrita como:

$$t_{star\ SP} = t_{vida\ \odot} \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^{1-\alpha}, \quad (42)$$

a razão para usá-la é que as massas das estrelas estão escritas em função da massa solar, de modo que basta substituir na expressão acima.

Os valores utilizados serão os obtidos através do método dos mínimos quadrados.

Para as estrelas de massa superior a 3 massas solares, temos: $\alpha = 3,4$ (na literatura o valor é $\alpha = 3$)

Para as estrelas de massa entre 0,5 e 3 massas solares, temos: $\alpha \sim 4,5$ (na literatura temos $\alpha = 4$)

Para as estrelas de massa inferior a 0,5 massas solares, temos: $\alpha \sim 2,8$ (na literatura o valor é $\alpha = 2,5$)

Tabela 6: O tempo calculado de permanência das estrelas na Sequência Principal.

Nome da estrela	Tempo de vida calculado em função da vida do sol
Aurigae	$1,11 \times 10^{-3}$
Zeta Ophiuchi	$7,54 \times 10^{-4}$
Theta1 Orionis C	$1,43 \times 10^{-4}$
41 Arietis	$6,62 \times 10^{-2}$
Alpha Arae	$4,39 \times 10^{-3}$
Beta Canis Minoris	$4,95 \times 10^{-2}$
Delta Antilae	$5,49 \times 10^{-2}$
Epsilon Apodis	$1,28 \times 10^{-2}$
Lambda Crucis	$2,10 \times 10^{-2}$
Nu1 Arae	$1,23 \times 10^{-2}$
Regulus	$4,06 \times 10^{-2}$
Sigma Aietis	$3,96 \times 10^{-2}$
Upsilon Orionis	$7,03 \times 10^{-4}$
Zeta Canis Majoris	$7,45 \times 10^{-2}$
Theta 1 Orionis	$9,71 \times 10^{-4}$

Pi Andromedae A	$1,12 \times 10^{-2}$
Vega	$7,03 \times 10^{-2}$
Sirius	$8,54 \times 10^{-2}$
Beta Pictorius	$7,45 \times 10^{-2}$
Fomalhaut	$1,02 \times 10^{-1}$
Altair	$1,30 \times 10^{-1}$
Procyon	$2,93 \times 10^{-1}$
Gamma Virginis	$1,56 \times 10^{-1}$
Eta Arietis	$3,99 \times 10^{-1}$
Theta 1 Orionis C	$7,16 \times 10^{-1}$
Tau Ceti	2,35
Alpha Centauri B	1,41
61 Cygni A	3,66
Alpha Mensae	1,29
70 Ophiuchi A	2,39
61 Cygni B	5,04
Sigma Draconis	1,92
Gliese 185	4,98
EZ Aquarii A	16,6
Proxima Centauri	43,47
Van Biesbroeck star	63,10

5 - Conclusões

Nesse trabalho procurou-se avaliar como é possível utilizar o conhecimento de física para entender um pouco das estrelas. Partiu-se de dados encontrados na literatura sobre algumas estrelas e baseado em modelos teóricos avaliou-se a relação entre massa e luminosidade, o tempo de vida da estrela e também estimamos o raio destas estrelas.

Em um primeiro momento, avaliou-se a relação entre massa e luminosidade de uma estrela, neste ponto observou-se que para melhor entender a relação entre as duas grandezas é necessário separar as estrelas em faixas de massa distintas. O conjunto de dados foi dividido de acordo com a massa das estrelas, conforme proposto na literatura, em (abaixo de 0,5 massas solares, entre 0,5 e 3 massas solares e acima de 3 massas solares) os valores encontrados para a relação estão bem próximo dos valores encontrados na literatura, conforme mostrado no texto, a diferença pode ser justificada pela imprecisão dos valores dos dados das estrelas. Além disso, usando a Lei de Stefan-Boltzmann, e os dados encontrados na literatura para luminosidade e temperatura, para calcular os raios das estrelas.

Os resultados mostram os valores do expoente alfa, próximos do que é descrito na literatura. A partir dele, obtivemos estimativas do tempo de vida das estrelas na sequência Principal, o que concordou com a literatura, a qual afirma que quanto mais massiva for uma estrela, menor será o seu tempo de vida na Sequência Principal. A

maioria das estrelas tiveram seus raios calculados com valor próximo dos dados tabelados.

