

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
Departamento de Astronomia

Paula Aline Durães Almeida de Souza Santos

A Física Moderna no Interior das Estrelas Massivas

Mestrado Profissional em Ensino de Astronomia

SÃO PAULO
2022

Paula Aline Durães Almeida de Souza Santos

A Física Moderna no Interior das Estrelas Massivas

Dissertação apresentada ao Departamento de Astronomia do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG) da Universidade de São Paulo como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ensino de Astronomia.

Área de Concentração: Ensino de Astronomia.

Orientadora: Prof^ª. Dra. Jane Cristina Gregorio-Hetem.

Versão Corrigida. Original encontra-se disponível na Unidade.

São Paulo
2022

Agradecimentos

Primeiramente agradeço ao meu marido, pelo apoio, compreensão, suporte e conselhos durante toda a criação, produção e finalização dessa dissertação.

À minha família, principalmente à minha mãe, por acreditar que eu seria astronauta e ao meu falecido pai que sempre torceu pelos meus estudos.

À minha orientadora professora Dr^a. Jane Cristina Gregorio-Hetem, não só pela orientação desse projeto, mas por todas as conversas e conselhos além dessa dissertação, principalmente em um momento tão conturbado como foi a pandemia.

À direção e coordenação do Centro de Ensino São José, em especial Sabrina Zapalá e Carolina Favaro pelo apoio e incentivo antes, durante e depois da aplicação das atividades em sala de aula.

A todos(as) professores(as) das disciplinas que cursei durante o mestrado no IAG-USP, não somente pelas aulas, mas pelas conversas, desabafos e pela torcida ao tomarmos a primeira dose da vacina da COVID-19.

À turma formada em 2019 do Centro de Ensino São José, em especial, André Kido, Talyta Scaramuzzo, Fabrício de Biasi, Pedro Zapalá, Guilherme Amaral, Herakles, João Pellegrini, Matheus Henrique, Pedro Chinaglia, Bruno Lemos e todos os alunos e todas as alunas que me inspiraram a criar esse projeto com perguntas inusitadas no meio da aula.

Aos(às) alunos(as) do Clube de Astronomia do Centro de Ensino São José de 2021 e 2022, que me ajudaram de diversas formas.

Aos(às) amigos(as) que fiz durante a jornada desse mestrado, que de alguma forma foram parte essencial para a construção dessa dissertação.

À todas as pessoas que me ouviram e me confortaram durante todo o processo.

*Se as coisas são inatingíveis... ora!
Não é motivo para não querê-las...
Que tristes os caminhos, se não fora
A presença distante das estrelas!*
Mario Quintana

Resumo

SANTOS, P. A. D. A. **A física moderna no interior das estrelas massivas**. 2022. Dissertação (Mestrado Profissional em Ensino de Astronomia) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

Este trabalho tem como proposta principal, apresentar quatro sequências didáticas que fazem junção entre os principais conteúdos da Física Moderna, que estão na grade curricular do terceiro ano do ensino médio com temas norteadores da Astronomia, para dessa forma, tornar esse conteúdo mais motivador, mas sem perder os conceitos principais aprendidos durante esse percurso. A dissertação foi estruturada de forma que cada capítulo tenha uma parte teórica bem desenvolvida para que o(a) professor(a) possa consultar caso seja necessário ou possa utilizar como referencial teórico para a aula, exercícios autorais, de vestibulares ou de Olimpíadas, gabarito com resolução desses exercícios, um roteiro de atividade prática com um tema relacionado às estrelas para os(as) alunos(as), finalizando então com um gabarito do roteiro de atividade prática para o(a) professor(a). Essa dissertação foi desenvolvida, pensando basicamente nos estágios finais da evolução de estrelas massivas, logo, apesar dos primeiros capítulos estarem relacionados a Ondas Eletromagnéticas e Classificação Estelar, eles servem para dar base introdutória sobre o que são estrelas e como podemos estudá-las, para então posteriormente, ser vinculado especificamente com as estrelas de alta massa, para que seja possível finalizar com uma sequência didática com o tema sobre os Buracos Negros, tema que suscita muita curiosidade entre os(as) alunos(as) e foi a inspiração para a criação dessa dissertação e do produto final.

Palavras-chave: Estrelas Massivas. Física Moderna. Buraco Negro.

Abstract

SANTOS, P. A. D. A. **Modern physics inside massive stars**. 2022. Dissertação (Mestrado Profissional em Ensino de Astronomia) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

The main goal of this work is to present four didactic sequences that join some guiding themes of Astronomy with the main contents of Modern Physics, which are in the curriculum of the third year of high school, to make this content more motivating, but without losing the main concepts learned during this journey. This work is structured so that each chapter has a well-developed theoretical part that can be consulted by the teacher or used as a theoretical reference for the class; proposed exercises (authorial or from exams for college entrance and academic olympics); feedback with the resolution of these exercises; a practical activity script with a theme related to the stars for the students; ending then with a template of the practical activity script for the teacher. This work was developed, basically thinking about the final stages of the massive stars evolution, so, although the first chapters are related to Electromagnetic Waves and Stellar Classification, they serve to provide an introductory basis on what stars are and how they can be studied. Then, we focus on the high mass stars, so that it is possible finishing with a didactic sequence with the theme about Black Holes, a topic that arouses a lot of curiosity among students, which was the inspiration for the creation for this work and the final product.

Keywords: Massive Stars. Modern Physics. Black Hole.

Sumário

| | | |
|---------|---|----|
| Sumário | 1 | |
| 1 | INTRODUÇÃO | 3 |
| 2 | OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA | 11 |
| 3 | DESENVOLVIMENTO DAS ATIVIDADES | 19 |
| 4 | LUMINOSIDADE E FLUXO ESTELAR | 23 |
| 4.1 | Ondas Eletromagnéticas | 23 |
| 4.2 | Propriedades da Luz | 29 |
| 4.3 | Luminosidade e Fluxo Estelar Aparente | 31 |
| 4.4 | Exercícios - Luminosidade e Fluxo Estelar | 34 |
| 4.5 | Gabarito - Luminosidade e Fluxo Estelar | 35 |
| 4.6 | Roteiro de Atividade Prática | |
| | Estudando a Equação do Brilho Aparente de uma Estrela | 36 |
| 4.7 | Roteiro do Professor(a) | |
| | Estudando a Equação do Brilho Aparente de uma Estrela | 39 |
| 5 | CLASSIFICAÇÃO ESTELAR | 45 |
| 5.1 | A Função de Planck e o Efeito Fotoelétrico | 45 |
| 5.2 | As Cores das Estrelas | 52 |
| 5.3 | Classificação Estelar | 55 |
| 5.4 | Diagrama Hertzsprung-Russel | 62 |
| 5.5 | Exercícios - Classificação Estelar | 65 |
| 5.6 | Gabarito - Classificação Estelar | 68 |
| 5.7 | Roteiro de Atividade Prática | |
| | Classificando as Estrelas | 70 |
| 5.8 | Roteiro do Professor(a) | |
| | Classificando as Estrelas | 82 |
| 6 | EVOLUÇÃO ESTELAR E A PRODUÇÃO DE ELEMENTOS | 85 |
| 6.1 | A Radioatividade | 85 |
| 6.2 | A Física Nuclear | 86 |
| 6.3 | Os Decaimentos Alfa, Beta e Gama | 87 |
| 6.4 | Reações Nucleares | 88 |
| 6.5 | Evolução Estelar | 89 |

| | | |
|------|--|-----|
| 6.6 | Nucleossíntese Estelar | 91 |
| 6.7 | Exercícios - Evolução Estelar e a Produção de Elementos | 95 |
| 6.8 | Gabarito - Evolução Estelar e a Produção de Elementos | 99 |
| 6.9 | Roteiro de Atividade Prática Entendendo a Evolução de uma Estrela Massiva | 101 |
| 6.10 | Roteiro do Professor(a) Entendendo a Evolução de uma Estrela Massiva | 110 |
| 7 | BURACOS NEGROS | 113 |
| 7.1 | Relatividade Restrita | 113 |
| 7.2 | Relatividade Geral | 123 |
| 7.3 | Buracos Negros | 125 |
| 7.4 | Exercícios - Buracos Negros | 128 |
| 7.5 | Gabarito - Buracos Negros | 130 |
| 7.6 | Roteiro de Atividade Prática Observando um Buraco Negro Estelar | 131 |
| 7.7 | Roteiro do Professor(a) Observando um Buraco Negro Estelar | 134 |
| 8 | RESULTADOS DAS ATIVIDADES APLICADAS EM SALA DE AULA | 141 |
| 8.1 | Aplicação das Atividades - Resultados Parciais | 146 |
| 9 | CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS DE CONTINUIDADE | 149 |
| | Referências | 151 |
| A | BASE NACIONAL COMUM CURRICULAR - BNCC | 157 |
| B | PLANO DE AULA | 161 |
| C | DADOS ESTELARES | 163 |
| D | RESPOSTAS DOS(AS) ALUNOS(AS) ATIVIDADE SOBRE CLASSIFICAÇÃO ESTELAR | 167 |
| E | ARTIGO PUBLICADO - RBEF | 175 |
| F | CARTA DE AUTORIZAÇÃO | 187 |

1 INTRODUÇÃO

A educação por muitas décadas está moldada no que conhecemos como ensino tradicional. Esse tipo de ensino visa apenas a alocação de conteúdos nos(as) alunos(as), como se os(as) mesmos(as) fossem pequenas caixas de inserção de conhecimento.

Segundo Zabala (2015), o tradicionalismo do ensino dentro das escolas pode ser resumido em duas vertentes: a vertente do(a) professor(a) e seu papel dentro da sala de aula, atribuindo a eles(as) o papel de transmissores de conhecimento e controladores dos resultados que são obtidos a partir do que fazem com suas aulas; a vertente do(a) aluno(a) como receptor(a) do conhecimento apresentado por seu(sua) professor(a), com o papel de interiorizar todas as informações que recebe, de forma que as ações dentro da sala de aula, nada mais são do que a repetição do que foi aprendido, onde os exercícios são como se fossem uma cópia de um modelo já existente e que o(a) aluno(a) só terá certeza de ter “aprendido” o conteúdo a partir do momento em que ele(a) tem a resolução e/ou explicação de um determinado assunto de forma automatizada.

Em contra mão, professores(as) dentro de suas respectivas escolas, de várias idades e disciplinas, procuram diferentes metodologias para colocarem em sala de aula, analisando sempre o quanto essas transformações nos métodos de ensino são efetivas e duradouras. As mudanças nas práticas de ensino e aprendizagem vêm junto com a aceleração ao acesso às novas tecnologias de informação e comunicação principalmente por parte dos(as) alunos(as). Com a utilização crescente de *smartphones*, *tablets* e computadores, alunos(as) se encontram cada vez mais desmotivados pela monotonia de suas aulas (Almeida e Gregorio-Hetem, 2021).

Na área de Ciências da Natureza, professores(as) procuram dar sentido ao conteúdo que é ensinado dentro da sala de aula na tentativa de motivar seus(suas) alunos(as) a prestarem mais atenção e se sentirem engajados de alguma forma com o assunto discutido.

A disciplina de Física Moderna, que está na grade curricular do ensino médio é vista como um conteúdo muito difícil de ser compreendido pelos(as) alunos(as) que estão na fase final do ciclo básico de ensino. Conceitos abstratos e fórmulas algebricamente complicadas são fatores importantes para a desmotivação do(a) estudante dentro da sala de aula. Os Parâmetros Curriculares Nacionais do Ensino Médio ou também conhecidos como PCNEM (Brasil, 2000) trazem uma reflexão sobre a física que todos os(a) professores(as) devem ter em mente:

“É preciso discutir qual física ensinar para possibilitar uma melhor compreensão do mundo e uma formação para a cidadania mais adequada. Sabemos todos que, para tanto, não existem soluções simples ou únicas, nem receitas prontas que garantam o sucesso. Essa é a questão a ser enfrentada pe-

los educadores de cada escola, de cada realidade social, procurando corresponder aos desejos e esperanças de todos os participantes do processo educativo, reunidos através de uma proposta pedagógica clara (Brasil, 2000).”

Apesar da reflexão por parte dos PCNEM, a inserção da Física Moderna no currículo do ensino regular é discutida desde sempre, conforme é apresentado por Ostermann e Moreira (2016) quando mencionam uma discussão que ocorreu na III Conferência Interamericana sobre Educação em Física:

“Na III Conferência Interamericana sobre Educação em Física (Barojas, 1988), foi organizado um grupo de trabalho para discutir o ensino de Física Moderna. Na discussão, foram levantadas inúmeras razões para a introdução de tópicos contemporâneos na escola média. Dentre elas destacam-se:

- despertar a curiosidade dos estudantes e ajudá-los a reconhecer a Física como um empreendimento humano e, portanto, mais próxima a eles;
- os estudantes não têm contato com o excitante mundo da pesquisa atual em Física, pois não vêem nenhuma Física além de 1900. Esta situação é inaceitável em um século no qual ideias revolucionárias mudaram a ciência totalmente;
- é do maior interesse atrair jovens para a carreira científica. Serão eles os futuros pesquisadores e professores de Física;
- é mais divertido para o professor ensinar tópicos que são novos. O entusiasmo pelo ensino deriva do entusiasmo que se tem em relação ao material didático utilizado e de mudanças estimulantes no conteúdo do curso. É importante não desprezar os efeitos que o entusiasmo tem sobre o bom ensino;
- Física Moderna é considerada conceitualmente difícil e abstrata; mas, resultados de pesquisa em ensino de Física têm mostrado que, além da Física Clássica ser também abstrata, os estudantes apresentam sérias dificuldades conceituais para compreendê-la (Ostermann e Moreira, 2016).”

Outra preocupação é o ingresso de nossos(as) alunos(as) nas universidades públicas ou privadas do nosso país. Às vezes isso é apenas uma preocupação do(a) professor(a), porém é com certeza a base de muitos projetos pedagógicos de escolas no contexto nacional. A preocupação em ter o maior número de alunos(as) na universidade X, Y ou Z, faz com que metodologias ou temas diferentes daqueles que são mais abordados nos grandes vestibulares não sejam inseridos no planejamento anual, nem aplicados em sala de aula. O texto a seguir, criado para subsidiar discussões sobre o caminho a trilhar no Ensino de Física dentro dos PCNEM (Ricardo, 2004), apresenta uma argumentação contra essa cultura:

“[...] não há garantias de que vencendo o programa previsto o aluno passará no vestibular. A impressão que se tem é de que o professor, quando vence o extenso conteúdo, fez a sua parte e agora cabe ao aluno estudar. Mas, o que nos garante

que a aprendizagem foi efetiva? E aqueles que não passaram no vestibular, de que serviu a física que aprendeu na escola? (Ricardo, 2004)”

Apesar da insistência em retirar Física Moderna dos currículos do ensino regular, pode-se observar a partir do gráfico apresentado na Figura 1 que apesar de não ser uma quantidade relevante, houveram nos últimos cinco anos, um total de 85 questões relacionadas ao estudo de Física Moderna em vestibulares de universidades públicas, Enem e instituições das forças armadas. Portanto, percebe-se que ainda são temas pertinentes e que são solicitados por grandes vestibulares do país.

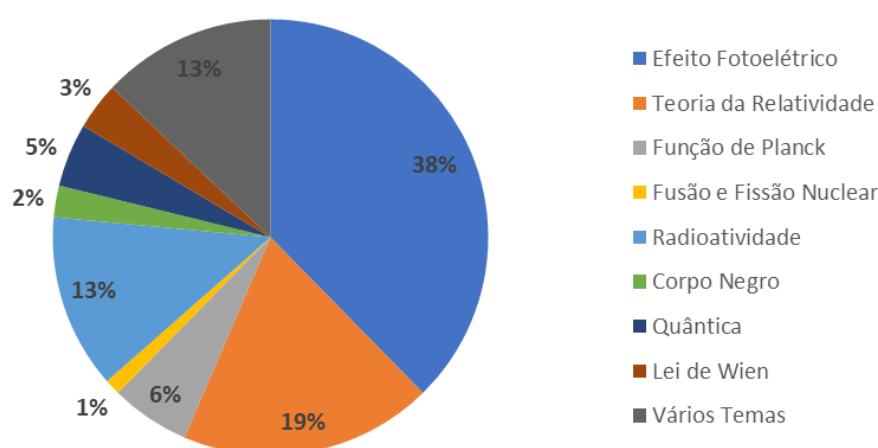


Figura 1 – Gráfico de porcentagem dos assuntos de Física Moderna que caíram nos vestibulares nos últimos cinco anos. A opção “Vários Temas” que aparece na legenda, está relacionada às questões que fazem uma combinação entre assuntos diferentes dentro da Física Moderna.

Em relação à aprendizagem e à avaliação, Lino e Fusinato (2011) apresentam uma reflexão importante:

“Evidenciar se o aluno obteve aprendizagem significativa não implica em pedir ao aluno respostas mecanicamente memorizadas com testes que atribuam conceitos ou elementos essenciais de uma proposição de conteúdo, ou seja, pedir ao aluno que reproduza ideias no mesmo sentido das palavras que foram originalmente apresentadas (Lino e Fusinato, 2011).”

Isso mostra que não só os vestibulares mas as avaliações precisam de modificações individuais durante o processo educativo. A crescente falta de interesse entre os(as) alunos(as) (Gouw e Bizzo, 2016), frente ao aumento da pressão para entrar nos grandes vestibulares, mais a falta de conectividade entre os conteúdos e a realidade dos(as) alunos(as) levou a possibilidade da criação do que é conhecido hoje como novo ensino médio, fundamentado pela Base Nacional Comum Curricular ou BNCC, que estabelece competências e habilidades que todo(a) aluno(a) deve obter ao final de sua vida escolar, descentralizando o ensino em disciplinas e o colocando dentro do contexto da interdisciplinaridade (Brasil, 2015).

“Os sistemas de ensino e as escolas devem construir seus currículos e suas propostas pedagógicas, considerando as características de sua região, as culturas locais, as necessidades de formação e as demandas e aspirações dos estudantes. Nesse contexto, os itinerários formativos, previstos em lei, devem ser reconhecidos como estratégicos para a flexibilização da organização curricular do Ensino Médio, possibilitando opções de escolha aos estudantes.

Aliás, a flexibilidade deve ser tomada como princípio obrigatório pelos sistemas e escolas de todo o País, asseguradas as competências e habilidades definidas na BNCC do Ensino Médio, que representam o perfil de saída dos estudantes dessa etapa de ensino. Cabe aos sistemas e às escolas adotar a organização curricular que melhor responda aos seus contextos e suas condições (Brasil, 2015).”

Outro ponto importante que a BNCC nos traz é a possibilidade de fazer com que a aprendizagem do(a) aluno(a) seja não só interessante mas também significativa, trazendo a criação de itinerários formativos, que podem ter o formato de laboratório, clubes, oficinas, observatórios entre outros, onde os(as) alunos(as) poderão escolher o que querem estudar.

“Na Educação Básica, a área de Ciências da Natureza deve contribuir com a construção de uma base de conhecimentos contextualizada, que prepare os estudantes para fazer julgamentos, tomar iniciativas, elaborar argumentos e apresentar proposições alternativas, bem como fazer uso criterioso de diversas tecnologias. O desenvolvimento dessas práticas e a interação com as demais áreas do conhecimento favorecem discussões sobre as implicações éticas, socioculturais, políticas e econômicas de temas relacionados às Ciências da Natureza.

[...]

Para além do aprofundamento dessas temáticas, a BNCC de Ciências da Natureza e suas Tecnologias propõe também que os estudantes ampliem as habilidades investigativas desenvolvidas no Ensino Fundamental, apoiando-se em análises quantitativas e na avaliação e na comparação de modelos explicativos. Além disso, espera-se que eles aprendam a estruturar linguagens argumentativas que lhes permitam comunicar, para diversos públicos, em contextos variados e utilizando diferentes mídias e tecnologias digitais de informação e comunicação (TDIC), conhecimentos produzidos e propostas de intervenção pautadas em evidências, conhecimentos científicos e princípios éticos e responsáveis (Brasil, 2015).”

Apesar da ideia da BNCC parecer interessante, muitos(as) professores(as) e escolas se veem preocupados(as) com a mudança do cenário na educação. Alguns artigos discutem sobre essas mudanças, na verdade, se realmente são mudanças (Silva, 2018; Sússekind, 2019), inclusive pensando diretamente nos principais desafios que os(as) professores(as)

da área de Ciências da Natureza encontrarão na hora de planejar suas aulas (Castro et al., 2020).

A criação de aulas dinâmicas e contextualizadas em todos os campos, como é indicado pela BNCC (Brasil, 2015), seja nos conteúdos que deverão ser apresentados ou seja na relação com a realidade do(a) aluno(a) se baseia na experiência e facilidade do(a) professor(a) em relação ao assunto que será apresentado. Segundo Zabala (2015):

“Se entendemos que a melhora de qualquer das atuações humanas passa pelo conhecimento e pelo controle das variáveis que intervêm nelas, o fato de que os processos de ensino/aprendizagem sejam extremamente complexos - certamente mais complexos do que os de qualquer outra profissão - não impede, mas sim torna mais necessário, que nós professores, disponhamos e utilizemos referenciais que nos ajudem a interpretar o que acontece em aula. Se dispomos de conhecimento desse tipo, nós os utilizaremos previamente ao planejar, no próprio processo educativo, e, posteriormente, ao realizar uma avaliação do que aconteceu (Zabala, 2015).”

A docência, diferente de outras profissões, não possui referências ou modelos que simplesmente podem ser seguidos com a intenção de obter resultados semelhantes ao já obtido por alguém que já tenha testado. A utilização de um método ou de um livro didático pode ser diferente, inclusive dentro da mesma turma, pois cada aluno(a) é único(a) e o contexto não somente escolar, mas individual, pessoal e psicológico deve ser considerado na hora do planejamento de uma aula (Zabala, 2015).

Apesar da Física Moderna ser um componente curricular previsto pelos PCN e pela BNCC, o conteúdo nem sempre é ministrado ou ministrado de forma completa pelo(a) professor(a) por diversos motivos, sendo eles:

1. O(A) professor(a) pode não ter tempo viável para passar o conteúdo por questões de carga horária reduzida;
2. O projeto político pedagógico da escola visa apenas focar em conteúdos que são abordados em grandes vestibulares nacionais;
3. Falta de formação do(a) professor(a).

Os primeiros dois motivos, na realidade da educação atual, normalmente são correlacionados quando falamos de escolas privadas, porém quando se trata de escolas públicas a carga horária para disciplina de Física, é reduzida ao ponto de não ser viável a inclusão do ensino de Física Moderna em seus planejamentos (de Moura e Vianna, 2019). Quando falamos de problemas na formação do(a) professor(a), entramos em uma situação mais ampla, pois se há lacunas em sua formação, o(a) professor(a) não conseguirá atender em suas aulas as necessidades de seus(as) alunos(as) (Silva e Braidante, 2018).

Pode-se a partir do quadro apresentado na Figura 2, analisar o que o(a) professor(a) deveria ter após sua formação e como isso se concretiza dentro da sala de aula:

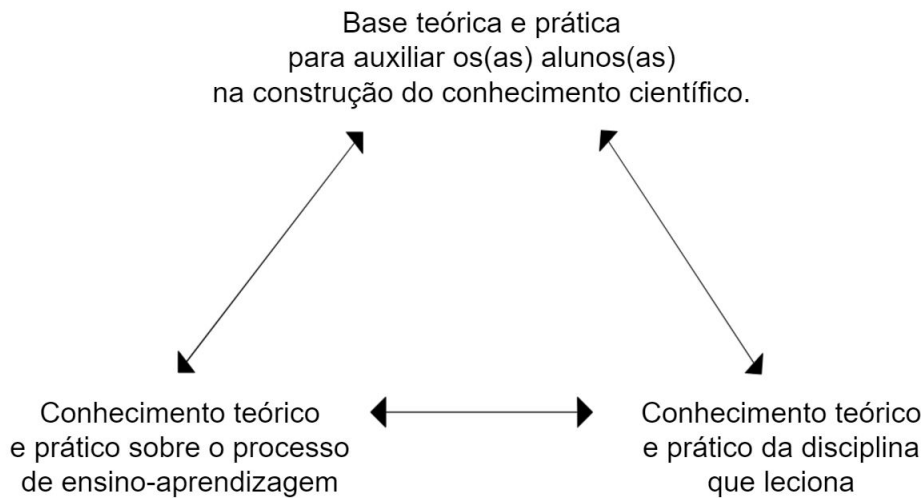


Figura 2 – Ciclo básico de conhecimentos teóricos e práticos para lecionar uma determinada disciplina. Figura criada a partir do texto de Silva e Braidante (2018) que discute sobre a formação dos professores de ciências.

Baseado então nas informações do quadro apresentado, pode-se perceber que para o(a) professor(a) fornecer uma aula com assuntos e metodologias diferentes, ele(a) deve dominar o conteúdo que é responsável de forma a se flexibilizar se houver a necessidade (Hypolitto, 2009; Zabala, 2015) e assim, segundo Silva e Braidante (2018) terá condições para:

1. Elaborar e orientar atividades que suscitem o interesse dos(as) alunos(as) em aprender;
2. Realizar críticas e mudanças no processo de ensino-aprendizagem;
3. Avaliar o processo de ensino-aprendizagem de forma contínua.

Indiferente dos motivos, de Moura e Vianna (2019) trazem um pequeno recorte do que pode ocorrer com os(as) alunos(as) pela falta dessa importante componente curricular .

“A deficiência no Ensino de Física Moderna causa prejuízos na formação dos estudantes, pois dificulta a compreensão de muitos dos aspectos tecnológicos do mundo contemporâneo, como as telecomunicações com e sem fio, a aplicação da Física na área da medicina, engenharias, funcionamento de aparatos tecnológicos de uso diário como *smartphones*, computadores, CD’s, DVD’s, internet, etc (de Moura e Vianna, 2019).”

Tendo como base essa ideia e conhecendo a dificuldade em ensinar Física Moderna, principalmente para os(as) alunos(as) que estão no terceiro ano do ensino médio, espera-se que a aplicação de diferentes assuntos de forma a interligar os conteúdos de Física

Quântica, Física Nuclear e Relatividade Restrita com algum outro tema norteador que aguce a imaginação e a curiosidade dos(as) alunos(as), possa trazê-los para participarem e se engajarem mais nas aulas (Silva Jr., 2017), por esse motivo, a Astronomia se faz presente nesse trabalho, para interligar assuntos que são relacionados mas que não são abordados em sala de aula.

2 OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA

O produto final resultante dessa dissertação tem como objetivo geral criar atividades que instiguem a curiosidade e que facilite a compreensão dos(as) alunos(as) nas áreas de Física Moderna e Astronomia. Além disso, tem-se como objetivos específicos:

- Dar suporte aos(às) professores(as) que lecionam a disciplina de Física, sejam eles(as) graduados(as) na área ou não, fornecendo sequências didáticas com desenvolvimento teórico dos conteúdos de Física Moderna, a partir de explicações detalhadas dos métodos, teorias e deduções das equações para que sirva de material de apoio em suas aulas, contribuindo como complementação à sua formação;
- Criar roteiros de atividades práticas com gabarito para os conteúdos de Física Moderna utilizando como tema principal estrelas e sua evolução, com o foco em estrelas massivas que resultem em Buracos Negros.

Para atingir tais objetivos, as seguintes hipóteses foram consideradas:

- Professores(as) possuem dificuldade em falar sobre Astronomia por não terem uma formação sólida em sua graduação;
- Em caso de escolas da rede pública (principalmente), professores(as) graduados(as) em outras áreas estão se disponibilizando para dar aulas de Física. Dessa forma, não só a Astronomia será um assunto difícil de se discutir com seus(suas) alunos(as) como o(a) professor(a) não terá base suficiente para explicar e/ou discutir sobre Física Moderna.;
- Alunos(as) possuem grande interesse em assuntos da Física Moderna como, por exemplo, Física Nuclear e Relatividade assim como em assuntos de Astronomia, principalmente Buracos Negros;

Tais hipóteses apresentadas foram baseadas em experiência pessoal em sala de aula como também a partir de conversas individuais com outros(as) professores(as) que lecionam Física.

Para ter uma base das necessidades do(a) professor(a) de uma forma mais geral e não utilizando apenas uma experiência pessoal, foi disponibilizado um questionário no *Google Forms* para que professores e professoras do Brasil pudessem responder e ajudar a ter uma ideia de como são as relações desses conteúdos em seus planejamentos anuais.

O questionário ficou aberto por aproximadamente um ano e meio e foi divulgado tanto por meio de colegas de profissão para que o mesmo fosse repassado para conhecidos(as), como também por meio de redes sociais como *Facebook*, *Instagram*, grupos de *Whats App*

de professores, entre outros. Mesmo com todo o tempo de abertura e com a extensa divulgação foram obtidas 82 respostas aplicáveis para análise.

A partir dos dados recebidos, verificou-se que a maior parte dos(as) professores(as) estão alocados em escolas da rede privada do Brasil (Figura 3-a). Além disso, 78% são formados(as) em Física, porém, tem-se que 22% possuem outras formações, entre elas, Matemática, Programa de Formação de Professores em Física¹, Biologia, Química, Engenharia, Tecnólogo em Mecânica de Precisão e Direito (Figura 3-b).

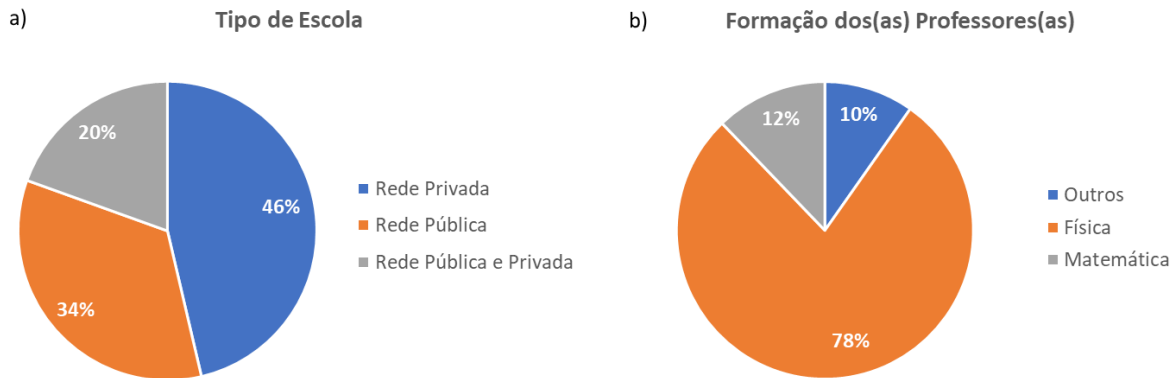


Figura 3 – Distribuição das respostas para a enquete sobre os conteúdos de Física e Astronomia nos planejamentos anuais de professores(as): a) Gráfico de porcentagem em relação ao tipo de escola; b) Gráfico de porcentagem em relação à formação dos(as) professores(as) que lecionam a disciplina de Física.

A Figura 4 apresenta uma visão mais geral da relação entre a formação do(a) professor(a) e onde esses(as) estão lecionando, nota-se que a maior parte dos(as) professores(as) entrevistados(as) formados(as) em Física estão na Rede Privada.

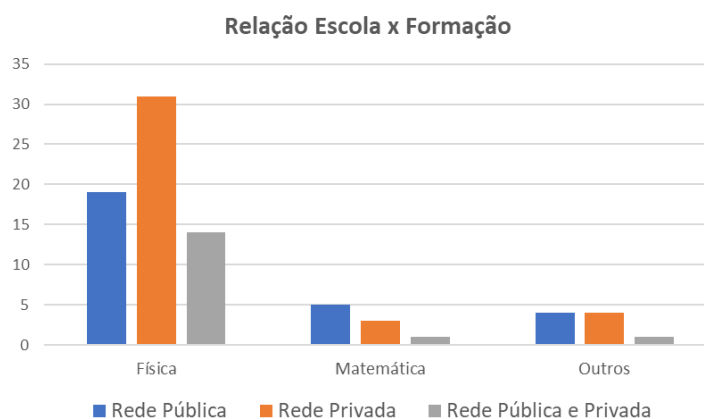


Figura 4 – Gráfico de Barras que relaciona a formação dos(as) professores(as) entrevistados(as) e onde estão alocados (Rede Pública ou Particular).

Mas por qual razão é importante que quem esteja lecionando Física, seja formado na área? É necessário lembrar que a Física não é apenas uma disciplina com várias

¹ Esse tipo de curso é voltado para quem possui diploma em bacharelado em cursos correlatos, tendo disciplinas relacionadas à educação, como Didática, por exemplo.

fórmulas que podem ser memorizadas a partir de truques mnemônicos (podemos usar como exemplo, a famosa equação do “sorvete” $\rightarrow s = s_0 + v \cdot t$), como é visto por muitos(as) alunos(as). O(A) professor(a) deve ser capaz de apresentar aos(às) seus(suas) alunos(as) todo o contexto histórico por trás de uma equação, podendo inclusive acrescentar deduções e/ou curiosidades. Para analisar tal lacuna no conhecimento de quem está à frente da sala de aula, foi feito o seguinte questionamento aos(às) professores(as) entrevistados(as): “*Você sente-se à vontade quando há a necessidade de apresentar a solução ou dedução de uma equação do conteúdo de Física Moderna para sua turma?*”.

O gráfico apresentado na Figura 5 mostra que apenas 21% dos(as) entrevistados(as) possuem confiança ou segurança para apresentar soluções ou deduções dentro da área de Física Moderna.

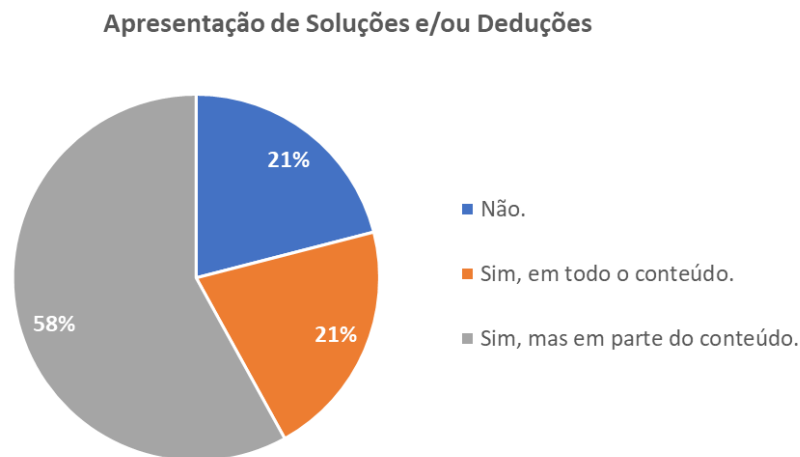


Figura 5 – Gráfico de porcentagem que apresenta o nível de confiança e/ou segurança dos(as) professores(as) entrevistados(as) em relação a demonstração de equações em Física Moderna.

Em relação ao conhecimento e/ou formação em Astronomia, a Figura 6 apresenta que apenas 20% dos entrevistados possuem uma boa formação na área.

Considerando o aumento crescente do tema sendo exposto por meio de mídias digitais e de comunicação em geral como TV e Rádio e a inserção do tema como uma das bases da BNCC, conforme apresentado abaixo, a Astronomia torna-se um tema de grande importância para o conhecimento do(a) professor(a).

“Em **Vida, Terra e Cosmos**, resultado da articulação das unidades temáticas **Vida e Evolução e Terra e Universo** desenvolvidas no Ensino Fundamental, propõe-se que os estudantes analisem a complexidade dos processos relativos à origem e evolução da Vida (em particular dos seres humanos), do planeta, das estrelas e do Cosmos, bem como a dinâmica das suas interações, e a diversidade dos seres vivos e sua relação com o ambiente. Isso implica, por exemplo, considerar modelos mais abrangentes ao explorar algumas aplicações

das reações nucleares, a fim de explicar processos estelares, datações geológicas e a formação da matéria e da vida, ou ainda relacionar os ciclos biogeoquímicos ao metabolismo dos seres vivos, ao efeito estufa e às mudanças climáticas (Brasil, 2015).”

Formação dos(as) Professores(as) em Astronomia

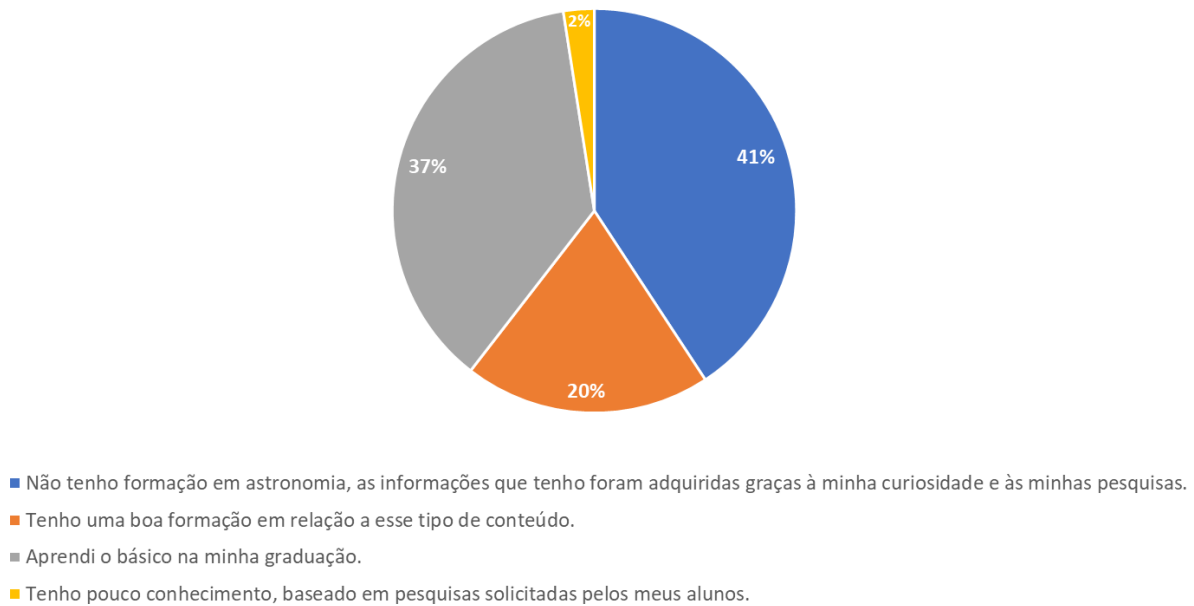


Figura 6 – Gráfico de porcentagem em relação ao conhecimento e formação dos(as) professores(as) em Astronomia.

Os dados apresentados nas Figuras 5 e 6 expõem não só a necessidade de formações continuadas em Física e em Astronomia, mas também materiais didáticos próprios para a utilização por professores(as) que possuem no mínimo formação na área de Ciências da Natureza ou Exatas para suprir a necessidade daqueles(as) que estarão em suas salas de aula, provavelmente lecionando um conteúdo sem nenhum apoio ou material pedagógico.

A experimentação nas aulas de Física também é de grande importância para que as aulas não fiquem apenas em cima de teorias e cálculos (Zabala, 2015). Quando o assunto é Física Moderna há uma grande dificuldade de se abstrair o conteúdo para algo mais palpável e essa dificuldade é ainda maior em relação a experimentos na área, fazendo com que professores(as) recorram em sua maioria para experimentos lúdicos ou simulações. Porém, a Figura 7 expõe que 57% dos(as) entrevistados(as) simplesmente não utilizam experimentos quando falam sobre Física Moderna.

Utilização de Experimentos de Física Moderna na Sala de Aula

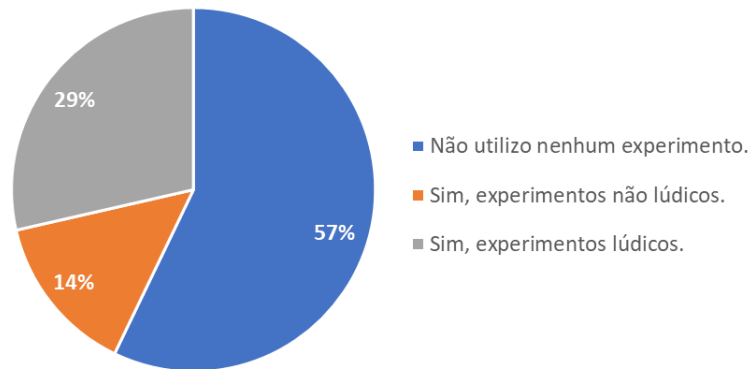
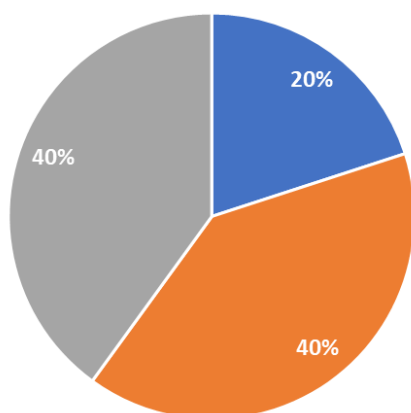


Figura 7 – Gráfico de porcentagem que apresenta dados sobre uso ou não de experimentos nas aulas de Física Moderna.

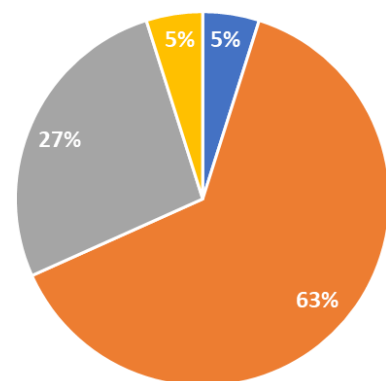
Para analisar a última hipótese, foi questionado sobre o interesse dos(as) alunos(as) em relação aos conteúdos de Física Moderna e Astronomia. Conforme apresenta-se no Gráfico da Figura 8, quando o assunto é Física Moderna, há uma relação de 40% que possuem muito interesse na área e 40% que não possuem interesse algum, já quando o assunto é Astronomia, 63% dos(as) alunos(as) a partir da visão de seus(suas) professores(as) possuem muito interesse.

