



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPUS CAMPINA GANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE LICENCIATURA EM FÍSICA**

FELIPE SÉRVULO MACIEL COSTA

UM ESTUDO INTRODUTÓRIO SOBRE AS ESTRELAS

UM ESTUDO INTRODUTÓRIO SOBRE AS ESTRELAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Licenciatura em Física da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de Licenciado em Física.

Orientadora: Prof. Dra. Morgana Lígia de Farias Freire.

**CAMPINA GRANDE-PB
2014**

É expressamente proibida a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano da dissertação.

C837e Costa, Felipe Sérvulo Maciel.
Um estudo introdutório sobre as estrelas [manuscrito] / Felipe Sérvulo Maciel Costa. - 2014.
75 p. : il. color.

Digitado.
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Física) -
Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e
Tecnologia, 2014.
"Orientação: Profa. Dra. Morgana Lígia de Farias Freire,
Departamento de Física".

1. Estrelas. 2. Astronomia. 3. Sol. I. Título.

21. ed. CDD 523.8

FELIPE SÉRVULO MACIEL COSTA

UM ESTUDO INTRODUTÓRIO DA EVOLUÇÃO DAS ESTRELAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Licenciatura em Física da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de Licenciado em Física.

Aprovada em: 26/11/2014.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dra. Morgana Ligia de Farias Freire (Orientadora)
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof. Me. Elialdo Andriola Machado
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof. Dr. Edvaldo de Oliveira Alves
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

À minha filha, Lohanny Beatrice, que me permitiu ver o mundo com outros olhos e que tanto me engrandece e me inspira,

À todos aqueles que admiram os mistérios do Universo. DEDICO.

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora Morgana Lígia de Farias Freire, pela indicação de bibliografias e pelo empenho durante todo este trabalho.

À minha vó, minha mãe, minhas tias e meus primos, pela compreensão por minha ausência nas reuniões familiares.

Ao astrônomo Carl Sagan (*in memoriam*), que possibilitou-me enriquecer a curiosidade de conhecer e apaixonar-me cada vez mais pela astronomia e astrofísica.

Aos professores que contribuíram ao longo de 5 anos, por meio das disciplinas e debates, para o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Coordenador do PMAP UAB “Monsenhor Manuel Vieira”, Vamberto Flávio Teófilo de Oliveira, pela paciência e compreensão das horas ausentes no trabalho.

À minha esposa, pela paciência, dedicação e compreensão da minha frequente ausência.

Aos colegas de turma que, além da amizade, me permitiram construir uma família.

“O hidrogênio em nosso DNA, o cálcio em nossos dentes, o ferro em nosso sangue, o carbono em nossas tortas de maçã foram feitos nos interiores de estrelas em colapso. Somos feitos de material estelar.” – *Carl Sagan, Cosmos.*

RESUMO

As estrelas são aspirações em estudos na astronomia, na astrofísica, entre outras áreas. O Sol, nossa fonte primária de energia, é um exemplo de estrela de sequência principal, uma verdadeira usina nuclear. Mas, comparado às outras estrelas do universo, o Sol ainda é minúsculo. Além dele, existem inúmeras outras formas de estrelas, dos mais variados tipos, tamanhos e cores. Entre vários exemplos típicos, temos as estrelas gigantes, supergigantes, anãs brancas, anãs negras, anãs marrons, estrelas binárias e variáveis. Há também outras formas exóticas de estrelas que, dependendo de sua massa inicial, colapsam-se e transformam-se nas mais misteriosas e complexas estruturas do cosmos, tais como: buracos negros, quasares, supernovas, hypernovas, estrelas de nêutrons, pulsares, entre outros. O presente trabalho tem como objetivo apresentar introdutoriamente a evolução das estrelas, desde o seu nascimento em uma nuvem molecular, até o seu destino final, resultando em uma estrela colapsada e/ou compacta, assim como também os fatores físicos e as pesquisas envolvidas no estudo estelar.

Palavras-Chave: Estrelas. Evolução. Sol.

ABSTRACT

The stars are aspirations in studies in astronomy, astrophysics, and other areas. The sun, our primary source of energy, is an example of a main sequence star, a real nuclear power plant. But compared to other stars in the universe, the sun and still tiny. Besides him, there are numerous other forms of stars, of various types, sizes and colors. Among several typical examples, we have the giant stars, supergiants, white dwarfs, black dwarfs, brown dwarfs, stars and binary variables. There are also other exotic forms of stars, depending on their initial mass, it collapses and they become the most mysterious and complex structures of the cosmos, such as: black, quasars, supernovae, hypernovas, neutron stars, pulsars holes between others. This paper aims to present introductorily the evolution of stars, from their birth in a molecular cloud, to its final destination, resulting in a collapsed and/or compact star, as well as physical factors involved in the research and study stellar.

Keywords: Stars. Evolution. Sun

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Uma das mais conhecidas nuvens moleculares: os pilares da criação, na Nebulosa de Órion.....	16
Figura 2 – A gravidade e a pressão entram em estado de equilíbrio hidrostático fazendo com que a estrela se estabilize por muito tempo.....	18
Figura 3 - Primeiro gráfico apresentado no trabalho de Hertzsprung em 1911.....	19
Figura 4 - Diagrama H-R de luminosidade e temperatura, mostrando as diferentes fases de evolução estelar.	19
Figura 4: Diagrama H-R mostrando diferentes regiões.....	20
Figura 6 - Reação de fusão na produção de Hélio 4 a partir de núcleos de Hidrogênio.....	22
Figura 7 - Imagem da atmosfera solar pelo Solar Dynamics Observatory da NASA.....	23
Figura 8 - Desenhos originais das manchas solares por Galileu em sua obra “Istoria e Dimostrazioni Intorno Alle Macchie Solar” de 1613.....	24
Figura 5 - Diagrama mostrando as diferenças fases da nuvem molecular até formar o Sol e todo o Sistema Solar.....	26
Figura 10 - Disposição das estrelas Gigantes, supergigantes, subgigantes e anãs, no Diagrama H-R. Esse gráfico é parametrizado com a magnitude absoluta, luminosidade e temperatura de superfície.....	29
Figura 11- Exemplo de estrelas gigantes vistas à olho nu: Pollux, maior estrela da constelação de gêmeos. Arturus, maior estrela da constelação de Boeiro, e Aldebaran, maior estrela da constelação de Touro.....	31
Figura 12 – Gráfico apresentado à evolução de uma estrela depois de deixar a fase de sequência principal.....	31
Figura 13 – Nebulosas planetárias: nebulosa olho de Gato, NGC 7662, NGC 7009, NGC 6829.....	33
Figura 14 - Nebulosas planetárias: NGC 2392 a nebulosa do esquimó.....	33
Figura 15 - A Nebulosa de Hélix.....	33
Figura 16 - Estrutura de conchas concêntricas formadas pelos elementos, assemelhando-se a uma cebola.....	35
Figura 17 - Diagrama de comparação entre o tamanho das estrelas gigantes, supergigantes e o sol.	36
Figura 6 - Diagrama H-R com as estrelas gigantes e as supergigantes.....	36

Figura 19 - Camadas de uma estrela massiva prestes a tornar-se uma supernova.....	38
Figura 20 - Impressão artística dos anéis em torno de SN1987A.....	40
Figura 21 - A Nebulosa do Caranguejo (Messier-1, NGC 1952, Taurus A), foi o resultado da Supernova observada por astrônomos chineses e árabes e nativos americanos em 1054.....	40
Figura 22 - Nebulosa planetária NGC3132, no centro podemos ver uma anã branca.....	42
Figura 23 – Diagrama H-R: as estrelas anãs vermelhas encontram-se no canto inferior direito.....	43
Figura 24 - Imagem de Próxima Centauri tirada pelo telescópio Espacial Hubble.....	44
Figura 7 – Comparação do Sol com a Próxima Centauri (última da esquerda para a direita)	44
Figura 8 - Esta anã marrom (objeto menor na foto) orbita a estrela Gliese 229, que está localizada na constelação do Lobo a cerca de 19 anos-luz da Terra. Esta anã marrom, batizada de Gliese 229B, possui cerca de 20 a 50 vezes a massa de Júpiter.....	45
Figura 27 – Gráfico do período-Luminosidade/magnitude.....	48
Figura 28 - Disposição das estrelas variáveis no Diagrama HR.....	48
Figura 29 - A estrela Dupla Mizar, primeira a ser vista ‘por um telescópio. Cortesia: George Kristiansen.....	50
Figura 30 - A primeira observação direta de uma estrela de nêutrons em luz visível.....	51
Figura 31 – Estrutura interna das uma estrela de nêutrons.	52
Figura 9 - Sequência de imagens do pulsar.....	53
Figura 10- Impressão artística de um buraco negro distorcendo o espaço a sua volta.....	55
Figura 11 - Quasar muito distante alimentado por um buraco negro com dois bilhões de massas solares, datado de 770,000 mil anos após o Big Bang.....	56

LISTA DE SÍMBOLOS

M_{\odot} - Massa solar
 L_{\odot} - Luminosidade solar
 R_{\odot} - Raio solar

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1 FORMAÇÃO DAS ESTRELAS	16
1.2 DEFINIÇÃO	16
1.2.1 Protoestrelas	18
1.2.3 Sequência Principal, Pré-Sequência Principal E O Diagrama H-R.....	19
2. O SOL	24
3. ESTRELAS GIGANTES, SUPERGIGANTES E ANÃS.....	30
3.1 ESTRELAS GIGANTES.....	30
3.2 ESTRELAS SUPERGIGANTES	34
3.2.1 As Supernovas	38
3.2.2 Os tipos de Supernovas	40
3.3 ESTRELAS ANÃS	41
3.3.1 Anãs brancas.....	41
3.3.2 Anãs Negras	43
3.3.3 Anãs Vermelhas.....	43
3.4.4 Anãs Marrons.....	44
4. ESTRELAS VARIÁVEIS, DUPLAS E COLAPSADAS	46
4.1 ESTRELAS VARIÁVEIS	46
4.2 ESTRELAS DUPLAS	49
4.3 ESTRELAS COLAPSADAS.....	50
4.3.1 Estrelas de Nêutrons	50
4.3.2 Pulsares.....	52
4.3.3 Buracos negros.....	53
4.3.4 Quasares	55
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	57
REFERÊNCIAS.....	59
APÊNDICE	63

1. INTRODUÇÃO

Desde os tempos mais remotos, a observação celeste fez parte não só do imaginário, mas também da vida humana. O movimento dos astros, mais especificamente as estrelas, influenciou na economia, na agricultura e nas navegações e deu origem às religiões antigas e aos mitos. Hoje, com o advento da astrofísica estelar e com a ajuda da tecnologia, o homem não só observa as estrelas, mas também é capaz de seguir a trilha da evolução destes corpos, o que auxilia no entendimento do Universo.

As estrelas são aspirações em estudos na astronomia, na astrofísica, entre outras áreas da física. Uma estrela constitui-se em uma enorme esfera de gás ardente em seu interior por energia nuclear. As mais antigas estrelas da nossa galáxia nasceram aproximadamente a 14 (quatorze) bilhões de anos. Um exemplo de uma estrela que conhecemos é o Sol. Trata-se da estrela do sistema solar que fornece energia a terra essencial à vida de todos os seres que a ela pertence.

Constantemente, no Universo, as estrelas nascem. O nascimento de uma estrela se dá através de amplas nuvens de gases e poeira. As várias estrelas são semelhantes ao Sol, no entanto existem também estrelas grandiosas do tamanho do sistema solar inteiro e anãs que se compara como tamanho da terra. Mas o que é um conjunto de estrelas? O nome melhor seria uma família. Desta forma uma família de estrelas que se unem no espaço pela força da gravidade é denominada de galáxia. “A força da gravidade existe em todos os corpos celestes, inclusive nas estrelas.

O gás que forma as estrelas não consegue se espalhar porque a força da gravidade não deixa. Por vários motivos o gás quer se espalhar no espaço, mas a gravidade não deixa” (KLEBER, 2011, p. 10). Para se ter uma ideia da dimensão de uma galáxia, tem-se que as pequenas possuem milhões de estrelas e tem um comprimento um milhão de anos-luz.

Qual é a relação entre a cor e temperatura de uma estrela? “A cor está relacionada com sua temperatura externa. “Quanto mais azul a estrela, mais quente ela é. Antares é vermelha, sendo, portanto, uma estrela fria, com temperatura de aproximadamente 3.600K. Já a estrela Shaula tem uma temperatura bem maior, em torno de 25.000K” (DOTTORI, 2011, p. 2)

Dentre bilhões de galáxias, temos apenas três que podem ser vistas a olho nu, com aspecto de manchas de luz, ou seja, nubladas. As demais são visíveis apenas com grandes telescópios.

As estrelas, formadas a partir de imensas nuvens moleculares imersas em nebulosas gasosas existentes nas galáxias. Essas nuvens são constituídas quase que inteiramente de hidrogênio e hélio. À medida que este hélio nuclear for todo transformado em carbono, e parte em oxigênio, as estrelas entram no ramo das supergigantes (SARAIVA et al., 2001). As supergigantes constituem-se as estrelas em que a fonte de energia começou a esgotar, o núcleo central vai sucumbindo e ao mesmo tempo aumenta a temperatura.

Há também outras formas exóticas de estrelas que, dependendo de sua massa inicial, colapsam-se e transformam-se nas mais misteriosas e complexas estruturas do cosmos, tais como: buracos negros, quasares, supernovas, hypernovas, estrelas de nêutrons, pulsares, entre outros.

O presente trabalho tem como objetivo apresentar a evolução das estrelas, desde o seu nascimento em uma nuvem molecular, até o seu destino final, resultando em uma estrela colapsada e/ou compacta, assim como também os fatores físicos e as pesquisas envolvidas no estudo estelar.

Por isso, o presente estudo orientou-se com a investigação junto a artigos e livros sobre as estrelas. Por se tratar de uma questão bastante ampla, foram feitos alguns recortes que chamaram a atenção. Assim, este trabalho teve como tipo de pesquisa a qualitativa. Os estudos da pesquisa qualitativa diferem entre si quanto ao método, à forma e aos objetivos (GODOY, 1995). Para o desenvolvimento de estudo de pesquisa qualitativa tem-se a cortadura do fenômeno determinado pela pesquisa no espaço. Como enfatiza Neves (1996, p. 1), a expressão pesquisa qualitativa assume “diferentes significados... Compreende um conjunto de diferentes técnicas interpretativas que visam descrever e decodifica os componentes de um sistema complexo de significados”. Neste sistema complexo de significados a pesquisa qualitativa vem sendo usada numa perspectiva de produção de conhecimentos.

A abordagem qualitativa oferece três diferentes possibilidades de se realizar pesquisa: a pesquisa documental, o estudo de caso e a etnografia. Dentre dessas possibilidades, o nosso trabalho poderia se caracterizar como pesquisa documental (CHIZZOTTI, 2006;

FIGUEIREDO, 2007; GAIO et al., 2008). No entanto, Pode-se até causar uma estranheza para o leitor, mas nossa investigação não se reveste os aspectos básicos que possa identificar um trabalho dessa natureza. No entanto quanto aos meios entende-se a pesquisa documental assemelha-se a pesquisa bibliográfica, pois ambas utilizam de documentos. Deixamos registrado que só assemelha-se, pois existe um elemento que as diferenciam, que é a natureza das fontes. Como nosso estudo remete-se as contribuições de diferentes autores, sobre o tema pesquisado, as fontes que utilizamos foram dos tipos secundárias. Além disso, a pesquisa bibliográfica segundo Moresi (2003):

[...] é o estudo sistematizado desenvolvido com base em material publicado em livros, revistas, jornais, redes eletrônicas, isto é, material acessível ao público em geral. Fornece instrumental analítico para qualquer outro tipo de pesquisa, mas também pode esgotar-se em si mesma. O material publicado pode ser fonte primária ou secundária (MORESI, 2003, p. 10,).

Já quanto aos fins a nossa investigação é do tipo exploratória. Pois foi como uma sondagem. Não comporta hipóteses e é um ponto de partida para o tema que pretendemos abordar (MORESI, 2003).

Por isso, podemos dizer que nosso trabalho foi introdutório, pois delimitamos de maneira introdutória o objeto de estudo, que pode ser justificado pelo próprio título. E sua classificação quanto aos meios de investigação foi à pesquisa bibliográfica e quanto aos fins foi à investigação exploratória.

Diante do objetivo deste trabalho, o mesmo foi dividido em cinco capítulos: No primeiro Capítulo apresentaremos a formação estelar. No segundo Capítulo destinamos a relatar sobre uma estrela muito importante para a vida na Terra: o Sol. No terceiro Capítulo, dentre os vários tipos de estrelas destacamos as classificadas pelo tamanho: estrelas gigantes, supergigantes e anãs. No quarto Capítulo, dentre as inúmeras classes e tipos de estrelas, existem certas categorias que se destacam no estudo estelar, por possuírem certas características físicas distintas e marcantes e são os maiores alvos de estudo dos astrofísicos estelares na atualidade, ou seja, as estrelas variáveis, duplas e colapsadas. E no quinto Capítulo apresentamos nossas considerações finais.

1.1 FORMAÇÃO DAS ESTRELAS

As estrelas são esferas de plasma (gás superaquecido) que, em boa parte de sua vida, estão em equilíbrio termodinâmico entre a energia liberada pela fusão nuclear no seu interior e a compressão causada pela gravidade da massa esférica. Parte da energia desse processo é liberada desde o centro da estrela até a periferia, chegando até o espaço em forma de radiação eletromagnética. No céu noturno, a olho nu, podemos observar cerca de 7000 estrelas (MOURÃO, 2000), no entanto, com ajuda de modernos telescópio estima-se que existem 7×10^{22} estrelas no Universo conhecido. Somente na nossa galáxia, a Via Láctea, existe cerca de 200 bilhões delas (BAHR e SOMMA, 2005).

O nascimento das estrelas representa um importante evento no Universo, uma vez que ao nascerem, as estrelas de diferentes massas originam desde pequenos corpos como planetas e asteroides até as mais complexas estruturas.

1.2 DEFINIÇÃO

A formação de estrelas bem como sua evolução é um evento natural e constante desde que o Universo começou a sintetizar os átomos nos primeiros instantes após o *Big Bang*, ou seja, quando $t = 380000$ anos¹ (era da recombinação) e $T = 3000\text{K}$ ², quando os elétrons que antes estavam livres, se ligaram aos núcleos atômicos, formando o ${}^1_1\text{H}$ (Hidrogênio 1), ${}^2_1\text{H}$ (Deutério), ${}^3_2\text{He}$ (Hélio-3), ${}^4_2\text{He}$ (Hélio-4) e ${}^7_3\text{Li}$ (Lítio-7) (OLIVEIRA FILHO e SARAIVA, 2014). Nesse período, a radiação pela primeira vez pôde fluir pelo cosmos (radiação cósmica de fundo) e a Nucleossíntese Primordial pôde também criar os primeiros fótons do Universo que se tornou visível e opaco (GLEISER, 2006).