Nesse trabalho focou-se na análise da Sequência Principal, onde se tentou obter um grande número de informações sobre as estrelas que pertencem a essa região do diagrama H-R. Uma pretensão futura consiste na análise das outras regiões desse diagrama.

6 - Apêndices

6.1-Estrelas na Bandeira do Brasil

Cada estrela que aparece na bandeira brasileira representa um estado. As estrelas lá indicadas representam estrelas visíveis no Céu Noturno.

Abaixo segue indicadas quais estrelas representam quais estados. [51]



- | | |
|--|---|
| <p>1. PARÁ
<i>Spica (α Virginis)</i></p> <p>2. AMAZONAS
<i>Prócion (α Canis Minoris)</i></p> <p>3. MATO GROSSO DO SUL
<i>Alphard (α Hydrae)</i></p> <p>4. RONDÔNIA
<i>Wezen (δ Canis Majoris)</i></p> <p>5. MATO GROSSO
<i>Sírio (α Canis Majoris)</i></p> <p>6. RORAIMA
<i>Muliphem (γ Canis Majoris)</i></p> <p>7. AMAPÁ
<i>Mirzam (β Canis Majoris)</i></p> <p>8. TOCANTIS
<i>Adhara (ϵ Canis Majoris)</i></p> <p>9. GOIÁS
<i>Canopus (α Carinae)</i></p> <p>10. BAHIA
<i>Gacrux (γ Crucis)</i></p> <p>11. MINAS GERAIS
<i>Pálida (δ Crucis)</i></p> <p>12. ESPÍRITO SANTO
<i>Intrometida (ϵ Crucis)</i></p> <p>13. SÃO PAULO
<i>Acrux (α Crucis)</i></p> | <p>14. ACRE
<i>Dhanab al Shuja (γ Hydrae)</i></p> <p>15. PIAUÍ
<i>Antares (α Scorpii)</i></p> <p>16. MARANHÃO
<i>Graffias (β Scorpii)</i></p> <p>17. CEARÁ
<i>Wei (ϵ Scorpii)</i></p> <p>18. RIO GRANDE DO NORTE
<i>Shaula (λ Scorpii)</i></p> <p>19. PARAÍBA
<i>Girtab (κ Scorpii)</i></p> <p>20. PERNAMBUCO
<i>Denebakrab (μ Scorpii)</i></p> <p>21. ALAGOAS
<i>Sargas (θ Scorpii)</i></p> <p>22. SERGIPE
<i>Apollyon (l Scorpii)</i></p> <p>23. SANTA CATARINA
<i>δ Trianguli Australis</i></p> <p>24. RIO GRANDE DO SUL
<i>Atria (α Trianguli Australis)</i></p> <p>25. PARANÁ
<i>γ Trianguli Australis</i></p> <p>26. RIO DE JANEIRO
<i>Mimosa (β Crucis)</i></p> <p>27. BRASÍLIA
<i>Polaris Australis (σ Octantis)</i></p> |
|--|---|

Figura 16: Estrelas que representam os estados do Brasil.

6.2-Lista de constelações [2]

