

Renato da Silva Rosa Rodrigues

**FORMAÇÃO E EVOLUÇÃO ESTELAR COMO UMA  
PROPOSTA DE CONTEXTUALIZAÇÃO PARA O ENSINO DE  
TERMODINÂMICA NO ENSINO MÉDIO**

Dissertação submetida ao Programa de  
Pós-Graduação em Ensino de Física da  
Universidade Federal de Santa  
Catarina para a obtenção do Grau de  
Mestre em Ensino de Física  
Orientador: Prof. Dr. Wagner  
Figueiredo

Florianópolis  
2016

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Rodrigues, Renato da Silva Rosa  
Formação e Evolução Estelar como uma Proposta de  
Contextualização para o Ensino de Termodinâmica no Ensino  
Médio / Renato da Silva Rosa Rodrigues ; orientador,  
Wagner Figueiredo - Florianópolis, SC, 2016.  
127 p.

Dissertação (mestrado profissional) - Universidade  
Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Físicas e  
Matemáticas. Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física.

Inclui referências

1. Ensino de Física. 2. Ensino de Física. 3.  
Termodinâmica. 4. Estrelas. I. Figueiredo, Wagner. II.  
Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós  
Graduação em Ensino de Física. III. Título.

Renato da Silva Rosa Rodrigues

**FORMAÇÃO E EVOLUÇÃO ESTELAR COMO UMA  
PROPOSTA DE CONTEXTUALIZAÇÃO PARA O ENSINO DE  
TERMODINÂMICA NO ENSINO MÉDIO**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Ensino de Física”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física

Florianópolis, 16 de Setembro de 2016.

---

Prof. Celso de Camargo Barros Junior, Dr.  
Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Wagner Figueiredo, Dr.  
Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Alexandre Magno Silva Santos, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Bernardo Walmott Borges, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Marcos João Correia, Dr.  
Instituto Federal Catarinense



Dedico este trabalho à minha família.



## **AGRADECIMENTOS**

Ao Deus todo poderoso, por me dar condições de realizar este trabalho, sem o seu agir nada seria possível.

À minha esposa, pelo apoio, torcida e paciência nas muitas horas ausentes.

A toda minha família pelo apoio e confiança.

Ao meu orientador, o professor Dr. Wagner Figueiredo, pela disposição, paciência, dedicação e conselhos prestados durante a realização deste trabalho.

Aos professores do mestrado pelos seus ensinamentos.

Aos colegas de mestrado pelo convívio e experiências compartilhadas.

À direção da Escola de Educação Básica Gracinda Augusta Machado, pelo espaço oportunizado para a aplicação deste trabalho.

Aos alunos que participaram da implementação do material.

À Capes pelo auxílio financeiro, essencial para a realização deste trabalho.



## RESUMO

Esta dissertação descreve o desenvolvimento e implementação de um material instrucional composto por um texto principal intitulado Formação e Evolução Estelar, um experimento intitulado Medindo a Temperatura Efetiva do Sol e um site intitulado Evolução Estelar. O material foi desenvolvido para professores de Física da Educação Básica que desejam enriquecer suas aulas trabalhando conceitos de Termodinâmica contextualizados com a Formação e Evolução Estelar. Ele foi aplicado em uma turma de Ensino Médio de uma escola pública da rede estadual de Santa Catarina. Os resultados indicam a possibilidade da inserção de tópicos de Astrofísica no Ensino de Física, bem como a validade de se trabalhar a Termodinâmica de forma contextualizada à formação e evolução das estrelas. Ficou evidenciado a disposição e interesse dos alunos pelo tema, assim como a participação e envolvimento em todas as aulas. Nossa intenção é que este trabalho seja uma referência de fácil acesso e que se torne um material enriquecedor para professores e alunos.

**Palavras-chave:** Ensino de Física. Termodinâmica. Estrelas.



## **ABSTRACT**

This Thesis describes the development and implementation of an instructional material that consists of a main text entitled Formation and Evolution of Stars, an experiment entitled Measuring the Sun's temperature and a Website called Stellar Evolution. The material was developed for physics' teachers of the High School who intend to enlarge their classes working with thermodynamics concepts related to the formation and evolution of stars. It was applied to High School students of a public school in the Santa Catarina state, Brazil. The results of our investigation indicate the possibility to include Astrophysics topics in teaching Physics within the context of Thermodynamics. We have observed the interest of the students in Thermodynamics following this approach. We believe this work will be a reference of easy access and can help teachers and students to learn more about concepts of Thermodynamics by this new road.

**Keywords:** Physics Teaching. Thermodynamics. Stars.



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>17</b>
<b>3 DESCRIÇÃO DO PRODUTO INSTRUCIONAL DESENVOLVIDO.....</b>	<b>21</b>
<b>4 IMPLEMENTAÇÃO DO PRODUTO INSTRUCIONAL DESENVOLVIDO 23</b>	
4.1 DESCRIÇÃO DO AMBIENTE ESCOLAR.....	24
4.2 RECEPÇÃO DO MATERIAL PELOS ALUNOS.....	24
4.3 METODOLOGIA E AVALIAÇÃO.....	24
4.4 CRONOGRAMA DE IMPLEMENTAÇÃO, OBJETIVOS E ATIVIDADES..	26
4.5 RELATO DAS AULAS.....	29
<b>5 RESULTADOS E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>37</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>47</b>
<b>APÊNDICE A – Formação e Evolução Estelar.....</b>	<b>49</b>
<b>APÊNDICE B – Experimento: Medindo a Temperatura Efetiva do Sol.....</b>	<b>115</b>
<b>APÊNDICE C – Site: Evolução Estelar.....</b>	<b>121</b>
<b>APÊNDICE D – Questionário de Investigação Inicial.....</b>	<b>123</b>
<b>APÊNDICE E – Questionário de Investigação Final.....</b>	<b>125</b>
<b>APÊNDICE F – Avaliação Final.....</b>	<b>127</b>



## 1 INTRODUÇÃO

Espera-se que o ensino de Física no Ensino Médio contribua para que o estudante possa gerar significados sobre o mundo natural a partir do conhecimento que é construído ativamente por ele em conjunto com os colegas e com o professor que deve ser o mediador desta construção.

Infelizmente, a Física na Educação Básica tem se reduzido a um treinamento para a aplicação de fórmulas na resolução de problemas artificialmente formulados ou puramente abstratos que não geram quase ou nenhum significado palpável ao estudante. Este tipo de abordagem, demasiadamente distante dos conhecimentos que os estudantes têm do mundo, não os permite reconhecer a aplicação dos conteúdos no cotidiano, sendo poucos os alunos que relacionam os fenômenos presentes do dia a dia com a Física que se aprende na escola. Por esses e outros fatores, a Física tem sido considerada por muitos, uma disciplina carregada de fórmulas matemáticas complicadas.

Muitos professores e pesquisadores defendem que essa forma de ensino deve ser substituída por um ensino que mobilize a atividade do aluno ao invés de favorecer sua passividade. Segundo essa corrente denominada construtivista, é importante que o aluno se envolva, comprometido com a busca de respostas e soluções para questões que sejam apresentadas pelo professor. (BORGES, 2002 apud MARIM, 2014, p. 1).

De acordo com a Proposta Curricular do Estado de Santa Catarina,

[...] para se estabelecer um diálogo real, em que alunos e professores possam efetivamente formular ideias e conferir seu aprendizado, pode-se recomendar o tratamento, desde a abertura de cada área da Física, de temas da vida diária, como equipamentos, sistemas, e situações reais [...] (SANTA CATARINA, 1998, p.142).

Nessa perspectiva, com o objetivo de dar sentido a um conteúdo tradicionalmente presente no currículo por intermédio da associação com um tema do cotidiano, desenvolvemos um material instrucional que

contextualiza o ensino de Termodinâmica com um tema bastante pertinente, a Formação e Evolução Estelar.

Ao longo de sua experiência na sala de aula o autor pôde perceber o encantamento dos alunos do ensino médio ao ouvirem falar sobre as estrelas, decidindo, portanto, empregar esforços em produzir um material com linguagem acessível que possa contribuir para a formação dos educandos. Pode-se destacar ainda como motivos para a escolha do tema:

- A necessidade da inserção de tópicos de Astrofísica no Ensino Médio, preconizada pelos Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio (PCNEM);
- A escassez de materiais que abordem temas de Astrofísica de forma simples e sem erros conceituais;
- A ausência do assunto formação e evolução das estrelas nos livros didáticos;
- A importância da Termodinâmica para o entendimento dos fenômenos cotidianos bem como para o entendimento dos processos de formação e evolução estelar.

Nas Ciências em geral, e na Física em particular, é necessário abstração e dinamismo para o entendimento de vários conceitos. Os alunos têm dificuldades para relacionar o conhecimento científico com a realidade à sua volta, o que prejudica a aprendizagem. A contextualização da Termodinâmica com a formação e a evolução estelar poderá favorecer a assimilação de conceitos de maneira mais eficiente do que o ensino dos conceitos por si só, sem nenhuma aplicação.

O produto educacional gerado poderá ser usado como um material suplementar ou alternativo para o ensino contextualizado da Termodinâmica no Ensino Médio. Além de servir de apoio para professores e alunos aprofundarem seus conhecimentos sobre o tema, poderá ainda estimular outras propostas de contextualização para o ensino de Física, bem como encorajar os docentes a promoverem uma abordagem de Astrofísica em suas aulas.

No segundo Capítulo deste trabalho apresentamos uma breve discussão sobre o referencial teórico adotado para o desenvolvimento e implementação do material instrucional. No terceiro Capítulo faz-se uma descrição do material. Segue no quarto Capítulo a descrição de sua implementação em uma turma de Ensino Médio. No quinto e último Capítulo, apresentam-se os resultados dessa implementação e são feitas

as considerações finais. O Apêndice A é o texto intitulado Formação e Evolução Estelar, principal componente do material instrucional desenvolvido, seguido do experimento intitulado Medindo A Temperatura Efetiva do Sol, no Apêndice B. O último componente do material é um site que desenvolvemos intitulado Evolução Estelar, onde descrevemos os passos para seu uso e que são descritos no Apêndice C. Finalmente, o Apêndice D, é um questionário de investigação inicial, o apêndice E corresponde a um questionário de investigação final e o Apêndice F corresponde à Avaliação Final, todos aplicados na implementação do material.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

A proposta de desenvolvimento e aplicação do material produzido está embasada nas Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN+). Estas orientações complementam os Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio (PCNEM), explicitando a articulação das competências gerais que se deseja promover com os conhecimentos disciplinares e apresenta um conjunto de sugestões de práticas educativas e de organização dos currículos que, coerente com tal articulação, estabelece temas estruturadores do ensino disciplinar na área de Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias. (Brasil, 2002).

Um dos temas estruturadores sugeridos nos PCN+ para a Física é: Universo, Terra e Vida, que traz entre outras, a possibilidade de apresentar aos alunos conhecimentos concernentes à formação e evolução estelar. Segundo o documento:

Confrontar-se e especular sobre os enigmas da vida e do universo é parte das preocupações frequentemente presentes entre jovens nessa faixa etária. Respondendo a esse interesse, é importante propiciar-lhes uma visão cosmológica das ciências que lhes permita situarem-se na escala de tempo do Universo, apresentando-lhes os instrumentos para acompanhar e admirar, por exemplo, as conquistas espaciais, as notícias sobre as novas descobertas do telescópio espacial Hubble, indagar sobre a origem do Universo ou o **mundo fascinante das estrelas** e as condições para a existência da vida como a entendemos no planeta Terra. (BRASIL, 2002, p. 78, grifo nosso).

Ainda, de acordo com os PCN+:

Para que todo o processo de conhecimento possa fazer sentido para os jovens, é imprescindível que ele seja instaurado por meio de um diálogo constante entre alunos e professores, mediado pelo conhecimento. E isso somente será possível se estiverem sendo considerados objetos, coisas e fenômenos que façam parte do universo vivencial do aluno, seja próximo, como carros, lâmpadas ou televisões, seja parte de seu imaginário, como viagens espaciais, naves, **estrelas** ou o Universo. Assim, devem ser contempladas sempre estratégias que contribuam para esse diálogo. (BRASIL, 2002, p. 83, grifo nosso).

Em consonância com os PCN+, o material instrucional desenvolvido objetiva um ensino de Termodinâmica em particular, contextualizado à formação e evolução das estrelas. A proposta permite ao professor explorar conceitos da Termodinâmica dando-lhes sentido e significados na medida em que se busca compreender o “mundo” das estrelas. Pretendemos possibilitar ao aluno, ainda que de modo singelo, uma formação que lhe assegure um entendimento maior do universo que o cerca. Os PCN+ evidenciam a necessidade de contextualizar os conteúdos com o mundo vivencial na busca por fazer os alunos adquirirem competências e habilidades que lhes permitam lidar com fenômenos naturais e tecnológicos presentes no dia a dia.

Como já mencionado neste trabalho, a Física ensinada no Ensino Médio tem mantido um distanciamento dos fenômenos naturais e tecnológicos e se reduzido a um formalismo matemático abstrato sem muita aplicação. Muitos encaram o conhecimento da física abordado na Educação Básica como sendo apenas preparatório para o vestibular e/ou necessário somente aos alunos que eventualmente frequentarão um curso de nível superior na área das ciências exatas. No entanto, os PCN+ preconizam que o Ensino Médio, etapa final da educação Básica não deve constituir-se exclusivamente como uma etapa transitória e preparatória para o Ensino Superior, instaurando a educadores um desafio para a construção de um novo ensino numa nova escola. Frente à necessidade de melhorias, é preciso identificar bons pontos de partida para a construção dessa nova escola, uma escola que prepare para a vida, qualifique o aluno para a cidadania e o capacite para o aprendizado

permanente, em eventual prosseguimento dos estudos ou diretamente no mundo do trabalho. (BRASIL, 2002). Segundo os PCN+:

Esses bons pontos de partida, entretanto, estão cercados de difíceis obstáculos, como a tradição estritamente disciplinar do ensino médio, de transmissão de informações desprovidas de contexto, de resolução de exercícios padronizados, heranças do ensino conduzido em função de exames de ingresso à educação superior. Outro obstáculo é a expectativa dos jovens – quando não de suas famílias e das próprias instituições escolares – de que os agentes no processo educacional sejam os professores, transmissores de conhecimento, enquanto os estudantes permanecem como receptores passivos, e a escola resume-se ao local em que essa transmissão ocorre. Tais expectativas equivocadas, somadas a um ensino descontextualizado, resultam em desinteresse e baixo desempenho. (BRASIL, 2002, p. 10).

Nesta perspectiva, sugerimos para a aplicação do material, uma abordagem baseada no construtivismo cognitivista, em que o ensino deve estar centrado no aluno e o professor deve se colocar como mediador, facilitador da construção do conhecimento pelos discentes, e não como transmissor de conhecimentos. Em nossa aplicação, pretendeu-se envolver os alunos na busca de respostas e soluções a questões levantadas pelo professor. Buscou-se estabelecer um diálogo no qual os estudantes tivessem efetiva participação. Para tanto, optamos por aulas expositivas e dialogadas sob a perspectiva de uma proposta dialógico - problematizadora. De acordo com Delizoicov & Angotti (1994), a prática docente foi pautada nos três momentos pedagógicos: a problematização inicial, a organização e a aplicação dos conhecimentos.

Na problematização inicial, partindo-se do mundo vivencial do estudante, apresentam-se os questionamentos e/ou as situações-problema relacionadas com o conteúdo proposto. A organização do conhecimento é o estudo propriamente dito dos conhecimentos necessários para a compreensão do conteúdo e da problematização inicial. Na aplicação do conhecimento, busca-se analisar e interpretar as situações iniciais de acordo com o conhecimento adquirido bem como aplicá-lo em novas situações-problema. Dessa forma, os três momentos

pedagógicos favorecem o estabelecimento de uma dinâmica dialógica que contribui para a construção e reconstrução do conhecimento em sala de aula, estando em pleno acordo com o que preconizam os PCN+.

Faz parte do material instrucional desta Dissertação, um experimento que tem, entre outras, a finalidade de despertar nos alunos o espírito investigativo. Segundo os PCN+:

É indispensável que a experimentação esteja sempre presente ao longo de todo o processo de desenvolvimento das competências em Física, privilegiando-se o fazer, manusear, operar, agir, em diferentes formas e níveis. É dessa forma que se pode garantir a construção do conhecimento pelo próprio aluno, desenvolvendo sua curiosidade e o hábito de sempre indagar, evitando a aquisição do conhecimento científico como uma verdade estabelecida e inquestionável. (BRASIL, 2002, p. 84).

### 3 DESCRIÇÃO DO PRODUTO INSTRUCIONAL DESENVOLVIDO

O produto instrucional desenvolvido e aplicado é composto por:

- Um texto intitulado: Formação e Evolução Estelar (Apêndice A);
- Um experimento sobre radiação térmica, intitulado: Medindo a Temperatura Efetiva do Sol (Apêndice B);
- Um site interativo intitulado: Evolução Estelar (Apêndice C).

O material foi desenvolvido para professores de Física da Educação Básica que desejam enriquecer seus conhecimentos e suas aulas trabalhando conceitos de Termodinâmica contextualizados com a Formação e Evolução Estelar. O produto foi construído a partir de ampla pesquisa na literatura correspondente e tem como inspiração principal o livro *Astronomia e Astrofísica* dos autores Kepler de Souza Oliveira Filho e Maria de Fátima Oliveira Saraiva. O material instrucional está de acordo com os Parâmetros Curriculares Nacionais e o tema de trabalho proposto é sugerido na Base Nacional Comum Curricular.

No texto *Formação e Evolução Estelar*, descreve-se sobre a formação e a evolução das estrelas e exploram-se os principais conceitos termodinâmicos envolvidos nesse contexto. Por se tratar de um texto destinado ao Ensino Médio, prezou-se por discutir os conteúdos com uma linguagem simples e objetiva, de forma a tornar a leitura agradável e significativa. É útil deixar claro que um estudo mais aprofundado e detalhado das propriedades físicas das estrelas, requer o domínio de muitos campos da Física, assim como de Matemática e Cálculo Computacional avançados. Esse tipo de descrição seria incoerente com o nível de ensino para o qual o produto é destinado.

No primeiro Capítulo, o texto introduz o tema relativo à formação e evolução estelar, apontando para a importância do assunto e sua relação com a Termodinâmica. No segundo Capítulo é discutido o conceito de constelação e a importância das constelações para os povos antigos, bem como suas aplicações atuais. São exemplificadas algumas constelações visíveis a olho nu e de simples identificação, como por exemplo, a constelação de Órion. No terceiro Capítulo, discutem-se as principais propriedades físicas do meio interestelar e são apresentadas algumas imagens de nebulosas ou berçários de estrelas. No quarto Capítulo explora-se o principal elemento químico presente nas estrelas, o hidrogênio, e deixa-se claro que a mecânica quântica é a teoria que dá

conta do estudo do mundo microscópico. Ainda nesse Capítulo são discutidas a força elétrica e a lei de Coulomb. O quinto Capítulo é um breve resumo do desenvolvimento histórico da resposta para a questão: Qual é a fonte de energia das estrelas? O sexto Capítulo aborda o nascimento de uma estrela destacando os principais processos físicos envolvidos. Discute-se a oposição entre a pressão térmica e a pressão gravitacional bem como o papel da temperatura para o início das reações termonucleares. No Capítulo sete discutem-se os conceitos de temperatura e calor e as leis da Termodinâmica no contexto do nascimento das estrelas. Através do modelo de gás ideal se exemplifica uma aplicação da 1ª lei da Termodinâmica no processo de contração de uma protoestrela. Ainda neste capítulo são usadas diversas analogias para se explicar o conceito de entropia. No oitavo Capítulo é explorada a fusão nuclear, fenômeno físico fundamental numa estrela. Em seguida, no Capítulo nove é abordada a fissão nuclear bem como suas aplicações, enfatizando-se o poder devastador de uma bomba nuclear e o uso da fissão em reatores nucleares. O décimo Capítulo trata da radiação térmica no contexto do estudo das estrelas. Discute-se a radiação de corpo negro e a catástrofe do ultravioleta introduzindo-se a quantização da energia e as leis de Stefan-Boltzmann e de Wien. No décimo primeiro Capítulo é discutida a espectroscopia, principal método de obtenção de informação das estrelas. Esse Capítulo aborda as leis de Kirchhoff para a espectroscopia e a dependência dos espectros com a temperatura. Ainda no Capítulo onze são apresentadas a classificação espectral e a classificação de luminosidade das estrelas e faz-se uma introdução à mecânica quântica com o intuito de explicar o surgimento das linhas de emissão e absorção nos espectros atômicos, bem como a influência da temperatura nesses espectros. No Capítulo doze explora-se o diagrama H-R, dando-se ênfase a sua utilidade no estudo das estrelas. O décimo terceiro Capítulo é uma abordagem da Sequência Principal, estágio de vida das estrelas de maior duração. Discute-se a relevância da massa como determinante tanto nesse estágio como nos estágios finais que culminam na morte das estrelas. Ainda no Capítulo treze, são apresentados os tipos de estrelas da Sequência Principal de acordo com as suas massas. Finalmente, no décimo quarto e último Capítulo, discutem-se os estágios finais da evolução das estrelas e a morte desses astros. No final desse Capítulo apresenta-se um quadro resumo das etapas da evolução estelar.

O experimento Medindo a Temperatura Efetiva do Sol consiste numa aplicação dos conhecimentos sobre a radiação térmica presentes no texto descrito anteriormente. O objetivo é medir a temperatura

efetiva do Sol através da constante solar, definida como a energia por unidade de tempo e por unidade de área que atinge perpendicularmente a superfície terrestre. Para tanto, utiliza-se a equação fundamental da calorimetria para calcular a quantidade de energia (sob a forma de calor) recebida do Sol, medindo-se a variação de temperatura de certa quantidade de água. É utilizado ainda o conceito de luminosidade juntamente com a lei de Stefan-Boltzmann.

A atividade experimental contribui para que o aluno seja ativo no processo de ensino e aprendizagem, desperta a curiosidade, instiga o espírito científico, e provoca a reflexão sobre o conteúdo aprendido.

O experimento Medindo a Temperatura Efetiva do Sol é simples de se realizar e requer a utilização de material de baixo custo. Os procedimentos foram descritos em detalhes e as equações apresentadas passo a passo. É necessário, no entanto, a intervenção do professor para o sucesso da atividade. A parte final do roteiro experimental traz um questionário que faz os estudantes pensarem sobre a atividade realizada e sobre as causas do erro experimental obtido. Deseja-se que os estudantes reflitam por si só na absorção da energia pela atmosfera e nos efeitos da latitude como determinantes para a diferença entre a temperatura obtida e a temperatura efetiva teórica do Sol.

Com o intuito de complementar o texto (principal componente do material) foi desenvolvido o site Evolução Estelar. O desenvolvimento do site deu-se em parte no contexto da carga horária da disciplina Atividades Computacionais para o Ensino Médio e Fundamental, componente do currículo do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física. O site apresenta uma síntese (rica em imagens) da evolução estelar apresentada no texto. Pretende-se chamar a atenção dos alunos com a riqueza de imagens, fazendo-os interagir e ao mesmo tempo revisar o conteúdo apresentado nesta Dissertação. No Apêndice C são apresentados os detalhes de como acessar e utilizar esse site.

#### **4 IMPLEMENTAÇÃO DO PRODUTO INSTRUCIONAL DESENVOLVIDO**

Após o desenvolvimento do material instrucional, aplicamos o mesmo com o intuito de verificar sua aceitação e eficácia no processo de ensino e aprendizagem. Este Capítulo é o relato da implementação do material e da metodologia utilizada, bem como da recepção e avaliação do material por parte dos alunos.

#### 4.1 DESCRIÇÃO DO AMBIENTE ESCOLAR

O material instrucional foi aplicado em uma turma de 2º ano do Ensino Médio do período matutino, composta de 25 alunos com idades entre 15 e 17 anos, da Escola de Educação Básica Gracinda Augusta Machado, situada no município de Imbituba, estado de Santa Catarina. A proposta se deu nas aulas de Física durante o 2º bimestre do ano letivo de 2016 e contou ao todo com 22 aulas de 38 minutos, totalizando 11 semanas de duração.

A Escola de Educação Básica Gracinda Augusta Machado é uma escola pública estadual que foi fundada em 1952, no princípio com turmas de Ensino Fundamental e que começou a oferecer o Ensino Médio somente em 2010. Existem atualmente na escola, 9 turmas de séries iniciais, 10 turmas de anos finais do Ensino Fundamental e 7 turmas de Ensino Médio. O principal espaço utilizado na aplicação do projeto foi o laboratório de informática, que dispõe de 8 computadores em funcionamento, uma lousa digital e um projetor multimídia.

#### 4.2 RECEPÇÃO DO MATERIAL PELOS ALUNOS

Os alunos receberam a proposta e o material com muito entusiasmo. Num primeiro momento foi anunciado a implementação do material e o tema proposto e, em seguida, foi aplicado um questionário investigativo (Apêndice D) com o objetivo de verificar os conhecimentos prévios sobre o assunto bem como os interesses e expectativas sobre o tema. Buscando mais autenticidade nos resultados, foi pedido aos alunos que não se identificassem. Verificou-se que, dos 20 alunos que responderam ao questionário, 6 declaram estar muito interessados pelo assunto, 7 declaram estar interessados, 6 declaram estar razoavelmente interessados e apenas 1 aluno alegou não ter interesse. Com relação à expectativa, 8 deles declaram ter muitas expectativas, 11 declaram ter algumas expectativas e apenas 1 alegou não tê-las. Os números nos permitem afirmar que os alunos da turma tinham interesse e expectativas com a implementação do material.

#### 4.3 METODOLOGIA E AVALIAÇÃO

O material instrucional foi aplicado em 11 encontros de 2 horas-aula cada. As aulas foram expositivas e dialogadas, sob a perspectiva de uma proposta dialógico - problematizadora. De acordo com Delizoicov & Angotti (1994), a prática docente foi pautada nos três momentos

pedagógicos: a problematização inicial, a organização e a aplicação dos conhecimentos.

O foco da aplicação foi o ensino e aprendizagem de conceitos da Termodinâmica relacionados com a formação e evolução estelar. O ensino foi centrado no aluno, ao passo que o professor se colocou como mediador na construção do conhecimento. O aluno sempre foi instigado a participar da aula, contribuindo com suas ideias para as discussões e expressando seus pensamentos e compreensões sobre o tema. Os estudantes foram incentivados a aprender através do trabalho em grupo. Buscou-se também diversificar as tarefas e atividades, tornando-as atraentes. Ao longo das aulas e também ao final da proposta foram coletadas informações (de forma verbal e escrita) sobre a satisfação dos alunos com relação ao projeto, a sua aprendizagem e relevância do tema.

Foi feito uso de giz, quadro negro, computador e projetor multimídia. Como recurso didático principal foi utilizado o texto Formação e Evolução Estelar (Apêndice A), que ficou disponível aos alunos nos computadores do laboratório de informática, nos *smartphones* e *notebooks* próprios e também numa versão impressa na secretaria da escola para xerox.