As primeiras estrelas nasceram quando o Universo tinha entre 100 e 250 milhões de anos de idade (BROMM e LARSON, 2004) e se formaram a partir do gás primordial composto de aproximadamente 75% de H^+ , 24% He^+ e traços de Deutério, $\text{He}3$ e Li (OLIVEIRA FILHO e SARAIVA, 2014). Todos os outros elementos foram formados a partir dos repetitivos ciclos de nascimento e morte das estrelas que sucessivamente nasceriam.

Chamadas de População III, essa primeira geração de estrelas, era composta de estrelas supermassivas (na ordem de centenas de vezes a massa do Sol) e por terem uma grande massa, não duravam muito e seu intervalo de vida não ultrapassava milhões de anos.

¹Tempo do Universo

²Temperatura do Universo.

(BROMM, et al, 2002). Devido à força de atração gravitacional, os elementos começam a aglutinar-se em um só ponto e a nuvem de gás começa a condensar-se ao redor desse ponto em um processo lento (Figura 1).



Figura 12 - Uma das mais conhecidas nuvens moleculares: os pilares da criação, na Nebulosa de Órion.
Fonte: http://www.sun.org/uploads/images/Pillars_of_Creation.jpg

Há várias condições físicas que provocam e permitem a formação de uma estrela no interior de nuvens moleculares. Sabemos que, de acordo com a Lei da gravitação de Newton, descrita na Equação (1), a força da gravidade F_G varia com o inverso do quadrado da distância (R) entre objetos: *quanto menor a distância entre eles, maior será a intensidade da força*³. O que ocorre nas nuvens moleculares é que a densidade de suas partículas de gás aumenta o suficiente, fazendo com que, conseqüentemente, fiquem mais próximas umas das outras. Isso faz com que se inicie o processo de colapso gravitacional dentro da nuvem.

$$F_G = G \frac{M_1 m_2}{R^2}. \quad (1)$$

Onde F_G é a força gravitacional, M_1 é a massa do corpo 1, m_2 é a massa do corpo 2, R é a distância entre as massas M_1 e m_2 e G é a constante gravitacional.

³ Publicado pela primeira vez por Newton em 1687, no *Philosophiae naturalis principia mathematica*.

O que provoca o aumento repentino da densidade desta nuvem são as explosões estelares, chamadas de supernovas (PRIALNIK, 2000). Quando uma supernova explode nas proximidades de uma nuvem molecular gigante, uma grande quantidade de gás é lançada no espaço interestelar com altas velocidades e isto faz com que haja a compressão gravitacional. Além das supernovas, estima-se que outros fatores externos como instabilidades gravitacionais/magnéticas e ondas de densidades próximas ajudam no processo de formação da protoestrela. O que de fato ocorre é que os astrofísicos ainda não compreendem completamente as ações que fazem com que o colapso gravitacional (OBSERVATÓRIO NACIONAL, 2013a).

A contração gravitacional dá origem a um único objeto. Esse objeto então é fragmentado em pequenas nuvens [...] Ainda não se sabe como é feita essa fragmentação e é um dos grandes desafios da astrofísica. Cada uma dessas nuvens possui massa suficiente para formar uma estrela. O mesmo processo que ocorreu na nuvem gigante irá ocorrer então nestas nuvens fragmentadas, formando o que chamamos de protoestrelas (PRIALNIK, 2000, p. 195).

Esses fragmentos evoluem individualmente e no processo de contração gravitacional, eles liberam energia potencial gravitacional. Metade dessa energia potencial aquece a nuvem molecular enquanto que a outra metade da energia é irradiada para fora sob a forma de radiação térmica (OBSERVATÓRIO NACIONAL, 2013b).

1.2.1 Protoestrelas

As protoestrelas⁴ são os objetos do próximo estágio da evolução estelar que são formadas efetivamente em cerca de 1.000 anos após os pequenos fragmentos se colapsarem. No interior de cada protoestrela, a distância entre as partículas muito menor no interior da protoestrela do que no exterior, isso faz com que a força de atração gravitacional seja muito mais forte no interior (OBSERVATÓRIO NACIONAL, 2013b). O centro da protoestrela então se contrai mais rapidamente e mais energia será liberada, e esta região por sua vez ficará mais quente do que as regiões externas.

De acordo com a equação da lei do gás perfeito ou ideal, a pressão é diretamente proporcional à temperatura, ou seja:

$$PV = nRT, \quad (2)$$

⁴ Do grego *proto* (inicial): um objeto estelar que encontra-se em sua fase inicial de formação que posteriormente formará uma estrela.

onde P é a pressão, n o número de moles e T a temperatura do gás.

Isso indica que, uma vez aumentado os processos de colisão entre as partículas de gás no interior da protoestrela, provocando por sua vez um aumento de sua temperatura, conseqüentemente, um aumento na pressão. A pressão e a gravidade agem em sentidos contrários executando uma das manobras na qual irá manter a esfera de gás superaquecido que brevemente formará uma estrela. A força de pressão interna dos gases em expansão e a força da gravidade que age continuamente contraindo a esfera entram em equilíbrio (Figura 2). Esse equilíbrio chamado de equilíbrio hidrostático é o princípio fundamental para que uma estrela se mantenha por boa parte de sua vida em uma fase chamada de fase principal ou sequência principal, na qual o nosso Sol faz parte. Somente quando é atingido este estágio de equilíbrio, dizemos que uma estrela nasce (OBSERVATÓRIO NACIONAL, 2013b).

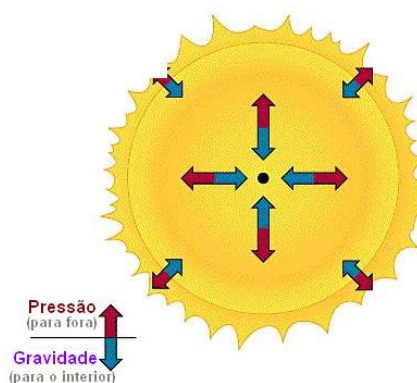


Figura 13 – A gravidade e a pressão entram em estado de equilíbrio hidrostático fazendo com que a estrela se estabilize por muito tempo.

Fonte: http://www.prof2000.pt/users/angelof/af16/ts_sol/big_images/bigsol10.png

1.2.3 Sequência Principal, Pré-Sequência Principal E O Diagrama H-R

As estrelas são objetos muito distintos uns dos outros. Suas propriedades observacionais, tais como, a massa, a luminosidade, o raio, a temperatura e a frequência do seu comprimento de onda (OBSERVATÓRIO NACIONAL, 2013c), ou seja, sua cor revela o que se podem encontrar estrelas distribuídas nos seguintes intervalos:

$$10^{-1} M_{\text{sol}} < M_{\text{estrela}} < 70 M_{\text{sol}}$$

$$10^{-4} L_{\text{sol}} < L_{\text{estrela}} < 10^6 L_{\text{sol}}$$

$$10^{-2} R_{\text{sol}} < R_{\text{estrela}} < 10^3 R_{\text{sol}}$$

$$10^3 \text{ K} < T_{\text{superfície da estrela}} < 10^5 \text{ K} . \quad (3)$$

Em 1911⁵ o astrônomo dinamarquês Ejnar Hertzsprung (1873- 1967) apresentou um gráfico relacionando a luminosidade de algumas estrelas observadas com as temperaturas que elas apresentavam (Figura 3). Neste gráfico, as estrelas não se distribuíam uniformemente, mas se agrupavam em regiões bem definidas (OBSERVATÓRIO NACIONAL, 2013c). Ao mesmo tempo e Independentemente de Hertzsprung, o astrônomo norte-americano Henry Norris Russell (1877-1957) fez, em 1913, o mesmo tipo de trabalho com outro grupo de estrelas, obtendo o mesmo resultado (OLIVEIRA FILHO e SARAIVA, 2013). Esse gráfico ficou conhecido como o Diagrama Hertzsprung- Russell ou diagrama H-R.

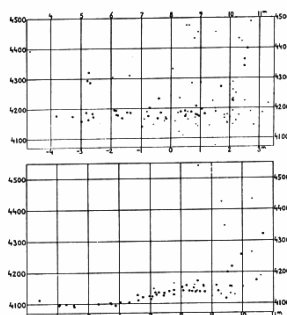


Figura 14 - Primeiro gráfico apresentado no trabalho de Hertzsprung em 1911.
Fonte: <http://www.rundetaarn.dk/engelsk/observatorium/hertz.html>

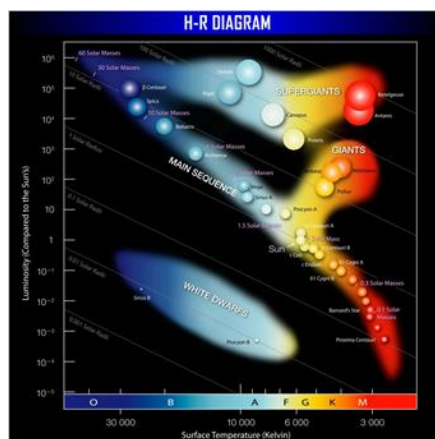


Figura 4 - Diagrama H-R de luminosidade e temperatura, mostrando as diferentes fases de evolução estelar.
Fonte: <http://www.museumofflight.org/iya-hrddiagram>

A partir do Diagrama H-R apresentado na Figura 4, pode-se perceber que as estrelas não são distribuídas uniformemente. Elas dispõem preferencialmente em algumas regiões.

⁵ Publikationen des Astrophysikalischen Observatorium zu Potsdam", 1911, Nr. 63.

Essa característica é hoje alvo de estudos para os astrofísicos e astrônomos e facilitou a determinação da fase de uma estrela, uma vez que a localização do gráfico determina todas as características do astro estudado.

No gráfico apresentado na Figura 5, existem 3 grandes faixas. A primeira logo abaixo no canto inferior é a faixa das anãs-brancas. A grande faixa diagonal que domina quase todo o gráfico é chamada de faixa da sequência principal onde as maiorias das estrelas incluindo o Sol se localizam. A terceira faixa localizada logo acima, representa a faixa das supergigantes. Existem ainda faixas intermediárias como a das gigantes localizada logo acima da faixa da sequência principal. Também, pelo gráfico da Figura 5, percebemos ainda que quando a temperatura de uma estrela diminui, seu raio aumenta, indicando uma característica peculiar da evolução de uma estrela: embora uma estrela gigante e supergigantes sejam maiores e mais brilhantes que o Sol, a sua temperatura não passa da ordem de 2500 K. Elas são estrelas muito frias que já esgotaram todo o seu hidrogênio e estão nas ultimas fases de evolução (OBSERVATÓRIO NACIONAL, 2013c).

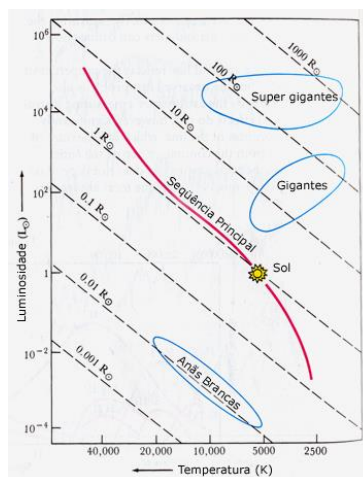


Figura 15: Diagrama H-R mostrando diferentes regiões.

Fonte: http://www.on.br/ead_2013/site/conteudo/cap15-diagrama/diagrama_hr.pdf.

“É importante notar que o fato de uma estrela estar “na” ou “fora da” sequência principal não se refere a sua posição no espaço, mas apenas a posição do ponto no diagrama HR que representa sua luminosidade e temperatura. Estima-se que em torno de 80% das estrelas nas vizinhanças do Sol são estrelas da sequência principal. Aproximadamente 20%

são anãs brancas e menos do que 1% são gigantes, supergigantes ou anãs marrons.” (OLIVEIRA FILHO e SARAIVA, 2014, p. 241)

As estrelas anãs brancas são muito mais quentes do que o Sol, sendo conseqüentemente, muito mais azuis do que ele. Ao mesmo tempo, as estrelas anãs brancas são menos luminosas do que o Sol e muito pequenas, muito menores que ele (OBSERVATÓRIO NACIONAL, 2013d).

Desse modo, podemos observar quatro características observando o gráfico. Sua cor, sua temperatura, seu raio e sua luminosidade. Outra característica observacional importante é que as estrelas não estão sempre em uma posição fixa no diagrama: estrelas sofrem mudanças ao longo de suas fases evolutivas. Essas mudanças se apresentam como variações de tamanho, temperatura, e luminosidade. Quando isto acontece, as estrelas saem da sequência principal e começam a se deslocar ao longo do diagrama H-R (OBSERVATÓRIO NACIONAL, 2013d).

Daqui a 5 bilhões de anos, o nosso Sol sairá da sequência principal e irá se deslocar para a direita e para cima do gráfico, se transformando em uma estrela Gigante Vermelha e posteriormente uma anã branca (ZELIK e GREGORY, 1998). Após 100.000 anos, essa protoestrela ainda está muito fria, na faixa de $1 \times 10^6 K$, temperatura esta não suficiente para a queima estável do H (OBSERVATÓRIO NACIONAL, 2013b).

Ao passar 10.000.000 anos, a temperatura do núcleo atinge $8 \times 10^6 K$ e a protoestrela já possui energia suficiente para fundir H em He⁶ (cerca de 1 KeV) e entram na fase de pré-sequência principal, podendo então ser chamada de estrela (OLIVEIRA FILHO, 2011). A reação de fusão de hidrogênio em hélio se dá através da equação:



Onde e⁺ é um pósitron e n um neutrino, γ é a energia correspondente à fusão (Figura 6).

⁶ Ciclo Próton ou ciclo pp.

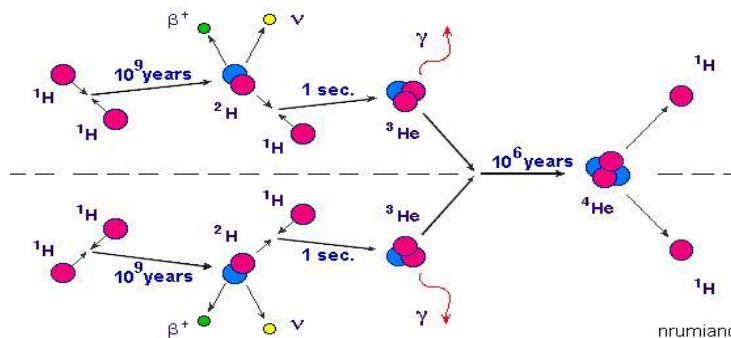


Figura 6 - Reação de fusão na produção de Hélio 4 a partir de núcleos de Hidrogênio. Fonte: <http://files.elfoseanjos.webnode.pt/>

A temperatura da superfície desta estrela com $1 M_{\odot}$ recém nascida alcança aproximadamente 4500K (OBSERVATÓRIO NACIONAL, 2013b).

Quando uma estrela entra na fase de sequência principal, a pressão interna equaliza-se com a gravidade que a estrela gera no espaço-tempo. Isso é chamado de Equilíbrio Hidrostático (mecânico) e é determinado de acordo com a equação:

$$\frac{dP}{dr} = \rho \frac{GM_r}{r^2}. \quad (5)$$

Onde o dr é o elemento infinitesimal de comprimento da estrela, P a pressão interna, G a constante gravitacional, M é a massa de uma esfera de raio r e ρ é a densidade.

Existe também a equação da força gravitacional atuando sobre uma esfera (OLIVEIRA FILHO, 2008):

$$M_r = \int_0^r \rho 4r^2 dr. \quad (6)$$

Essa equação é chamada de *equação da massa*, ou *equação da continuidade*. (Ibidem, 2004).

As Equações (5) e (6) juntas, governam a estrutura de uma estrela e determinam uma estimativa de ordem de grandeza de temperatura e pressão barométricas (OLIVEIRA FILHO, 2008).

Dependendo de sua massa, uma estrela permanecerá na fase de sequência principal pelos próximos bilhões de anos - 90% do total de sua vida (OLIVEIRA FILHO, 2013) até que todo seu hélio queime e ela se colapse novamente.

2. O SOL

O Sol é a estrela do Sistema Solar, nossa fonte de energia constante, é apenas uma entre as 400 bilhões de estrelas da Via Láctea e assim como outras estrelas de sequência principal o Sol também terá seu fim (Figura 7). Possui a classe espectral de G2V: O índice “G2” indica que a estrela possui uma temperatura de superfície de aproximadamente 5.780 K, o que lhe confere uma cor branca (a cor amarela ou laranja são apenas aspectos ópticos obtidos quando os raios solares passam pela atmosfera). O V indica que a estrela está na sequência principal (PHILLIPS, 1995).

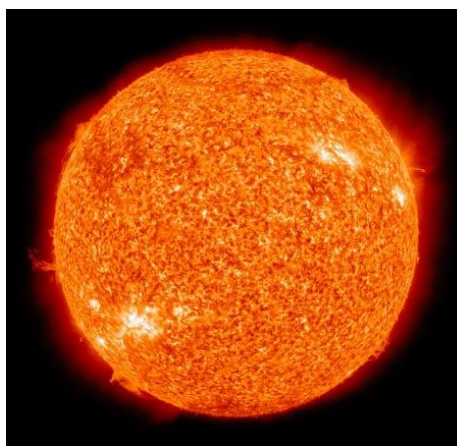


Figura 7 - Imagem da atmosfera solar pelo Solar Dynamics Observatory da NASA.
Fonte: NASA / SDO (AIA).

Nossa estrela mãe foi venerada desde a antiguidade, prova disto são as inúmeras divindades da cultura oriental, tais como Rá Hórus, na mitologia egípcia; Dellingr, na mitologia Nórdica; Apollo, na mitologia grega, sem contar no panteão Inca, Maia e Asteca. Todos eles eram representações do Sol, fonte de vida e energia para as atividades diárias dos antigos (GLEISER, 2006).

Os filósofos gregos acreditavam que o Sol assim como as estrelas era feito da quintessência e eram imutáveis (GLEISER, 2006) Mas, desde quando Galileu Galilei observou através de seu telescópio pela primeira vez as manchas solares (Figura 8) e publicou no seu trabalho *“Istoria e Dimostrazioni Intorno Alle Macchie Solar”* (Galileu, 1613).