Considerando o retorno em relação aos conteúdos de Física Moderna ter sido abaixo do que se esperava, a Astronomia ainda se sobrepõem ao tipo de interesses dos(as) alunos(as), trazendo uma boa motivação para entrelaçar as duas áreas e concluir os objetivos anteriormente citados.

Interesse dos(as) Alunos(as) - Física Moderna



Interesse dos(as) Alunos(as) - Astronomia



■ Só manifestam interesse se é conteúdo de prova. ■ Muito interesse
 ■ Pouco interesse ■ Nenhuma das alternativas acima.

Figura 8 – Gráfico de porcentagem dos(as) professores(as) sobre interesse dos(as) alunos(as) em relação aos conteúdos de Física Moderna e Astronomia.

Além de todos os dados apresentados até o momento e para que os(as) professores(as) conseguissem se expressar ao fazer comentários fora do que estava definido no questionário, foi deixado como aberto e opcional em espaço de texto para respostas longas com o seguinte título: *“Caso queira manifestar-se sobre os desafios que você encontra para ministrar os conteúdos de Física Moderna e/ou Astronomia, por favor utilize esse espaço para acrescentar seus comentários. (Opcional)”*. Abaixo apresentam-se alguns comentários pertinentes com detalhes das dificuldades que esses(as) professores(as) encontram em seu dia a dia:

“Com a nova BNCC os professores formados em biologia devem explicar física química e biologia desde o 6º ano sem uma formação adequada para isso.”

“A dificuldade está relacionada a achar material destinado ao ensino médio com esse tema. Eu utilizo referências bibliográficas da graduação.”

“Falta de vontade dos alunos, poucos materiais na escola, professor precisa garimpar material para aplicar, muitos materiais “sumiram” da escola pública.”

“Na escola da rede pública os desafios são muitos: falta de material pedagógico, laboratório, cursos de formação...”

“Ocorre que tanto na rede pública como na privada Física Moderna quase nunca é abordada por falta de tempo. A pergunta sobre quantas aulas são dedicadas a esse conteúdo eu respondi 4 aulas por falta de opção, pois em média é 1 ou 2 aulas.”

“O maior problema em lecionar física moderna é o currículo da escola que trabalho, é por minha formação que vejo a importância de inserir tópicos de física moderna, ao longo do conteúdo proposto, pela apostila do colégio que trabalho.”

“Sou professor de Física do Ensino Médio, mas Física Moderna não faz parte do currículo aqui no Rio de Janeiro. Como o programa já é extenso, não sobra tempo para uma abordagem sistemática de FM. O que faço é apresentar algumas ideias quando se relacionam ao assunto que estou ministrando no momento. Mas não há nenhuma programação ou preparo prévio para isso. Contudo, as vezes em que o fiz, notei interesse de parte dos alunos.”

“Acho que o principal empecilho para ministrar esses conteúdos é que eles não são cobrados com frequência no ENEM ou nos vestibulares de meu estado, apesar de aparecerem em alguns currículos e timidamente na BNCC. Entendo que essa justificativa não é aceitável, porém é o que acontece no Rio de Janeiro.”

“Carga horária baixa para muito conteúdo programático de física clássica.”

“Os maiores desafios estão quando saio da teoria e vou para o cálculo...”

“À grande dificuldade está nas avaliações externas (ENEM, vestibulares etc). Pois os currículos escolares não contemplam tempo para que esses assuntos sejam abordados na sala de aula.”

“Infraestrutura”

“Como não tenho licenciatura em Física, preciso me dedicar muito mais pra poder ministrar as minhas aulas.”

Como já é de conhecimento praticamente empírico, a maior parte dos problemas giram em torno da falta de tempo para o conteúdo de Física Moderna, falta de material didático, falta de estrutura da escola e falta de formação. Foi a partir dessa realidade que surgiu o propósito de criar sequências didáticas com conteúdos de Física Moderna utilizando a Astronomia, tratando especificamente da evolução de estrelas massivas como tema norteador de forma a servirem como material didático para auxiliar o(a) professor(a) tanto teoricamente em suas aulas, com acesso a um texto teórico base, com exercícios que dialogassem entre os assuntos, como também atividades práticas que colocassem o(a) aluno(a) como protagonista não somente na fronteira do conhecimento como na utilização de tecnologias digitais, utilizando análise de dados e simulações.

3 DESENVOLVIMENTO DAS ATIVIDADES

A Astronomia e a Astrofísica são campos da ciência que instigam curiosidade entre muitos(as) alunos(as) do ensino médio. Com a divulgação crescente nas redes sociais e/ou na mídia, perguntas pertinentes ao assunto percorrem todas as aulas de física, principalmente quando são iniciados conteúdos de Física Moderna. Algumas escolas, com o uso dos itinerários formativos na área de Ciências da Natureza (Brasil, 2015) já inseriram a Astronomia como tema de projetos e programas de incentivo à ciência, tendo um bom resultado em relação à procura dos(as) alunos(as) para participarem das aulas, considerando que essas disciplinas são em sua maioria do tipo optativa (Moderna, 2021).

Como basicamente a estrutura e a evolução das estrelas são explicadas em sua maior parte utilizando Física Moderna e tendo em vista o crescente interesse dos(as) alunos(as) na área, principalmente em relação aos Buracos Negros, foi proposto o questionamento para esse trabalho: é possível que esses(as) alunos(as) aprendam Física Moderna utilizando como tema norteador a Astronomia?

Ao se fazer um levantamento bibliográfico na área, em busca de artigos que trouxessem temas ou experimentos para o ensino de Astronomia, em nível nacional, percebe-se que poucos são direcionados ao ensino médio. É ainda menor o número de artigos que apresentam o uso da Astronomia para o ensino de Física Moderna. Mesmo assim, ainda há uma procura em inserir conteúdos teóricos e práticos, de forma geral, para dar insumos ao(à) professor(a) dentro da sala de aula. Os materiais encontrados, com base no período dos últimos dez anos, indicam informações importantes para uma sequência de aulas para abordar assuntos como, Astronomia ou Cosmologia (Fróes, 2014; Perimeter Institute, 2021; Horvath, 2021); utilização do Sol como tema para estudos de conteúdos específicos de Física Moderna (Junior e Silva, 2011; Junior et al., 2013; Silva, 2015; Almeida e Gregorio-Hetem, 2021) e por fim, com base principalmente no tema de Astrofísica Estelar para estudos também de conteúdos de Física Moderna (Marranghello e Pavani, 2011a,b; Horvath, 2013; Napoleão, 2018; Cestari, 2018; Bandecchi et al., 2019a,b; Perimeter Institute, 2021).

A partir desse levantamento, percebeu-se que com a exceção de Horvath (2019) em seu livro “As Estrelas na Sala de Aula: uma Abordagem Para o Ensino da Astronomia Estelar”, todos os artigos, teses ou resumos aqui apresentados, se referem a um conteúdo específico dentro da Física Moderna e muitas vezes com experimentos repetidos, como por exemplo, o espectroscópio de baixo custo. Isso demonstra a necessidade de um material amplo, com possibilidade de ser flexível ao(à) professor(a), para que ele(a) tenha autonomia e liberdade para saber quais recursos didáticos utilizará em suas aulas, se baseando também na realidade de seus(suas) alunos(as) (Zabala, 2015) e que perpassasse pelo desenvolvimento teórico de todos os conteúdos que estão definidos no currículo do terceiro ano

do ensino médio, com exercícios e atividades práticas que possibilitem a análise do aprendizado e interesse do(a) aluno(a) tanto na Astrofísica como na Física Moderna, seguindo assim a definição dada por Zabala (2015) para uma sequência didática:

“As sequências didáticas, como conjuntos de atividades, nos oferecem uma série de oportunidades comunicativas, mas que por si mesmas não determinam o que constitui a chave de todo o ensino: as relações que se estabelecem entre os professores, os alunos e os conteúdos de aprendizagem (Zabala, 2015).”

Com isso as sequências didáticas aqui apresentadas, abordam temas da área de Astronomia para explicar Física Moderna, com o intuito de proporcionar ao(a) professor(a) um material acessível (até para aqueles que não são formados na área) e de qualidade, propondo atividades com temas instigantes para motivar e aguçar a curiosidade dos(as) alunos(as) trazendo engajamento e autonomia nas salas de aula (Figura 9).

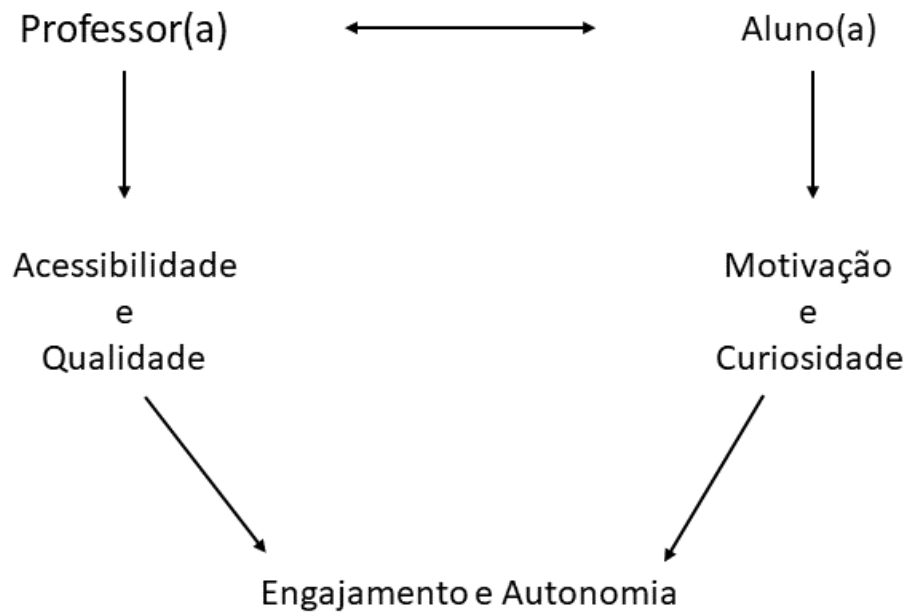


Figura 9 – Esquema geral da criação das sequências didáticas baseado em Zabala (2015).

Quando fala-se em engajamento e autonomia por parte dos(as) alunos(as) tem-se em mente a aprendizagem como algo que deve ter um significado na vida de cada ser humano. Segundo Ausubel (1980) a aprendizagem deve ter algum tipo de significado além da escola, para que o(a) aluno(a) consiga manter o que aprendeu de forma relevante após fazer conexões com o seu dia a dia. No caso das sequências didáticas aqui apresentadas, não necessariamente o assunto faz parte do dia a dia do(a) aluno(a), porém esse material fornecerá ferramentas para que ele(a) correlacione o que aprendeu com uma dada notícia ou postagem em alguma rede social, trazendo-o(a) para uma nova visão de mundo.

As sequências didáticas propostas foram construídas com base na BNCC (Anexo A) focando em habilidades importantes no futuro de cada aluno(a). Para que a construção

dessas sequências ocorra de forma fluída, foi feita uma análise de correspondência entre os assuntos para que fossem ligados de forma a ter início, meio e fim, para isso, partiu-se sempre de um tema de Física Moderna que estava planejado para o ano para então vinculá-lo com o tema norteador. Como já mencionado anteriormente, buracos negros é um dos temas mais comentados no ensino médio, por esse motivo foi decidido que o caminho que seria tomado precisaria passar por estrelas de alta massa, para então finalizar com buracos negros.

A estrutura das sequências didáticas tinham como base a ideia da construção de um livro didático, logo os capítulos foram divididos em:

- Introdução ao Capítulo: contém um breve resumo do que o(a) professor(a) irá encontrar nas páginas seguintes;
- Desenvolvimento Teórico do Tema: nesse ponto o(a) professor(a) irá encontrar todo desenvolvimento teórico com deduções e informações relevantes para uso dentro da sala de aula, além da contextualização histórica do tema em questão;
- Exercícios: exercícios de fixação onde os temas de Física e Astronomia convergem entre si;
- Gabarito dos Exercícios: gabarito com resoluções dos exercícios de fixação;
- Atividade Prática: atividade prática utilizando simulações ou experimentos para serem realizados por meio presencial, virtual ou híbrido;
- Roteiro do(a) Professor(a): gabarito com informações importantes para a realização das atividades práticas assim como também as respostas que os(as) alunos(as) devem obter durante a atividade.

Além da estrutura dos capítulos, também disponibilizou-se três anexos importantes para consulta:

- BNCC (Anexo A): local onde o(a) professor(a) encontrará as principais Competências Gerais, Competências Específicas e Habilidades utilizadas como apoio para a construção das sequências didáticas;
- Plano de Aula (Anexo B): plano de aula flexível e testado durante o ano de 2021;
- Dados Estelares (Anexo C): informações sobre temperatura, luminosidade e raio de alguns tipos de estrelas baseadas em Carroll e Ostlie (2007).

A partir dessa estrutura assim como apresentado por Silva (2016) em sua dissertação, é de grande importância que o(a) professor(a) não siga as sequências didáticas e atividades nelas propostas, como se fosse uma “receita de bolo”, mas que seja readequada à sua vivência dentro da sala de aula e à realidade tanto da escola como de seus(suas) alunos(as).

4 LUMINOSIDADE E FLUXO ESTELAR

Este capítulo apresenta uma introdução ao conteúdo de Física Moderna utilizando de forma aplicada o estudo das estrelas e sua evolução. Inicialmente vamos abordar o que é a luz, como ela se forma, qual é a sua natureza e quais são suas principais propriedades. Para isso deve-se entender o que são ondas eletromagnéticas e porque elas são tão importantes para diversas descobertas dentro da Astronomia.

Com esses conteúdos bem alinhados, então iniciamos a aplicação de como enxergamos a luz das estrelas. Todas estrelas têm o mesmo brilho? Considerando um mesmo observador na Terra, o que difere o brilho de uma estrela em relação ao brilho de outra?

Em resumo, esse capítulo apresentará os conteúdos de Ondas Eletromagnéticas e Propriedades da Luz e terá como atividade prática a análise da Luminosidade e do Fluxo Estelar detectado a uma dada distância (Brilho Aparente).

4.1 Ondas Eletromagnéticas

Em 1865, James Clerk Maxwell (1831 – 1879) percebeu que as leis empíricas da eletricidade e do magnetismo poderiam ser escritas resumidamente por quatro equações diferenciais parciais, sendo elas:

Lei de Gauss → O número de linhas de campo que atravessam uma superfície gaussiana arbitrária S é proporcional à carga contida na mesma superfície:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}, \quad (4.1)$$

sendo que ρ é a densidade de carga (quantidade de carga em relação ao volume da superfície) e ϵ_0 a constante de permissividade do vácuo¹.

Lei de Gauss para o Magnetismo → O número de linhas de campo magnético que atravessa uma superfície gaussiana arbitrária S é sempre igual a zero:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0. \quad (4.2)$$

Lei de Faraday-Lenz → O campo elétrico gerado por uma carga é proporcional à variação do fluxo magnético com o tempo na superfície contida em uma curva:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}. \quad (4.3)$$

¹ Constante de Permissividade do Vácuo: $\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k_0}$ sendo $k_0 = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2$ a constante eletrostática no vácuo e $\epsilon_0 \approx 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 / \text{N} \cdot \text{m}^2$.

Lei de Ampère-Maxwell \rightarrow O campo magnético produzido numa curva é proporcional à corrente e a variações do campo elétrico no tempo, em uma superfície gaussiana arbitrária S contida pela curva. Logo, por essa lei podemos dizer que a mudança no campo elétrico induz um campo magnético.

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}, \quad (4.4)$$

sendo μ_0 a permeabilidade magnética no vácuo².

Sabemos que não há carga elétrica no vácuo e como consequência não há também corrente elétrica, dessa forma pode-se reescrever as Equações 4.1 e 4.4 para $\rho = 0$ e $\vec{J} = 0$ e então definir a equação para a velocidade das ondas eletromagnéticas no vácuo (Griffiths, 1999), logo:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0, \quad (4.5)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}. \quad (4.6)$$

Não se sabe quanto vale $\frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$, porém $\vec{\nabla} \times \vec{E}$ é definido pela Equação 4.3, logo podemos calcular o seu rotacional³ como:

$$\vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{E}) = -\frac{\partial}{\partial t} \vec{\nabla} \times \vec{B},$$

$$\vec{\nabla} (\vec{\nabla} \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \vec{\nabla} \times \vec{B}. \quad (4.7)$$

Substituindo as equações 4.5 e 4.6 em 4.7, temos que:

$$-\nabla^2 \vec{E} = -\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \rightarrow \nabla^2 \vec{E} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}. \quad (4.8)$$

Sabemos que a equação da onda em uma dimensão $u(x,t)$ é dada por:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0 \rightarrow \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2},$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \nabla^2 u \rightarrow \nabla^2 u = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}. \quad (4.9)$$

Comparando as Equações 4.8 e 4.9 e utilizando as informações já definidas para as constantes permeabilidade magnética no vácuo (μ_0) e permissividade do vácuo (ϵ_0), calculamos

² Permeabilidade Magnética no Vácuo: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2$.

³ $\vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{A}) = \vec{\nabla} (\vec{\nabla} \cdot \vec{A}) - \nabla^2 \vec{A}$.

a velocidade de uma onda eletromagnética no vácuo, a partir de:

$$\begin{aligned} \frac{1}{v^2} &= \mu_0 \epsilon_0 \rightarrow v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}, \\ v &= \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \cdot \frac{1}{4 \cdot \pi k_0}}} \rightarrow v = \frac{1}{\sqrt{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot 9 \cdot 10^9}}}, \\ v &= \frac{1}{\sqrt{\frac{10^{-7}}{9 \cdot 10^9}}} \rightarrow v = \sqrt{\frac{9 \cdot 10^9}{10^{-7}}}, \\ v &= \sqrt{9 \cdot 10^9 \cdot 10^7} \rightarrow v = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}. \end{aligned}$$

Logo, a velocidade da luz, caracterizada universalmente pela letra c , proveniente da palavra em latim *celeritas* que significa velocidade, é definida por:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \rightarrow c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \approx 3 \cdot 10^5 \text{ km/s}. \quad (4.10)$$

A comparação entre as informações obtidas por Maxwell, os dados experimentais da velocidade da luz, e as suas propriedades de polarização, indicou que a luz também era uma onda eletromagnética e dessa forma, assim como qualquer onda conhecida na época, deveria haver um meio de propagação.

Como não era possível determinar visualmente qual era esse meio de propagação, ficou determinado que este meio seria então o *Éter Luminífero*⁴, justificando o fato que ondas eletromagnéticas conseguiam se propagar (Tipler e Llewellyn, 2014).

Em 1887 Albert Abraham Michelson⁵ (1852 – 1931) e Edward Williams Morley (1838 – 1923) projetaram um experimento dedicado para a detecção da existência do *Éter Luminífero*. Esse dispositivo que foi chamado de interferômetro, detectaria a diferença entre o intervalo de tempo da trajetória de ida e volta de um feixe de luz entre o divisor de feixe para o espelho 1 e o intervalo de tempo da trajetória de ida e de volta de um feixe de luz entre o divisor de feixe e o espelho 2, conforme apresentado na Figura 10.

Se fosse detectada uma diferença entre os intervalos de tempo, conforme previsto por Michelson e Morley, haveria a comprovação da existência do *Éter Luminífero*. Apesar da eficiência do interferômetro, todas as medidas realizadas falharam e nunca encontraram qualquer diferença de tempo. Com esse resultado, indicou-se fortemente a não existência do *Éter Luminífero*, logo se provava que a luz (e qualquer onda eletromagnética) não precisava de nenhum meio para se propagar.

⁴ O Éter foi um termo empregado por Aristóteles para definir uma substância que se diferenciava dos quatro elementos por sua ingenerabilidade, incorruptibilidade, inalterabilidade e que estaria em todos os pontos do Universo. Por volta do começo do século XIX, Augustin Jean Fresnel, indicou a existência dessa mesma substância como um meio hipotético para propagação das ondas luminosas, denominando-a como *Éter Luminífero* (Abbagnano, 1970).

⁵ <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1907/summary/>.

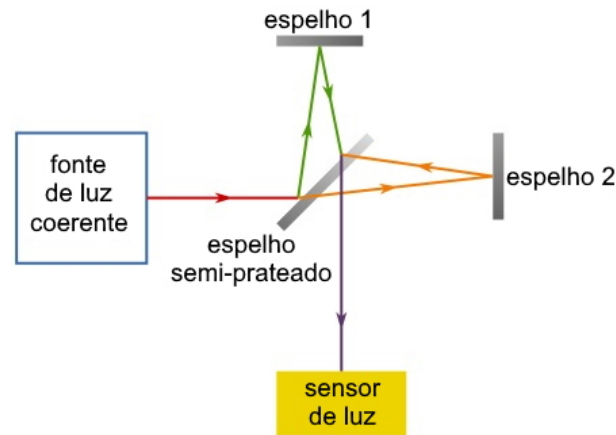


Figura 10 – Esquema do experimento de Michelson e Morley⁶.

Com isso surgiu a necessidade de uma nova teoria para substituir as transformações relativísticas de Galileu para assegurar a invariância das leis do eletromagnetismo nascendo assim um dos pilares para a criação da Relatividade de Einstein (Tipler e Llewellyn, 2014; Serway e Jewett Jr, 2014) que será estudado nos capítulos posteriores.

Hoje sabemos que as ondas eletromagnéticas possuem as seguintes propriedades:

1. Podem ser polarizadas, pois são de natureza transversal;
2. Não são modificadas ou afetadas por outros tipo de campos que não seja elétrico ou magnético;
3. Diferentes das ondas mecânicas, as ondas eletromagnéticas não precisam de um meio para se propagarem (propagam-se no vácuo);
4. Sua velocidade é igual à velocidade da luz, quando se propagam no vácuo;
5. Caso não estejam se propagando no vácuo, sua velocidade é dada conforme a velocidade de uma onda:

$$v = \lambda \cdot f,$$

onde λ é o seu comprimento de onda e f a é sua frequência.

As ondas eletromagnéticas são ondas do tipo transversais, tridimensionais e que se propagam em meios materiais e no vácuo. São representadas de forma ordenada em um conjunto de dados de comprimento de onda e/ou frequência conhecido como Espectro Eletromagnético. Normalmente são representadas em sala de aula, em livros didáticos ou sistemas digitais como na Tabela 1 (Friaça et al., 2000; Zeilik e Gregory, 1998) ou por uma imagem como na Figura 11.

⁶ Crédito da Imagem: https://pt.wikipedia.org/wiki/Experiencia_de_Michelson-Morley.

Tabela 1 – As faixas de ondas eletromagnéticas e a ordem de grandeza de seus respectivos comprimentos de onda e frequências.

| Nome | Tipo | Comprimento de Onda (m) | Frequência (Hz) |
|---------------|----------|-------------------------|-------------------|
| Rádio | Longo | 10^5 | $3 \cdot 10^3$ |
| | | 10^4 | $3 \cdot 10^4$ |
| | | 10^3 | $3 \cdot 10^5$ |
| | Curto | 10^2 | $3 \cdot 10^6$ |
| | | 10^1 | $3 \cdot 10^7$ |
| | FM | 10^0 | $3 \cdot 10^8$ |
| | UHF | 10^{-1} | $3 \cdot 10^9$ |
| Micro-Ondas | Radar | 10^{-2} | $3 \cdot 10^{10}$ |
| Infravermelho | Distante | 10^{-4} | $3 \cdot 10^{12}$ |
| | Próximo | 10^{-5} | |
| Visível | - | 10^{-6} | $3 \cdot 10^{14}$ |
| Ultravioleta | Próximo | 10^{-7} | $3 \cdot 10^{15}$ |
| | Distante | 10^{-8} | |
| Raios X | Moles | 10^{-9} | $3 \cdot 10^{17}$ |
| | | 10^{-10} | |
| | Duros | 10^{-11} | |
| Raios Gama | - | 10^{-12} | $3 \cdot 10^{20}$ |
| | | 10^{-13} | |
| | | 10^{-14} | |
| | | 10^{-15} | |

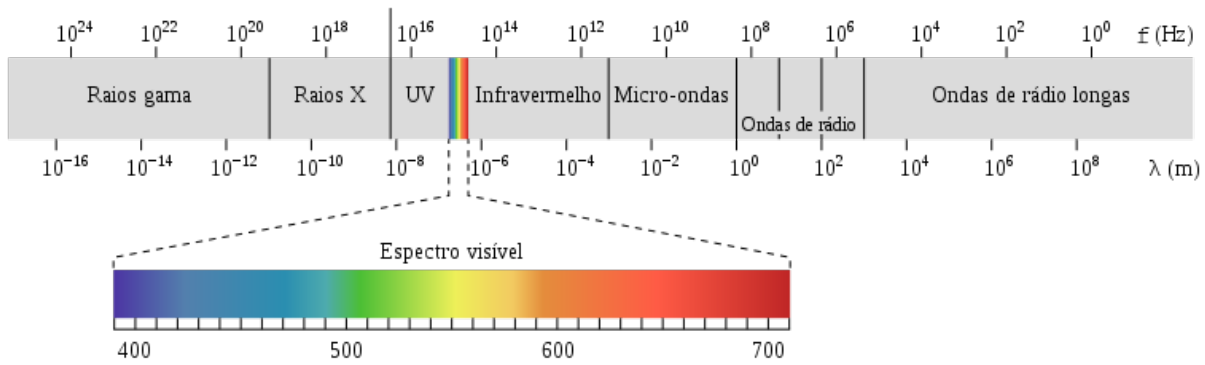


Figura 11 – Representação do Espectro Eletromagnético⁷.

Os limites tanto de frequência quanto de comprimento de onda não são bem definidos, podendo haver sobreposições dentro do espectro, mas as faixas de ondas eletromagnéticas são explicadas a partir do modo no qual são criadas ou utilizadas no cotidiano. Uma parte do espectro eletromagnético que é bem definida, é o intervalo do Visível, que pode ser apresentado conforme a Tabela 2.

Tabela 2 – Intervalos de comprimento de onda em Ângström⁸(Å) e frequência em hertz (Hz) do Espectro Visível.

| Cor | Comprimento de Onda (Å) | Frequência (10^{12} Hz) |
|----------|-------------------------|----------------------------|
| Violeta | 3900 - 4550 | 659 - 769 |
| Azul | 4550 - 4920 | 610 - 659 |
| Verde | 4920 - 5770 | 520 - 610 |
| Amarelo | 5770 - 5970 | 503 - 520 |
| Laranja | 5970 - 6220 | 482 - 503 |
| Vermelho | 6220 - 7800 | 384 - 482 |

Como resumido no artigo de Almeida e Gregorio-Hetem (2021), “toda informação proveniente do Universo é obtida a partir de instrumentos próprios para coletar as diferentes formas de radiação. Esses instrumentos estão associados à análise de determinados comprimentos de onda, nos fornecendo informações específicas das condições físicas dos astros [...]”, um exemplo para essa afirmação está ilustrada na composição de imagens fornecida na Figura 12, que apresenta o Sol em diferentes comprimentos de onda da região do visível e do ultravioleta. A partir dessa figura pode-se perceber que cada comprimento de onda traz diferentes informações sobre as camadas do Sol, podendo ficar evidente nesse

⁷ Crédito da Imagem: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:EM_spectrum_pt_2.svg.

Note que o comprimento de onda no detalhe do espectro visível é dado em nanômetros.

⁸ $1 \text{ \AA} = 1 \cdot 10^{-10} \text{ m}$.

caso a visualização de manchas solares, protuberâncias, *flares* e etc. A composição dessa imagem está disponível também na forma animada para apresentação em sala de aula⁹.

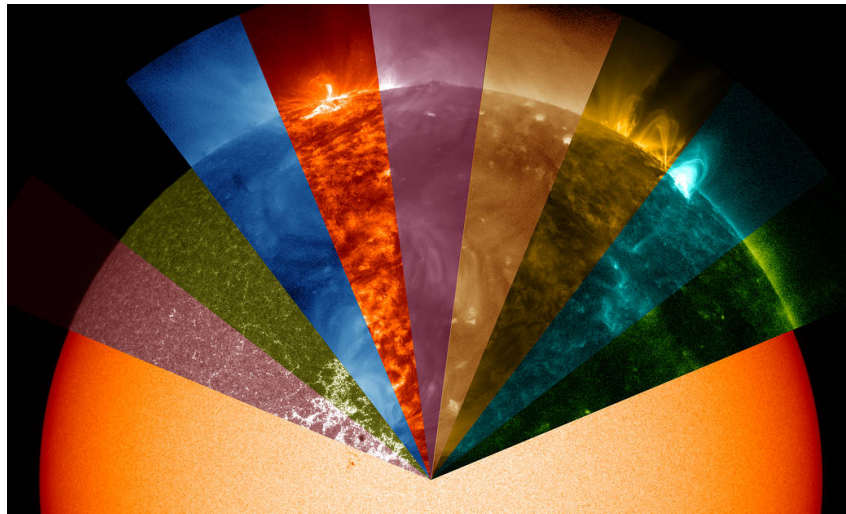


Figura 12 – O Sol: nossa estrela observada em diversos comprimentos de onda. Na parte inferior da figura, encontra-se a imagem do Sol no intervalo do visível e na parte superior, da direita para esquerda comprimentos de onda indo de 94\AA (região verde) até 1700\AA (região rosa) respectivamente. Esses valores correspondem ao intervalo do ultravioleta¹⁰.

4.2 Propriedades da Luz

A luz sendo uma onda, possui as mesmas propriedades ópticas de uma onda qualquer, com a diferença que por ser do tipo eletromagnética, ela não necessita de um meio para se propagar. Para lembrar o que foi aprendido em óptica, apresentam-se abaixo as propriedades da luz com foco nas estrelas.

- **Difração:** os raios de luz de uma estrela, podem também difratar ao entrar em contato com o ar atmosférico, perdendo nitidez e deformando-se (de Almeida, 2014). Esse efeito faz com que sejam mais propícias as observações realizadas com telescópios localizados em regiões de elevadas altitudes e de clima seco, onde as variações na atmosfera são menores;
- **Interferência:** após passar pela difração, a luz pode sofrer o fenômeno de interferência. Neste caso, os comprimentos de onda se sobrepõem criando um padrão de franjas brilhantes (interferência construtiva) ou escuras (interferência destrutiva), quando máximos ou mínimos, respectivamente, são combinados;

⁹ Vídeo para apresentação em sala de aula: <https://www.youtube.com/watch?v=kS57VH3QN1g>.

¹⁰ Crédito da Imagem: NASA Goddard Space Flight Center - <https://www.nasa.gov/content/solar-dynamics-observatory-shows-suns-rainbow-of-wavelengths>.

- Reflexão: as leis da reflexão são válidas também para a luz das estrelas, isso significa que quando a luz é refletida, o raio incidente e o raio refletido coexistem no mesmo plano geométrico em relação a reta perpendicular normal. Além disso, o ângulo incidente deve ser igual ao ângulo refletido conforme apresentado na Figura 13. É utilizando a reflexão a partir de espelhos, que os telescópios atuais coletam os dados das estrelas;

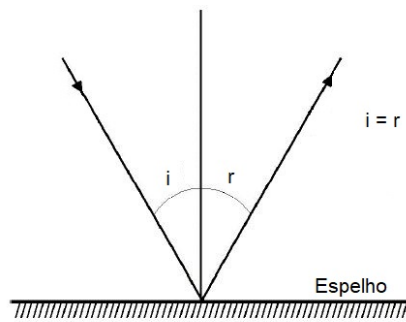


Figura 13 – Reflexão da Luz. Na figura estão representados i como sendo o ângulo de incidência e o r como sendo o ângulo de reflexão.

- Refração: as leis da refração são válidas também para a luz das estrelas, isso significa que os planos de incidência e de refração coexistem, conforme apresentado na Figura 14 e que a Lei de Snell é válida conforme a equação abaixo:

$$n_1 \cdot \text{sen } i = n_2 \cdot \text{sen } r.$$

Nesse caso, um dos exemplos que ocorre com as estrelas é que sua luz é refratada ao entrar em contato com o nosso ar atmosférico, fazendo com que o trajeto dos raios de luz seja cada vez mais desviado conforme o índice de refração da atmosfera vai aumentando (de Almeida, 2014), afetando a qualidade das observações. Esse efeito, conhecido como aberração cromática, é mais pronunciado quando se utilizam telescópios refratores, que utilizam lentes em vez de espelhos;

- Polarização: a luz das estrelas é polarizada em relação ao vetor campo elétrico \vec{E} e o vetor campo magnético \vec{B} , logo ela se direciona em um plano em que há as componentes E_x e E_y do campo elétrico e B_x e B_y do campo magnético como apresentado na Figura 15.

Ao se analisar a interação da luz com a matéria percebeu-se que ela era constituída de partículas, hoje conhecidas como *Fótons*. Os fótons são considerados pequenos “pacotes” que carregam consigo uma certa quantidade de energia, com isso pode-se verificar que a luz possui um comportamento duplo, podendo ser ondulatório ou corpuscular e isso é conhecido e estudado como a Dualidade Onda-Partícula (Friaça et al., 2000).

¹¹ Crédito da Imagem: Bagnato e Pratavieira (2015).

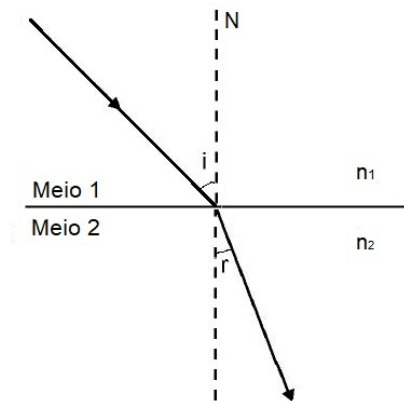


Figura 14 – Refração da Luz. Na figura estão representados i como sendo o ângulo de incidência, r como sendo o ângulo de refração, N a reta normal ao plano, n_1 o índice de refração do Meio 1 e o n_2 o índice de refração do Meio 2.

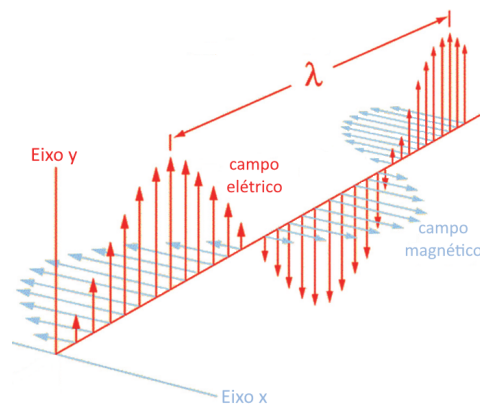


Figura 15 – Representação da Luz polarizada pelos campos elétrico e magnético¹¹.

4.3 Luminosidade e Fluxo Estelar Aparente

Uma estrela para nós como observadores nada mais é do que uma fonte de luz que pode tanto iluminar o nosso planeta Terra, no caso da nossa estrela Sol, como também pode iluminar o céu durante a noite, para o caso de outras estrelas que aparecem na forma de pontos brilhantes.

A luminosidade é uma característica intrínseca de uma estrela, que independe de sua distância, mas depende completamente de seu raio e de sua temperatura, logo quanto maior o raio ou maior a temperatura da estrela, maior será a sua luminosidade (Oliveira Filho e Saraiva, 2004). A luminosidade é calculada a partir da energia total emitida pelos fótons em todas as direções em um dado intervalo de tempo, conforme apresentado a partir da Equação 4.11:

$$L = \frac{\Delta E}{\Delta t}, \quad (4.11)$$

onde a Luminosidade é dada em Watt (W).

O fluxo luminoso aparente de uma estrela, também conhecido como brilho aparente,

está diretamente relacionado com a energia coletada e é ser determinado a partir da Equação 4.12:

$$F = \frac{L}{4 \cdot \pi \cdot d^2}, \quad (4.12)$$

onde d é a distância da estrela e o brilho aparente é dado em unidade de potência por unidade de área (W/m^2).

Em linhas gerais, o brilho aparente proveniente de uma estrela é inversamente proporcional ao quadrado de sua distância:

$$F \propto \frac{1}{d^2}.$$

Uma das formas de medir o brilho aparente de uma estrela é a partir de detectores conhecidos como fotômetros. Esse tipo de equipamento pode ser acoplado a um telescópio, onde receberá o brilho aparente em forma de contagens de fótons (luz) de uma determinada região se transformando em diferença de potencial ou em corrente elétrica e a partir disso, é convertido em uma imagem cuja intensidade é proporcional à contagem de fótons coletados. Outro tipo de dispositivo muito utilizado hoje e que também pode ser acoplado a um telescópio é o CCD¹²:

“Um CCD é um “chip” eletrônico, feito de material semicondutor, como o Silício, e manufaturado para ser sensível ao impacto da luz sobre sua superfície. Este chip é dividido em uma matriz formada por elementos chamados pixel. Quanto maior o tamanho da matriz, maior é a área do céu que pode ser imageada. Quanto menor o tamanho de cada pixel, melhor é a resolução da imagem, isto é, mais detalhes ela exhibe. Tipicamente, um CCD tem uma área de 1,5 cm \times 1,5 cm, e 1000 \times 1000 = 1 milhão de pixels, com pixels de 15 mm de lado tipicamente. Um fóton, ao cair sobre um pixel, libera um elétron do chip, graças ao efeito fotoelétrico. Assim, cada pixel funciona como um balde que armazena água da chuva. Quanto mais gotas/fótons chovem no balde/pixel, mais elétrons ele acumula. Depois de acabada a exposição, basta contar quantos elétrons se acumularam em cada balde que teremos nossa imagem digital. Câmeras CCD são muito comuns hoje em dia. Máquinas fotográficas digitais e câmeras de vídeo usam estes dispositivos. Os CCD's usados em astronomia são muito mais sensíveis, pois têm que captar intensidades muito baixas de luz. Uma vantagem de CCD's é que eles são bastante lineares, isto é, a relação entre fótons coletados pelo número de fótons incidentes é praticamente constante. Isto facilita a conversão de carga coletada em número de fótons, procedimento que é chamado de calibração da imagem. Em filmes ou placas fotográficas, essa conversão é bem mais delicada (Fernandes Junior et al., 2002).”

¹² Sigla proveniente do inglês, *charge-coupled device* que pode ser traduzido por dispositivo de carga acoplada.

Como explicado de forma concisa e didática por Fernandes Junior et al. (2002), os CCD's realizam imageamento em uma determinada região que contém estrelas e estimam o brilho aparente pela mesma técnica de “contagem” de fótons.

4.4 Exercícios - Luminosidade e Fluxo Estelar

1. (UEMG 2010 - Adaptado) TEXTO PARA A PRÓXIMA QUESTÃO

O ano de 2009 foi o Ano Internacional da Astronomia. A 400 anos atrás, Galileu apontou um telescópio para o céu, e mudou a nossa maneira de ver o mundo, de ver o Universo e de vermos a nós mesmos. A questão, a seguir, nos coloca diante de constatações e nos lembra que somos, apenas, uma parte de algo muito maior: o cosmo.

Considere a radiação do Sol que nos atinge, na forma de ondas eletromagnéticas. Sobre essas ondas eletromagnéticas, assinale a alternativa em que se faz uma afirmação INCORRETA:

- Além de estarem na faixa visível, também apresentam radiações que não são visíveis para nós, seres humanos.
 - Quanto maior é a frequência, menor é o seu comprimento de onda.
 - Essas ondas não precisam de um meio material para se propagar.
 - São ondas longitudinais resultantes da variação de campos elétricos e magnéticos.
- Qual é o valor da velocidade de uma onda do tipo Raios-X no vácuo?
 - Calcule a frequência de uma onda eletromagnética que possui comprimento de onda igual a 6 mm e verifique em qual parte do espectro eletromagnético ela se encontra. Considere que essa onda está se propagando no vácuo.

- Calcule a luminosidade de duas estrelas que possuem o mesmo brilho aparente $F = 2 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2$. Sabe-se que a primeira estrela está a uma distância igual a 5 anos-luz da Terra e a segunda estrela está a uma distância igual a 10 anos-luz da Terra. O que se pode dizer em relação aos valores encontrados para as luminosidades dessas estrelas em relação a um observador na Terra?

Justifique sua resposta comparando as duas estrelas com a luminosidade Solar (L_{\odot}).

Dados: $1 \text{ ano} - \text{luz} = 9,5 \cdot 10^{15} \text{ m}$; $\pi \approx 3$; $L_{\odot} \approx 3,8 \cdot 10^{26} \text{ W}$.

- Rigel é a sétima estrela mais brilhante do nosso céu noturno e a mais brilhante da sua constelação (Orion). Sabendo que ela está a uma distância aproximadamente igual a 864 anos-luz da Terra e que possui uma luminosidade igual a $85000 L_{\odot}$, calcule a razão entre os brilhos aparentes de Rigel e do Sol $\left(\frac{F_R}{F_{\odot}}\right)$.

Dados: Luminosidade do Sol = L_{\odot} ; Distância Terra-Sol = $1,6 \cdot 10^{-5}$ ano-luz.

4.5 Gabarito - Luminosidade e Fluxo Estelar

Nota ao(à) professor(a): As questões fornecidas foram extraídas de provas oficiais.

Caso sejam adaptadas, é importante ressaltar que seu conteúdo principal não foi alterado.

1. (UEMG 2010 - Adaptado¹³) Alternativa D.

São ondas transversais resultantes da variação de campos elétricos e magnéticos.

2. É igual a velocidade da luz, sendo $v \approx 3 \cdot 10^5 \text{ km/s}$ ou $v \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$.

3. Tendo como base que a onda se propaga no vácuo ($v = c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$), temos que sua frequência é dada por:

$$c = \lambda \cdot f \rightarrow f = \frac{c}{\lambda}$$

$$f = \frac{3 \cdot 10^8}{6 \cdot 10^{-3}} \rightarrow f = 5 \cdot 10^{10} \text{ Hz}$$

A onda eletromagnética está na região de micro-ondas.