Os alunos foram avaliados através de:

- Participação nas discussões e envolvimento nas atividades propostas.
- Resolução de exercícios de revisão como tarefa para casa.
- Elaboração de sínteses relativas aos conteúdos abordados.
- Produção de um texto dissertativo final sobre os conteúdos trabalhados.

A avaliação é um elemento importante da prática pedagógica, aqui entendida como parte do processo de ensino e aprendizagem, um elemento que possibilita obter informações sobre o desempenho e o processo. Ela indica estratégias que podem ser adotadas para superar os pontos fracos. Não pode ser vista como um fim em si mesmo ou como um elemento de punição. Ela é individual, não pode ser usado como um elemento comparativo e conseqüentemente gerador de diferenças sociais. Nesta perspectiva, buscamos compreender os avanços individuais dos estudantes e a qualidade de seu aprendizado, bem como o seu envolvimento nas atividades sugeridas.

#### 4.4 CRONOGRAMA DE IMPLEMENTAÇÃO, OBJETIVOS E ATIVIDADES

Segue abaixo o cronograma de implementação do material instrucional constando os conteúdos trabalhados, os objetivos e as atividades desenvolvidas.

Quadro 1 – Cronograma de implementação do material instrucional.

CRONOGRAMA DE IMPLEMENTAÇÃO DO MATERIAL INSTRUCIONAL				
ENCONTRO (2 horas-aula)	DATA	CONTEÚDO	OBJETIVOS	ATIVIDADES
1º	10/05	Introdução à Formação e Evolução Estelar.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Apresentar a proposta e compartilhar o material;</li> <li>- Verificar interesses e expectativas;</li> <li>- Problematicar e introduzir os conteúdos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aplicação de questionário investigativo de concepções prévias, interesse e expectativas dos alunos;</li> <li>- Apresentação geral do projeto e discussão dos objetivos, métodos e avaliação;</li> <li>- Apresentação do material instrucional e cronograma;</li> <li>- Exposição do conteúdo em slides;</li> </ul>

2º	17/05	Constelações;  Berçário de Estrelas.	- Definir constelação; - Discutir o meio interestelar e as condições propícias à formação de uma estrela; - Incentivar o uso de softwares para o aprendizado;	- Exposição do conteúdo em slides; - Apresentação e uso do software <i>Stellarium</i> ; - Entrega da síntese do conteúdo da aula anterior.
3º	24/05	O átomo de Hidrogênio;  A Fonte de Energia das Estrelas;  O Nascimento de uma Estrela.	- Discutir o átomo de Hidrogênio; - Apresentar resumidamente o desenvolvimento histórico sobre a fonte de energia das estrelas; - Compreender o nascimento de uma estrela.	- Exposição do conteúdo em slides; - Entrega da síntese do conteúdo da aula anterior.
4º	31/05	As Leis da Termodinâmica.	- Discutir as leis da termodinâmica no contexto da formação de uma estrela;	- Exposição do conteúdo em slides; - Entrega da síntese do conteúdo da aula anterior.
5º	07/06	Fusão Nuclear;  Fissão Nuclear e Reatores Nucleares.	- Compreender o que é fusão e fissão nuclear; - Discutir vantagens e desvantagens com relação ao uso da energia nuclear.	- Exposição do conteúdo em slides; - Entrega da síntese do conteúdo da aula anterior.
6º	14/06	Radiação Térmica.	- Compreender o fenômeno da radiação térmica; - Entender como o conhecimento sobre a radiação térmica auxilia no estudo das estrelas;	- Exposição do conteúdo em slides; - Uso de um simulador de curva espectral; - Entrega da síntese do conteúdo da aula anterior.

7º	21/06	Radiação Térmica;  Experimento: Medindo a Temperatura Efetiva do Sol.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Realizar uma atividade prática para instigar o espírito científico nos alunos;</li> <li>- Relacionar o conhecimento adquirido com a experimentação;</li> <li>- Medir indiretamente a temperatura do Sol.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Discussão do Experimento;</li> <li>- Realização do experimento em grupos;</li> <li>- Aplicação de questionário do experimento;</li> <li>- Entrega da síntese do conteúdo da aula anterior.</li> </ul>
8º	28/06	Espectroscopia	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Compreender as leis da espectroscopia;</li> <li>- Entender como se pode obter informações sobre as estrelas;</li> <li>- Discutir fenômenos quânticos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Exposição do conteúdo em slides;</li> <li>- Entrega do questionário relativo ao experimento.</li> </ul>
9º	05/07	O Diagrama H-R;  A Sequência Principal.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Definir o diagrama H-R;</li> <li>- Compreender a utilidade do diagrama H-R no estudo das estrelas;</li> <li>- Explorar a sequência principal do diagrama H-R.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Exposição do conteúdo em slides;</li> <li>- Entrega da síntese do conteúdo</li> </ul>
10º	12/07	Estágios Finais da Evolução e Morte das Estrelas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Explorar os estágios avançados da evolução estelar;</li> <li>- Compreender como as estrelas morrem;</li> <li>- Descobrir o que resta após a morte de uma estrela.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Exposição do conteúdo em slides;</li> <li>- Entrega da síntese do conteúdo da aula anterior.</li> </ul>

11°	19/07	Evolução Estelar	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Revisar o assunto: Evolução Estelar;</li> <li>- Visualizar imagens de estrelas em seus mais diversos estágios;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Uso do Site: Evolução Estelar;</li> <li>- Aplicação de questionário investigativo sobre o site;</li> <li>- Aplicação de questionário investigativo final sobre o projeto;</li> <li>- Produção individual de um texto final sobre o projeto.</li> <li>- Entrega da síntese do conteúdo da aula anterior.</li> </ul>
-----	-------	------------------	--	---

Fonte: Desenvolvido pelo Autor.

#### 4.5 RELATO DAS AULAS

Esta seção é o relato das aulas sob a perspectiva do envolvimento e participação dos alunos.

**1º Encontro:** No início deste encontro foi divulgado aos alunos que seria implementada uma nova proposta nas aulas de Física. Antes da apresentação detalhada da proposta foi solicitado que cada um respondesse a um questionário inicial (Apêndice D) sem se identificar. Após todos responderem ao questionário, a turma foi solicitada a se dirigir para a sala de informática, onde através de uma apresentação em Power Point foi apresentado o projeto, os objetivos, a metodologia e a avaliação. Os alunos ficaram atentos e curiosos a respeito e tiraram algumas dúvidas sobre a avaliação. Em seguida foi apresentado o cronograma de aplicação e compartilhado o texto principal da proposta. Os alunos já puderam visualizar o texto nos celulares e também nos computadores da sala. Após essa conversa inicial, novamente através de uma apresentação em Power Point foi introduzido o tema: Formação e Evolução Estelar. Foram apresentadas as seguintes questões:

- O que é uma estrela?
- Do que são formadas?

- Por que emitem luz?
- Há quanto tempo existem?
- A que distância se encontram de nós?
- Sempre existirão?
- Qual é a estrela mais próxima da Terra?
- Quais as partes da Física que estão relacionadas ao estudo das estrelas?

As respostas dos alunos divergiram bastante do conhecimento científico que se tem a respeito. Através do diálogo, percebeu-se que a grande maioria nunca havia lido ou estudado algo sobre o tema. No entanto, chamou a atenção o envolvimento e a participação de alunos que em outras aulas até então, sempre se mantinham calados. Os alunos ficaram muito curiosos e queriam as respostas, todavia elas não foram dadas, ressaltando que se iria estudar passo a passo a formação e a evolução estelar. Em seguida foi destacado que as estrelas nascem, evoluem e morrem e foram apresentados os conteúdos presentes no texto, dando-se ênfase ao papel da Termodinâmica nesse contexto. Por fim, foi destacado o conteúdo do próximo encontro e solicitado aos alunos que elaborassem uma síntese de 10 a 20 linhas e um questionamento, ambos referentes ao próximo conteúdo, para ser entregue na próxima aula. Questionados a respeito da aula, a maioria avaliou como boa e interessante e mostraram-se motivados para o próximo encontro.

**2º Encontro:** Inicialmente, os alunos foram questionados a respeito da leitura e elaboração da síntese dos capítulos do texto para esta aula. Alguns relataram que gostaram bastante dos capítulos, sendo uma leitura agradável e interessante. Em seguida iniciou-se a apresentação do conteúdo em slides. Durante a aula, a classe se mostrou bem participativa, sempre respondendo as questões problematizadoras. Os alunos ficaram bem empolgados com relação às constelações apresentadas que podem ser visualizadas a olho nu, como a constelação do Cruzeiro do Sul e do Órion, por exemplo. Na segunda parte do encontro foi discutido a respeito dos berçários de estrelas. Vários alunos fizeram perguntas sobre como as estrelas nascem num berçário, no entanto foi ressaltado que a resposta seria construída no próximo encontro. Os alunos ficaram encantados com as imagens apresentadas da nebulosa de Órion, da nebulosa da Águia e da nebulosa da Cabeça de Cavalos. Na parte final foi apresentado o software Stellarium, que despertou a curiosidade e o encantamento em vários discentes. Muitos foram os questionamentos com relação ao seu funcionamento. Em

seguida foi deixado um tempo livre para que em grupos, eles pudessem explorar o software nos computadores da sala de informática. Por fim, foi destacado o conteúdo do próximo encontro e solicitado aos alunos que elaborassem a síntese, a ser entregue na próxima aula, referente ao próximo conteúdo. Questionados a respeito da aula, a maioria disse gostar muito e ter aprendido coisas novas e interessantes, destacando o uso do Stellarium.

**3º Encontro:** No início deste encontro foram recolhidas as sínteses do conteúdo das aulas do encontro anterior. Em seguida foi discutido o átomo de Hidrogênio, momento em que os alunos estavam concentrados e não houve muitas questões relativas ao conteúdo. Percebeu-se que alguns alunos tinham alguns conhecimentos relativos ao átomo de Hidrogênio das aulas de química. A discussão foi encaminhada no sentido de explicitar a importância do estudo do átomo de Hidrogênio para o estudo das estrelas. Em seguida foi abordada a fonte de energia das estrelas, começando-se por uma discussão bem geral a respeito das formas de energia que se utiliza no dia a dia. Neste momento os alunos participaram bastante, dando exemplos de tipos de energia que utilizam. A discussão foi encaminhada no sentido de se mostrar que todas as formas de energia que utilizamos só estão disponíveis a nós, graças à energia que o Sol emite. Em seguida, foi feita aos alunos a seguinte questão: Qual a fonte de energia do Sol? Foi pedido que os alunos pensassem a respeito no intervalo entre as aulas. Na segunda aula do encontro os alunos foram novamente questionados sobre a fonte de energia do Sol. Um aluno disse ter alguma coisa haver com os gases e os demais disseram não saber a resposta. Foi feita então um resumo histórico sobre as hipóteses que foram levantadas pelos cientistas para responder a esta questão. Os estudantes acharam bem interessante a maneira como se pensava na época. Em seguida, iniciou-se a discussão sobre o nascimento das estrelas, parte da aula mais aguardada pelos alunos. Ao longo da explicação vários deles fizeram perguntas no que diz respeito à força gravitacional e ao processo de nascimento das estrelas. Questionados ao final da aula sobre o encontro, alguns estudantes relataram achar muito interessante e também se mostraram satisfeitos com o conteúdo ministrado.

**4º Encontro:** Iniciou-se este encontro fazendo-se a seguinte questão: O que é Termodinâmica? Os alunos apresentaram algumas concepções baseadas no que já haviam lido no material. Em seguida foram discutidos os objetivos da Termodinâmica e a sua relação com as

estrelas. Na sequência foram revisados os conceitos de calor e temperatura e discutida a 1ª lei da Termodinâmica no contexto da formação das estrelas. Os discentes foram bem participativos e fizeram questões sobre o calor emitido e a temperatura de uma estrela. Na segunda aula do encontro foi discutida a 2ª lei da Termodinâmica a partir de um questionamento envolvendo uma estrela já formada. Novamente os alunos participaram bastante, principalmente quando foram usadas analogias para se elucidar o conceito de entropia. Percebeu-se claramente que a contextualização e as analogias prenderam a atenção dos alunos na aula bem como aumentou a participação. No fim do encontro os alunos foram questionados com relação ao andamento do projeto. Eles relataram estarem mais envolvidos nas aulas e estarem curiosos para saber mais sobre as estrelas.

**5º Encontro:** Iniciou-se este encontro com uma revisão do modelo atômico e uma introdução da força elétrica bem como da força nuclear. Os alunos responderam aos questionamentos iniciais sobre o átomo, tendo maiores dificuldades na tentativa de explicar a coesão atômica. Eles demonstraram interesse em entender a força nuclear e os processos de fusão e fissão. Em seguida foi discutida a fusão nuclear com o exemplo típico da fusão de Hidrogênio em Hélio nas estrelas e novamente enfatizou-se a conversão de massa em energia, agora com exemplos numéricos. Os alunos ficaram impressionados com a quantidade de energia convertida por segundo no Sol. Na segunda parte do encontro iniciou-se a discussão da fissão nuclear e dos isótopos radioativos no contexto das explosões das bombas nucleares em Hiroshima e Nagasaki. Essa foi a parte do encontro que os alunos mais se envolveram e tiveram curiosidade. Eles fizeram uma série de questões sobre as bombas de fissão e os seus efeitos. Alguns comentaram a respeito de documentários que haviam assistido sobre isso. Procurou-se estabelecer a conexão entre as explosões e os processos que ocorrem no interior das estrelas, valendo-se da curiosidade dos discentes. Na parte final da aula foi discutida a questão da “geração” de energia elétrica no mundo e o funcionamento dos reatores nucleares, destacando-se as vantagens e as desvantagens do uso da energia nuclear. Eles ficaram surpresos ao saber que o Brasil possui reatores nucleares e fizeram alguns questionamentos como, por exemplo: O que aconteceria caso um reator nuclear explodisse? Por último foi discutido sobre as pesquisas que vem sendo feitas a respeito da fusão nuclear controlada, o que também gerou bastante envolvimento.

**6º Encontro:** Este encontro foi iniciado com uma problematização a respeito da energia emitida pelas estrelas. A principal questão colocada foi: Quais as formas de energia que as estrelas emitem e como essa energia se propaga? Em geral as respostas convergiram para a energia térmica como a principal forma de energia emitida pelas estrelas. Os alunos não souberam especificar corretamente como essa energia se propaga. A partir da problematização inicial definiu-se onda eletromagnética e se explorou o espectro eletromagnético desde as ondas de baixas frequências até as partículas cósmicas. Percebeu-se esse assunto como total novidade para os alunos que por sua vez participaram efetivamente na discussão do espectro com uma série de questionamentos. Em seguida, definiu-se radiação térmica e foram apresentadas imagens de corpos aquecidos emitindo luz. Nesse ponto os alunos ficaram impressionados com o fato de que até mesmo o corpo humano emite ondas eletromagnéticas e ainda com o fato de que a lâmpada incandescente funciona com base no princípio discutido. Em seguida, foram apresentadas diferentes curvas espectrais de corpo negro apontando-se para a catástrofe do ultravioleta. Essa parte requereu um tempo maior, pois os alunos apresentaram algumas dificuldades de compreensão. Discutiu-se ainda a quantização como solução para a catástrofe do ultravioleta em termos mais gerais e a partir das curvas espectrais trabalhou-se as leis de Wien e de Stefan-Boltzmann, discutindo-se a possibilidade da determinação da temperatura efetiva das estrelas através dessas leis. Nessa parte da aula os alunos interagiram menos do que de costume. A participação dos discentes aumentou quando foram discutidas as cores das estrelas em função da temperatura, mostrando-se, por exemplo, a impossibilidade de vermos uma estrela verde. Eles ficaram muito entusiasmados com o simulador de curva espectral apresentado. No final do encontro foram recolhidas as sínteses do conteúdo do dia.

**7º Encontro:** Este encontro foi um dos mais aguardados pelos alunos. Tratava-se do encontro destinado à realização do experimento Medindo a Temperatura Efetiva do Sol. Eles estavam curiosos em saber como obteríamos essa temperatura. Inicialmente foi relembrado o conceito de temperatura efetiva e definido a constante solar. Discutiu-se também a equação fundamental da calorimetria. Na sequência foram desenvolvidos todos os passos matemáticos até encontrarmos a equação que fornece a temperatura efetiva em função da altura da coluna de água, do comprimento e da sombra do bastão, do tempo e da variação da

temperatura (para mais detalhes, ver Apêndice B). Durante a explicação matemática os alunos mostraram muitas dificuldades, que foram pouco a pouco sanadas. Concluída essa etapa, passamos a realização do experimento. Em grupos de três componentes, os estudantes foram conduzidos grupo a grupo ao pátio da escola, onde podíamos ter acesso à luz do Sol. O experimento não foi realizado por todos ao mesmo tempo porque tínhamos apenas um termômetro (do tipo culinário, com boa precisão). O clima favoreceu bastante, o céu estava sem nuvens e fazia bastante calor. Por uma questão de tempo, optou-se por levar o recipiente de isopor já pintado de preto. Após cada grupo encerrar a atividade, retornava à sala, onde deveria responder o questionário experimental. A atividade foi bem interessante, os alunos estavam bastante motivados e participativos. Por mais que o experimento fosse simples, para os alunos ele foi fantástico. Eles interagem, fazem perguntas e estavam ansiosos para calcular a temperatura. Houve inclusive, certa disputa entre os grupos para ver quem encontraria a temperatura mais próxima ao valor teórico. Após todos concluírem o experimento, houve a necessidade de orientar os estudantes no cálculo da temperatura, uma vez que eles apresentaram várias dificuldades com relação à manipulação da calculadora. Os alunos ficaram encantados com a boa aproximação entre o valor da temperatura obtida e o valor teórico. Eles relataram verbalmente que a atividade foi muito divertida e interessante, porque segundo eles “deu certo”. No fim deste encontro foi entregue um breve questionário investigativo sobre o experimento a ser entregue na próxima aula.

**8º Encontro:** Iniciou-se este encontro com a seguinte questão: Qual a principal fonte de informações sobre as estrelas? Apenas um aluno fez menção à luz que elas emitem. Em seguida definiu-se a espectroscopia aplicando-a no contexto do estudo das estrelas. Os alunos conseguiram entender que os átomos possuem espectros de absorção e emissão que os caracterizam. Eles consideraram essa informação bastante relevante. Foi ressaltada a influência da temperatura nos espectros e apresentada a classificação espectral das estrelas. Apresentou-se também alguns espectros estelares comparando-se com os espectros atômicos na tentativa de se identificar a presença de determinados elementos químicos nas estrelas. Os alunos foram instigados a identificar algumas dessas linhas e responderam bem à proposta, dando a entender que compreenderam a técnica. A segunda parte do encontro foi destinada ao entendimento das causas das linhas espectrais de absorção e emissão a partir da quantização. Essa parte da aula foi um pouco maçante, notou-

se que a exposição continha muitas informações tornando difícil a assimilação do conteúdo por parte dos alunos. Eles mesmos acharam o conteúdo do segundo período mais complicado. Ao longo das explicações, volta e meia os alunos “fugiam” do tema do dia fazendo questões relacionadas com a morte das estrelas, evidenciando suas expectativas com relação à parte final da proposta.

**9º Encontro:** Iniciou-se este encontro com uma breve revisão dos conceitos de luminosidade e temperatura. Em seguida definiu-se o diagrama H-R e foi apresentado um exemplo desse diagrama tomando-se o Sol como referência. Foram explicadas as diferentes regiões do diagrama H-R dando ênfase a sua utilidade para o estudo das estrelas. Os alunos compreenderam bem a disposição dos pontos no diagrama. Alguns a princípio confundiram a disposição dos pontos no diagrama H-R com a disposição espacial das estrelas, o que reforçou nossa análise no sentido de deixar bem esclarecido esse aspecto. Em seguida foi explorada a sequência principal do diagrama H-R dando-se ênfase a influência da massa como determinante para a posição de uma estrela nesse diagrama. Os estudantes fizeram algumas questões a respeito dos tipos de estrelas da Sequência Principal. De forma geral, a participação dos alunos neste encontro foi menor do que nas aulas anteriores. Mais uma vez os questionamentos divergiram do assunto apontando principalmente para o que diz respeito à morte das estrelas. Foram dadas algumas respostas rápidas e superficiais com relação à morte das estrelas deixando-se bem claro que esse assunto seria o próximo a ser trabalhado em detalhes.

**10º Encontro:** Este encontro foi o mais esperado pelos alunos. Muitos deles já haviam feito várias questões sobre a morte das estrelas. Iniciou-se discutindo a saída das estrelas da sequência principal com o fim do combustível hidrogênio no núcleo. Os alunos compreenderam que quando o combustível da estrela acaba ela inicia a sua velhice. Mais uma vez foi discutida a influência da massa para o destino final das estrelas. Alguns alunos esboçaram dúvidas com relação ao fato de que quanto maior a massa de uma estrela, menor é o seu tempo de vida. Eles esperariam que quanto maior fosse a massa, maior seria o tempo de vida. A partir dessa questão se discutiu a taxa de consumo do combustível, que é muito maior para as estrelas mais massivas, e os estudantes conseguiram compreender essa questão. Em seguida foram discutidos os estágios finais da evolução das estrelas para os diferentes intervalos de massas considerados na literatura. Os alunos prestaram

bastante atenção esboçando fascínio e apresentando questões, principalmente quando se apresentou as imagens de nebulosas planetárias e supernovas. Uma das questões levantadas pelos estudantes foi: “Os elementos químicos criados nas estrelas são os mesmos que existem na Terra”? Eles se impressionaram ao ouvir que sim. Os alunos também fizeram várias perguntas sobre as anãs brancas, estrelas de nêutrons e buracos negros, ficando impressionados com as suas densidades, por exemplo. De forma geral, a participação e envolvimento dos alunos neste encontro foi bem ampla. Eles demonstraram bastante interesse e satisfação com as aulas. No fim deste encontro foram recolhidos os exercícios de tarefa e ressaltado que o próximo encontro seria o fechamento do projeto com o uso do site, aplicação de questionário final e elaboração de um texto dissertativo, sendo muito importante a presença de todos.

**11º Encontro:** Neste encontro os alunos foram solicitados a explorarem o site Evolução Estelar, já disponível nos computadores da sala de informática. Em grupos de três, eles deveriam fazer as leituras com o intuito de revisarem a Evolução Estelar estudada no encontro anterior. Foi solicitado também aos grupos que respondessem a um questionário com relação ao uso do site. Percebeu-se um bom envolvimento dos estudantes na atividade. Questionados verbalmente com relação ao site, os alunos disseram que ele é bastante interessante principalmente no que diz respeito à possibilidade de trocar as massas e a visualização das imagens. Em seguida foi solicitado que os estudantes respondessem ao questionário final do projeto. Na segunda parte do encontro os alunos foram solicitados a escreverem um texto dissertativo sobre a formação e evolução estelar. Eles foram orientados de que esse texto deveria ser a descrição do aprendizado ao longo das aulas. Os estudantes deveriam também escrever sobre essa nova experiência nas aulas de física, fazer sugestões, avaliar o material lido, as aulas e o seu aprendizado de maneira geral. Após o término dessa atividade, agradeceu-se aos estudantes pela participação e envolvimento no projeto e foram encerradas oficialmente as atividades do 2º bimestre.

**Observação:** Os exercícios de revisão foram entregues aos alunos no final de cada encontro para serem realizados como atividade extraclasse em grupos de três componentes. Ainda, acompanhavam os exercícios de revisão as seguintes questões (a serem respondidas individualmente):

1) Você gostou da aula de hoje? Justifique.

- 2) O que mais lhe chamou atenção nesta aula?
- 3) Como você avalia o seu aprendizado com relação a aula de hoje?

## **5 RESULTADOS E CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Este Capítulo é a descrição dos resultados da implementação do produto instrucional desenvolvido. Pautamo-nos na observação em sala de aula, nos relatos verbais e escritos dos alunos em cada encontro, nas sínteses elaboradas, nos questionários de investigação inicial e final e, na avaliação final do projeto.

No que diz respeito à aceitação do material, como relatamos no Capítulo 4, os estudantes receberam a proposta e o material com muito entusiasmo. Eles estavam contentes e curiosos para assistirem às aulas. Pela primeira vez, depois de um ano e meio de trabalho nessa mesma turma, notou-se empolgação, interesse e expectativas com relação às aulas de Física. Isso nos motivou a empregarmos esforços em aplicarmos o material da melhor maneira possível. Percebemos que um estudante motivado contribui para um professor motivado e vice-versa.

Os alunos apresentaram muitas dúvidas, interesses e curiosidades concernentes ao tema trabalhado. A ocorrência de discussões com a participação efetiva dos alunos, inclusive os mais tímidos, mostraram-se um traço marcante das aulas. Percebemos que o processo dialógico professor-aluno aumentava a cada aula.

Inicialmente foi constatado que a grande maioria dos estudantes nunca havia lido algo a respeito das estrelas do ponto de vista científico, o que de certa forma favoreceu nossa abordagem. A estratégia de os alunos terem que ler os textos antes das discussões para elaborarem as sínteses se mostrou válida, pois percebemos que aqueles que faziam as leituras participavam e questionavam mais do que os que não as realizavam. Apesar de não terem muito o hábito de leitura, a maioria dos alunos leu o texto e fez todas as sínteses solicitadas. Ficou claro que em alguns pontos a leitura tornou-se difícil, principalmente nos trechos que envolviam equações e, portanto, as explicações do professor nas aulas foram importantes para evitar lacunas na aprendizagem. Mas, de uma forma geral, os estudantes relataram que o texto possui uma linguagem adequada à compreensão.

O uso do software Stellarium foi um sucesso, nenhum aluno conhecia esse recurso e ficou visível o encantamento nos rostos deles. Vários estudantes baixaram o programa para usarem em casa. Nesse ponto salientamos a importância do uso das novas tecnologias como aliadas no processo de ensino e aprendizagem. Sem dúvida, o uso desse

programa complementou as discussões que foram feitas em relação às constelações, aos berçários de estrelas, etc.

As discussões que foram realizadas a respeito da fonte de energia das estrelas foram proveitosas, abrindo um leque para a discussão da geração e uso racional da energia no mundo. Os conceitos de calor e temperatura foram bem assimilados e discutidos no contexto da formação de uma estrela, assim como a conservação da energia e a 1ª lei da Termodinâmica. Percebemos claramente os benefícios do uso de analogias para a compreensão da 2ª Lei da Termodinâmica. Outro ponto que se mostrou crucial no texto e nas discussões foi a relação estabelecida entre a geração de energia nas estrelas e o funcionamento dos reatores nucleares, assim como o entendimento da produção e funcionamento das bombas atômicas.

A discussão da propagação da energia e das ondas eletromagnéticas no contexto do estudo das estrelas mostrou-se muito rica, possibilitando-nos ainda trabalhar com a relação entre essas ondas e as novas tecnologias, o que despertou o interesse e a participação dos alunos.