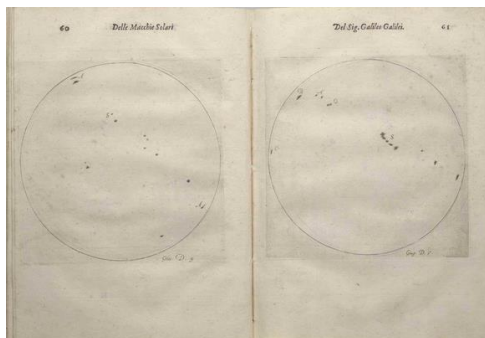


Figura 8 - Desenhos originais das manchas solares por Galileu em sua obra “Istoria e Dimostrazioni Intorno Alle Macchie Solar” de 1613.

Fonte: <http://www.rarebookroom.org/Control/galsol/index.html>

No início do século XIX, quando o óptico alemão Joseph Von Fraunhofer (1787 - 1826) viu acidentalmente através de suas lentes, pela primeira vez, o espectro solar, mostrando a faixa visível, com suas proeminentes manchas. Mais tarde, em 1850, Robert Bunsen (1811 -1899) e Gustav Kirchhoff (1824 - 1887) ao estudar as linhas escuras do espectro solar, descobriram que na verdade seriam os elementos presentes nas regiões mais frias da superfície da estrela (GLEISER, 2006).

“Quando a luz criada nas regiões mais frias – que têm espectro contínuo – passa pelas regiões mais frias, os elementos ali presentes a absorvem em seus tons específicos, de modo que o espectro medido na Terra é o que ‘sobra’” (GLEISER, 2006, p. 106). Isso fez com que fosse possível determinar os elementos químicos do Sol fossem basicamente os mesmos elementos presentes aqui na Terra, como o hidrogênio, sódio, magnésio, ferro etc. Na Tabela 1 apresentamos algumas características do Sol.

O Sol é, assim como outra estrela, uma grande “usina” termonuclear que transforma Hidrogênio em Hélio e que possui 99% de toda a energia do Sistema Solar.

Na sua fase atual o Sol possui 75% de sua massa formada por hidrogênio e 25% de hélio. Em termos de número de átomos 92,1% dele é formado por átomos de hidrogênio e 7,8% são átomos de hélio. Todos os outros elementos mais pesados do que o hélio, que chamamos coletivamente de "metais" representam apenas 0,1% da massa do Sol. No entanto, à medida que o hidrogênio vai sendo convertido em hélio na sua região central pelos processos de fusão da cadeia p-p esta relação percentual vai lentamente mudando ao longo do tempo (OBSERVATÓRIO NACIONAL, 2007, apud MENDES, 2006, p. 15).

Estima-se que o Sol possui 4,5 bilhões de anos de idade, ou seja, ele não foi feito do material de nucleossíntese primordial do universo (hidrogênio e hélio), mas sim de material reciclado. Esse material passou:

[...] alguns bilhões de anos em uma estrela que se tornou uma supergigante e explodiu como supernova, ejetando hidrogênio e hélio no espaço, juntamente com cerca de 3% de elementos mais pesados, como carbono, oxigênio, enxofre, cloro e ferro que tinham sido sintetizados no núcleo da supergigante, antes desta tornar-se uma supernova (KEPLER, 2013, s/p).

Tabela 1 – Algumas características físicas e químicas atuais do Sol.

CARACTERÍSTICAS	VALORES
Massa	$M_{\odot} = 1,9891 \times 10^{30} \text{ kg}$
Raio	$R_{\odot} = 6,963 \times 10^8 \text{ m}$
Densidade média	1408 kgm^{-3}
Densidade central	$1,6 \times 10^5 \text{ kgm}^{-3}$
Distância média da Terra	$1,496 \times 10^8 \text{ km}$
Luminosidade	$4 \times 10^{33} \text{ erg/seg}$
Temperatura efetiva	$T_{\text{ef}} = 5785 \text{ K}$
Temperatura central K	$T_c = 1,5 \times 10^7 \text{ K}$
Magnitude absoluta bolométrica	$M_{\text{bol}} = 4,72$
Magnitude absoluta visual	$M_V = 4,79$
Tipo espectral e classe de luminosidade G2 V	Tipo espectral e classe de luminosidade G2 V
Índices de cor	$B - V = 0,62$
	$U - B = 0,10$
Composição química principal (4) (5)	Hidrogênio = 74,9%
	Hélio = 23,8%
	Oxigênio = 1 %
	Carbono = 0,3 %
	Ferro = 0,2%
	Neon = 0,2%
Período rotacional no equador	25,1 dias
Período rotacional nos polos	34,3 dias
Campo Magnético	$\langle B_{\text{sol}} \rangle = 1 \text{ gauss}$

Fonte: NASA

O Sol assim como as estrelas tipo solar, começou sua vida a partir de uma nuvem molecular gigante (NMG) que depois se fragmenta em glóbulos e logo em seguida, formam uma protoestrela ($0,8 M_{\odot} < M < 3 M_{\odot}$) que irá se colapsar e formar a estrela que hoje nos dá vida (WOOD e ZARRO, 1981).

As teorias atuais dizem que o Sol, há 4,57 bilhões de anos atrás (ZIRKER, 2002, PP. 7-8), começou a se formar-se a partir de uma enorme nuvem escura de poeira e gás chamada de nebulosa pré-solar (IRVINE, 1983). A sua idade indica que ele não nasceu do material

primordial do universo (Hélio e Hidrogênio) mas sim de material reciclado de uma antiga supernova. Estima-se que uma estrela gigante vermelha se colapsou e formou uma supernova que por sua vez explodiu, ejetando hidrogênio e hélio no espaço, junto com cerca de 3% de elementos mais pesados, como carbono, oxigênio, enxofre, cloro e ferro que tinham sido sintetizados no núcleo desta supergigante (OLIVEIRA FILHO, e SARAIVA, 2014, p 248).

A Nebulosa Pré-Solar possui um protosol em seu centro e, ao seu redor, um disco de matéria de aproximadamente 200 UA⁷ (ZABLUDOFF, 2013), composto de pequenos fragmentos dispostos em raias. Esse disco de matéria, também chamado de disco de acreção⁸, foi aumentando sua taxa de rotação, devido à conservação do momento angular e as partes externas começaram a achatarse. A poeira concentrada em várias raias do disco de acreção irá formar os planetas, asteroides e outros corpos pequenos do sistema solar (OLIVEIRA FILHO, e SARAIVA, 2014).

A protoestrela (protosol) no centro do disco irá cada vez mais irradiar energia e se tornar cada vez maior ao passar do tempo (ZABLUDOFF, 2013). Depois de ser ejetado para o espaço, esse material, talvez por algum outro evento externo (ondas de densidade, explosões de supernovas vizinhas) teve sua densidade aumentada. Devido à colisão dos átomos no interior da nuvem, o Sol então começou a perder (emitir) radiação em forma de luz e calor para o espaço um processo irreversível - entropia (OLIVEIRA FILHO e SARAIVA, 2013).

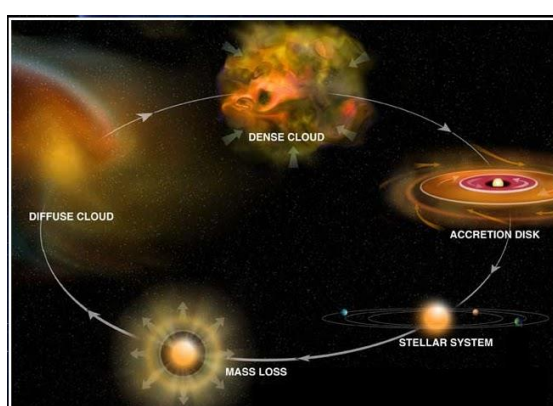


Figura 16 - Diagrama mostrando as diferenças fases da nuvem molecular até formar o Sol e todo o Sistema Solar. *Fonte: skatelescope.org*

⁷ UA: Sigla para Unidade Astronômica que equivale a 149.597.870.700 m ou a distância Terra-Sol

⁸ Disco de acreção é o nome dado à estrutura formada pela matéria difusa encontrada orbitando o corpo central que costumeiramente pode ser uma protoestrela, uma anã branca ou estrela de nêutrons.

Com o início das reações termonucleares em seu núcleo, o Sol começa sua vida como uma verdadeira estrela, aquecida pela oferta quase inesgotável de combustível nuclear contida em seu vasto interior.

Atualmente, o Sol está na fase de sequência-principal no diagrama HR. A maioria das estrelas do universo está nesta fase. “Nosso Sol ficará então nesta fase por cerca de 10 bilhões de anos” (ZEILIK e GREGORY 1998, p. 32).

De acordo com a Lei de Stefan Boltzman, a luminosidade (irradiância) de uma estrela varia de acordo com a variação de seu volume, da seguinte forma:

$$L = 4\pi r^2 \sigma T^4. \quad (7)$$

Onde σ é a constante de Stefan Boltzman ($\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$) e T é a temperatura da superfície.

As camadas externas se reajustam ao aumento de luminosidade expandindo-se e, como a área superficial aumenta, sua temperatura diminui. Dessa forma, a luminosidade aumenta e a estrela torna-se mais vermelha, aproximando-se do ramo das gigantes no diagrama HR (OLIVEIRA FILHO e SARAIVA, 2014, p. 262).

Daqui a 1,1 bilhão de anos, o Sol ficará 10% mais luminoso e causará um aumento de temperatura drástico para o planeta terra, evaporando toda a sua água, e conseqüentemente, toda a vida no planeta se esvairá (SCHRÖDER, 2008).

O Sol continuará a crescer e engolfará (absorverá) mercúrio (OBSERVATÓRIO NACIONAL, 2013e). Quando a temperatura do centro do sol atingir 100 milhões de K, e a reação triplo- α , descoberta pelo americano Edwin Ernest Salet (1925-2008), combinará três núcleos de hélio em um núcleo de carbono.

Logo depois, o Sol, agora como uma gigante vermelha, aumentará mais ainda seu raio, ejetando então 30% de sua matéria para o espaço. A estrela, agora com um raio de 250 U.A. terá feito o mesmo com Vênus e a Terra (SCHRÖDER, 2008). Estima-se que o vento solar provocado pela matéria ejetada, lançará os planetas para longe de sua órbita, mas não será suficiente para a Terra, por exemplo, ser engolida, por conta das forças de maré que a gigante vermelha irá provocar (PALMER, 2008).

A fusão de hélio irá sustentar-se por 100 milhões de anos. A massa do Sol não será suficiente para queimar o carbono em oxigênio (bilhões de K) e não explodirá em uma supernova. Ao invés disso, quando a estrela atinge 300 milhões de K, pulsações térmicas

farão com que o Sol se transforme em uma nebulosa planetária. Essa última durará apenas 10 mil anos (KWOK, 2000).

O objeto central dessa nebulosa, se compactou em uma anã branca. Esse objeto possui prótons e nêutrons tão densos que uma colher desse material pesa cerca de 1 tonelada terrestre. Por analogia, a densidade de uma anã branca equivale ao Sol, se este fosse diminuído no volume da Terra. Esse objeto resultante permanecerá assim por bilhões de anos até que se torne uma anã-negra, a fase final do Sol, no qual a anã-branca se tornou tão fria que nem emitirá mais sua luz. A anã negra permanecerá assim pelos próximos trilhões de anos (POGGY, 1997).

3. ESTRELAS GIGANTES, SUPERGIGANTES E ANÃS

Dos vários tipos de estrelas catalogadas até agora, destacam-se também as estrelas classificadas de acordo com o seu tamanho. Hertzsprung descobriu que estrelas da mesma cor podiam ser divididas entre luminosas, que ele chamou de gigantes, e estrelas de baixa luminosidade, que ele chamou de anãs (OLIVEIRA FILHO e SARAIVA, 2013).

Na Figura 10, temos o Diagrama H-R, apresentando as estrelas gigantes, supergigantes e anãs: As supergigantes, estrelas de classe de luminosidade Ia, estão logo no topo. Logo abaixo estão as gigantes bilhantes, da classe II. As gigantes da classe III, ficam logo abaixo, já as subgigantes, estrelas intermediárias de classe IV, logo acima da sequência principal. Finalmente podemos ver na parte inferior esquerda, as estrelas anãs-brancas, na classe V. Estrelas da sequência principal, como o Sol, podem ser consideradas anãs amarelas. Essa classificação foi desenvolvida em 1943, por Morgan, Kenan e Kellman, astrônomos do Laboratório de Yerkes (MORGAN et al, 1943).

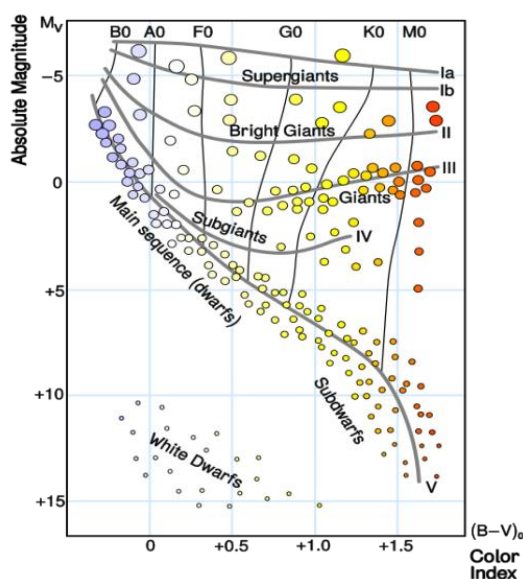


Figura 10 - Disposição das estrelas Gigantes, supergigantes, subgigantes e anãs, no Diagrama H-R. Esse gráfico é parametrizado com a magnitude absoluta, luminosidade e temperatura de superfície.

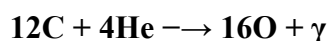
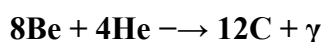
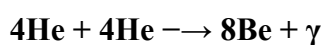
Fonte: Wikipédia Commons. Créditos: Rursus.

3.1 ESTRELAS GIGANTES

As estrelas gigantes são aquelas que já esgotaram seu hidrogênio de sua região central através dos processos termonucleares. Estima-se que apenas 1% das estrelas na vizinhança solar está na classe das gigantes e supergigantes. Nessa classe de estrelas, a geração de energia passa a ocorrer em uma camada em torno do núcleo (OLIVEIRA FILHO e

SARAIVA, 2013). O núcleo rico em hélio não possui temperatura suficientemente alta para transformá-lo em carbono, mas o hélio que está se formando nas camadas mais exteriores começam a cair em direção ao núcleo, incrementando sua massa total, daí, sua temperatura aumentará por conta da ação da gravidade, que irá colapsar mais rapidamente o núcleo até que ocorra a queima do hélio gerando, assim o carbono ($T \sim 10^8 K$). O momento que isso acontece é chamado de flash do hélio (SOBRINHO, 2013).

“A fusão do hélio ocorre em 3 passos com a formação de núcleos de oxigênio e de carbono e a libertação de raios gama” (SOBRINHO, 2013, p 5), são eles:



Conseqüentemente, suas camadas mais externas ao núcleo começam se expandir e arrefecem. Nisso, a estrela sai da Sequência Principal e passa para a fase de gigante vermelha⁹, aumentando seu raio e seu brilho (SOBRINHO, 2013). Como sua superfície é fria, seu comprimento de onda vai tender para o vermelho, emitindo essa cor em destaque, no visível. No Diagrama HR, dizemos que a estrela está no *Ramo Assimptótico das Gigantes* (AGB). (SOBRINHO, 2013)

A estrela possui no seu interior regiões ainda muito quentes. Em algumas delas a temperatura atinge 30000 K. Isto é suficiente para que bolhas de gás se desloquem para a superfície da estrela. Quando estes gases atingem a superfície da estrela, sua luminosidade aumenta muito, mais de 1000 vezes. “A temperatura da sua superfície é de, apenas, 4000 K. A estrela agora é vermelha, muito luminosa e muito grande, podendo ser mais de 200 vezes maior do que o seu tamanho original”. (OBSERVATÓRIO NACIONAL, 2013e, p. 1). Na Figura 11, apresentamos alguns exemplos de gigantes vermelhas, tais como Pollux, Arcturos e Aldebaran.

⁹ De acordo com a Lei de Wien, corpos com cerca de 4 mil kelvin emitem radiação vermelha, portanto, conveniu-se chamar estes corpos de gigantes vermelhas.

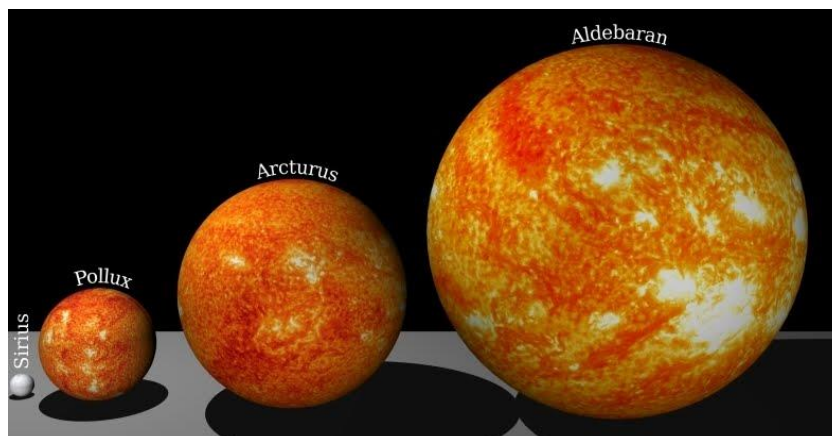


Figura 11- Exemplo de estrelas gigantes vistas à olho nu: Pollux, maior estrela da constelação de gêmeos. Arturus, maior estrela da constelação de Boeiro, e Aldebaran, maior estrela da constelação de Touro.
 Fonte: NASA, SOHO, JPL, Keck Observatory

Não podemos dizer que toda estrela que sai da fase de sequência principal, pode se tornar uma gigante vermelha. Esse processo depende de muitos fatores iniciais e um deles é a massa que a estrela tinha quando esta estava na fase de sequência principal (Figura 12). O “flash do hélio”¹⁰ ocorre apenas nas estrelas de menor massa. As estrelas de maior massa variam pouco em termos de luminosidade durante esta fase.