4. Utilizando os dados fornecidos, temos:

$$1 \text{ ano} - \text{luz} = 9,5 \cdot 10^{15} \text{ m}$$

$$d_1 = 5 \text{ anos} - \text{luz} \approx 4,7 \cdot 10^{16} \text{ m}$$

$$d_2 = 10 \text{ anos} - \text{luz} \approx 9,5 \cdot 10^{16} \text{ m}$$

$$F = 2 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2$$

$$F = \frac{L_{\star}}{4 \cdot \pi \cdot d^2} \rightarrow L_{\star} = 4 \cdot \pi \cdot F \cdot d^2$$

$$L_{\star_1} = 4 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 10^{-8} \cdot (4,7 \cdot 10^{16})^2 \rightarrow L_{\star_1} = 5,3 \cdot 10^{26} \text{ W} \approx 1,4 L_{\odot}$$

$$L_{\star_2} = 4 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 10^{-8} \cdot (9,5 \cdot 10^{16})^2 \rightarrow L_{\star_2} = 2,2 \cdot 10^{27} \text{ W} \approx 6 L_{\odot}$$

A partir dos resultados obtidos, pode-se concluir que a luminosidade da primeira estrela é menor em relação a luminosidade da segunda estrela. Isso acontece devido ao fato que a luminosidade é diretamente proporcional ao fluxo e a distância. Considerando que as duas estrelas possuem o mesmo brilho aparente para um observador na Terra, é passível a ideia de que a estrela mais distante possui uma luminosidade maior.

5. A partir dos dados fornecidos, temos que:

$$F = \frac{L_{\star}}{4 \cdot \pi \cdot d^2}$$

$$\frac{F_R}{F_{\odot}} = \frac{85000 L_{\odot}}{4 \cdot \pi \cdot 864^2} \cdot \frac{4 \cdot \pi \cdot (1,6 \cdot 10^{-5})^2}{L_{\odot}}$$

$$\frac{F_R}{F_{\odot}} = \frac{85000}{864^2} \cdot (1,6 \cdot 10^{-5})^2 \rightarrow \frac{F_R}{F_{\odot}} = 3 \cdot 10^{-11}$$

¹³ A questão foi extraída do site da UEMG, disponível em: <http://www.2018.uemg.br/arquivos/2010/PS2010ProvasGeraiis.pdf>.

4.6 Roteiro de Atividade Prática

Estudando a Equação do Brilho Aparente de uma Estrela

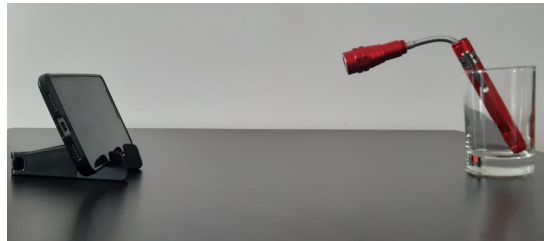
Aprendemos nesse tópico sobre o que são ondas eletromagnéticas, como se propagam e demos enfoque no que conhecemos como luz, sua natureza e suas propriedades. Sabemos que as estrelas iluminam nosso céu e discutimos que a luminosidade é uma característica intrínseca de uma estrela e que não depende de sua distância, mas o fluxo luminoso que recebemos aqui na Terra, ou seja, o brilho aparente, é inversamente proporcional ao quadrado da distância da fonte de luz.

$$F \propto \frac{1}{d^2}$$


Para verificar a dependência do fluxo luminoso em função da distância da estrela (se o fluxo cresce ou decresce conforme alteramos a distância), vamos construir o nosso próprio céu com uma única estrela. Para representar essa estrela, você utilizará uma fonte de luz que iluminará um local pré determinado, para que você possa medir o fluxo de luz dessa fonte.

Procedimento

1. Determine uma posição para sua fonte de luz conforme o exemplo abaixo.



2. Marque as posições do seu celular (Luxímetro¹) em relação à fonte de luz com uma fita crepe ou qualquer outro tipo marcador.
As distâncias devem ser de 20 cm, 40 cm e 80 cm.

3. Abra o *Physics Toolbox Sensor Suite* no celular, clique no botão  e coloque na opção Luxímetro.

4. Escolha a opção “Leitura Digital” .

5. Coloque a tela do celular virada para a fonte de luz na posição de 20 cm.

6. Aguarde até que o Luxímetro consiga determinar o valor do fluxo e anote esse valor na tabela abaixo.

¹ Luxímetro é um aparelho onde seu detector mede a intensidade de luz em uma determinada área.

| Nome | | |
|---------------|-------------------|-------------------|
| Distância (m) | Fluxo de Luz (lx) | Fluxo de Luz (lx) |
| | | |
| | | |
| | | |

7. Faça o mesmo procedimento do item 5, agora com as distâncias de 40 cm e 80 cm e anote na tabela.
8. Após finalizada a sua parte da tabela, seu(sua) colega de dupla deve fazer os mesmos procedimentos indicados nos itens acima.
9. Façam uma análise criteriosa dos seus dados e respondam as perguntas do Questionário de Investigação.

Questionário de Investigação

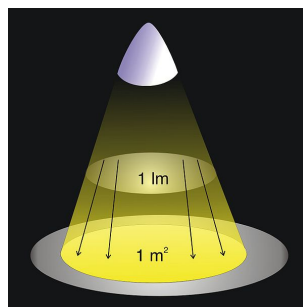
1. O brilho aparente da sua fonte de luz aumenta ou diminui em relação a cada distância?
2. O que se pode inferir baseado nos resultados obtidos pela dupla?
3. Caso os resultados não tenham sido exatamente como o esperado, justifique discutindo quais são os possíveis erros encontrados.

4. Baseado na equação do fluxo de luz apresentada em sala de aula, discuta sobre a proporção entre o fluxo luminoso e a distância.

5. Seria possível realizar o mesmo experimento dentro de uma câmara de vácuo? Justifique utilizando o que se sabe sobre a propagação de ondas.

Observações Importantes

Lux (lx) foi uma unidade de medida observada durante todo o experimento. Essa unidade faz parte do SI (Sistema Internacional de Unidades), que mede o fluxo luminoso (lm) por unidade de área (m^2). Nesse caso específico, como estamos usando uma fonte de luz do tipo comum, nosso fluxo luminoso tem unidade de medida de Lúmen (lm), conforme apresentado na figura abaixo², agora para o caso de estrelas, o fluxo luminoso é dado em medida de potência por área ($Watt/m^2$).



² Crédito da Imagem: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Iluminancia.jpg>.

4.7 Roteiro do Professor(a)

Estudando a Equação do Brilho Aparente de uma Estrela

Objetivo da Atividade: Apresentar os conceitos de Ondas Eletromagnéticas e Luminosidade das Estrelas a partir da detecção do fluxo luminoso de uma determinada fonte de luz, fazendo com que o(a) aluno(a) analise os dados criteriosamente para relacionar luminosidade com distância a partir da equação $F \propto \frac{1}{d^2}$.

Pergunta Norteadora: Como varia o brilho de uma fonte luminosa em função de sua distância em relação a um observador?

Materiais

- 1 Fonte de luz (lanterna do celular, abajur, lanterna comum e etc.);
- 1 Trena ou fita métrica;
- 1 Fita crepe ou qualquer material que possa marcar as distâncias em uma superfície lisa;
- 1 Celular com o aplicativo *Physics Toolbox Sensor Suite*¹⁴ instalado, que será usado com um Luxímetro¹⁵.

Como Fazer

- Separe a turma em duplas;
- Posicione as duplas com uma certa distância entre elas para que não haja muita interferência na detecção da luz pelo Luxímetro;
- Entregue o *Roteiro de Atividade Prática - Estudando a Equação da Luminosidade de uma Estrela* para cada grupo e auxilie na atividade se necessário.

Gabarito da Atividade

Para obtenção de um gabarito do tipo suporte para o(a) professor(a), foram analisados os seguintes resultados encontrados a partir de três montagens diferentes (Experimentos 1, 2 e 3), apresentados nas Tabelas 3 a 5.

✓ Experimento 1

- Fonte de Luz: lanterna do celular da marca *Huawei* - Modelo *Honor 5X*;
- Luxímetro (Detector): Celular da marca *Samsung* - Modelo *Galaxy A30*.

O experimento foi feito primeiramente com o ambiente completamente escuro durante a noite (dados na coluna Aluno(a) 1) e com a luz ambiente acesa (dados obtidos na

¹⁴ Créditos do *Software*: *Vieyra Software*.

¹⁵ Luxímetro é um aparelho onde seu detector mede a intensidade de luz em uma determinada área.

coluna Aluno(a) 2). Pode-se perceber que há uma pequena diferença no fluxo obtido pelos luxímetros, quando se comparam os dois casos e isso mostra a importância de se manter o mesmo local com a mesma luz ambiente para todos os grupos enquanto realizam a atividade.

Tabela 3 – Apresentação dos dados obtidos para uma mesma fonte de luz (*Honor 5X*) e para um mesmo luxímetro (*Galaxy A30*) com a luz ambiente desligada (Aluno(a) 1) e com a luz ambiente ligada (Aluno(a) 2).

| Nome | Aluno(a) 1 | Aluno(a) 2 |
|----------------------|--------------------------|--------------------------|
| Distância (m) | Fluxo de Luz (lx) | Fluxo de Luz (lx) |
| 0,2 | 500 | 504 |
| 0,4 | 128 | 132 |
| 0,8 | 27 | 34 |

✓ Experimento 2

- Fonte de Luz: lanterna tática de potência igual a 128000 W.
- Luxímetro (Detector):
 - Celular da marca *Samsung* - Modelo *Galaxy A30*;
 - Celular da marca *Samsung* - Modelo *Galaxy S21*;
 - Celular da marca *Motorola* - Modelo *G31*;

O segundo experimento foi realizado sem luz ambiente e com uma fonte de luz fixa e igual para todos os detectores. Isso foi feito para que fosse possível analisar como celulares de marcas ou modelos diferentes se comportam frente ao mesmo tipo de dado (luminosidade). A partir dos dados apresentados na Tabela 4, pode-se verificar que as informações de luminosidade obtidas pelos dois celulares da marca *Samsung* são muito próximos, obtendo uma proporção de queda de luminosidade de 30% para o *Galaxy A30* e 27% (de 20 cm para 40 cm) e 28% (de 40 cm para 80 cm) para o *Galaxy S21*. Já para o celular *Motorola G31*, não foram obtidos dados regulares, considerando que o mesmo não conseguia detectar a luminosidade nas distâncias especificadas na atividade. Percebeu-se que o *Motorola G31* só conseguia fazer a detecção da luminosidade proveniente da fonte quando estava muito próximo da lanterna (a uns cinco centímetros da mesma).

Tabela 4 – Apresentação dos dados obtidos para uma mesma fonte de luz (*Lanterna Tática*) e diferentes luxímetros.

| Modelo | Distância (m) | Fluxo de Luz (lx) |
|--------|---------------|-------------------|
| A30 | 0,2 | 33 |
| | 0,4 | 10 |
| | 0,8 | 3 |
| S21 | 0,2 | 26 |
| | 0,4 | 7 |
| | 0,8 | 2 |
| G31 | 0,2 | 4 |
| | 0,4 | 0 |
| | 0,8 | 0 |

✓ Experimento 3

- Fonte de Luz: lanterna do celular da marca *Samsung* - Modelo *Galaxy S21*.
- Luxímetro (Detector):
 - Celular da marca *Samsung* - Modelo *Galaxy A30*;
 - Celular da marca *Motorola* - Modelo *G31*;

Como foi percebido no Experimento 2, o celular da Motorola não tinha obtido nenhum dado que fosse passível de análise. Dessa forma, foram feitos mais dois testes para verificar e assimilar o possível problema para o caso.

No terceiro experimento, foi colocada como fonte fixa e sem luz ambiente a lanterna do celular *Galaxy S21*. A partir dos dados da Tabela 5 é possível verificar que não só o *Galaxy A30* obteve uma maior detecção em comparação com o experimento anterior, aumentando a proporção de queda de luminosidade para 34%, como o *Motorola G31*, diferente do experimento anterior, obteve dados nas três distâncias, obtendo uma proporção de queda de luminosidade de 26% (de 20 *cm* para 40 *cm*) e de 31% (de 40 *cm* para 80 *cm*). Isso mostra que provavelmente o *Motorola G31* tem maior sensibilidade para detectar luminosidade de fontes de luz com aberturas menores, tornando-as menos difusas, conforme apresentado na Figura 16.

Tabela 5 – Apresentação dos dados obtidos para uma mesma fonte de luz (*Galaxy S21*) e diferentes luxímetros.

| Modelo | Distância (m) | Fluxo de Luz (lx) |
|--------|---------------|-------------------|
| A30 | 0,2 | 280 |
| | 0,4 | 94 |
| | 0,8 | 31 |
| G31 | 0,2 | 110 |
| | 0,4 | 29 |
| | 0,8 | 9 |



Figura 16 – Medidas de abertura das duas fontes de luz utilizadas nos Experimentos 2 e 3. Do lado direito da imagem, apresenta-se a medida de abertura da saída de luz da Lanterna Tática (2,7 cm), já do lado esquerdo apresenta-se a medida de abertura da saída de luz da Lanterna do *Galaxy S21* (4 mm).

Gabarito - Questionário de Investigação

1. O brilho aparente da sua fonte de luz aumenta ou diminui em relação ao aumento da distância?

Com o aumento da distância o brilho aparente diminui.

2. O que se pode inferir baseado nos resultados obtidos pela dupla?

O(A) professor(a) deve analisar caso a caso em uma discussão aberta com a turma (debate).

3. Caso os resultados não tenham sido exatamente como o esperado, justifique discutindo quais são os possíveis erros encontrados.

Há várias possibilidades da dupla não conseguir encontrar os valores esperados conforme o roteiro e o(a) professor(a) deverá analisar cada caso.

Abaixo apresentam-se algumas indicações dos possíveis erros:

- Aparato experimental configurado de forma errônea;
 - O Luxímetro não estava voltado diretamente para a fonte de luz (posição ou angulação do celular (detector) em relação à fonte de luz);
 - A fonte de luz utilizada possui potência baixa;
 - A fonte de luz utilizada é difusa;
 - A dupla utilizou valores diferentes para as distâncias.
4. Baseado na equação do fluxo de luz apresentada em sala de aula, discuta sobre a proporção entre o fluxo luminoso e a distância.

A dupla deverá concluir que segundo a equação $F \propto \frac{1}{d^2}$, quanto maior é a distância menor é o fluxo de luz. Isso pode ser verificado através dos experimentos realizados e apresentados nesse gabarito. Professor(a), nesse caso, cada dupla poderá apresentar dados/porcentagens diferentes do que apresentado nesse gabarito, é importante verificar que realmente houve uma diminuição do fluxo de luz ao aumentar a distância.

Caso alguma dupla tenha encontrado problemas que diferem do que foram apresentados aqui, possivelmente a resposta dessa pergunta será negativa, logo o(a) professor(a) deverá fazer uma discussão com a sala ou com a própria dupla para analisar os resultados.

Conclusão da Atividade

O(a) aluno(a) deverá ser capaz de relacionar os dados obtidos com a equação do fluxo luminoso, verificando então que com o aumento da distância o fluxo diminui, percebendo então a importância da equação fornecida neste roteiro.

Observações Importantes

- O uso desse aplicativo não é possível em celulares com iOS (*iPhones*), nesse caso indique a montagem das duplas baseadas sempre em pelo menos um(a) dos(as) aluno(a) com celulares que possuem *Android* como sistema operacional.
- Peça para que os(as) alunos(as) instalem o aplicativo na semana anterior ao momento em que o roteiro será aplicado, assim terá tempo suficiente para resolver qualquer problema que aparecer em relação à instalação do mesmo.

- Professor(a), se atente à configuração do aparato experimental e corrija se necessário.
- Esta atividade também pode ser feita de forma individual.
- Professor(a), é importante que essa atividade seja feita apenas no ensino presencial, para que todos os resultados tenham as mesmas condições de luminosidade ambiente.
- Assim como apresentado nas Tabelas 3, 4 e 5, os dados entre as duplas podem sofrer alterações além do que apresentado aqui nesse Gabarito. É importante que o(a) professor(a) veja possíveis efeitos nos resultados baseados não somente na atividade em si, mas em relação a marcas e modelos dos equipamentos utilizados.
- Professor(a) caso queira que os(as) alunos(as) apresentem os resultados em porcentagem, forneça o seguinte exemplo, conforme os dados apresentados na Tabela 3: Caso no aumento de 20 cm para 40 cm a dupla tenha obtido uma queda de 500 lx para 128 lx, a porcentagem é dada por $\frac{128}{500} \cdot 100\%$.

5 CLASSIFICAÇÃO ESTELAR

Neste capítulo são apresentados os principais acontecimentos na era da Física Moderna e como tais revoluções na Física ajudaram a entender melhor como as estrelas podem ser classificadas de acordo com suas condições físicas e suas características observáveis.

Os tópicos de Física Moderna aqui apresentados serão: Radiação de Corpo Negro, A Função de Planck, O Efeito Fotoelétrico e as Linhas Espectrais para então podermos entender melhor como podemos identificar os diferentes comprimentos de onda emitidos pelas estrelas assim como classificá-las por meio de sua luminosidade, cor, tamanho e temperatura efetiva.

5.1 A Função de Planck e o Efeito Fotoelétrico

A Radiação de Corpo Negro

Ao aquecer um objeto, independente de sua massa, percebe-se que ao chegar em uma determinada temperatura esse objeto emite luz. Esse processo foi verificado pela primeira vez em 1792 por um inglês produtor de porcelana fina chamado Thomas Wedgwood, que observou, ao colocar suas peças de porcelana no forno, que elas emitiam em uma cor avermelhada independente de sua forma ou de seu tamanho (Carroll e Ostlie, 2007).

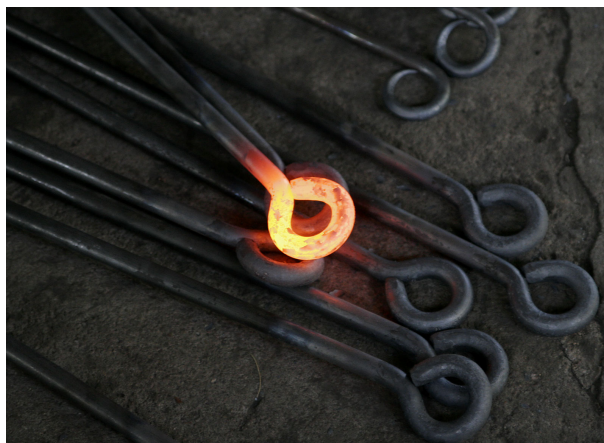


Figura 17 – Imagem de uma barra de metal emitindo no visível após ser aquecida¹.

Posteriormente, por volta de 1800, Sir William Herschel (1738 – 1822), ao observar a decomposição da luz branca por um prisma (experimento já apresentado por Newton), percebeu que ao passar um termômetro nas diferentes regiões do espectro visível (cores),

¹ Crédito da Imagem: <https://en.wikipedia.org/wiki/Incandescence>.

que a temperatura aumentava conforme ia mudando e se aproximando do vermelho. Ele observou inclusive que o efeito térmico permanecia mesmo quando ultrapassava a região do vermelho, que para ele parecia uma região escura (ou sem cor aparente). Hoje sabemos que essa região é chamada de infravermelho e que todos os corpos emitem esse tipo de radiação (UFRGS, 2019).

Pesquisas continuaram sendo realizadas na área para tentar entender qual era a ligação entre a temperatura e o que era emitido. Tais pesquisas revelaram que quando um objeto está a uma temperatura maior do que o zero absoluto ele emitirá radiações eletromagnéticas em diferentes comprimentos de onda. Essa radiação foi denominada na metade do século XIX como Radiação de Corpo Negro.

Um corpo negro denominado ideal é aquele que absorve toda radiação que é incidida nele como representado na Figura 18-A ou reflete toda radiação que está contida em seu interior como apresentado na Figura 18-B, para o segundo caso, o corpo negro ideal, poderá emitir em um comprimento de onda específico na região do visível (Carroll e Ostlie, 2007).

O primeiro modelo teórico foi criado por Gustav Kirchhoff (1824 – 1887) em 1859. Tal modelo mantém a ideia de um corpo sólido com um pequeno orifício (cavidade), mantido com temperatura constante em todas as suas paredes. Para Kirchhoff a radiação emitida ou absorvida por essa cavidade não dependeria de seu formato ou tamanho e sim da temperatura do corpo (Halliday et al., 2004).

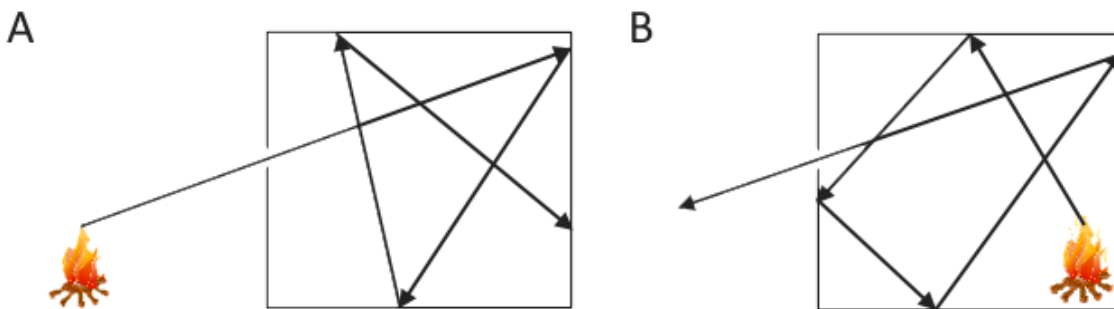


Figura 18 – Representação esquemática do modelo teórico para um corpo negro criado por Kirchhoff em 1859. A imagem A apresenta o corpo negro absorvendo toda a radiação que nele incide e na imagem B apresenta a emissão de radiação em seu interior.

Por volta de 1879, a partir de dados experimentais em relação a observações do fenômeno, Josef Stefan (1835 – 1893) apresentou que a intensidade de radiação proveniente de um corpo negro era diretamente proporcional à sua temperatura em kelvin, seguida por uma constante sigma e essa relação foi dada a partir da seguinte equação:

$$I = \sigma \cdot T^4, \quad (5.1)$$

com σ igual a $5,6704 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$.

Posteriormente, em 1884 Ludwig Boltzmann (1844 – 1906), demonstrou teoricamente a mesma equação utilizando as leis da termodinâmica e do eletromagnetismo. Assim, a constante σ ficou reconhecida como então a constante de Stefan-Boltzmann.

A Função de Planck

Tendo como base a equação que Stefan e Boltzmann apresentaram sobre a intensidade de radiação (ou emissão de energia), demonstrando que ela cresce proporcionalmente com a temperatura do corpo ($I \propto T^4$), percebeu-se também que quando a temperatura crescia, conforme apresentado na Figura 19, o máximo de emissão tendia para comprimentos de onda menores, logo, era necessário uma equação que relacionasse a intensidade de radiação com o comprimento de onda.

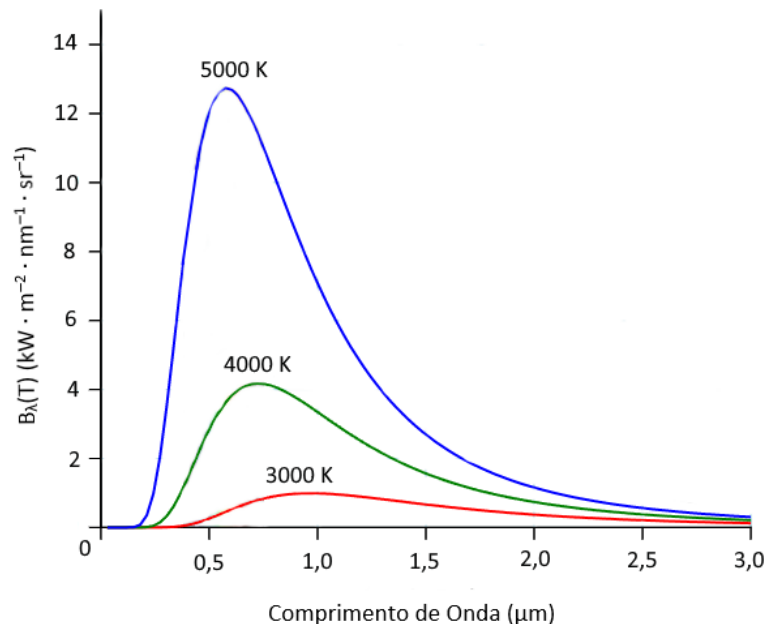


Figura 19 – Representação das curvas de corpo negro para diferentes temperaturas ².

Sabia-se na época que essa relação vinha do fato que a intensidade de radiação decrescia a potência total irradiada em todos os comprimentos de onda relacionados à curva obtida experimentalmente, isso significa que a intensidade de radiação era a somatória ou a integral em todos os pontos da curva (Halliday et al., 2004), expressa por:

$$I(T) = \int_0^{\infty} B_{\lambda}(T) d\lambda. \quad (5.2)$$

Com isso John William Strutt (1842 – 1919) também conhecido como Lord Rayleigh e James Hopwood Jeans (1877 – 1946), utilizaram essa informação para determinar que a energia irradiada pelo corpo negro vem da oscilação do campo eletromagnético chegando

² Crédito da Imagem (Adaptada): https://en.wikipedia.org/wiki/Black-body_radiation.

então na seguinte proporção:

$$B_{\lambda}(T) \approx \frac{2 \cdot c \cdot k \cdot T}{\lambda^4}, \quad (5.3)$$

onde $c = 2,9979 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ é a velocidade da luz, $k = 1,38062 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ a constante de Boltzmann³, T a temperatura e λ o comprimento de onda.

A relação apresentada na Equação 5.3, hoje conhecida como lei de Rayleigh-Jeans, era adequada para ajustar a curva de corpo negro observada na faixa de altos comprimentos de onda, porém para comprimentos de onda menores (no sentido do ultravioleta) as curvas divergiam conforme apresentado no modelo da Figura 20, essa divergência ficou conhecida posteriormente como a Catástrofe do Ultravioleta ou também Catástrofe de Rayleigh-Jeans.

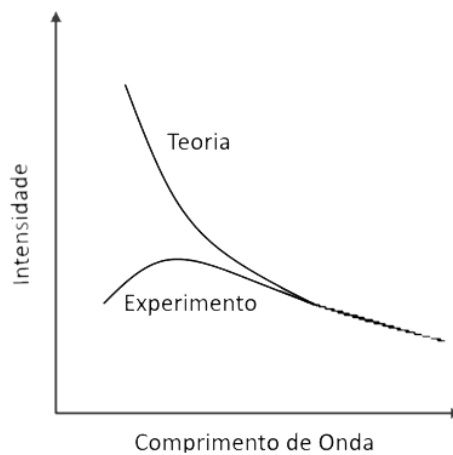


Figura 20 – Representação da curva experimental de corpo negro para diferentes temperaturas em relação à curva teórica correspondente à lei de Rayleigh-Jeans⁴.

Wilhelm Wien (1864 – 1928) em 1896 tentando encontrar uma equação que ajustasse a curva de corpo negro, publicou que a relação entre o comprimento de onda ($\lambda_{máx.}$) onde ocorre o máximo de emissão de um corpo negro e a sua temperatura é dada por uma constante conforme apresentado na Equação 5.4:

$$\lambda_{máx.} \cdot T \approx 2898 \mu\text{m} \cdot K. \quad (5.4)$$

Tal contribuição, denominada Lei do Deslocamento de Wien foi um dos motivos pelo qual lhe rendeu um prêmio Nobel em 1911⁵.

Apesar das tentativas de Wien em encontrar uma expressão correta que ajustasse a curva de radiação de corpo negro, a física do final do século XIX e início do século XX

³ A constante de Boltzmann relaciona a energia das moléculas de um átomo com sua temperatura e pode ser obtida aproximadamente pela razão entre a constante universal dos gases perfeitos ($R = 8,31 \text{ J/mol} \cdot K$) e a constante de Avogadro ($6,02214076 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$)

⁴ Crédito da Imagem (Adaptada):

https://www.if.ufrgs.br/tex/fis142/fismod/mod03/m_s02.html.

⁵ <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1911/summary/>.

não era suficiente para resolver esse problema. Enquanto Rayleigh e Jeans conseguiam demonstrar uma equação apenas para a faixa de altos comprimentos de onda, Wien demonstrou empiricamente uma equação para a faixa de baixos comprimentos de onda, conforme apresentado na Equação 5.5:

$$B_{\lambda}(T) \approx a \cdot \lambda^{-5} \cdot e^{\frac{-b}{\lambda \cdot T}}, \quad (5.5)$$

onde a e b , são constantes inseridas para a obtenção de um melhor ajuste nos dados experimentais (Carroll e Ostlie, 2007).

Experimentos realizados apresentavam resultados que mostravam que a radiação eletromagnética ao interagir com a matéria não estava de acordo com a teoria apresentada por Maxwell. Os físicos da época não acreditavam que seria possível encontrar novos modelos, porém Max Karl Ludwig Planck (1858 – 1947), em 1900, não desistiu de tentar resolver o problema da radiação de corpo negro e acabou revelando ao mundo um novo modelo teórico que explicava as observações da radiação de corpo negro em todos os comprimentos de onda.

Conhecido hoje como pai da Física Quântica, Planck acreditava que poderia ter uma falha no modelo de Rayleigh-Jeans, pois eles admitiam que os osciladores irradiavam em qualquer quantidade de energia. Com isso, Planck decidiu colocar restrições ao modelo já iniciado, definindo então que esses osciladores deveriam emitir em determinadas quantidades de energia, necessariamente dependendo da frequência da radiação emitida e de uma constante.

Ele considerou que os átomos que emitiam a radiação eletromagnética eram osciladores harmônicos do tipo massa-mola que possuíam uma quantidade de energia mínima ou *quantum*⁶ de energia, que equivale à energia de um fóton, dada segundo a equação:

$$E = h \cdot f, \quad (5.6)$$

sendo h uma constante universal conhecida hoje como constante de Planck⁷ que possui valor igual a $6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ou $4,14 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$. A igualdade apresentada na Equação 5.6 é conhecida hoje como Equação da Quantização da Energia, trazendo um novo significado para a física e apresentando que a luz é quantizada.

Além disso, segundo a sua hipótese, a energia deveria ser múltipla de números inteiros, conforme é apresentado na Equação 5.7 e que só deveria ocorrer emissão ou absorção de radiação pelo oscilador quando o mesmo “salta” de um nível de energia para um outro próximo.

$$E = n \cdot h \cdot f. \quad (5.7)$$

Caso o átomo permaneça no mesmo nível de energia, nenhuma radiação é emitida ou absorvida e esses níveis são denominados como estados quânticos estacionários.

⁶ A palavra *quanta* (plural de *quantum*) vem do latim e significa pacotes.

⁷ Planck denominou tal constante, inicialmente como quantum de ação como apresentado em sua Autobiografia (Benjamin, 2012)

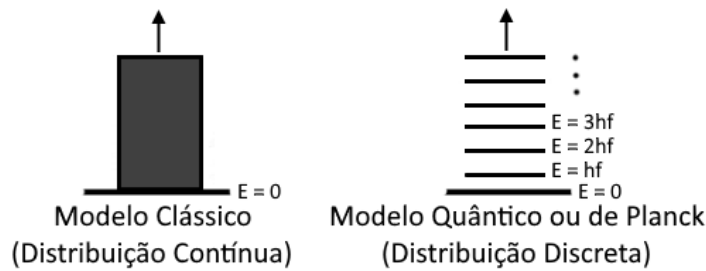


Figura 21 – Representação de como a energia é distribuída em níveis atômicos nos modelos clássico e quântico⁸.

Com isso, Planck demonstrou a partir das Equações 5.3 e 5.5 que a radiância de um corpo negro, partindo da função $B_\lambda(T)$ era dada por:

$$B_\lambda(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}, \quad (5.8)$$

onde e é o número de Euler⁹.

Planck apresentou seus resultados em uma reunião na Sociedade Alemã de Física em 14 de Dezembro de 1900, mas até aquele momento ele acreditava que tinha encontrado apenas um artifício matemático para solucionar o problema da Catástrofe do Ultravioleta (Benjamin, 2012), no entanto, ele tinha dado início à Física Quântica e por tal contribuição recebeu o Nobel em 1918 pela descoberta dos quanta de energia¹⁰.

O Efeito Fotoelétrico

Outra situação que Planck não sabia, é que sua constante h , seria a solução para um outro problema, até ali não solucionado. Em 1887 Heinrich Hertz (1857 – 1894) ao realizar um experimento utilizando um oscilador para comprovar a teoria eletromagnética proposta por Maxwell, acidentalmente observou o efeito fotoelétrico. Conforme apresentado no livro de Tipler e Llewellyn (2014), sobre a relação de Hertz com a descoberta expõem um cientista curioso, porém preocupado:

“A descoberta inesperada do efeito fotoelétrico incomodou Hertz porque interferia em sua pesquisa principal, mas o cientista reconheceu imediatamente que se tratava de um fenômeno muito importante e interrompeu todos os outros trabalhos durante seis meses para estudá-lo mais de perto. Seus resultados, publicados naquele mesmo ano, foram complementados por outros pesquisadores (Tipler e Llewellyn, 2014).”

Hertz, assim como outros pesquisadores da época, já sabia que as partículas emitidas eram negativas, porém, somente em 1900, Philipp Lenard (1862 – 1947) ao realizar um

⁸ Crédito da Imagem (Adaptada): Eisberg e Resnick (1985).

⁹ Constante matemática base dos logaritmos naturais

¹⁰ <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1918/summary/>.

experimento utilizando essas partículas em um campo magnético, verificou que a relação de carga e massa dessas partículas era da mesma ordem da razão de carga e massa de elétrons, confirmando então que essas partículas eram realmente elétrons (Tipler e Llewellyn, 2014).

Foi em 1905 que Albert Einstein (1879 – 1955) utilizando a ideia da quantização de energia de Planck, levando em conta que tal contribuição era na verdade uma característica universal da luz (Tipler e Llewellyn, 2014), conseguiu explicar o efeito fotoelétrico de uma forma mais geral. Ele considerou que quando um feixe de fótons (luz) incide na superfície de uma placa de metal, elétrons são ejetados dessa superfície, conforme é apresentado na Figura 22. A partir disso, Einstein chegou à conclusão que a energia cinética máxima dos fótons incidentes é dada por:

$$E_{C_{max}} = h \cdot f - \phi, \quad (5.9)$$

sendo a energia cinética máxima dada em eV (elétron-volt¹¹) e ϕ a função trabalho (energia mínima para manter um elétron preso dentro do material) definida dependendo do material.

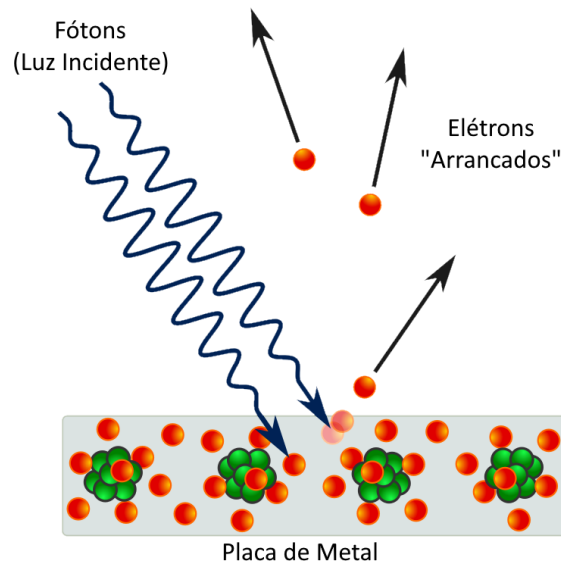


Figura 22 – Representação esquemática do efeito fotoelétrico. Fótons incidentes interagem com a placa de metal e elétrons são “arrancados” da mesma¹².

É interessante perceber que para cada elemento químico presente na placa de metal haverá então uma energia mínima necessária para que ocorra a interação dos fótons com a superfície. Tal informação pode ser verificada a partir da Tabela 5.1, que apresenta a função trabalho de diferentes elementos químicos.

¹¹ $1 eV = 1,60218 \cdot 10^{-19} J$.

¹² Crédito da Imagem (Adaptada): https://en.wikipedia.org/wiki/Photoelectric_effect.

Tabela 6 – Elementos químicos com suas respectivas funções trabalho¹³.

| Elemento | Função Trabalho (eV) |
|----------|----------------------|
| Na | 2,28 |
| Cs | 1,95 |
| Cd | 4,07 |
| Al | 4,08 |
| Ag | 4,73 |
| Pt | 6,35 |
| Mg | 3,68 |
| Ni | 5,01 |
| Se | 5,11 |
| Pb | 4,14 |

A explicação para o efeito fotoelétrico rendeu a Einstein o Prêmio Nobel¹⁴ de 1921 recebido um ano depois em 10 de Novembro de 1922.

5.2 As Cores das Estrelas

Estrelas são objetos astronômicos que emitem em diferentes comprimentos de onda. Além disso, algumas se apresentam visíveis em “cores” diferentes a olho nú. A radiação de corpo negro é uma aproximação muito boa para representar a emissão das estrelas. A cor, que corresponde ao máximo de emissão em função da temperatura, pode ser notada a olho nú em algumas das estrelas. Pode-se usar como exemplo, *Acrux*¹⁵, uma estrela azulada com temperatura superficial igual a 24200 K (Lang, 1980) e *Gacrux*¹⁶, uma estrela avermelhada que possui uma temperatura superficial igual a 3460 K (Carroll e Ostlie, 2007) ambas de uma constelação muito bem conhecida do hemisfério sul, a Cruzeiro do Sul, também chamada *Cru*x (vide Figura 23).

¹³ Tabela retirada do livro de Tipler e Llewellyn (2014).

¹⁴ <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1921/summary/>.

¹⁵ *Acrux* é a estrela principal da constelação Cruzeiro do Sul e é conhecida também por *Alpha Crucis* (α Cru ou α Crucis) ou Estrela de Magalhães (em homenagem ao navegador português Fernão de Magalhães).

¹⁶ *Gacrux* é conhecida também por *Gamma Crucis* (γ Cru ou γ Crucis) ou Rubídea (que significa vermelha).

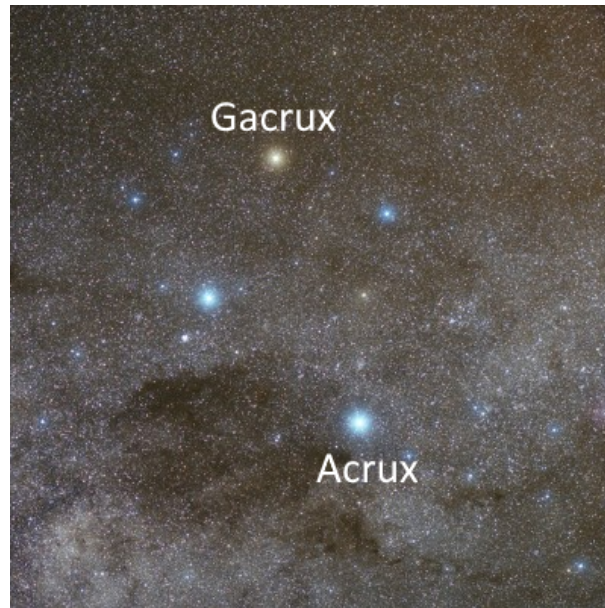


Figura 23 – Imagem da constelação Cruzeiro do Sul¹⁷.

Considerando estrelas como um exemplo aproximadamente ideal de um corpo negro, observa-se que a lei do deslocamento de Wien é válida. Porém, não pode-se esperar que a cor de uma estrela, estimada a partir do comprimento de onda em que ocorre o máximo de emissão será a cor vista por um(a) observador(a) na Terra. Isso ocorre devido ao fato que essa radiação ainda passa pela atmosfera terrestre e chega para nós em uma tonalidade diferente, conforme é apresentado na Tabela 7. Além disso, o aspecto (ou cor aparente) estelar depende das características do olho humano, que podem favorecer a melhor detecção de alguns comprimentos de onda em relação a outros.

Tabela 7 – Relação entre a cor, correspondente ao comprimento de onda ($\lambda_{máx.}$) em que ocorre o pico de emissão (Lei de Wien), a faixa espectral no espectro do visível centrada em $\lambda_{máx.}$, e o aspecto, em termos de cor aparente, para um observador na Terra.

| Cor | Faixa Espectral (nm) | Cor Aparente |
|----------|----------------------|---------------------|
| Violeta | 380 - 450 | Azulada |
| Azul | 450 - 495 | |
| Verde | 495 - 570 | Branco-Amarelada |
| Amarelo | 570 - 590 | |
| Laranja | 590 - 620 | Laranja-Avermelhada |
| Vermelho | 620 - 750 | |

A partir das temperaturas fornecidas para as duas estrelas e utilizando a Equação 5.4, é possível calcular os respectivos comprimentos de onda para o máximo de emissão

¹⁷ Crédito da Imagem (Adaptada): <https://apod.nasa.gov/apod/ap070517.html>.

de radiação, assim como, a partir desses dados, representar as curvas de corpo negro conforme se mostra na Figura 24.