A discussão sobre a radiação térmica foi mais truncada, devido à própria dificuldade conceitual desse tema e as dificuldades que os alunos têm com a manipulação das equações. Sugerimos ao professor que se propor a aplicar este material, que dedique um tempo maior para esse tópico. Ainda sobre o tratamento da radiação térmica, vale a pena destacar que o uso do simulador da curva espectral permitiu um grande envolvimento e foi crucial para os alunos entenderem a relação entre temperatura e a cor das estrelas.

No que diz respeito à espectroscopia, os alunos conseguiram, além de compreender a técnica, relacionar o tema com aquilo que haviam aprendido nas aulas de química. A abordagem que se refere à explicação das linhas espectrais através da quantização e dos orbitais atômicos revelou ser um viés para se trabalhar um pouco de mecânica quântica já no 2º ano do Ensino Médio. No entanto, encontramos algumas dificuldades para trabalhar esse tema, mais uma vez percebemos que deveríamos dispor de um tempo maior para explorarmos mais lentamente algumas partes do texto e dessa forma favorecer a assimilação de alguns conceitos por parte dos alunos.

A avaliação final (Apêndice F) consistiu na elaboração de um texto dissertativo em que cada aluno deveria relatar o que aprendeu e também expressar comentários, avaliando o projeto de maneira geral. Os alunos deixaram registradas suas impressões, comentários e críticas ao projeto como um todo. A partir da análise da avaliação final pode-se

avaliar tanto o aprendizado de cada aluno como o projeto em seu aspecto global. Observamos nas respostas boa receptividade dos alunos ao texto trabalhado, metodologias e tecnologias utilizadas. Vejamos parte dos relatórios de alguns alunos:

Foi um projeto interessante, que aumentou ainda mais meu interesse sobre as estrelas, esclareceu diversas dúvidas que eu tinha, haviam ferramentas de estudo diversificadas, o texto escrito pelo professor apresenta uma linguagem fácil de ser entendida, alguns temas eram um pouco difíceis, porém haviam informações que nos ajudaram a entendê-los, nas aulas os alunos participaram e interagiram, enfim, foram aulas diferentes, interessantes e que contribuíram para o meu aprendizado. (ALUNO 1).

Admitirei que não gostava e não me dou bem em Física, mas depois desse maravilhoso projeto pude aprender uma coisa, nós tornamos as coisas mais difíceis. Então, eu adorei desse projeto tudo, tirando a parte que eu não gostei que foram os cálculos, as fórmulas, não que eu não gostei, mas é que não dá de entrar muitas coisas na cabeça, aprendi a gostar de física pois não se baseia só em conta. Eu consegui tirar minhas dúvidas ao longo das aulas, acho que o jeito em que o projeto foi elaborado foi ótimo, poderia fazer mais projetos assim para trabalhar os assuntos da física em sala de aula. Eu não posso esquecer que além de uma boa explicação o texto ficou maravilhoso. (ALUNA 2).

Eu gostei de tudo. Eu nunca gostei de física, mas essas aulas foram muito importantes para mim, pois além de ser um assunto que eu sempre tive muitas dúvidas é um assunto maravilhoso para estudar. Eu gostei muito do projeto e cada texto que eu li eu tinha mais e mais dúvidas, dúvidas estas que foram tiradas. As aulas de física ficaram muito mais interessantes ao meu ver, pois nós saímos daquela parte de contas e fórmulas chatas, claro que isso é a minha opinião e o meu ver das aulas. Então, parabéns ao professor que resolveu

fazer isso e dizer que esse projeto além de bem elaborado é também muito explicativo. Eu gostaria de dizer também que o professor deveria procurar trazer mais projetos como esse, eu adoraria que nossas aulas fossem um pouco mais assim. (ALUNA 3).

Eu gostei muito de aprender todo processo da vida das estrelas, me deixou muito curiosa sobre todos os assuntos, não gostei da parte de cálculos mais aprendi de tudo um pouco. Senti com certeza muito mais motivada a estudar. O que foi importante pra mim foi saber que quando a gente para pra escutar e querer saber sobre o assunto, a gente aprende e entende com muita facilidade e a aula se torna mais legal e interessante. Tirei todas minhas dúvidas, e podia melhorar tendo mais aulas na semana para não ficarmos esquecidos sobre todos os assuntos. Achei o texto escrito pelo professor muito bom, pois com toda a sua inteligência e organização me motivou mais ainda a querer aprender a fazer o trabalho. (ALUNA 4).

Eu gostei muito de aprender que a física não é somente cálculos, antes eu tinha essa visão fechada, mas agora entendi que a física não é só isso. Aprendi muito sobre as estrelas, coisas que eu nem imaginava que estavam relacionadas como a termodinâmica e o estudo das estrelas. Eu achei muito legal ter um professor que se dispôs a fazer algo de diferente com nossa turma, porque antes era só sala e sala, e assim ficou mais legal e motivou para estudar. (ALUNA 5).

Me senti mais motivada a estudar, pois foi uma aula melhor e mais dinâmica, foi muito bom e os textos estavam ótimos e bem explicativos. (ALUNA 6).

Foi muito interessante, eu jamais havia feito algo do tipo. Se outros professores pegassem esse método acredito que os alunos responderiam mais. (ALUNO 7).

A análise dos relatórios dos alunos mostrou que a proposta do uso do texto e as estratégias utilizadas foram exitosas. Os relatórios permitem ainda o levantamento de uma série de comentários e sugestões interessantes. Destacam-se:

- A abordagem contextualizada de um tema da física foi algo totalmente novo para a maioria dos estudantes. Percebeu-se que esse tipo de abordagem deu sentido e significado ao aprendizado dos alunos e desmistificou a visão que muitos deles tinham de que a física se reduz a aplicação de fórmulas complicadas na resolução de problemas abstratos;
- O tema escolhido de pano de fundo para trabalharmos a termodinâmica foi muito bem recebido pelos estudantes, que relataram ter muitas curiosidades e interesse em estudá-lo. Do ponto de vista motivacional, a formação e evolução estelar se mostrou um tema bastante pertinente, inclusive para se abordar mais profundamente outras partes da física como a mecânica quântica, a física nuclear, a gravitação, etc.;
- Os relatórios ecoaram “gritos de socorro” para que as próximas aulas de física tenham mais recursos didáticos num processo de ensino e aprendizagem dinâmico, diferente da abordagem tradicional, apenas dentro de sala de aula com quadro negro e giz;
- Os próprios alunos reconheceram a maior participação dos colegas nas aulas e esboçaram o desejo de que mais projetos como esse ocorram também em outras disciplinas;
- Uma aluna percebeu a necessidade de se ter mais aulas de física por semana para melhorar o aprendizado. É interessante que essa necessidade tenha sido apontada pela estudante, uma vez que o número reduzido de aulas tem sido uma das dificuldades mais citadas pelos professores de física, sobretudo por aqueles que trabalham nas redes públicas estaduais;
- A maioria dos alunos esboçou não gostar das partes do texto que envolviam fórmulas. Esse aspecto evidencia a dificuldade que os estudantes ainda possuem de trabalhar com o formalismo

matemático, apesar de ser algo bem frequente nas aulas tradicionais.

Os textos dissertativos elaborados pelos alunos na avaliação final nos possibilitam dizer que o aprendizado foi satisfatório. As descrições dos estudantes revelaram um bom grau de assimilação dos conceitos da termodinâmica e da física em geral, assim como uma boa compreensão da formação, evolução e morte das estrelas. É relevante destacar que alguns estudantes internalizaram inclusive certas coisas que estavam implícitas no projeto. O relato abaixo, por exemplo, infere a aquisição de um novo olhar sobre o empreendimento científico.

Muitos físicos batalharam muito para descobrir tudo o que sabemos hoje, cada informação, cada teste era bem calculado. Vários físicos acabaram ganhando prêmios por suas descobertas que até então eram consideradas coisas malucas e difíceis de acreditar, mas cada um deles foi muito importante na história da física, afinal o que seriam das respostas se não houvesse dúvidas para sanar? (ALUNA 8).

A comparação entre as respostas dos questionários aplicados no início e no término da proposta também forneceu indícios que corroboram com nossa afirmação de que o aprendizado dos alunos foi satisfatório. No questionário inicial, grande parte dos estudantes respondeu não saber as respostas da maioria das perguntas e boa parte das respostas estavam incorretas e por vezes totalmente infundadas. Já no questionário final, ocorreu o inverso, quase todos responderam a todas as perguntas e a maioria das respostas estava de acordo com o que havíamos discutido nas aulas.

Vale destacar que grande parte dos alunos respondeu corretamente o que é termodinâmica e percebeu fortemente a importância da termodinâmica para o estudo das estrelas. Além disso, 82% dos alunos disseram que aprenderam os conceitos da termodinâmica no contexto da formação e evolução estelar, porém quando questionados se haviam achado melhor estudar os conceitos da termodinâmica e da física em geral, associando-os ao estudo das estrelas, ou se seria melhor estudá-los separados desse contexto a turma ficou dividida, 50% responderam sim e 50% responderam não. Em geral, os que responderam sim, justificaram dizendo que o estudo da

termodinâmica de forma contextualizada ajudou a entender melhor a importância dos conceitos, enquanto os que responderam não, justificaram que o estudo separado dos conceitos proporcionaria um melhor entendimento e aprofundamento. Percebemos que o ponto crucial aqui foi o pouco tempo dedicado na exploração de determinados conceitos, devido ao volume de informações contidas no texto. Durante a implementação foi necessário chamar a atenção dos alunos para alguns conceitos físicos, uma vez que o vislumbre e a curiosidade sobre as estrelas faziam com que eles de certa forma não focassem nesses conceitos. Nesse sentido, recomenda-se que se reserve mais que 22 aulas para uma próxima implementação do material, para que haja um aprofundamento maior dos conceitos da física.

A análise do questionário final também mostrou que a maioria dos alunos teve suas expectativas iniciais em relação ao projeto atendidas e, ainda, todos os que responderam o questionário disseram que o interesse e o gosto pela Física aumentaram.

A realização da atividade experimental possibilitou aos estudantes perceberem a aplicabilidade de alguns conhecimentos adquiridos ao longo das aulas, sobretudo aqueles que dizem respeito à radiação térmica. Os alunos executaram a atividade tranquilamente, demonstrando paciência e curiosidade. Na parte dos cálculos foi necessária a intervenção do professor devido a uma série de dificuldades que os alunos apresentaram. Para uma próxima aplicação, sugerimos que o professor faça um diagnóstico prévio dos conhecimentos matemáticos dos alunos, a fim de prepará-los para a manipulação adequada das equações, evitando que esse tipo de dificuldade desvie a atenção dos alunos dos conceitos principais do experimento durante a elaboração do relatório.

As respostas do questionário experimental mostraram que os alunos conseguiram compreender a causa de usarmos um recipiente de isopor pintado de preto. Os valores obtidos para a temperatura efetiva do Sol foram bem aproximados do valor teórico, sendo que o maior erro obtido foi de aproximadamente 18% e o menor de aproximadamente 0,2%. Esses resultados evidenciam a validade do experimento proposto. Quando solicitados a escreverem as possíveis causas dos erros, as respostas dos alunos limitaram-se ao erro na leitura das medidas ou erros provenientes de arredondamento nos cálculos, além de algumas respostas infundadas. Apenas um dos grupos fez uma possível menção às absorções da energia na atmosfera, dizendo: *“O erro é devido às interferências que os raios de sol têm até atingir a Terra”*.

As respostas do questionário a respeito da atividade experimental também demonstram a relevância dessa atividade para o aprendizado e motivação dos alunos, assim como certo vislumbre ao fato de se conseguir medir, ainda que de forma indireta, a temperatura da superfície do Sol. Quando questionados se haviam gostado da experiência e se a mesma havia contribuído para o seu aprendizado, todos os alunos (as) afirmaram que sim, vejamos algumas respostas:

Sim, pois o experimento é uma forma de colocar em prática aquilo que estudamos. (ALUNO 1).

Sim, pois nos ensinou a calcular a temperatura do Sol, sendo que aos nossos olhos parecia impossível. (ALUNA 4).

Sim, é incrível a forma de medir a temperatura do Sol com este experimento. (ALUNO 7).

Sim, o experimento nos mostrou na prática a realização do que foi estudado, sendo interessante e proveitoso. (ALUNA 12).

Sim, achei muito incrível o experimento e muito criativo também, meio complicado aquela fórmula, mas no final deu certo. (ALUNO 15).

Sim, gostei do experimento, achei interessante como varia a temperatura da água em tão pouco tempo. (ALUNO 18).

Sim, porque coisas tão simples que foram usados neste experimento que não imaginávamos que pudessem ser usadas para a física. (ALUNO 20).

A utilização do site como proposta de revisão da evolução estelar e fechamento das atividades do projeto também foi bastante válida. Da mesma forma como no experimento, os estudantes responderam um questionário em que todos disseram gostar do site e que o mesmo contribui para o aprendizado. Vejamos alguns comentários dos alunos:

O site foi excepcional para ajudar a compreender o estudo. (ALUNA 3).

O site é bem explicativo e com imagens bem lindas. (ALUNA 4).

As informações do site me possibilitaram aprender mais o conteúdo. (ALUNO 7).

O site é fácil de utilizar e apresenta mais informações sobre as estrelas. (ALUNO 10).

É um site onde o assunto está mais resumido, mais compreensível para as pessoas. (ALUNO 14).

Ele mostra as estrelas por imagens e tem vários resumos e explicações interessantes. (ALUNO 20).

Além da apresentação das aulas, o site me ajudou de uma forma resumida a entender melhor. (ALUNO 22).

Durante o uso do site, notou-se que o apelo visual e o fato das informações estarem contidas na tela do computador de forma que os alunos pudessem interagir variando a massa das estrelas, foram relevantes para chamar a atenção dos mesmos.

A experiência educacional descrita nesta dissertação buscou abordar os principais conceitos da Termodinâmica aproximando o conhecimento da vida, evolução e morte das estrelas dos alunos do Ensino Médio. A proposta foi bem aceita pelos alunos e as evidências aqui descritas sinalizam a possibilidade da inserção de tópicos de Astrofísica no Ensino de Física, bem como a validade de se trabalhar a Termodinâmica no contexto da formação e evolução estelar. As aulas se tornaram mais atraentes do que de costume, motivando os alunos aborrecidos com a abordagem tradicional. Ficou evidenciado ainda a disposição e interesse dos alunos pelo tema, assim como a participação e envolvimento em todas as aulas. O aprendizado dos estudantes foi satisfatório, levando-nos a crer que nossos objetivos foram alcançados.

Desenvolvemos e levamos para a sala de aula um produto novo, diferenciado, na tentativa de aproximar o Ensino de Física da vida real, possibilitando uma aprendizagem mais significativa. Não é nossa intenção que o material substitua o livro didático ou que seja usado como único recurso no ensino da termodinâmica, pois entendemos que existem limitações no produto e que o mesmo deve ser usado como um

material complementar, aliado aos demais recursos didáticos. Não encaramos o material como um produto acabado e destacamos a importância da realização de pesquisas que desenvolvam metodologias de uso do material que complementem a que apresentamos. Ressaltamos a importância de uma abordagem construtivista, na qual os alunos se envolvam ativamente na construção do conhecimento. Esperamos que o nosso produto sirva como fonte inspiradora para a elaboração de outros materiais para o Ensino de Física. Por fim, encorajamos os professores a aplicarem em suas aulas o material instrucional, alvo desta dissertação.

## REFERÊNCIAS

- AUSUBEL, D. P.; NOVACK, J. D.; HANESIAN, H. Psicologia educacional. Rio de Janeiro: Interamericana, 1980.
- BRASIL, Ministério da Educação. Secretaria de Educação Fundamental. Parâmetros Curriculares Nacionais (PCNs). Brasília: MEC/SEF, 1999.
- BRASIL. Ministério da Educação. Secretaria de Educação Média e Tecnológica. Parâmetros Curriculares Nacionais (Ensino Médio). Brasília: MEC/SEMTEC, 2000.
- BRASIL, Ministério da Educação. Secretaria de Educação Média e Tecnológica. PCN+: Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCNs). Brasília: MEC/SEMTEC, 2002.
- CONSELHO NACIONAL DE EDUCAÇÃO. Diretrizes Curriculares Nacionais para o ensino médio (DCNEM). Brasília: Câmara de Educação Básica, 1998.
- DELIZOICOV, D; ANGOTTI, J. A. P. Física. Col. Magistério -2 ed. rev. São Paulo: Cortez, 1992. Metodologia Ensino de Ciências. São Paulo: Cortez, 1994.
- MARIM, Manoel Jorge Rodrigues. Superposição de ideias em física ondulatória. 2014. 155 f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física) – Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.
- SANTA CATARINA, Secretaria de Estado da Educação e do Desporto. Proposta Curricular de Santa Catarina: Educação Infantil, Ensino Fundamental e Médio: Disciplinas curriculares. Florianópolis: COGEN, 1998.



## APÊNDICE A – Formação e Evolução Estelar

### 1 Introdução

Toda estrela passa por um processo evolutivo que se inicia com o seu nascimento no interior de uma nuvem interestelar e que culmina com a sua morte depois de bilhões ou até trilhões de anos. A morte pode ser lenta e tranquila como uma anã branca ou explosiva e arrasadora como as supernovas, verdadeiros espetáculos no céu dos quais sobram objetos impressionantes como estrelas de nêutrons ou buracos negros. O material que resta após a morte, pode ser aproveitado para originar novas estrelas, gerando um ciclo de vida e morte das estrelas no universo. Esta é, em linhas gerais, a fascinante história sobre a Vida e a Morte das Estrelas que você vai encontrar neste trabalho.

Certamente ao olhar o céu e observar as estrelas, você já deve ter feito uma série de perguntas a respeito desses astros, entre elas: A que distâncias se encontram da Terra? Do que são formadas? Por que emitem luz? Há quanto tempo existem? Sempre existirão? Desde muito tempo atrás, a curiosidade humana vem permitindo a construção de um conhecimento cada vez maior a respeito do mundo em que vivemos e do universo que nos cerca. A Física é a ciência que estuda a natureza e seus fenômenos considerando as relações existentes entre matéria e energia. Matéria é tudo aquilo que possui massa e, portanto ocupa um lugar no espaço, enquanto que a energia pode ser definida como a capacidade de um sistema realizar trabalho (gerar movimento). A energia se apresenta de diversas formas e não pode ser criada nem destruída, apenas transformada. O desenvolvimento do princípio da conservação da energia tem sido um dos mais significativos feitos na evolução da física e desempenha um papel importantíssimo para a compreensão dos fenômenos que a física se propõe a explorar.

A Termodinâmica é a parte da física que tem como objetivo central, o estudo das transformações de energia envolvendo calor, trabalho mecânico e outros tipos de energia e, ainda, como essas transformações podem ser relacionadas com as propriedades da matéria. Ela tem aplicação nos mais variados fenômenos do universo, desde sistemas aparentemente simples como o aquecimento de água em uma chaleira a sistemas extremamente complexos como a estrutura de uma estrela [1].

Neste texto, não apenas descreveremos sobre a formação e a evolução das estrelas, mas também exploraremos os principais conceitos

termodinâmicos envolvidos nesse contexto. Inicialmente, falaremos sobre as constelações e a suas utilidades para os povos antigos. Em seguida, exploraremos o meio interestelar e o principal elemento químico presente nas estrelas, o Hidrogênio. Abordaremos a respeito do nascimento das estrelas, destacando os principais fenômenos físicos envolvidos. Discutiremos alguns conceitos termodinâmicos e as leis da Termodinâmica no contexto da formação estelar. Também iremos explorar a fusão nuclear, processo físico bem presente em uma estrela, enfatizando algumas de suas aplicações aqui na Terra. Ainda, vamos estudar a radiação térmica e a espectroscopia na busca da compreensão de como se conseguem informações sobre as estrelas e, por fim, abordaremos a evolução e a morte das estrelas.

Salientamos que um estudo profundo e detalhado das propriedades físicas das estrelas, de sua formação e evolução, requer o domínio de muitos campos da física, assim como de matemática avançada e cálculo computacional. Este não é o objetivo deste trabalho. Boa parte deste texto foi inspirada no livro *Astronomia & Astrofísica*, dos autores Kepler de Souza Oliveira Filho e Maria de Fátima Oliveira Saraiva.

## 2 Constelações

Os astrônomos estimam que o universo conhecido possua algo em torno de  $10^{23}$  estrelas de diversos tamanhos, massas, cores e brilho. Só na Via Láctea, há cerca de 400 bilhões de estrelas [2, 3]. No entanto, podemos visualizar um número relativamente bem reduzido de estrelas no céu. Em um céu escuro e sem nuvens há cerca de 8500 estrelas visíveis a olho nu, todas pertencentes à Via Láctea, mas por causa das dimensões da Terra e também de sua posição em relação aos outros astros, nem todas essas estrelas são visíveis ao mesmo tempo. O número de estrelas que podemos visualizar a olho nu em certo instante depende muito da latitude em que estamos e do horário que observamos. Em média esse número é em torno de 2500 [4]. Com o uso de um binóculo, o número de estrelas visíveis aumenta para alguns milhares e com o uso de um telescópio pode-se observar milhões de estrelas e objetos celestes.

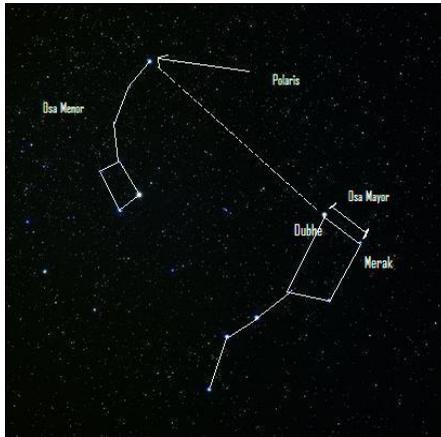
Sem nenhum recurso tecnológico, mas com muita disposição, chineses, babilônios, assírios e egípcios já faziam registros a respeito dos astros em aproximadamente 3000 a.C. Ao olhar o céu noturno os povos antigos perceberam que as estrelas mantêm sempre as mesmas distâncias entre si e estão “organizadas” em aglomerados ou constelações que eles imaginavam formar alguma figura de pessoa,

animal, objeto ou ser mitológico que as caracterizavam. As constelações eram utilizadas para servir de referência para determinar a passagem do tempo, as estações do ano, o clima, melhores períodos para caça, pesca e agricultura e até mesmo para fins astrológicos. Vale lembrar que a astrologia não tem cunho científico.

As estrelas de uma constelação não estão necessariamente próximas, pois ao se olhar para o céu não é possível ter a real percepção da distância entre elas, mas apenas uma ideia da disposição delas em relação às outras na esfera celeste. O conceito de constelação dado pelos antigos não é mais o mesmo. Atualmente, constelação é definida como uma região do céu a qual pertencem não somente estrelas, mas qualquer objeto celeste que, visto a partir da Terra, esteja contido na mesma região, mesmo sem qualquer ligação astrofísica com outro objeto ou estrela da constelação e de fato, geralmente esta ligação astrofísica não existe [5]. As constelações mudam com o tempo, e em 1929 a União Astronômica Internacional adotou 88 constelações oficiais, de modo que cada estrela do céu faz parte de uma constelação. Apesar de não possuir mais a mesma importância que tinham na antiguidade, as constelações ainda são úteis para os estudos astronômicos, como por exemplo, para direcionar equipamentos de navegação espacial, indicar direções no universo e tornar mais fácil a identificação de astros no céu.

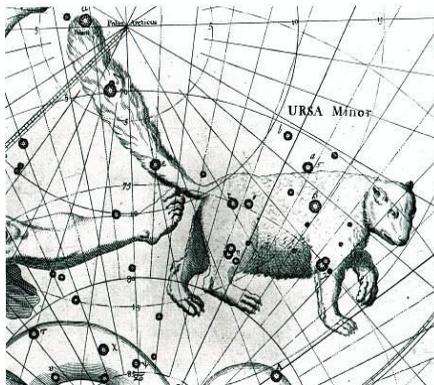
Identificar as constelações no céu noturno é uma tarefa em geral muito difícil. Algumas são mais fáceis de identificar por causa de suas estrelas de maior brilho aparente e há aquelas que só podem ser vistas completamente por alguém que se encontra em um dos hemisférios terrestre. Por exemplo, a Ursa Menor (Figuras 1 e 2), só pode ser vista no Hemisfério Norte. Apesar das estrelas de Ursa Menor serem aparentemente pouco brilhantes, ela se destaca porque sua estrela mais brilhante, *Polaris*, (que está na cauda da Ursa Menor) tem a sua posição quase coincidente com o polo norte celeste, sendo por esta razão mais conhecida como estrela polar [6].

Figura 1 – As constelações da Ursa Menor (acima) e da Ursa Maior (abaixo).



Fonte: <http://astronomymydomine.blogspot.com.br/>. Acesso em: 16 jan. 2016.

Figura 2 – Representação artística da constelação da Ursa menor. Nessa figura também vemos parte de outras constelações.



Fonte: <http://www.ianridpath.com/startales/ursaminor.htm>. Acesso em: 16 jan. 2016.

Ao contrário do hemisfério norte, que tem a estrela *Polaris* indicando o polo norte celeste, no hemisfério sul não existe uma estrela que possa servir de referência para indicar o polo sul celeste. Na

realidade, no hemisfério sul a estrela que poderia indicar o polo sul celeste seria *Sigma Octantis*, porém o seu brilho é muito fraco e só é visível à vista desarmada a partir de um local escuro e com boas condições atmosféricas. Como tal, não serve de referência. Neste caso a constelação do Cruzeiro do Sul (Figuras 3 e 4), também conhecida como *Crux* tem um papel importante. Para os gregos, ela pertencia à constelação do Centauro, mas os navegantes europeus no século XVI, auxiliados pela sua posição transformaram essa parte do Centauro em outra constelação e a chamaram de Cruzeiro do Sul. Seguindo uma linha imaginária a ligar a estrela *Gacrux* (também conhecida como *Rubídea*) à estrela mais brilhante *Acrux* (também conhecida *Alfa Crucis* ou ainda como Estrela de Magalhães), estaremos próximos do polo sul celeste se continuarmos com essa linha, a partir da estrela *Acrux*, até ter um comprimento de aproximadamente 4,5 vezes a distância entre essas duas estrelas. A constelação do Cruzeiro do Sul é visível no hemisfério sul e em regiões do hemisfério norte próximas da linha do equador, e apesar de ser a menor constelação entre as 88 constelações reconhecidas pela União Astronômica Internacional, é bem reconhecível por suas estrelas de brilho considerável [5, 6, 7].

Figura 3 – A constelação do Cruzeiro do Sul.



Fonte: <http://cosmonouniverso.blogspot.com.br/2013/01/a-constelacao-do-cruzeiro-do-sul-tem-54.html>. Acesso em: 21 jan. 2016.