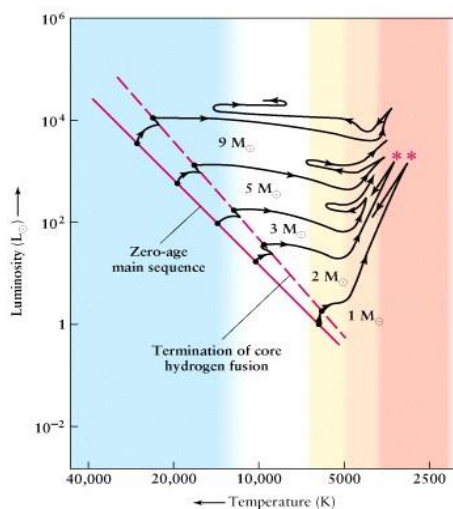


Figura 12 – Gráfico apresentado à evolução de uma estrela depois de deixar a fase de sequência principal.
 Fonte: Universidade Carolina do North – Physics UCN

Nas estrelas com menos de $0,8 M_{\odot}$, não chegam a fundir o seu hélio e a contração muito lenta do seu núcleo continuará. Sua temperatura central aumenta muito pouco. A superfície da gigante vermelha continua a expandir transformando-se numa estrela supergigante. Devido à sua pequena massa, a luminosidade da estrela é gerada pelo processo

¹⁰ Denomina-se *flash do hélio* a expansão violenta das camadas exteriores das estrelas de pequena e grande massas provocada pela fusão descontrolada do hélio no núcleo da estrela.

de convecção (OBSERVATÓRIO NACIONAL, 2013e). Devido ao seu processo de expansão contínua, a estrela não consegue manter o seu envoltório e o ejeta no espaço (OBSERVATÓRIO NACIONAL, 2013e). A estrela, então, se transformará em um objeto conhecido como nebulosa planetária¹¹ com um núcleo remanescente (OLIVEIRA FILHO e SARAIVA, 2013. p. 268).

O Sol, em um determinado período de sua evolução final, irá se tornar uma nebulosa planetária, irradiando matéria para o espaço. As nebulosas planetárias são um dos objetos mais admirados por astrônomos amadores e profissionais do mundo inteiro, por possuírem diversas formas e irradiarem diferentes cores (POGGY, 1997). Alguns exemplos de nebulosas planetárias estão apresentados nas Figuras 12, 13 e 14.



Figura 13 – Nebulosas planetárias: nebulosa olho de Gato, NGC 7662, NGC 7009, NGC 6829.
 Fonte: NASA/CXC/RIT/J.Kastner et al.; Optical: NASA/STScI .



Figura 14 - Nebulosas planetárias: NGC 2392 a nebulosa do esquimó.
 Fonte: NASA, ESA, Andrew Fruchter (STScI), and the ERO team (STScI + ST-ECF)¹².



Figura 15 - A Nebulosa de Hélix.

¹¹ O termo “planetária” não tem relação alguma com os planetas. A origem do termo data do século XVIII, onde os astrônomos, quando as observaram pela primeira vez, assemelhavam-nas com planetas gigantes, vistos através dos telescópios da época.

¹² Disponível em: <http://www.spacetelescope.org/images/html/hec9910a.html>.

Fonte: NASA, ESA, e C.R. O'Dell.

A Nebulosa planetária é o resultado da expulsão de cerca de metade do material estelar (gás) em que o centro que restou da estrela, praticamente exposto enquanto o gás estelar espalha-se para todas as direções (SOBRINHO, 2013)

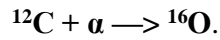
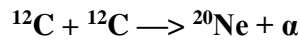
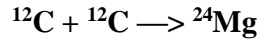
Este núcleo, bastante quente (100000 K), tem o seu pico de emissão na banda do UV. Esta radiação acaba por ionizar os átomos da nebulosa, os quais, por sua vez, acabam por reemitir a radiação absorvida em comprimentos de onda mais longos, essencialmente na banda do visível. (SOBRINHO, 2013, p 13-14).

Só na nossa galáxia, existem cerca de 3000 nebulosas planetárias (PARKER, 2006). Com a velocidade de expansão de seu gás entre 10-30 km/s, estimasse que o seu tempo de vida é de 10000 anos até que ela ejete todo o seu material no Ramo Assimptótico das Gigantes (AGB). Depois disso, o que resta da nebulosa é apenas um núcleo remanescente chamado de anã-branca, o próximo estágio de evolução da estrela (PARKER, 2006).

3.2 ESTRELAS SUPERGIGANTES

Como já foi dito anteriormente, quando uma estrela possui massa $0,8 M_{\odot} < M < 3 M_{\odot}$, como é o caso do Sol, seu núcleo de hélio sólido se fundirá em carbono, no processo triplo-alpha. Cada reação triplo-alpha libera aproximadamente 7,5 eV de energia, criando uma reação em cadeia expandindo violentamente o hélio (flash de hélio). A estrela agora se tornou uma supergigante vermelha com núcleo de carbono sólido e sai do Ramo das Gigantes Vermelhas (RGB) entrando agora no Ramo Assimptótico das Gigantes (AGB). A supergigante vermelha, por exemplo, será uma das fases de evolução do Sol.

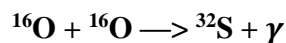
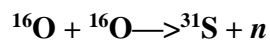
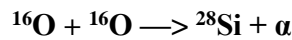
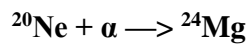
As estrelas supergigantes são tidas como as mais massivas que existem e ocupam a parte superior do diagrama HR. Possuem entre 8 e 12 massas solares e seu brilho, entre 30.000 até centenas de milhares de vezes a luminosidade solar. Seu raio, por sua vez, varia entre 30 até 1000 raios solares. Estrelas entre $3 M_{\odot} < M < 10 M_{\odot}$, fazem o mesmo processo de queima de hélio em um núcleo de carbono, mas nesse tipo de estrela, o núcleo continua a colapsar com temperatura acima de 10^9 K, temperatura suficiente para fundir o carbono no núcleo de acordo com a reação:



Nesse caso o núcleo de carbono se torna sólido e expande-se no chamado “flash de carbono” com uma temperatura gigantesca de 10^{120} K (OBSERVATÓRIO NACIONAL, 2013e).

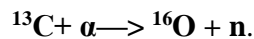
Se a estrela tem entre $10 M_{\odot}$ e $20 M_{\odot}$, ela evolui gradativamente em vários estágios de queima com produção de vários outros elementos químicos. Elas não passam por explosões violentas, mas o núcleo passa por suscetíveis reações formando os elementos seguintes dispostos em camadas (OBSERVATÓRIO NACIONAL, 2013e).

O próximo passo, quando todo o elemento do núcleo for consumido, a contração gravitacional transfere as reações termonucleares para um próximo anel em torno do novo núcleo. Outra contração do núcleo faz com que a temperatura nesta região aumente e seja iniciado o próximo estágio de fusão nuclear. A temperatura do núcleo sobe para 1.5×10^9 K, temperatura suficiente para a fusão do oxigênio em neônio, formando por sua vez, silício, enxofre, fósforo e magnésio (SARAIVA, 2013).



Onde o α representa uma partícula alpha, o n , *um nêutron*, o p^+ , um próton, e γ , uma partícula gama.

Para estrelas entre $20 M_{\odot}$ e $25 M_{\odot}$, o núcleo se colapsa a temperaturas na faixa de $2,7 \times 10^9$ K, suficiente para a queima do silício, no qual resulta em uma variedade de outros elementos, do enxofre até o ferro (SOBRINHO, 2013), representado pela reação:



Onde o e^+ representa um pósitron, enquanto o ν , representa um neutrino.

Durantes essas reações nucleares, um grande número de nêutrons é produzido. Os nêutrons, por não terem carga elétrica, têm facilidade de agregar-se a outros núcleos, dando origem a outros isótopos dos elementos que já foram formados. Mas, esses núcleos de nêutrons são bastante instáveis e decaem em estados de menor energia (OBSERVATÓRIO NACIONAL, 2013e).

Com a contínua queima e, devido à diferença de massa dos diferentes elementos, forma-se uma espécie de “cebola” (Figura 16), onde cada camada da estrela é composta por um elemento. Como o ferro é o elemento mais pesado formado, ele formará o núcleo dessa estrela, seguido dos demais elementos como visto na Figura 16 (OBSERVATÓRIO NACIONAL, 2013e). Da parte externa para o núcleo da estrela massiva, temos elementos cada vez mais pesados e temperaturas mais elevadas.

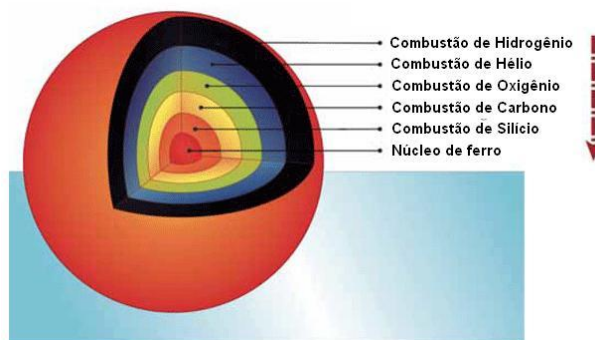


Figura 16 - Estrutura de conchas concêntricas formadas pelos elementos, assemelhando-se a uma cebola..
Fonte: http://francisco-scientiaestpotentia.blogspot.com.br/2010_04_01_archive.html

Esse processo de formação dos elementos nas estrelas é chamado de Nucleossíntese Estelar, onde se sintetizam todos os elementos estáveis pesados, incluindo o ferro-56 e níquel-62. Ao atingir esse estágio, a estrela irá ter pressão suficiente para vencer a gravidade, expandindo mais ainda suas camadas exteriores e tornando-se finalmente uma supergigante vermelha. Os núcleos de ferro dessas supergigantes irão colapsar e os demais elementos são produzidos na explosão de Supernovas. Após a fase de Supergigante ela ejeta a maior parte de sua massa em uma explosão de supernova e terminar a sua vida como uma estrela de nêutrons:

[...] com uma temperatura superficial acima de 1 milhão de graus K, massa de cerca de 1,4 M Sol, e raio de cerca de 20 km. Se essa estrela possuir campo magnético forte, ela emitirá a luz direcionada em um cone em volta dos polos magnéticos, como um farol, e será um pulsar. (KEPLER, 2013, p.261).

Quando a massa do núcleo supera o limite de Chandrasekhar¹³ ($1,44 M_{\odot}$), a pressão de degeneração de elétrons será insuficiente para suportar o peso devido à força da gravidade, e o núcleo de ferro se colapsará, formando uma estrela de nêutrons ou no caso, se o núcleo de ferro exceder o limite de Tolman-Oppenheimer-Volkoff (entre $1,5$ e $3,0 M_{\odot}$) formará um buraco negro, no caso de estrelas com massa inicial maior que $25 M_{\odot}$ (BOMBACI, 1996).

Algumas das mais conhecidas supergigantes que podem ser vistas todas as noites a olho nu, como por exemplo, Betelgeuse (α Orioni), na constelação de Órion e a Antares (α Scorpii), estrela mais brilhante da constelação de Escorpião (OLIVEIRA FILHO, 2014). A Figura 17 apresenta uma comparação em escala real das duas estrelas com as demais gigantes vermelhas e o Sol (apenas um ponto na imagem).

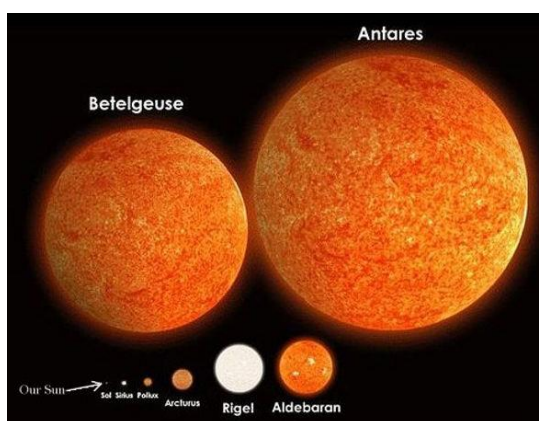
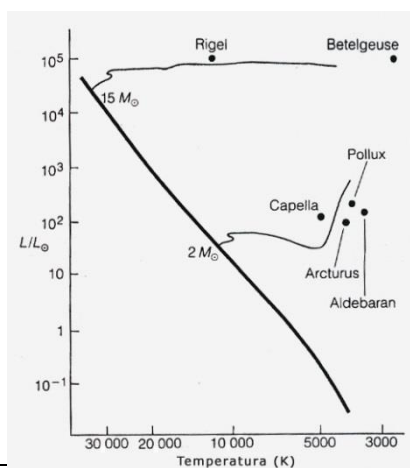


Figura 17 - Diagrama de comparação entre o tamanho das estrelas gigantes, supergigantes e o Sol.
Fonte: kahuakai.weebly.com.

No diagrama da Figura 18 apresenta como estão dispostas, no diagrama H-R, algumas estrelas supergigantes (Rigel e Betelgeuse) e gigantes (Aldebarã, Capella, Pollux).



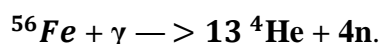
¹³ Esse é o limite de Chandrasekhar, publicado em 1942, pelo brasileiro Mário Schenberg (1914-1990) e pelo indiano Subrahmanyan Chandrasekhar (1910-1995) e corresponde ao ponto da evolução de uma estrela em que o balanço de pressão no núcleo isotérmico não pode ser mais alcançado (Oliveira Filho & Maria de Fátima, 2014, p. 292).

Figura 17 - Diagrama H-R com as estrelas gigantes e as supergigantes.
 Fonte: *Observatório Nacional (2013e)*.

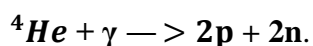
3.2.1 As Supernovas

Nas estrelas pequenas, como massa inferior a $10 M_{\odot}$, como o nosso Sol, ao final de suas vidas, saem da sequência principal e anãs-brancas rodeadas por uma nebulosa planetária. Nas estrelas grandes, com massa superior a $10 M_{\odot}$, suficiente para fazer com que a gravidade produza temperaturas maiores que 10^8 K, capaz de provocar a fusão de átomos de neônio e de silício, que produzem núcleos de Fe^{56} . Os processos de degeneração de ferro, junto com o níquel são a ponte entre a fusão nuclear e a fissão nuclear, por possuírem maior energia de ligação (FEWEL, 1955). A energia de ligação por núcleon do átomo de ferro ao invés de produzir energia, a consome (TIPLER e LLEWELLYN, 2006).

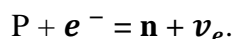
Neste caso, quando ocorre a queima de núcleo de ferro, as reações termonucleares deixam de ocorrer, fazendo com que a gravidade se acelere e aqueça o núcleo até ultrapassar 10^9 K, temperatura suficiente para desintegrar os átomos de ferro, produzindo átomos de hélio e nêutrons e raios gama de alta energia (TIPLER e LLEWELLYN, 2006). A reação abaixo ocorre em uma estrela Supergigante:



Os fótons irão desintegrar os elementos que foram produzidos por várias etapas de produção de nucleossíntese no processo chamado fotodesintegração (OBSERVATÓRIO NACIONAL, 2013e). Esse processo é extremamente rápido (cerca de frações de segundos) (SOBRINHO, 2013). Os núcleos de hélio também se desintegram, consumindo também grandes quantidades de energia:



Os prótons produzidos na reação acima se combinam com elétrons no núcleo, para formar nêutrons, ou seja:



Onde o e^{-} representa um elétron.

O que acontece a seguir origina um dos eventos cataclísmicos mais impressionantes do universo: a envoltória da estrela (gases que não pertencem ao núcleo) expande-se violentamente e rapidamente (Figura 19), gerando um evento astrofísico chamado de supernova (TIPLER e LLEWELLYN, 2006). Na Figura 19, tem-se que cada camada está processando a nucleossíntese, exceto o inerte núcleo de ferro que permanece estável crescendo até atingir a massa limite de Chandrasekhar.

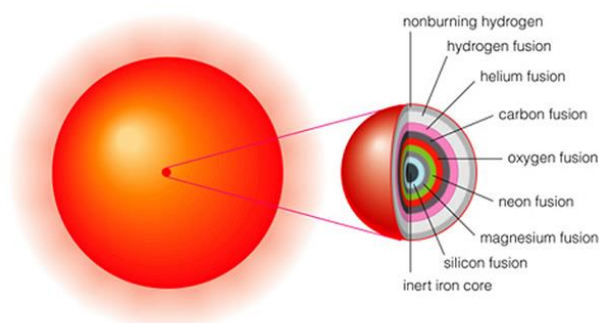


Figura 19- Camadas de uma estrela massiva prestes a tornar-se uma supernova.

Fonte: <http://astronomy.nmsu.edu/tharriso/ast110/class19.html>

Neste processo, liberam-se cerca de 10^{46} J de energia em forma luminosa e cinética – praticamente, o que o Sol produzirá durante a sua vida (SOBRINHO, 2013). Aproximadamente 96% de toda a massa da estrela é expelida para o espaço. As supernovas são eventos extremamente raros, mas igualmente importantes, uma vez que a energia liberada no processo produz os demais elementos mais pesados, como o urânio, ouro, zinco, cobre e prata. Os seres vivos da Terra – incluindo claro, nós - por exemplo, só existiriam um dia por que um dia uma supernova deu origem aos elementos que hoje compõem o nosso sistema solar e, conseqüentemente, deu origem à Terra e tudo que existe nela, inclusive os seres vivos, embora algumas pesquisas atuais apontem para a origem

Ao atingir a luminosidade máxima $10^9 L_{\odot}$, a supernova poderá ofuscar o brilho de toda a galáxia na qual ela se encontra. Em 23 de fevereiro de 1987, astrônomos de todo o mundo tiveram a chance de observar uma supernova, distante a apenas 170.000 anos-luz, na grande nuvem de Magalhães. A supernova denominada SN1987A (Figura 20), foi a mais recente que pôde ser visível a olho nu desde que Kepler e Galileu observaram outra supernova, em 1604. Também foram registradas observações de supernovas por astrônomos chineses, em 1006 e 1054 (Figura 21), esta última, visível até hoje na forma da nebulosa de

Caranguejo (SOBRINHO, 2013; OLIVEIRA FILHO e SARAIVA, 2014; TIPLER e LLEWELLYN, 2006).



Figura 20 - Impressão artística dos anéis em torno de SN1987A.
 Fonte: Imagem: ESO/L Calçada.