1. Ursa Menor (Ursae Minoris) (UMi)
Constelação grega. Contém o polo celeste norte. A menos de 1° do polo está Polaris, a estrela polar que foi usada desde tempos remotos para a navegação.
2. Dragão (Draconis) (Dra)
Grande constelação que serpenteia grande parte do polo norte celeste. Na mitologia grega, Dragão representa o dragão que Hércules matou num de seus 12 trabalhos.
3. Cefeu (Cephei) (Cep)
Constelação grega que representa Cefeu, um rei mítico da Etiópia casado com a rainha Cassiopéia e pai de Andrômeda.
4. Cassiopéia (Cassiopeiae) (Cas)
Constelação grega que representa uma rainha mítica da Etiópia que foi punida devido a sua vaidade por Poseidon.
5. Girafa (Camelopardalis) (Cam)
Representa uma girafa. Foi introduzida no século XVII por Petrus Plancius.
6. Lince (Lyncis) (Lyn)
Constelação introduzida por Johannes Hevelius no final do século XVII. Possui esse nome porque Hevelius pensava que só olhos de lince poderiam vê-la.
7. Cocheiro (Aurigae) (Aur)
Cocheiro representa um cocheiro, identificado na mitologia grega como Ericônio, rei lendário de Atenas.
8. Ursa Maior (Ursae Majoris) (UMa)
Também conhecida como a grande ursa. Na mitologia grega, representa dois personagens: Calisto, amante de Zeus transformada em urso por Hera, mulher do deus, num ataque de ciúmes; e Adrastéia, uma das duas ninfas que cuidaram do bebê Zeus, escondendo-o do seu pai assassino, Cronos. A segunda ninfa, Ida é representada por Ursa Menor, a Pequena Ursa.
9. Cães de Caça (Canum Venaticorum) (CVn)
Foi introduzida por Johannes Hevelius.
10. Boieiro (Bootis) (Boo)
Contém a estrela mais brilhante ao norte do equador celeste, Arturus (Alpha Bootis), que é a quarta estrela mais brilhante do céu noturno. Boieiro representa um homem tangendo um urso (Ursa Maior). O nome “Arturus” significa “guarda do urso” em grego. Os dois cães do Boieiro são representados pela constelação vizinha, Cães de Caça.
11. Hércules (Herculis) (Her)
Hércules representa o forte homem que na mitologia grega empreendeu os 12 trabalhos vestindo uma pele de leão e brandindo uma clava. Um dos doze trabalhos foi matar um dragão, e no Céu, Hércules ajoelha-se com um pé sobre a cabeça do dragão, ao norte.
12. Lira (Lyrae) (Lyr)

Contém a estrela Vega, a quinta estrela mais brilhante do céu noturno. Representa o instrumento tocado por Orfeu.

13. Cisne (Cygni) (Cyg)

Representa um dos disfarces usados por Zeus para uma das suas seduções ilícitas. É popularmente conhecido como cruzeiro do norte, pois suas principais estrelas delineiam uma cruz enorme.
14. Andrômeda (Andromedae) (And)

Representa a filha da rainha mítica Cassiopéia.
15. Lagarto (Lacertae) (Lac)

Uma das constelações propostas por Johannes Hevelius. É famosa por ter dado seu nome a uma nova classe de galáxias, os chamados objetos BL Lacertae.
16. Triângulo (Trianguli) (Tri)

Os antigos gregos viam nela o delta do Nilo ou a ilha da Sicília.
17. Perseu (Persei) (Per)

Representa o personagem enviado para matar Medusa, a Górgona. No céu, ele é representado segurando a cabeça da Górgona, simbolizada pela estrela Algol ou *Beta Persei*, uma famosa estrela variável.
18. Carneiro (Arietis) (Ari)

Representa o carneiro cujo velocino de ouro pendia de um carvalho na Cólquida, costa leste do mar Negro. Jasão e os argonautas fizeram uma viagem épica para levar o velocino a Grécia.
19. Touro (Tauri) (Tau)

Possui os aglomerados estelares Plêiades e Híades e a nebulosa do Caranguejo. As Híades representam o focinho do touro enquanto que a estrela mais brilhante da constelação, Aldebaran, marca o céu olho cintilante. Na mitologia grega, o touro representa o disfarce adotado por Zeus para levar a princesa Europa da Fenícia para Creta, cruzando o Mediterrâneo a nado com ela nas costas.
20. Gêmeos (Geminorum) (Gem)

É facilmente identificável por suas duas estrelas mais brilhantes, Castor e Pollux, que têm os nomes dos gêmeos da mitologia grega que ela representa. Castor e Pollux representam as cabeças dos gêmeos.
21. Caranguejo (Cancer) (Cnc)

Na mitologia grega, o caranguejo atacou Hércules durante sua luta contra a Hidra de muitas cabeças, mas foi esmagado pelo pé do herói.
22. Leão menor (Leonis Minoris) (LMi)

Foi introduzida por Johannes Hevelius.
23. Cabeleira de Berenice (Comae Berenices) (Com)

Representa os cachos da cabeleira da rainha Berenice do Egito, cortados por ela como tributo aos deuses quando o marido voltou incólume da batalha.
24. Leão (Leonis) (Leo)

Representa o leão de couro impenetrável morto por Hércules no primeiro de seus doze trabalhos.
25. Virgem (Virginis) (Vir)

A maior constelação do Zodíaco e a segunda maior de todas.