Figura 4 – Representação artística da Constelação Cruzeiro do Sul.



Fonte: <http://estrelaseplanetas-cesar.blogspot.com.br/2013/08/cruzeiro-do-sul-constelacao-da-cru-x-do.html>. Acesso em: 23 jan. 2016.

Outra constelação bastante fácil de visualizar é Órion (Figura 5). Talvez você já conheça pelo menos parte dela, que são aquelas três estrelas quase alinhadas de brilhos parecidos, popularmente conhecidas pelos brasileiros como as “Três Marias”. Seus nomes verdadeiros são: *Mintaka*, *Alnilam* e *Alnitak*. Elas estão no centro da constelação, sabendo encontrá-las pode-se identificar a constelação facilmente.

Figura 5 – A constelação de Órion.



Fonte: <http://cienciasaqui.blogspot.com.br/2011/04/estrela-de-orion-esta-diminuindo.html>. Acesso em: 23 jan. 2016.

Segundo a mitologia grega, Órion representa um caçador (Figura 6), perseguido e ferido mortalmente por um escorpião enviado para matá-lo. Esses dois personagens, Órion e Escorpião, tornaram-se constelações, e foram postos no céu em oposição: quando Órion está se pondo no oeste, Escorpião está nascendo no leste. O caçador está em companhia de seus dois cães de caça (representados pelas constelações Cão Maior e Cão Menor). A constelação tem a forma de um quadrilátero com as Três Marias no centro, representando o cinturão do caçador. O vértice nordeste do quadrilátero é formado pela estrela avermelhada *Betelgeuse*, que marca o ombro direito do caçador. O vértice sudoeste do quadrilátero é formado pela estrela azulada *Rigel*, que marca o pé esquerdo de Órion.

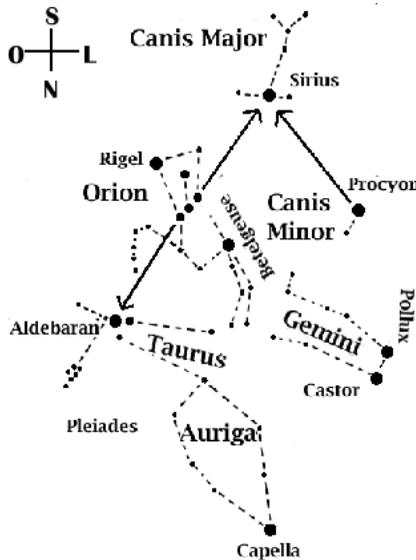
Figura 6 – Representação artística da Constelação de Órion.



Fonte: <http://www.observatorio.ufmg.br/dicas13.htm>. Acesso em: 23 jan. 2016.

No hemisfério Sul Órion aparece de ponta cabeça (Figura 7). A estrela mais brilhante de Cão Maior é *Sírius*. Ela é também a estrela mais brilhante do céu noturno, e pode ser facilmente identificada a sudeste das Três Marias. No mês de dezembro, procure Órion após o anoitecer no leste, o sol estará se pondo quando se vê Órion “nascer”. Por ser visível durante toda a noite neste mesmo mês, Órion indica o verão no hemisfério sul [2, 5]. Como já mencionado, não é uma tarefa fácil identificar as constelações, mas podemos recorrer a um mapa do céu ou a um bom *software* que pode ser obtido na rede.

Figura 7 – Mapa do céu na área da constelação de Órion.

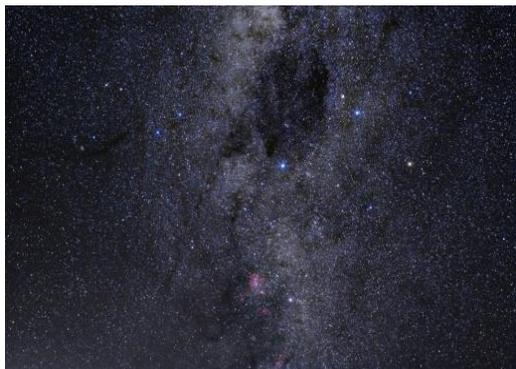


Fonte: OLIVEIRA FILHO, Kepler de Souza; SARAIVA, Maria de Fátima Oliveira. *Astronomia e Astrofísica*. 2. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2004.

### 3 Berçário das Estrelas

Toda estrela tem uma origem, um nascimento, que apesar de não ter data marcada, tem lugar pra acontecer. Ele acontece em regiões do universo que podemos chamar de berçários de estrelas. Trata-se de nuvens de gás e poeira que compõem o espaço entre as estrelas, denominadas nuvens interestelares. Numa noite de céu “limpo” e sem luar, pode-se observar uma grande mancha escura abaixo e a esquerda do Cruzeiro do Sul conhecida como *Saco de Carvão* (Figura 8). Ela é apenas uma das muitas nuvens de gás e poeira da Via Láctea. Muitas outras podem ser vistas a olho nu, por entre campos ricos em estrelas, como manchas escuras espalhadas na nossa galáxia [8].

Figura 8 – Nebulosa Saco de Carvão, visível a olho nu à esquerda da cruz da constelação do Cruzeiro do Sul. O contraste com o brilho da Via Láctea torna a aparência do Saco de Carvão mais escura do que qualquer outra parte do céu.



Fonte:<http://www.meteorito.com.br/astrofotografia.php?idC=13&fil=eve&idF=81&pg=2&id=2>. Acesso em: 10 jan. 2016.

Estrelas recém-formadas no interior das nuvens podem "iluminá-las" como no caso da nebulosa de Órion (Figura 9). Situada na constelação de Órion, também conhecida como M42 ou NGC 1976, é por muitos, considerada como um dos mais belos objetos celestes que se pode observar. Esta nebulosa é visível à vista desarmada como um ponto luminoso situado no centro da região da espada do caçador (as três estrelas situadas ao sul do cinturão de Órion), mas para que possamos observar a beleza deste objeto celeste, temos de recorrer a bons instrumentos de observação [6].

Figura 9 – Nebulosa de Órion.



Fonte: <http://apod.nasa.gov/apod/ap120715.html>. Acesso em: 07 abr. 2016.

O meio interestelar é formado por mais de 90% de Hidrogênio (na forma molecular:  $H_2$ ), aproximadamente 9% de Hélio e cerca de 1% de elementos mais pesados. Ele contém tipicamente um átomo de hidrogênio por centímetro cúbico e, aproximadamente, 100 grãos de poeira por quilômetro cúbico. A poeira é composta principalmente de grafite, silicatos e gelo de água, em grãos de vários tamanhos, mas muito menores (da ordem de um micrômetro) do que a poeira aqui na Terra [9]. O meio interestelar é, portanto, extremamente rarefeito, mais do que o melhor vácuo produzido em laboratório.

No meio interestelar, as moléculas estão concentradas sob a forma de nuvens moleculares com grande variedade de formas e massas de poucas vezes até um milhão de massas solares, se estendendo de alguns até cerca de 600 anos-luz. A distância típica entre as nuvens moleculares é muito maior que os seus próprios tamanhos.

Aproximadamente 10% da massa da Via Láctea (uma massa equivalente a 10 bilhões de sóis), está na forma de gás interestelar e a poeira agrupa menos de 1% da massa em gás. Se toda essa massa fosse convertida em estrelas, a nossa Galáxia seria provavelmente uma das mais brilhantes e não seria possível a vida na Terra, tamanho seria o calor proveniente das estrelas. Felizmente, em condições normais, as nuvens interestelares não são muito produtivas. A maioria delas passa milhares de anos sem atividade alguma. Na Galáxia inteira nascem menos de dez estrelas por ano. A temperatura do meio interestelar pode variar de um valor muito baixo até alguns milhares de graus Celsius,

dependendo da proximidade com alguma estrela. Em média a temperatura típica de uma região escura do meio interestelar é - 200°C [6, 9, 10].

Figura 10 – Conhecidas como ‘Pilares da Criação’, essas colunas de gás e poeira, que ocupam a região central da Nebulosa da Águia, a cerca de sete mil anos-luz da Terra, são um dos mais famosos berçários de estrelas conhecidos.



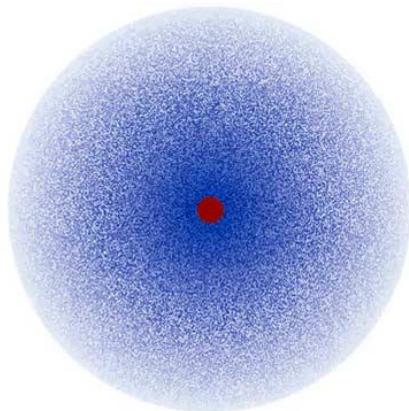
Fonte: <http://www.nasa.gov/content/goddard/hubble-goes-high-definition-to-revisit-iconic-pillars-of-creation>. Acesso em: 07 abr. 2016.

#### **4 O Átomo de Hidrogênio**

O hidrogênio é o elemento mais leve, simples e abundante do universo e, como vimos, é o principal componente das nuvens interestelares e consequentemente das estrelas. Na Terra, o hidrogênio existe como um gás diatômico ( $H_2$ ) que devido à sua pequena densidade, pode ser encontrado apenas nas camadas mais altas da atmosfera e ainda assim em uma concentração muito pequena. Entretanto, combinado com outros elementos, o hidrogênio é muito abundante na natureza, sendo principalmente encontrado na forma de compostos químicos tais como hidrocarbonetos e água. Daí a origem de seu nome, que vem do grego *hidro* e *genes*, que significa “gerador de água”. O átomo de hidrogênio é o mais simples que existe, ele possui apenas um próton e um elétron.

A teoria que melhor descreve os átomos e o mundo microscópico é a Mecânica Quântica. Na teoria quântica não se fala em órbitas definidas de elétrons em torno de núcleos, mas sim em orbitais atômicos ou nuvens de probabilidades. Essas nuvens não representam a posição exata dos elétrons, apenas delimitam uma região do espaço na qual a probabilidade de encontrar o elétron é maior. Quanto maior a probabilidade de um elétron ser encontrado em uma determinada região do átomo, mais densa é a nuvem eletrônica que o representa. Na figura abaixo, está representado o átomo de hidrogênio com o próton no centro (bolinha vermelha) e a nuvem de probabilidades (em azul) indicando as possíveis posições em que o elétron pode ser encontrado.

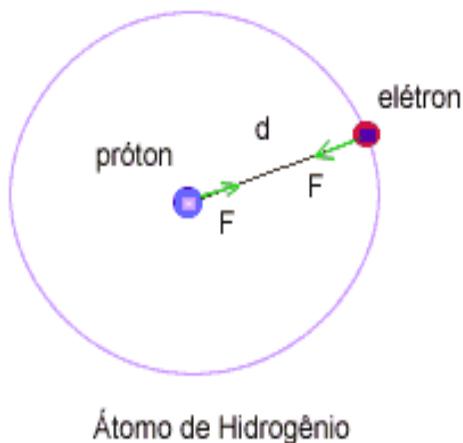
Figura 11 – Representação estilizada do átomo de hidrogênio.



Fonte: [http://www.infopedia.pt/\\$nuvem-electronica-do-atomo](http://www.infopedia.pt/$nuvem-electronica-do-atomo). Acesso em: 25 jan. 2016.

Prótons e elétrons possuem carga elétrica positiva e negativa respectivamente. A carga elétrica é uma propriedade intrínseca destas partículas, sendo a responsável pela força elétrica existente entre corpos carregados. Corpos com cargas de mesmo sinal se repelem e de sinais contrários se atraem. Assim, entre o próton e o elétron do átomo de hidrogênio existe uma força elétrica de atração (Figura 12). Esta força é responsável pela coesão do átomo de hidrogênio e, em parte pela coesão dos átomos de todos os outros elementos.

Figura 12 – Representação da força elétrica entre o próton e o elétron no átomo de hidrogênio.



Fonte: <http://www.efeitojoule.com/2008/10/exercicio-resolvido-lei-de-coulomb.html>. Acesso em: 16 jan. 2016.

A intensidade da força elétrica para partículas em repouso é dada pela seguinte expressão, conhecida como lei de Coulomb:

$$F_e = \frac{K \cdot |Q_1| \cdot |Q_2|}{d^2},$$

onde  $F_e$  é a força eletrostática;

$K = \frac{1}{4\pi\epsilon}$ , sendo  $\epsilon$  a permissividade elétrica do meio;

$Q_1$  e  $Q_2$  representam as cargas do par de partículas e

$d$  é a distância entre elas.

A lei de Coulomb estabelece que a intensidade da força eletrostática entre duas partículas carregadas é diretamente proporcional ao produto dos módulos das cargas das partículas e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre elas. Isso significa que à medida que duas partículas carregadas se aproximam, a força de repulsão ou atração fica cada vez maior.

Devido à atração existente entre o elétron e o próton, é necessária certa energia (a depender de cada elemento químico) para retirar um

elétron de um átomo. Esta energia é denominada potencial de ionização. O potencial de ionização do hidrogênio é de 13,6 elétrons-volt. O elétron-volt é uma unidade de energia que representa o ganho de energia cinética quando um elétron é acelerado pela queda de potencial de um volt. O hidrogênio está diretamente relacionado às transformações de energia que ocorrem no interior das estrelas.

## 5 A Fonte de Energia das Estrelas

O desenvolvimento da Termodinâmica no final do século XIX fez surgir uma questão importante: Qual a fonte de energia das estrelas? Muitos empregaram esforços na tentativa de dar uma resposta satisfatória a esta questão. Inicialmente, se imaginou que o Sol emitia calor devido à queima de algum combustível tradicional. O melhor combustível conhecido na época era o carvão mineral. Os cálculos indicavam que um Sol queimando carvão mineral, não poderia durar mais do que 10 mil anos. A hipótese mais aceita era que o Sol emitia luz e calor devido à contração gravitacional. Essa hipótese supunha que o Sol estaria em lenta contração e que a energia cinética resultante desse processo seria convertida em energia térmica, irradiada pela sua superfície. O físico inglês, William Thomson, conhecido como Lorde Kelvin (1824-1907) estimou que neste caso, o Sol teria uma idade entre 20 e 100 milhões de anos, não concordando ainda com as estimativas que geólogos e paleontólogos tinham, de bilhões de anos [2, 11].

Em 1905, o físico alemão Albert Einstein, através da teoria da relatividade restrita, sugeriu a conversão de massa em energia segundo a relação:

$$E = mc^2,$$

onde  $E$  é a energia;

$m$  é a massa convertida e

$c$  a velocidade da luz no vácuo, cujo valor é de  $3.10^8$  m/s.

Em seu trabalho, *Sobre a constituição interna das estrelas*, de 1926, o astrônomo e físico inglês Sir Arthur Stanley Eddington (1882-1944) sugeriu existir uma intensa fonte de energia no núcleo de uma estrela gerando pressão para contrabalancear a contração gravitacional. Eddington acreditava num processo, que hoje em dia, sabemos que não ocorre na natureza, a aniquilação de prótons por elétrons, que produziria energia suficiente para milhares de bilhões de anos. Durante os anos

1920 e 1930, os astrônomos estavam coletando dados sobre as estrelas enquanto a teoria do núcleo atômico se desenvolvia. Em 1932, o físico inglês Sir James Chadwick (1891-1974) descobriu o nêutron, estabelecendo a ideia de um núcleo atômico formado por prótons e nêutrons. Em 1939, o alemão Hans Albrecht Bethe (1906-2005) publicou o artigo *A produção de Energia nas Estrelas* (o que lhe rendeu o prêmio Nobel em 1967) mostrando como a fusão termonuclear podia produzir a energia emitida pelas estrelas. Ele mostrou como prótons poderiam se unir e se transformar em núcleos de hélio no interior das estrelas, liberando energia [2, 11].

## 6 O Nascimento de uma Estrela

Além da força elétrica, existem outras três forças fundamentais na natureza, a força gravitacional, a força nuclear forte e a força nuclear fraca. Entre elas, a mais familiar é a força gravitacional. A força gravitacional é uma força de atração entre massas dada pela seguinte relação, obtida pelo físico Isaac Newton:

$$F_g = \frac{G \cdot M_1 \cdot M_2}{d^2},$$

onde  $F_g$  é a força gravitacional;

$G$  é a constante universal da gravitação cujo valor é  $6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2$ ;

$M_1$  e  $M_2$  são as massas dos corpos e

$d$  é a distância entre eles.

A expressão da força gravitacional é muito semelhante à lei de Coulomb, no entanto, a força eletrostática pode ser de atração ou repulsão, enquanto que a força gravitacional é sempre de atração. Assim, a força gravitacional tende a unir tudo o que tem massa. É ela que mantém coesos os planetas, as estrelas e as galáxias no universo, sendo também responsável pelas órbitas da Lua em torno da Terra e da Terra e dos outros planetas em torno do Sol, etc. Entre quaisquer objetos existe uma interação gravitacional, no entanto esta força só produz efeito perceptível quando as massas são muito grandes, como no caso de planetas e estrelas.

Uma nuvem molecular está sujeita à atração gravitacional entre as suas partes e, dessa forma, deveríamos esperar que a mesma acabasse por colapsar. No entanto, os átomos que compõem a nuvem molecular

estão em movimento, gerando uma pressão dentro da nuvem que se opõe a ação da gravidade, fazendo com que a nuvem permaneça em equilíbrio mecânico. Podemos entender esse fenômeno através da seguinte analogia: quando se assopra dentro de um balão, colocam-se muitas partículas confinadas e próximas entre si em movimento. Estas partículas tendem a se afastar (assim como quando se deixa um frasco de perfume aberto e as moléculas evaporaram exalando o cheiro do perfume), chocando-se com as paredes do balão gerando uma pressão que é contrabalanceada pela força que o balão exerce sobre as moléculas, mantendo-as presas. No caso das nuvens moleculares no meio interestelar, o que mantém as moléculas na mesma nuvem é a força gravitacional. Em média as moléculas das nuvens interestelares movimentam-se muito lentamente, mas é esse movimento que evita o colapso, mantendo a estabilidade da nuvem.

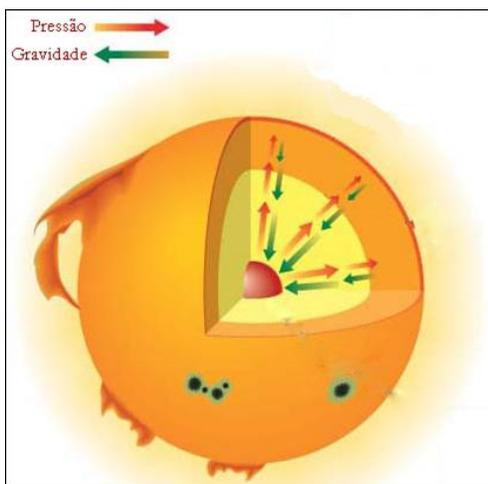
O nascimento de uma estrela se inicia com uma instabilidade gravitacional dentro de uma nuvem molecular no meio interestelar. A instabilidade gravitacional acontece devido a fatores internos e externos às nuvens, capazes de comprimi-las, aumentando a densidade local. Entre os fatores, podemos citar a queda de temperatura numa região da nuvem, ondas de choque provenientes de supernovas (grandes explosões estelares), rotação de uma galáxia espiral e até mesmo a colisão entre duas galáxias [7, 10].

Aglutinações de matéria em alguns locais da nuvem formam pequenos glóbulos que por sua vez, atraem a matéria circundante aumentando cada vez mais a massa e conseqüentemente, a atração gravitacional. A energia cinética dos átomos em queda livre sobre o centro dos glóbulos é dissipada, aumentando a energia cinética média do gás contido nos glóbulos, provocando um aumento da temperatura. A massa do gás aquecido é um embrião de uma nova estrela. O glóbulo que tinha uma temperatura de aproximadamente - 200°C agora se superaquece e, se houver massa suficiente, aumenta sua temperatura a ponto de emitir energia luminosa, pelo mesmo princípio físico que faz com que uma barra de ferro aquecida no fogo passe a emitir luz a partir de certa temperatura. Ele se torna uma enorme esfera de gás resplandecente chamada de protoestrela (estrela em formação). A energia irradiada para fora da protoestrela tende a diminuir a temperatura central, reduzindo a pressão interna facilitando a contração gravitacional. Com a gravidade em ação comprimindo a protoestrela a temperatura em seu interior atinge alguns milhares de graus Celsius e os choques entre os átomos separam os elétrons dos prótons ionizando completamente o hidrogênio. A gravidade atua inexoravelmente, e

quando a temperatura atinge alguns milhões de graus Celsius, os prótons atingem velocidades tão altas, que colidem se aproximando o suficiente para vencer a repulsão elétrica, caindo sob o domínio de forças nucleares. Com a força nuclear em ação, os átomos de hidrogênio são acelerados uns contra os outros, se fundindo em núcleos de Hélio. O início da fusão nuclear do hidrogênio em hélio marca o nascimento de uma nova estrela. A energia liberada pela fusão é suficiente para conter o colapso gravitacional, mantendo a recém-nascida estrela em equilíbrio mecânico [8].

Nem sempre o colapso de uma nuvem molecular gera uma estrela. Aglutinações de matéria com massas inferiores a 8% da massa do Sol, não atingem temperaturas suficientes para iniciar a fusão nuclear, dando origem a outros corpos celestes como anãs marrons, planetas, asteroides, etc. O tempo necessário desde o início do colapso da nuvem gravitacional até o nascimento da estrela também depende de sua massa. Estima-se que o Sol levou trinta milhões de anos, enquanto estrelas com quinze massas solares levam somente 160 000 anos.

Figura 13 – Quando a pressão térmica se torna igual à pressão gravitacional a estrela atinge o equilíbrio mecânico, mantendo o volume constante por bilhões de anos.



Fonte: <http://www.newtonsapple.org.uk/the-sun-and-nuclear-fusion/>. Acesso em: 29 jan. 2016.

De uma grande nuvem molecular que se fragmenta em inúmeros pedaços, devido às flutuações em sua densidade, poderá se formar um grande número de estrelas. Estrelas nascidas de uma mesma nuvem formam grupos chamados aglomerados estelares. Um exemplo desses aglomerados são as Plêiades (Figura 14), conhecidas popularmente como as sete “irmãs” e facilmente visíveis o olho nu de ambos os hemisférios. Estrelas de um mesmo aglomerado apresentam características e propriedades bem parecidas. Muito tempo depois do nascimento elas poderão se separar umas das outras, para viverem de forma solitária, em duplas ou em pequenos grupos. Algumas estrelas, entretanto, permanecerão por toda a vida nos aglomerados [12].

Figura 14 – O aglomerado das Plêiades. Ele consiste de aproximadamente 3000 estrelas na constelação de Touro a 400 anos-luz da Terra. As mais brilhantes são azuladas e conhecidas como "As sete irmãs".



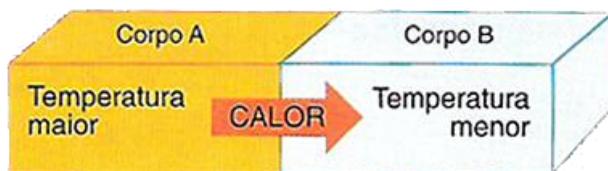
Fonte: <http://apod.nasa.gov/apod/ap060109.html/>. Acesso em: 07 abr. 2016.

## 7 As Leis da Termodinâmica

Durante o processo de formação de uma estrela, há constantemente transformação de energia potencial gravitacional armazenada na nuvem molecular em energia cinética que é dissipada na forma de calor (energia térmica) aumentando a temperatura da protoestrela. Tem-se nesse processo uma verificação da 1ª lei da termodinâmica, a qual afirma que a energia pode se apresentar e se transformar de diversas formas, mas a energia total envolvida num processo termodinâmico sempre se conserva.

A temperatura está relacionada com a energia cinética média das partículas de um corpo. Todo corpo, por menor que seja, possui tantas moléculas que não há como se fazer um cálculo individual desta energia. Muitas propriedades da matéria que podem ser medidas dependem da temperatura, como o comprimento de uma barra metálica ou a cor de um objeto incandescente muito quente, possibilitando assim sua medida através de uma determinada escala. Uma vez que pode ser medida a partir de um sistema físico sem ser preciso considerar o comportamento individual de seus componentes, a temperatura é considerada uma grandeza termodinâmica macroscópica. Já o calor, é energia em transferência devido às diferenças de temperatura. Quando dois corpos em diferentes temperaturas são colocados em contato, há um fluxo de energia do corpo que tem maior temperatura em direção ao de menor temperatura. Do ponto de vista microscópico, o que acontece é uma transferência de energia cinética das partículas mais agitadas presentes no corpo de maior temperatura para as partículas menos agitadas do corpo de menor temperatura. À medida que um corpo “quente” perde calor para um corpo “frio”, a temperatura do corpo “quente” diminui e a do corpo “frio” aumenta até que elas se tornem iguais. Quando isso acontece, dizemos que os corpos estão em equilíbrio térmico.

Figura 15 – Fluxo de energia (calor) do corpo A, de maior temperatura para o corpo B, de menor temperatura. Microscopicamente, o calor pode ser entendido como uma transferência de energia cinética entre as partículas.



Fonte: [http://www.aulas-fisica-quimica.com/7e\\_10.html](http://www.aulas-fisica-quimica.com/7e_10.html). Acesso em: 26 jan. 2016.

Deve estar claro, portanto, que calor e temperatura não são sinônimos. Além disso, nem sempre as trocas de calor acarretam mudanças de temperatura. Para que ocorra a mudança de estado físico de uma substância à pressão constante, por exemplo, é necessário um ganho ou uma perda de calor. Se você quiser congelar água, passando-a do estado líquido para o estado sólido precisa retirar calor, do contrário precisa fornecer calor. Ocorre que durante uma mudança de estado

físico, calor é trocado para aproximar ou afastar as moléculas, alterando a energia potencial e não a energia cinética das partículas. Desta forma, a temperatura não é alterada. A 1ª lei da termodinâmica é frequentemente expressa pela equação:

$$\Delta U = Q - W,$$

onde  $\Delta U$  é a variação da energia interna de um sistema físico;

$Q$  é o calor trocado pelo sistema e

$W$  é o trabalho realizado.

A energia interna é a soma das energias de todas as partículas do sistema. O trabalho deve ser entendido como energia capaz de gerar movimento, no caso de uma estrela, por exemplo, contrações e expansões. O sistema pode ganhar calor ( $Q$  é positivo) ou perder calor ( $Q$  é negativo) e também realizar trabalho ( $W$  é positivo) ou receber trabalho de um agente externo ( $W$  é negativo). Os sinais são adotados por convenção.