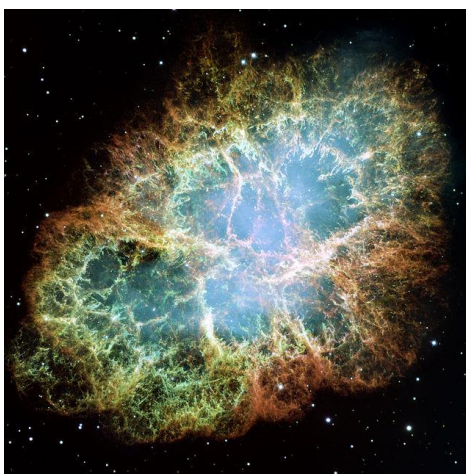


Figura 21 - A Nebulosa do Caranguejo (Messier-1, NGC 1952, Taurus A), foi o resultado da Supernova observada por astrônomos chineses e árabes e nativos americanos em 1054.
 Fonte: NASA, ESA, J. Hester and A. Loll (Arizona State University) - HubbleSite: gallery

3.2.2 Os tipos de Supernovas

Existem dois tipos de SN: as do tipo I e tipo II. Por definição, as SN do tipo I, não possuem linhas de hidrogênio em seu espectro, quando analisadas. Estima-se que elas se formam através de colapsos de anãs brancas, quando estas atingem o limite de Chandrasekhar (1.44 M sol), ela se colapsará, formando uma supernova do tipo I. Elas subdividem-se em três outras subcategorias (SOBRINHO, 2013):

1. *Supernovas Ia*: apresentam em seu espectro eletromagnético uma linha de absorção do silício bastante forte.
2. *Supernovas Ib*: não possuem linhas de silício, porém apresentam uma risca de absorção de hélio;

3. *Supernovas Ic*: não possuem nenhuma linha de absorção de silício ou de hélio em seu espectro.¹⁴

O segundo tipo de supernova é a supernova tipo II, que são resultado de uma explosão de estrelas de massa intermediária ou de grande massa, assim como as SN tipo Ib e Ic. A diferença entre elas, é que, no caso do tipo Ib e Ic, as estrelas mãe perderam suas camadas mais exteriores antes da explosão (SOBRINHO, 2013).

3.3 ESTRELAS ANÃS

Como as estrelas variam em tamanho e brilho, tem-se que as mais pequenas denomina-se anãs. Assim como as maiores tem a descrição de gigantes. As estrelas anãs são um grupo característico de estrelas ao qual a maioria das estrelas conhecidas pertence. A característica deste grupo é que o processo majoritário de produção de energia é a fusão de prótons (núcleos de hidrogênio) em uma reação chamada próton-próton. A seguir apresentaremos as estrelas anãs brancas, negras, vermelhas e marrons.

3.3.1 Anãs brancas.

Estrelas com massa menor que $8 M_{\odot}$, em seus estágios finais, formam uma nebulosa planetária, cujo núcleo degenerado forma um objeto compacto com massa de até $1,44 M_{\odot}$, conhecida como anã branca (Figura 22), devido a sua cor em destaque. Embora as nebulosas planetárias sejam o principal canal para o surgimento das anãs-brancas, existem estrelas que passam diretamente para o ramo das horizontais e estrelas binárias interagentes que geram anãs brancas (OLIVEIRA FILHO, 2014).

No processo de formação, o objeto remanescente da nebulosa planetária, que irá originar a anã branca, à medida que estas reações se extinguirem, a luminosidade da estrela compacta irá também diminuir. Quando não existirem mais reações termonucleares em seu interior, não existirá então uma pressão para fora e a gravidade faz com que o objeto se contraia. Nesse momento, a pressão de degeneração dos elétrons¹⁵, é a única coisa que faz com que a anã-branca se colapse (OBSERVATÓRIO NACIONAL, 2013d). Quando a pressão

¹⁴ Após 1985, as Supernovas foram classificadas a partir da análise espectroscópica, revelando a existência de diferentes elementos em sua composição. Por exemplo, as linhas de absorção de silício nas SN tipo Ia indicam que ainda contém silício em seu envoltório.

¹⁵ Quando uma certa quantidade de elétrons ocupa mesmo estado quântico ou uma mesma posição no espaço, o *Princípio De Exclusão De Pauli* faz com que estes tenham diferentes níveis de energia. O resultado é uma pressão emergente que é chamada de *Pressão De Degeneração Dos Elétrons*.

de degeneração dos elétrons iguala a pressão e a gravidade, a estrela então deixa de se contrair.

As anãs brancas típicas têm temperatura entre 150 000 K e 3700 K, luminosidades entre $3 \geq \log L=L_{\odot} \geq -4,5$ (OLIVEIRA FILHO e SARAIVA, 2014), raio de 10^9 m (da mesma ordem da Terra) e densidade na ordem de 5×10^9 g/cm³ (OBSERVATÓRIO NACIONAL, 2013a). Para termos uma ideia, uma moeda feita do material de uma anã branca, teria uma massa de cerca de 200 kg (OBSERVATÓRIO NACIONAL, 2013a).

Aproximadamente 10% das estrelas pertencentes à nossa galáxia são estrelas anãs brancas, e 98% de todas as estrelas que já saíram da sequência principal são anãs brancas (OLIVEIRA FILHO e SARAIVA, 2014).

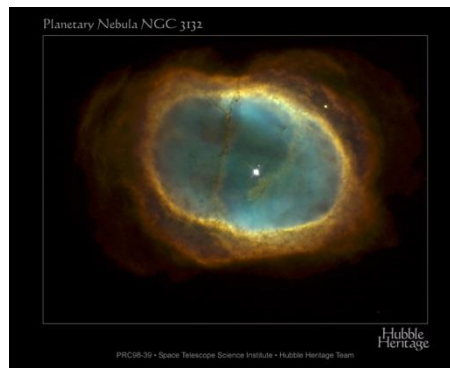


Figura 22 - Nebulosa planetária NGC3132, no centro podemos ver uma anã branca.
 Fonte: Hubble, NASA Hubble images of nebulae.

A primeira anã branca descoberta foi o sistema triplo 40 Eridani, que contém o par 40 Eridani B/C, foi descoberto por William Herschel, em 31 de janeiro de 1783. Outra anã branca bem conhecida é Sirius B, a estrela companheira de Sírius A - a estrela mais brilhante do firmamento - descoberta em 1844 por Friedrich Wilhelm Bessel. O maior contribuinte nas pesquisas teóricas das anãs brancas foi o astrofísico indiano Subramanyan Chandrasekhar (OLIVEIRA FILHO, 2014).

A teoria desenvolvida por Chandrasekhar e que hoje sabemos ser correta nos diz que: “Se uma estrela central de uma nebulosa planetária tem massa menor do que 1,4 massas solares ela evolui, tornando-se cada vez mais degenerada e finalmente se estabiliza como uma estrela anã branca.” (OBSERVATÓRIO NACIONAL, 2013d, p. 2).

3.3.2 Anãs Negras

Por não terem mais processos térmicos, a estrela anã branca irá se extinguir aos poucos, ficando cada vez menos luminosas. Quando isto acontece, a anã branca torna-se invisível, formando um objeto chamado anã negra.

As anãs negras são objetos hipotéticos. Nenhuma estrela no universo atingiu esse estágio, embora o Sol alcançará um dia este estágio, se tornando uma estrela fria, daqui a 5 bilhões de anos (TIPLER e LLEWELLYN, 2006).

3.3.3 Anãs Vermelhas

As anãs vermelhas são estrelas relativamente pequenas e frias do tipo espectral K ou M e, apesar do nome desconhecido, são os objetos mais comuns nas galáxias do universo, porém, devido a sua pouca massa, e, conseqüentemente, baixas temperatura e luminosidade, não são observadas no espectro visível (ADAMS et al., 2004). Mesmo as maiores anãs vermelhas (por exemplo, HD 179930, HIP 12961 e Lacaille 8760) têm apenas cerca de 10% da luminosidade do Sol (CHABRIER et al., 1996). Na Figura 23, apresentamos o diagrama HR, observamos que elas se encontram no canto inferior direito, praticamente no início da sequência principal.

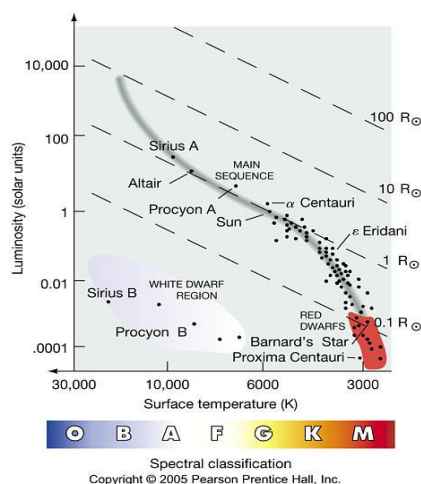


Figura 23 – Diagrama H-R: as estrelas anãs vermelhas encontram-se no canto inferior direito. *Fonte: Imagem: Pearson Prentice Hall, Inc¹⁶.*

As massas de estrelas anãs vermelhas variam desde $0,075 M_{\odot}$ (massa limite para se tornar uma anã marrom), até $0,5 M_{\odot}$. Na evolução de uma estrela anã vermelha, quanto

¹⁶ Disponível em http://www2.astro.psu.edu/users/cpalma/astro1h/Images/FG10_13.JPG

menor for a sua massa, maior será seu tempo de vida e em mais tempo ela cruzará a sequência principal do diagrama H-R. Estima-se que anãs vermelhas com massa de limite inferior de $0,08 M_{\odot}$, ficarão 12 trilhões de anos na sequência principal (ADAMS, et al., 2004).

A estrela mais próxima do Sol, a Próxima Centauri (Figuras 24 e 25), é uma estrela anã vermelha de classe M5, assim como outras 20 estrelas mais próximas (KERVELLA e THEVENIN, 2003).



Figura 24 - Imagem de Próxima Centauri tirada pelo telescópio Espacial Hubble.
Fonte: ESA/Hubble & NASA - <http://www.spacetelescope.org/images/potw1343a/>.

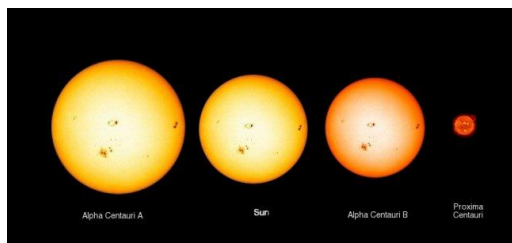


Figura 18 – Comparação do Sol com a Próxima Centauri (última da esquerda para a direita).
Fonte: <http://www.fenoticias.com.br/wp-content/uploads/Alpha-Centauri.jpg>

3.4.4 Anãs Marrons

Esse tipo de objeto estelar é formado de plasma e composto em sua grande maioria, de hidrogênio e Hélio, e uma pequena parte de lítio, deutério e outros elementos (Figura 26). Sua massa encontra-se entre 13 e 75 Mj (massas de Júpiter). Apesar do nome, sua coloração é fraca e avermelhada, ou magenta (BURGASSER, 2008) no espectro, embora elas sejam melhores vistas em infravermelho. Atualmente, a União Astronômica Internacional considera um objeto com uma massa superior a massa crítica de fusão termonuclear do deutério

(atualmente calculada em 13 massas de Júpiter para objetos de metalicidade solar¹⁷) como sendo uma anã marrom, enquanto um objeto que possui massa inferior a 13 M_J (e em órbita de uma estrela ou um remanescente) estelar é considerado um planeta (WGESP, 2014).

As anãs marrons ou anãs castanhas são objetos subestelares que não iniciaram a fusão de hidrogênio em seu núcleo e não tem massa suficientemente grande para ser uma estrela, porém possui massa superior a de um planeta gasoso, sendo então considerada uma estrela “fracassada” (BOSS, 2006, s/p.).

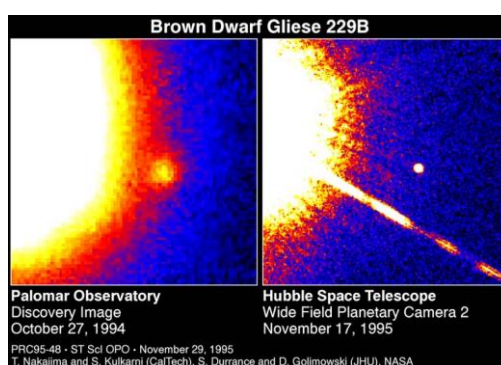


Figura 19 - Esta anã marrom (objeto menor na foto) orbita a estrela Gliese 229, que está localizada na constelação do Lobo a cerca de 19 anos-luz da Terra. Esta anã marrom, batizada de Gliese 229B, possui cerca de 20 a 50 vezes a massa de Júpiter.

Fonte: Caltech, Nasa.

¹⁷ A **metalicidade** é o índice que indica a proporção de elementos diferentes do Hélio e Hidrogênio em objetos no Universo. Por conveniência, quaisquer elementos que não sejam He e H, são considerados “metais”. Por exemplo, estrelas com metalicidade solar contém C e O em sua composição.

4. ESTRELAS VARIÁVEIS, DUPLAS E COLAPSADAS

Dentre as inúmeras classes e tipos de estrelas, existem certas categorias que se destacam no estudo estelar, por possuírem certas características físicas distintas e marcantes e são os maiores alvos de estudo dos astrofísicos estelares na atualidade. As estrelas variáveis, como o próprio nome diz, variam seu brilho em determinados períodos de tempo. As Estrelas Duplas, ou Binárias, são estrelas que possuem um par e que giram em torno de um centro de massa comum (baricentro). Geralmente o par de estrelas duplas é composto de uma estrela maior (primária) e uma estrela menor (secundária). Já as estrelas colapsadas, são objetos de grande massa que já estão em seu estágio final de evolução e que, por ação da gravidade, se colapsaram e formaram outros objetos estelares, alvo dos maiores mistérios atuais da astrofísica. Entre eles, temos os buracos negros, os pulsares, os *magnetares* e as estrelas de nêutrons. No apêndice apresentamos os instrumentos para a observação das estrelas.

4.1 ESTRELAS VARIÁVEIS

Existem certos tipos de estrelas que, ao deixarem a sequência principal em direção ao ramo das gigantes, não permanecem paradas nesta faixa. Elas apresentam uma peculiaridade na qual ficam se movendo para frente e para trás na região do ramo das gigantes, mais especificamente, na chamada “instability strip” ou faixa de instabilidade. Quando uma determinada estrela cruza esta faixa, ela fica instável e muda periodicamente seu brilho/magnitude e tamanho durante horas ou anos, Elas são chamadas apropriadamente de estrelas variáveis (OLIVEIRA FILHO, 2011).

As estrelas variáveis são aquelas em que a variação não representa apenas as flutuações normais de grandes conjuntos de partículas em movimentos turbulentos, mas apresentam amplitudes mensuráveis com certo grau de regularidade¹⁸ (OBSERVATÓRIO NACIONAL, 2013f).

Esta variação se dá tanto por fatores intrínsecos (contração de camadas externas, explosões), quanto extrínsecos (eclipses em sistemas estelares binários). As estrelas variáveis pulsam devido à presença de camadas absorvedoras de energia nas camadas mais externas da estrela, regiões onde o H e o He estão parcialmente ionizados. Estas camadas possuem uma

¹⁸ Em outras palavras, a característica de “variável” está intrinsecamente não só a flutuação de seu tamanho ou magnitude, mas também ligada à amplitude periódica e regular observada em diagramas.

característica de absorverem energia quando se comprimem e liberam energia, quando se expandem. Quando estas camadas se aproximam da superfície da estrela, ela oscila devido às diferenças de forças entre a gravidade e a pressão, que contrabalançam a estrela em tempos determinados, devido à pulsação da mesma e as constantes mudanças no ponto de equilíbrio térmico. Todas as estrelas que estão na faixa de instabilidade, pulsam, pois elas possuem zona de ionização e estão no lugar certo no Diagrama HR (OBSERVATÓRIO NACIONAL, 2013f).

A teoria sobre a existência de estrelas variáveis se deu pelo astrônomo o astrônomo inglês Sir Arthur Stanley Eddington por volta de 1920, em que estipulou sobre a hipótese de contração das estrelas, em seu trabalho “Sobre a Constituição Interna das Estrelas”. A teoria de Eddington foi comprovada com a descoberta da primeira Variável Cefeida, η Aql, em 1784, pelo astrônomo inglês Edward Pigott. Também, no mesmo ano, outro astrônomo inglês, John Goodricke, descobriu a variabilidade de brilho da estrela δ Cephei¹⁹, que passou a ser o protótipo da classe de variáveis cefeidas (OLIVEIRA FILHO e SARAIVA, 2014).

Outra grande contribuição no estudo das cefeidas se deu através da astrônoma americana Henrietta Swan Leavitt que aplicou o método fotográfico às cefeidas nas Nuvens de Magalhães, derivou a relação período de luminosidade. Esta relação foi usada por Hertzsprung, em 1913, para a primeira determinação da distância da pequena nuvem, e por Hubble em 1923 para a determinação da distância de Andrômeda (OLIVEIRA FILHO e SARAIVA, 2014). Com esta relação, Leavitt desenvolveu uma lei de luminosidade e período, elaborando assim um diagrama período-luminosidade. Com isso, pode-se calcular a distância de uma Cefeida. A Figura 27 é um exemplo de um diagrama período-luminosidade de uma estrela Cefeida.

¹⁹ Cephei, ou Cefeu, era o herói da mitologia grega, que dá o nome da constelação onde a estrela foi encontrada e por sua vez também nomeou a classe de estrela variável Cefeida.

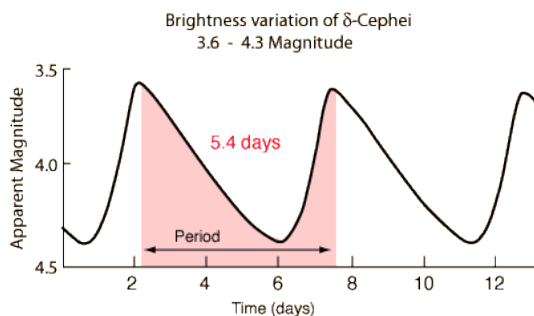


Figura 27 – Gráfico do período-Luminosidade/magnitude.
 Fonte: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/astro/imgast/cephd.gif>

As estrelas variáveis são subdivididas em categorias ou grupos, de acordo com o “Combined General Catalogue of Variable Stars” (OLIVEIRA FILHO e SARAIVA, 2014; OBSERVATÓRIO NACIONAL, 2013f; ANDRADE et al. 2000), como:

- Estrelas Binárias Eclipsantes;
- Estrelas Variáveis Pulsantes;
- Estrelas Variáveis Eruptivas;
- Estrelas Binárias Rotacionais;
- Estrelas Variáveis Cataclísmicas;
- Fontes de raios-x variáveis.