26. Balança (Librae) (Lib)
Representa a balança da justiça segurada por Virgem.
27. Coroa Boreal (Coronae Borealis) (CrB)
Representa a coroa usada pela princesa Ariadne ao se casar com o deus Baco, que a projetou no céu em celebração.
28. Serpente (Sepentis) (Ser)
Divide-se em duas, Cabeça e Cauda. As duas metades contam como uma única constelação. Ela representa uma enorme serpente enroscada em torno de Ofiúco, que agarra a cabeça na mão esquerda e a cauda na direita. Na mitologia grega, as serpentes simbolizavam o renascimento por trocarmos de pele.
29. Ofiúco (Ophiuchi) (Oph)
Representa um homem segurando uma serpente. Na mitologia, Ofiúco é identificado com Esculápio, o deus grego da medicina que ressuscita os mortos. Hades, deus do inferno, temendo que esse poder pusesse em risco seu comércio de almas mortas, pediu a Zeus que fulminasse Esculápio com um raio. Zeus pôs Esculápio entre as estrelas, onde é visto segurando uma serpente.
30. Escudo (Scuti) (Sct)
Foi introduzida pelo astrônomo Johannes Hevelius.
31. Flecha (Sagittae) (Sge)
É a terceira menor constelação. Os gregos a viam como uma flecha lançada por Apolo, Hércules ou Eros, cuja ponta é marcada por sua flecha mais brilhante.
32. Águia (Aquilae) (Aql)
Representa uma águia voando. Na mitologia grega, a águia carregava os raios que Zeus lançava sobre seus inimigos. Segundo a lenda, Zeus transformou-se ou enviou uma águia e carregou o menino pastor Ganimedes até o Olimpo para servir aos deuses.
33. Raposa (Vulpeculae) (Vul)
Introduzida por Johannes Hevelius.
34. Delfim (Delphini) (Del)
Uma das constelações gregas originais. Representa o golfinho que salvou o poeta e músico Arion de se afogar atacado por ladrões num navio, ou o que foi enviado por Poseidon para lhe levar a ninfa do mar Anfitrite, com quem queria se casar.
35. Cavalo menor (Equulei) (Equ)
É a segunda menor constelação. Representa a cabeça de um pequeno cavalo. Foi acrescentada por Ptolomeu.
36. Pégaso (Pegasi) (Peg)
Só o quarto dianteiro do cavalo aparece no céu. Pégaso era o cavalo voador do herói Belerofonte. Pégaso nasceu do corpo de medusa, a górgona, quando ela foi decapitada por Perseu.
37. Aquário (Aquarii) (Aqr)
Na mitologia grega, Aquário representava um belo pastor, Ganimedes, de quem Zeus se agradou. Zeus enviou sua águia (ou, se transformou em uma, como

indica algumas versões) a fim de levar o rapaz para o monte Olimpo, onde ele se tornou um copeiro dos deuses.