Podemos ilustrar uma aplicação da 1ª lei da Termodinâmica à formação de uma estrela fazendo algumas simplificações. Imagine que o sistema físico em questão seja uma região limitada por uma esfera cujo centro coincide com o centro da protoestrela. Agora, considere que o gás hidrogênio contido nessa esfera se comporte como um gás ideal, ou seja, os átomos se comportam como partículas que não interagem. Desprezemos também qualquer movimento de rotação da esfera, assim como campos magnéticos internos e externos. Em resumo, nosso sistema físico é uma esfera de gás ideal. À medida que a gravidade atua nos átomos que estão no exterior da esfera, realiza um trabalho negativo sobre ela, comprimindo-a. Este processo pode ser tão rápido que não haja tempo suficiente para a esfera de gás ideal trocar calor com o meio externo. Nesse caso, o processo é chamado de compressão adiabática. Temos:  $Q = 0$  e  $W$  é um número negativo qualquer. Utilizando a equação anterior obtemos:

$$\Delta U = 0 - (-W) \rightarrow \Delta U = +W,$$

ou seja,  $\Delta U$  é um número positivo, significando que a energia interna aumenta e conseqüentemente a temperatura do sistema físico que idealizamos aumenta, uma vez que a energia interna de um gás ideal é somente a sua energia cinética. Para um gás ideal vale a equação de estado:

$$P = \frac{n \cdot R \cdot T}{V},$$

onde  $P$  é a pressão térmica;

$V$  é o volume ocupado pelo gás;

$n$  é o número de moles;

$R$  é a constante universal dos gases ideais, cujo valor é 8,31 J/ mol. K e

$T$  é a temperatura absoluta.

Com o aumento da temperatura e a diminuição do volume, a pressão no interior da esfera aumenta, sustentando o peso crescente das camadas externas. Através do modelo de gás ideal, acabamos de exemplificar uma aplicação da 1ª lei da termodinâmica no processo de contração de uma protoestrela, obtendo resultados condizentes com a realidade. Quando a estrela nasce e entra em equilíbrio mecânico, não há mais trabalho externo comprimindo o gás, ela usa então a energia produzida pelas reações nucleares para manter a temperatura e a pressão internas suficientes para manter a sua estabilidade. A estrela ficará por bilhões de anos irradiando energia sem diminuir sua temperatura média porque extrai energia através de reações termonucleares.

Agora, suponha que por algum processo físico, a energia cinética dos átomos de hidrogênio a altíssimas temperaturas fosse convertida novamente em energia potencial gravitacional, ou seja, imaginemos que as partículas agitadas no interior da estrela se afastassem voltando a formar uma nuvem molecular em equilíbrio, seria violada a 1ª lei da Termodinâmica? De modo algum, ainda assim a energia seria conservada. No entanto, tal processo não ocorre. Isso seria análogo às seguintes experiências do dia-a-dia: Quando se deixa um objeto cair, energia potencial gravitacional é transformada em energia cinética durante a queda e posteriormente em som e calor, mas o contrário não acontece, ou seja, o objeto não pode subir espontaneamente do chão enquanto se esfria. Se isso acontecesse, não haveria violação da 1ª lei da termodinâmica. Quando uma bola rola sobre uma superfície, sua energia cinética diminui à medida que o atrito com a superfície produz calor, aquecendo a bola e a própria superfície, mas não se observa uma bola em repouso adquirir movimento graças ao esfriamento da superfície a qual mantém contato. De tal maneira não se pode aquecer um objeto e esperar que ele entre em movimento espontaneamente enquanto diminui de temperatura. E ainda, quando se deixa uma xícara de café quente sobre a mesa, o café perde calor para o ambiente aquecendo o ar, mas

ninguém deixa café frio sobre a mesa para esquentar, esperando que o ar se esfrie [13]. Todos os processos que listamos, acontecem apenas em um único sentido, por isso são denominados processos irreversíveis.

Na natureza os processos termodinâmicos são todos irreversíveis. Apesar de não violarem a 1ª lei da Termodinâmica, os processos opostos não ocorrem, pois violariam a 2ª lei da Termodinâmica, a qual nos diz qual é o sentido escolhido para estes processos. Processos termodinâmicos irreversíveis têm em comum o fato de que a energia tende a se dissipar na forma de calor. O calor também pode ser em parte, utilizado para gerar trabalho. Dispositivos responsáveis por transformar calor em trabalho são conhecidos como máquinas térmicas. No entanto, máquinas térmicas são limitadas. É fácil converter completamente a energia mecânica em calor, basta que se tenha atrito, mas não existe uma máquina que possa converter todo o calor absorvido em trabalho, e essa não é uma limitação de engenharia, mas uma limitação imposta pela própria natureza.

A 2ª Lei da Termodinâmica declara ser impossível, para uma máquina térmica que opera em ciclos, converter integralmente o calor que recebe em trabalho. As máquinas térmicas impulsionaram o desenvolvimento da termodinâmica e da revolução industrial a partir do final do século XVIII. As primeiras máquinas eram movidas a vapor e o principal combustível era o carvão mineral. Elas foram usadas primeiramente para extrair água das minas de carvão, mas logo foram aplicadas nas indústrias e nas locomotivas. Dito de outro modo, a 2ª Lei da Termodinâmica afirma que o calor sempre flui espontaneamente de um corpo de maior temperatura para um corpo de menor temperatura. É possível que o calor flua de um corpo frio para um corpo quente, porém este não é um processo espontâneo, para acontecer é necessário se empregar trabalho. Dispositivos que executam esse processo funcionam como máquinas térmicas ao contrário, são eles: os refrigeradores, aparelhos de ar-condicionado e bombas de calor.

Quando um corpo recebe calor, suas partículas ficam mais agitadas ou mais desordenadas. Como a energia tende a se “dissipar” na forma de calor, é lícito dizer que os sistemas tendem a ficar mais desordenados quando trocam energia. Ainda que um sistema físico possa diminuir a desordem, ele o faz graças ao aumento da desordem de outro sistema. O saldo final é sempre positivo, a desordem sempre aumenta. Essa desordem dos sistemas físicos está associada a uma grandeza denominada entropia. A 2ª lei da termodinâmica ainda pode ser escrita da seguinte forma: a entropia de um sistema físico isolado

sempre aumenta quando ele sofre alterações. O aumento da entropia de um sistema físico isolado define, portanto, o sentido das transformações.

Assim como uma lei da natureza, o aumento da entropia parece ser um fato da vida. Nossas casas tendem a ficarem cada vez mais desorganizadas. Meias tendem a ficar desemparelhadas nas gavetas. Roupas organizadas tendem a ficar espalhadas pelo quarto. O material escolar tende a ficar espalhado nas mochilas ou nas mesas de estudo. Para que tudo fique organizado, correspondendo a um estado de menor entropia, é necessário trabalho, ainda assim, o trabalho aquecerá o corpo de quem o realiza provocando um aumento de entropia, que será maior que a diminuição de entropia por ele gerada. Outro exemplo do aumento da desordem é o de um baralho de cartas perfeitamente ordenado, ou seja, com baixa entropia. Comece a embaralhá-lo e ele ficará menos organizado. Após algumas embaralhadas, haverá pequenos grupos de cartas em sequência, mas no geral ele terá mais desordem e maior entropia. Após embaralhar muitas vezes, ele estará completamente desordenado, com uma entropia muito alta. Agora, não importa quantas vezes se embaralha as cartas, elas não retornarão mais ao seu estado inicial [13]. A entropia tende a um máximo.

O que as estrelas têm a ver com a 2ª lei da Termodinâmica? Durante a formação de uma estrela, assim como nos exemplos anteriores, energia ordenada (energia potencial gravitacional) se transforma, por um processo irreversível, em energia desordenada (calor). Além disso, o calor gerado no núcleo de uma estrela é propagado para as regiões externas mais frias, e em seguida a estrela perde calor para o seu entorno irreversivelmente em conformidade com a 2ª lei. Uma estrela converte massa em energia. Esta é uma tradução muito direta de ordem (partículas localizadas) em desordem (energia que se propaga através do espaço) [13]. Ao perder energia para o resto do universo a entropia de uma estrela segue diminuindo, ao passo que a entropia dos sistemas físicos que recebem a energia irradiada pela estrela aumenta. Lembramos que o saldo é sempre positivo, a entropia como um todo aumenta.

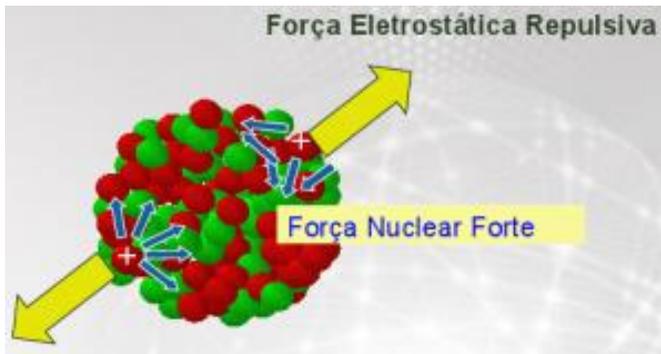
Embora a energia do universo permaneça constante, a entropia ou desordem, cresce com o tempo. Isso significa dizer que cada vez mais energia “organizada” tende a se transformar em calor através de processos sem retorno. À medida que os corpos trocam calor e entram em equilíbrio térmico, aquela energia que podia ser utilizada devido às diferenças de temperatura, fica inviável, visto que o processo é irreversível. Assim, com o passar do tempo, menos energia fica disponível para a produção de trabalho. É importante destacar que não

se perde energia, mas sim a sua disponibilidade, ou seja, a oportunidade de se converter parte do calor em trabalho. Devido às transformações de outras formas de energia em calor, como no interior das estrelas, por exemplo, o universo como um todo, tenderá ao equilíbrio térmico (entropia máxima) entre todas as suas partes.

## 8 Fusão Nuclear

Sabe-se que prótons possuem carga de sinal positivo e elétrons carga de sinal negativo e, que partículas de cargas de mesmo sinal se repelem e de sinais contrários se atraem. Sendo assim, o que explica o fato de os prótons se manterem unidos no núcleo de um átomo? É que existe uma força atrativa muito intensa entre os núcleons (prótons e nêutrons) que compensa a força de repulsão elétrica. Essa força é chamada de interação nuclear forte. Seu alcance é da ordem de  $10^{-15}$  m, se restringindo apenas ao núcleo atômico, e não depende da carga elétrica, atuando igualmente entre prótons, nêutrons, e entre prótons e nêutrons. Ela é responsável pela coesão dos núcleos atômicos e também pela liberação de energia através dos processos de fissão e fusão nuclear [10].

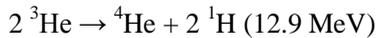
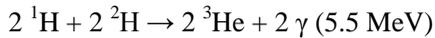
Figura 16 – A força nuclear forte se opõe a repulsão elétrica, mantendo os núcleons unidos.



Fonte: <http://www.coisasquedeusfala.com.br/2013/01/>. Acesso em: 28 jan. 2016.

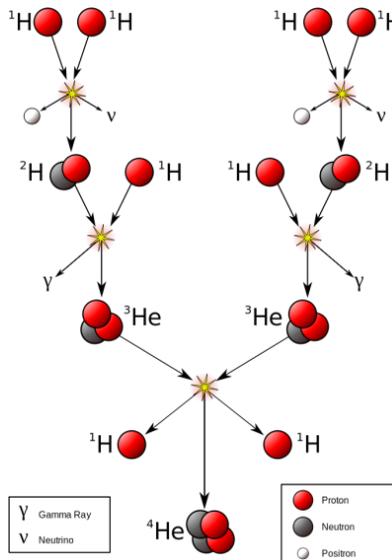
Vimos que no processo de formação de uma estrela, os prótons, a altíssimas velocidades vencem a repulsão coulombiana e caem sob o

domínio da força nuclear. A força nuclear entre os prótons acelera uns contra os outros, provocando como resultado líquido a transformação de quatro prótons em um núcleo de hélio, liberando energia. Para temperaturas da ordem de 10 milhões de Kelvin, como no interior do Sol, a transformação de hidrogênio em hélio se dá principalmente pelo “ciclo próton-próton” (ou ciclo p-p) [14]:



Essas reações resultam na reação global:  $4 \text{ } ^1\text{H} \rightarrow \text{ } ^4\text{He} + 2 \text{ e}^+ + 2 \text{ } \gamma + 2 \text{ } \nu_e$ , onde  $\text{e}^+$  é um pósitron,  $\gamma$  é um fóton de raio gama,  $\nu_e$  é um neutrino, H e He são isótopos de hidrogênio e hélio, respectivamente. A energia liberada em cada ciclo é de 26,7 MeV.

Figura 17 – O ciclo próton-próton é o principal responsável pela geração de energia nas estrelas.



Fonte: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:FusionintheSun.svg/>. Acesso em: 29 jan. 2016.

Essa espécie de transmutação de elementos mais leves em elementos mais pesados é conhecida como fusão nuclear. O interessante nesse processo é que, diferentemente de uma reação química qualquer, a massa não se conserva. No caso da fusão do hidrogênio em hélio, tem-se que a massa do núcleo de hélio é 0,7% menor que a soma das massas dos 4 prótons envolvidos na fusão. A diferença de massa é convertida em energia de acordo com a fórmula de Einstein:  $E = mc^2$ . Essa relação matemática nos diz que uma pequena quantidade de matéria pode gerar uma enorme quantidade de energia. Um grama de matéria totalmente convertida em energia produz 90 trilhões de Joules. Esta quantidade de energia é suficiente para ferver aproximadamente 270 mil toneladas de água à temperatura ambiente. O Sol, por sua vez, converte aproximadamente 600 milhões de toneladas de hidrogênio em hélio por segundo [2].

Em uma estrela, a fusão nuclear acontece principalmente em sua região central (núcleo), onde as temperaturas são mais altas. A energia proveniente da fusão nuclear é irradiada para fora do núcleo, e parte dela vai aquecer o próprio gás que o envolve, sendo depois irradiada novamente para regiões cada vez mais externas. Dependendo da massa e da composição química, um conjunto de diferentes reações de fusão nuclear pode acontecer no núcleo das estrelas, produzindo energia necessária para sustentar a emissão de radiação.

## **9 Fissão Nuclear e Reatores Nucleares**

Diferentemente da fusão nuclear, em que elementos se unem para formar elementos mais pesados, no processo de fissão nuclear, elementos mais pesados se desintegram em elementos mais leves, liberando energia. A fissão nuclear é, portanto, uma “quebra” de núcleos atômicos. A soma das massas dos produtos é menor que a soma das massas dos reagentes e novamente há uma conversão de massa em energia. A fissão nuclear pode ser empregada na fabricação de bombas, denominadas bombas atômicas ou bombas A. Nelas, a massa do núcleo pesado (em geral urânio 235 ou plutônio 239) fissionável é maior que a massa total dos fragmentos resultantes da fissão. A diferença de massa é convertida em energia. No Projeto Manhattan, os Estados Unidos fabricaram as primeiras bombas atômicas de fissão, lançadas sobre as cidades japonesas de Hiroshima e Nagasaki em 6 e 9 de agosto de 1945 respectivamente, matando cerca de 220 mil pessoas e deixando muitas outras com sequelas gravíssimas [15].

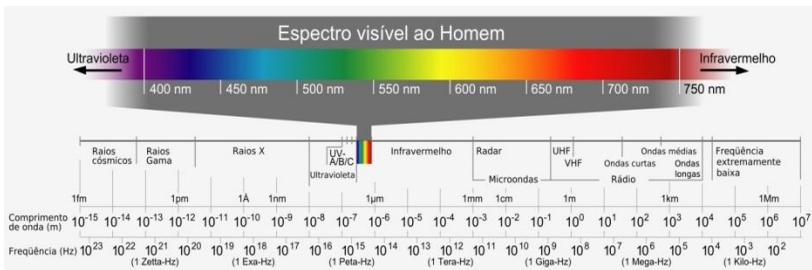
Também podem ser produzidas bombas nucleares de fusão, denominadas bombas de hidrogênio ou bombas H. O processo é o mesmo que ocorre no interior das estrelas, porém, numa escala de energia bem menor. Para se conseguir temperaturas necessárias à fusão do hidrogênio, a única maneira até hoje encontrada, é o uso de uma bomba de fissão, ou seja, a bomba atômica é quem detona a bomba de hidrogênio. Explosões de bombas A ou bombas H causam impactos devastadores, ondas de pressão e calor que explodem ou derretem o que encontram pela frente, além de altíssimos níveis de radiação de nêutrons e raios  $\gamma$ .

A fissão nuclear também pode ser usada para fins pacíficos. Existem pequenos reatores que produzem isótopos para uso na medicina e também nas indústrias, mas a maior parte dos reatores está instalada em usinas destinadas à produção de eletricidade, isto é, usinas termelétricas movidas à energia nuclear. Poderíamos esperar que existissem reatores nucleares de fusão, pois eles seriam capazes de produzir energia a partir da fusão de núcleos de hidrogênio, obtido da água, resultando em núcleos de Hélio, um inofensivo gás nobre. Há mais de meio século, técnicos e cientistas têm se dedicado, até hoje sem sucesso, à pesquisa da fusão nuclear controlada, o que significaria reproduzir em nosso planeta, um processo de geração de energia semelhante ao que ocorre nas estrelas. Além da dificuldade de manusear a matéria em altíssimas temperaturas, o problema maior é alcançar e manter tais temperaturas sem usar uma bomba A [15]. Fica por enquanto a esperança que um dia essa tecnologia possa ser desenvolvida.

## **10 Radiação Térmica**

As estrelas emitem energia sob a forma de ondas eletromagnéticas e outros tipos de partículas. Ondas eletromagnéticas são produzidas por cargas elétricas aceleradas e por transições entre níveis de energia quantizados. Diferentemente das ondas mecânicas, não necessitam de um meio material para se propagarem. No vácuo, elas viajam com a velocidade da luz, e de fato, a luz também é uma onda eletromagnética. As ondas eletromagnéticas se diferenciam pelo comprimento de onda ou frequência, que por sua vez determinam a forma com que elas interagem com a matéria. O conjunto de todas as frequências possíveis para as ondas eletromagnéticas é denominado de espectro eletromagnético.

Figura 18 – O espectro eletromagnético.



Fonte: [https://pt.wikipedia.org/wiki/Espectro\\_vis%C3%ADvel](https://pt.wikipedia.org/wiki/Espectro_vis%C3%ADvel). Acesso em: 07 abr. 2016.

Em virtude da temperatura, qualquer corpo emite radiações eletromagnéticas. A distribuição de frequência dessas radiações depende da temperatura e é denominada radiação térmica. Nas temperaturas usuais, a maioria dos corpos é visível não pela luz que emitem, mas pela luz que refletem, uma vez que nessas temperaturas, a maior parte da radiação emitida está na faixa do infravermelho, invisível ao olho humano. Mas, quando se aquece um objeto metálico, por exemplo, percebe-se que a partir de certa temperatura ele começa a emitir luz visível, primeiramente na cor vermelha apagada, tornando-se vermelho mais intenso, tendendo ao branco azulado à medida que a temperatura aumenta. A experiência indica, portanto, que a cor da luz emitida e a intensidade da radiação dependem da temperatura [16]. A figura abaixo mostra um metal emitindo luz depois de aquecido.

Figura 19 – Metal aquecido emitindo luz.

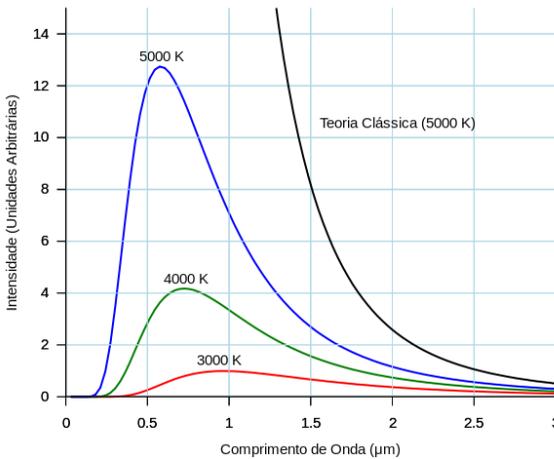


Fonte:

[https://pt.wikipedia.org/wiki/Irradia%C3%A7%C3%A3o\\_t%C3%A9rmica](https://pt.wikipedia.org/wiki/Irradia%C3%A7%C3%A3o_t%C3%A9rmica).  
Acesso em: 06 fev. 2016.

De modo geral, a forma detalhada do espectro da radiação térmica emitida por um corpo a certa temperatura depende da sua composição. No entanto, a experiência mostra que há um tipo de corpo, que quando aquecido, emite espectros de caráter universal. Esses corpos possuem a propriedade especial de absorver toda a radiação térmica incidente sobre eles, e por não refletirem nenhuma radiação, inclusive a luz visível, são chamados de corpos negros. Por ser um absorvedor perfeito, um corpo negro é também um emissor perfeito. Em equilíbrio térmico, ele irradia energia na mesma taxa que a absorve. Verifica-se que todos os corpos negros à mesma temperatura emitem radiações térmicas com a mesma intensidade para cada comprimento de onda, independentemente dos detalhes de sua composição. Essa característica faz com que os corpos negros se tornem referência no estudo da radiação térmica, também conhecida como radiação de corpo negro. A figura abaixo mostra curvas espectrais experimentais de corpo negro para três temperaturas distintas.

Figura 20 – Espectro de radiação de Corpo Negro. As curvas em vermelho, verde e azul representam a distribuição de intensidade de radiação por comprimento de onda de um corpo negro para temperaturas de 3000K, 4000K e 5000K respectivamente. A curva em preto é a distribuição teórica da física clássica.



Fonte: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/92/Corpo\\_negro.svg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/92/Corpo_negro.svg)  
Acesso em: 05 fev. 2016.

Na tentativa de explicar a irradiação de energia em função do comprimento de onda por meio da física clássica, os físicos John William Strutt (1842-1919), mais conhecido como Lord Rayleigh e James Hopwood Jeans (1877-1946), obtiveram uma curva de distribuição de frequências ou comprimentos de onda discrepante da curva experimental. Para grandes comprimentos de onda (baixas frequências) as curvas coincidem, mas para comprimentos de onda menores (altas frequências), a curva teórica se afasta grosseiramente da curva experimental, indicando que a intensidade da radiação tende ao infinito para comprimentos de onda que tendem a zero (Figura 20). Esse comportamento não realista da previsão da teoria clássica ficou conhecido como “catástrofe do ultravioleta”. A expressão enfatiza a não validade da teoria clássica nessa região do espectro. Esse era um problema desafiador para os físicos na época [16].

A solução para a catástrofe do ultravioleta foi proposta no ano de 1900 pelo físico alemão Max Planck (1858-1947). Para explicar a distribuição espectral da radiação de corpo negro, ele introduziu o

conceito de quantização da energia, que o conduziu a uma equação que concordava com os dados experimentais em todos os comprimentos de onda, conhecida como lei de Planck. Por sua complexidade, a lei de Planck não será aqui abordada. O conceito de que a energia, antes vista como uma grandeza contínua, não poderia ser emitida em qualquer quantidade, mas apenas em valores bem definidos, denominados *quantum* (do latim “porção de algo”) de energia ou fótons de energia, parecia tão absurdo na época, que até mesmo Planck, ao introduzi-lo, definiu-o como um “ato de desespero”. Segundo ele, a cada quantum corresponde a energia  $E$  dada por:

$$E = h \cdot f,$$

em que  $h$  é a constante de Planck e  $f$  é a frequência da onda emitida. A solução dada por Planck para a “catástrofe do ultravioleta” lhe rendeu o prêmio Nobel de Física de 1918 e é considerada o ponto de partida da história da física quântica.

Observando as curvas espectrais de corpo negro (Figura 20) podem-se obter duas conclusões importantes. A primeira delas é que existe um comprimento de onda no qual a intensidade da energia irradiada é máxima. À medida que a temperatura aumenta, esse máximo se desloca para valores de comprimento de onda menores. A segunda é que a quantidade de energia irradiada (área sob a curva) é proporcional ao aumento de temperatura. Essas observações deram origem, respectivamente, à lei do deslocamento de Wien e a lei de Stefan-Boltzmann. Ambas podem ser deduzidas da lei de Planck. A lei do deslocamento de Wien foi formulada empiricamente pelo físico alemão Wilhelm Wien. Ela relaciona o comprimento de onda no qual se situa a máxima emissão de radiação de corpo negro e sua temperatura:

$$\lambda_{m\acute{a}x} \cdot T = 2.898 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K},$$

Em 1879, o físico austríaco Josef Stefan (1835-1893), partindo também de resultados experimentais chegou à conclusão que a potência (energia total irradiada por segundo) de um corpo negro é diretamente proporcional à sua temperatura elevada à quarta potência e também diretamente proporcional à área da superfície emissora:

$$P_{rad} = A \cdot \sigma \cdot T^4,$$

em que  $P_{rad}$  é a potencia irradiada;

A é a área do corpo negro;

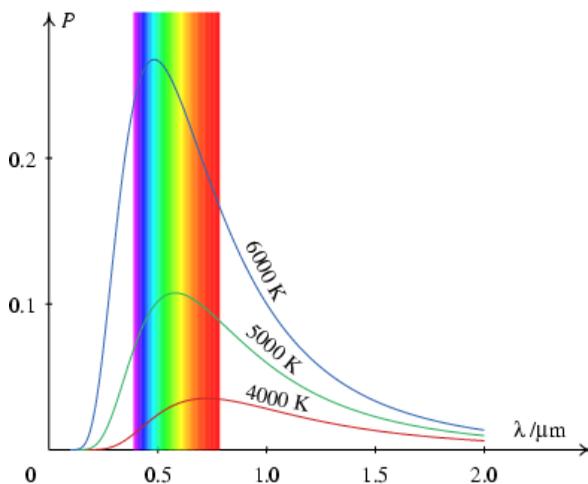
T a sua temperatura absoluta e

$\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann, que vale  $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ .

Essa relação ficou conhecida como lei de Stefan. Mais tarde, em 1884, o físico austríaco Ludwig Boltzmann (1844-1906), usando argumentos termodinâmicos deduziu a lei de Stefan teoricamente, e ela passou a ser conhecida como lei de Stefan-Boltzmann.

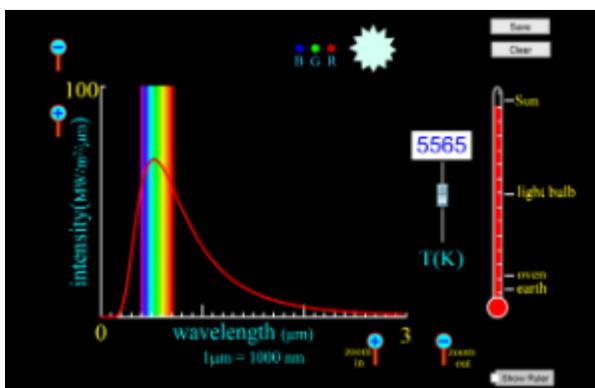
Corpos negros não existem na natureza, visto que nenhum objeto tem absorção e emissão perfeitas. No entanto, muitos corpos incandescentes têm espectros de emissão bem parecidos com o de corpo negro. Com o objetivo de estudar esses corpos, podemos supor que o espectro da radiação emitida por eles é igual ao espectro da radiação emitida por um corpo negro, sem que as conclusões sejam invalidadas. A figura 21 mostra o espectro de radiação de corpo negro para as temperaturas de 4000K, 5000K e 6000K. Para uma temperatura de 4000K, o pico de intensidade se dá em um comprimento de onda que corresponde ao vermelho, dessa forma, um objeto que irradie aproximadamente como um corpo negro ficará vermelho a esta temperatura. Já se a temperatura do objeto for de 5000K, o pico de intensidade se dará em um comprimento de onda na faixa do amarelo esverdeado, no entanto, o objeto não terá essa cor por causa da superposição das outras cores também presentes no espectro, tornando-o esbranquiçado. E ainda, se a temperatura do objeto for de 6000K o pico de intensidade se dará próximo do azul e o corpo será azul. Recomenda-se ao leitor, o uso de um simulador de curva espectral de corpo negro (Figura 22) para diferentes temperaturas, disponível na internet no seguinte endereço eletrônico: [https://phet.colorado.edu/sims/blackbody-spectrum/blackbody-spectrum\\_pt.html](https://phet.colorado.edu/sims/blackbody-spectrum/blackbody-spectrum_pt.html).