A Figura 28 apresenta alguns tipos de estrela variáveis e suas respectivas localizações no Diagrama HR:

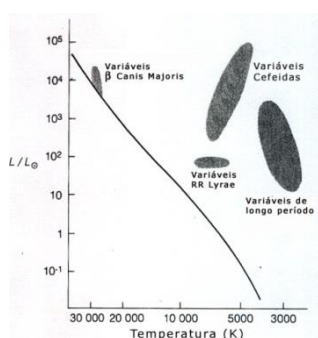


Figura 28 - Disposição das estrelas variáveis no Diagrama HR.
 Disponível em http://www.on.br/ead_2013/site/conteudo/cap20-estrelas-variaveis/variaveis.pdf

Das estrelas variáveis pulsantes, merecem destaque dois tipos: As Variáveis Cefeidas tipo I, Variáveis Cefeidas tipo II e as Variáveis RR Lyrae. As Cefeidas tipo I, ou δ Cephei, são estrelas ricas em núcleos pesados (metais), já as Cefeidas do tipo II, ou W Virgins, são

estrelas pobres em metais (OLIVEIRA FILHO e SARAIVA, 2014; OLIVEIRA FILHO, 2011). Esses tipos de cefeidas são supergigantes de tipo espectral F, G ou K, que pulsam com períodos de até 100-135 dias (OLIVEIRA FILHO e SARAIVA, 2014) e têm amplitudes de 0.1 a 2 magnitudes (OLIVEIRA FILHO, 2011). Existem algumas variáveis do tipo II podem variar suas magnitudes de 4,3 a 3,4 no período de apenas 5,4 dias (OLIVEIRA FILHO, 2011).

Variáveis do tipo RR Lyrae são estrelas de baixa massa, que ocupam a parte inferior da faixa de instabilidade, muitas vezes denominadas como cefeidas de curto período. Seu protótipo de estudo foi à estrela RR na constelação de Lyra. Esse tipo de estrela possui como características uma luminosidade em torno de $100 L_{\odot}$, períodos de pulsação pequeno (entre 0,1 e 1,2 dias) e com amplitudes de magnitude no visível, entre 0,5 e 2,0 (ANDRADE et al., 2000). Como elas possuem uma luminosidade conhecida, elas são indicadores de distância para aglomerados globulares.

4.2 ESTRELAS DUPLAS

Estrelas duplas²⁰ ou binárias (Figura 29) é um sistema que consiste em duas estrelas que orbitam um centro de massa comum (baricentro). Quando duas ou mais estrelas constituem esse sistema, eles são chamados de Sistemas Múltiplos de Estrelas. Nesse sistema, a estrela de maior massa é chamada de estrela principal e a estrela de menor massa é chamada de estrela secundária ou estrela companheira.



Figura 29 - A estrela Dupla Mizar, primeira a ser vista 'por um telescópio. Cortesia: George Kristiansen.
Fonte: <http://www.narit.or.th/en/files/2013JAHHvol16/2013JAHH...16...81T.pdf>

Em astrofísica, os estudos de estrelas binárias são de grande importância, uma vez que através deles podemos encontrar alguns parâmetros físicos estelares, tais como, massa,

²⁰ O termo Estrelas duplas pode se referir à Estrela Dupla óptica: duas estrelas que estão aparentemente juntas do ponto de vista de um observador, porém estão distantes umas das outras (HEINTZ, 1978).

luminosidade, período de rotação, distâncias, temperatura superficial entre outros, incluindo a relação empírica de massa-luminosidade, pelas quais estrelas individuais são estimadas. Esses parâmetros, no entanto, dependem de vários métodos observacionais e do tipo de estrela binária na qual o sistema é composto (OLIVEIRA FILHO, 2007).

4.3 ESTRELAS COLAPSADAS

Em astrofísica, chama-se de colapso, qualquer evento onde a matéria estelar sofre transformações termodinâmicas causadas pela ação da gravidade. Esses eventos fazem parte do ciclo das estrelas e são fundamentais para a formação dos mais misteriosos objetos do universo, as chamadas estrelas colapsadas, entre elas os buracos negros, as estrelas de nêutrons e os pulsares, descritas a seguir.

4.3.1 Estrelas de Nêutrons

Em uma Supernova, quando o material remanescente em seu núcleo, supera o limite de Chandrasekhar ($1,44 M_{\odot}$), (TIPLER e LLEWELLYN, 2006) a pressão de degeneração de elétrons será insuficiente para manter-se como uma anã-branca e não irá suportar o peso devido à força gravitacional, e o núcleo de ferro se colapsará em altíssimas pressões (SOBRINHO, 2013), fazendo com que os elétrons reajam com os prótons, dando origem aos nêutrons (decaimento beta inverso) e emitindo um *anti-neutrino*, que irá escapar quase livremente emitindo energia para fora. Nesse processo, é formado um objeto composto exclusivamente por este material: as *estrelas de nêutrons* (TIPLER & LLEWELLYN, 2006).

A existência das estrelas de nêutrons foi proposta inicialmente em 1932, pelo físico russo Lev Davidovich Landau (Figura 30) e dois anos depois, Walter Baade e Fritz Zwicky (OLIVEIRA FILHO e SARAIVA, 2014), em um artigo de 1934, em que eles postularam um objeto de maior densidade que as anãs brancas. Eles também propuseram que supernovas originavam as estrelas de nêutrons.

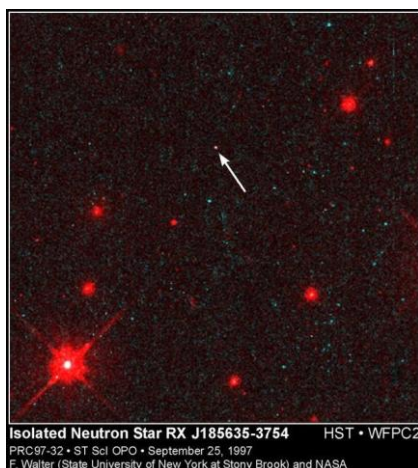


Figura 30 - A primeira observação direta de uma estrela de nêutrons em luz visível.
 Fonte: Fred Walter (Universidade Estadual de Nova York em Stony Brook) e NASA. Fonte: ST Sc

Em 1938, Julius Robert Oppenheimer, precursor do Projeto Manhattan para a construção da bomba atômica, e George Michael Volkoff publicaram um artigo mostrando, teoricamente, os limites máximos das massas das estrelas de nêutrons (OLIVEIRA FILHO e SARAIVA, 2014)

As estrelas de nêutrons (Figura 31) têm como características uma densidade na ordem de 10^{14} g/cm³ (na ordem da densidade dos nêutrons). Estrelas de nêutrons com $1 M_{\odot}$, possuirá um raio de $1,27 \times 10^4$ m = 12,7 Km (TIPLER e LLEWELLYN, 2006. P. 455). Sua crosta é cristalina e a força gravitacional de sua superfície é de 100 bilhões de vezes maior que a força gravitacional na superfície da Terra. A massa das estrelas de nêutrons, segundo teorias mais recentes, adentra entre $1,7 M_{\odot}$ e $3 M_{\odot}$. Estrelas acima dessa massa se condensariam a uma singularidade, um buraco negro (OLIVEIRA FILHO e SARAIVA, 2014). As estrelas de nêutrons têm atmosfera bem espessa, com vários micrometros de comprimento. Logo abaixo da atmosfera, encontra-se a crosta sólida, de 1,5 km de espessura. Seu núcleo é constituído principalmente de nêutrons densamente agrupados e outra parte constituída de prótons e um número igual de elétrons, em um estado como líquido conhecido como neutronium (TORRES et al., 2010).

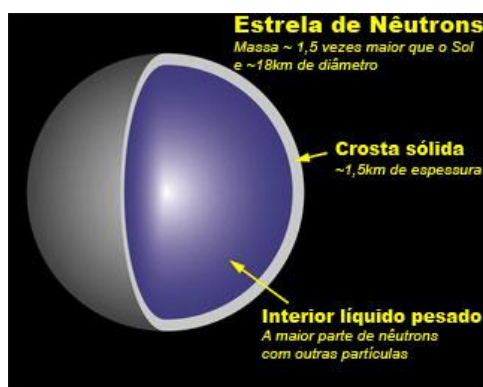


Figura 31 – Estrutura interna das uma estrela de nêutrons.
 Fonte: http://science.nasa.gov/newhome/headlines/sgr_slides/N_sctn2.jpg

Para fins análogos, uma colher de chá do material feito de uma estrela de nêutrons, pesaria aqui na Terra, cerca de 5 bilhões de toneladas (5×10^{12} kg), dando-nos uma ideia da assombrosa densidade desse tipo de estrela (DARLING, 2014).

4.3.2 Pulsares.

Em 1967, a aluna de doutorado, Jocelyn Bell Burned, da Universidade de Cambridge, iniciou seu projeto de pesquisa, orientado por Antony Hewish, que consistia inicialmente no estudo interestelar. Ao pesquisar algumas estrelas, Burned descobriu que certos pulsos de rádio chegavam com enorme precisão a cada 1,33728 segundos, vindos da constelação de Vulpecula - Raposa (OLIVEIRA FILHO e SARAIVA, 2014). Essa foi a descoberta do primeiro pulsar. No mesmo ano, em 1967, Franco Pacici havia sugerido que objetos como a nebulosa de Caranguejo e resíduos de supernovas, seriam estrelas de nêutrons que tinham como característica uma fonte de ondas de rádio (TIPLER e LLEWELLYN, 2006. p. 455).

Os astrônomos da época sugeriram que esses pulsos originavam das pulsações radiais das estrelas, mas foi Thomas Gold que propôs um modelo semelhante ao de Pacici e que poderia explicar a radiação encontrada por Burned e Hewish (GOLD, 1968). Thomas, calculando a radiação, descobriu que os pulsos radioativos na verdade vinham de uma estrela de nêutrons em rotação, denominada pulsar²¹ (OLIVEIRA FILHO e SARAIVA, 2014).

Segundo o modelo mais aceito, os pulsares são estrelas de nêutrons que possuem um elevado campo magnético no qual as radiações emitidas provêm de partículas carregadas e aceleradas pelas linhas deste campo magnético e pela rápida rotação da estrela (TIPLER & LLEWELLYN, 2006).

Um dos pulsares mais conhecido é o pulsar do Caranguejo (PSR B0531+21), localizado no centro da Nebulosa de mesmo nome (e que também é uma remanescente da Supernova SN 1054), foi descoberto em 1968. O pulsar também é um dos poucos que emite luz no visível (ZEILIK e GREGORY, 1998. p. 263). Seu feixe gira aproximadamente 30 vezes por segundo e é um dos períodos mais curtos que se conhece (TIPLER e LLEWELLYN, 2006. p. 455). A

²¹ O termo “pulsar”, por sua vez, não condiz com uma estrela que pulsa, mas sim com a variação da rotação da estrela, fazendo com que o feixe de radiação se torne periódico em relação a um observador.

Figura 32 apresenta uma sequência de imagens feitas com um Photon-Counting Camera (KPCA), o que permitiu uma resolução no visível no momento dos pulsos.

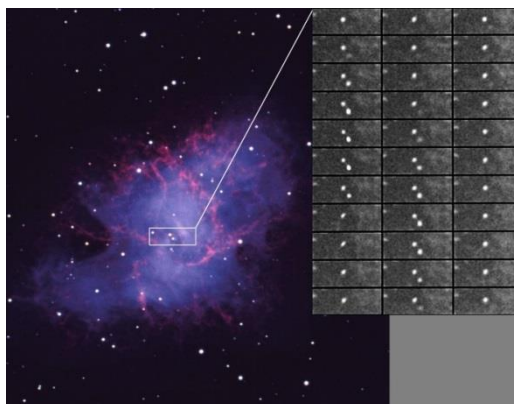


Figura 20 - Sequência de imagens do pulsar.

Fonte: http://lempel.pagesperso-orange.fr/un_os_dans_le_crabe_uk.htm

4.3.3 Buracos negros

Em uma supernova formada a partir de uma estrela de massa inicial entre 25 e 100 M_{\odot} , quando o núcleo de ferro excede o limite de Tolman-Oppenheimer-Volkoff (entre 1.5 e 3.0 M_{\odot}), que é a taxa necessária para a formação das estrelas de nêutrons (OLIVEIRA FILHO & SARAIVA, 2014), a estrela colapsa-se em uma região do espaço onde a curvatura do espaço-tempo e a densidade são infinitas e o volume é quase nulo. Esta região denomina-se singularidade (PENROSE, 1996).

Segunda a Relatividade Geral, nenhuma velocidade no universo pode escapar da velocidade da luz, portanto:

$$V_{esc} = \sqrt{\frac{2GM_{\odot}}{R}} = c. \quad (8)$$

Desconsiderando os efeitos da mecânica quântica e da relatividade, temos que:

$$R_s = \frac{2GM}{c^2}. \quad (9)$$

Onde R_s é o *Raio de Schwarzschild*, ou raio do *horizonte de eventos* (TIPLER e LLEWELLYN, 2006, p. 455). O objeto em questão possui uma velocidade de escape igual a c , ou seja, seu campo gravitacional é tão intenso que nenhum objeto (nem mesmo a luz),

consegue escapar de sua região colapsada (HAWKING e MLODINOW, 2005). O horizonte de eventos é o contorno esférico externo do objeto colapsado que delimita esse escape.

De acordo com o desvio gravitacional para o vermelho, uma radiação de comprimento de onda λ_0 emitida a uma distância R de uma massa M, sofre um deslocamento para maiores comprimentos de onda dado por:

$$\frac{\lambda}{\lambda_0} = \left(1 - \frac{v_g}{c^2}\right)^{-1/2} = \left[1 - \frac{2GM}{c^2 R}\right]^{-1/2} = \left(1 - \frac{R_s}{R}\right)^{-1/2}. \quad (10)$$

Onde λ é o novo comprimento de onda. Neste objeto, quando o raio R alcançar o raio de Schwarzschild, o comprimento de onda λ tenderá para o infinito e, conseqüentemente, a energia da radiação emitida, dada por $E=hf = hc/\lambda$, tenderá para zero. Dessa forma, quando $R < R_s$, a radiação também não escapará da superfície da estrela. Esse objeto em questão é chamado de buraco negro (TIPLER e LLEWELLYN, 2006, p. 455).

O termo “buraco negro” foi introduzido pela primeira vez em 18 de janeiro de 1964, pela escritora Ann Ewing, na revista *Science News Letter*, embora muitos acreditem a criação do termo a John Archibald Wheeler, que usou o termo durante uma palestra (ARCHIBALD, 1998), ele apenas ajudou a popularizá-lo. Muito antes, em 1783, o inglês John Michell já tinha proposto uma ideia de uma estrela de grande massa na qual nem a luz escaparia de sua força gravitacional. Mais tarde, em 1916, Karl Schwarzschild, através das equações da relatividade geral de Albert Einstein, derivou corretamente o raio do horizonte de eventos (TIPLER e LLEWELLYN, 2006, p. 455).

Em 1974, o físico inglês Stephen Hawking previu que os buracos negros na verdade não são tão negros. Eles emitem determinadas quantidades de radiação térmica, fazendo com que o buraco negro se comporte como um corpo negro. Esse efeito ficou conhecido como Radiação Hawking (HAWKING, 1974).

Devido à natureza termodinâmica dos buracos negros, cuja temperatura permeia na faixa de bilionésimos de Kelvin, evidências observacionais e experimentais de buracos negros ainda não foram realizadas, embora sua existência seja comprovada indiretamente através de seus efeitos no espaço, como as lentes gravitacionais. A Figura 33 apresenta a impressão artística de um buraco negro distorcendo o espaço a sua volta, criando o efeito da lente gravitacional. Nesta imagem simulada, o buraco negro está à frente da grande nuvem de Magalhães.

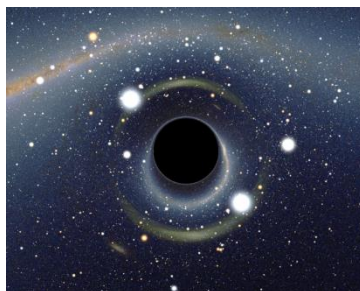


Figura 21- Impressão artística de um buraco negro distorcendo o espaço a sua volta.

Fonte: <http://www.wallshark.com/wallpaper/black-hole-spa>

Astrofísicos estimam que exista um buraco negro supermassivo no centro da nossa galáxia (Via Láctea) que é responsável por grande parte da massa que ali se encontra. As evidências de que o mesmo exista parte do movimento próprio de estrelas ao redor da região chamada Sagitário A. Segundo os astrofísicos, esse buraco negro supermassivo estaria interagindo gravitacionalmente com estas estrelas (GHEZ et al., 1998). Mediante os cálculos das leis de Kepler e da análise do deslocamento Doppler da estrela normal visível, pode-se estipular a existência desse seu companheiro invisível (TIPLER, 1986).

Em síntese, os buracos negros são formados quando estrelas supermassivas sofrem um colapso gravitacional. Os buracos negros em rotação são denominados buracos Kerr, já os que têm rotação são chamados buracos Schwarzschild (TIPLER, 1986).

4.3.4 Quasares

Quando um buraco negro supermassivo interage com a matéria de uma estrela nas suas redondezas, por exemplo, a matéria cai no horizonte de eventos e, devido ao atrito, forma um disco de acreção, fonte de radiação eletromagnética, raios-x, raios gama e luz visível (GREENSTEIN, 1964). Esses objetos em questão são os mais luminosos objetos do Universo, denominados de Quasares (quasi-stellar radio sources – fontes de rádio quase estelares). Os quasares podem chegar a uma luminosidade de 100 galáxias Via-Láctea.

Além disso, de acordo com as altas medições de *redshift*, ou desvio para o vermelho, foi estipulado que os quasares também são os objetos mais distantes do universo tanto no espaço, quanto no tempo. A Figura 34 apresenta a impressão artística do quasar ULAS J1120 + 0641, um quasar muito distante alimentado por um buraco negro com dois bilhões de massas

solares. Este quasar é o mais distante já encontrado, datado de 770,000 mil anos após o Big Bang.



Figura 22 - Quasar muito distante alimentado por um buraco negro com dois bilhões de massas solares, datado de 770,000 mil anos após o Big Bang.

Fonte: <http://www.eso.org/public/images/eso1122a/>

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O homem sempre se direcionou seu olhar para o céu. Com o das tecnologias espaciais, o estudo das estrelas permanece ativo, direta o indiretamente na vida humana diária. E deve se prolongar na expectativa do avanço da tecnologia observacional como os telescópios espaciais observando a assinatura de luz das estrelas e tentando entender a dinâmica do universo.