38. Peixes (Piscium) (Psc)
Na mitologia grega, Peixes representa Afrodite e seu filho Eros, que se transformaram em peixes e mergulharam no Eufrates para escapar do monstro Tífon.
39. Baleia (Ceti) (Cet)
É uma das 48 constelações originais gregas. Representa o monstro marinho que estava prestes a devorar Andrômeda quando foi morto por Perseu.
40. Órion (Orionis) (Ori)
Representa um caçador ou guerreiro seguido por seus cães (as constelações Cão Maior e Cão Menor). Seu traço mais peculiar são as Três Marias. Na mitologia grega, Órion foi mortalmente ferido por um escorpião. Como está em oposição com escorpião, põe-se quando este se levanta.
41. Cão Maior (Canis Majoris) (Cma)
Contém a estrela mais brilhante do céu noturno, Sírius. Representa um dos dois cães que seguiam Órion.
42. Cão Menor (Canis Minoris) (Cmi)
O menor dos dois cães de Órion. É facilmente reconhecido a partir de sua estrela mais brilhante, Procyon. Procyon em grego significa “antes do cão”, pois essa constelação se eleva primeiro que o outro cão.
43. Unicórnio (Monocerotis) (Mon)
Foi introduzida por Petrus Plancius.
44. Hydra (Hydrae) (Hya)
Hidra é a maior constelação. Hidra foi o monstro de muitas cabeças morto por Hércules no seu segundo trabalho, mas é representada como uma cobra d’água de uma só cabeça.
45. Máquina Pneumática (Antilae) (Ant)
Foi introduzida no século XVIII pelo astrônomo francês Nicolas Louis de Lacaille.
46. Sextante (Sextantis) (Sex)
Foi introduzida por Johannes Hevelius. Representa um sextante.
47. Taça (Crateris) (Crt)
Representa uma taça.
48. Corvo (Corvi) (Crv)
É uma das 48 constelações originais. Representa um corvo, a ave sagrada de Apollo.
49. Centauro (Centauri) (Cen)
Possui a estrela mais próxima do Sol. Representa um centauro, criatura mítica com torso de homem e patas de cavalo.
50. Lobo (Lupi) (Lup)
Uma das 48 constelações originais conhecidas pelos gregos antigos. Representa um lobo morto por Centauro com uma lança.
51. Sagitário (Sagittarii) (Sgr)

Na mitologia grega, Sagitário representava Croto, filho de Pã, que inventou o arco e a flecha e foi caçar a cavalo. Ele também foi enviado para ferir o escorpião que matou Órion. É por essa razão que Sagitário “levanta-se” no céu logo após escorpião surgir.

52. Escorpião (Scorpii) (Sco)

Representa o animal que matou Órion com sua picada. O coração do escorpião é marcado pela estrela vermelha Antares.

53. Capricórnio (Capricorni) (Cap)

É a menor constelação do zodíaco. No mito grego, representa o deus Pã, semelhante a um bode. Consta que ele saltou num rio e tornou-se em parte peixe para escapar do monstro marinho Tífon. Por isso, a constelação é descrita como um bode com rabo de peixe.

54. Microscópio (Microscopii) (Mic)

Com a forma de um microscópio composto primitivo, foi proposta pelo astrônomo francês Nicolas Louis de Lacaille.

55. Peixe Austral (Piscis Austrini) (PsA)

É realçada pela presença de Fomalhaut de magnitude 1,2. Para os gregos antigos, os dois peixes da constelação zodiacal de Peixes eram filhos de Peixe Austral. No céu, a torrente de água da jarra de Aquário flui para a boca do peixe, designado pela palavra árabe ‘Fomalhaut’, que significa “boca do peixe”.

56. Escultor (Sculptoris) (Scl)

Introduzida por Nicolas Louis de Lacaille, segundo o qual ela representava o ateliê de um escultor; o nome foi abreviado depois.

57. Forno (Fornacis) (For)

Foi introduzida por Nicolas Louis de Lacaille, originalmente sob o nome *Fornax Chemica*, numa alusão ao forno químico usado para destilação.

58. Butil (Caeli) (Cae)

Foi introduzida por Nicolas Louis de Lacaille.

59. Eridano (Eridani) (Eri)

Representa um rio que serpenteia do pé do Touro no norte a serpente marinha no sul. Eridano aparece na história de Faetone, filho do deus-Sol Hélios, que tentou impelir o pai a brigar pelo céu, mas perdeu o controle e caiu como um meteoro no rio.

60. Lebre (Leporis) (Lep)

Constelação reconhecida pelos gregos antigos. Representa uma lebre perseguida pelo céu por um dos cães de Órion, Cão Maior. Segundo a lenda, a constelação representa uma praga de lebres que assolou a ilha grega de Leros, quando um programa de reprodução desandou.

61. Pomba (Columbae) (Col)

Introduzida por Petrus Plancius. Representa a pomba que Noé soltou de sua arca para encontrar terra, conforme descrito na Bíblia. A pomba retornou com um ramo de oliveira no bico, mostrando que as águas do dilúvio estavam abaixando.