Figura 21 – Espectro de corpo negro para as temperaturas de 4000K, 5000K e 6000K.



Fonte: <http://www.fisica-interessante.com/aula-historia-e-epistemologia-da-ciencia-11-crise-da-fisica-3.html>. Acesso em: 05 fev. 2016.

Figura 22 – Simulador de curva espectral de corpo negro para diferentes temperaturas, disponível em: [https://phet.colorado.edu/sims/blackbody-spectrum/blackbody-spectrum\\_pt.html](https://phet.colorado.edu/sims/blackbody-spectrum/blackbody-spectrum_pt.html).



Fonte: [https://phet.colorado.edu/sims/blackbody-spectrum/blackbody-spectrum\\_pt.html](https://phet.colorado.edu/sims/blackbody-spectrum/blackbody-spectrum_pt.html). Acesso em: 05 fev. 2016.

A temperatura no centro de qualquer estrela é da ordem de milhões de Kelvin, necessária à fusão nuclear. O espectro emitido no centro da estrela, pelas reações nucleares, é composto principalmente de raios gama, não visível. A radiação gama flui do interior da estrela para fora, sendo absorvida e reemitida em todas as direções. Ao migrar para as camadas mais externas e “frias”, o espectro torna-se cada vez menos energético passando a ser principalmente de raios x, ultravioleta e, finalmente perto da superfície, no visível. A cor de uma estrela é definida, portanto, pela temperatura de sua superfície.

As estrelas emitem radiação de forma parecida com a de um corpo negro, logo, as mais frias são vermelhas enquanto as mais quentes são azuis. Ao se olhar para a constelação de *Órion* com um binóculo, pode-se identificar a estrela *Betelgeuse*, que é avermelhada, e a estrela *Rigel*, que é azulada. A partir da análise do espectro de uma estrela, associa-se o comprimento de onda que mais contribui para a radiação emitida e, através da lei de Wien obtém-se a temperatura superficial aproximada da estrela:

$$T = \frac{2.898 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}}{\lambda_{\text{máx}}},$$

Pode-se utilizar a lei de Stefan-Boltzmann para estabelecer a relação entre a potência irradiada ou luminosidade (L), o raio (R) e a temperatura efetiva ( $T_{ef}$ ) de uma estrela, dada por:

$$L = 4 \pi R^2 \cdot \sigma \cdot T_{ef}^4,$$

A temperatura efetiva de uma estrela é definida como a temperatura de um corpo negro que emite a mesma quantidade de energia por unidade de área e por unidade de tempo que a estrela. A temperatura efetiva é apenas um valor representativo, uma vez que a temperatura de uma estrela cresce da superfície em direção ao seu interior variando em milhões de graus Celsius. A temperatura de uma estrela medida pela lei de Wien (a partir da intensidade em um comprimento de onda) é chamada de temperatura de brilho e difere ligeiramente da temperatura efetiva medida pela lei de Stefan-Boltzmann (a partir da luminosidade e do raio). Pode-se ainda definir a temperatura de cor, determinada a partir da razão da intensidade em dois comprimentos de onda diferentes. Essas temperaturas não são iguais porque as estrelas não se comportam exatamente como corpos negros.

## 11 Espectroscopia

A luz emitida por uma estrela permite que, além de sua temperatura, possam ser determinadas outras propriedades físicas como sua composição química, densidade, aceleração gravitacional superficial, distância, etc. O espectro de uma estrela é a maior fonte de informações a seu respeito. Ele corresponde à intensidade da radiação decomposta em comprimentos de onda específicos.

O estudo da luz e demais radiações eletromagnéticas emitidas ou absorvidas por um corpo denomina-se espectroscopia. Além do seu uso na astronomia, a espectroscopia tem ampla utilização na física e na química. O instrumento utilizado para visualizar o espectro é o espectroscópio (Figura 23). A peça básica do espectroscópio é a rede de difração ou o prisma, cuja função é separar o feixe de radiação em seus comprimentos de onda componentes. O espectro pode ser registrado através de imagens ou gráficos construídos por softwares a partir de medidas de corrente, tensão, resistência elétrica, etc. Ele também pode ser observado diretamente para o caso de uma análise da contribuição na faixa do visível.

Figura 23 – Espectroscópio de prisma ou rede de difração com análise por observação direta.



Fonte: <http://www.iberdidac.org/news/3bscientific/3Bscientific14022014.html>.  
Acesso em: 10 fev. 2016.

A espectroscopia se originou no ano de 1665, quando o físico inglês Isaac Newton (1642-1727), observou que a luz branca, como a luz solar, ao incidir sobre um prisma, decompunha-se ou separava-se em diferentes cores formando uma imagem semelhante a que se vê em um arco-íris.

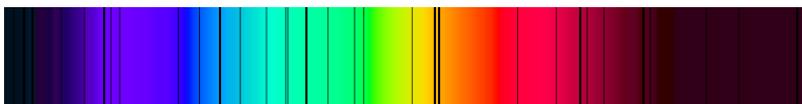
Figura 24 – Representação artística da experiência em que Isaac Newton fez passar luz branca através de um prisma produzindo um espectro contínuo.



Fonte: <http://www.escolapedia.com/el-arco-iris/>. Acesso em: 10 fev. 2016.

O espectro obtido por Newton ao usar um prisma para decompor a luz solar se estende do vermelho ao violeta, a princípio de forma contínua. Contudo através de uma análise mais cuidadosa e com equipamento de maior resolução, pode-se observar a presença de linhas escuras. Já no início do século XIX, o alemão Joseph Von Fraunhofer (1787 – 1826), que fabricava instrumentos de vidro (lentes, prismas, microscópios e telescópios), já havia contado 574 linhas escuras no espectro solar, chamadas depois de linhas de Fraunhofer (Figura 25). Fraunhofer utilizava as linhas do espectro solar para calibrar seus instrumentos e determinar as propriedades dos vidros. Ele também observou linhas escuras nos espectros de algumas estrelas (*Sírius*, *Castor*, *Pollux*, *Capella*, *Betelgeuse* e *Procyon*) e é considerado um dos pioneiros da espectroscopia estelar [2].

Figura 25 – Espectro solar com linhas escuras.



Fonte: [https://pt.wikipedia.org/wiki/Espectro\\_de\\_Fraunhofer#/media](https://pt.wikipedia.org/wiki/Espectro_de_Fraunhofer#/media). Acesso em: 10 fev. 2016.

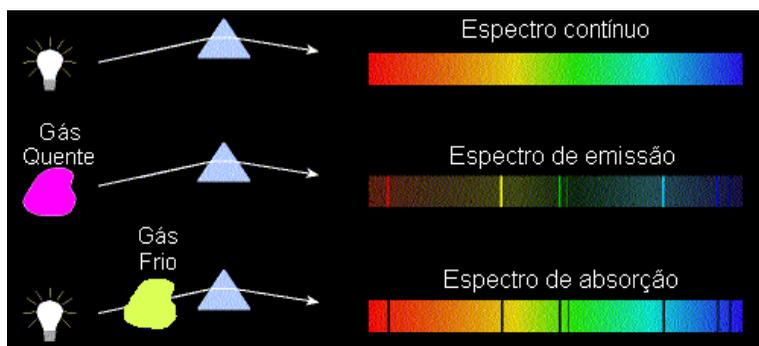
Em 1856, o químico alemão Robert Wilhelm Bunsen (1811 - 1899) e seu colaborador, o físico Gustav Robert Kirchhoff (1824 - 1887), observaram os espectros de diversos elementos e perceberam que o espectro formado não era contínuo, e sim constituído de séries de linhas brilhantes que variavam de elemento para elemento. O conhecimento acumulado permitiu a Kirchhoff formular três importantes leis empíricas sobre os espectros que hoje são conhecidas como leis de Kirchhoff para a espectroscopia. São elas [2]:

1ª lei: Um corpo opaco em altas temperaturas, sólido, líquido ou gasoso, emite um espectro contínuo.

2ª lei: Um gás transparente (pouco denso) produz um espectro de linhas brilhantes (de emissão). O número e a cor dessas linhas dependem dos elementos químicos presentes no gás.

3ª lei: Se um espectro contínuo passar por um gás em temperatura mais baixa, o gás frio causa a presença de linhas escuras (absorção). O número e a posição dessas linhas dependem dos elementos químicos presentes no gás.

Figura 26 – Os três tipos de espectros na classificação de Kirchhoff: o contínuo, o de emissão e o de absorção.



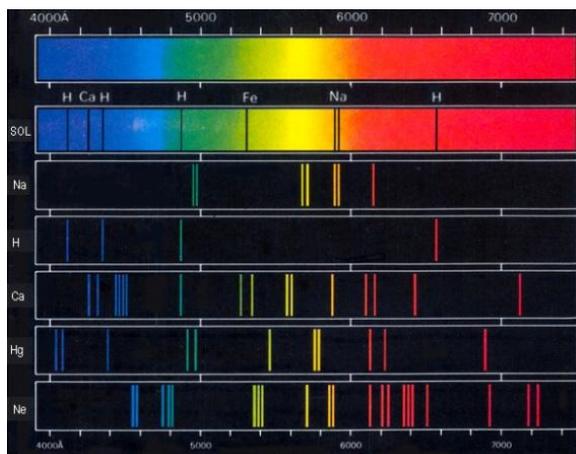
Fonte: <http://astro.if.ufrgs.br/rad/espec/espec.htm>. Acesso em: 13 fev. 2016.

As descobertas feitas por Bunsen e Kirchhoff impulsionaram o desenvolvimento da espectroscopia. O fato de cada elemento químico possuir um padrão único de emissão e absorção permite que as linhas espectrais sejam utilizadas para sua identificação, constituindo-se como uma espécie de "impressão digital" do elemento. Ao associar o espectro

solar com as evidências experimentais, Kirchhoff concluiu que o Sol deveria ser constituído de um gás “quente” envolto por um gás “frio”. Esse gás “frio” absorve uma parte do espectro contínuo emitido, causando a presença de linhas escuras em comprimentos de onda bem definidos no espectro solar. Comparando os espectros, ele descobriu linhas de magnésio, cálcio, níquel, entre outros elementos [2].

Em 1862, o astrônomo sueco Anders Jonas Ångström (1814-1874) identificou linhas de hidrogênio no Sol, e em 1868 o astrônomo inglês *Sir* Joseph Norman Lockyer (1836-1920) descobriu uma linha não identificada no espectro solar, que ele associou a um novo elemento químico, o hélio, do original grego *helios*, que quer dizer Sol. Somente 27 anos mais tarde o elemento hélio foi descoberto na Terra, pelo químico inglês *Sir* William Ramsay (1852-1916) ao perceber que o espectro de um minério de urânio produziu uma linha na posição exata daquela encontrada por Lockyer no espectro do Sol. A figura 27 mostra (de cima para baixo) o espectro contínuo emitido por um sólido aquecido, o espectro de absorção do Sol, onde apenas as linhas mais fortes são indicadas, juntamente com os elementos que as produzem e em seguida os espectros de emissão de alguns elementos químicos. Percebemos que as linhas de emissão que aparecem nos espectros de alguns elementos químicos se alinham perfeitamente com as linhas de absorção correspondentes a estes elementos que estão assinaladas no espectro de absorção do Sol. Isto indica que as linhas de emissão e de absorção correspondentes têm o mesmo comprimento de onda [2, 17].

Figura 27 – Espectros de emissão de um sólido aquecido e de diversos elementos, juntamente com o espectro de absorção do Sol.



Fonte: [http://www.on.br/ead\\_2013/site/conteudo/cap11-espectro/espectro-general.html](http://www.on.br/ead_2013/site/conteudo/cap11-espectro/espectro-general.html). Acesso em: 12 fev. 2016.

Assim como o Sol, a grande maioria das estrelas emite espectros contínuos com linhas de absorção. O contínuo emitido tem forma similar à de um corpo negro com a temperatura da superfície da estrela. As linhas de absorção são causadas pelos átomos de diferentes elementos na atmosfera da própria estrela, que absorvem radiação de certas frequências.

Embora Fraunhofer já tivesse observado alguns espectros de estrelas, investigações mais completas dos espectros das estrelas foram feitas posteriormente pelo astrônomo britânico William Huggins (1824-1910) e pelo astrônomo italiano Angelo Secchi (1818-1878), que perceberam a diversidade de espectros estelares. Secchi propôs uma primeira classificação das estrelas em tipos espectrais, feita puramente em termos da aparência dos espectros obtidos, pois ainda não se sabia a relação entre as linhas de absorção e outras propriedades físicas [14, 17]. Mais tarde, descobriu-se que embora as linhas de absorção revelem a composição química da estrela, o aparecimento ou não dessas linhas depende da temperatura, ou seja, mais do que a composição química, é a temperatura que determina o espectro das estrelas. Por exemplo, somente estrelas com temperaturas entre 7.000 K e 10.000 K apresentam linhas fortes do hidrogênio no espectro, apesar dele ser o elemento mais

abundante em todas as estrelas. Assim, o fato de uma estrela ter linhas de certo elemento em seu espectro indica que esse elemento está presente na atmosfera da estrela, mas o fato da estrela não ter as linhas de um elemento não indica que o elemento não exista. Atualmente se sabe que as estrelas são formadas em geral por 90% de Hidrogênio, aproximadamente 9% de Hélio e cerca de 1% a 2% de elementos mais pesados.

A classificação espectral usada atualmente foi desenvolvida no observatório de Harvard, nos Estados Unidos, no início do século XX e se baseia nas intensidades relativas das linhas de absorção presentes nos espectros. Nela as estrelas são classificadas em função decrescente da temperatura superficial. A tabela 1 mostra informações sobre os principais tipos espectrais.

Tabela 1: Classificação das estrelas em função decrescente da temperatura.

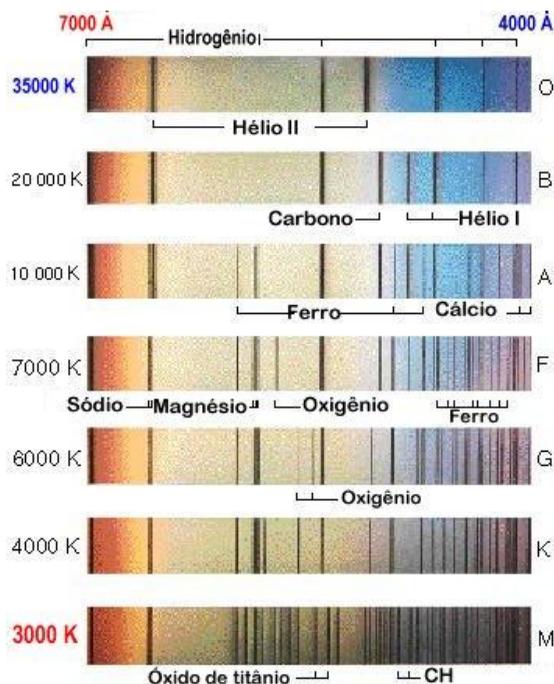
<b>Tipo Espectral</b>	<b>Cor da Estrela</b>	<b>Temperatura Superficial (K)</b>	<b>Exemplo</b>
<b>O</b>	azul	≈ 20.000 a 40.000	Mintaka
<b>B</b>	branco-azulado	≈ 15.000	Rigel
<b>A</b>	branco	≈ 9.000	Sírius
<b>F</b>	branco-amarelado	≈ 7.000	Prócion
<b>G</b>	amarelo	≈ 5.500	Capella
<b>K</b>	alaranjado	≈ 4.000	Aldebarã
<b>M</b>	vermelho	≈ 3.000	Betelgeuse

Fonte: OLIVEIRA FILHO, Kepler de Souza; SARAIVA, Maria de Fátima Oliveira. *Astronomia & Astrofísica*. 2. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2004.

Cada tipo espectral se subdivide em 10 classes, sendo 0 a mais quente, dentro da classe e 9 a mais fria. Por exemplo, o Sol pertence à classe espectral G2, sendo muito semelhante à Capella (G0), enquanto Sírius é da classe A1 e Betelgeuse é da classe M2 [1, 14]. A figura 29 mostra alguns espectros de estrelas (na faixa do visível). O padrão de linhas de absorção difere de um espectro para o outro, sendo que para determinados comprimentos de onda, em algumas estrelas as linhas aparecem mais fortes do que em outras. Neste caso, essas estrelas são

semelhantes em termos de composição química e as diferenças espectrais se devem unicamente às diferenças de temperatura [9].

Figura 28 – Espectros na faixa do visível para estrelas diferentes.



Fonte: <http://astro.if.ufrgs.br/rad/espec/espec.htm>. Acesso em: 13 fev. 2016.

A classificação de Harvard não leva em conta a luminosidade (brilho) das estrelas que depende não somente da temperatura superficial, mas também do raio. Através da largura das linhas espectrais de uma estrela pode-se determinar sua luminosidade. Essas larguras dependem da aceleração gravitacional na superfície da estrela, que por sua vez permite o cálculo de seu raio, culminando na determinação da luminosidade através da Lei de Stefan-Boltzmann. Nesse sentido, as estrelas podem ser classificadas também de acordo com a sua luminosidade. Existem seis diferentes classes de luminosidade [2]:

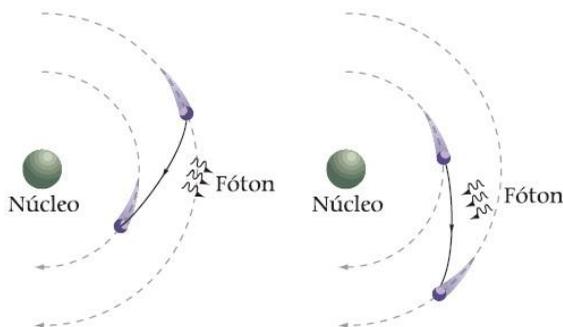
Ia - supergigantes superluminosas. Exemplo: *Rigel*

- Ib - supergigantes. Exemplo: *Betelgeuse*
- II - gigantes luminosas. Exemplo: *Antares*
- III - gigantes. Exemplo: *Aldebarã*
- IV - subgigantes. Exemplo: *Acrux*
- V - anãs (seqüência principal). Exemplo: Sol

A espectroscopia tem importância ímpar para o estudo das estrelas e nos remete as seguintes questões: Como acontece a emissão ou absorção pelos átomos apenas em certas frequências ou comprimentos de onda? E, por que existe uma relação forte entre essas linhas e a temperatura? As respostas exigem um conhecimento mais detalhado a respeito da estrutura da matéria e começaram a ser construídas a partir do início do século XX com o desenvolvimento da Mecânica Quântica. Em 1911, o físico e químico neozelandês Ernest Rutherford (1871-1937), descobriu que os átomos são compostos de um pequeno núcleo, com carga elétrica positiva, envolto por uma nuvem de elétrons, com carga elétrica negativa. Os elétrons não poderiam estar em repouso, pois seriam atraídos em direção ao núcleo provocando o colapso do átomo. Rutherford propôs que os elétrons estariam girando em torno do núcleo em órbitas circulares, o que não resolvia o problema, porque a aceleração sofrida provocaria perda de energia pela emissão de ondas eletromagnéticas num espectro contínuo, e o elétron se moveria em espiral até atingir o núcleo, tornando o colapso inevitável.

Apenas alguns anos antes do descobrimento de Rutherford, vimos que Planck havia proposto que a matéria emite energia de forma discreta ao solucionar o problema da radiação de corpo negro. Os físicos já estavam convencidos que a física clássica não era suficiente para explicar o mundo microscópico dos átomos. Em 1913, o físico dinamarquês Niels Henrik Bohr (1885-1962), desenvolveu um modelo atômico no qual propunha uma modificação no modelo de Rutherford, aplicando a ideia da quantização de Planck. Bohr postulou que os elétrons se movem em órbitas circulares estáveis sem emitir radiação. As órbitas possíveis, também conhecidas como estados estacionários são tais que o momento angular do elétron é um múltiplo de um valor fundamental. A cada órbita é associado um nível de energia. Segundo ele, apenas quando o elétron muda de órbita, um fóton é absorvido ou emitido, carregando consigo uma quantidade de energia exatamente igual à diferença de energia entre as órbitas envolvidas. A energia do fóton emitido obedece à relação  $E = h \cdot f$ , sugerida por Planck.

Figura 29 – Transição entre órbitas segundo o modelo de Bohr. Ao passar de um nível de energia maior para um nível de energia menor o elétron emite um fóton (esquerda). Ao passar de um nível de energia menor para um nível de energia maior o elétron absorve um fóton (direita).



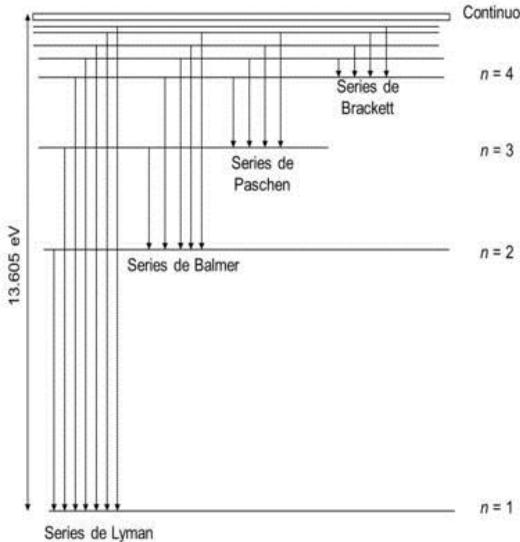
Fonte: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAgR0gAA/projeto-raios-laser>.  
Acesso em: 13 fev. 2016.

O modelo de Bohr para o átomo de hidrogênio permite mostrar que a energia ( $E_n$ ) do elétron referente ao nível energético ( $n$ ) é dada por:

$$E_n = -\frac{13,6}{n^2},$$

onde a energia  $E_n$  é medida em elétron-volts e  $n$  assume apenas valores inteiros: 1,2,3.... $\infty$ . A figura 30 mostra alguns dos níveis de energia para o átomo de hidrogênio e as linhas de emissão para a transição entre diferentes níveis energéticos. O fato de a energia estar com sinal negativo indica que o elétron está ligado ao átomo e precisa receber a energia correspondente para tornar-se livre. Para  $n = 1$ , o elétron está no estado de mais baixa energia, chamado de estado fundamental. Todos os outros estados com  $n \neq 1$  são considerados estados excitados. Um elétron num estado excitado sempre tende a voltar para o estado fundamental.

Figura 30 – Níveis de energia para o átomo de hidrogênio. Cada linha horizontal representa um nível de energia e as linhas verticais representam as transições entre esses níveis.



Fonte: <https://fisica2spp.wikispaces.com/UNIDAD+VI>. Acesso em: 14 fev. 2016.

As transições entre qualquer nível e o nível final 1, 2, 3 e 4 para o átomo de hidrogênio correspondem, respectivamente às séries (conjunto de linhas no espectro) de Lyman, Balmer, Paschen e Brackett. É interessante notar que as séries de Lyman e Brackett ainda não tinham sido descobertas na época em que Bohr desenvolveu o seu modelo. Elas foram previstas pelo modelo e descobertas em seguida, recebendo o nome de seus descobridores [16]. O modelo de Bohr não só explicava a existência das linhas no espectro do hidrogênio, como também permitia calcular com precisão seus comprimentos de onda. Apesar de concordar com os espectros do átomo de hidrogênio, a teoria de Bohr falha na descrição de átomos com mais de um elétron. No entanto, ela pode ser considerada o pontapé inicial para os estudos posteriores que culminaram no surgimento de uma teoria que explica corretamente a estrutura da matéria, a Mecânica Quântica. De acordo com a Mecânica Quântica não faz sentido falar em órbitas de elétrons como pensava Bohr, no entanto as ideias de quantização, níveis de energia, emissão e

absorção de fótons permanecem válidas, explicando corretamente o aparecimento das linhas nos espectros dos mais variados elementos químicos.

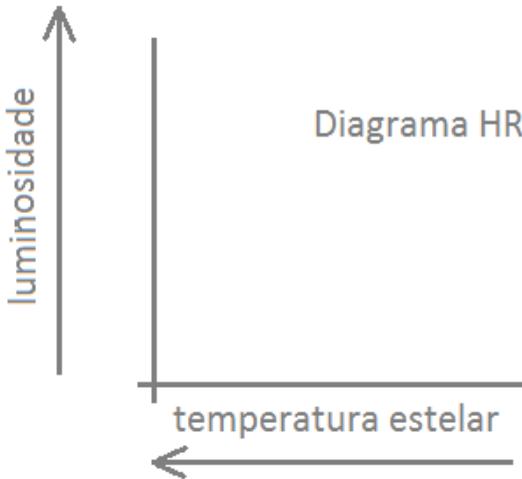
Podemos agora, entender a relação entre o aparecimento das linhas espectrais de emissão ou absorção com a temperatura. Quando um gás é aquecido muitos elétrons dos elementos químicos que o compõem, ao absorver energia através das colisões passam do estado fundamental para estados excitados. O número de elétrons nos estados excitados depende da temperatura de tal maneira que algumas linhas de absorção ou emissão só irão aparecer no espectro se o gás estiver em temperatura suficiente para que elétrons estejam nos níveis associados a estas linhas. Para ilustrar, considere as linhas do Hidrogênio na faixa do espectro visível, as linhas de Balmer. Para que elas estejam presentes no espectro de absorção de uma estrela é necessário que os elétrons dos átomos de hidrogênio estejam excitados ao nível  $n = 2$ . Isso só acontece em estrelas com temperaturas superficiais em torno de 10000K. Para temperaturas menores, muito poucos elétrons estarão no nível  $n=2$  e as linhas de Balmer não aparecerão. Já em estrelas com temperaturas muito altas, existe energia suficiente para ionizar quase todos os átomos de hidrogênio de modo que não existirão transições eletrônicas no átomo de hidrogênio, e conseqüentemente, as linhas de Balmer não aparecerão no espectro. Resta ainda um questionamento: Se os átomos emitem em linhas espectrais, de onde vem o espectro contínuo? Ele é gerado devido ao alargamento das linhas espectrais causado pela forte interação entre os átomos num corpo sólido, líquido ou num gás denso [2].