Cálculo para *Acrux* com $T = 24200$ K:

$$\lambda_{m\acute{a}x.} = \frac{2898}{T} \mu m \cdot K \rightarrow \lambda_{m\acute{a}x.} = \frac{2898}{24200} \rightarrow \lambda_{m\acute{a}x.} \approx 1,20 \cdot 10^{-1} \mu m \approx 120 \text{ nm}.$$

Cálculo para *Gacrux* com $T = 3460$ K:

$$\lambda_{m\acute{a}x.} = \frac{2898}{T} \mu m \cdot K \rightarrow \lambda_{m\acute{a}x.} = \frac{2898}{3460} \rightarrow \lambda_{m\acute{a}x.} \approx 8,38 \cdot 10^{-1} \mu m \approx 838 \text{ nm}.$$

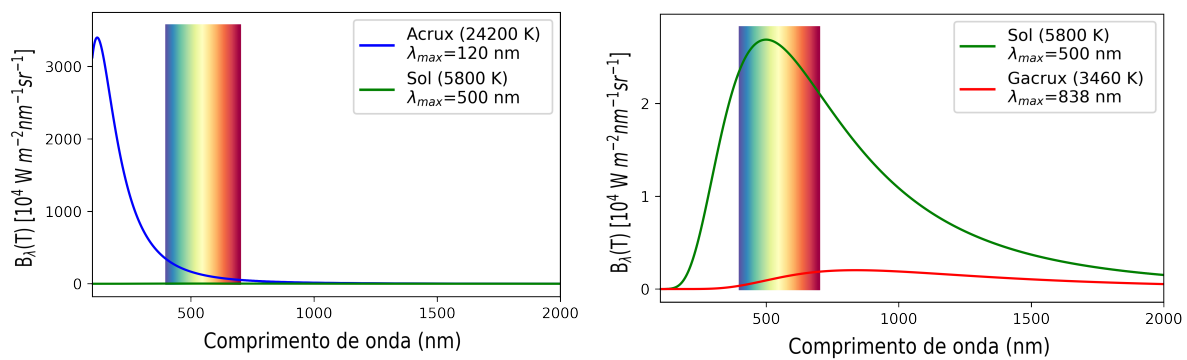


Figura 24 – Representação das curvas de corpo negro para as estrelas *Acrux* e *Gacrux*¹⁸.

Analisando os valores obtidos é possível perceber que para ambas as estrelas os resultados estão fora da faixa de valores de comprimento de onda do visível. Isso vem do fato que foi calculado o comprimento de onda do máximo de emissão, onde para *Acrux* cai no ultravioleta, pois é uma estrela com uma temperatura superficial alta enquanto para *Gacrux* cai no infravermelho, por ser uma estrela de temperatura superficial mais baixa. Porém, ao analisar as curvas da Figura 24 percebe-se que a maior parte da região do visível para a *Acrux* cai no trecho do azul, trazendo então para a estrela uma aspecto azulado conforme apresentado na Tabela 7, já para a *Gacrux* a maior porção da região do visível ainda é próximo do vermelho, trazendo para essa estrela o aspecto laranja-avermelhada.

A cor de uma estrela está relacionada com a temperatura, uma das várias características utilizadas para classificá-la e nos aprofundaremos neste assunto na Seção 5.3, dedicada à Classificação Estelar, que foi definida com base na forma e na intensidade das linhas espectrais.

¹⁸ Imagem obtida a partir do simulador em Python disponível no artigo de Almeida e Gregorio-Hetem (2021).

5.3 Classificação Estelar

Linhas Espectrais

A exemplo do que está ilustrado na Figura 25, linhas espectrais são traçados que identificam os elementos químicos presentes em um determinado material. Tais linhas foram identificadas inicialmente por Joseph Ritter von Fraunhofer (1787 – 1826), fabricante de instrumentos de vidro como lentes, prismas, entre outros além de ser o inventor do espectroscópio. Apesar de não relacionar diretamente aos elementos químicos, Fraunhofer utilizava as linhas obtidas do espectro solar para calibrar seu instrumentos de vidro, como seus prismas, por exemplo. Até meados de 1820, Fraunhofer tinha medido 574 linhas do espectro solar, hoje conhecidas como linhas de Fraunhofer, classificando-as com letras maiúsculas (linhas mais fortes) e minúsculas (linhas mais fracas) (Oliveira Filho e Saraiva, 2004).

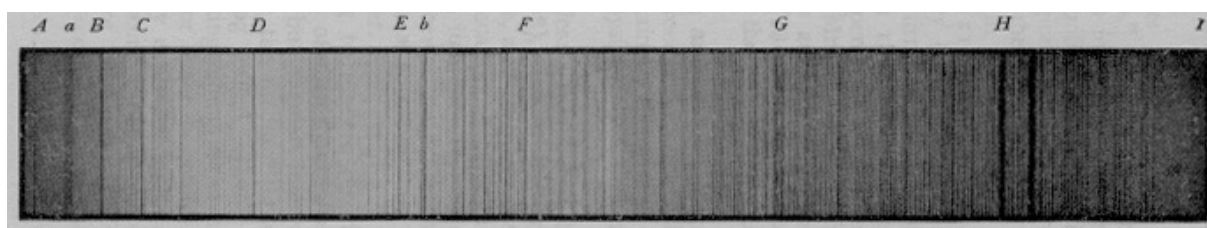


Figura 25 – Representação de um espectro com as linhas de Fraunhofer¹⁹.

Em 1856, Robert Wilhelm Eberhard Bunsen (1811 – 1899) inventou um dispositivo capaz de ter uma chama de gás incolor para realizar procedimentos laboratoriais, porém ele percebeu que ao passar elementos químicos sobre essa chama, eram emitidas cores diferentes. Gustav Robert Kirchhoff (1824 – 1887), na época colaborador de Bunsen, sugeriu que utilizasse primas para distinguir melhor as cores obtidas, ao realizar esse procedimento, ambos perceberam que não era emitido um espectro contínuo de cores, mas que cada elemento produzia linhas diferentes dentro desse espectro.

Tendo como base as linhas do espectro solar identificadas por Fraunhofer, Kirchhoff quis comprovar que as linhas denominadas como linhas D eram a representação do sódio. Tal experiência é bem descrita no livro de Oliveira Filho e Saraiva (2004), conforme apresentado abaixo:

“Para isto ele passou a luz do Sol através de uma chama de sódio, esperando que as linhas do sódio preenchessem as linhas escuras do Sol. Para sua surpresa, as linhas D ficavam mais fortes, mais escuras. Ele então substituiu o Sol por um sólido quente. A luz do sólido que passava pela chama apresentava as mesmas linhas escuras do Sol, na posição das linhas do sódio. Ele então concluiu que o Sol era um gás ou sólido quente, envolto por um gás mais frio.

¹⁹ Crédito da Imagem: <http://astro.if.ufrgs.br/rad/espec/espec.htm>.

Estas camadas mais frias é que produziam as linhas escuras do Sol. Comparando o espectro, ele descobriu linhas de Mg, Ca, Cr, Co, Zi, Ba e Ni no Sol (Oliveira Filho e Saraiva, 2004).”

Dessa forma, Kirchhoff enunciou três leis (Kirchhoff, 1860) que são descritas como as Leis de Kirchhoff (Carroll e Ostlie, 2007; Oliveira Filho e Saraiva, 2004), conforme são apresentadas abaixo.

1. Um gás denso e quente ou um corpo sólido quente produz um espectro contínuo sem nenhuma linha espectral escura.

Exemplos: Filamento de uma lâmpada incandescente.



Figura 26 – Esquema ilustrativo de uma lâmpada gerando um espectro contínuo¹⁹.

2. Um gás quente e pouco denso (transparente) produz linhas espectrais brilhantes (linhas de emissão).

Exemplo: Lâmpada fluorescente.



Figura 27 – Esquema ilustrativo de um gás quente e pouco denso gerando um espectro de emissão¹⁹.

3. Um gás frio na frente de uma fonte que gera um espectro contínuo produzirá linhas espectrais escuras (linhas de absorção).

Exemplo: Sol (fonte de espectro contínuo) e sua fotosfera (gás frio).



Figura 28 – Esquema ilustrativo de um gás frio na frente de uma fonte (lâmpada) gerando um espectro de absorção¹⁹.

A Classificação de Harvard

Harvard College Observatory, instituição fundada em 1839 recebeu em 1847 um telescópio de 15 polegadas que ficou conhecido como “O Grande Refrator” (Figura 29) (Harvard College Observatory, 2019). O uso dos telescópios era (e continua sendo) de extrema importância para observações astronômicas, mas esses registros eram feitos apenas de forma visual, sem a possibilidade de uma documentação abrangente das imagens obtidas.

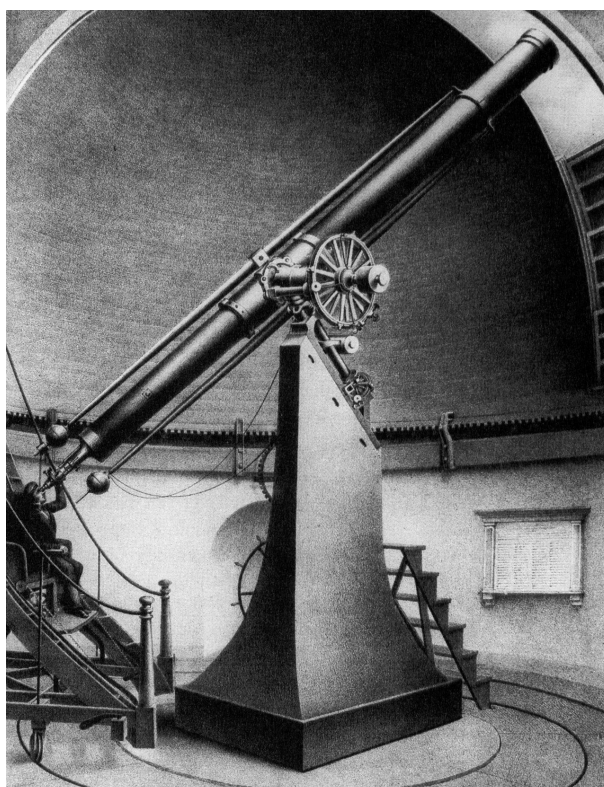


Figura 29 – O telescópio do Observatório de Harvard, também chamado de O Grande Refrator, que foi usado nos primeiros estudos da classificação estelar²⁰.

Edward Charles Pickering (1846 – 1919), nomeado diretor do Observatório de Harvard em 1877, sendo o primeiro diretor do observatório que era formado em física, possuía um grande interesse na área de fotometria. Além das contribuições na área científica, Pickering decidiu fazer a contratação de mulheres, que possuíam formação em astronomia para trabalhar com ele, realizando análises e cálculos astronômicos a partir de placas fotográficas que continham imagens de várias regiões do céu. Essas mulheres ficaram conhecidas na comunidade científica como “Computadores de Harvard” ou “Calculadoras de Harvard” devido ao trabalho que exerciam dentro do observatório (Marchi, 2017).

Em 1890, Pickering e sua assistente Williamina Paton Stevens Fleming (1857 – 1911) desenvolveram em Harvard uma nova taxonomia para os tipos espectrais de estrelas. Eles

²⁰ Crédito da Imagem: https://wblog.wiki/pt/Harvard_College_Observatory.

classificavam as estrelas de acordo com as linhas mais fortes de absorção do hidrogênio associando letras em maiúsculo, começando pela letra A para a linha mais forte até P para a linha mais fraca.

Ao mesmo tempo, Antonia Maury (1866 – 1952), que também era assistente de Pickering e colega de trabalho de Fleming, desenvolvia outro tipo de classificação. Em seu trabalho Maury tentava reordenar as letras da classificação usada por Pickering e Fleming (colocando B antes de A), com base na largura das linhas espectrais do Hidrogênio. Somente mais tarde ficou comprovado que as diferenças nas larguras das linhas estão associadas à gravidade na superfície estelar.

Foi em 1901, que Annie Jump Cannon (1863 – 1941), funcionária do Observatório de Harvard e que trabalhava analisando placas fotográficas com espectros estelares, reordenou a sequência espectral ficando conhecida hoje como Classificação Espectral de Harvard “O B A F G K M”, apresentada de forma resumida na Tabela 8 e na Figura 30 a relação, tipo espectral, cor aparente e temperatura (Marchi, 2017).

Cannon utilizou para essa classificação uma sequência a partir da temperatura das estrelas e não mais pela intensidade das linhas de absorção do hidrogênio. Isso significa que o tipo O representa em sua classificação, uma estrela muito quente (azul) e o tipo M uma estrela mais fria (vermelha). Foi também estabelecido que os primeiros tipos da sequência, mais próximos do tipo O e correspondentes às temperaturas mais elevadas seriam denominados “*early type*”, por outro lado, os últimos tipos (ou tardios), denominados “*late type*” são indicativos das temperaturas menores, ou seja, mais próximos do tipo M. Essa denominação também se aplica às subdivisões decimais ... B8, B9, A0, A1, A2, ... A9, F0... . Neste exemplo, uma estrela “*early A type*” é representada pelos subtipos A0 ou A1 (primeiros subtipos A) e “*late A type*” corresponde a A8 ou A9 (últimos subtipos A) (Marchi, 2017; Carroll e Ostlie, 2007).

Tabela 8 – Lista dos tipos espectrais da Classificação de Harvard e sua relação com as cores das estrelas.

| Tipo Espectral | Cor Aparente | Temperatura (K) |
|-----------------------|---------------------|------------------------|
| O | Azul | >25000 |
| B | Azulada | 25000 - 10000 |
| A | Branca | 10000 - 8000 |
| F | Amarelada | 8000 - 6000 |
| G | Amarela | 6000 - 5000 |
| K | Alaranjada | 5000 - 4000 |
| M | Avermelhada | 4000 - 3000 |

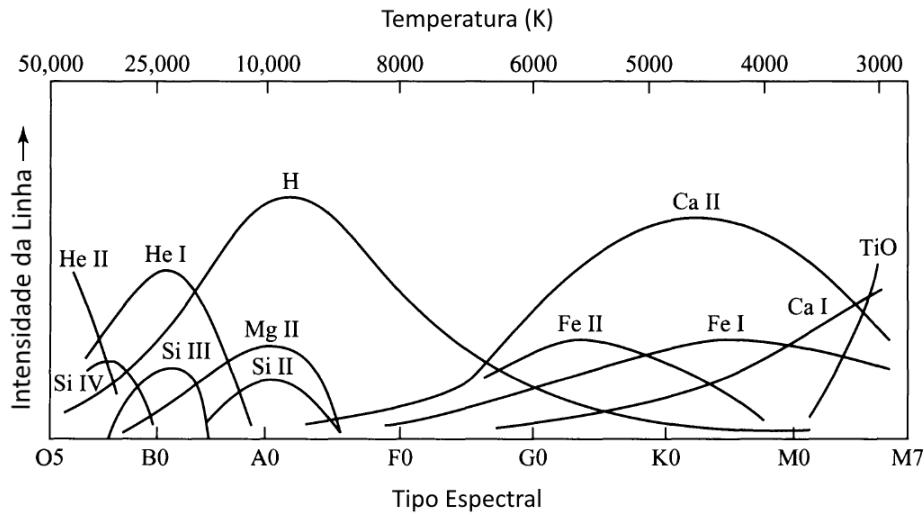


Figura 30 – Representação da dependência das intensidades das linhas espectrais com a temperatura pela Classificação de Harvard²¹.

Cannon classificou por volta de 400000 estrelas utilizando negativos de espectros estelares assim como apresentado na Figura 31, e essas classificações foram publicadas no *Henry Draper Catalogue*, catálogo que possuía dados astrométricos e espectroscópicos de estrelas, publicado pela primeira vez em 1890 (Figura 32).

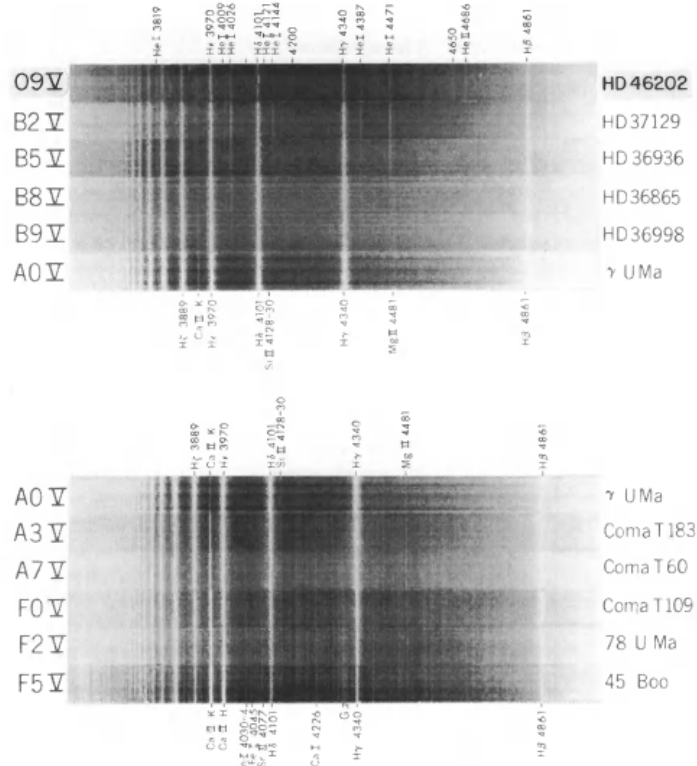


Figura 31 – Negativo de um espectro estelar na sequência principal nas classes O9 até F5²².

²¹ Crédito da Imagem: Carroll e Ostlie (2007).

²² Crédito da Imagem: Abt et al. (1968).

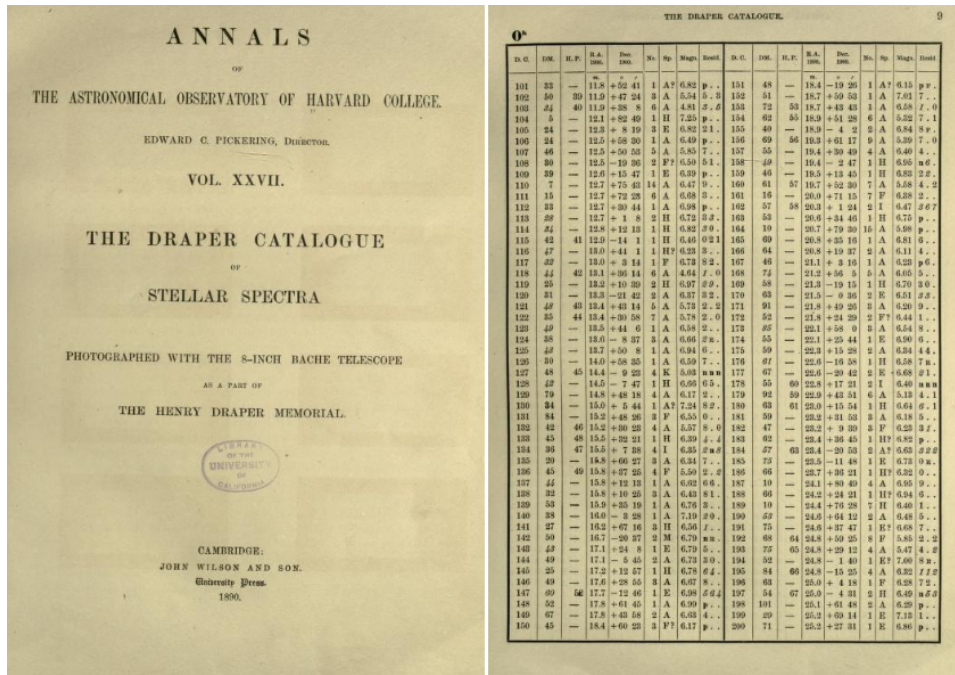


Figura 32 – *The Draper Catalogue*. Imagem da esquerda apresenta a capa do catálogo e na imagem da direita, para ilustrar o tipo de dados publicados, apresenta-se a página 9 do mesmo catálogo²³.

Classe de Luminosidade

Apesar da classificação estelar de Harvard ser um bom método para separar as categorias das estrelas, ela não era completa, pois percebia-se que além da temperatura e da cor, outros parâmetros poderiam ser utilizados para fornecer diferentes tipos de classificações.

Partindo da lei de Stefan-Boltzmann dada pela Equação 5.1 e sendo a área de uma estrela aproximadamente como uma esfera de raio R , temos que a sua luminosidade pode ser dada por:

$$L = 4 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \sigma \cdot T^4. \quad (5.10)$$

Observamos então que a luminosidade de uma estrela não depende apenas de sua temperatura, mas também de seu raio, logo do seu tamanho. Fundamentado então a partir das larguras das linhas espectrais sensíveis à gravidade superficial, em 1943, William Wilson Morgan (1906 – 1994), Philip Childs Keenan (1908 – 2000) e Edith Kellman (1911 – 2007), todos do Observatório Astronômico de Yerkes, inseriram seis classes de luminosidade diferentes. Essa classificação ficou conhecida como Sistema MKK, conforme é apresentado na Tabela 9 (Oliveira Filho e Saraiva, 2004).

²³ Crédito da Imagem: <https://archive.org/stream/drapercatalogueo00harvrich#page/8/mode/2up>.

Tabela 9 – As classes de luminosidade e as fases evolutivas das estrelas pelo sistema MKK²⁴.

| Classe | Fase Evolutiva |
|--------|----------------------------|
| Ia | Supergigantes Brilhantes |
| Ib | Supergigantes |
| II | Gigantes Brilhantes |
| III | Gigantes |
| IV | Subgigantes |
| V | Sequência Principal (Anãs) |
| D | Anãs Brancas |

Lembrando que a gravidade superficial é dada por:

$$P = F_{grav.},$$

$$m \cdot g = \frac{G \cdot M \cdot m}{R^2},$$

$$g = \frac{G \cdot M}{R^2},$$

onde G é a constante gravitacional igual a $6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$, temos que quanto menor o raio da estrela, maior será a gravidade superficial. Pela Equação 5.10, nota-se que a luminosidade é inversamente proporcional à gravidade, conforme está bem descrito por Oliveira Filho e Saraiva (2004):

“Quanto maior a gravidade superficial, maior a pressão e, portanto, maior o número de colisões entre as partículas na atmosfera da estrela. As colisões perturbam os níveis de energia dos átomos, fazendo com que eles fiquem mais próximos ou mais afastados entre si do que o normal. Em consequência, os átomos perturbados podem absorver fótons de energia e comprimento de onda levemente maior ou menor do que os fótons absorvidos nas transições entre níveis não perturbados. O efeito disso é que a linha de absorção fica alargada. Portanto, para uma mesma temperatura, quanto menor a estrela, mais alargada será a linha, e vice-versa (Oliveira Filho e Saraiva, 2004).”

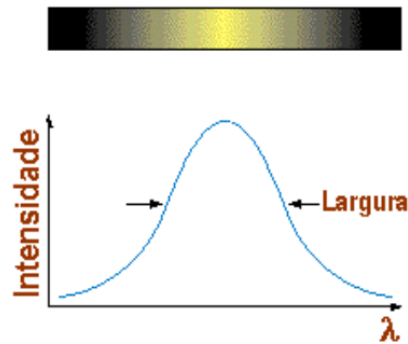


Figura 33 – Representação gráfica da largura de uma linha espectral em emissão²⁵.

Pode-se então resumir que:

- Estrelas grandes têm pressão menor (linhas de absorção estreitas) → Maior luminosidade (Exemplo da estrela B8Ia na Figura 34).
- Estrelas pequenas têm pressão maior (linhas de absorção alargadas) → Menor luminosidade (Exemplo da estrela B8V na Figura 34).

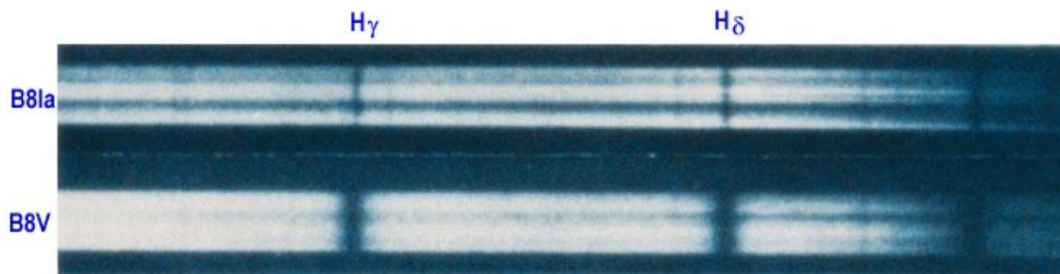


Figura 34 – Espectros de duas estrelas de mesmo tipo espectral e classes de luminosidade diferentes. É possível perceber na imagem que a estrela supergigante, classificada como B8Ia possui as linhas do Hidrogênio mais estreitas, indicando então que é uma estrela mais luminosa que a a estrela da Sequência Principal, classificada como B8V, cujo raio é menor²⁵.

5.4 Diagrama Hertzsprung-Russel

Ejnar Hertzsprung (1873 – 1967) era graduado em engenharia química, formação que atraiu sua atenção na área de química de fotografias. Por esse seu interesse, começou a trabalhar em 1902 em pequenos observatórios dinamarqueses, que por sua vez aplicou a fotografia para a medição da luz das estrelas. Publicou dois artigos (um em 1905 e outro em 1907) onde ele mostrava que havia uma relação entre as cores das estrelas e seu brilho.

²⁵ Crédito da Imagem: http://www.if.ufrgs.br/fis02001/aulas/aula_espec.htm.

Com esse trabalho foi possível verificar um método que correlacionava a cor de uma estrela com seu brilho verdadeiro e assim estimar as distâncias estelares por meio da comparação com o brilho (magnitude) aparente. Esse trabalho foi de tamanha importância que Karl Schwarzschild, que era diretor do observatório de Potsdam, na Alemanha, forneceu uma vaga na equipe do observatório de Göttingen para Hertzsprung trabalhar em 1909 e logo mais tarde ser considerado como astrônomo sênior no mesmo observatório.

Já Henry Norris Russell (1877 – 1957) ingressou como estudante na Universidade de Princeton em 1893, se formando em 1897. Após obter seu doutorado na mesma universidade em 1900, Russell trabalhou por quase dois anos no *Cambridge University Observatory*, com o desenvolvimento de um dos primeiros programas fotográficos para determinar as distâncias das estrelas por meio de paralaxe.

Ao determinar quais estrelas ele usaria para testar qual das teorias de evolução estelar estava correta, ele utilizou suas medidas e determinou o brilho intrínseco dessas estrelas, comparando logo após, com as cores/espectros das mesmas, descobrindo assim, que a maioria das estrelas azuis eram mais brilhantes que as estrelas amarelas e que as estrelas amarelas eram mais brilhantes que estrelas vermelhas e apenas algumas estrelas (as gigantes vermelhas) não seguiam essa correlação, suas cores variavam entre amarelo e vermelho e possuíam praticamente o mesmo brilho (Britannica, b).

Apesar de não terem trabalhado juntos, enquanto Hertzsprung, alguns anos antes, classificou vários tipos de estrelas, notando que para uma mesma temperatura, algumas estrelas apresentavam uma luminosidade maior, indicando que o seu brilho intrínseco também dependia de seu raio, Russell colocou em um gráfico a magnitude absoluta e o tipo espectral de estrelas observadas. O Diagrama de Hertzsprung-Russell ou Diagrama H-R (Figura 35) (Britannica, a,b), é um gráfico que apresenta a relação entre a luminosidade de uma estrela e sua temperatura para diferentes fases evolutivas. Esse diagrama amplamente utilizado nos dias atuais, apresenta as características das estrelas como cor, luminosidade, temperatura e tamanho. Além disso, é possível utilizar o diagrama Hertzsprung-Russell para determinar em que estágio evolutivo uma determinada estrela se encontra.

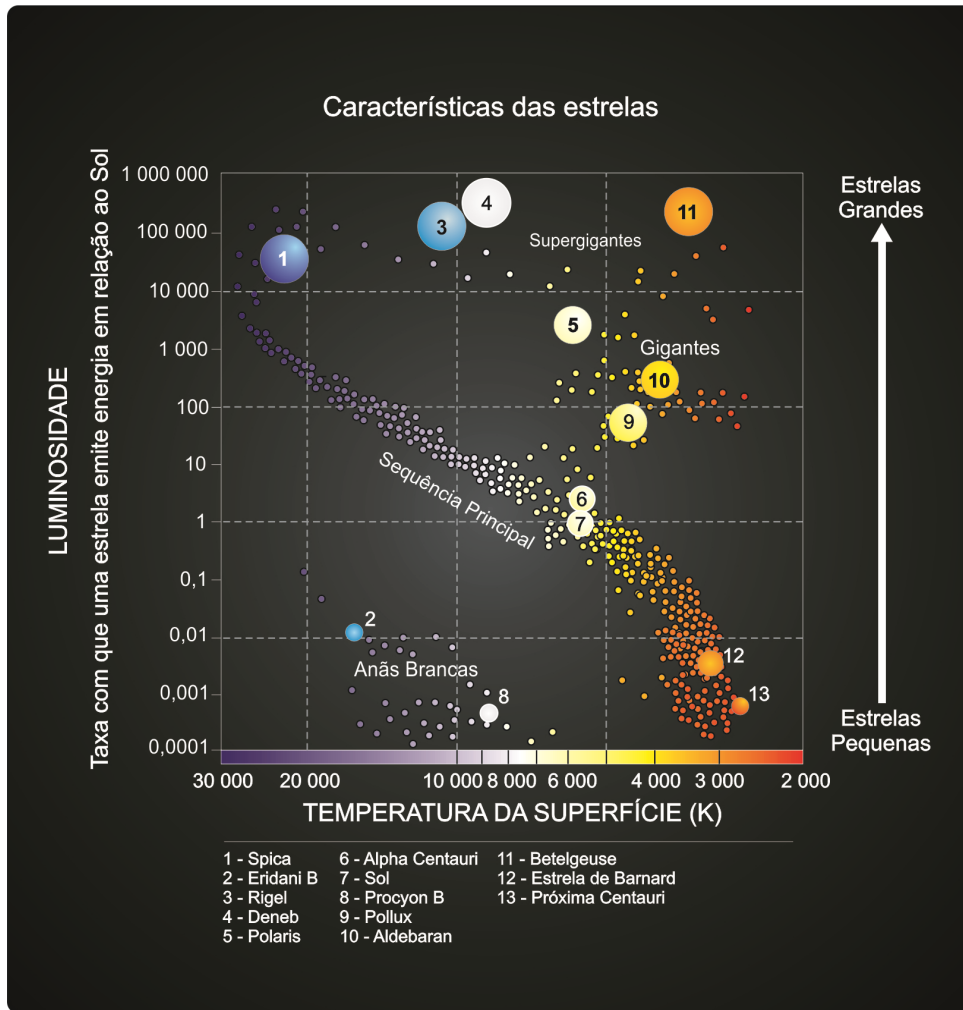


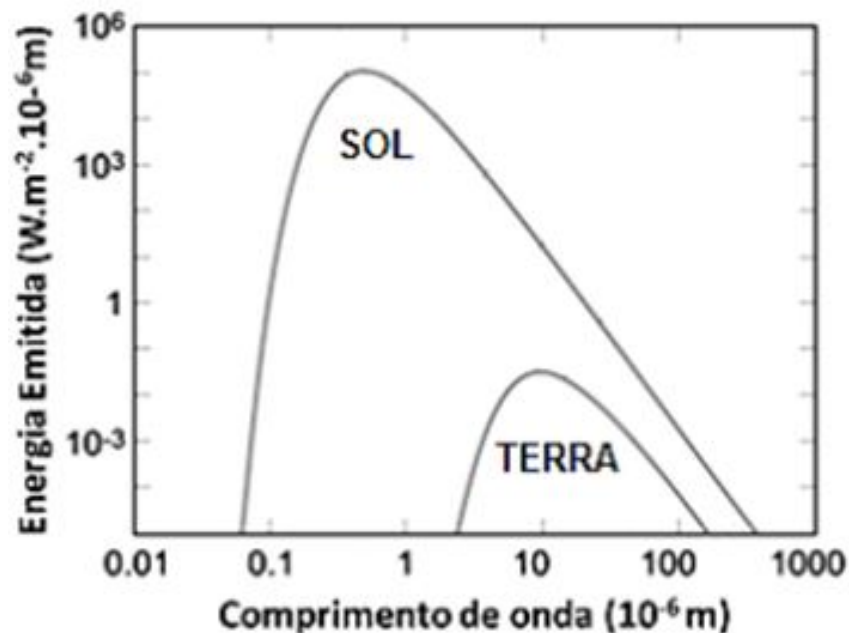
Figura 35 – Diagrama de Hertzsprung-Russell ou Diagrama H-R²⁶.

²⁶ Crédito da Imagem: <http://astro.if.ufrgs.br/estrelas/diagramaHR.jpg>.

5.5 Exercícios - Classificação Estelar

1. (OBA - Nível IV - 2014) As queimadas ocorrem por motivos naturais (através de raios, por exemplo) ou antrópicos (provocadas pelos homens). No entanto, cerca de 90% das queimadas são de origem antrópica. As queimadas contribuem para o acúmulo de dióxido de carbono (CO_2) e outros gases do efeito estufa na atmosfera, afetando, desta forma, não somente a qualidade do ar local e regional, mas também o clima global. Em decorrência do desmatamento da Floresta Amazônica e de práticas agrícolas que utilizam a queimada para limpar a superfície, o Brasil é considerado o país que mais emite gases do efeito estufa.

Sensores instalados em satélites artificiais permitem identificar regiões da superfície terrestre onde ocorrem queimadas. Esses sensores funcionam baseados no princípio da Lei de Planck, que estabelece que a emissão de energia eletromagnética é dependente da temperatura do corpo e do comprimento de onda. Conforme ilustrado na Figura, o Sol, com uma temperatura média superficial próxima aos 5762 K emite a maior intensidade da sua radiação na faixa de comprimento de onda da luz visível ($0,4$ a $0,7 \cdot 10^{-6} m$), enquanto a Terra, com uma temperatura superficial média próxima a 288 K ($\approx 15^\circ C$) emite a maior parte da sua radiação na faixa de comprimento do infravermelho (comprimentos de onda acima de $0,7 \mu m$, onde $1 \mu m = 10^{-6} m$). A Figura também mostra que quanto maior a temperatura, maior é a intensidade máxima de radiação emitida, observando-se, ainda que o ponto de máxima intensidade move-se para a esquerda, na medida em que a temperatura é elevada.



a) A relação entre temperatura (T) e comprimento de onda (λ), no qual se observa o máximo de energia emitida por um corpo, é dada pela Lei do deslocamento de Wien:

$$\lambda \cdot T = 2898 \mu m K.$$

Dessa forma, para a temperatura de 288 K, a intensidade máxima se dá a $10 \mu m$, enquanto a 5672 K, ela ocorre a $0,5 \mu m$, dentro da faixa do visível, conhecida como luz e na qual nossos olhos são mais sensíveis. Considerando que a temperatura média superficial das queimadas é de 1200 K, em qual comprimento de onda o sensor do satélite deve ser calibrado para melhor captar a existência de queimadas?

b) De uma maneira simplificada, a quantidade de energia total (considerando todos os comprimentos de onda) emitida por um objeto é dada pela Lei de Stefan-Boltzmann: $E = \sigma \cdot T^4$, onde $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$ e T é a temperatura superficial do objeto dada na escala Kelvin.

Considerando que a temperatura típica de uma queimada é de 1200 K (quatro vezes a temperatura da superfície terrestre), quantas vezes mais energia emite uma queimada quando comparada à emissão da superfície terrestre?

2. (ITA - 2018) Contando com um prisma e um contador de número de fótons por segundo, deseja-se medir a temperatura de uma estrela com base no seu espectro eletromagnético obtido por meio de um telescópio.

a) Projete esquematicamente esse experimento representando o prisma como um triângulo e o contador de fótons por segundo como um quadrado.

b) Explique os conceitos usados em (a) para obter a temperatura da estrela.

3. Calcule o comprimento de onda e informe em qual região do espectro eletromagnético devemos observar uma estrela que possui temperatura superficial aproximadamente igual a 10500 K?

Dados: Região do Visível - 700 nm (Vermelho) \rightarrow 400 nm (Violeta).

4. (OBA - Nível III - 2000) O Diagrama de Hertzsprung Russell, conhecido como diagrama HR, foi descoberto independentemente pelo dinamarquês Ejnar Hertzsprung (1873-1967), em 1911, e pelo americano Henry Norris Russell (1877-1957), em 1913. Russel representou algumas estrelas estudadas em um diagrama Luminosidade x Temperatura superficial. A partir do estudo desse diagrama, podemos determinar propriedades das estrelas. Uma das aplicações mais importantes do diagrama HR é a determinação de distâncias estelares. O fator que determina onde uma estrela se localiza na sequência principal é a sua massa: estrelas mais massivas são mais quentes e mais luminosas Observação: A luminosidade 1 é a luminosidade do Sol.

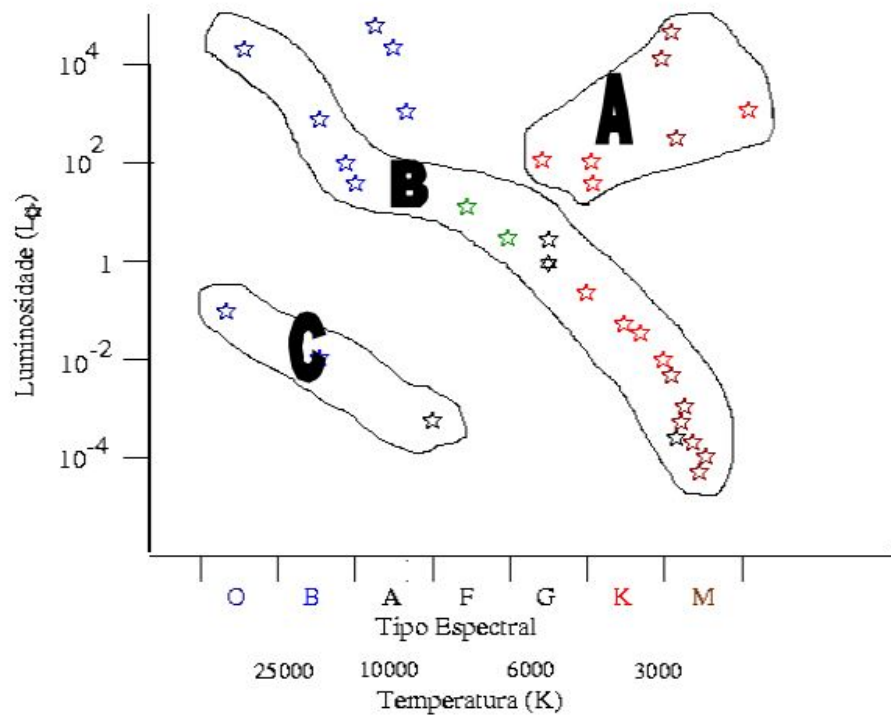


Figura 36 – Representação Esquemática do Diagrama H-R.

- a) De acordo com a figura associe os nomes das áreas assinaladas como A, B e C aos grupos de estrelas conhecidos como gigantes vermelhas, anãs brancas e sequência principal.
 - b) Determine em qual faixa espectral se localiza o Sol e a que região (A, B ou C) ele atualmente pertence, sabendo que sua temperatura superficial é algo em torno de 6000 K.
 - c) Em sua evolução o Sol passará pelos três estágios definidos pelos grupos A, B e C. Determine esta sequência e diga em qual região do gráfico ele permanecerá por menos tempo.
5. Qual é a energia em eV dos fótons emitidos por uma estrela de temperatura igual a 2000 K.
- Dado: $h \cdot c = 1,240 \cdot 10^{-6} \text{ eV} \cdot \text{m}$

5.6 Gabarito - Classificação Estelar

Nota ao(à) professor(a): As questões fornecidas foram extraídas de provas oficiais.

Caso sejam adaptadas, é importante ressaltar que seu conteúdo principal não foi alterado.

1. (OBA - Nível IV - 2014²⁷)

a) Considerando a temperatura de 1200 K, temos que o comprimento de onda que deve ser calibrado no sensor do satélite é dado por:

$$\lambda_{máx.} \cdot T = 2898 \mu m K$$

$$\lambda_{máx.} = \frac{2898}{T} \rightarrow \lambda_{máx.} = \frac{2898}{1200} = 2,4 \mu m$$

b) A partir da mesma temperatura utilizada no item anterior, temos a seguinte relação entre as energias:

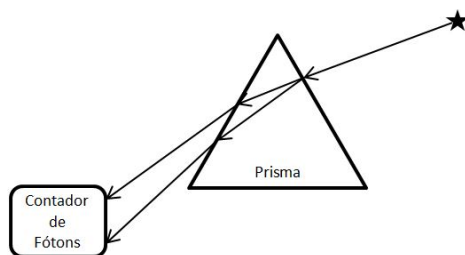
$$\frac{E_{queimada}}{E_{Terra}} = \frac{\sigma T_{queimada}^4}{\sigma T_{Terra}^4}$$

$$\frac{E_{queimada}}{E_{Terra}} = \frac{(4 \cdot T_{Terra})^4}{T_{Terra}^4} = 4^4 = 256$$

Logo, uma queimada emite 256 vezes mais energia quando comparada a emissão da superfície terrestre.

2. (ITA - 2018²⁸)

a) Aparato Experimental:



b) Pelo fenômeno de refração, o prisma faz com que a luz seja decomposta em diferentes comprimentos de onda, cuja incidência sobre o contador de fótons ocorre em diferentes posições. Dependendo da temperatura da estrela, haverá um determinado comprimento de onda para o qual a contagem de fótons será máxima, em comparação com as contagens medidas nos outros comprimentos de onda. Com a informação sobre o comprimento de onda ($\lambda_{máx.}$) que corresponde ao pico máximo

²⁷ A questão foi extraída do site da OBA, disponível em: http://www.oba.org.br/sisglob/sisglob_arquivos/Prova%20nivel%204%20da%20XVII%20BA%20DE%202014%20GABARITO.pdf.