O presente trabalho que teve como objetivo apresentar um estudo introdutório sobre as fases de evolução de estrelas de diferentes massas, desde o nascimento em nuvens densas de matéria, até o colapso final destes corpos, em um processo no qual os elementos mais leves são sintetizados e geram elementos mais pesados no núcleo quente e denso.

São essas nuvens densas que formarão sistemas com planetas, estrelas e corpos menores. No caso de estrelas de grande massa, a gravidade é grande para colapsar a estrela contra si própria, gerando as mais complexas estruturas do universo, tais como buracos negros, pulsares, estrelas de nêutrons e quasares.

A maioria das estrelas no universo, como o Sol, está na fase de sequência principal e possui um estado de quase equilíbrio, fontes aparentemente inesgotáveis de energia e luz. Em contrapartida, quanto maior for a massa de uma estrela, menor será seu tempo de vida, existem as estrelas de grande massa que, ao colapsar seus núcleos pesados a partir do ferro, geram as *supernovas*, que tem calor suficiente para forjar elementos mais pesados e lança-los junto com os elementos mais leves, no espaço interestelar.

Elementos tais como, carbono, nitrogênio, oxigênio e silício, são ingredientes fundamentais, uma vez que estas formarão as próximas gerações de estrelas e planetas, os compostos fundamentais para a criação da vida complexa.

Desta forma, temos que este fato não só nos une quimicamente com as estrelas e com o universo, auxilia-nos a entender nossa origem. Também nos leva a pensar que além de nós, pode haver milhares de sistemas estelares que abrigam ou abrigarão vida, complexa ou não.

Devido ao avanço da astrofísica e da astrobiologia com os telescópios espaciais, hoje sabemos que temos mais de mil exoplanetas confirmados, dezenas deles são potencialmente habitáveis.

Ademais, é implausível afirmar que a Terra é a única reserva biológica do Cosmos, porém ainda não temos a evidência necessária para afirmar o contrário. Em ambos os casos, a conclusão é surpreendente e nos leva a aguardar para que a demanda dos próximos

telescópios modernos e os avanços nas pesquisas da astrofísica nos aproximem de tais respostas. Até lá, continuaremos admirando as estrelas no céu noturno.

REFERÊNCIAS

- ADAMS, F. C.; GRAVES, G. J. M.; LAUGHLIN, G. Red Dwarfs and the End of the Main Sequence, *Rev MexAA (Serie de Conferencias)*, 22, p. 46-49, 2004.
- AITKEN, R. G. *The Binary Stars*. New York: Dover, 1964, p. 1.
- ANDRADE J.; AUGUSTO, P., ANDRONOV, I. Séries Temporais para a Análise de Estrelas Variáveis Projecto PESO. Departamento de Matemática, Universidade da Madeira, 2000.
- ARCHIBALD, W. *Geons, Black Holes, and Quantum Foam: A Life in Physics*. p. 296, 1998.
- BAHR, F., SOMMA, Isabelle., *Atlas do Universo*. Editorial Sol 90. S.L., Barcelona, Espanha, 2005.
- BOMBACI, I. The maximum mass of a neutron star. *Astronomy and Astrophysics*, 305, 871B, 1996.
- BOSS, A. Are They Planets or What? Carnegie Institution of Washington. Arquivado originalmente, 2006. Disponível em: http://lasp.colorado.edu/education/outerplanets/giantplanets_whatandwhere.php.
- BROMM V., LARSON, R. B., *The First Stars in The Universe*. Scientific American – Special Edition, 2004.
- BROMM, et al. The formation of the first stars in the primordial star-forming cloud. *Astrophysical Journal*, 564: p 23- 51, 2002.
- BURGASSER, A. J. Brown dwarfs: Failed stars, super Jupiters, 2008. Disponível em: http://astro.berkeley.edu/~gmarcy/astro160/papers/brown_dwarfs_failed_stars.pdf.
- CHABRIER, G.; BARAFFE, I.; PLEZ, B. "Mass-Luminosity Relationship and Lithium Depletion for Very Low Mass Stars". *Astrophysical Journal Letters* 459 (2): p 91-94, 1996
- CHIZZOTTI, A. *Pesquisa qualitativa em ciências humanas e sociais*. Petrópolis, Vozes, 2006.
- DARLING, David. NEUTRON STAR. Disponível em <http://www.daviddarling.info/encyclopedia/N/neutronstar.html>. Página visitada em 28 de setembro de 2014
- DOTTORI. H. *Estrelas*. Observatório Educativo Itinerante. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011. Disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/oei/hipexpo/estrelas.pdf>. Acesso: setembro de 2014.
- FEWELL, M. P. The Atomic Nuclide with the Highest Mean Binding Energy. *Am. J. Phys.* 63, July 1995.
- FIGUEIREDO, N. M. A. *Método e metodologia na pesquisa científica*. 2ª ed. São Caetano do Sul, São Paulo, Yendis Editora, 2007.

GAIO, R.; CARVALHO, R. B.; SIMÕES, R. Métodos e técnicas de pesquisa: a metodologia em questão. In: GAIO, R. (Org.). Metodologia de pesquisa e produção de conhecimento. Petrópolis, Vozes, 2008.

GHEZ, A. M.; KLEIN, B. L; MORRIS, M. et al. High Proper-Motion Stars in the Vicinity of Sagittarius A*: Evidence for a Supermassive Black Hole at the Center of Our Galaxy. *The Astrophysical Journal* 509 (2). p. 678, 1998.

GLEISER, M. Poeira das estrelas. Vol. 1. São Paulo–SP: editora Globo, 2006.

GODOY; A. S. Pesquisa qualitativa tipos fundamentais. Revista de Administração de Empresas / EAESP - FGV, São Paulo, Brasil, 1995.

GOLD, T. Rotating neutron stars and the nature of pulsars. *Nature* 218. pp. 731-732, 1968.

GREENSTEIN, J. L. The Quasi-Stellar Radio Sources 3C 48 and 3C 273. *Astrophysics Journal*, v. 140, 1964.

HAWKING, S. W. MLODINOW, Leonard. 1942 – Uma Nova História do Tempo. Tradução de Vera de Paula Assis. – Rio de Janeiro: Ediouro, 2005

HAWKING, S. W. Black hole explosions?. *Nature* **248** (5443): p.30–31, 1974.

IRVINE W. M. The chemical composition of the pre-solar nebul". T. I. Gombosi (Ed.). *Cometary Exploration*, n.1, p. 3–12, 1983.

KERVELLA, P.; THEVENIN, F. A Family Portrait of the Alpha Centauri System: VLT Interferometer Studies the Nearest Stars. Observatório Europeu do Sul, 2003.

KLEBER A. et al. Reação nucleares: estrelas. Observatório Nacional-MCT. Coleção Observatório Nacional. Edição: 04/2009. 2009

_____ Astronomia nas escolas. Estrelas. Edição 07/2011, n.5. Observatório Nacional, 2011.

KWOK, S. The origin and evolution of planetary nebulae. University of Calgary, Canada. Cambridge university press, 2000.

MORESI, E. (Org.). Metodologia da Pesquisa. Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Gestão do Conhecimento e Tecnologia da Informação. Pró-Reitoria de Pós-Graduação – PRPG. Universidade Católica de Brasília – UCB, Brasília – DF, 2003.

MORGAN, W. W.; KEENAN, P. C.; KELLMAN, E. An atlas of stellar spectra, with an outline of spectral classification, Chicago, Ill., The University of Chicago press, 1943.

MORGAN, W. W.; KEENAN, P. C.; KELLMAN, Edith (1943), "An atlas of stellar spectra, with an outline of spectral classification", Chicago, Ill., The University of Chicago press.

MOURÃO, R. R. de F. Edição do Atlas Celeste. Editora Vozes, Petrópolis, 2000.

NEVES, J. L. Pesquisa qualitativa – características, usos e possibilidades Cadernos de Pesquisa em Administração. São Paulo, v. 1, n 3, 1996.

OBSERVATÓRIO NACIONAL. As estrelas anãs brancas. 2013d. Disponível em: http://www.on.br/ead_2013/site/conteudo/cap22-estrelas-anas-brancas/an-as-brancas.pdf.

OBSERVATÓRIO NACIONAL. As estrelas gigantes e supergigantes. 2013e. Disponível em: http://www.on.br/ead_2013/site/conteudo/cap19-gigantes-supergigantes/gigantes.pdf.

OBSERVATÓRIO NACIONAL. Como as estrelas se formam? 2013b. Disponível em: http://www.on.br/ead_2013/site/conteudo/cap16-formando-estrelas/formando.html

OBSERVATÓRIO NACIONAL. Estrelas variáveis, 2013f. Disponível: http://www.on.br/ead_2013/site/conteudo/cap20-estrelas-variaveis/variaveis.pdf.

OBSERVATÓRIO NACIONAL. O diagrama Hertzsprung-Russell. 2013c. Disponível em: http://www.on.br/ead_2013/site/conteudo/cap15-diagrama/diagrama_hr.pdf.

OBSERVATÓRIO NACIONAL. Supernovas, 2013a. Disponível em: http://www.on.br/ead_2013/site/conteudo/cap23-supernovas/supernovas.html.

OLIVEIRA FILHO, K. de S. As anãs brancas, 2014. Disponível em: <http://astro.if.ufrgs.br/estrelas/node8.htm>.

_____. Equilíbrio Hidrostático. Instituto de Física. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2008. Disponível em: <http://astro.if.ufrgs.br/evol/node13.htm>.

_____. Estrelas Variáveis. Instituto de Física. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2011. Disponível em: <http://astro.if.ufrgs.br/estrelas/variaveis.htm>.

OLIVEIRA FILHO, K. de S.; SARAIVA, M. de F. Astronomia e Astrofísica 3ª ed. Editora Livraria da Física, 2014.

_____. Astronomia e Astrofísica. Departamento de Astronomia - Instituto de Física. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014, 792p.

_____. Fusão Termo-Nuclear. 2013. Disponível: <http://astro.if.ufrgs.br/estrelas/node10.htm>.

Palmer, J. Hope dims that Earth will survive Sun's death", New Scientist, 2008. Disponível em: <http://www.newscientist.com/article/dn13369-hope-dims-that-earth-will-survive-suns-death.html#.VGaZk2dIeIg>.

PARKER, Q. A. al. The Macquarie/AAO/Strasbourg H α Planetary Nebula Catalogue: MASH 373 (1):79-94.DOI:10.1111/j. 1365-2966.2006.10950.x, 2006.

PENROSE, R. Chandrasekhar, Black Holes, and Singularities. J. Astrophys. Astr. **17**, 213–231.

PHILLIPS, K. J. H.. Guide to the Sun. Cambridge University Press. p. 47–53, 1995.

POGGE, Richard W. The Once and Future Sun New Vistas in Astronomy - Ohio State University (Department of Astronomy) 1997. Disponível em <http://www.astronomy.ohio-state.edu/~pogge/Lectures/vistas97.html> página visitada em 27 de outubro de 2014.

PRIALNIK, D. An Introduction to the Theory of Stellar Structure and Evolution. Cambridge University Press. 195–212, 2000.

SAGAN, C. E. Cosmos. Ed. Francisco Alves, 1980.

SARAIVA, M. de F. O.; OLIVEIRA FILHO, K. de S.; MÜLLER A. M. Formação e Evolução Estelar. Notas de aula do Instituto de Física. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001. Disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/fis02001/aulas/Aula20-122.pdf>.

SCHRÖDER, K.P. Distant future of the Sun and Earth revisited. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2008.

SOBRINHO J. L. G. Estrelas: origem, evolução e morte. Centro de Ciências Exatas e da Engenharia, Universidade da Madeira. Grupo de Astronomia da Universidade da Madeira. 2013

TIPLER, P. A. Física. 2ª ed. – Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1986.

TORRES, C. M. A.; FERRARO, Nicolau Gilberto, SOARES, Paulo Antônio de Toledo. Física – Ciência e Tecnologia: Volume 3. 2 ed. – São Paulo: Moderna, 2010.

TIPLER, P. A. LLEWELLYN, R. A. Física moderna, 3ª ed. Editora. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2006.

WGESP - Grupo de Trabalho sobre planetas extra-solares: Definição de um planeta, 2014. Disponível em <http://home.dtm.ciw.edu/users/boss/definition.html>.

WOOD, P. R.; ZARRO, D. M. Helium-shell flashing in low-mass stars and period changes in Mira variables. Astrophysical Journal 247, Bibcode, 1981.

ZABLUDOFF, A, Lecture 13: The Nebular Theory of the origin of the Solar System. University of Arizona, Spring, 2003.

ZEILIK, M.; GREGORY, S. A. Introductory Astronomy & Astrophysics (4th ed.), Saunders College Publishing, 1998.

APÊNDICE

INSTRUMENTOS PARA OBSERVAÇÕES DE ESTRELAS

A observação do céu noturno e dos corpos celestes é algo que sempre fez parte da humanidade desde os tempos remotos. A evolução da astronomia e da astrofísica se deu desde as primeiras observações, realizadas a olho nu, na Pré-História, passando pelos árabes, no século VII²², até o advento da primeira luneta, no século XVII, chegando aos dias atuais, com o uso dos mais avançados telescópios espaciais as mais sofisticadas tecnologias. Nosso olhar no espaço foi cada vez mais longe, alcançando fronteiras no universo nunca antes imaginado. E isto não é diferente quando se trata de estrelas (ATLAS DO UNIVERSO, 2005)

Não se sabe qual foi a primeira pessoa que apontou para os céus, admirando as estrelas, mas sabemos que elas estão embelezando nosso quintal cósmico todos os dias e não foi diferente na antiguidade. O primeiro a observar as estrelas com propósitos científicos e com o auxílio de um instrumento foi Galileu Galilei (1564 – 1642) (RONAN, 1987).

Ao saber da invenção de uma luneta, desenvolvida pelo fabricante de lentes holandês Han Lippershey em 1608 e usada inicialmente como brinquedo (CONNER, 2005), Galileu soube da invenção do instrumento em 1609 e apenas usando informações do mesmo, o aperfeiçoou e apontou-o pela primeira vez para os céus, em 1610 (Figura A).



Figura A - Luneta usada por Galileu.

Fonte: <http://www.fisica-interessante.com/image-files/galileu-telescopio.jpg>

Com seu instrumento capaz de aumentar três vezes o tamanho de objetos, ele viu que era possível observar com detalhes e com mais nitidez os corpos celestes (Figura B). Galileu resolveu

²² No século VII, os árabes instalaram observatórios em Bagdá, Cairo, Damasco outros centros importantes e construíram quadrantes e torqueti, idealizados por Ptolomeu, assim como ampulhetas, astrolábios e esferas armilares. Quando conquistaram a Espanha, no século XI, os árabes estabeleceram observatórios nesses novos centros, de modo que a astronomia passou para a Europa sem interrupção (Oliveira Filho & Saraiva, 2014. pp. 687).

então desenvolver uma luneta mais sofisticada, com lentes mais potentes. Com isso, ele pôde estudar com riqueza de detalhes as fases da Lua, de Vênus, as manchas solares e as crateras e vales da Lua e o mais importante: descobriu o que ele inicialmente pensava que seriam estrelas: os quatro satélites de Júpiter (ATLAS DO UNIVERSO, 2005; OLIVEIRA FILHO e SARAIVA, 2014). Com seu instrumento, Galileu também descobriu a infinidade de outras estrelas que não podiam ser vistas a olho nu, observou também algumas nebulosas e o brilho da nossa galáxia, a via láctea.

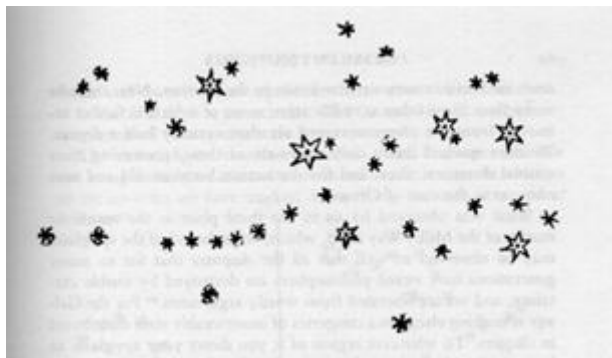


Figura B - Desenho das Plêiades, em sua obra, *Sidereus Nuncius*. A olho nú, podemos ver apenas 7 estrelas deste aglomerado. Fonte: UFRGS. http://www.if.ufrgs.br/mpef/mef008/aulas_11/Galileu_observacoes_tel_v3.htm

Telescópio Refrator e Refletor e a sextante

Depois do advento da luneta de Galileu, o astrônomo alemão Johannes Kepler e o físico britânico Isaac Newton, dedicaram-se à construção de instrumentos mais sofisticado, chamados de telescópios²³ (ATLAS DO UNIVERSO, 2005). Em 1611²⁴, Kepler publicou que iria construir um instrumento com duas lentes convexas (modelo refrator), diferente do de Galileu (Figura C), com uma lente convexa e uma côncava (OLIVEIRA FILHO e SARAIVA, 2014).

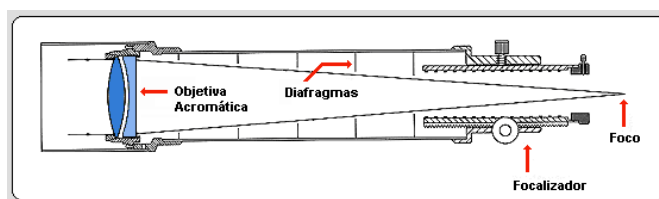


Figura 23 - Esquema de um telescópio Refrator.

Fonte: http://www.cosmobrain.com.br/artigos/artigo_012002.html

Em 1668, Newton, utilizando o trabalho de Kepler, construiu um telescópio refletor (catoptrico, do grego *katoptron*, espelho), que continha um espelho curvo, ao invés de lentes convencionais (Figura D).

²³ Do Grego "Tele" = Longe + *Scopio* = Observar

²⁴ *Dioptrice*, 1611.

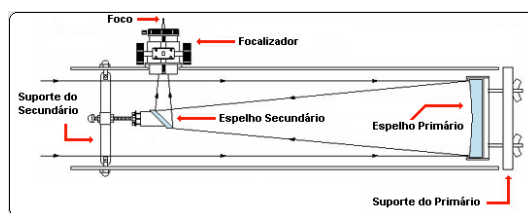


Figura D - Esquema típico de um Refletor Newtoniano.
 Fonte: http://www.cosmobrain.com.br/artigos/artigo_012002.html

Outro instrumento astronômico para observação e medição de estrelas, a sextante, foi inventado em 1731, pelo inglês John Hadley (1682-1744). A sextante é um instrumento por onde se vê o horizonte e uma estrela simultaneamente através de uma pequena luneta, para medir sua altura (Ibidem, p. 690).