## 12 O diagrama H-R

Sabe-se que a partir de seus espectros, as estrelas podem ser classificadas de acordo com a temperatura superficial (classificação de Harvard) e também de acordo com a luminosidade (classificação de Luminosidade). Temperatura e luminosidade permitem ainda a construção de uma ferramenta importante para o estudo das estrelas, o diagrama Hertzsprung - Russel ou simplesmente diagrama H-R. Ele recebe este nome, em homenagem aos astrônomos que o construíram de forma independente no início do século XX, o dinamarquês Ejnar Hertzsprung (1873-1967) e o americano Henry Norris Russel (1877-1957). O diagrama H-R de um conjunto de estrelas, é em geral representado por um gráfico de luminosidade (no eixo das ordenadas) contra temperatura (no eixo das abscissas) destas estrelas. Ele revela a

correlação entre estas grandezas, sendo bastante útil para o estudo da evolução estelar.

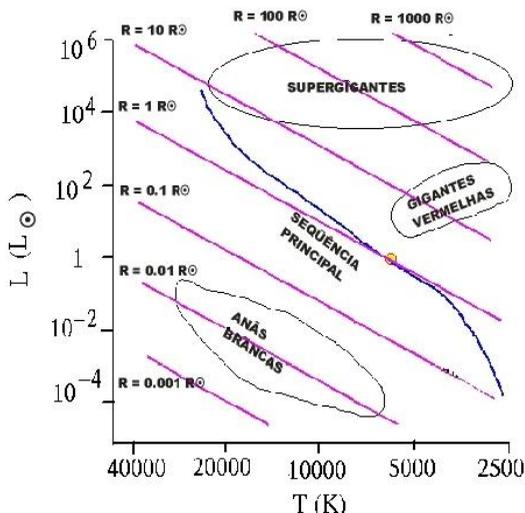
Figura 31 – Forma mais comum de se representar o diagrama H-R. A luminosidade cresce de baixo para cima no eixo vertical enquanto que a temperatura cresce da direita para a esquerda no eixo horizontal.



Fonte: <http://www.if.ufrgs.br/~fatima/fis2010/Aula18-132.pdf>. Acesso em: 18 fev. 2016.

Pode-se, por exemplo, avaliar o raio das estrelas a partir de um diagrama H-R. De acordo com a equação de Stefan-Boltzmann, a luminosidade depende estritamente da temperatura, mas também apresenta uma dependência com o raio. Para uma dada temperatura, a luminosidade cresce de baixo para cima no diagrama, e através da equação anterior conclui-se que o raio também cresce de baixo para cima. Agora, para um dado valor luminosidade, a temperatura diminui da esquerda para a direita de modo que, de acordo com a equação de Stefan-Boltzmann, o raio da estrela deve aumentar nesse mesmo sentido. Logo, o raio de uma estrela aumenta na direção diagonal no diagrama H-R no sentido do canto inferior esquerdo para o canto superior direito, como mostra a figura 32.

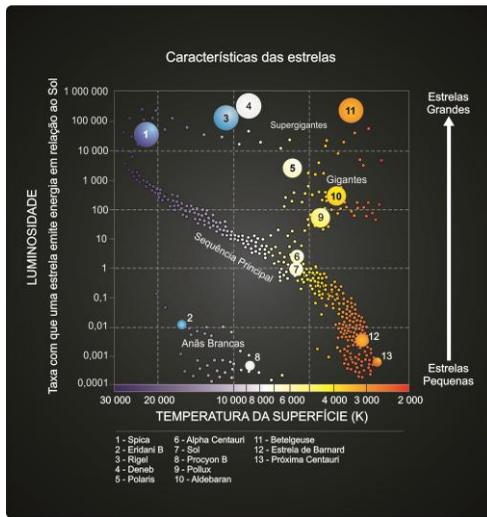
Figura 32 – Estrelas que possuem luminosidade e temperatura que correspondem a pontos sobre as linhas oblíquas têm raio correspondente ao indicado para cada linha.  $R_{\odot}$  significa o raio do Sol.



Fonte: [http://www.if.ufrgs.br/oei/stars/hr/diag\\_hr.htm](http://www.if.ufrgs.br/oei/stars/hr/diag_hr.htm). Acesso em: 18 fev. 2016.

A figura 33 mostra um diagrama H-R para um conjunto de estrelas próximas do Sol. Cada ponto no gráfico corresponde a uma estrela com determinada temperatura superficial e luminosidade. Pode-se ainda associar a temperatura com a cor e o tipo espectral, e a luminosidade com a magnitude (brilho) de cada estrela.

Figura 33 – Diagrama H-R para estrelas próximas ao Sol.



Fonte: <http://astro.if.ufrgs.br/estrelas/node2.htm>. Acesso em: 20 fev. 2016.

A utilidade do diagrama H-R está relacionada com a forma com que os pontos se distribuem por ele. Poderia se pensar que devido à infinidade de estrelas que existem, os pontos num diagrama como este pudessem estar dispostos de maneira aleatória, mas não é isso que se observa. O acúmulo desses pontos em determinadas regiões do diagrama possibilita uma classificação das estrelas em diferentes grupos que por sua vez representam estágios da evolução estelar. Tomando por exemplo, o Sol como referência (número 7 no diagrama H-R da figura anterior), percebe-se que o ponto que designa sua temperatura superficial e luminosidade pertence a uma região do diagrama onde existe uma grande concentração de pontos que se estende do canto superior esquerdo ao canto inferior direito. No diagrama H-R essa região é conhecida como sequência principal. A sequência principal é o primeiro estágio evolutivo de uma estrela recém-nascida.

Acima da Sequência Principal existem ainda duas outras concentrações de pontos que designam estrelas muito luminosas com temperaturas também bastante variáveis de uma para outra, que são as estrelas gigantes (as mais frias são vermelhas e as mais quentes amareladas) e as supergigantes (na sua maioria azuis). Nesse estágio

evolutivo, pós-sequência principal, as estrelas realizam fusão nuclear a partir de elementos mais pesados que o hidrogênio. Abaixo da sequência principal do diagrama H-R existe outra concentração de pontos que designam estrelas de baixa luminosidade. Esses pontos estão associados a estrelas que não realizam mais fusão nuclear e já estão na fase final de sua vida, as anãs brancas. Apesar do nome, nem todas as estrelas pertencentes a esse grupo são necessariamente brancas. Suas temperaturas variam bastante de uma para outra e conseqüentemente a cor também. Deve-se estar claro que os pontos no diagrama H-R não representam a posição espacial das estrelas. Estrelas que ocupam posições próximas no diagrama não estão necessariamente próximas no espaço.

### 13 A Sequência Principal

Após o nascimento das estrelas, temperatura e luminosidade variam muito pouco e são tais que as tornam pertencentes a sequência principal. As estrelas passam 90% do tempo de suas vidas neste estágio, na qual a taxa de produção de energia através da fusão do hidrogênio em hélio (principal forma de obtenção de energia na sequência principal) é praticamente constante. Por passarem quase todo o tempo de suas vidas na sequência principal, a chance de uma estrela no céu estar nesta fase é muito alta. De fato, 90% das estrelas estão nesse estágio evolutivo, sem muitas mudanças na sua estrutura. O Sol é uma delas, e graças à constância de sua temperatura e luminosidade, a vida na Terra é possível.

A grandeza física determinante para uma estrela de sequência principal é a massa. Ela determina a luminosidade, o raio e, portanto a temperatura superficial de uma estrela e a sua posição na sequência principal. Medidas de massas de estrelas binárias (estrelas duplas que orbitam entre si) através da Terceira Lei de Kepler revelam que a massa cresce no mesmo sentido da luminosidade na sequência principal [2, 8]. A dependência da luminosidade com a massa é bastante razoável, uma vez que quanto maior for a massa de uma estrela, maior será a pressão das camadas externas sobre o núcleo e, conseqüentemente, maior será a taxa de produção de energia responsável pela geração da pressão térmica necessária para manter o equilíbrio mecânico. A luminosidade depende da massa segundo as seguintes relações de proporcionalidade [2]:

$$L \propto M^{2.5} \text{ (para } M \leq 0,5 \text{ } M_{\odot})$$

$$L \propto M^4 \text{ (para } 0,5 M_{\odot} \leq M \leq 3 M_{\odot})$$

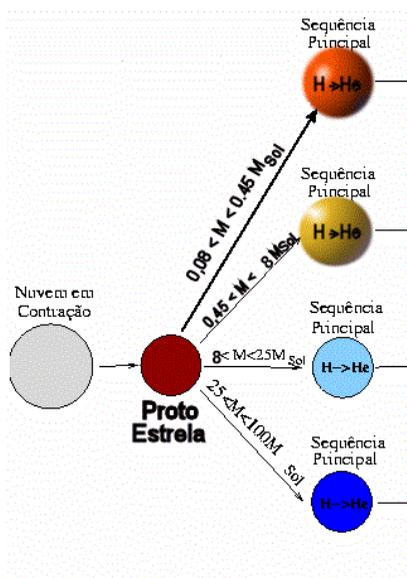
$$L \propto M^3 \text{ (para } M \geq 3 M_{\odot})$$

onde  $M_{\odot}$  corresponde a massa do Sol. Estas relações permitem estimar a massa de uma estrela através do seu tipo espectral.

As estrelas mais massivas da sequência principal são também as mais brilhantes (luminosas) e quentes. Elas estão localizadas na parte superior esquerda da sequência principal do diagrama H-R. De outro modo, as de menores massas brilham muito menos, são mais frias e estão localizadas na parte inferior direita da sequência principal. Elas são conhecidas como anãs vermelhas. Mais frias e mais compactas que o Sol, as anãs vermelhas são as estrelas mais numerosas do universo, mas devido à baixíssima luminosidade não são visíveis a olho nu. Um exemplo de anã vermelha é a estrela Próxima Centauri ou Próxima do Centauro. Ela fica a 4,2 anos-luz da Terra, sendo a estrela mais próxima depois do Sol, pertencendo à constelação de Centauro [6, 14].

A figura 34 ilustra os tipos de estrelas da sequência principal de acordo com as massas. As menos massivas, entre 0,08 e 0,45 massas solares, são as anãs vermelhas. As estrelas com massas entre 0,45 e 8 massas solares são estrelas amareladas do tipo do Sol. Já as estrelas com massas entre 8 e 25 massas solares são gigantes azuis e, finalmente, as mais massivas, entre 25 e 100 massas solares, são as supergigantes azuis. Gigantes e supergigantes são estrelas bem raras, enquanto as de massas menores são muito mais numerosas [14].

Figura 34 – Estrelas da sequência principal. A luminosidade e temperatura das estrelas dependem da massa.

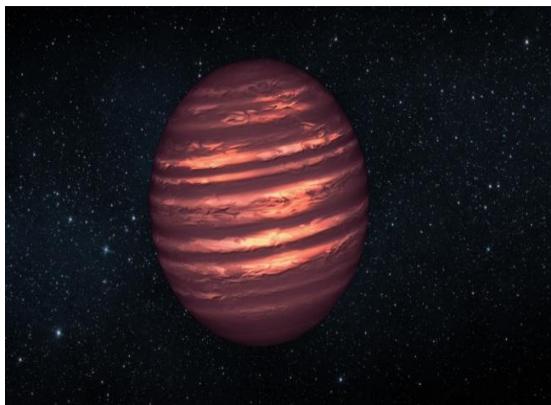


Fonte: <http://astro.if.ufrgs.br/estrelas/evolesthe.gif>. Acesso em: 17 mar. 2016.

A massa mínima necessária para a formação de uma estrela é  $0,08 M_{\odot}$ . Os corpos que resultam de aglomerações com massas entre  $0,01 M_{\odot}$  e  $0,08 M_{\odot}$  são chamados de anãs marrons. Por outro lado, quando a estrela inicia sua vida com massa acima de  $100 M_{\odot}$ , ela ejeta parte de sua massa e depois evoluirá como uma estrela de até  $100 M_{\odot}$  [2].

Anãs marrons possuem massa superior a de um planeta e inferior a necessária para realizar a fusão do hidrogênio como uma estrela regular. Por isso são consideradas estrelas fracassadas. Devido à baixa massa, as anãs marrons são pouco luminosas em comparação com as estrelas, por isso são difíceis de serem detectadas. A maior parte da radiação que emitem se situa na faixa do infravermelho, próximo do espectro visível. Especula-se que o número de anãs marrons no universo seja comparável ao número de estrelas.

Figura 35 – Concepção artística de uma anã marrom.



Fonte:

<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/5b/2MASSJ22282889-431026.jpg>. Acesso em: 14 mar. 2016.

A massa também determina o tempo que uma estrela deverá permanecer na sequência principal e, conseqüentemente, o tempo total de vida das estrelas. O tempo de vida de uma estrela é a razão entre a energia que ela tem disponível e a rapidez com que ela gasta essa energia, ou seja, sua luminosidade. Como a luminosidade varia exponencialmente com a massa, estrelas massivas queimam muito mais rapidamente seus estoques de hidrogênio em relação às menos massivas. Portanto, as estrelas de maiores massas passam muito menos tempo na sequência principal do que as de massas menores. Estima-se que quando cerca de 10% da massa total de hidrogênio (massa presente no núcleo) de uma estrela é transformada em hélio a pressão gerada não é mais o suficiente para manter o equilíbrio hidrostático. A partir daí então, a estrela passa a sofrer transformações estruturais e começa a sair da sequência principal. O tempo de vida na sequência principal pode ser calculado pela seguinte equação [2]:

$$T_{sp} \approx \frac{10^{10}}{M^2},$$

em que a massa deve ser expressa em massas solares e o tempo é medido em anos. Estima-se que o Sol esteja na sequência principal há

4,5 bilhões de anos e, de acordo com a equação anterior, deve permanecer neste estágio por mais 5,5 bilhões de anos.

## 14 Estágios Finais da Evolução e Morte das Estrelas

Quando o Hidrogênio do núcleo acaba, a estrela começa a passar por mudanças estruturais que iniciam a sua saída da sequência principal. A saída da sequência principal marca o início dos estágios finais da evolução que culminam na morte das estrelas. O tempo de vida que resta a uma estrela depois que sai da sequência principal é pequeno se comparado ao tempo que já viveu. O destino final de uma estrela depende da massa e também se a estrela é solitária, binária ou faz parte de um sistema múltiplo. Por questões de simplicidade, abordaremos apenas a evolução das estrelas solitárias. Neste caso, mais uma vez, a massa é a grandeza protagonista.

Com o fim do hidrogênio no núcleo, uma estrela buscará por outro recurso energético para continuar lutando contra a gravidade que a tenta comprimir. Ela começará a fusão do hélio que foi produzido durante toda a sua vida e se possível (a depender da massa) após a queima do hélio continuará fundindo elementos mais pesados. Para cada novo elemento químico processado, a queima será mais rápida e serão necessárias maiores temperaturas centrais. Quando não mais encontra recurso energético, a estrela morre. Dependendo da massa inicial, o que resta após a morte de uma estrela poderá ser: uma anã branca, uma estrela de nêutrons ou até mesmo um buraco negro [10].

Estrelas com massas muito pequenas, entre  $0,08 M_{\odot}$  e  $0,45 M_{\odot}$ , realizam a fusão do hidrogênio em hélio no núcleo muito lentamente, por isso possuem temperaturas superficiais relativamente baixas, são as anãs vermelhas. As anãs vermelhas permanecem por centenas de bilhões de anos queimando hidrogênio, de tal maneira que a idade do universo não é suficiente para que elas tenham evoluído além da sequência principal. Depois que o hidrogênio no núcleo de uma anã vermelha se esgotar, a temperatura central não será suficiente para iniciar a fusão do hélio. As anãs vermelhas de menores massas deverão aumentar a temperatura e luminosidade devido à contração gravitacional tornando-se anãs brancas (com núcleo de hélio), enquanto as de massas maiores devem aumentar de tamanho, passando pela fase de gigante vermelha antes de se tornarem anãs brancas.

Quando o hidrogênio do núcleo se esgota, uma estrela com massa compreendida entre  $0,45 M_{\odot}$  e  $8 M_{\odot}$  inicia a fusão de hidrogênio em uma camada acima do núcleo de hélio, gerando uma pressão tal, que faz

com que as camadas externas se expandam. A expansão destas camadas causa um abaixamento da temperatura superficial e a estrela se torna gigante vermelha. Sem realizar fusão, o núcleo de hélio de uma gigante vermelha não gera pressão suficiente para conter a gravidade que o esmaga. A energia proveniente da contração aumenta a temperatura o suficiente para que se inicie a fusão do hélio em carbono, liberando energia para conter o colapso gravitacional [9, 10].

Figura 36 – Representação artística de uma estrela na fase de Gigante Vermelha.



Fonte: [http://irfu.cea.fr/Images/astImg/2996\\_1.jpg](http://irfu.cea.fr/Images/astImg/2996_1.jpg). Acesso em: 14 mar. 2016.

Após a transformação do hélio em carbono no núcleo, estrelas com massas entre  $0,45M_{\odot}$  e  $8M_{\odot}$  não atingem temperaturas suficientes para a fusão do carbono. O núcleo inerte e rico em carbono é comprimido pelas camadas externas até que os elétrons ficam próximos o suficiente a ponto de surgir entre eles uma força repulsiva, gerando uma pressão denominada pressão de degenerescência (um efeito quântico devido ao princípio da exclusão de Pauli) que se opõe à pressão gravitacional, fazendo cessar a compressão do núcleo de carbono. As camadas acima no núcleo (agora em equilíbrio mecânico) continuam a processar hélio em carbono e hidrogênio em hélio liberando energia suficiente para expulsar as camadas mais externas da estrela, onde a gravidade torna-se menor devido ao crescimento do raio estelar. A estrela então se divide em duas partes: um caroço central superaquecido composto principalmente de carbono e uma região de gás mais frio em volta do caroço. O gás ejetado será ionizado pela radiação emitida pelo caroço central e emitirá luz. Quando observadas, essas camadas de gás

com um caroço central apresentam o aspecto de discos parecidos com planetas e por isso são conhecidas como nebulosas planetárias. Em nossa galáxia existem cerca de 10.000 nebulosas planetárias. A nebulosidade permanece visível por aproximadamente 10.000 anos após sua ejeção pela estrela.

Figura 37 – Nebulosa NGC 2392 ou nebulosa do esquimó.



Fonte:

[http://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image\\_feature\\_762.html](http://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image_feature_762.html). Acesso em: 14 mar. 2016.

Figura 38 – Nebulosa NGC 6720 ou nebulosa do anel.



Fonte: <http://www.spacetelescope.org/images/heic1310a/>. Acesso em: 14 mar. 2016.

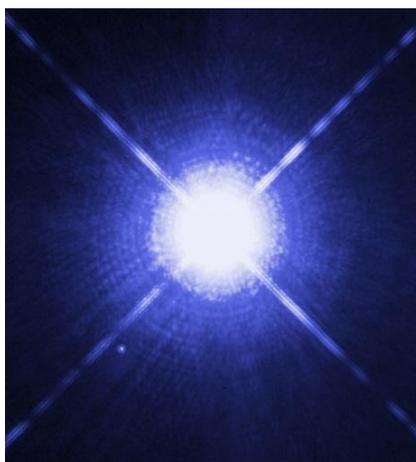
Figura 39 – Nebulosa planetária NGC 6302 ou nebulosa da Borboleta. Ela se encontra na constelação de escorpião, a cerca de 3800 anos-luz de distância da Terra. A "borboleta" se estende por mais de dois anos-luz.



Fonte: <http://www.spacetelescope.org/images/heic0910h/>. Acesso em: 14 mar. 2016.

O caroço de carbono remanescente no centro da nebulosa planetária tem aproximadamente o tamanho da Terra e cerca de metade da massa do Sol, sendo, portanto, muito denso. Ele possui altíssimas temperaturas, no entanto é pouco luminoso por ser relativamente muito pequeno [9]. Por causa de seu tamanho e cor ele é chamado de anã branca. A primeira anã branca foi descoberta em 1783 e a segunda em 1862. Tratam-se respectivamente, de 40 Eridani B, companheira de 40 Eridani A (estrela de coloração alaranjada, visível no céu) e Sirius B, a companheira de Sirius A (a estrela mais brilhante do céu). Desde então, muitas outras anãs brancas foram descobertas nas vizinhanças do Sol, como membros de sistemas binários ou isolados [11, 18].

Figura 40 – Sirius A e Sirius B, fotografadas pelo telescópio espacial Hubble. A anã branca Sirius B pode ser vista como um ponto de luz na parte inferior esquerda da brilhante Sirius A.



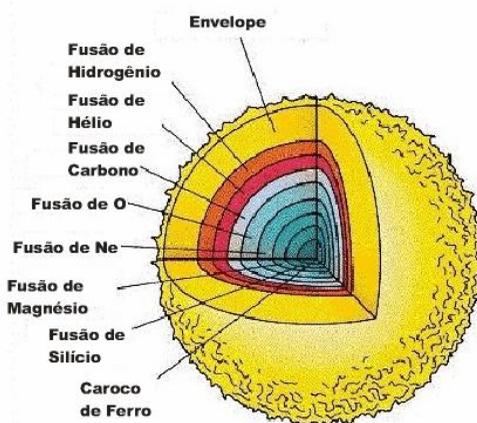
Fonte: [https://en.wikipedia.org/wiki/White\\_dwarf](https://en.wikipedia.org/wiki/White_dwarf). Acesso em: 14 mar. 2016.

Aproximadamente 98% de todas as estrelas que já saíram da sequência principal são anãs brancas e este será o destino da grande maioria das estrelas de nossa Galáxia, que é formada em sua maior parte por estrelas menores que o Sol. Uma anã branca típica pode ter uma densidade média de cerca de 1 milhão de gramas por centímetro cúbico. Algumas anãs brancas têm densidades centrais maiores do que 10 milhões de gramas por centímetro cúbico. Uma colher de chá do material que as constitui pesaria, aqui na Terra, 50 toneladas [11]. As

anãs brancas têm temperaturas que variam desde 3700K até 150000K. Além disso, os cálculos indicam que elas podem ter massa máxima de  $1,4 M_{\odot}$ , conhecida como limite de Chandrasekhar ou massa de Chandrasekhar. Esta é a maior massa que pode ser suportada pela pressão de degenerescência dos elétrons [2]. Uma anã branca não realiza fusão nuclear e, portanto não é a rigor uma estrela. Ela emitirá energia térmica por bilhões de anos até se tornar um objeto frio, denso e escuro chamado de anã negra. Uma anã negra será definitivamente (daqui a muitos bilhões de anos) o que sobrar após a morte de estrelas com até 8 massas solares.

Estrelas com massas maiores que  $8M_{\odot}$  têm uma morte ainda mais espetacular. Depois que saem da sequência principal e se tornam supergigantes vermelhas, elas atingem temperaturas suficientes para realizar não só a fusão do hélio em carbono, mas também a fusão do carbono em oxigênio e assim sucessivamente até produzir ferro no núcleo. Na luta da estrela contra a gravidade, os elementos químicos vão sendo queimados em camadas concêntricas até que o núcleo comece a ser preenchido por ferro [9, 14].

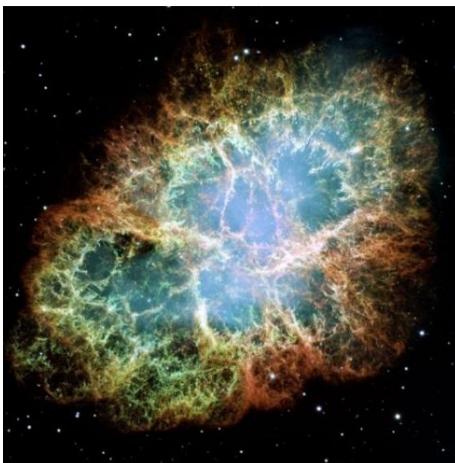
Figura 41 – Representação de uma estrela muito massiva que realiza fusão nuclear camada a camada, desde o hidrogênio (o mais leve) na superfície até o ferro (o mais pesado) no centro.



A fusão do ferro não é energeticamente favorável, pois requer mais energia para acontecer do que a energia que libera. Sem produzir energia, a pressão no núcleo de ferro diminui tornando-se insuficiente para conter o colapso gravitacional, finalmente a gravidade vence. As camadas externas começam a “cair” sobre o núcleo e a pressão gravitacional aumenta o suficiente para vencer a pressão de degenerescência dos elétrons, comprimindo a matéria central de tal maneira que os elétrons se unem aos prótons formando nêutrons e emitindo neutrinos. Em reação à extrema compressão o núcleo estelar se expande violentamente. A gigantesca explosão libera uma enorme quantidade de energia, fazendo a estrela brilhar (por um curto período de tempo) o equivalente ao de uma galáxia inteira. Este evento marca o fim catastrófico de uma estrela com massa maior que  $8M_{\odot}$  e é conhecido como explosão de supernova.

Na explosão de uma supernova, a maior parte da massa da estrela é ejetada no meio interestelar formando um remanescente com um aspecto similar a uma nebulosa planetária. A matéria lançada no espaço irá ao longo do tempo se diluir e esfriar. Ela irá enriquecer o meio interestelar com os elementos produzidos na estrela e, estará sujeita mais uma vez a se contrair e formar uma nova estrela com maior concentração de elementos mais pesados que o hidrogênio. A figura 42 mostra a nebulosa do Caranguejo, que foi o que restou após a explosão de uma supernova que foi vista a olho nu e registrada pelos chineses e nativos americanos em 1054 d.C [7, 14]. Muitas outras supernovas já foram detectadas com o auxílio de telescópios.

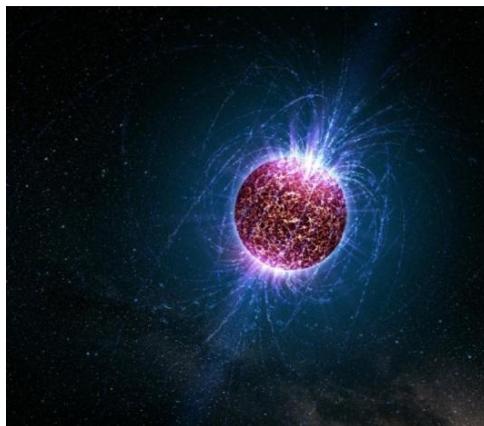
Figura 42 – Nebulosa do Caranguejo. Ela é remanescente de uma supernova.



Fonte: <http://www.spacetelescope.org/images/heic0515a/>. Acesso em: 18 mar. 2016.