²⁸ A questão foi extraída do site do ITA, disponível em: https://www.vestibular.ita.br/provas/fisica_2018.pdf.

de emissão é possível determinar a temperatura a partir da Lei de Deslocamento de Wien.

$$\lambda_{m\acute{a}x.} \cdot T = 2898 \mu m K \rightarrow T = \frac{2,898 \cdot 10^{-3}}{\lambda_{m\acute{a}x.}} K$$

3. Considerando uma temperatura de 10500 K, temos que o comprimento de onda máximo é dado por:

$$\lambda_{m\acute{a}x.} \cdot T = 2,9 \cdot 10^{-3} mK$$

$$\lambda_{m\acute{a}x.} = \frac{2,9 \cdot 10^{-3}}{T}$$

$$\lambda_{m\acute{a}x.} = \frac{2,9 \cdot 10^{-3}}{10500}$$

$$\lambda_{m\acute{a}x.} = 2,8 \cdot 10^{-7} m$$

Logo, a região do espectro eletromagnético em que essa estrela poderá ser observada é a região de Ultravioleta.

4. (OBA - Nível III - 2000²⁹)

a) A = Gigantes Vermelhas, B = Sequência Principal e C = Anãs Brancas;

b) Tipo espectral G, região B;

c) Sequência principal, gigantes vermelhas e anãs brancas. Gigantes vermelhas.

5. Considerando uma temperatura de 2000 K, temos que:

$$\lambda_{max} \cdot T = 2,9 \cdot 10^{-3} mK$$

$$\lambda_{max} = \frac{2,9 \cdot 10^{-3}}{T}$$

$$\lambda_{max} = \frac{2,9 \cdot 10^{-3}}{2000}$$

$$\lambda_{max} = 1,45 \cdot 10^{-6} m$$

$$E = h \cdot f \rightarrow E = \frac{h \cdot c}{\lambda} = \frac{1,240 \cdot 10^{-6}}{1,45 \cdot 10^{-6}}$$

$$E = 0,86 eV$$

²⁹ A questão e seu gabarito foram extraídos do site da OBA, disponível em: http://www.oba.org.br/sisglob/sisglob_arquivos/provas_gabaritos/2000/2000_provas_09_05_2011/gbniv3_3oba.pdf.

5.7 Roteiro de Atividade Prática

Classificando as Estrelas

O asterismo ou denominação de constelações a partir de objetos ou animais do dia a dia, foi empregada muitos anos antes do nascimento da própria Astronomia. A partir dela povos inteiros identificavam momentos corretos para plantio e colheita ou até mesmo, em modo mais religioso, a possibilidade de um possível evento cataclísmico, ao se depararem por exemplo com um Eclipse Total do Sol.

Os Gregos incorporaram e espalharam a ideia vinda da Mesopotâmia, associando a posição da Terra em relação ao Sol no momento do nascimento de uma criança com a sua personalidade durante a sua vida. Ou seja, a personalidade dependeria da época do ano em que a pessoa nasceu. Além disso, a Astrologia do jeito que conhecemos hoje continua relacionada com a nomenclatura das constelações adotadas originalmente pelos gregos. Apesar da Astronomia (ciência) e da Astrologia (pseudociência) andarem juntas durante um bom tempo, foi com as descobertas de cientistas da renascença, que revolucionaram os conhecimentos da época, que foram evidenciadas as distinções entre os dois temas. Sabemos que por causa do movimento de precessão do nosso planeta Terra a posição que observamos o Sol com relação às constelações muda com o passar do tempo.

Para ilustrar o movimento de precessão, vamos fazer um *tour*, utilizando o *software* Celestia, pelo céu do dia em que cada um(a) de vocês nasceram para verificar que a posição do Sol, conforme observamos ao longo do ano, não coincide mais com as constelações adotadas originalmente para a definição dos signos astrológicos. Além disso, vamos estudar a partir dessas constelações, como classificar as estrelas supondo que elas tenham uma emissão semelhante à de um corpo negro ideal.

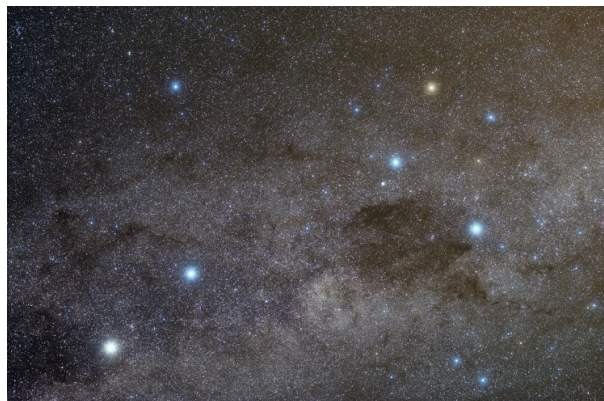


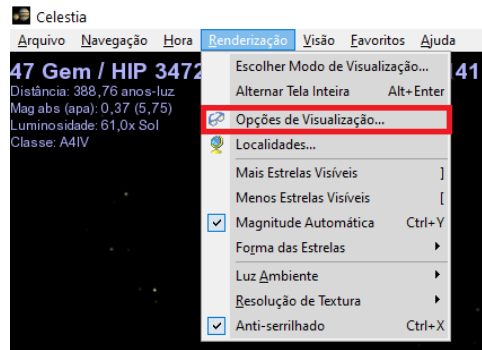
Foto da constelação Cruzeiro do Sul (à direita da imagem) junto com as estrelas Rigil Kentaurus e Hadar (à esquerda da imagem) da constelação de Centauro, também conhecidas como Alpha Centauri e Beta Centauri respectivamente¹.

¹ Crédito da Imagem: NASA/Yuri Beletsky - <https://apod.nasa.gov/apod/ap070517.html>.

Procedimento

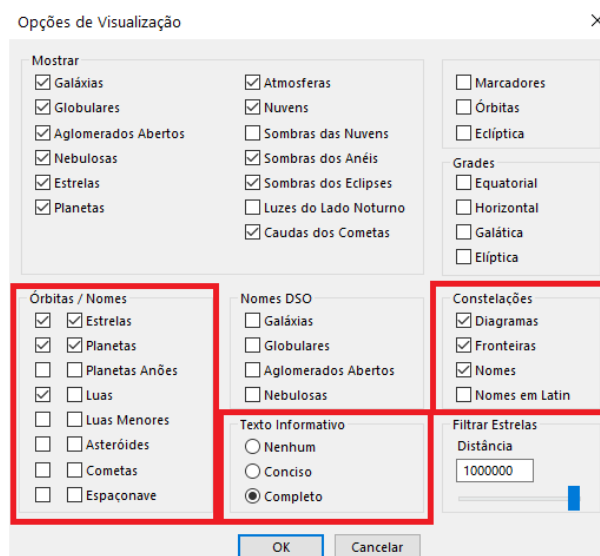
Parte I - Uso do *Software* no *Windows*

1. Abra o *Software* Celestia.
2. Clique em Renderização → Opções de Visualização;

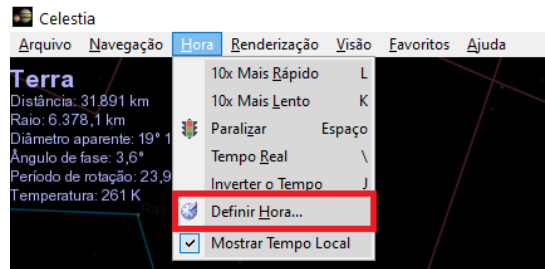


3. Deixe marcadas (✓) as seguintes informações:

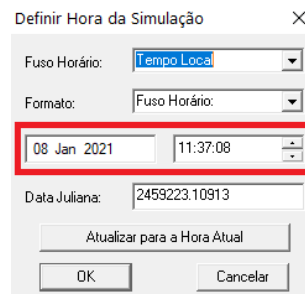
- Estrelas (opcional);
- Planetas;
- Diagrama;
- Fronteiras;
- Nomes;
- Completo.



4. Clique em Hora → Definir Hora;



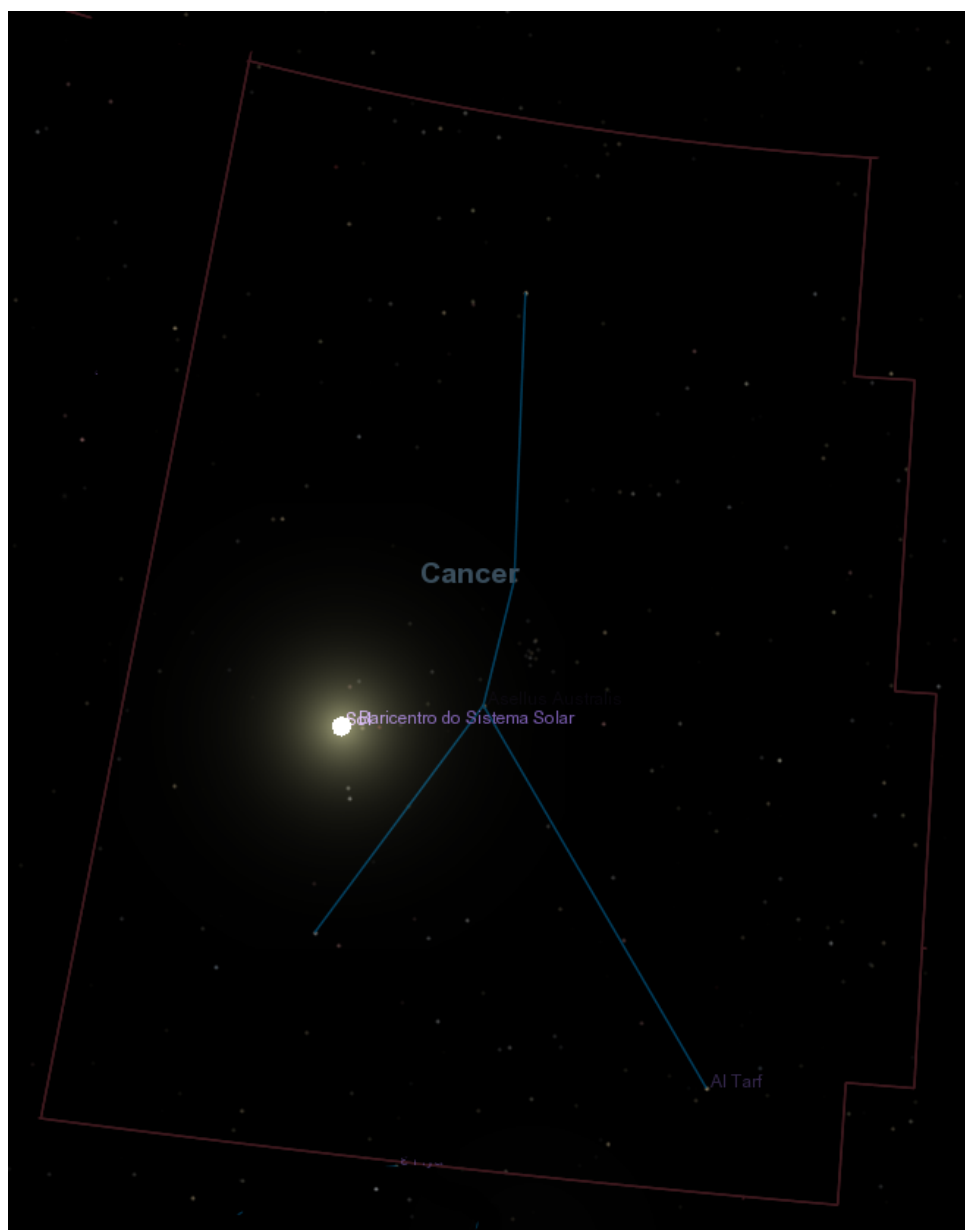
5. Coloque a data e hora do seu nascimento e clique em OK; *Importante: Não utilize o teclado numérico do seu computador.*



6. Localize o Sol utilizando os seguintes botões do *mouse*;
- *Scroll* (roda de rolamento): *Zoom* no objeto selecionado;
 - Botão Esquerdo: Movimento da tela;
 - Botão Direito: Movimento do objeto selecionado.

ATENÇÃO: Não utilize a opção “Ir para” ou “Ir para Objeto”!


7. Nesse momento o Celestia te levará até o baricentro do sistema solar e você poderá ver na direção de qual constelação (região demarcada por uma linha avermelhada) o Sol estava no dia em que você nasceu. Anote o nome dessa constelação.

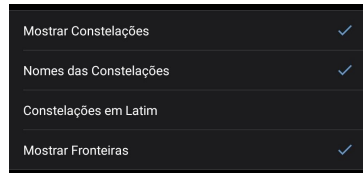


Exemplo da constelação de Cancer no *Software Celestia*.

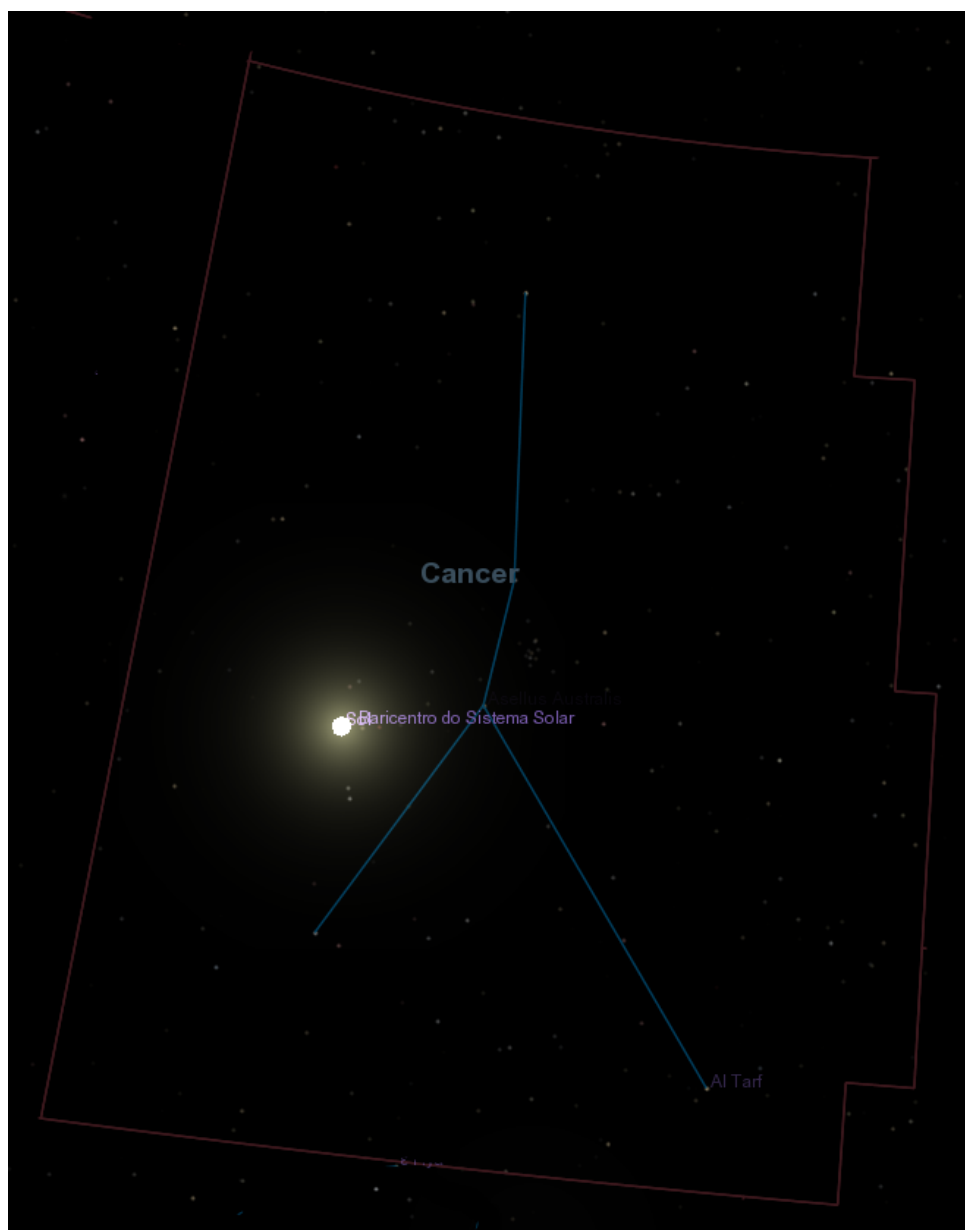
Procedimento Alternativo

Parte I - Uso do aplicativo no *Android* ou iOS

1. Abra o aplicativo Celestia.
2. Clique no botão  e vá em Configurações;
3. Clique em Constelações e deixe ativas apenas as seguintes opções:



4. Volte para as Configurações e clique em Nomes de Objetos, deixe ativa apenas “Estrelas”.
5. Volte novamente para as Configurações e clique em Exibição de Informações, deixe tido apenas a opção “Completa”.
6. Para finalizar, volte para as Configurações e clique em Hora Atual e depois em Selecionar Hora;
7. Coloque a data e hora do seu nascimento no formato dd/MM/yyyy HH:mm:ss e clique em OK;
Exemplo: 01/01/2020 01:02:00, não é necessário colocar os segundos.
8. Localize o Sol mexendo na própria tela do celular.
ATENÇÃO: Não utilize a opção “Ir para” ou “Ir para Objeto”!
9. Nesse momento você poderá ver em qual constelação (região demarcada por uma linha avermelhada) o Sol estava no dia em que você nasceu. Anote o nome dessa constelação.



Exemplo da constelação de Cancer no *Software Celestia*.

Parte II

1. Escolha duas estrelas dentro da área que consta sua constelação e clique em cima delas.

Importante: Essas Estrelas não podem ser repetidas dentro do seu grupo.

2. Utilizando os dados obtidos pelo Celestia e as informações dadas no **Material de Apoio** dessa atividade, complete a **Tabela de Dados do Grupo**, referente às estrelas escolhidas por cada membro do grupo:

3. Marque no **Diagrama H-R** disponibilizado também no **Material de Apoio**, cada uma das estrelas informadas na **Tabela de Dados do Grupo** e responda o Questionário de Investigação.

| Tabela de Dados do Grupo | | | | | |
|------------------------------|--|--|--|--|--|
| Nome Aluno (a) | | | | | |
| Constelação | | | | | |
| Estrela 1 | | | | | |
| Nome da Estrela | | | | | |
| Luminosidade (L_{\odot}) | | | | | |
| Tipo Espectral | | | | | |
| Classe de Luminosidade | | | | | |
| Temperatura Superficial (K) | | | | | |
| Cor da Estrela | | | | | |
| Comprimento de Onda (m) | | | | | |
| Estrela 2 | | | | | |
| Nome da Estrela | | | | | |
| Luminosidade (L_{\odot}) | | | | | |
| Tipo Espectral | | | | | |
| Classe de Luminosidade | | | | | |
| Temperatura Superficial (K) | | | | | |
| Cor da Estrela | | | | | |
| Comprimento de Onda (m) | | | | | |

Material de Apoio

Importante: Encontram-se abaixo, algumas dicas de onde obter cada uma das informações contidas na Tabela de Dados do Grupo, para você não se perder!

- Constelação, Nome da Estrela, Tipo Espectral, Luminosidade, Classe de Luminosidade e Temperatura Superficial → Celestia;
- Classe de Luminosidade → Tabela de Classe de Luminosidade;
- Cor da Estrela → Tabela de Classificação Espectral por Tipo Espectral e Cor;
- Comprimento de onda → Lei de Deslocamento de Wien, que fornece o comprimento de onda (λ_{max}) no qual ocorre o máximo de emissão da estrela.

Exemplo:

Castor / α Gem / 66 Gem / HIP 36850 / HD 60178 / SAO 60198
 Distância: 50,868 anos-luz
 Mag abs (apa): 0,61 (1,58)
 Luminosidade: 48,6x Sol
 Classe: A2V
 Temperatura de superfície: 8.970 K
 Raio: 3,0 R_{sol} (2.070.000 km)
 Período de rotação: 14,400 horas

Exemplo de uma estrela da constelação de Gêmeos, selecionada no *Software Celestia*.

Tabela de dados de exemplo utilizando as informações baseadas na figura acima.

| Tabela de Dados | |
|------------------------------|---------------------|
| Constelação | Gêmeos |
| Nome da Estrela | Castor |
| Luminosidade (L_{\odot}) | 48,6 |
| Tipo Espectral | A2 |
| Classe de Luminosidade | V (Anã) |
| Temperatura Superficial (K) | 8970 |
| Cor da Estrela | Branca |
| Comprimento de Onda (m) | $3,2 \cdot 10^{-7}$ |

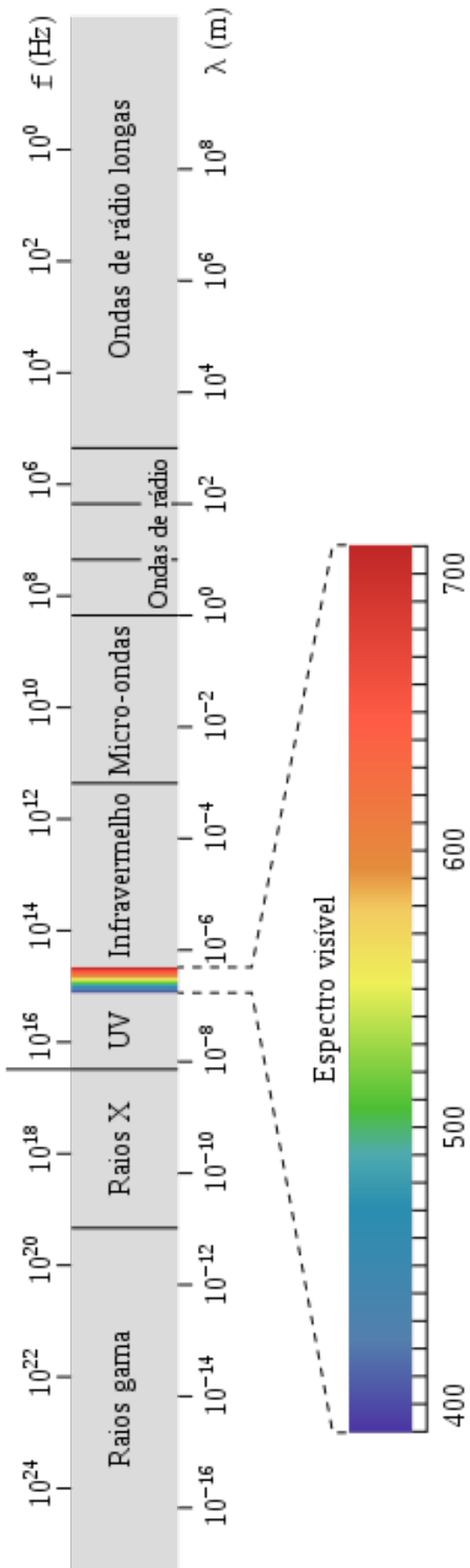
Classificação Espectral por Tipo Espectral e Cor Aparente.

| Tipo Espectral | Cor |
|----------------|-------------|
| O | Azul |
| B | Azulada |
| A | Branca |
| F | Amarelada |
| G | Amarela |
| K | Alaranjada |
| M | Avermelhada |

Classe de Luminosidade.

| Classe | Fase Evolutiva |
|--------|----------------------------|
| Ia | Supergigantes Brilhantes |
| Ib | Supergigantes |
| II | Gigantes Brilhantes |
| III | Gigantes |
| IV | Subgigantes |
| V | Sequencia Principal (Anãs) |
| D | Anãs Brancas |

Lei do Deslocamento de Wien: $\lambda_{máx} \cdot T = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$

Espectro Eletromagnético².

² Crédito da Imagem: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:EM_spectrum_pt_2.svg.

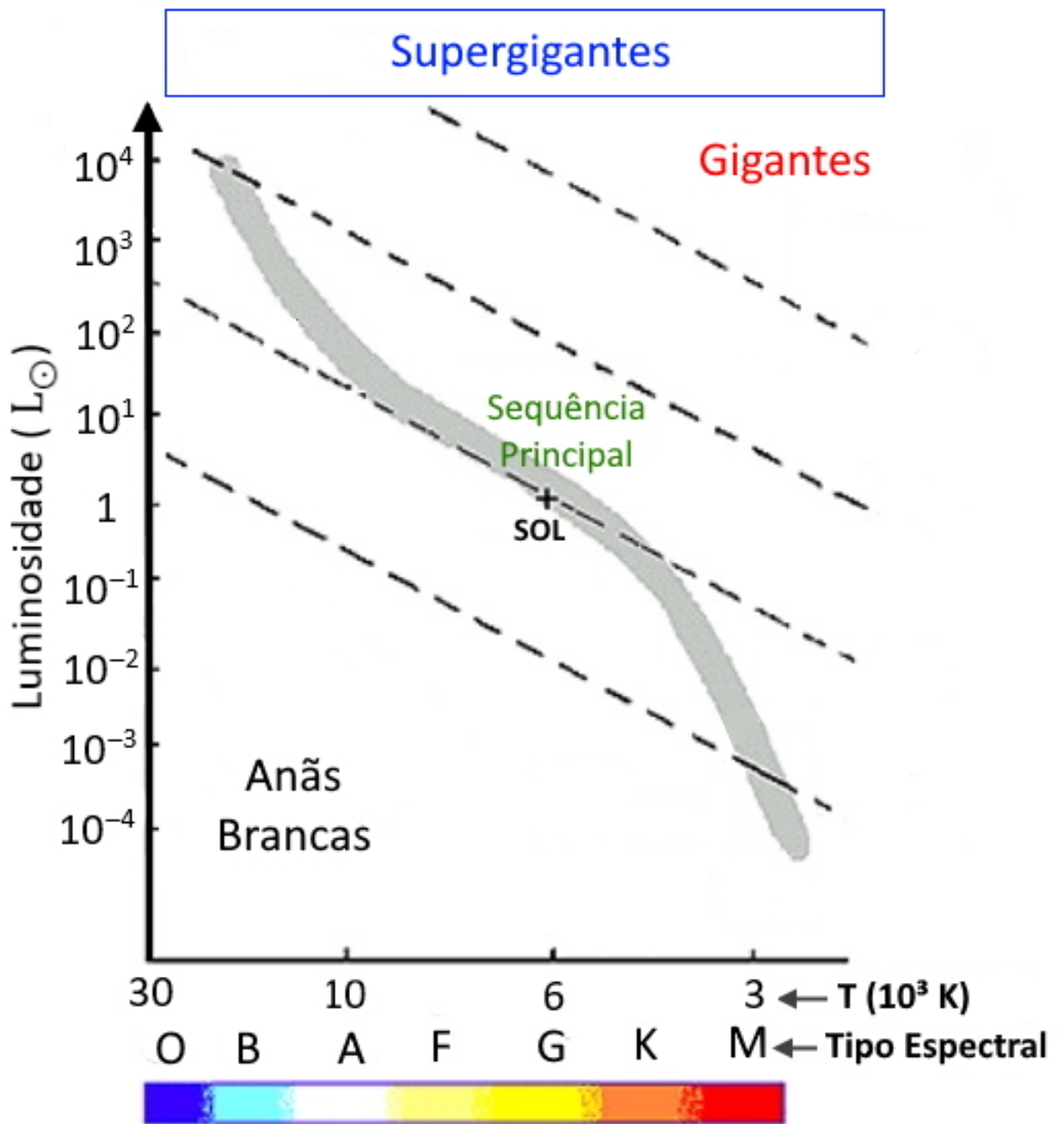


Diagrama H-R³. O eixo y fornece a luminosidade estelar dada em luminosidades solares, e o eixo x indica a temperatura efetiva em unidades de milhares de kelvin. As retas tracejadas indicam a posição de estrelas de mesmo raio, dado em raios solares, variando de 0,1 (abaixo da linha do Sol), 10 e 100 (primeira e segunda linhas acima do Sol).

³ Crédito da Imagem (Adaptada): <http://www.telescopiosnaescola.pro.br/coresdasestrelas.pdf>

5.8 Roteiro do Professor(a)

Classificando as Estrelas

Objetivo da Atividade: Apresentar o conceito da Radiação de Corpo Negro utilizando como aplicação a Classificação Estelar a partir do uso do *Software* Celestia e do Diagrama H-R.

Pergunta Norteadora: Quais são os parâmetros que caracterizam uma estrela?

Materiais

- 1 Computador por grupo ou 1 *Tablet* ou Celular por integrante;
- *Software* Celestia;

Como Fazer

- Separe a turma em grupos de no mínimo 3 alunos(as) e no máximo 5 alunos(as);
- Entregue o *Roteiro de Atividade Prática - Classificando as Estrelas* para cada grupo e auxilie na atividade se necessário.

Gabarito - Questionário de Investigação

1. Em qual região do espectro eletromagnético está o máximo de emissão das suas estrelas? Importante: Utilize o valor obtido pela Lei do Deslocamento de Wien e a Figura do Espectro Eletromagnético disponibilizado no Material de Apoio, para responder essa pergunta.

Considerando os limites de temperatura que os(as) alunos(as) encontrarão, as regiões do espectro eletromagnético que devem ser encontradas para responder essa pergunta são Ultravioleta e Visível.

2. De acordo com a posição das suas estrelas no diagrama H-R, como você poderia classificá-las (Gigantes, Sequência Principal, Anãs Brancas ou Anãs Vermelhas)?

Essa questão terão respostas diferentes pois, dependem das constelações e estrelas escolhidas por cada grupo. É importante que o(a) professor(a) fique atento(a), pois a maioria das respostas devem conter estrelas na região da Sequência Principal ou na região das Gigantes.

3. Quais são os parâmetros usados na classificação de uma estrela? Como esses parâmetros se relacionam? Justifique.

A temperatura e a luminosidade são os principais fatores para a classificação estelar. A temperatura indica o tipo espectral e a cor da estrela. Pela Lei de Wien, verifica-se que estrelas mais quentes possuem cores mais para o azul enquanto estrelas mais frias possuem cores mais avermelhadas, como visto em aula, isso é previsto considerando que estrelas são objetos próximos de serem um corpo negro ideal. Já a luminosidade está ligada ao tamanho (raio) da estrela, logo, quanto maior é o seu raio, maior será o valor da sua luminosidade.

Conclusão da Atividade

O (A) aluno (a) deverá ser capaz de relacionar os dados obtidos com a posição no Diagrama H-R das estrelas escolhidas, concluindo que os parâmetros que caracterizam uma estrela são, temperatura superficial, que está relacionada com o tipo espectral e a cor da estrela, e a luminosidade, que aumenta com o raio estelar. Além disso, a região no Diagrama H-R, também chamada Classe de Luminosidade, indica o estágio evolutivo em que a estrela se encontra.

Observações Importantes

- Professor(a) se atente para quais sistemas operacionais o Roteiro será utilizado. O início da atividade apresenta duas alternativas, logo você encontrará **Parte I - Uso do *Software* no *Windows*** caso utilize o Celestia no *Windows* ou **Parte I - Uso do aplicativo no *Android* ou *iOS*** caso utilize o Celestia pelo *Android* ou *iOS*.
- Os(as) alunos(as) devem encontrar um intervalo de temperatura entre 3000 K e 30000 K.
- Os(as) alunos(as) devem encontrar uma faixa de luminosidade entre $10^{-4} L_{\odot}$ e $10^4 L_{\odot}$.
- A classe de luminosidade encontrada deve ser compatível com a fase evolutiva em que a estrela se encontra no Diagrama H-R.
- A sugestão de discussão dos signos astrológicos tem apenas a intenção de atrair a atenção dos(as) alunos(as) para o tema Constelações de forma lúdica, a partir de um assunto que geralmente está ligado ao cotidiano. É importante notar que não se trata de uma proposta de demonstrar a validade ou não dos signos com base na posição do Sol com relação às constelações. De fato, originalmente a astrologia definiu a distribuição dos signos com base na posição da Terra com relação ao Sol, dividindo os 12 meses do ano iniciando-se no ponto vernal, ou seja a data do equinócio de primavera do Hemisfério Norte (próximo a 21 de março). Naquela

época, essa data correspondia ao Sol nascendo na direção da Constelação de Áries e na sequência desta foram definidos os chamados signos do zodíaco, que correspondem às principais constelações vistas na direção da eclíptica (trajetória aparente anual do Sol). Até hoje a astrologia mantém essa definição dos signos com base no ponto vernal, independente do movimento de precessão do eixo da Terra que faz com que a direção em que o Sol nasce, com relação às constelações, mude com o passar do tempo. Sendo assim, o(a) professor(a) pode optar por não incluir esse tipo de discussão em sala de aula, pois a maneira de demonstrar que a astrologia não é uma ciência deve levar em conta outros aspectos, que não estão relacionados com os tópicos abordados na sequência didática proposta.

Caso haja a necessidade de uma discussão mais aprofundada no assunto ou tenha tempo de aula, peça aos grupos que assistam a palestra “Signos, ascendentes: qual a crítica à astrologia?” apresentada por Henrique Xavier no programa do IAG/USP³⁰.

³⁰ Astronomia ao meio-dia: <http://www.astro.iag.usp.br/~astro12h/files/2018/2510.html>

6 EVOLUÇÃO ESTELAR E A PRODUÇÃO DE ELEMENTOS

Esse capítulo aborda os tópicos de Física Nuclear vistos no ensino médio e que se relacionam diretamente com a evolução das estrelas, sejam elas de baixa massa como também as de alta massa.

Para isso, os tópicos aqui apresentados serão Radioatividade, Física Nuclear, Decaimentos Alfa, Beta e Gama, Reações Nucleares para então finalizar com a apresentação de conceitos básicos sobre Evolução Estelar e a Nucleossíntese Estelar.

6.1 A Radioatividade

A radioatividade é um efeito que ocorre quando núcleos instáveis decaem ao emitir radiação tornando-se assim mais estáveis. Esse processo foi percebido em 1896 por Antoine Henri Becquerel¹ (1852 – 1908), levado pela descoberta dos Raios-X por Wilheelm Conrad Röntgen² (1845 – 1923), decidindo analisar se substâncias que eram fosforescentes também emitiam Raios-X. Utilizando sais de urânio Becquerel percebeu que, mesmo as amostras que não eram fosforescentes emitiam uma radiação “invisível”. Com isso concluiu que essa emissão nada tinha a ver com a fosforescência e sim com o próprio urânio (Okuno e Yoshimura, 2016).

Um ano depois, em 1897 Marie Skłodowska-Curie^{1,3} (1867 – 1934) procurou por Becquerel para que ele a orientasse em sua tese de doutorado. Marie Curie estudou elementos com propriedades similares ao que foi encontrado no urânio, denominando inclusive o efeito de emissão de radiação descoberto pelo orientador como radioatividade. Enquanto estudava, juntamente com seu marido Pierre Currie¹ (1859 – 1906) a recém denominada radioatividade, Marie Curie, em 1898 descobriu dois novos elementos químicos, Polônio e Rádio, ambos com propriedades radioativas (Okuno e Yoshimura, 2016).

Até aquele momento, não se sabia ao certo que tipos de partículas estavam sendo emitidas pelo urânio. Foi apenas em 1899, que Ernest Rutherford (1871 – 1937) ao fazer experimentos com o que era conhecido como “os raios de Becquerel”, publicou:

“Esses experimentos mostram que a radiação do urânio é complexa e que estão presentes ali pelo menos dois tipos distintos de radiação - uma delas é prontamente absorvida, que será chamada por conveniência por radiação

¹ <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1903/summary/>.

² <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1901/summary/>.

³ <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/1911/summary/>.

alfa e a outra de caráter mais penetrante, que será chamada de radiação β (Rutherford, 1899).”

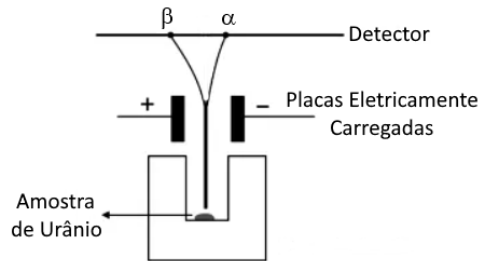


Figura 43 – Representação esquemática do experimento realizado por Rutherford⁴.

Uma terceira partícula, foi percebida em 1900, por Paul Villard (1860 – 1934), porém apenas três anos depois, Rutherford denominou-a como radiação gama, pois diferente das duas partículas encontradas anteriormente, essa não sofria deflexão em meio a um campo magnético (Okuno e Yoshimura, 2016).

Temos hoje uma definição bem clara de quais são essas partículas, sendo elas apresentadas como:

Partículas Alfa (α) → Núcleos de Hélio (2 Prótons + 2 Nêutrons).

Partículas Beta (β) → Elétrons e^- ou β^- ou Pósitrons e^+ ou β^+ .

Radiação Gama (γ) → Radiação eletromagnética com origem na emissão de fótons de alta energia.

6.2 A Física Nuclear

Desde o século XVIII diversos cientistas persistiam com a tentativa de definir um modelo sólido para o átomo. Pode-se lembrar por exemplo o primeiro modelo criado por John Dalton (1766 – 1844), com a ideia que qualquer matéria era feita por partículas indivisíveis, logo depois veio Joseph John Thomson (1856 – 1940), derrubando a teoria de Dalton e explicando que na verdade o átomo era aproximadamente uma esfera não sólida de carga elétrica positiva, mas que continha cargas elétricas negativas estáticas distribuídas uniformemente ao seu redor, obtendo então uma carga total nula. Tal modelo conhecido hoje como “pudim de passas”, foi utilizado por alguns anos, até Rutherford, estimulado ao estudar os Raios-X descobertos por Röntgen e pelas descobertas sobre as partículas alfa, beta e gama, criou um modelo atômico que constituía em um núcleo com partículas positivas (prótons) e nêutrons. Além disso, ao redor do núcleo encontravam-se espaços vazios onde ficam os elétrons (denominado como eletrosfera), que giram em torno do núcleo (Tipler e Llewellyn, 2014).

⁴ Crédito da Imagem (Adaptada):

<https://brasilescola.uol.com.br/quimica/radioatividade-estrutura-atomo.htm>.

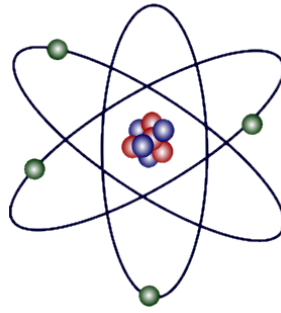


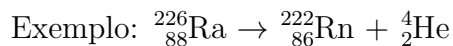
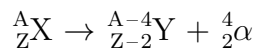
Figura 44 – Exemplo do Modelo de Rutherford. As bolinhas verdes representam os elétrons, enquanto as vermelhas representam os prótons e as azuis os nêutrons⁵.

O núcleo atômico é definido por um número atômico Z (mesmo valor do número de prótons), número de nêutrons N e o número de massa A , sendo esse valor igual ao número de núcleons (número de prótons mais número de nêutrons).

6.3 Os Decaimentos Alfa, Beta e Gama

Antes de um núcleo instável emitir algum tipo de partícula, ele passa por um processo chamado de decaimento radioativo e esse processo pode ser dividido baseado no tipo de partícula que é ejetada pelo átomo, sendo eles:

- **Decaimento Alfa:** Quando um núcleo emite uma partícula alfa (${}^4_2\text{He}$), por conservação ele perde dois prótons e dois nêutrons resultando em um núcleo mais estável com o número atômico (Z) menor em duas unidades e o número de massa (A) menor em quatro unidades.



- **Decaimento Beta:** Quando um núcleo emite uma partícula beta⁶, o número de massa (A) para o novo núcleo permanecerá o mesmo que o núcleo principal, porém o número atômico (Z) aumentará ou diminuirá em uma unidade, dependendo se a emissão for β^- ou β^+ respectivamente. Além disso, para manter a conservação de energia, momento linear e momento angular, uma partícula descoberta por Wolfgang Pauli (1900 – 1958) e denominada por Enrico Fermi⁷ (1901 – 1954) como neutrino⁸

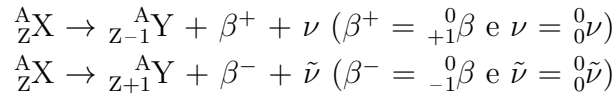
⁵ Crédito da Imagem (Adaptada): https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Atomo_de_Rutherford_con_neutrones.png.

⁶ A emissão de um β^- ou de um de um β^+ em um núcleo de um átomo é proveniente do decaimento de um nêutron ($n \rightarrow p + e^- + \text{antineutrino}$) ou de um próton ($p \rightarrow n + e^+ + \text{neutrino}$), respectivamente, durante o processo radioativo (Okuno e Yoshimura, 2016).

⁷ <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1938/summary/>.

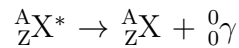
⁸ Partícula elementar sem carga elétrica e com massa muito menor do que a massa de um elétron.

também é emitida nesse processo de decaimento. Logo, por conservação, caso seja emitido um β^+ , junto será emitido um neutrino e caso seja emitido um β^- , junto será emitido um antineutrino⁹.



Exemplo: ${}^{14}_6\text{C} \rightarrow {}^{14}_7\text{N} + \beta^- + \bar{\nu}$

- Decaimento Gama: Nesse tipo de decaimento não há mudança no número de massa (A) e nem no número atômico (Z), logo não há mudança no átomo (que normalmente é acompanhado por um asterisco para representar que é um núcleo excitado), porém há emissão de radiação eletromagnética em forma de fótons.



Exemplo: ${}^{137}_{56}\text{Ba}^* \rightarrow {}^{137}_{56}\text{Ba} + {}^0_0\gamma$

6.4 Reações Nucleares

Dentre as reações nucleares, as duas mais importantes são a Fissão Nuclear e a Fusão Nuclear. Ambas reações se baseiam em processos de conversão de parte da massa do núcleo de um átomo em algum tipo de energia (Tipler e Llewellyn, 2014). Abaixo, elas serão apresentadas resumidamente em tópicos:

- Fissão Nuclear (Figura 6.3) é uma reação que se baseia na fragmentação de um núcleo atômico instável e pesado após o bombardeamento por meio de nêutrons. Com esse tipo de reação se obtém novos núcleos atômicos, mais nêutrons e a liberação de uma grande quantidade de energia (Chung, 2001).