62. Bússola (Pyxidis) (Pyx)

- Introduzida por Nicolas Louis de Lacaille. Representa a bússola magnética de um barco.
63. Popa (Puppis) (Pup)
Era parte da antiga figura grega do navio, a nau de Jasão e os argonautas.
64. Vela (Velorum) (Vel)
É uma das três partes em que a constelação grega de Navio foi dividida.
65. Quilha (Carinae) (Car)
Outra parte da figura de Navio. No mito grego, Argo era uma potente galé de 50 remos em que Jasão e 50 dos maiores heróis gregos, os argonautas, navegaram para Cólquida, na margem leste do mar Negro, para buscar o velocino de ouro de um carneiro.
66. Cruzeiro do Sul (Crucis) (Cru)
É a menor das 88 constelações. Os gregos a viam como parte do Centauro, mas foi transformada em constelação por navegantes europeus no século XVI.
67. Mosca (Muscae) (Mus)
Foi introduzida no fim do século XVI pelos navegadores holandeses Pieter Dirkszoon Keyser e Frederick de Houtman.
68. Compasso (Circini) (Cir)
Introduzida por Nicolas Louis de Lacaille. Tem a forma de um triângulo isósceles longo e fino.
69. Esquadro (Normae) (Nor)
Introduzida por Nicolas Louis de Lacaille que a chamou de *Norma et Regula*, ou seja, Esquadro e Régua.
70. Triângulo Austral (Trianguli Australis) (TrA)
Foi introduzida no fim do século XVI pelos navegadores holandeses Pieter Dirkszoon Keyser e Frederick de Houtman.
71. Altar (Arae) (Ara)
Representava para os gregos antigos, o altar sobre o qual os deuses do Olimpo juraram fidelidade antes de lutar com os Titãs pelo controle do Universo. O tampo do altar está voltado para o sul e a Via Láctea pode ser imaginada com a fumaça do incenso.
72. Coroa Austral (Coronae Australis) (CrA)
Consiste num arco de estrelas de 4ª magnitude e menos brilhantes, que representam uma coroa de louros. Era uma das 48 constelações originais gregas.
73. Telescópio (Telescopii) (Tel)
Introduzida por Nicolas Louis de Lacaille, homenageia o telescópio.
74. Índio (Indi) (Ind)
Foi introduzida no fim do século XVI pelos navegadores holandeses Pieter Dirkszoon Keyser e Frederick de Houtman. Representa um índio levando uma lança e flechas.
75. Grou (Gruis) (Gru)
Foi introduzida no fim do século XVI pelos navegadores holandeses Pieter Dirkszoon Keyser e Frederick de Houtman. Representa uma ave de pernas e pescoço longos, o grou.

76. Fênix (Phoenicis) (Phe)
Foi introduzida no fim do século XVI pelos navegadores holandeses Pieter Dirkszoon Keyser e Frederick de Houtman. Representa a ave mítica que renasceu das cinzas de sua predecessora.
77. Tucano (Tucanae) (Tuc)
Foi introduzida no fim do século XVI pelos navegadores holandeses Pieter Dirkszoon Keyser e Frederick de Houtman. Para eles era uma ave das Índias orientais, mas hoje representa a ave de bico grande das Américas Central e do Sul.
78. Serpente Marinha (Hydri) (Hyi)
Foi introduzida no fim do século XVI pelos navegadores holandeses Pieter Dirkszoon Keyser e Frederick de Houtman. Representa uma pequena cobra d'água, mas não deve ser confundida com Hidra, grande cobra d'água.
79. Relógio (Horologii) (Hor)
Representa um relógio de pêndulo. Introduzida por Nicolas Louis de Lacaille.
80. Retículo (Reticuli) (Ret)
Introduzida por Nicolas Louis de Lacaille. Representa o retículo, grade de linhas finas na ocular de seu telescópio.
81. Pintor (Pictoris) (Pic)
Introduzida por Nicolas Louis de Lacaille. Ele a imaginou como o cavalete de um pintor e chamou-a *Equuleus Pictoris*.
82. Dourado (Doradus) (Dor)
Foi introduzida no fim do século XVI pelos navegadores holandeses Pieter Dirkszoon Keyser e Frederick de Houtman. Contém a maior parte da Grande Nuvem de Magalhães. Representa o peixe dourado, de águas tropicais. A Constelação foi também descrita como peixe-espada.
83. Peixe-Voador (Volantis) (Vol)
Foi introduzida no fim do século XVI pelos navegadores holandeses Pieter Dirkszoon Keyser e Frederick de Houtman. Representa o peixe tropical que plana no ar com as nadadeiras esticadas.
84. Mesa (Mensae) (Men)
A menos brilhante das 88 constelações. Foi introduzida por Nicolas Louis de Lacaille e homenageia a montanha da Mesa, perto da cidade do Cabo, na África do Sul.
85. Camaleão (Chamaeleontis) (Cha)
Foi introduzida no fim do século XVI pelos navegadores holandeses Pieter Dirkszoon Keyser e Frederick de Houtman. Em algumas cartas antigas, aparecia de língua esticada para pegar a vizinha Mosca.
86. Ave do Paraíso (Apodis) (Aps)
Foi introduzida no fim do século XVI pelos navegadores holandeses Pieter Dirkszoon Keyser e Frederick de Houtman.
87. Pavão (Pavonis) (Pav)
Foi introduzida no fim do século XVI pelos navegadores holandeses Pieter Dirkszoon Keyser e Frederick de Houtman. Na mitologia grega, o pavão era a