Figura E- Sextante.
 Fonte: http://static.freepik.com/fotos-gratis/sextante_21128036.jpg

Telescópios de Grande Porte

Os telescópios ópticos são instrumentos modernos que baseiam-se na captação e no aumento da luz visível das estrelas ou do reflexo das mesmas na superfície de planetas.

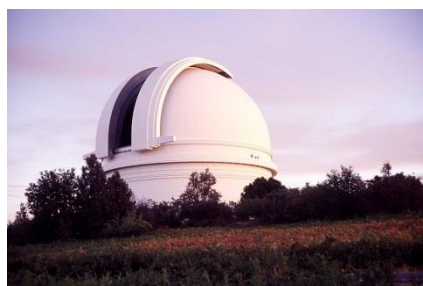
A sensibilidade de um telescópio aumenta com o tamanho da área coletora e, portanto, com o quadrado do diâmetro, de modo que dobrando o seu tamanho, podemos detectar objetos quatro vezes mais fracos. Os telescópios na Terra podem enxergar objetos da ordem de 1 segundo de arco ou maiores (1 segundo de arco corresponde a uma moeda de 25 centavos a 50 km de distância! (Oliveira Filho & Saraiva 2004. p 513)

A localização de um observatório astronômico é um fator impar no estudo das estrelas. Um exemplo é observatório de Mauna Kea (Figura F), no Havaí, construído em 1944, localizado a cerca de 4 mil metros de altitude. Essa altitude é propensa para a detecção de radiação infravermelha, uma vez que esse tipo de radiação é bloqueado em altitudes menores (ATLAS DO UNIVERSO, 2005) Os maiores telescópios desse observatório são os telescópios gêmeos Keck I e Keck II. Seus espelhos, de 10 metros cada, são formados por mosaicos de espelhos menores (OLIVEIRA FILHO e SARAIVA, 2014).



*Figura F- Telescópios Keck no alto do monte Mauna Kea.
Fonte: <http://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?release=2008-016>*

Em 1948, foi inaugurado outro importante observatório: O Monte Palomar, em San Diego, na costa oeste dos Estados Unidos, onde se localiza o telescópio Hale, considerado por três décadas, o maior do mundo. O Hale possui espelho primário de abertura de 200 polegadas (cinco metros) e 10 metros de diâmetro. Com o Hale, foi possível fazer um grande trabalho de catalogação de estrelas. Durante a década de 50, produziu-se o maior Atlas de estrelas e nebulosas. Em 1980, esse mapeamento foi refeito, e hoje é considerado um dos mais completos já realizados (ATLAS DO UNIVERSO, 2005).



*Figura G - Vista do observatório Hale.
Fonte: http://www.absoluteastronomy.com/topics/C._Donald_Shane_telescope*

O maior e mais avançado telescópio óptico de grande porte na atualidade é o Gran Telescópio Canarias (Figura H), localizado na Espanha. Mas já está sendo construído no Chile, o European Extremely Large Telescope (E-ELT) com um espelho primário de 39 metros de diâmetro e que, dentro de uma década, será o maior telescópio do mundo.



*Figura H - Telescópio GTC, nas Canárias.
Fonte: <http://teleskopblog.de/gran-telescopio-canarias-gtc/>*

No Hemisfério Sul, os maiores telescópios encontram-se nos Andes chilenos, nas montanhas de La Silla (ESO2), Cerro Tololo(CTIO3), e Cerro Pachon (Gemini e SOAR4) (TELESCÓPIOS - USP, 2014). No Brasil, o Perkin Elmer, maior telescópio no país, localiza-se no Observatório Pico dos Dias ou OPD, operado hoje pelo Laboratório Nacional de Astrofísica, antes pertencido ao Observatório Nacional. O Perkin possui 1,6 m de diâmetro.

Observações Indiretas

Observar e estudar as estrelas é um trabalho que não se limite apenas aos convencionais telescópios refratores, refletores e de grande porte. Existem outros meios de observação e detecção das estrelas. Sabe-se que a luz é emitida não só na visível, mas em diversas faixas do espectro, como as ondas de rádio, raios-x, ultravioleta e infravermelho. Esse tipo de radiação pode ser captada com auxílio dos chamados radiotelescópios (ATLAS DO UNIVERSO, 2005). Os radiotelescópios são os responsáveis pelos estudos de pulsares, quasares, regiões nebulosas ricas em hidrogênio.

O primeiro a captar um sinal espacial com ondas de rádio foi o norte-americano Karl Guthe Jansky (OLIVEIRA FILHO e SARAIVA, 2014). Em 1932, enquanto estudava efeitos das tempestades nas ondas de rádio terrestre, o engenheiro descobriu um sinal desconhecido que variava em um período de 24 horas. Anos depois, descobriu-se que o sinal na verdade vinha do centro da Via Láctea (ATLAS DO UNIVERSO, 2005).

Subsequentemente, inúmeros astrônomos e astrofísicos investiram na construção de radiotelescópios ao redor do mundo. Os radiotelescópios possuem um formato semelhante às antenas parabólicas, porém com um tamanho bem maior, capazes de captar frequências em várias faixas do espectro eletromagnético.

Em 1963, foi construído o maior radiotelescópio do mundo (Figura I), localizado em Arecibo, no Porto Rico, com 300 metros de diâmetro. No Brasil, o maior radiotelescópio é o Rádio-Observatório do Itapetininga, na cidade de Atibaia-SP, com um diâmetro de 14 metros (ATLAS DO UNIVERSO, 2005).



Figura I - O maior radiotelescópio do mundo, contrariamente aos telescópios convencionais, é imóvel, porém, com seu tamanho gigantesco, capta longas faixas de sinais de rádio quando fontes astronômicas emitem no local que ele está montado.

Fonte: <http://www.naic.edu/public/about/photos/hires/ao011.jpg>

Em 1980, foi construído o VLA (Very Large Array), um conjunto de radiotelescópios localizado em Socorro (Figura J), no Novo México (OLIVEIRA FILHO e SARAIVA, 2014). Outro importante observatório de rádio telescópios da atualidade é o Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA), localizado a 5000 metros de altitude, no planalto de Chajnantor, deserto do Atacama, no Chile. O ALMA é o maior projeto de astronomia e astrofísica já realizado, com 66 antenas que captam em comprimentos de onda entre 0,3 a 9,6 milímetros. O ALMA será esperado para nos fornecer uma visão da evolução das estrelas durante o início do Universo e claro, imagens em alta resolução de estrelas e planetas em formação (SKA, 2011). Em 2018, será construído o Square Kilometre Array (SKA), que será o maior conjunto de radiotelescópios do planeta, que iniciará suas operações em 2025 (SKA, 2011).

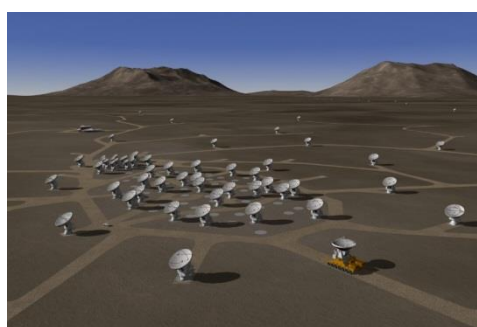


Figura J - Conjunto de Radiotelescópios do ALMA.

Fonte: <http://www.nrao.edu/pr/2008/alma.aas/ALMA-2.jpg>

Telescópios Espaciais

Os telescópios são uma ferramenta impar na astrofísica estelar, porém, pelo fato da atmosfera do nosso planeta bloquear ou absorver alguns sinais e distorcer imagens, os astrônomos criaram um tipo de instrumento que rompe essa limitação: os telescópios espaciais (Telescópios IAG-USP).

Os telescópios espaciais possuem várias vantagens frente aos telescópios comuns terrestres. Além de observar regiões do espectro que são obscurecidas ou distorcidas pela atmosfera terrestre, como os e raios-gama, raios-x e infravermelho, eles se esquivam da “poluição visual” das fontes de luz na Terra, tornando-se ultra eficazes na captação de imagens do nosso Universo, incluindo estrelas e nebulosas (OBSERVATÓRIO NACIONAL, 2013). Dentre os principais telescópios espaciais existentes, destacam-se o Telescópio Espacial Hubble, o Chandra X-ray Observatory (CXO), o Spitzer Space Telescope (SST).

Telescópio Espacial Hubble

A 600 km de altitude, localiza-se o Telescópio Espacial Hubble (Figura K), um dos mais importantes instrumentos da astronomia óptica. Posto em operação em 1990, pelo ônibus espacial Discovery, e com eventuais falhas em seus espelhos, apresentadas poucas semanas depois do seu lançamento e falhas na sua órbita, corrigidas em 1993²⁵ e em 1997²⁶, o telescópio Hubble nos deu as mais espetaculares imagens do Universo feitas até então (ATLAS DO UNIVERSO, 2005).

Com um espelho principal de 2,4 metros de diâmetro e sua localização privilegiada no espaço, o Hubble possui outros quatro espelhos que têm capacidade para captar imagens em infravermelho, ultravioleta e no visível, gerando imagens em alta resolução – 10 vezes melhores do que os telescópios em terra (ATLAS DO UNIVERSO, 2005).

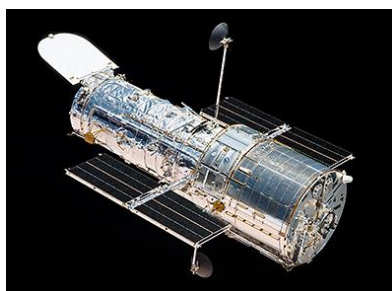


Figura K - O Telescópio Espacial Hubble como visto da partida Space Shuttle Atlantis , voando Missão de Manutenção 4 (STS-125).

Fonte: <http://hubblesite.org/gallery/spacecraft/25/>

Como o Hubble, os astrônomos e astrofísicos puderam observar e estudar diferentes corpos do Universo (Figuras L e M), como berçários estelares, estrelas em formação e explosões cósmicas (ATLAS DO UNIVERSO, 2005).

²⁵ *Servicing Mission 1.* NASA,

²⁶ *Servicing Mission 2.* NASA



Figura L - Detalhe da Nebulosa Cabeça de Cavalo (Barnard 33), imagem obtida pelo Hubble. A Nebulosa Cabeça de Cavalo é uma nuvem fria e escura de gás e poeira, em silhueta contra a nebulosa brilhante IC 434. A área brilhante no canto superior esquerdo é uma jovem estrela incorporada em seu berçário de gás e poeira. Crédito:

Fonte: <http://hubblesite.org/gallery/wallpaper/pr2001012a/>

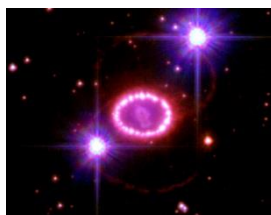


Figura M - Supernova 1987A, fotografada pelo Hubble. Crédito: NASA, ESA, P. Challis and R. Kirshner (Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics).

Fonte: <http://hubblesite.org/gallery/album/star/pr2007010a/>

Dentre as mais importantes descobertas e conquistas do Hubble, estão a medição das variáveis cefeidas, a limitação da constante de Hubble - que auxiliou na determinação da idade do Universo e uma das mais importantes: a evidência que praticamente confirmou a existência dos buracos negros (GEBHARDT et al., 2000). Se tratando da visão do cosmos, o Hubble proporcionou a humanidade um salto evolutivo, comparado ao salto dado pela luneta de Galileu, em 1610.

Devido ao advento de novas tecnologias, a NASA pretende substituir o telescópio Hubble em 2018 em um projeto de uma missão não tripulada, que irá colocar o Telescópio Espacial James Webb (JWST) em funcionamento. Suas principais características são um espelho de 6,5 metros de diâmetro. Podendo captar desde o visível, passando pelas ondas médias e curtas, até o infravermelho médio, o telescópio James Webb irá estudar a evolução e nascimento das galáxias, e da formação das estrelas e planetas (Atlas do Universo, 2005. p. 132) (NASA, 2014).

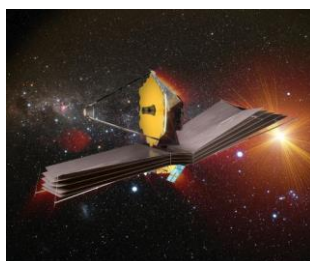


Figura N - Concepção artística do Telescópio Espacial James Webb.

Fonte: http://www.teleobjetivo.org/wp-content/uploads/2007/05/james_webb_telescope.jpg.

Outros Telescópios Espaciais

Além do Hubble, existem outros telescópios espaciais em atividade. O Chandra X-ray Observatory (CXO), lançado em 1993, e o Spitzer Space Telescope (SST), lançado em 2003, ambos através da NASA (Figura O).

O telescópio Chandra²⁷, assim com o Hubble, revolucionou a astrofísica na questão de imagens de corpos em formação (Figura P). Prova disto foram as descobertas ligadas ao telescópio. Algumas delas foram a primeira luz da Supernova Cassiopéia A (PAVLOV et al., 2000), imagens melhoradas da Nebulosa do Caranguejo (WEISSKOPF et al., 2000), imagens de raios-x de buracos negros, estrelas de sequência principal.



Figura O - Telescópio Espacial Chandra.
Fonte: <http://www.ibharms.de/index-Dateien/Page662.htm>

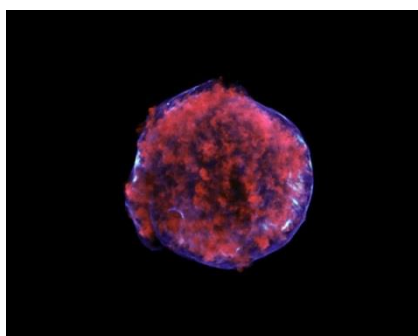


Figura P – Imagem da Nebulosa Tycho obtida através do Telescópio Chandra. NASA/CXC/Rutgers/K.Eriksen et al. – Fonte: <http://chandra.harvard.edu/photo/2011/tycho/more.html>

Outro grande telescópio espacial, o Spitzer (Figura Q), é um observatório espacial que capta objetos que emitem radiação na faixa de infravermelho do espectro. Com o Spitzer, foi possível detectar objetos que não puderam ser vistos pelo observatório em infravermelho em terra (Infrared Space Observatory), incluindo alguns berçários estelares distantes, discos protoplanetários (Figura R). Alguns desses objetos emitem apenas em infravermelho, devido a sua temperatura (próximas do zero absoluto) (SPLITZER, 2014).

²⁷ Homenagem à Subrahmanyam Chandrasekhar.

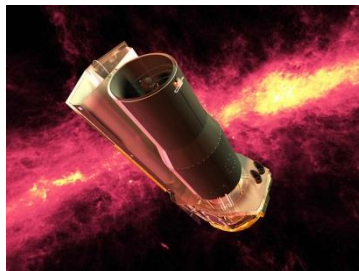


Figura Q - Telescópio Espacial Spitzer. NASA/JPL-Caltech.

Fonte: <http://www.spitzer.caltech.edu/images/3072-SIRTf-Spitzer-Rendered-against-an-Infrared-100-Micron-Sky>

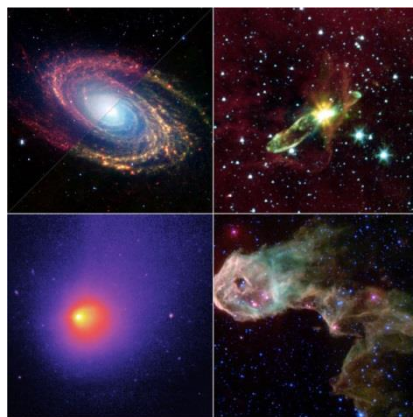


Figura R – Mosaico com algumas das imagens captadas pelo Spitzer: No sentido horário a partir da parte superior esquerda: vista em infravermelho da galáxia espiral Messier 81; saídas embutidas do Herbig-Haro 46/47; proto-estrelas descobertas em vários pontos de do glóbulos escuros IC1396; e o cometa Schwassmann-Wachmann 1. Os dados do Spitzer da jovem estrela HH 46-IR, e de uma galáxia distante 3.250 milhões de anos-luz de distância, mostram a presença de moléculas orgânicas de água e pequenos, indicando um forte indício de vida em outros planetas.

Fonte: <http://www.spitzer.caltech.edu/news/149-ssc2003-06-NASA-Releases-Dazzling-Images-from-New-Space-Telescope>

REFERÊNCIAS

- BAHR, F.; SOMMA, I. Atlas do Universo. Editorial Sol 90. S.L., Barcelona, Espanha, 2005.
- CONNER, C.A People's History of Science: Miners, Midwives, and Low Mechanics. Ed. Nation Books, 2005.
- GEBHARDT, K. J et al. A Relationship between Nuclear Black Hole Mass and Galaxy Velocity Dispersion. The Astrophysical Journal 539 (1): L13–L16, 2000.
- MAIOR TELESCÓPIO DO MUNDO. Disponível em <www.msnbc.msn.com> Página visitada em 10 de outubro de 2014.
- OLIVEIRA FILHO, K. de S.; SARAIVA, M. de F. Astronomia e Astrofísica 1ª edição. Editora Livraria da Física, 2014.
- RONAN, C. A. História Ilustrada da Ciência: Universidade de Cambridge. 1 ed. São Paulo: Círculo do Livro, 1987. 4 vol. vol. III - Da Renascença à Revolução Científica.
- SERVICING MISSION 1. NASA, Disponível em <http://asd.gsfc.nasa.gov/archive/hubble/missions/sm1.html>. Página visitada em 12 de outubro de 2014.
- SKA ORGANIZATION. SKA announces Founding Board and selects Jodrell Bank Observatory to host Project Office. Disponível em <https://www.skatelescope.org/news/2nd-april-news>. Pagina visitada em 11 de outubro de 2014.
- TELESCÓPIOS. IAG USP. Disponível em <<http://www.astro.iag.usp.br/~dalpino/AGA215/APOSTILA/cap06cor.pdf>> página visitada em 12 de outubro de 2014.
- PAVLOV, G. G; ZAVLIN, V. E.; ASCHENBACH, B.; TRUMPER, J.; SANWAL, D. "O objeto compacto central em Cassiopeia A: Uma estrela de nêutron com calotas polares aquecidas ou um Buraco Negro? The Astrophysical Journal 531, 2000.
- WEISSKOPF, MC; Hester, JJ; Tennant, AF; Elsner, RF; Schulz, NS; Marshall, HL; Karovska, M.; Nichols, JS; Swartz, DA et al. Descoberta da Estrutura espacial e espectral na emissão de raios-X da nebulosa do Caranguejo. The Astrophysical Journal 536, 2000