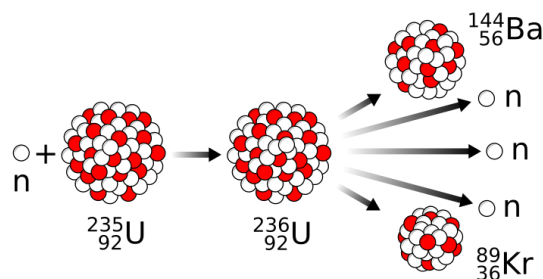


Figura 45 – Representação de uma reação do tipo Fissão Nuclear¹⁰.

⁹ Antipartícula do neutrino.

¹⁰ Crédito da Imagem: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Nuclear_fission_reaction.svg.

- Fusão Nuclear (Figura 6.4) é uma reação oposta à Fissão Nuclear, pois se baseia na combinação de dois núcleos atômicos para a criação de um único núcleo mais pesado além da liberação de uma grande quantidade de energia.

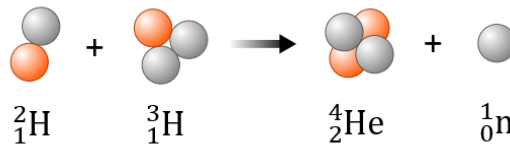


Figura 46 – Representação de uma reação do tipo Fusão Nuclear, na qual um núcleo de hélio é obtido a partir dos isótopos do hidrogênio (deutério e trítio).

6.5 Evolução Estelar

Assim como qualquer processo na natureza, as estrelas nascem, evoluem e morrem em um ciclo de tamanha beleza que chega a ser estranho falar sobre a morte desse astro.

Na física, falamos que na natureza nada se cria, tudo se transforma e as estrelas são um bom exemplo de como isso acontece. Uma estrela nasce do que é conhecido como Nuvem Interestelar. Essa região é constituída de gás frio e difuso composto principalmente de hidrogênio. Algumas dessas nuvens podem ter sido quimicamente enriquecidas com elementos mais pesados, como o carbono e outros metais produzidos em explosões de supernovas por estrelas massivas que foram formadas anteriormente nas proximidades da região (Chung, 2001; Oliveira Filho e Saraiva, 2004).

Após passar pelo processo de seu nascimento e uma curta fase da juventude (40 milhões de anos, no caso de uma estrela de massa semelhante à do Sol), a estrela atinge a “maturidade” chegando na etapa que é conhecida como Sequência Principal, passando a maior parte da sua vida nessa fase. Para os próximos passos é importante definir que tipo de estrela será estudada, pois sua massa determina os tipos de reações nucleares que ocorrem para a formação de, por exemplo, novos elementos químicos.

Caso a estrela seja de baixa massa ($0,8M_{\odot}$ a $2M_{\odot}$)¹¹ ou de valor intermediário ($2M_{\odot}$ a $10M_{\odot}$), ela permanecerá muito tempo na Sequência Principal (cerca de 11 bilhões de anos, para uma estrela semelhante ao Sol), para então evoluir em uma gigante vermelha, seguir como uma nebulosa planetária e então chegar aos estágios finais da evolução como uma anã branca.

¹¹ É importante ressaltar que se a estrela não faz parte de um sistema binário ou de um sistema múltiplo e possui massa menor que $0,8 M_{\odot}$, ela ainda não teve tempo de chegar até a fase da Sequência Principal, considerando a idade do Universo (Oliveira Filho e Saraiva, 2004).

Já uma estrela de alta massa (massas maiores que $10M_{\odot}$), passará um tempo menor na Sequência Principal (em comparação ao tempo de uma estrela de massa menor)¹², evoluindo então para uma supergigante vermelha¹³ até explodir em uma supernova.

Dessa explosão há duas possibilidades de fim para uma estrela. Caso a estrela tenha de $10M_{\odot}$ até $25M_{\odot}$ ela terminará como uma estrela de nêutrons, agora se a estrela tiver mais que $25M_{\odot}$ ela finalizará seu ciclo como um buraco negro. A Figura 47 apresenta um esquema das principais etapas evolutivas.

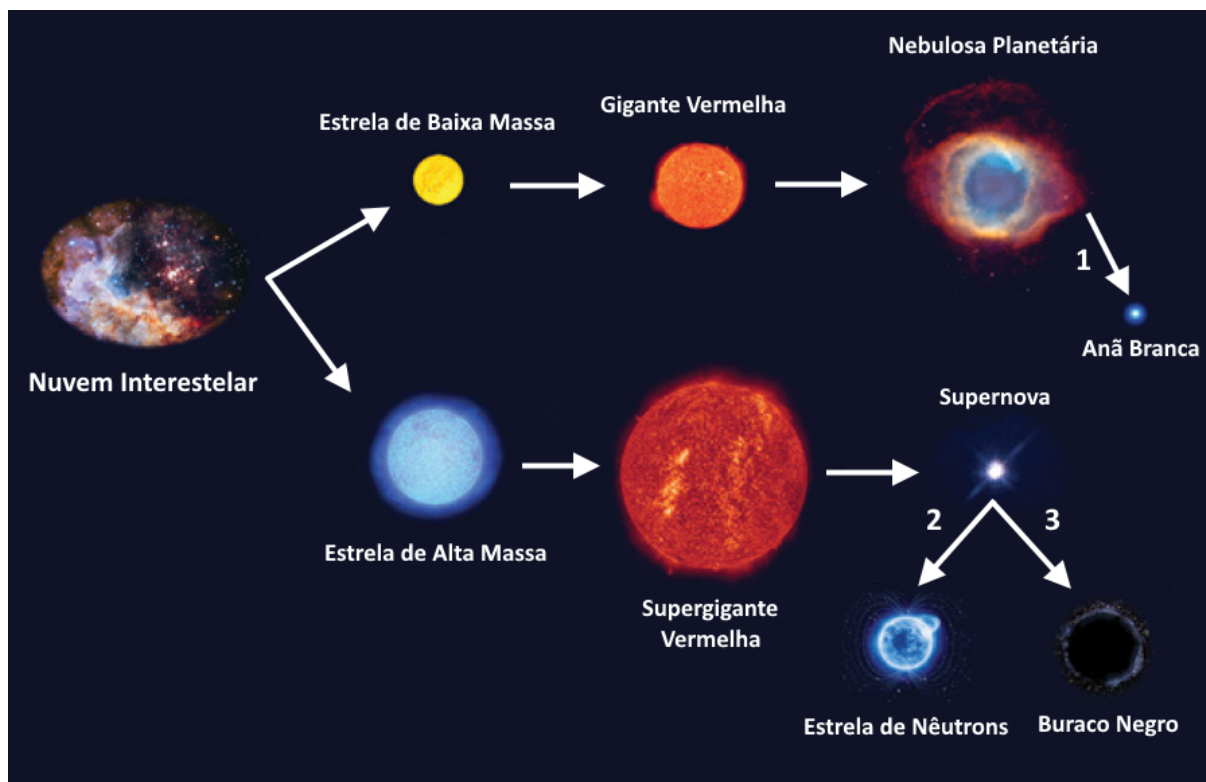


Figura 47 – Diagrama representativo da evolução estelar. Seguindo pela numeração da imagem temos: 1 - Resultado da morte de estrelas com massas menores que 10 massas solares; 2 - Resultado da morte de estrelas com massas entre 10 e 25 massas solares; 3 - Resultado de estrelas com mais de 25 massas solares (Oliveira Filho e Saraiva, 2004)¹⁴.

Apesar do tom trágico, após comentar sobre tantas possibilidades de uma estrela morrer, não se pode esquecer que sua evolução é parte de um ciclo, logo, isso significa que

¹² A diminuição de tempo das estrelas de alta massa em relação as estrelas de massa menores (como o Sol) na Sequência Principal, se deve ao fato que elas queimam o hidrogênio mais rapidamente do que as estrelas de massa menor. Uma estrela de $25M_{\odot}$ permanece cerca de 6,4 milhões de anos na Sequência Principal.

¹³ Antes de virar uma supergigante vermelha a estrela se torna uma gigante vermelha, mas esse processo ocorre tão rápido que pode-se desprezar essa passagem, pelo menos para fins didáticos (para a sala de aula).

¹⁴ Crédito da Imagem (Adaptada): Material do Perimeter Institute (Entendendo o Espaço Sideral) disponível em: <https://resources.perimeterinstitute.ca/collections/astrophysics-cosmology/products/figuring-outer-space?variant=46424785158>.

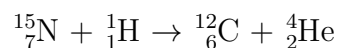
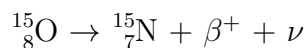
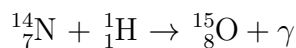
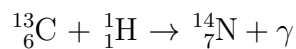
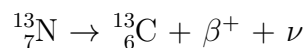
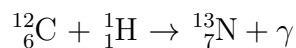
após a explosão em Supernova, uma nuvem interestelar poderá receber novo material e perturbações que eventualmente irão desencadear a formação de várias novas estrelas.

Na seção a seguir serão apresentadas algumas reações nucleares que ocorrem em determinadas fases da vida de uma estrela de alta massa.

6.6 Nucleossíntese Estelar

Ciclo do Carbono ou Ciclo CNO - Sequência Principal

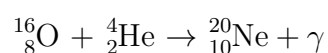
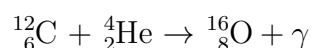
A permanência da estrela na Sequência Principal é marcada pelas reações nucleares que transformam hidrogênio em hélio na sua região central (núcleo estelar). No caso das estrelas massivas, rapidamente a temperatura central atinge cerca de $2 \cdot 10^7$ K. Nessa temperatura, o mecanismo predominante para a produção de hélio a partir do hidrogênio utiliza como catalisadores os elementos carbono, nitrogênio e oxigênio.



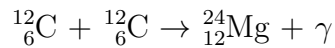
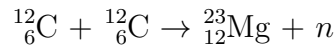
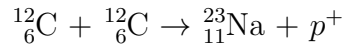
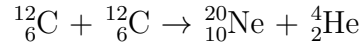
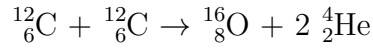
Por ser um ciclo, ao chegar na produção do hélio, o átomo de carbono liberado na última reação fica disponível para participar novamente na primeira reação dando continuidade ao processo.

Queima de Carbono, Oxigênio e Silício - Supergigantes Vermelhas

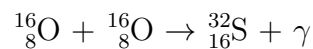
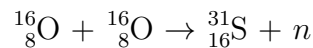
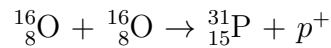
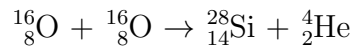
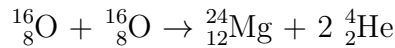
A estrela ao chegar na fase de Supergigante Vermelha, começará a queimar elementos mais pesados como carbono, oxigênio e silício devido ao aumento de sua temperatura interna ($T \approx 10^8$ K), a partir das reações abaixo:



Se a estrela for suficientemente massiva, com temperaturas no seu interior da ordem de $6 \cdot 10^8$ K, outros produtos nucleares serão criados como o sódio e o magnésio, conforme as reações abaixo (Carroll e Ostlie, 2007):



Na fase de queima do carbono o elemento mais abundante é o magnésio. O enxofre é o resultado da queima do oxigênio obtido anteriormente quando a estrela chega a uma temperatura aproximadamente igual a 10^9 K. Tais reações são apresentadas abaixo:



A partir dessas reações, são sintetizados outros elementos mais pesados, podendo chegar até o núcleo mais estável, o ${}^{56}_{26}\text{Fe}$.

Últimos Estágios - Explosão de Supernova

Nessa fase a estrela possui um núcleo, contendo praticamente apenas ${}^{56}_{26}\text{Fe}$ e um envoltório com elementos mais leves, distribuídos em camadas concêntricas, conforme ilustrado na Figura 6.6, sendo que a última camada é formada por um envoltório de gás inerte, contendo principalmente hidrogênio.

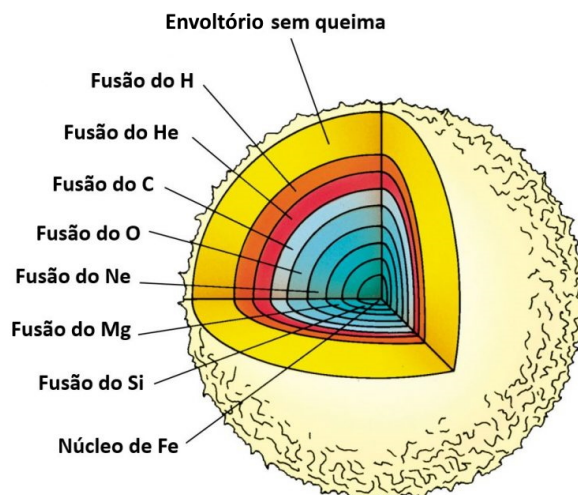


Figura 48 – Representação de uma estrela com uma estrutura do tipo casca de cebola, onde cada camada apresenta a temperatura suficiente para a fusão de um elemento diferente¹⁵.

Induzida pelas reações ultra-rápidas que acontecem nas camadas acima do núcleo, a estrela entra em colapso, onde após um movimento de implosão em relação ao seu interior, se reverte em uma explosão, jogando todo o material de seu envoltório para fora, originando assim uma supernova¹⁶ (Chung, 2001). A Figura 49 mostra um exemplo de imagem de restos de uma supernova. O quadro mostrado na Figura 6.8 representa os principais eventos da nucleossíntese, em função da fase evolutiva da estrela.

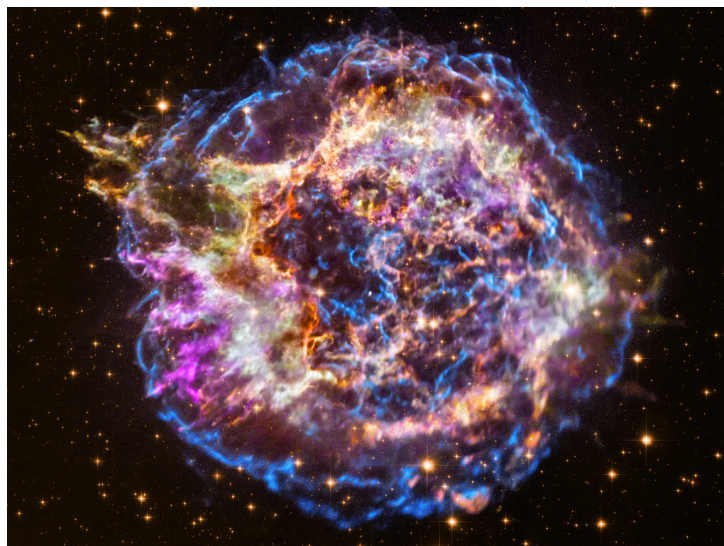


Figura 49 – Imagem criada a partir da composição de dados ópticos e de Raios-X da remanescente de Supernova, Cassiopeia A¹⁷.

¹⁵ Crédito da Imagem (Adaptada): Originalmente extraída de Chaisson e McMillan (2006).

¹⁶ Supernovas possuem uma luminosidade de cerca de 10^{10} vezes a luminosidade do Sol.

¹⁷ Crédito da Imagem: X-ray - NASA, CXC, SAO; Optical - NASA, STScI - <https://apod.nasa.gov/apod/ap210123.html>.

NUCLEOSSÍNTESE ESTELAR

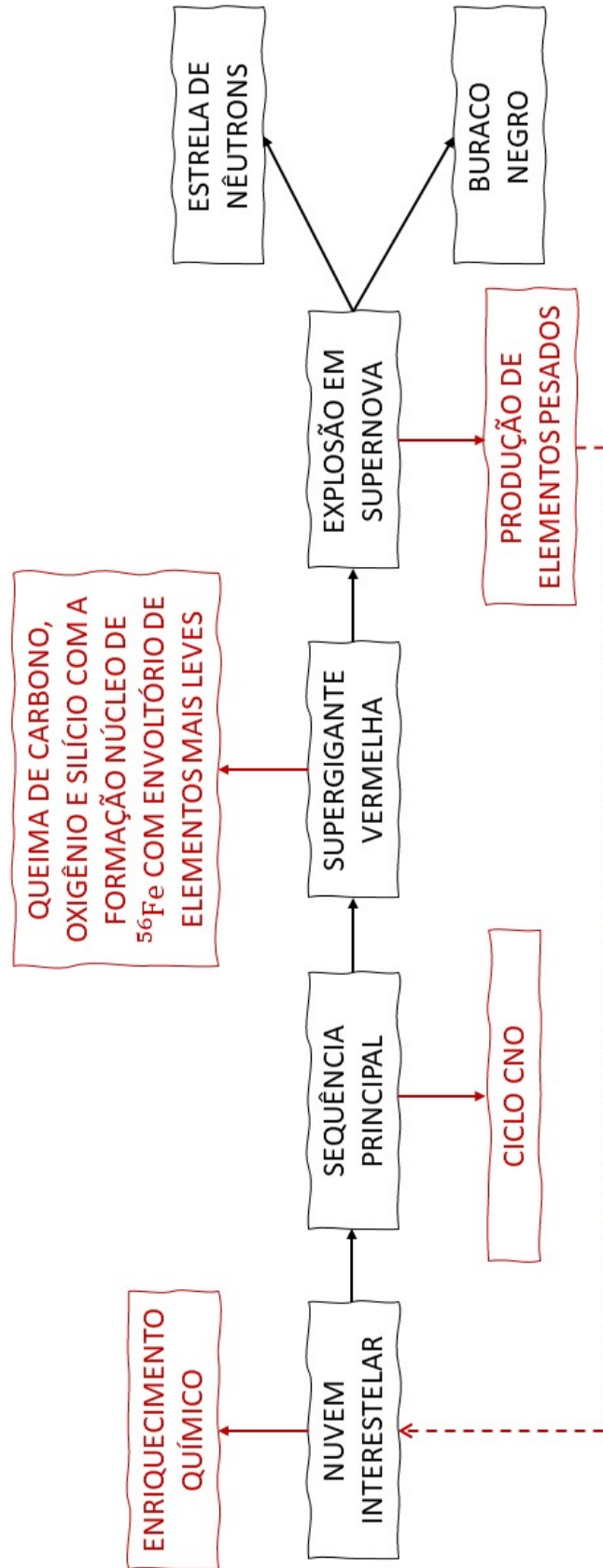


Figura 50 – Representação esquemática dos principais eventos da nucleossíntese, em função da fase evolutiva de uma estrela massiva.

6.7 Exercícios - Evolução Estelar e a Produção de Elementos

1. (OBA - Nível IV - 2008 - Adaptada) **Composição das Estrelas.**

Para viabilizar o estudo detalhado da luz proveniente das estrelas, os astrônomos e astrônomas utilizam diversos instrumentos. Um dos instrumentos mais importantes utilizado por eles é o espectrômetro, capaz de decompor a luz das estrelas em suas diversas cores. A sequência de cores formada é chamada de espectro. Um exemplo de espectro que você já deve ter observado é o arco-íris, fenômeno natural em que gotas de água decompõem a luz do Sol.

A identificação e quantificação dos elementos químicos são com certeza uma das mais impressionantes características que atualmente se pode obter através dos espectros das estrelas. Uma curiosidade histórica a este respeito é que o filósofo francês Auguste Comte (1798 – 1857), em 1820, chegou a dizer que seria impossível conhecer do que são feitas as estrelas. A observação de linhas escuras no espectro solar, feita por William Hyde Wollaston (1766 – 1828), feita em 1802, foi o início de toda a história que viria a demonstrar que Comte estava errado.

O físico alemão Gustav Robert Kirchhoff (1824 – 1887) realizou diversos experimentos importantes para estudar as linhas dos espectros. Uma experiência feita foi aquecer gases e observar seus espectros. Ele observou que estes gases não emitiam um espectro contínuo como o arco-íris, sendo que cada elemento gerava uma série de linhas diferentes. Por exemplo, o neônio tinha linhas no vermelho, o sódio tinha linhas no amarelo e o mercúrio tinha linhas no amarelo e no verde.

Estas linhas eram todas brilhantes, diferentes das raias escuras observadas no espectro do Sol e também de outras estrelas, que à época já tinha sido observado. Kirchhoff queria confirmar que as linhas escuras identificadas nos espectros estelares correspondiam às linhas identificadas no estudo dos gases.

Para isto ele fez passar a luz do Sol através de uma chama de sódio, esperando que as linhas do sódio preenchessem as linhas escuras do Sol. Para sua surpresa, as linhas ficaram mais fortes, mais escuras. Ele então substituiu o Sol por um sólido quente.

A luz do sólido que passava pela chama apresentava as mesmas linhas escuras do Sol, na posição das linhas do sódio. Ele então concluiu que o Sol era um gás ou sólido quente, envolto por um gás “mais frio”, isto é, ainda muito quente, porém menos que o corpo sólido quente, ou seja esta foi a primeira identificação da estrutura de uma estrela, isto é uma parte mais central composta de material mais quente que irradiava energia envolto por uma parte menos quente que foi chamada de atmosfera da estrela. Estas camadas menos quentes, ou seja, a atmosfera da estrela, é que produzem as linhas escuras do Sol. Comparando espectros, ele descobriu linhas

associadas aos elementos magnésio, cálcio, cromo, cobalto, zinco, bário e níquel no espectro do Sol.

Os resultados das experiências de Kirchhoff estão apresentados de forma visual na Figura 51. Nas três figuras estão apresentados espectros obtidos ao passar feixes de luz por um prisma em diferentes situações. A primeira situação é o caso de uma lâmpada, que apresenta espectro contínuo. A segunda situação exemplifica o caso de um gás quente que apresenta um espectro de emissão de raias (linhas). O terceiro caso é o de um espectro de absorção, onde um gás “frio” (menos quente) absorve uma parte da energia do espectro contínuo da lâmpada.

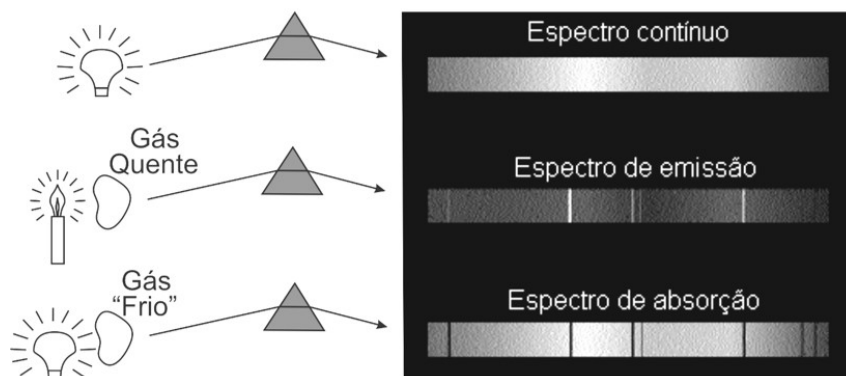


Figura 51 – Representação de espectros no contínuo, de emissão e de absorção.

a) Na Figura 52 apresentamos o espectro simplificado de uma estrela fictícia, contendo inúmeras raias escuras. Identifique os elementos presentes na estrela fictícia (último espectro), procurando conjuntos de linhas correspondentes a um dado elemento.

Obs. Você já deve ter lido que os elementos primordiais do universo são basicamente hidrogênio, hélio e lítio. Isto significa que todos os demais existentes hoje no universo, como todos aqueles necessários à vida aqui em nosso planeta, foram produzidos e espalhados no meio interestelar por meio de processos de evolução e morte estelar. Neste sentido é que dizemos que somos “poeira de estrelas”, isto é, para que nós, seres com células baseadas em carbono, pudéssemos habitar um planeta rochoso com oceanos e atmosfera de nitrogênio, oxigênio e gás carbônico, foi necessário que estrelas morressem. Não é por outro motivo que a atmosfera do nosso Sol é tão rica em elementos químicos.

b) Apenas identificando as linhas escuras de dois espectros de estrelas diferentes, uma astrônoma pôde concluir que uma delas provavelmente era mais velha do que a outra. Como você acha que ela chegou a esta conclusão?

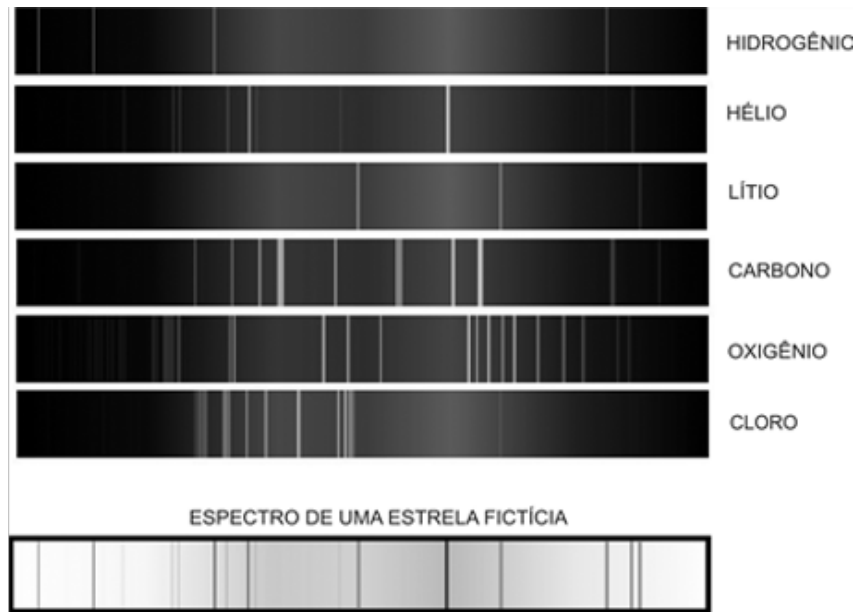


Figura 52 – Modelo de espectros para determinados elementos químicos e abaixo um espectro simplificado de uma estrela fictícia.

2. (OBA - Nível III - 2000) Estrelas diferenciam-se de planetas por gerarem energia, que pode ser irradiada ao espaço, aquecendo e iluminando corpos próximos, como faz o Sol com a Terra, já que esta última não tem a mesma capacidade.
 - a) Qual o processo que gera a energia de uma estrela?
 - b) Por que uma estrela maior, mais massiva, dura menos que uma estrela menor?

3. (CEFET MG - 2015 - Adaptada)

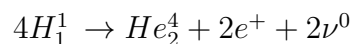
Considere os dados abaixo para resolver a questão, quando for necessário.

Constantes Físicas

Aceleração da gravidade próximo à superfície da Terra: $g = 10 \text{ m/s}^2$;

Velocidade da luz no vácuo: $c = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s}$.

No núcleo das estrelas, como o Sol, a energia é produzida pela fusão de átomos de hidrogênio em hélio, em que quatro prótons (núcleo de H) se fundem em uma partícula alfa (núcleo de He) liberando dois pósitrons, dois neutrinos e energia, conforme a seguinte equação:



onde e^+ é um pósitron e ν^0 um neutrino. Sabe-se que a massa atômica do hidrogênio é 1,0078 u, a massa do hélio é 4,0026 u e $u = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$. Desprezando-se as contribuições dos pósitrons e neutrinos, mantendo-se a conservação de energia nesse

processo e considerando a equação da energia sendo $E = m \cdot c^2$, a energia liberada em cada reação de conversão de hidrogênio em hélio, é, em joules, igual a

- a) $2,86 \cdot 10^{-2}$.
- b) $4,75 \cdot 10^{-2}$.
- c) $8,58 \cdot 10^{-6}$.
- d) $2,57 \cdot 10^{-12}$.
- e) $4,27 \cdot 10^{-12}$.

4. (Unisinos - 2016) A origem da energia solar, no Sol, ocorre a partir

- a) da combustão de substâncias que contêm carbono.
- b) da fissão nuclear do hidrogênio.
- c) da fissão nuclear do urânio.
- d) da fusão nuclear do hidrogênio.
- e) da fusão nuclear do urânio.

5. Indique em que fase evolutiva de uma estrela ocorre cada uma das reações nucleares apresentadas abaixo.

- a) ${}^{16}_8\text{O} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{20}_{10}\text{Ne} + \gamma$
- b) ${}^{15}_7\text{N} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^{12}_6\text{C} + {}^4_2\text{He}$
- c) ${}^{16}_8\text{O} + {}^{16}_8\text{O} \rightarrow {}^{32}_{16}\text{S} + \gamma$

6.8 Gabarito - Evolução Estelar e a Produção de Elementos

Nota ao(à) professor(a): As questões fornecidas foram extraídas de provas oficiais.

Caso sejam adaptadas, é importante ressaltar que seu conteúdo principal não foi alterado.

1. (OBA - Nível IV - 2008 - Adaptada¹⁸)

a) Com esta questão, queremos passar a noção de como elementos químicos podem ser identificados em estrelas sem que nenhuma “amostra” de seu material seja analisado diretamente em laboratório. Este caráter de trabalhar com dados colhidos através de observação e análise de objetos distantes e, em sua maioria intangíveis, é o que faz a especificidade observacional da Astronomia. No caso do espectro apresentado, somente estão presentes os elementos Hidrogênio, Hélio e Lítio na estrela fictícia, como pode ser visto a partir da identificação das linhas em seu conjunto na Figura 53 (obs.: as linhas estão identificadas em ordem da esquerda para a direita, quando há linhas muito próximas, escreve-se imediatamente abaixo, mantendo esta ordenação sem sobreposição - por exemplo, as três últimas linhas são H, He e Li).

b) Na verdade, esta pergunta têm várias respostas. No contexto da questão, queremos que o(a) aluno(a) conclua que uma estrela mais nova (formada recentemente) deve, a princípio, apresentar mais elementos químicos no seu espectro. Claro, o(a) aluno(a) mais versado em evolução estelar pode responder algo como uma estrela azul (ou qualquer outra de grande massa), porque permanece em sua fase de queima de hidrogênio oposta a uma gigante vermelha de massa pouco maior que a solar (porque teria demorado muito tempo para evoluir).

Obs. Se o(a) aluno(a) respondeu o oposto, mas deixou claro que uma estrela nova é uma estrela formada no início do universo, essa resposta também poderá ser considerada.

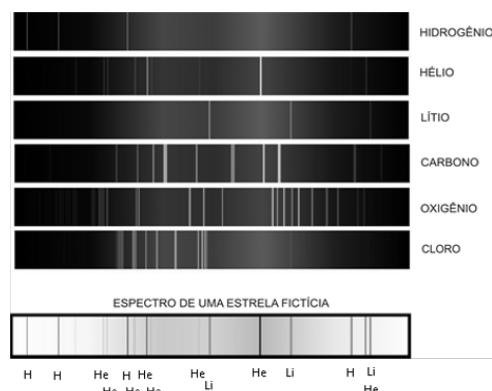


Figura 53 – Resposta baseada no modelo de espectros para determinados elementos químicos.

¹⁸ A questão e seu gabarito foram extraídos do site da OBA, disponível em: http://www.oba.org.br/siglob/siglob_arquivos/provas_gabaritos/2008/GABARITO%20COM%20QUESTOES%20nivel%204%20da%20XI%20BA_2008.pdf

2. (OBA - Nível III - 2000¹⁹.)
- a) Reações de fusão nuclear em seu interior, onde parte da massa é convertida em energia.
- b) Apesar de mais massiva, a sua taxa de consumo de energia é muito maior (necessário para gerar energia capaz de sustentar seu maior tamanho).
3. (CEFET MG - 2015 - Adaptada²⁰.) Alternativa E.
Sabendo que $E = m \cdot c^2$, temos que:
- $$E_{\text{liberada}} = 4E_H - E_{He}$$
- $$E_{\text{liberada}} = 4 \cdot m_H \cdot u \cdot c^2 - m_{He} \cdot u \cdot c^2$$
- $$E_{\text{liberada}} = 4 \cdot 1,0078 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 - 4,0026 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \cdot (3 \cdot 10^8)^2$$
- $$E_{\text{liberada}} = 4,27 \cdot 10^{-12} \text{ J}$$
4. (Unisinos - 2016²¹) Alternativa D.
Assim como qualquer estrela, a sua energia é proveniente basicamente da fusão nuclear do hidrogênio.
5. a) Supergigante Vermelha;
b) Sequência Principal;
c) Supergigante Vermelha.

¹⁹ A questão e seu gabarito foram extraídos do site da OBA, disponível em: http://www.oba.org.br/sisglob/sisglob_arquivos/provas_gabaritos/2000/2000_provas_09_05_2011/gbniv3_3oba.pdf

²⁰ A questão foi extraída do site do CEFET MG, disponível em: https://www.copeve.cefetmg.br/processos/20151_TRF/arquivos/provas/prova-transferencia-ensino-superior-2015-1-1-dia-quimica-tecnologica-engenharia-ambiental-e-sanitaria-1

²¹ A questão foi extraída do site da Unisinos, disponível em: <https://vestibular.brasilecola.uol.com.br/baixar/33362> (Arquivo: Prova Unisinos Verão 2016).

6.9 Roteiro de Atividade Prática

Entendendo a Evolução de uma Estrela Massiva

Sabemos que os elementos químicos estão presentes durante toda a evolução de uma estrela, desde o seu berçário (nebulosa estelar) até o momento de sua morte. Já as reações nucleares que produzem os elementos mais pesados ocorrem principalmente nos estágios finais do seu ciclo evolutivo.

Para entender melhor como ocorre toda essa mudança, vamos conhecer quais são os estágios que uma estrela passa durante toda a sua evolução analisando a figura abaixo:

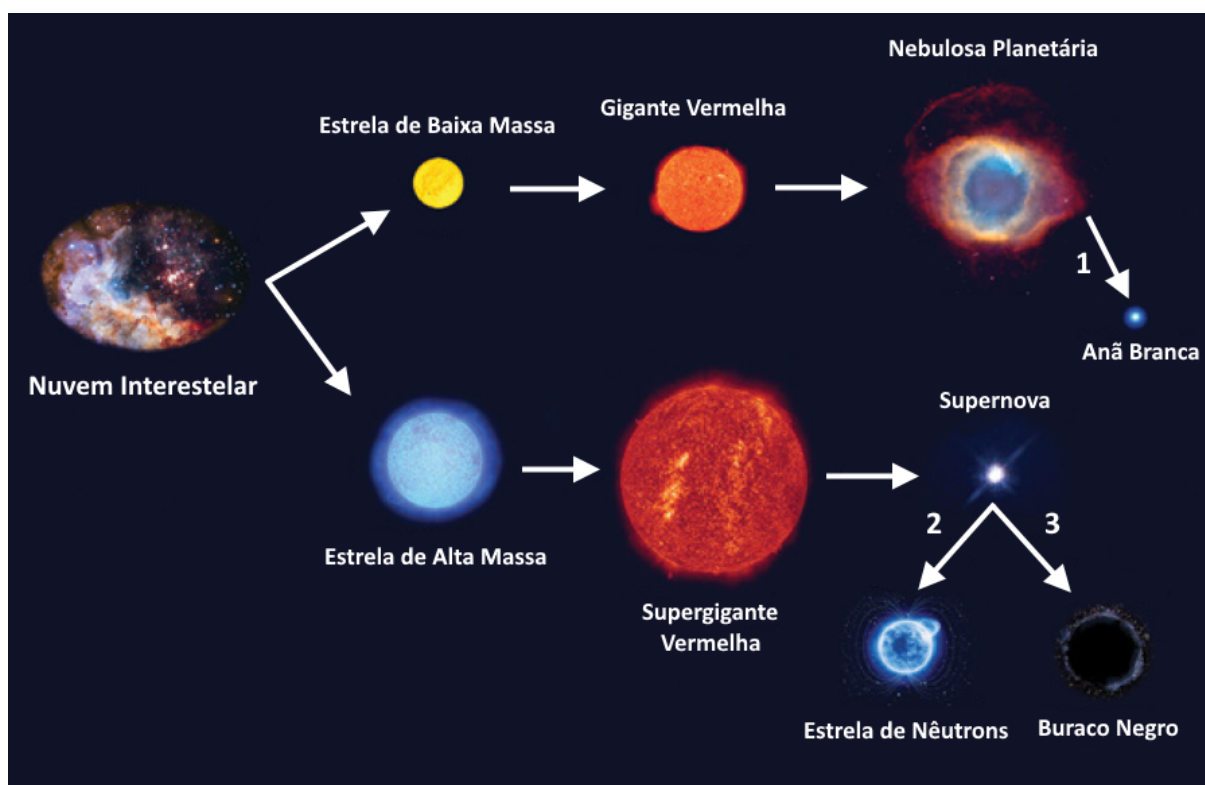


Diagrama representativo do ciclo de evolução estelar. Seguindo pela numeração da imagem temos: 1 - Resultado da morte de estrelas com massas menores que 10 Massas Solares; 2 - Resultado da morte de estrelas com massas entre 10 e 25 Massas Solares; 3 - Resultado de estrelas com mais de 25 Massas Solares¹.

Considerando como base para essa atividade estrelas com massas entre 10 e 25 massas solares (M_{\odot}), conforme apresentado na figura acima, um dos resultados após a sua explosão é a formação de uma Supernova. Nessa atividade estudaremos Cassiopeia A (Cas A), uma remanescente de Supernova localizada na constelação de Cassiopeia a 11000 anos-luz² da Terra e que possui como resultado de sua explosão uma estrela de nêutrons próxima ao seu centro.

¹ Imagem adaptada do material do Perimeter Institute (Entendendo o Espaço Sideral): <https://resources.perimeterinstitute.ca/collections/astrophysics-cosmology/products/figuring-outer-space?variant=46424785158>.

² 1 ano-luz $\approx 9,5 \cdot 10^{12}$ km.

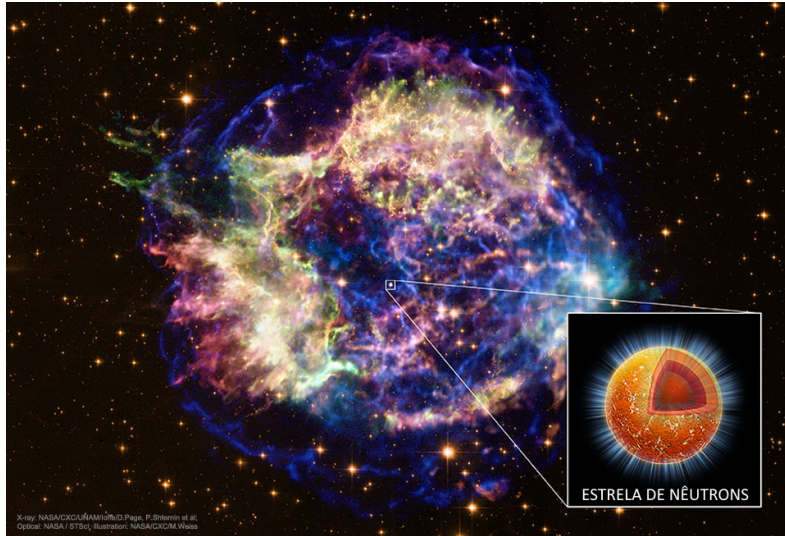


Imagem criada a partir da composição de dados ópticos e de Raios-X da remanescente de Supernova, Cassiopeia A e a localização de uma estrela de nêutrons (amplificada para melhor visualização a partir da ilustração no canto inferior direito)³.

Para analisá-la utilizaremos um *Software* que simula um dos telescópios de Raios-X do observatório XMM-Newton (*X-Ray Multi-Mirror Newton*) que foi lançado, em 10 de dezembro de 1999, para orbitar a Terra e ainda hoje continua em pleno funcionamento.



Impressão artística do Observatório XMM-Newton⁴.

Agora que o grupo já leu o texto e se atentou às imagens, é o momento de iniciar as análises de espectroscopia de Raios-X de Cassiopeia A para descobrir quais são os elementos principais que aparecem nesse estágio final da vida de uma estrela massiva.

³ Crédito da Imagem: X-ray - NASA/CXC/UNAM/Ioffe/D.Page, P. Shternin et al; Optical - NASA/STScI; Ilustração: NASA/CXC/M. Weiss - <https://apod.nasa.gov/apod/ap170501.html>.

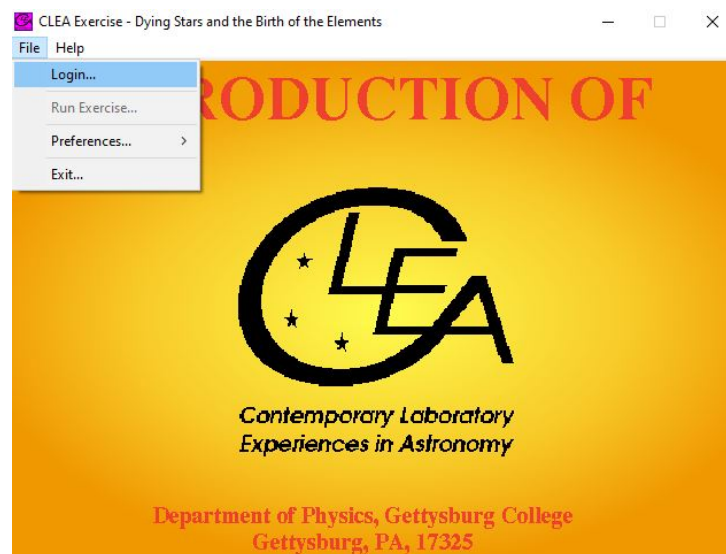
⁴ Crédito da Imagem: ESA/D. Ducros/NASA - <https://www.nasa.gov/sites/default/files/thumbnails/image/xmm.jpg>.