ave sagrada de Hera, mulher de Zeus, que viajava pelos ares numa biga puxada por pavões.

88. Oitante (Octantis) (Oct)

Foi introduzida por Nicolas Louis de Lacaille. Representa o instrumento náutico oitante, um predecessor do sextante. É a constelação no polo sul celeste.

7-Referências Bibliográficas

[1] FRIAÇA, A. C. S. (et all). Astronomia Uma Visão Geral do Universo, Edusp, 2008, São Paulo, ISBN 978-85-314-0462-7

[2] RIDPATH, I. Astronomia, Zahar, 2007, Rio de Janeiro, ISBN 978-85-7110-982-7

[3] ASOCIACIÓN FONDO DE INVESTIGACIONES Y EDITORES. Física una Visión Analítica del Movimiento volumen 3, Lumbreras, 2012, Peru, ISBN 978-612-307-207-0

[4] EISBERG, R. RESNICK, R. Física Quântica: Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas, Campus, ISBN 9788570013095

[5] S.O.Kepler, SARAIVA, M. F. Astronomia e Astrofísica, Livraria da Física, 2004, 2.ed. ISBN 9788588325234

[6] <http://astropt.org/blog/2011/05/09/ursa-maior-bem-la-em-cima/> (acessado no dia 26/04/2013)

[7] <http://seguindopassoshistoria.blogspot.com.br/2012/03/as-constelacoes.html> (acessado no dia 01/06/2013)

[8]<http://bibliacuriosa.blogspot.com.br/2012/01/constelacao-de-orion-e-profecia-de.html> (acessado no dia 26/04/2013)

[9] <http://www.emdialogo.uff.br/node/3862> (acessado no dia 01/06/2013)

[10]<http://matematicacritica.blogspot.com.br/2012/07/no-segundo-ano-do-ensino-medio-nos.html> (acessado no dia 01/06/2013)

[11]<http://timpanosgeograficos.blogspot.com.br/2011/01/o-papel-espacial-do-tempo-humano-parte.html> (acessado no dia 01/06/2013)

[12]<http://educar.sc.usp.br/fisica/movgrav.html> (acessado no dia 01/06/2013)

[13] <http://images55.hautetfort.com/tag/galil%C3%A9> (acessado no dia 26/04/2013)

[14]<http://spacefellowship.com/news/art12949/astronomy-question-of-the-week-how-far-is-unimaginably-far-.html> (acessado no dia 01/06/2013)

[15] <http://www.brasilecola.com/fisica/a-dispersao-luz-branca.htm> (acessado no dia 26/04/2013)

[16] http://wrjfis.no.comunidades.net/index.php?pagina=1085661977_02 (acessado no dia 26/04/2013)

[17] http://www.ced.ufsc.br/men5185/trabalhos/63_lampadas/incand/funciona04.htm (acessado no dia 26/04/2013)