Para estrelas com massas entre  $8M_{\odot}$  e  $25M_{\odot}$ , resta após a explosão de uma supernova um caroço central extremamente compacto, composto basicamente de nêutrons. Os nêutrons ficam tão próximos que surge entre eles, assim como entre os elétrons de uma anã branca, uma pressão de degenerescência que se opõe ao colapso gravitacional, mantendo o equilíbrio do caroço remanescente, agora denominado estrela de nêutrons. Estima-se que a pressão de degenerescência dos nêutrons suporte uma massa de até  $3M_{\odot}$ . Não devem, portanto, existir estrelas de nêutrons com massas superiores a esta. Estrelas de nêutrons são muito pequenas e compactas. Uma estrela de nêutrons com  $1M_{\odot}$  tem um raio de apenas 10 quilômetros e densidade tal que uma colher de seu material pesaria na Terra milhões de toneladas. Ainda sobre as estrelas de nêutrons, pode-se dizer que possuem altíssimas velocidades de rotação e campos magnéticos acentuados. Algumas delas emitem radiação periodicamente, sendo conhecidas como pulsares. Assim como as anãs brancas, estrelas de nêutrons não são efetivamente estrelas, pois não realizam fusão nuclear [8, 9, 14].

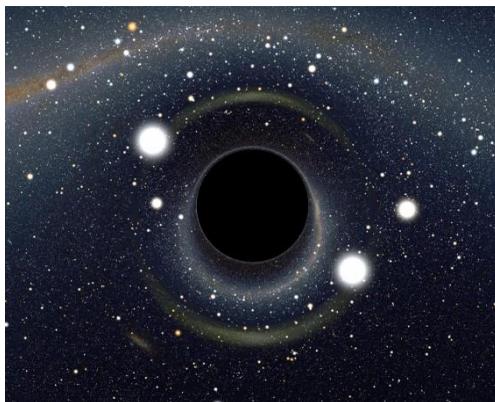
Figura 43 – Representação artística de uma estrela de nêutrons.



Fonte: <http://awesomeuniverse.org/2013/07/24/morre-uma-estrela/>. Acesso em: 18 mar. 2016.

Durante a fase de supergigante vermelha, estrelas com massa maiores a  $25M_{\odot}$ , passam pela fase de Wolf-Rayet, em que possuem brilho variável e um envoltório de poeira ejetado devido à forte pressão de radiação. Para essas estrelas, o caroço que resta da explosão de supernova é tão massivo que nem mesmo a pressão de degenerescência de nêutrons pode conter o seu colapso. Ele implode formando um corpo de densidade tão elevada que a aceleração da gravidade local não permite que nem mesmo a luz escape de dentro dele. Esse corpo é denominado buraco negro. O buraco negro é a morte definitiva de uma estrela supermassiva [14]. Uma vez que de buracos negros não sai nenhuma informação, eles são detectados através da ação que exercem sobre suas vizinhanças. Por possuírem elevada aceleração gravitacional eles tendem a atrair a matéria circundante. Nuvens de gás e poeira que orbitam regiões invisíveis (supostos buracos negros) emitem radiações que são detectadas. Buracos negros podem ser detectados também a partir da observação de estrelas binárias em que só uma das parceiras é visível. Não existem limites inferior e superior para a massa de um buraco negro. Poderíamos, inclusive, estar imersos dentro de um grande buraco negro sem nos dar conta disso.

Figura 44 – Representação artística de um buraco negro.

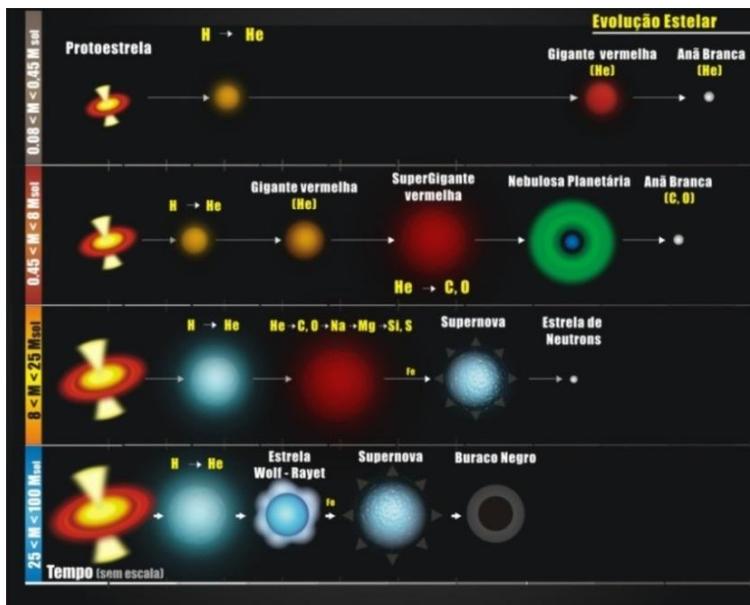


Fonte: <http://awesomeuniverse.org/2013/07/24/morre-uma-estrela/>. Acesso em: 18 mar. 2016.

Recentemente foi detectada a fusão de um sistema binário de buracos negros supermassivos. A colisão gerou uma onda gravitacional que foi detectada em setembro de 2015 pelos dois detectores do Observatório de Ondas Gravitacionais por Interferometria Laser (sigla LIGO em Inglês). O anúncio foi feito em 11 de Fevereiro de 2016. Localizado nos Estados Unidos, LIGO é o maior observatório de ondas gravitacionais e um dos mais sofisticados experimentos de física do mundo. Esta foi a primeira detecção direta de uma onda gravitacional, sendo muito comemorada pela comunidade científica envolvida. Assim como ondas eletromagnéticas são oscilações de campos elétricos e magnéticos causadas por cargas elétricas aceleradas, as ondas gravitacionais são oscilações no espaço-tempo causadas por massas aceleradas. A fusão dos dois buracos negros produziu um único buraco negro com massa correspondente a 62 massas solares. Este avanço científico abre uma nova janela para a observação do universo sob a forma de ondas gravitacionais [19].

A figura 45 apresenta de forma resumida as etapas da evolução estelar.

Figura 45 – Quadro resumo da evolução estelar.



Fonte: <http://astro.if.ufrgs.br/estrelas/node14.htm>. Acesso em: 17 mar. 2016.

## Referências Bibliográficas

- [1] YOUNG, Hugh D.; FREEDMAN, Roger A. *Física II: Termodinâmica e Ondas*. 10. ed. São Paulo: Pearson Addison Wesley, 2003.
- [2] OLIVEIRA FILHO, Kepler de Souza; SARAIVA, Maria de Fátima Oliveira. *Astronomia & Astrofísica*. 2. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2004.
- [3] FRAZZOLI, Jean Carlo Feital. *Astrofísica de Estrelas Compactas como Atividade Suplementar para o Ensino Médio*. 2012. 110 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Ensino de Física) – Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.
- [4] < <http://mundoestranho.abril.com.br/materia/quantas-estrelas-no-ceu-da-pra-ver-a-noite> >. Acesso em: 24 jan. 2016.
- [5] CLÁVIA, Ariana França. *Conhecendo as constelações*. Universidade Federal de Minas Gerais, maio, 2010. Disponível em: < <http://www.observatorio.ufmg.br/dicas13.htm> >. Acesso em: 10 jan. 2016.
- [6] < <http://www.siteastronomia.com> >. Acesso em: 20 jan. 2016.
- [7] RODRIGUES, Railson Carneiro Alexandrino. *Estrelas: Uma Análise da Sequência Principal do Diagrama H-R*. 2013. 64 f. Monografia (Bacharelado em Ciências Exatas e Tecnológicas) – Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, 2013.
- [8] NETO, Augusto Damineli; JABLONSKI, Francisco José. *Nascimento, Vida e morte das estrelas*. Rev. Bras. Ens. Fís., São Paulo, v.1, n.2, p.25-32, jun. 1979; v.2, n.1, p.36-52, mar. 1980; v.2, n.3, p.37-57, set. 1980.
- [9] GREGORIO-HETEM, Jane; JATENCO-PEREIRA, Vera; OLIVEIRA, Claudia Mendes de. *Fundamentos de Astronomia*. Departamento de Astronomia. Universidade de São Paulo, 2010. Disponível em: < <http://www.astro.iag.usp.br/~jane/aga215/> >. Acesso em: 20 jan. 2016.

- [10] CAPELATO, Hugo Vicente. *Estrelas*. In: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. *Introdução à Astronomia e Astrofísica*. São José dos Campos, 2003. Disponível em:  
<<http://www.cdcc.usp.br/cda/cursos/2015/evolucao-estelar/1-aula-O-Sol/Introducao-a-Astronomia-e-Astrofisica-Cap-05-Estrelas-Hugo-Vicente-Capelato-INPE.pdf>>. Acesso em: 16 jan. 2016.
- [11] ORTIZ, Roberto. *Evolução Estelar I*. Aperfeiçoamento em Astronomia para a docência. Universidade de São Paulo, 2014. Disponível em:  
<[http://each.uspnet.usp.br/ortiz/classes/Leitura\\_s21\\_Evolucao\\_Estelar1.pdf](http://each.uspnet.usp.br/ortiz/classes/Leitura_s21_Evolucao_Estelar1.pdf)>. Acesso em: 16 jan. 2016.
- [12] MEDEIROS, José Renan. *Nascimento, vida e morte das estrelas*. Ciência Hoje, Rio de Janeiro, v. 43, n.257, p. 20-25, mar. 2009.
- [13] IMPEY, Chris. *The Laws of Thermodynamics*. Teach Astronomy, 2015. Disponível em:  
<<http://www.teachastronomy.com/astropedia/article/The-Laws-of-Thermodynamics>>. Acesso em: 11 jan. 2016.
- [14] OLIVEIRA FILHO, Kepler de Souza; SARAIVA, Maria de Fátima Oliveira. *Hipertexto: Astronomia e Astrofísica*. Disponível em:  
<<http://astro.if.ufrgs.br/index.htm>>. Acesso em: 14 fev. 2016.
- [15] MENEZES, Luís Carlos et al. *Coleção Quanta Física 3º ano Ensino Médio*. São Paulo: Pueri Domus, 2010.
- [16] EISBERG, Robert; RESNICK, Robert. *Física Quântica: Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas*. Rio de Janeiro: Campus, 1979.
- [17] <<http://www.on.br/>>. Acesso em: 20 jan. 2016.
- [18] <[https://en.wikipedia.org/wiki/White\\_dwarf](https://en.wikipedia.org/wiki/White_dwarf)>. Acesso em: 14 mar. 2016.
- [19] STURANI, Riccardo. *Observação de ondas gravitacionais geradas pela fusão de um sistema binário de buracos negros*. Sociedade Brasileira de Física, fev. 2016. Disponível em:

<<http://www.sbfisica.org.br/v1/images/stories/noticias/fevereiro2016/stu-raniSBF1.pdf>>. Acesso em: 10 abr. 2016.

[20] MACIEL, Walter J. *Introdução à Estrutura e Evolução Estelar*. São Paulo: Edusp, 1999.

[21] CALLEN, Herbert B. *Thermodynamics and an Introduction to Thermostatistics*. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1985.

[22] FUKE, Luiz Felipe; YAMAMOTO, Kazuhito. *Física para o Ensino Médio, volume 2*. São Paulo: Saraiva, 2010.

[23] MELLO, Daniel R. C. *Aprendendo física com as estrelas binárias*. Rev. Bras. Ens. Fís., São Paulo, v. 36, n.3, ago. 2014.

[24] LEITE, Diego de Oliveira; PRADO Rogério Junqueira. *Espectroscopia no infravermelho: uma apresentação para o Ensino Médio*. Rev. Bras. Ens. Fís., São Paulo, v. 34, n.2, jun. 2012.

[25] MARRANGHELLO, Guilherme F.; PAVANI Daniela B. *Utilizando a câmera fotográfica digital como ferramenta para distinguir as cores das estrelas*. Física na Escola, v. 12, n.1, p. 20-26, maio. 2011.

## APÊNDICE B – Medindo a Temperatura Efetiva do Sol

A temperatura efetiva de uma estrela é definida como a temperatura de um corpo negro que emite a mesma quantidade de energia por unidade de área e por unidade de tempo que a estrela. A temperatura efetiva é apenas um valor representativo, uma vez que a temperatura de uma estrela cresce da superfície em direção ao seu interior, variando em milhões de graus Celsius.

Neste experimento, vamos medir a temperatura efetiva do Sol através da medida da energia por unidade de tempo por unidade de área ( $f$ ) que atinge perpendicularmente a superfície terrestre. Para tanto, iremos calcular a quantidade de energia (sob a forma de calor) recebida do Sol medindo a variação de temperatura de certa quantidade de água usando a equação fundamental da calorimetria:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (1)$$

onde  $Q$  é o calor trocado,  $m$  é a massa,  $c$  é o calor específico e  $\Delta T$  é a variação de temperatura.

De acordo com sua definição, a constante solar  $f$  pode ser escrita por:

$$f = \frac{Q}{A_{\perp} \cdot \Delta t} \quad (2)$$

onde  $A_{\perp}$  é a área perpendicular à luz incidente e  $\Delta t$  é o intervalo de tempo.

Substituindo (1) em (2) e, escrevendo a massa em função da densidade  $\rho$  e do volume  $V$ , obtemos:

$$f = \frac{\rho \cdot V \cdot c \cdot \Delta T}{A_{\perp} \cdot \Delta t} \quad (3)$$

Para um recipiente com formato regular podemos escrever:

$$V = A \cdot h \quad (4)$$

onde  $h$  é a altura da coluna d'água que será utilizada no experimento e  $A$  é a área do recipiente.

Substituindo (4) em (3) obtemos:

$$f = \frac{\rho \cdot A \cdot h \cdot c \cdot \Delta T}{A_{\perp} \cdot \Delta t} \quad (5)$$

A área perpendicular à luz incidente pode ser escrita como:

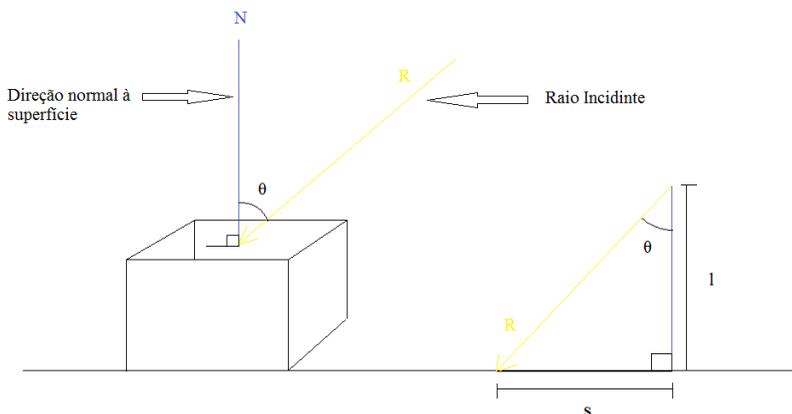
$$A_{\perp} = A \cdot \cos \theta \quad (6)$$

em que  $A$  é a área do recipiente e  $\theta$  é o ângulo entre a normal à superfície e a direção de incidência da radiação. Substituindo (6) em (5), obtemos:

$$f = \frac{\rho \cdot h \cdot c \cdot \Delta T}{\Delta t \cdot \cos \theta} \quad (7)$$

Para obtermos o ângulo  $\theta$ , faremos uso de um bastão (ou uma vara) de altura  $l$ , e verificaremos o comprimento  $s$  de sua sombra projetada no solo, conforme ilustrado na figura 1.

Figura 1 – Direção de incidência da radiação não perpendicular à superfície. Um bastão de altura  $l$  perpendicular ao solo projeta nele uma sombra de comprimento  $s$ , possibilitando determinar  $\theta$ .



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Dessa forma:

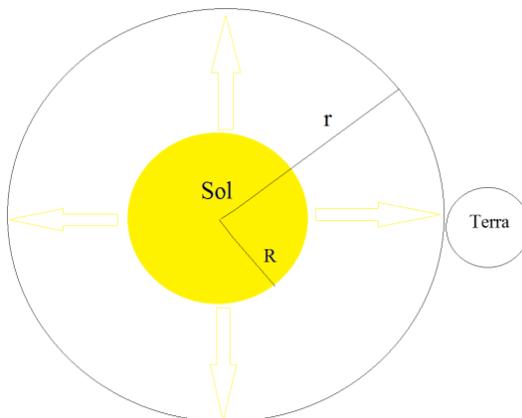
$$\theta = \text{arc tg} \left( \frac{s}{l} \right) \quad (8)$$

de modo que substituindo (8) em (7), tem-se:

$$f = \frac{\rho \cdot h \cdot c \cdot \Delta T}{\Delta t \cdot \cos \left[ \text{arc tg} \left( \frac{s}{l} \right) \right]} \quad (9)$$

De posse da constante solar, podemos calcular a luminosidade ( $L$ ) do Sol (energia emitida por unidade de tempo), supondo que a energia emitida pelo Sol atravessa uniformemente uma esfera imaginária de raio  $r$ , onde  $r$  é a distância entre a Terra e o Sol.

Figura 2 – Figura simplificada e fora de escala.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Assim, a luminosidade deve ser igual a constante solar multiplicada pela área desta esfera imaginária:

$$L = f \cdot 4 \pi r^2 \quad (10)$$

Finalmente, podemos utilizar a lei de Stefan-Boltzmann para determinar a temperatura efetiva ( $T_{ef}$ ) do Sol:

$$L = 4 \pi R^2 \cdot \sigma \cdot T_{ef}^4 \quad (11)$$

onde  $R$  é o raio do Sol e  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann.

Igualando (10) e (11) obtemos:

$$T_{ef} = \left(\frac{r}{R}\right)^{1/2} \cdot \left(\frac{f}{\sigma}\right)^{1/4} \quad (12)$$

Substituindo (9) em (12), obtemos:

$$T_{ef} = \left(\frac{r}{R}\right)^{1/2} \cdot \left\{ \frac{\rho \cdot c \cdot h \cdot \Delta T}{\sigma \cdot \Delta t \cdot \cos \left[ \arctan\left(\frac{s}{l}\right) \right]} \right\}^{1/4} \quad (13)$$

ou ainda, separando as constantes:

$$T_{ef} = \left(\frac{r}{R}\right)^{1/2} \cdot \left(\frac{\rho \cdot c}{\sigma}\right)^{1/4} \cdot \left\{ h \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t \cdot \cos \left[ \arctan\left(\frac{s}{l}\right) \right]} \right\}^{1/4} \quad (14)$$

em que:

$$r = 1,496 \cdot 10^{11} \text{ m}; \quad R = 6,96 \cdot 10^8 \text{ m}; \quad \rho_{\text{água}} = 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3};$$

$$c_{\text{água}} = 4,186 \cdot 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}; \quad \sigma = 5,67 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}.$$

Substituindo as constantes, obtemos para o caso particular da água:

$$T_{ef} \approx 4,3 \cdot 10^4 \left\{ h \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t \cdot \cos \left[ \arctan\left(\frac{s}{l}\right) \right]} \right\}^{1/4} \quad (15)$$

### Material necessário:

- Recipiente de isopor;
- Tinta preta fosca PVA a base de água;
- Termômetro;
- Pincel;
- Relógio;
- Régua;

- Bastão (ou uma vara rígida) de até 30 cm.

Obs: Procure usar um recipiente de isopor não muito alto, de forma a não projetar sombra dentro do recipiente. Uma altura de até 3cm é adequada.

### Procedimentos:

- Pinte a parte interna do recipiente com a tinta preta;
- Preencha o recipiente com água na temperatura ambiente;
- Meça a altura da coluna de água no recipiente;
- Meça a temperatura inicial da água;
- Coloque o recipiente com água totalmente exposto ao Sol;
- Aguarde de 10 a 20 min;
- Registre o tempo aguardado;
- Meça a nova temperatura;
- Prenda o bastão de forma a ficar perpendicular ao solo;
- Meça a altura do bastão a partir do solo;
- Meça o comprimento da sombra projetada.

### Tabela de Dados

Altura do bastão (l)	cm
Comprimento da sombra projetada (s)	cm
Altura da coluna de água (h)	m
Temperatura Inicial da água ( $T_0$ )	°C
Temperatura Final da água (T)	°C
Intervalo de Tempo ( $\Delta t$ )	Seg.
Varição de Temperatura ( $\Delta T = T - T_0$ )	°C

**Questionário:**

- 1) Por que usamos um recipiente de isopor e não um recipiente de um material qualquer neste experimento?
- 2) Com qual objetivo pintamos a parte interna do recipiente de tinta preta?
- 3) Utilizando os dados experimentais e a equação 15, calcule a temperatura efetiva do Sol.
- 4) O valor teórico da temperatura efetiva do Sol é 5785K. Calcule o erro percentual obtido neste experimento utilizando a tabela abaixo.

$T_{ef}^*$	$T_{ef}$	$ T_{ef}^* - T_{ef} $	$E (\%) = \frac{ T_{ef}^* - T_{ef} }{T_{ef}^*} \cdot 100\%$
	5785 K		

$T_{ef}^*$  é a temperatura efetiva experimental;  $T_{ef}$  é a temperatura efetiva teórica e  $E (\%)$  é o erro percentual.

- 5) Quais são os motivos do erro obtido nesta experiência?

**Referências Bibliográficas**

FRAZZOLI, Jean Carlo Feital. *Astrofísica de Estrelas Compactas como Atividade Suplementar para o Ensino Médio*. 2012. 110 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Ensino de Física) – Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

OLIVEIRA FILHO, Kepler de Souza; SARAIVA, Maria de Fátima Oliveira. *Astronomia & Astrofísica*. 2. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2004.

## APÊNDICE C – Site: *Evolução Estelar*

O site *Evolução Estelar* apresenta na tela inicial uma síntese da formação e evolução das estrelas. São apresentadas ainda nessa tela, a nebulosa de Órion, uma representação artística de uma protoestrela e uma imagem rica em estrelas. O usuário é solicitado a escolher a massa inicial da protoestrela na barra que se encontra na parte inferior da tela. Há 6 intervalos de massas possíveis; para cada intervalo abre-se uma nova imagem de uma estrela com um texto explicativo acima da imagem.

O 1º intervalo de massas vai de 0,01 a 0,08 massas solares e corresponde às anãs marrons. Clicando sobre a imagem da anã marrom o usuário obtém mais informações sobre essa espécie de “estrela fracassada”. O 2º intervalo de massas vai de 0,08 a 0,45 massas solares e corresponde às anãs vermelhas. Ao clicar sobre a imagem da anã vermelha, o usuário obtém mais informações sobre a evolução e morte desse tipo de estrela e visualiza uma sequência de imagens que ilustram essa evolução. O 3º intervalo de massas vai de 0,45 a 8 massas solares e corresponde às estrelas do tipo do Sol. Clicando sobre a imagem do Sol, o usuário obtém mais informações sobre a evolução e morte das estrelas do tipo do Sol, bem como pode observar uma sequência de imagens ilustrando essa evolução. O 4º intervalo de massas vai de 8 a 25 massas solares e corresponde às gigantes azuis. Ao clicar sobre a imagem da Gigante Azul que aparece, o usuário obtém mais informações sobre a evolução e morte desse tipo de estrela e visualiza uma sequência de imagens que correspondem a essa evolução. O 5º intervalo de massas vai de 25 a 100 massas solares e corresponde às supergigantes azuis. Clicando sobre a imagem da Supergigante Azul, obtém-se mais informações sobre a evolução e morte desse tipo de estrela e se observa uma sequência de imagens que ilustram essa evolução. O 6º e último intervalo corresponde a estrelas com massa acima de 100 massas solares, também denominadas supergigantes azuis. Ao clicar sobre a imagem da Supergigante Azul que aparece, o usuário obtém mais informações sobre a evolução e morte desse tipo de estrela e visualiza uma sequência de imagens que ilustram essa evolução.

O site *Evolução Estelar* encontra-se disponível no seguinte endereço eletrônico: <http://evolucaoestelar.atSPACE.cc/>. Havendo problemas de acesso, o arquivo com o site poderá ser solicitado enviando-se um e-mail para [renato.rodrigues1712@gmail.com](mailto:renato.rodrigues1712@gmail.com).



## APÊNDICE D – Questionário de Investigação Inicial

- 1) O que é uma estrela?
- 2) As estrelas nascem e/ou morrem? Comente sua resposta.
- 3) A que distâncias as estrelas estão de nós? Qual é a estrela mais próxima da Terra?
- 4) O que diferencia uma estrela de um planeta?
- 5) De que forma as estrelas emitem luz ? Além de luz, o que mais elas emitem?
- 6) Você já estudou sobre estrelas? Se sim, relate sua experiência.
- 7) As estrelas são todas idênticas? Comente.
- 8) Quais teorias físicas você acredita que estejam relacionadas com o estudo das estrelas?
- 9) Como são coletadas as informações sobre as estrelas?
- 10) Como você classifica o seu interesse pelo assunto *Formação e Evolução Estelar*?  
 Alto       Médio       Baixo       Não me interessa pelo assunto
- 11) Como você avalia sua expectativa em relação ao projeto *Formação e Evolução Estelar* que será implementado em suas aulas de Física?  
 Alta       Média       Baixa       Não tenho expectativa



## APÊNDICE E – Questionário de Investigação Final

- 1) O que é uma estrela?
- 2) O que diferencia uma estrela de um planeta?
- 3) De que forma as estrelas emitem luz? Elas emitem mais alguma coisa?
- 4) As estrelas são todas iguais? Se não, quais as diferenças entre elas?
- 5) Quais teorias da Física estão relacionadas com o estudo das estrelas?
- 6) Como se coletam informações sobre as estrelas?
- 7) O que é Termodinâmica?
- 8) Qual é a importância da Termodinâmica para o estudo das estrelas?
- 9) Você aprendeu Termodinâmica estudando as estrelas?
- 10) Você achou melhor estudar os conceitos da Termodinâmica e da Física em geral, associando-os ao estudo das estrelas ou seria melhor estudá-los separados desse contexto? Justifique sua resposta.
- 11) Suas expectativas em relação ao projeto: Formação, Evolução e Morte das Estrelas foram atendidas?  
 Perfeitamente                       Em partes                       Não
- 12) Após a aplicação do projeto, seu interesse ou gosto pela Física:  
 Aumentou muito       Aumentou       Permaneceu o mesmo  
 Diminuiu                       Diminui muito



## APÊNDICE F – Avaliação Final

**E. E. B. PROF<sup>a</sup> GRACINDA AUGUSTA MACHADO**

Ensino Médio

Componente Curricular: Física

Data: / / 2016

Turma: 201

Professor: Renato da Silva Rosa Rodrigues

Projeto: Formação e Evolução Estelar

### Avaliação Final

Aluno(a): \_\_\_\_\_

**Atividade 1:** Elabore um texto dissertativo a respeito do que você aprendeu sobre a Formação e a Evolução Estelar ao longo das aulas do projeto.

**Atividade 2:** Escreva sobre essa experiência nova nas aulas de Física. Você pode se guiar pelas seguintes questões:

O que você gostou? E o que não gostou? Aprendeu ou não? Sentiu-se mais motivado a estudar? O que foi mais importante para você nessas aulas? Sanou suas dúvidas com relação ao conteúdo? O que poderia melhorar? O que você achou do texto escrito pelo professor? Sinta-se à vontade para descrever sua avaliação sobre o projeto. Seja honesto, nesta atividade não existe resposta certa ou errada. Sua participação é muito importante.