Procedimento

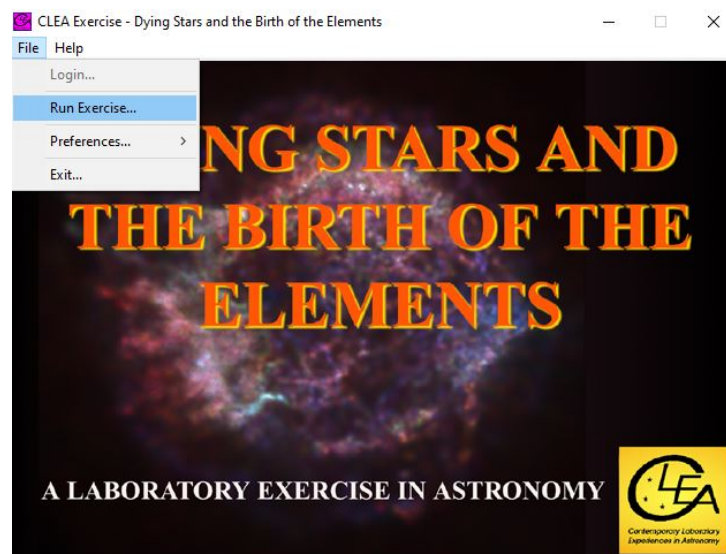
1. Vamos realizar o experimento “*Dying Stars and the Birth of the Elements*”, do projeto CLEA, com o *Software* que deve ser aberto a partir do ícone abaixo:



2. Ao abrir a tela inicial do *Software*, clique em *File* → *Login*.

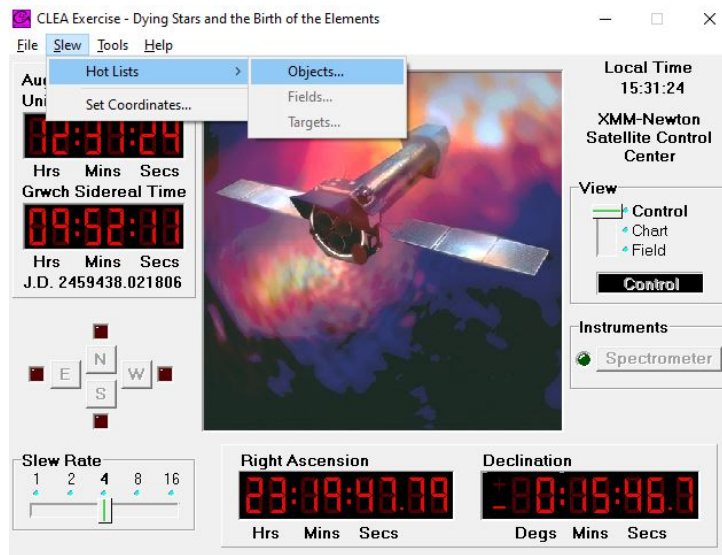


3. Indique em cada espaço o nome de cada integrante do grupo e clique em OK.
4. Ao abrir a tela inicial da simulação, clique em *File* → *Run Exercise*.

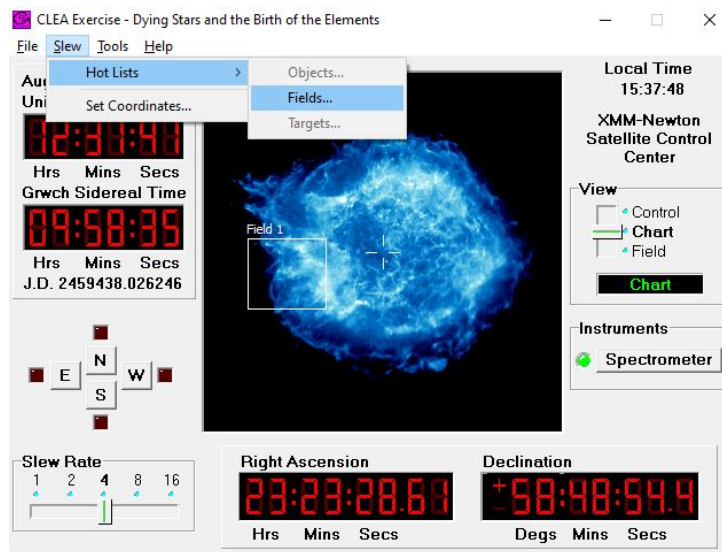


5. Caso a simulação pergunte se você gostaria de alterar o Fuso Horário, clique em Sim e altere para -3 , após isso, clique em OK e depois em Sim.

6. Após a configuração inicial pronta, iniciaremos o exercício clicando em *Slew* → *Hot Lists* → *Objects*.

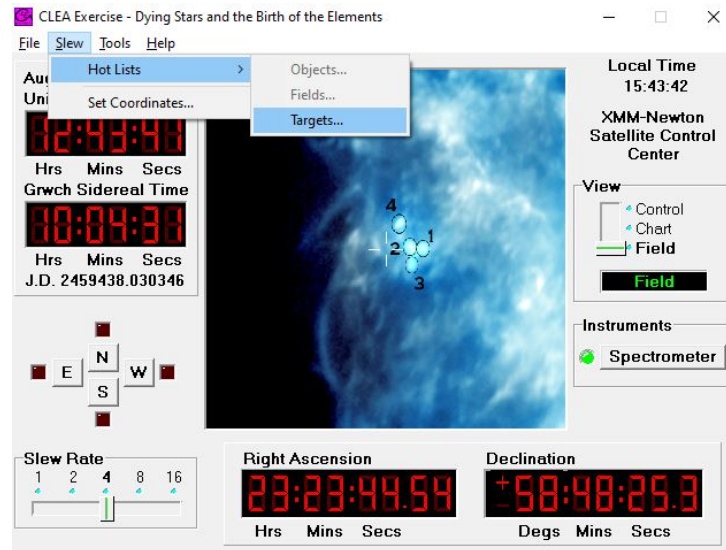


7. Clique duas vezes no Objeto 1 que aparece na lista, depois clique em OK e depois em Sim.
8. Após aguardar alguns segundos, aparecerá na sua tela, a imagem da remanescente de Supernova, Cassiopeia A.
9. Para determinar o local que devemos apontar o telescópio para obter os dados que serão analisados, clique em *Slew* → *Hot List* → *Fields*.



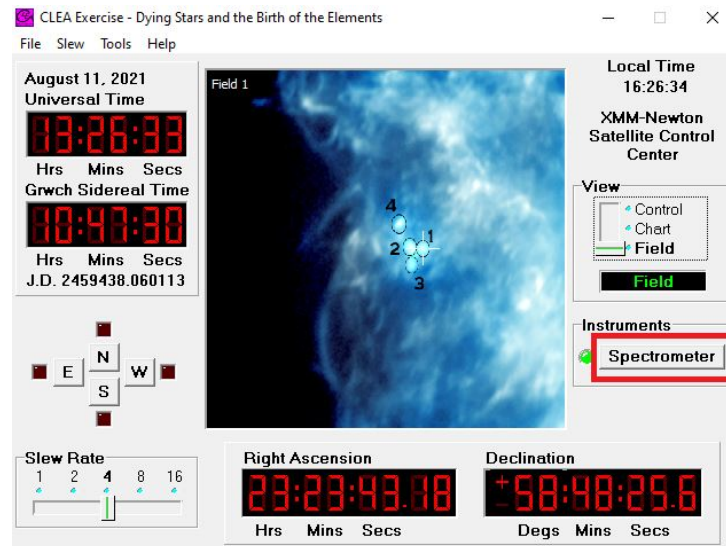
10. Clique duas vezes em *Field 1* que aparece disponível na lista, clique em OK e depois em Sim. Aguarde o cursor se movimentar até chegar em *Field 1*.

11. Para escolher os pontos que serão analisados clique em *Slew* → *Hot List* → *Targets*.

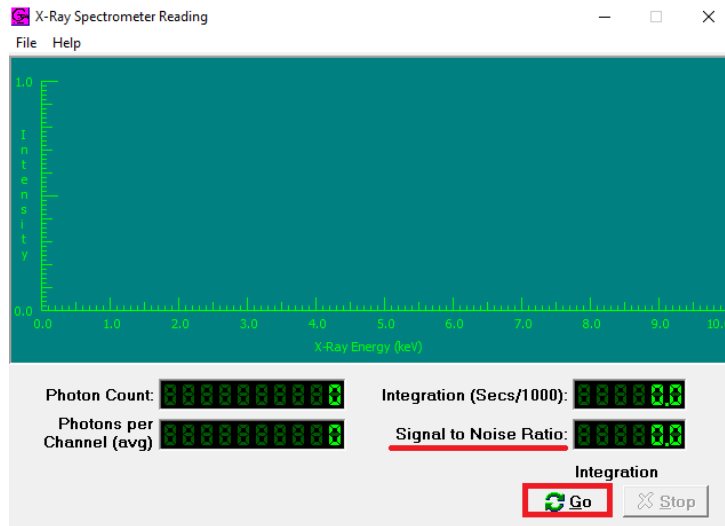


12. Nesse momento, abrirá uma lista de pontos, clique duas vezes em *Knot* ----, clique em OK e depois em Sim.

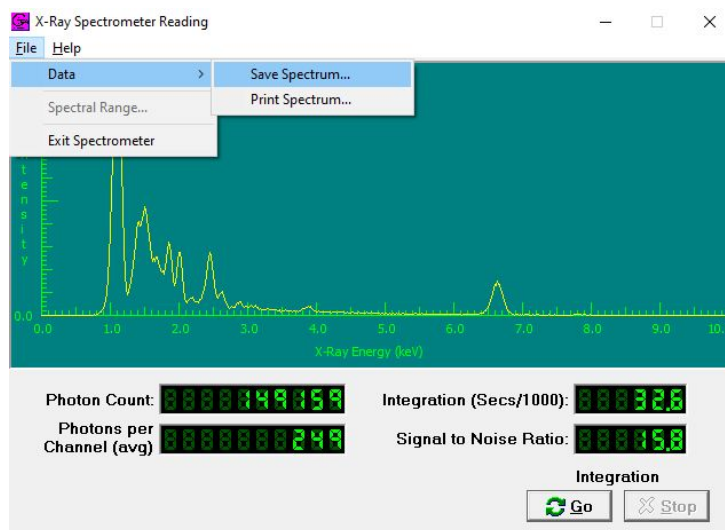
13. Quando o cursor se fixar no ponto escolhido, clique em *Spectrometer*.



14. Nesse momento, carregará uma nova tela onde aparecerá um gráfico. Clique em *Go* e aguarde até completar um valor aproximadamente igual a 15 em *Signal to Noise Ratio*⁵. Ao chegar nesse valor, clique em *Stop*.

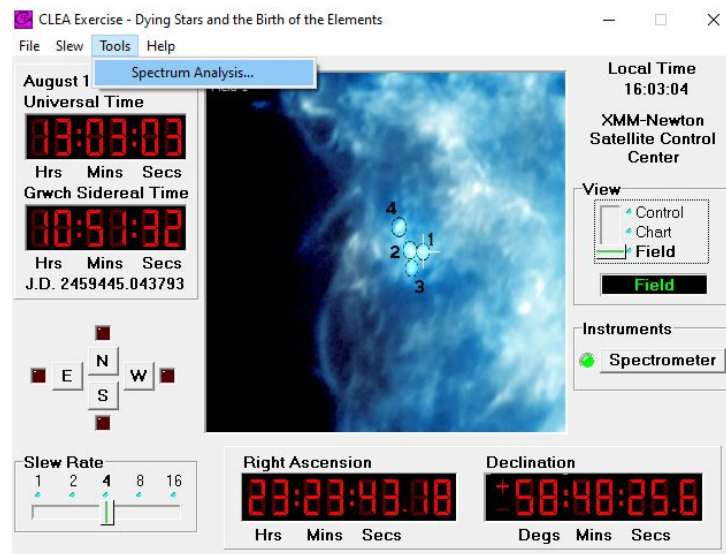


15. Após o espectro pronto, você deverá salvá-lo na área de trabalho, clicando em *File* → *Data* → *Save Spectrum*.

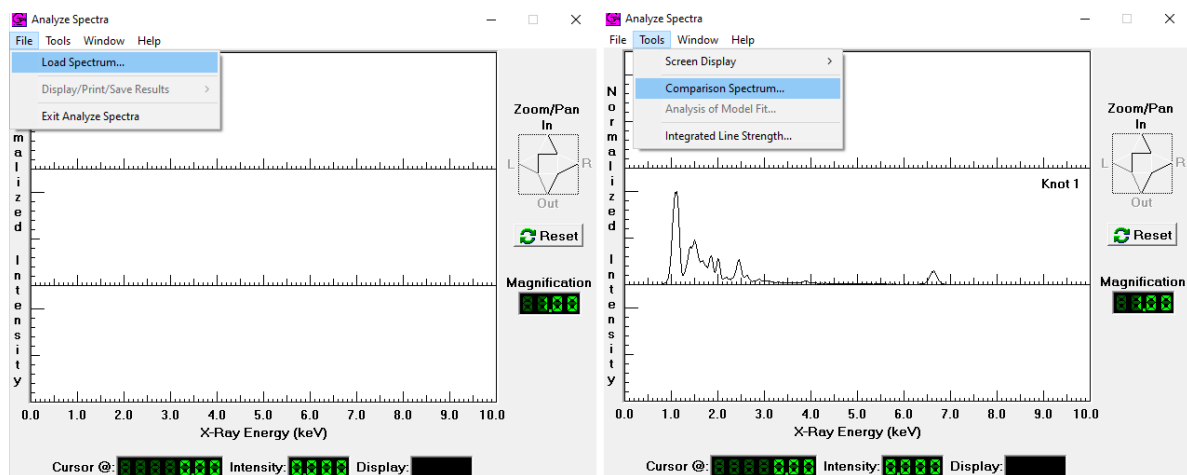


⁵ Esse campo da simulação indica o quanto de ruído (flutuação nos dados produzida por fatores que não se relacionam com o fenômeno estudado) o seu espectro terá. Logo, quanto mais próximo do valor indicado para essa atividade menor será o ruído de seu espectro.

16. Com o espectro salvo, vamos analisá-lo. Para isso devemos voltar para a tela inicial, clicar em *Tools* → *Spectrum Analysis*.

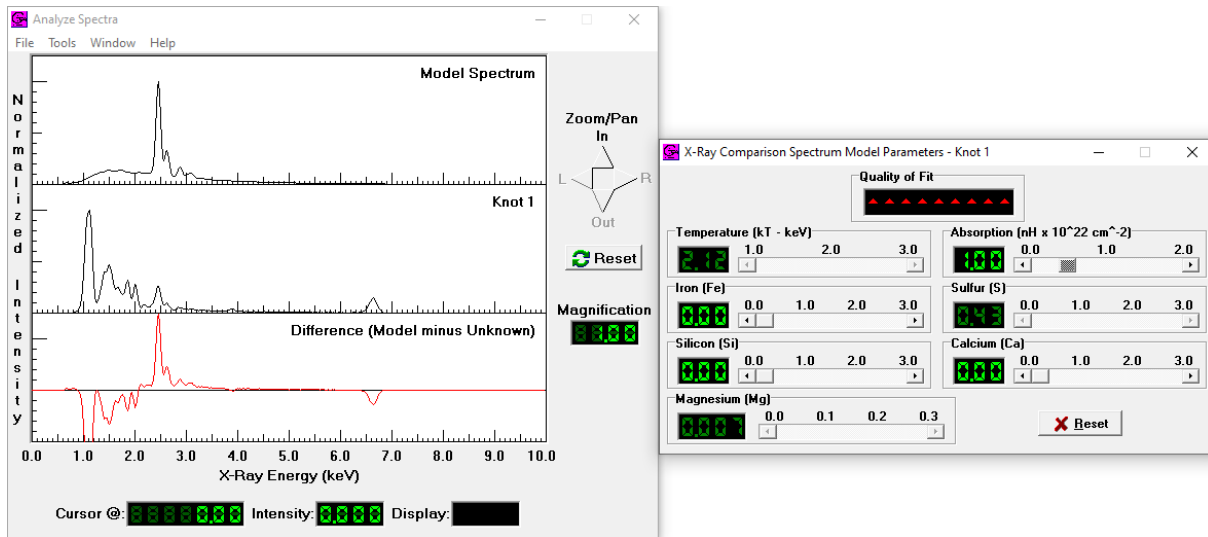


17. Assim que clicar em *Spectrum Analysis* aparecerá uma nova tela. Nessa tela clique em *File* → *Load Spectrum* para carregar o espectro que foi obtido pelo grupo. Após isso, na mesma tela clique em *Tools* → *Comparison Spectrum*.



18. Agora é a hora da análise do espectro!

Altere os valores de temperatura, absorção, ferro, silício, cálcio, magnésio e enxofre (no caso desses dois últimos, apenas se estiverem habilitados), até que o espectro da diferença (espectro vermelho) esteja o mais próximo da linha central e a Qualidade do Ajuste (*Quality of Fit*)⁶ tenha um valor o mais baixo possível.



19. Assim que finalizado, complete a Tabela disponibilizada abaixo.

| | Fe | S | Si | Ca | Mg | Qualidade do Ajuste |
|-----------------|----|---|----|----|----|---------------------|
| <i>Knot</i> --- | | | | | | |

⁶ Qualidade do Ajuste ou *Quality of Fit* é uma medida que mostra o quão bem o seu modelo se ajusta com um conjunto de dados. Quanto menor é o valor dessa medida, mais confiável é o modelo apresentado.

6.10 Roteiro do Professor(a)

Entendendo a Evolução de uma Estrela Massiva

Objetivo da Atividade: Fornecer aos alunos e alunas uma base para discutir sobre como a espectroscopia ajuda a entender a composição elementar de objetos astronômicos e discutir a partir das informações obtidas que diferentes partes de uma remanescente de supernova possuem diferentes condições físicas.

Pergunta Norteadora: Quais são os elementos químicos presentes na Remanescente de Supernova Cassiopeia A e quais processos físicos contribuem para o aumento da quantidade de Fe?

Materiais

- 1 Computador por grupo²²;
- *Software* contendo a atividade “*Dying Stars and the Birth of the Elements*” do projeto CLEA (*Contemporary Laboratory Experiences in Astronomy*)²³;

Como Fazer

- Separe a turma em grupos de no máximo 4 alunos;
- Baseado na quantidade de grupos, escolha aleatoriamente os pontos (*Knots*) de 1 a 4 e insira no passo 12 no *Roteiro de Atividade Prática*. É importante que os grupos possuam pontos diferentes para análise.

Exemplo:

12. Nesse momento, abrirá uma lista de pontos, clique duas vezes em ***Knot 3***, clique em *OK* e depois em *Sim*.

- Entregue o *Roteiro de Atividade Prática* para cada grupo e auxilie na atividade se necessário;

Gabarito - Tabela

| | Fe | S | Si | Ca | Mg |
|----------------------|------|------|------|------|-------|
| <i>Knot 1</i> | 1,29 | 0,43 | 0,40 | 0,64 | 0,007 |
| <i>Knot 2</i> | 0,72 | 0,30 | 0,29 | 0,53 | 0,075 |
| <i>Knot 3</i> | 2,67 | 0,97 | 1,34 | 2,41 | 0 |
| <i>Knot 4</i> | 1,09 | 0,28 | 0,32 | 0,70 | 0 |

²² Professor(a) o *software* é compatível apenas nos sistemas operacionais *Windows* e *Linux*.

²³ Link para Download: http://www3.gettysburg.edu/~marschal/clea/clea_products/pc/XMMLab.zip.

Gabarito - Questionário de Investigação

1. Explique brevemente o que representa o espectro resultante obtido (espectro vermelho).
O espectro resultante obtido é conhecido na estatística como espectro de resíduo ou espectro residual. Ele é um espectro resultante da subtração dos dados de um modelo pelos dados obtidos a partir de uma análise específica.
2. A partir dos dados do grupo, qual elemento possui maior intensidade. Utilizando uma tabela periódica, qual dos elementos encontrados é o mais “pesado”.
O Ferro, além de ser o elemento com maior intensidade em todos os casos, é o elemento mais pesado dentre os elementos apresentados.
3. Estudos na área da astrofísica mostram que a quantidade de Fe antes da explosão de uma estrela em Supernova é menor do que depois da explosão. A partir de quais processos físicos pode vir a aumentar a produção de Fe nessa fase da evolução de uma estrela massiva?
O ferro surge em maior quantidade nesse momento por causa das altas temperaturas e pressões devido a própria explosão da supernova. Elementos mais leves se fundem formando o ferro, enquanto os outros elementos se transformam em ferro por decaimento radioativo.

Observações Importantes

Os pontos aqui alertados são importantes e devem ser seguidos pelo(a) professor(a) para a realização da atividade. Os itens abaixo foram traduzidos e adaptados a partir do Manual do Software *CLEA - Dying Stars and the Birth of the Elements*²⁴.

- Caso a atividade seja feita presencialmente, assim que todos os grupos tiverem finalizado, você professor(a), poderá agrupar os resultados para compartilhar com a turma. Fazendo isso, poderá fornecer mais informações para que eles(as) possam responder as perguntas, além de trazer a discussão de que a ciência é resultado de um trabalho colaborativo.
Caso a atividade seja fornecida de forma a se realizar fora do ambiente escolar e longe de outros grupos, monte e compartilhe com a turma uma planilha eletrônica²⁵ com uma tabela de dados já padronizada, onde os grupos só precisam inserir os resultados encontrados.
- Peça aos(as) alunos(as) para alterarem um parâmetro de cada vez para ver como ele modifica individualmente o espectro.

²⁴ O manual original pode ser obtido em: http://public.gettysburg.edu/~marschal/clea/clea_products/manuals/XRaySNR_sm.pdf.

²⁵ Você poderá usar o Planilhas Google por exemplo.

- Se os(as) alunos(as) ficarem “travados” tentando conseguir bons ajustes, informe que eles(as) talvez precisem redefinir os valores utilizados. Para isso, o grupo deve começar a análise novamente, só que usando valores diferentes para os mesmos parâmetros.

Importante: Certifique-se de que eles anotaram os valores que foram utilizados quando ficaram “travados”. Dessa forma, eles poderão evitá-los após a reinicialização.

- Embora improvável, algum grupo pode encontrar um ajuste que parece bom, porém com valores “incorretos” para os parâmetros. Se isso acontecer, não diminua a nota do grupo (caso essa atividade resulte em uma nota)! Isso acontece com astrônomos e astrônomas profissionais também, ao tentar ajustar espectros de Raios-X, então use isso como uma aprendizagem para você e para o grupo: até os cientistas podem cometer erros.

7 BURACOS NEGROS

Buracos Negros é um tema que norteia a grande maioria das mentes curiosas de alunos(as) quando entra-se em conteúdos relacionados à Astronomia ou Física Moderna. Não é difícil de entender, já que é um assunto desconhecido entre as pessoas que não fazem parte da área científica e mesmo as que fazem, já acham algo assustador e incrível, assim como Stephen Hawking disse em uma palestra para a *BBC Reith Lectures* (Hawking, 2017).

“Dizem que às vezes a realidade é mais estranha que a ficção. Em nenhum lugar isso é mais verdadeiro que no caso dos buracos negros. Os buracos negros são mais estranhos que qualquer coisa já sonhada por escritores de ficção científica, mas são fatos do mundo da ciência.”

Esse capítulo finalizará o estudo do conteúdo de Física Moderna, utilizando Buracos Negros como tema norteador. Inicialmente vamos compreender a história por trás de todo o conhecimento adquirido até chegar ao que conhecemos hoje como Relatividade Restrita e Geral. Começaremos pelas Transformações de Galileu para entender posteriormente as Transformações de Lorentz. Com esse conteúdo esclarecido, vamos passar pelos Postulados de Einstein, Dilatação do Tempo e Contração do Espaço, Equivalência Massa-Energia, Efeito Doppler – Relativístico e por fim a Relatividade Restrita. Com todos esses conteúdos bem compreendidos, daremos início à Relatividade Geral, entendendo o Princípio da Equivalência, o Espaço-Tempo de Minkowski, a Curvatura do Espaço-Tempo, finalizando então a sequência de evolução de uma estrela de massa maior que 25 massas solares em um Buraco Negro.

7.1 Relatividade Restrita

Sabemos da mecânica clássica que as Leis de Newton (Inércia - Dinâmica - Ação e Reação), publicadas em *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* (1687), regem a maioria dos fenômenos conhecidos na natureza, as mesmas são invariantes (possuem a mesma forma não importando o referencial) e são válidas apenas em referenciais inerciais, logo, por definição, um referencial em que a própria Lei da Inércia é válida. Isso significa que a partícula nesse referencial deve permanecer em repouso ou em movimento retilíneo e uniforme (MRU) e não deve estar sujeita a forças externas a ela.

De acordo com a Lei da Inércia, temos que:

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a},$$

$$\vec{a} = 0 \rightarrow \vec{F} = 0.$$

O princípio de Galileu ou também conhecido como o princípio da relatividade de Galileu, nos possibilita fazer transformações de fenômenos que ocorrem em referenciais

inerciais para referenciais com velocidade relativa uniforme (em relação ao referencial inercial), em termos de suas coordenadas de espaço (x , y e z) e de tempo (t) (Serway e Jewett Jr, 2014).

Segundo o princípio de Galileu:

“As leis da mecânica são as mesmas em todos os referenciais inerciais.”

Considere então dois referenciais coincidentes e inerciais, apresentados na Figura 57:

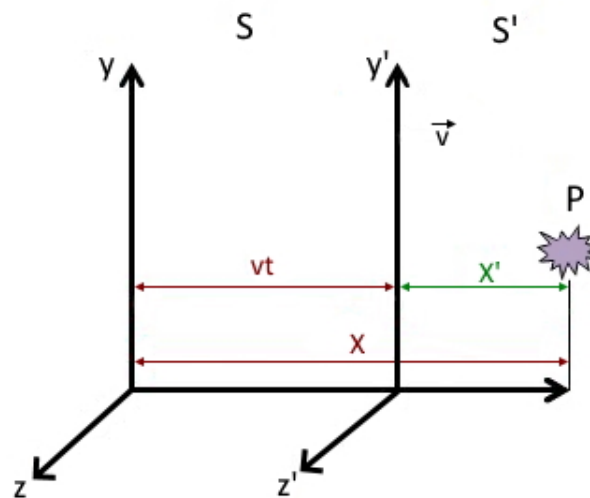


Figura 57 – Imagem representando dois referenciais inerciais S e S', onde ocorre um evento em um ponto P no momento em que S' está em movimento com velocidade \vec{v} .

Galileu então, fez as seguintes transformações a partir das coordenadas apresentadas:

$$x' = x - v \cdot t,$$

$$y' = y,$$

$$z' = z.$$

Para o tempo, foi adotado o que está previsto pela mecânica clássica, que independente da velocidade os relógios utilizados em ambos referenciais funcionam da mesma forma para os dois observadores ($t' = t$).

Logo, podemos perceber que dois observadores O e O', em seus respectivos referenciais, conseguem observar o mesmo evento segundo as equações de Galileu, mas sem a mudança no tempo, pois como dito anteriormente, os relógios em ambos referenciais funcionam igualmente.

Foi a partir dessa ideia que Einstein percebeu que as leis de Galileu-Newton eram válidas apenas para os sistemas de coordenadas galileanos, iniciando então novas ideias sobre a relatividade.

Fator de Contração de Lorentz-Fitzgerald

Hendrik Antoon Lorentz¹ (1853-1928) em 1892, apresentou matematicamente o que ele acreditava ser a solução para o resultado do experimento de Michelson-Morley, apresentado no Capítulo 4. A solução proposta se refere a um conjunto de equações que hoje são denominadas como Transformações de Lorentz² e são definidas por:

$$\begin{aligned}x' &= \gamma(x - v \cdot t), \\y' &= y, \\z' &= z, \\t' &= \gamma\left(t - \frac{v \cdot x}{c^2}\right),\end{aligned}\tag{7.1}$$

e sua transformação inversa:

$$\begin{aligned}x &= \gamma(x' + v \cdot t'), \\y &= y', \\z &= z', \\t &= \gamma\left(t' + \frac{v \cdot x'}{c^2}\right),\end{aligned}\tag{7.2}$$

sendo $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ denominado como o fator de Lorentz e v a velocidade do referencial inercial S' conforme apresentado na Figura 7.1 (Weyl, 1958).

Em seu artigo, Lorentz faz menção a George Francis FitzGerald (1851 – 1901) que na época informou que já estava testando essa mesma hipótese para justificar a falha no experimento de Michelson-Morley, pois assim como ele, FitzGerald também queria justificar matematicamente a existência do Éter Luminífero. Percebe-se que as equações obtidas são muito próximas das transformações já definidas por Galileu, com a exceção do tempo que passa a depender do referencial (t e t') e da coordenada x que passa a depender do fator de Lorentz e do tempo no referencial S' .

Dessa forma, é possível reparar que o espaço e o tempo estão completamente ligados (o que será chamado por Einstein posteriormente como espaço-tempo) e que um determinado evento pode ser observado em dois referenciais inerciais diferentes, não significando que o mesmo ocorreu de forma simultânea (Pereira e Mizukoshi, 2019). Isso nos leva a entender a não simultaneidade dos eventos, consequência estudada por Einstein no caso de movimentos de corpos com velocidades próximas à da Luz, encontrando então explicações que serão exploradas a partir dos tópicos a seguir.

¹ <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1902/summary/>.

² Um exemplo da dedução matemática das Transformações de Lorentz pode ser visto em: <https://progp.ufabc.edu.br/mnpef-sites/relatividade-restrita/relatividade-restrita-equacoes-do-movimento/>.

Os Postulados de Einstein

Em 1905, Einstein publicou um artigo sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento, onde ele apresenta os dois postulados mais importantes da relatividade restrita (Weyl, 1958):

1º Postulado: todos os sistemas de coordenadas em que são válidas as equações da mecânica, também são igualmente válidas as leis ópticas e eletrodinâmicas da mesma forma.

2º Postulado: a luz, no espaço vazio, se propaga sempre com uma velocidade determinada, independente do estado de movimento da fonte luminosa.

O primeiro postulado conhecido posteriormente como “O Princípio da Relatividade”, generaliza o princípio da relatividade de Galileu, estendendo as leis da física (mecânica e eletromagnética) sendo iguais em todos os referenciais inerciais. Já o segundo postulado, denominado posteriormente como “A Constância da Velocidade da Luz”, mostra uma breve descrição de todo tipo de onda eletromagnética, impondo que a velocidade da Luz é única e constante em todos os referenciais inerciais (Serway e Jewett Jr, 2014).

Dilatação do Tempo

Como consequência do segundo postulado de Einstein, que diz que a velocidade da Luz é a única grandeza absoluta constante em qualquer referencial inercial, apresenta-se a dilatação do tempo. Para melhor compreender esse tema, é proposto o seguinte exercício mental. Considere dois observadores, um deles (O) está no referencial da Terra e o outro (O') estará em um referencial dentro de uma nave espacial. Ocorre que em determinado momento, O' resolve apontar uma caneta laser para o teto da nave e como se fosse possível, ele observa o caminho de um fóton subindo e descendo conforme a Figura 58.

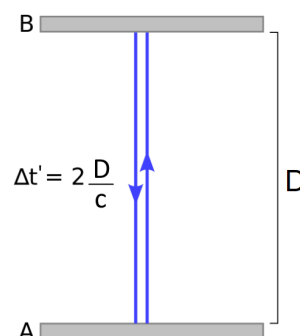


Figura 58 – Caminho percorrido pelo fóton dentro da nave citada no exemplo ilustrando a dilatação no tempo³.

Mas não é apenas o observador O' que consegue perceber esse fóton, o observador O no referencial da Terra também percebe o caminho realizado pelo mesmo fóton conforme é apresentado na Figura 59.

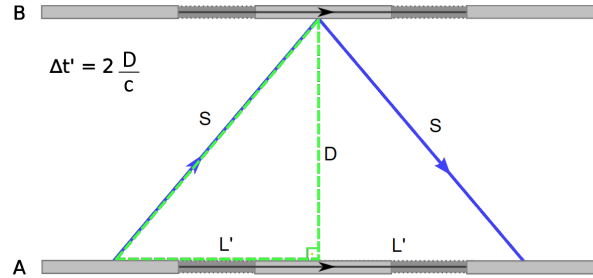


Figura 59 – Caminho do fóton e da nave observado no referencial da Terra³.

Para analisar o tempo medido pelos dois observadores, utilizando uma equação conhecida da cinemática ($v = \frac{\Delta S}{\Delta t}$), considerando L' a distância percorrida pela nave e S o caminho percorrido pelo fóton dentro da nave.

Para a nave:

$$v = \frac{\Delta S}{\Delta t} \rightarrow v = \frac{2L'}{\Delta t} \therefore L' = \frac{v \cdot \Delta t}{2}.$$

Para o fóton:

$$c = \frac{\Delta S}{\Delta t} \rightarrow v = \frac{2S}{\Delta t} \therefore S = \frac{c \cdot \Delta t}{2}.$$

Pelo Teorema de Pitágoras, temos que:

$$\begin{aligned} D^2 + L'^2 &= S^2, \\ D^2 + \left(\frac{v \cdot \Delta t}{2}\right)^2 &= \left(\frac{c \cdot \Delta t}{2}\right)^2, \\ \Delta t &= \sqrt{\frac{4D^2}{(c^2 - v^2)}} \therefore \Delta t = \frac{2D}{\sqrt{c^2 - v^2}}. \end{aligned}$$

Então:

$$\Delta t = \frac{2D}{\sqrt{c^2 (1 - \frac{v^2}{c^2})}} = \frac{2D}{c\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (7.3)$$

Substituindo $\Delta t' = \frac{2D}{c}$ na Equação 7.3:

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (7.4)$$

Por fim, substituindo o fator de Lorentz na Equação 7.4, temos que:

$$\Delta t = \gamma \cdot \Delta t'. \quad (7.5)$$

Sendo Δt o tempo medido em relação ao observador na Terra, $\Delta t'$ o tempo medido em relação ao observador dentro da nave e v a velocidade da nave, esse resultado apresenta

³ Crédito da Imagem: https://en.wikipedia.org/wiki/Time_dilation.

a dilatação do tempo, mostrando que a variação do tempo (Δt) medida por O é sempre maior que a variação do tempo ($\Delta t'$) medida por O', pois γ é sempre maior que um. Pode-se concluir dessa forma que relógios em movimento funcionam mais devagar que relógios em repouso (Serway e Jewett Jr, 2014; Ferraro et al., 2018; Griffiths, 1999).

Contração do Espaço

Outra consequência do segundo postulado de Einstein, é a contração do espaço, que pode ser explicado de forma bem simples com uma ideia de que uma régua pode ser medida por dois observadores em referenciais diferentes e eles terão resultados diferentes.

Para analisar isso matematicamente, consideramos L o comprimento medido por um observador no referencial na Terra (O) e L' o comprimento medido por um astronauta com o referencial na nave.

Da cinemática tem-se novamente:

$$v = \frac{\Delta S}{\Delta t}.$$

Para um observador na Terra:

$$c = \frac{L}{\Delta t}.$$

Para o astronauta na nave:

$$c = \frac{L'}{\Delta t'}.$$

Como a velocidade da luz é a mesma, tem-se que:

$$\frac{L}{\Delta t} = \frac{L'}{\Delta t'},$$

obtendo:

$$L = \frac{\Delta t}{\Delta t'} L'. \quad (7.6)$$

Pode-se substituir a Equação 7.5 na Equação 7.6, obtendo por fim:

$$L = \gamma \cdot L'. \quad (7.7)$$

Dessa forma, é possível concluir que para um observador que está conectado no mesmo referencial que a régua (referencial na Terra), ela preservará o seu tamanho natural, portanto a régua será observada em seu real comprimento, já para um observador que está em um referencial que possui uma velocidade relativa à régua (referencial em uma nave), observará a mesma com um comprimento menor do que seu tamanho natural (Serway e Jewett Jr, 2014; Ferraro et al., 2018; Griffiths, 1999; Tipler e Llewellyn, 2014).

Lei Relativística da Adição de Velocidades

Assim como já foi visto que o tempo e o espaço estão interligados, não é estranho se pensar que essa ligação afetará também a velocidade de um determinado evento observada em diferentes referenciais.

Dessa forma, considerando novamente um evento que ocorre conforme a Figura 60, observa-se agora que esse evento está sob as consequências da relatividade restrita, logo o tempo e o espaço são relativos. Para facilitar, será denominado como evento, o movimento de um fóton que ocorre no referencial S' .

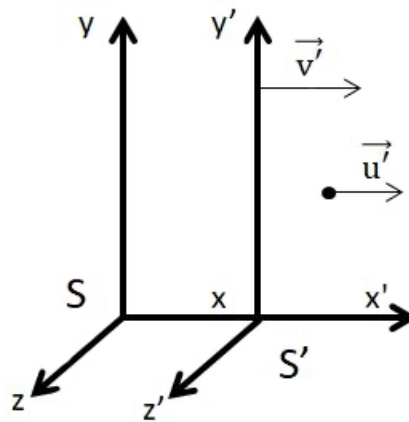


Figura 60 – Imagem representando dois referenciais inerciais S e S' . O referencial S está em repouso enquanto S' está com velocidade \vec{v}' . Além disso, um fóton no referencial S' se movimenta com velocidade \vec{u}' .

A velocidade u desse fóton para um observador no referencial S é dada por:

$$u = \frac{\Delta x}{\Delta t}. \quad (7.8)$$

Utilizando a transformação inversa de Lorentz obtida na Equação 7.2, temos que:

$$\Delta x = \gamma(\Delta x' + u'\Delta t'), \quad (7.9)$$

e

$$\Delta t = \gamma\left(\Delta t' + \frac{u'\Delta t'}{c^2}\right). \quad (7.10)$$

Substituindo as Equações 7.9 e 7.10 na Equação 7.8:

$$u = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{\gamma(\Delta x' + u'\Delta t')}{\gamma(\Delta t' + \frac{u'\Delta t'}{c^2})}.$$

Dividindo tanto o nominador como o denominador por $\Delta t'$, temos:

$$u = \frac{\frac{\Delta x'}{\Delta t'} + u'}{1 + \frac{u'}{c^2} \frac{\Delta x'}{\Delta t'}}.$$

Portanto, a velocidade u do fóton para um observador no referencial S é dada por:

$$u = \frac{v' + u'}{1 + \frac{v'u'}{c^2}},$$

com v' sendo a velocidade do referencial S' e u' a velocidade do fóton.

Concluimos então que a adição da velocidade dada pela mecânica clássica é válida apenas para corpos em movimento com velocidades muito pequenas em relação à velocidade da luz, significando que não é uma lei exata e que depende necessariamente da velocidade do corpo em questão (Einstein, 2003).

Equivalência Massa-Energia

A segunda lei de Newton ou lei da dinâmica, diz que a força resultante é o produto da massa pela aceleração de um corpo:

$$F = m \cdot a = \frac{d(mv)}{dt}. \quad (7.11)$$

Considerando uma partícula que se move apenas em sua direção x, teremos $v_y = 0$ e $v_z = 0$, portanto, a força na coordenada x será:

$$F_x = \frac{d}{dt}(mv_x). \quad (7.12)$$

A partir da mecânica clássica, o trabalho realizado por uma força em um deslocamento, é definido de duas maneiras. A primeira maneira diz que o trabalho é dado pelo produto da força pelo deslocamento de um corpo e a segunda maneira diz que o trabalho é dado pela variação da energia cinética. Dessa forma, considerando um infinitésimo de deslocamento de uma certa partícula (dx), temos que:

$$\tau = F_x \cdot dx, \quad (7.13)$$

e

$$\tau = dE. \quad (7.14)$$

Igualando as Equações 7.13 e 7.14, temos que:

$$dE = F_x \cdot dx. \quad (7.15)$$

Supondo que a força é constante e diferenciando a Equação 7.15 no tempo:

$$\frac{dE}{dt} = F_x \frac{dx}{dt}. \quad (7.16)$$

Sabendo que $\frac{dx}{dt} = v_x$ e substituindo a Equação 7.12 na Equação 7.16, temos que:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{d}{dt}(mv_x)v_x = \left(m \frac{dv_x}{dt} + \frac{dm}{dt}v_x \right) v_x,$$

$$\frac{dE}{dt} = mv_x \frac{dv_x}{dt} + \frac{dm}{dt} v_x^2. \quad (7.17)$$

Considerando que a variação da massa com o tempo é dada por:

$$m(v_x) = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v_x^2}{c^2}}} = \gamma \cdot m_0. \quad (7.18)$$

Derivando a Equação 7.18 temos:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{m_0}{c^2 \left(1 - \frac{v_x^2}{c^2}\right)^{\frac{3}{2}}} v_x \frac{dv_x}{dt}. \quad (7.19)$$

Substituindo as Equações 7.18 e 7.19 em 7.17:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{m_0}{\left(1 - \frac{v_x^2}{c^2}\right)^{\frac{1}{2}}} v_x \frac{dv_x}{dt} + \frac{m_0}{c^2 \left(1 - \frac{v_x^2}{c^2}\right)^{\frac{3}{2}}} v_x^3 \frac{dv_x}{dt},$$

isolando

$$\frac{m_0}{c^2 \left(1 - \frac{v_x^2}{c^2}\right)^{\frac{1}{2}}} v_x \frac{dv_x}{dt},$$

temos:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{m_0}{c^2 \left(1 - \frac{v_x^2}{c^2}\right)^{\frac{1}{2}}} v_x \frac{dv_x}{dt} \left(c^2 + \frac{v_x^2}{1 - \frac{v_x^2}{c^2}} \right). \quad (7.20)$$

Resolvendo apenas o que está dentro dos parenteses:

$$c^2 + \frac{v_x^2}{1 - \frac{v_x^2}{c^2}} = \frac{c^2 \left(1 - \frac{v_x^2}{c^2}\right) + v_x^2}{\left(1 - \frac{v_x^2}{c^2}\right)} \therefore \frac{c^2}{1 - \frac{v_x^2}{c^2}}. \quad (7.21)$$

Aplicando o resultado da Equação 7.21 na Equação 7.20, temos que:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{m_0 v_x}{\left(1 - \frac{v_x^2}{c^2}\right)^{\frac{3}{2}}} \frac{dv_x}{dt}. \quad (7.22)$$

Obtendo por fim a igualdade abaixo substituindo a Equação 7.19 na Equação 7.22:

$$\frac{dE}{dt} = c^2 \frac{dm}{dt}. \quad (7.23)$$

Integrando a equação 7.23, temos:

$$\int \frac{dE}{dt} = c^2 \int \frac{dm}{dt},$$

portanto:

$$E = mc^2 + \text{constante}.$$

Considerando a constante igual a zero (partícula em repouso), é possível chegar na conhecida equação:

$$E = mc^2. \quad (7.24)$$

A partir dessa equação, Einstein mostrou a dualidade massa-energia, logo, pode-se verificar que a energia pode ser convertida em massa e vice-versa. Se a partícula está em movimento, temos que a energia depende do fator de Lorentz:

$$E_T = \gamma mc^2. \quad (7.25)$$

Sabendo que essa é a energia total da partícula e usando as Equações 7.24 e 7.25, é possível calcular a Energia Cinética dessa partícula como:

$$\begin{aligned} E_T &= E + E_C, \\ \gamma mc^2 &= mc^2 + E_C, \\ E_C &= \gamma mc^2 - mc^2, \end{aligned}$$

logo:

$$E_C = (\gamma - 1)mc^2. \quad (7.26)$$

Com esse resultado podemos observar a conservação da massa-energia, diferentemente da mecânica clássica que propõe que massa e energia se conservam independentes uma da outra (Marder, 1970).