[18] <http://www.brasilecola.com/quimica/espectros-emissao-absorcao-leis-kirchhoff.htm> (acessado no dia 26/04/2013)

[19] <http://www.astro.mat.uc.pt/novo/observatorio/site/museu/T0181esp.htm> (acessado no dia 26/04/2013)

[20] <http://www.cdcc.usp.br/cda/dispositivos/paralaxe/index.html> (acessado no dia 14/06/2013)

[17] <http://ventosdouniverso.blogspot.com.br/2012/02/sumario-para-o-blogonauta-1.html> (acessado no dia 26/04/2013)

[21] <http://www.whip.obspm.fr/~arenou/articles/parsec.en.html> (acessado no dia 26/04/2013)

[22] <http://nautilus.fis.uc.pt/cec/teses/joana/prototipo/estereoscopia.htm> (acessado no dia 14/06/2013)

[23] <http://www.if.ufrgs.br/fis02001/aulas/hrdiag.html> (acessado no dia 26/04/2013)

[24] <http://www.spacetelescope.org/images/heic9910a/> (acessado no dia 14/06/2013)

[25] <http://www.spacetelescope.org/images/heic0515k/> (acessado no dia 14/06/2013)

[26] http://en.wikipedia.org/wiki/AE_Aurigae (acessado no dia 26/04/2013)

[27] http://en.wikipedia.org/wiki/Zeta_Ophiuchi (acessado no dia 26/04/2013)

[28] http://en.wikipedia.org/wiki/Main_sequence#Sample_parameters (acessado no dia 26/04/2013)

[29] http://en.wikipedia.org/wiki/41_Arietis (acessado no dia 26/04/2013)

[30] http://en.wikipedia.org/wiki/Alpha_Arae (acessado no dia 26/04/2013)

[31] http://en.wikipedia.org/wiki/Beta_Canis_Minoris (acessado no dia 26/04/2013)

[32] http://en.wikipedia.org/wiki/Delta_Antliae (acessado no dia 26/04/2013)

[33] http://en.wikipedia.org/wiki/Epsilon_Apodis (acessado no dia 26/04/2013)

- [34] http://en.wikipedia.org/wiki/Lambda_Crucis (acessado no dia 26/04/2013)
- [35] http://en.wikipedia.org/wiki/Nu1_Arae (acessado no dia 26/04/2013)
- [36] <http://en.wikipedia.org/wiki/Regulus> (acessado no dia 26/04/2013)
- [37] http://en.wikipedia.org/wiki/Sigma_Arietis (acessado no dia 26/04/2013)
- [38] http://en.wikipedia.org/wiki/Upsilon_Orionis (acessado no dia 26/04/2013)
- [39] http://en.wikipedia.org/wiki/Zeta_Canis_Majoris (acessado no dia 26/04/2013)
- [40] <http://en.wikipedia.org/wiki/Vega> (acessado no dia 26/04/2013)
- [41] <http://en.wikipedia.org/wiki/Sirius> (acessado no dia 26/04/2013)
- [42] <http://en.wikipedia.org/wiki/Fomalhaut> (acessado no dia 26/04/2013)
- [43] <http://en.wikipedia.org/wiki/Altair> (acessado no dia 26/04/2013)
- [44] http://en.wikipedia.org/wiki/Procyon#Procyon_A (acessado no dia 26/04/2013)
- [45] http://en.wikipedia.org/wiki/Alpha_Centauri_A (acessado no dia 26/04/2013)
- [46] http://en.wikipedia.org/wiki/Tau_Ceti (acessado no dia 26/04/2013)
- [47] http://en.wikipedia.org/wiki/Alpha_Centauri_B (acessado no dia 26/04/2013)
- [48] http://en.wikipedia.org/wiki/61_Cygni_B (acessado no dia 26/04/2013)
- [49] http://en.wikipedia.org/wiki/Sigma_Draconis (acessado no dia 26/04/2013)
- [50] http://en.wikipedia.org/wiki/Proxima_Centauri (acessado no dia 26/04/2013)
- [51] <http://clubedaquimica.blogspot.com.br/2010/06/o-que-as-cores-da-banda-eira-do-brasil.html> (acessado no dia 26/04/2013)