Efeito Doppler Relativístico

O Efeito Doppler ocorre quando há variação da frequência de onda observada devido ao movimento da fonte ou do observador a uma dada velocidade. Para o caso de ondas mecânicas, há sempre um meio onde essa onda se propaga. Com o exemplo conhecido para estudar esse tipo de efeito, considere uma ambulância com a sua sirene ligada e se aproximando de um observador parado, o mesmo escutará o som dessa sirene cada vez mais agudo e quando a ambulância se afastar o som ficará mais grave.

Pode-se então demonstrar a frequência da luz tanto de aproximação, utilizando as Equações 7.27 ou 7.28, quanto de afastamento utilizando as Equações 7.29 ou 7.30.

Para aproximação:

$$f_{emitida} = \sqrt{\frac{1 + \beta}{1 - \beta}} \cdot f_{observada}, \quad (7.27)$$

ou

$$\lambda_{observada} = \sqrt{\frac{1 + \beta}{1 - \beta}} \cdot \lambda_{emitida}. \quad (7.28)$$

Para afastamento:

$$f_{emitida} = \sqrt{\frac{1 - \beta}{1 + \beta}} \cdot f_{observada}, \quad (7.29)$$

ou

$$\lambda_{observada} = \sqrt{\frac{1 - \beta}{1 + \beta}} \cdot \lambda_{emitida}. \quad (7.30)$$

com $\beta = \frac{v}{c}$, $f_{emitida}$ sendo a frequência da luz emitida (a mesma que seria observada em repouso) e $f_{observada}$ sendo a frequência da luz detectada pelo observador.

Avaliando a variação das frequências obtidas a partir da luz de uma estrela, pode-se estimar por exemplo, se essa estrela está se afastando ($f_{observada} < f_{emitida}$), onde chamamos de desvio para o vermelho ou em inglês *Redshift* ou se essa estrela está se aproximando ($f_{observada} > f_{emitida}$), onde chamamos de desvio para o azul ou em inglês *Blueshift*, dessa forma, é possível obter o desvio para o Vermelho (*Redshift*), a partir da Equação 7.31:

$$Z = \frac{\lambda_{observada} - \lambda_{emitida}}{\lambda_{emitida}} = \frac{v}{c}, \quad (7.31)$$

com Z sendo o *Redshift*, v sendo a velocidade da estrela e c a velocidade da luz. Com isso, é possível analisar não somente se uma estrela está se afastando em relação à Terra mas também se galáxias estão no mesmo processo.

7.2 Relatividade Geral

Enquanto a Relatividade Restrita trabalha apenas com referenciais inerciais, a Relatividade Geral trabalha com referenciais não inerciais, portanto, referenciais acelerados.

O Princípio da Equivalência

Em 1916, Einstein publicou em seu artigo uma solução para explicar as duas propriedades físicas de massa que aparece tanto na lei da gravitação universal ($F = \frac{GMm}{r^2}$) quanto na segunda lei de Newton ($F = m \cdot a$), gerando então sua própria lei da gravitação, a Teoria da Relatividade Geral.

Com essa teoria, Einstein enunciou o seguinte postulado (Weyl, 1958):

“As leis da física devem ter uma estrutura tal que a sua validade permaneça em sistemas de referência animados de qualquer movimento.”

Que pode ser explicado como o terceiro postulado de Einstein, onde ele apresenta o Princípio da Equivalência (Tipler e Llewellyn, 2014):

“Um campo gravitacional homogêneo é equivalente, sob todos os aspectos, a um referencial uniformemente acelerado.”

Para entender esse princípio, considere a seguinte situação: você professor(a), está dentro de um foguete e tanto ele quanto você estão em repouso na Terra. Você solta uma bolinha de uma determinada altura h e você acompanha essa bolinha caindo até encostar no chão. Você já está acostumado(a) a ver isso toda vez que vai explicar o tema gravidade. Mas agora considere a mesma situação, só que dessa vez o foguete está em movimento vertical para cima com a velocidade aproximadamente igual à da luz. Nesse

momento você volta a soltar a bolinha, lembrando que dentro do foguete você está livre da ação gravitacional, percebendo então que a bolinha tem um comportamento exatamente igual à situação de quando o foguete estava parado. Isso significa que o Princípio da Equivalência é válido, logo a gravidade é equivalente à aceleração desse foguete.

O Espaço-Tempo de Minkowski

É comum quando falamos de espaço, a ideia de que estamos falando de algo tridimensional em coordenadas cartesianas x , y e z e quando queremos mudar de um ponto a outro, podemos então considerar qualquer ponto dessas coordenadas e denominá-los como x_1 , y_1 e z_1 .

Durante uma palestra ministrada em 21 de setembro de 1908, Hermann Minkowski (1864 – 1909) apresentou uma nova ideia sobre posições e coordenadas. Nesta proposta, não mais teríamos o espaço propriamente dito como coordenadas tridimensionais, mas teríamos um novo elemento, já conhecido separadamente como o tempo (Weyl, 1958).

“Meus senhores: As considerações sobre espaço e tempo que desejo expor-vos brotaram do terreno da física experimental. Aí reside a sua força. A sua tendência é radical. Daqui em diante os conceitos de espaço e de tempo, considerados como autônomos, vão desvanecer-se como sombras e somente se reconhecerá existência independente a uma espécie de união entre os dois (Weyl, 1958).”

Assim, surge a ideia de um espaço quadridimensional onde suas coordenadas são x , y , z e t (x , y e z das coordenadas cartesianas e o t do tempo).

A Curvatura do Espaço-Tempo

A Relatividade Geral nos explica que se um objeto de grande massa está em uma região do espaço, todos os corpos próximos a ele sentirão uma atração gravitacional e que será tão forte quanto maior é a massa desse objeto que estará neste local. Essa força de atração não é a que conhecemos a partir da mecânica clássica de Newton, para Einstein a ação gravitacional é a curvatura do espaço-tempo criada a partir de corpos com densidade elevada e é essa curvatura que define as órbitas em que corpos a uma dada velocidade permanecem ao redor do objeto de maior massa. Um exemplo sobre a curvatura do espaço-tempo pode ser observado na ilustração apresentada na Figura 61.

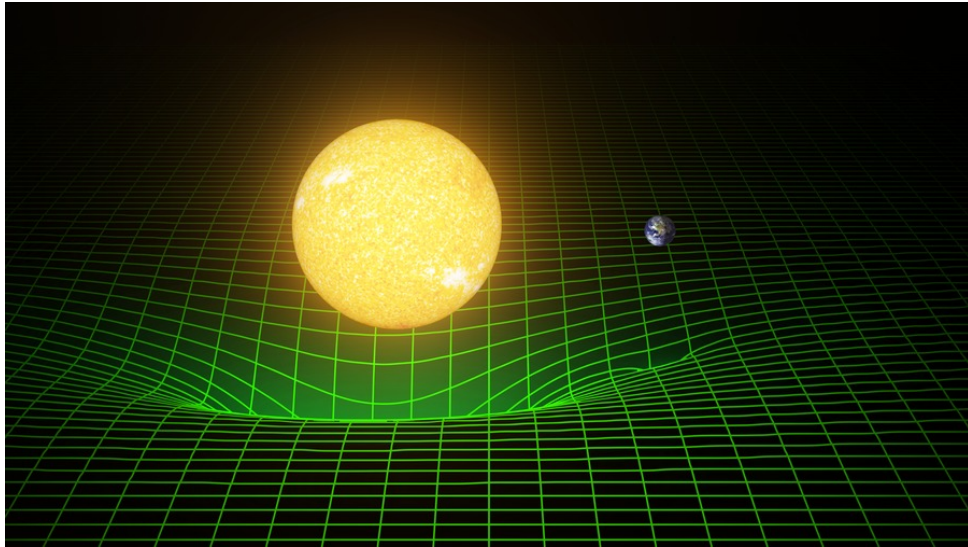


Figura 61 – Representação da distorção da malha espaço-tempo tendo como base o Sol e a Terra. Imagem sem escala e em cores fantasia⁴.

Uma ótima explicação colocada no livro de Carroll e Ostlie (2007), resume exatamente a ideia de Einstein:

“A massa age no espaço-tempo, dizendo a ele como se curvar e a curvatura do espaço-tempo age na massa, dizendo a ela como se mover (Carroll e Ostlie, 2007).”

Einstein também apresentou que relógios e suas “contagens” do tempo podem ser alterados na presença de campo gravitacional. Um relógio em um campo gravitacional funciona mais lentamente do que um relógio livre de gravidade. Dessa forma projetos de equipamentos modernos como o GPS, devem levar em conta a Relatividade Geral para que tenham o máximo de precisão possível em suas medidas de tempo (Tipler e Llewellyn, 2014; Weyl, 1958).

7.3 Buracos Negros

Buracos Negros são objetos astronômicos extremamente compactos, que possuem densidades muito altas e que a deformação no espaço ao seu redor chega a níveis tão altos que nem a luz consegue escapar. Um buraco negro é formado a partir da explosão de uma supernova, que ocorre após o colapso gravitacional de uma estrela de massa muito alta (maior que 25 massas solares). Em sistemas binários em que uma das componentes seja um objeto compacto (anã branca ou estrela de nêutrons) a passagem de matéria da companheira para a estrela compacta pode também acarretar em uma explosão de super-

⁴ Crédito da Imagem: T. Pyle/Caltech/MIT/LIGO Lab - <https://caltechletters.org/science/window-into-universe>.

nova. Neste caso, o resultado pode ser a desintegração total do sistema, ou a formação de um buraco negro (Carroll e Ostlie, 2007).

Até o momento as formas de detecção desses objetos são indiretas. Como a luz não escapa dos buracos negros, não é possível visualizá-los diretamente com um telescópio, por exemplo. Então como identificar um buraco negro em uma região do Universo?

Tomando-se o espectro das estrelas que estejam sob ação gravitacional do buraco negro, é possível notar rápidas e periódicas variações na posição do conjunto de linhas espectrais. Em seu movimento orbital, ora as estrelas se afastam do observador, e em outro período se aproximam. Pelo efeito Doppler Relativístico é possível analisar a velocidade orbital da estrela. Considerando as altas velocidades envolvidas e o pequeno raio da órbita, é possível estimar a massa do buraco negro, necessária para manter as estrelas presas em sua órbita (Horvath et al., 2011).

As Soluções de Schwarzschild

Sabe-se a partir da Relatividade Geral, que um objeto de massa muito elevada, pode distorcer o espaço-tempo, fazendo com que objetos próximos, obrigatoriamente orbitem ao seu redor.

Para explicar a curvatura do espaço-tempo de um buraco negro, Karl Schwarzschild (1873 – 1916), utilizou a teoria da Relatividade Geral para propor duas regiões relacionadas a um buraco negro, denominados posteriormente como Horizonte de Eventos e Ponto de Singularidade. O horizonte de eventos é uma região imaginária que limita o espaço ao redor de um buraco negro onde a força da gravidade (deformação do espaço) é tão grande que nada consegue escapar.

A interação de um estrela orbitando ao redor de um buraco negro é um ótimo exemplo do que pode ocorrer quando algo ultrapassa a região do espaço conhecida como horizonte de eventos. Ao orbitar, a estrela perde seu gás, pois o mesmo é atraído de forma espiralada em direção ao centro do buraco negro, formando o que é conhecido como disco de acreção, conforme representado na Figura 62.

O ponto de singularidade é um ponto imaginário dentro de um buraco negro em que a densidade de matéria tende ao infinito, enquanto seu raio tende a zero (Friaça et al., 2000), com isso, as leis da física não funcionam como deveriam nessa pequena região.

A distância que liga a fronteira do horizonte de eventos ao ponto de singularidade de um buraco negro, foi deduzida por Schwarzschild e pode ser explicada por meio de uma teoria conhecida no ensino médio. A partir da conservação da energia mecânica é possível determinar a velocidade de escape de um objeto, necessária para que ele consiga ultrapassar o horizonte de eventos. Considerando que a energia cinética inicial seja igual

⁵ Crédito da Imagem: https://en.wikipedia.org/wiki/Accretion_disk.

⁶ Crédito da Imagem (Adaptada): https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CNX_UPhysics_13_07_spacetime.png.

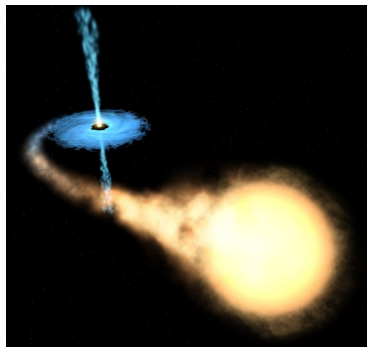


Figura 62 – Concepção artística de um sistema com um Buraco Negro e uma estrela. O gás estelar é atraído de forma espiralada enquanto a estrela orbita ao redor do Buraco Negro⁵.

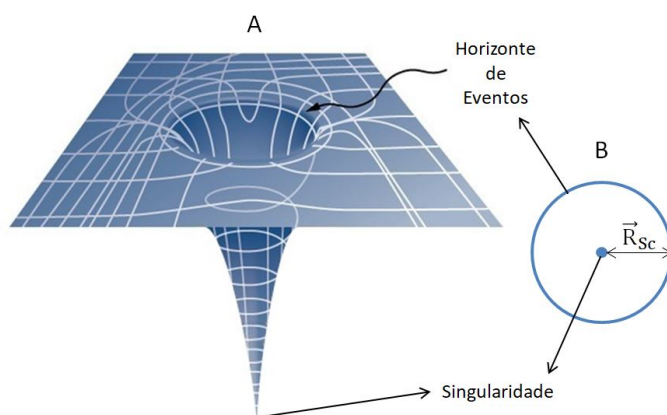


Figura 63 – Representação gráfica de um Buraco Negro com seu Horizonte de Eventos e seu Ponto de Singularidade. Na imagem A é possível observar a distorção do espaço-tempo em três dimensões. A imagem B mostra, no plano bidimensional, o raio que define o Horizonte de Eventos (R_{Sc}) e a posição central que corresponde ao ponto de singularidade⁶.

a energia potencial inicial (já que as duas energias finais são iguais a zero), temos que:

$$\begin{aligned}
 E_C &= E_P, \\
 \frac{1}{2}mv_e^2 &= \frac{GMm}{R}, \\
 v_e^2 &= \frac{2GM}{R}.
 \end{aligned} \tag{7.32}$$

Se usarmos a Equação 7.32, e colocarmos a velocidade de escape igual a velocidade da luz ($v_e = c$), teremos então o raio de Schwarzschild:

$$R_{Sc} = \frac{2GM}{c^2}. \tag{7.33}$$

Dessa forma, o raio de Schwarzschild (R_{Sc}) define o tamanho da região esférica dentro da qual a velocidade de escape é maior que a velocidade da luz. Essa é a explicação para o nome de buraco negro para a estrela que, após a explosão de supernova, colapsou atingindo um tamanho menor que R_{Sc} (Carroll e Ostlie, 2007).

7.4 Exercícios - Buracos Negros

1. (OBA - Nível III - 2001) **A Relatividade**

Uma das maiores manifestações da criatividade humana é, sem dúvida nenhuma, a Teoria da Relatividade Proposta por Albert Einstein. Sua ideia geral está contida, embora de forma simplificada, na expressão seguinte:

Assim como os observadores em diferentes localidades têm diferentes perspectivas espaciais do Universo, os observadores com velocidades diferentes têm diferentes perspectivas temporais.

Qual o significado físico desta expressão?

2. Considere que o *Redshift* observado de uma estrela que orbita um Buraco Negro é igual a 0,0004. Calcule sua velocidade radial, considerando a velocidade da luz no vácuo igual a $3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s}$.

3. (UEG - 2006 - Adaptada) “Buraco negro” é o nome dado a regiões do espaço sideral de onde radiotelescópios não captam nenhuma emissão de ondas eletromagnéticas. A designação “negro” vem do fato de que nenhuma luz emana daquele local. A astronomia detectou que há um fluxo intenso de radiação eletromagnética e de matéria para dentro do buraco negro que, portanto, não é vazio e sim hiperdenso em termos de concentração de massa e energia. O fato de que não sai luz visível de um buraco negro pode ser associado a qual das seguintes alternativas?
 - a) Por ser hiperdenso, o “buraco negro” tem a capacidade de emitir todas as cores de luz, formando uma mistura de cor “negra”.
 - b) A forte concentração de nêutrons no buraco negro não permite a saída de luz por causa da atração eletrostática.
 - c) Mesmo que muito pequena, a luz tem uma massa associada a ela e fica presa ao “buraco negro” pela forte atração gravitacional.
 - d) O “buraco negro” tem temperatura próxima ao zero absoluto e, por isso, não emite radiação alguma.
 - e) Devido a gravidade ao seu redor ser extremamente alta a luz não consegue “fugir”.

4. O que é Horizonte de Eventos? Qual seria o raio em km do Horizonte de Eventos de um Buraco Negro de massa igual a:

- a) $1M_{\odot}$;
- b) $5M_{\odot}$;
- c) $10M_{\odot}$;

Dados Importantes: $1 M_{\odot} = 1,9891 \cdot 10^{30} kg$, $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{N \cdot m^2}{kg^2}$ e $c = 3 \cdot 10^8 m/s$.

5. (ITA - 1999) O raio do horizonte de eventos de um buraco negro corresponde à esfera dentro da qual nada, nem mesmo a luz, escapa da atração gravitacional por ele exercida. Por coincidência, esse raio pode ser calculado não relativisticamente como o raio para o qual a velocidade de escape é igual à velocidade da luz. Qual deve ser o raio do horizonte de eventos de um buraco negro com uma massa igual à massa da Terra?

Dados:

Massa da Terra: $6,0 \cdot 10^{24} kg$

Velocidade da luz no vácuo: $3,0 \cdot 10^8 m/s$

Constante de gravitação universal: $6,67 \cdot 10^{-11} N \cdot m^2/kg^2$

- a) $9 \mu m$.
- b) $9 mm$.
- c) $30 cm$.
- d) $90 cm$.
- e) $3 km$.

7.5 Gabarito - Buracos Negros

Nota ao(à) professor(a): As questões fornecidas foram extraídas de provas oficiais.

Caso sejam adaptadas, é importante ressaltar que seu conteúdo principal não foi alterado.

1. (OBA - Nível III - 2001⁷) Várias possibilidades podem ser enxergadas como respostas. Nossa visão do Universo, tanto espacial quanto temporal, depende do referencial de onde estamos fazendo nossas observações. Depende também se este referencial está em repouso ou em movimento.

Assim como nossa perspectiva visual depende do referencial, ou seja, do lugar de onde fazemos nossas observações, o tempo pode se mostrar diferente para observadores com movimento relativo.

2. Sendo o *Redshift* observado igual a $Z = 4 \cdot 10^{-4}$ e a velocidade da Luz no vácuo aproximadamente igual a $3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s}$, temos que a velocidade radial é dada por:

$$Z = \frac{v}{c} \rightarrow v = Z \cdot c$$

$$v = 4 \cdot 10^{-4} \cdot 3 \cdot 10^8 = 1,2 \cdot 10^5 \text{ m/s}$$

3. (UEG - 2006 - Adaptada⁸) Alternativa E.

Como informado no texto, Buracos Negros são hiperdensos em termos de concentração de massa e energia, dessa forma a gravidade em seu interior é muito grande, fazendo com que nem a Luz consiga escapar dele.

4. a) $1M_{\odot}$;

$$R_{Sc} = \frac{2 \cdot G \cdot M}{c^2} = \frac{2 \cdot 6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 1,9891 \cdot 10^{30}}{(3 \cdot 10^8)^2} = 2948,3 \text{ m} = 2,9 \text{ km}$$

- b) $5M_{\odot}$;

$$R_{Sc} = \frac{2 \cdot G \cdot M}{c^2} = \frac{2 \cdot 6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 5 \cdot 1,9891 \cdot 10^{30}}{(3 \cdot 10^8)^2} = 14741,4 \text{ m} = 14,7 \text{ km}$$

- c) $10M_{\odot}$;

$$R_{Sc} = \frac{2 \cdot G \cdot M}{c^2} = \frac{2 \cdot 6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 10 \cdot 1,9891 \cdot 10^{30}}{(3 \cdot 10^8)^2} = 29482,9 \text{ m} = 29,5 \text{ km}$$

5. (ITA - 1999) Alternativa B.

$$R_{Sc} = \frac{2 \cdot G \cdot M}{c^2} = \frac{2 \cdot 6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 6 \cdot 10^{24}}{(3 \cdot 10^8)^2} = 8,9 \cdot 10^{-3} \text{ m} \approx 9 \text{ mm}$$

⁷ A questão e seu gabarito foram extraídos do site da OBA, disponível em: http://www.oba.org.br/sisglob/sisglob_arquivos/provas_gabaritos/2001/2001gab_n3_4oba.pdf.

⁸ A questão foi extraída do site da UEG, disponível em: <http://www.nucleodeselecao.ueg.br/old/PDFs/ps/17/provas/GeraisPS2006-2INGLES.zip>.

7.6 Roteiro de Atividade Prática

Observando um Buraco Negro Estelar

Você e seus colegas agora fazem parte de um grupo de pesquisa, de um grande Observatório que caça novos Buracos Negros provenientes da morte de alguma estrela.

No dia de hoje, o grupo resolveu observar a região que fica na direção da Constelação:

Antes mesmo de começar a observação, vocês devem pesquisar¹ e anotar sobre a Constelação escolhida as seguintes informações:

1. Estrela mais brilhante da Constelação:
2. Esboce um desenho esquemático para essa Constelação.

Parte I: Observação

Utilize o *Kit* disponibilizado durante a aula e ouça as orientações.

É importante que algum(a) integrante do grupo anote as seguintes observações:

1. Verifique a deformação do espaço-tempo causado pelo Buraco Negro estudado por seu grupo;
2. Solte a sua estrela ao redor do Buraco Negro e analise como ela orbita essa região do espaço.

Parte II: Obtendo Dados

Enquanto o grupo fazia suas observações, o telescópio do Observatório realizava medidas de espectroscopia na região do visível, obtendo dados de velocidade radial. Com base na curva de variação dessa velocidade, é possível determinar a sua velocidade orbital, seu período orbital (T) em anos e conseqüentemente seu raio orbital (R) em Unidades Astronômicas² (UA). Com essas informações é possível obter a partir da formulação da Lei da Gravitação Universal $\left(M(M_{\odot}) = \frac{R^3}{T^2}\right)$, a massa do Buraco Negro que o grupo estava observando³:

¹ Utilizem seus celulares, *tablets* ou computadores para realizar a pesquisa.

² 1 UA = Distância entre a Terra e o Sol.

³ Encontre a massa do Buraco Negro utilizando a tabela disponibilizada no Material de Apoio. Lembrem-se, vocês sabem qual constelação está em observação pelo grupo.

$$M_{BN} = \text{-----} M_{\odot}$$

1. Agora que o grupo já sabe a massa do Buraco Negro encontrado, calcule o Raio de Schwarzschild em km, sabendo que:

$$R_{Sc} = \frac{2 \cdot G \cdot M_{BN}}{c^2}$$

onde $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$, $G = 6,7 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$ e $M_{\odot} = 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$.

2. Imagine que foi enviada uma cápsula para ser colocada em órbita do Buraco Negro que foi encontrado pelo grupo. Calcule o fator de dilatação do tempo, assim que a cápsula começar a orbitar a uma distância $r = 50 \text{ km}$ ao redor desse Buraco Negro. Utilizando a equação apresentada abaixo, calcule o fator de dilatação do tempo.

Dica: Sua resposta terá como resultado um valor em relação a t' .

Exemplo: $t = n \cdot t'$.

$$t = t' \sqrt{1 - \frac{R_{Sc}}{r}}$$

3. Para cada 1 hora (60 minutos) que se passa no Buraco Negro, calcule o valor do tempo t' para um observador dentro da cápsula e discuta o resultado obtido com seu grupo.
4. Utilize a Tabela de Buracos Negros Estelares, apresentada ao final desse Roteiro e anote qual é o nome do Buraco Negro que o seu grupo encontrou;
5. Para facilitar a organização dos dados do grupo, coloque as informações obtidas na tabela abaixo:

| Nome do Buraco Negro | Constelação | Massa (M_{\odot}) | R_{Sc} (km) | t' (t) | t (h:min) |
|----------------------|-------------|-----------------------|---------------|----------|-----------|
| | | | | | |

6. Aguarde a discussão final com todos os grupos que trabalharam nesse projeto.

Material de Apoio

| Buracos Negros Estelares | | |
|--------------------------|-------------------------|-----------------------|
| Nome do BN | Constelação | Massa (M_{\odot}) |
| Cygnus X-1 | Cygnus (Cisne) | 16 |
| SS 433 | Aquila (Águia) | 11 |
| IL Lupi | Lupus (Lobo) | 9 |
| Nova Vul 1988 | Vulpecula (Raposa) | 8 |
| Nova Oph 1977 | Ophiuchus (Serpentário) | 7 |
| Nova Persi 1992 | Perseus (Perseu) | 5 |

| Dados Importantes | |
|-------------------|---|
| $1 M_{\odot}$ | $1,9891 \cdot 10^{30} \text{ kg}$ |
| G | $6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{kg}^2}$ |
| c | $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ |

7.7 Roteiro do Professor(a)

Observando um Buraco Negro Estelar

Objetivo da Atividade: Apresentar os conceitos de Relatividade Restrita e Geral ambas aplicadas no tema norteador, Buracos Negros, tanto na forma ilustrativa (Parte I) como na forma matemática (Parte II), colocando o(a) aluno(a) a discutir como Buracos Negros são formados, como detectá-los e quais são suas características principais.

Pergunta Norteadora: Como detectar um Buraco Negro?

Materiais

- Bolinhas de gude com massas aproximadamente iguais e pintadas na cor preta;
- Bolas de *Ping-Pong*;
- Pedacos quadrados de tecido elástico na cor preta de tamanho 60 cm × 60 cm;

Kit do Experimento - Parte I

Entregar para os grupos um kit contendo:

- 1 Bolinha de gude - Representando um Buraco Negro;
- 1 Bola de *Ping-Pong* - Representando uma Estrela;
- 1 Tecido elástico na cor preta;

Como Fazer

- Antes da realização da atividade, escolha uma constelação e a respectiva massa do Buraco Negro a partir da tabela disponibilizada abaixo (NASA, 2019) e insira essa informação nos locais indicados nos roteiros dos(as) alunos(as). É importante que os grupos trabalhem com constelações diferentes.

| Nome do BN | Constelação | Massa (M_{\odot}) |
|-----------------|-------------------------|-----------------------|
| Cygnus X-1 | Cygnus (Cisne) | 16 |
| SS 433 | Aquila (Águia) | 11 |
| IL Lupi | Lupus (Lobo) | 9 |
| Nova Vul 1988 | Vulpecula (Raposa) | 8 |
| Nova Oph 1977 | Ophiuchus (Serpentário) | 7 |
| Nova Persi 1992 | Perseus (Perseu) | 5 |

- Separe a turma em quatro grupos com três integrantes⁹, entregue os *Kits* e o *Roteiro de Atividade Prática* auxiliando os grupos se necessário.

⁹ Caso haja a necessidade de aumentar o número de grupos é indicado que não ultrapasse o limite de seis grupos.

Parte I

- Dois(duas) alunos(as) devem pegar o tecido (um de cada lado) e esticá-lo de forma a deixá-lo reto;



- O(A) terceiro(a) integrante, colocará a bolinha correspondente ao Buraco Negro no centro do tecido e puxará a bolinha + o tecido para baixo formando um funil no tecido;



- O(A) mesmo(a) aluno(a) que está fazendo a “distorção” no tecido, deverá então jogar a bola de ping-pong representando a estrela, de forma a perceber que tipo de movimento ela faz ao redor do Buraco Negro.



Parte II

- Peça agora para que cada grupo siga o Roteiro.

Nesse momento, o(a) professor(a) deve acompanhar os(as) alunos(as) para possíveis dúvidas tanto no conteúdo do roteiro quanto nas análises dos dados.

- Coloque na lousa a seguinte tabela para que seja preenchida com os dados encontrados pelos grupos:

| Nome do BN | Constelação | Massa (M_{\odot}) | R_{Sc} (km) | t | t' (h:min) |
|------------|-------------|-----------------------|---------------|---|------------|
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |

Lembrando que:

t → é o tempo medido por um observador na Terra.

t' → é o tempo medido por um observador no espaço.

Gabarito da Atividade

Os grupos devem chegar aproximadamente nos valores apresentados na tabela abaixo.

| Nome | Constelação | Massa (M_{\odot}) | R_{Sc} (km) | t | t' (h:min) |
|-----------------|-------------------------|-----------------------|---------------|------|------------|
| Cygnus X-1 | Cygnus (Cisne) | 16 | 47,6 | 0,22 | 04:36 |
| SS 433 | Aquila (Águia) | 11 | 32,8 | 0,59 | 01:42 |
| IL Lupi | Lupus (Lobo) | 9 | 26,8 | 0,68 | 01:28 |
| Nova Vul 1988 | Vulpecula (Raposa) | 8 | 23,8 | 0,72 | 01:24 |
| Nova Oph 1977 | Ophiuchus (Serpentário) | 7 | 20,8 | 0,76 | 01:18 |
| Nova Persi 1992 | Perseus (Perseu) | 5 | 14,9 | 0,84 | 01:12 |

Como apresentado, o tempo t' deve ser colocado em horas:minutos.

Para demonstrar utilizaremos como exemplo os dados de Cygnus X-1:

$$t = 0,22 \cdot t'$$

Para $t = 60$ min:

$$t' = \frac{60}{0,22} \approx 276 \text{ min}$$

$$276 \text{ min} = 4,6 \text{ h}$$

$$0,60 \text{ h} \approx 36 \text{ min}$$

$$4,6 \text{ h} = 04 : 36 \text{ ou } 4\text{h}36\text{min}$$

Conclusões da Atividade

Com a Parte I, os grupos devem compreender que a deformação do espaço-tempo tem relação com a massa do corpo, portanto, é importante a percepção do grupo que quanto maior é a massa do Buraco Negro, maior será a deformação na curvatura do espaço-tempo. É de grande importância, que seja comentado durante as discussões, que uma das formas de detecção de Buracos Negros utiliza o recurso de espectros na região do visível, obtidos a partir de telescópios ópticos. Com esses espectros é possível calcular a velocidade radial da estrela com base no Efeito Doppler (Carroll e Ostlie, 2007). Com a velocidade orbital é possível calcular o período (T) em anos e o raio orbital (R) em Unidades Astronômicas ¹⁰ (UA) da estrela ao redor do Buraco Negro, obtendo a partir da Lei da Gravitação Universal ¹¹ $\left(M(M_{\odot}) = \frac{R^3}{T^2}\right)$ a massa do Buraco Negro Estelar.

Com a Parte II, os grupos deverão compreender que a massa e o Raio de Schwarzschild são diretamente proporcionais, então, quanto maior é a massa do Buraco Negro, maior será o Raio de Schwarzschild. Por outro lado, o tempo no interior de um Buraco Negro passa mais lentamente do que para um observador em qualquer região do espaço.

¹⁰ 1 UA = Distância entre a Terra e o Sol.

¹¹ Caso seja necessário, consulte as **Observações Importantes** desse Roteiro.

Observações Importantes

• A massa foi obtida através da Lei da Gravitação Universal, adotando-se as unidades do sistema Terra-Sol, considerando m como a massa da Terra e M_{\odot} a massa do Sol:

$$F_{centrípeta} = F_{gravitacional}$$

$$\frac{m \cdot v^2}{R} = \frac{G \cdot M_{\odot} \cdot m}{R^2} \rightarrow v = \sqrt{\frac{G \cdot M_{\odot}}{R}}$$

Como o período orbital é dado por $T = \frac{2\pi \cdot R}{v}$, temos que:

$$\frac{2 \cdot \pi \cdot R}{T} = \sqrt{\frac{G \cdot M_{\odot}}{R}} \rightarrow \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot R^2}{T^2} = \frac{G \cdot M_{\odot}}{R}$$

Obtendo assim:

$$M_{\odot} = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot R^3}{G \cdot T^2} \quad (7.34)$$

Para obter a partir da Equação 7.34, a massa de um Buraco Negro em unidades de Massa Solar, deve-se considerar os seguinte dados:

$$M_{\odot} = 1 \text{ Massa Solar}$$

$$R_{Terra} = 1 \text{ UA}$$

$$T_{Terra} = 1 \text{ ano terrestre}$$

Assim, sabendo que $\frac{4 \cdot \pi^2}{G}$ é uma constante tanto para o Sol quanto para um Buraco Negro, tem-se que:

$$\frac{M_{\odot} \cdot T_{\odot}^2}{R_{\odot}^3} = \frac{M \cdot T^2}{R^3}$$

Fazendo as substituições com os dados fornecidos, obtêm-se a equação da massa de um Buraco Negro em unidades de Massa Solar:

$$\frac{M \cdot T^2}{R^3} = 1 \rightarrow M = \frac{R^3}{T^2}$$

• O fator de dilatação do tempo foi obtido a partir da conservação da energia potencial gravitacional e da energia cinética, obtendo a velocidade de escape necessária para um

objeto escapar de um Buraco Negro:

$$E_{cinética} = E_{potencial}$$

$$\frac{m \cdot v_e^2}{2} = \frac{G \cdot M \cdot m}{r}$$

$$v_e^2 = \frac{2 \cdot G \cdot M}{r}$$

Utilizando a dilatação do tempo da Relatividade restrita e conhecendo o raio de Schwarzschild ($R_{Sc} = \frac{2 \cdot G \cdot M}{c^2}$), temos que:

$$t = t' \sqrt{1 - \frac{v_e^2}{c^2}} \quad \therefore \quad t = t' \sqrt{1 - \frac{R_{Sc}}{r}}$$

Sendo r a distância de um observador em órbita em relação ao objeto de estudo.

8 RESULTADOS DAS ATIVIDADES APLICADAS EM SALA DE AULA

Tendo em vista que a experiência relatada neste capítulo foi pessoal e específica, foi escolhida a locução em primeira pessoa, diferente do que foi adotado em outros capítulos dessa mesma dissertação.

Devido à situação pandêmica que vivemos nos anos de 2020 e 2021, onde todas as escolas, sejam elas públicas ou privadas permaneceram com suas atividades no modo *on-line*, ocorreram diversos obstáculos para a realização do que estava previsto no cronograma proposto no início do mestrado. Em particular, o terceiro bimestre de 2021, foi o mais desafiador durante todo o processo, pois era o momento de aplicar para meus alunos e alunas pelo menos dois dos quatro roteiros construídos para o produto final do projeto. Com a obrigatoriedade do retorno às aulas presenciais (entre o terceiro e quarto bimestre de 2021), eram constantes as mudanças na carga horária dos(as) professores(as), número de aulas e número de alunos(as) no presencial. Dessa forma, tentei deixar a aplicação do produto final o mais flexível possível para que ao final do ano eu ainda tivesse algum resultado dessas atividades, mesmo dando aula para uma turma mista.

É importante lembrar que uma turma mista ocorre quando uma porcentagem de alunos(as) se encontram no presencial e outra porcentagem no *on-line*. Muitas escolas na época chamavam erroneamente esse modelo de sala de aula de Ensino Híbrido, porém não era o que ocorria durante a pandemia, pois não se seguia um formato realmente híbrido com metodologias de ensino diferenciadas como Modelo de Rotação, Modelo Flex, Modelo à la Carte e o Modelo Virtual Enriquecido, onde o ensino ocorre para todos(as) sendo uma parte de um mesmo objetivo no presencial e parte do mesmo objeto no *on-line* (Bacich et al., 2015). O que realmente aconteceu na verdade não é bem definido e está mais próximo do que pode ser chamado de Ensino Misto, onde parte da turma está no presencial e parte no *on-line*, porém tendo o mesmo conteúdo com os mesmos tipos de atividades.

Tendo esse contexto em mente, planejei que o roteiro proposto no capítulo sobre Luminosidade e Brilho Aparente fosse feito como trabalho para casa, onde os(as) alunos(as) fariam sozinhos(as) e teriam uma data fechada (um mês e meio) para entregar, enquanto o roteiro de Classificação Estelar e o Diagrama H-R seria feito presencialmente mesmo com a turma mista, independente do número de alunos(as) participando das aulas *on-line*. Apesar dessas condições, foram obtidos resultados que foram essenciais para correções das atividades e análise das reações dos(as) alunos(as) durante a realização da proposta.

O estudo foi desenvolvido em uma escola da rede privada do município de São Paulo no ano de 2021 e em duas turmas do 3^o Ano do Ensino Médio.

| Ano | Turma | Nº de Alunos(as) |
|------|-------|------------------|
| 2021 | 3A | 23 |
| | 3B | 14 |

Para uma melhor organização foi montado um planejamento bimestral (Tabela 13) onde, dia após dia eu teria já marcado uma proposta para realizar em sala de aula. Tal planejamento foi seguido continuamente com pequenas mudanças que ocorriam durante o percurso das aulas devido à diferença de engajamento e interesse das turmas ou mudanças pedagógicas como carga horária e número de aulas.

Tabela 13 – Planejamento bimestral base para o terceiro bimestre de 2021.

| 3AB | |
|------------------|---------------------|
| Tema | Observações |
| Eletromagnetismo | Aula Expositiva |
| Eletromagnetismo | Aula Expositiva |
| Eletromagnetismo | Correção Exercícios |
| Física Quântica | Aula Expositiva |
| Física Quântica | Aula Expositiva |
| Física Quântica | Atividade Prática |
| Física Quântica | Atividade Prática |
| Física Quântica | Atividade Prática |
| Física Nuclear | Aula Expositiva |
| Física Nuclear | Aula Expositiva |
| Física Nuclear | Exercícios |
| Física Nuclear | Correção Exercícios |
| Relatividade | Aula Expositiva |
| Relatividade | Aula Expositiva |
| Relatividade | Aula Expositiva |
| Relatividade | Exercícios |
| Relatividade | Correção Exercícios |

Levando em conta o planejamento apresentado, a escolha das duas atividades aplicadas foram baseadas na finalidade de utilizar as aulas para, com o *feedback* dos(as) alunos(as), melhorá-las e corrigi-las em questão de possíveis erros (falta de informação, por exemplo)

ou corrigi-las por falta de clareza nos roteiros. Além disso, o fato de estar no presencial, daria a possibilidade de analisar um dos objetivos da criação dessas atividades, poder conferir de perto se eles estão aproveitando e gostando da atividade, além de vê-los(as) fazendo associações interessantes. Nesse momento, era mais importante observar o engajamento na atividade do que analisar estatisticamente uma melhora no aprendizado sobre o assunto, principalmente considerando que a escola possui um projeto pedagógico de alto desempenho, logo, o importante era saber que eles(as) estavam motivados(as) para continuar seus últimos passos rumo à vida adulta (tendo como futuro uma universidade ou não).

O conteúdo geral de Física Moderna foi iniciado com uma questão feita pela plataforma *Mentimeter*¹, para compreender o que os alunos entendiam de uma forma geral sobre os diferentes tipos de visão sobre a ciência, especificamente, sobre as estrelas.

Para isso, utilizei um trecho do desenho animado da Disney², *O Rei Leão*, onde Simba (um leão), Timão (um suricato) e Pumba (um javali) estão deitados em um gramado, olhando para o céu estrelado. Enquanto eles estão nesse momento, há o seguinte diálogo:

Pumba: Timão...

Timão: Que é?

Pumba: Já imaginou o que serão aqueles pontos brilhantes lá em cima?

Timão: Rá Pumba, eu não imagino, eu sei!

Pumba: é...? O que são?

Timão: São vaga-lumes... vaga-lumes que ficaram grudados naquela coisa grande azul escura.

Pumba responde com uma cara de desconfiado.

Pumba: Ohhh, hihhi. Eu sempre pensei que fossem bolas de gás estourando a bilhões de quilômetros daqui.

Onde Timão responde rapidamente.

Timão: Pumba, para você só existe gás.

Pumba: Simba, o que que você acha?

Simba, constrangido responde.

Simba: Ahhhh, eu não sei...

Pumba e Timão, insistem para que ele responda a pergunta.

Timão e Pumba: Fala, fala, vamos... fala!

Simba convencido responde.

Simba: Já me disseram uma vez, que os grandes reis do passado estão lá, olhando por nós.

Pumba: Sério?!

Timão: Quer dizer que um bando de reis mortos estão olhando para nós?

¹ Link: <https://www.mentimeter.com/pt-BR>

² Link do trecho do vídeo utilizado: <https://www.youtube.com/watch?v=BzGKRegapjc>

Timão e Pumba, começam a rir da resposta dada por Simba enquanto o próprio ri constrangido junto com eles.

A cena continua com Timão e Pumba rindo enquanto Simba sai da conversa, onde assustado, Timão diz:

Timão: Foi alguma coisa que eu disse?

A partir desse trecho do desenho, iniciei uma enquete com a seguinte pergunta “quem está correto?”. A ideia era entender qual era o tipo de visão sobre estrelas que cada aluno(a) tinha naquele momento. Uma visão científica³ (Pumba), popular/cultural (Timão) ou religiosa (Simba). A partir disso, obtive os seguintes resultados:

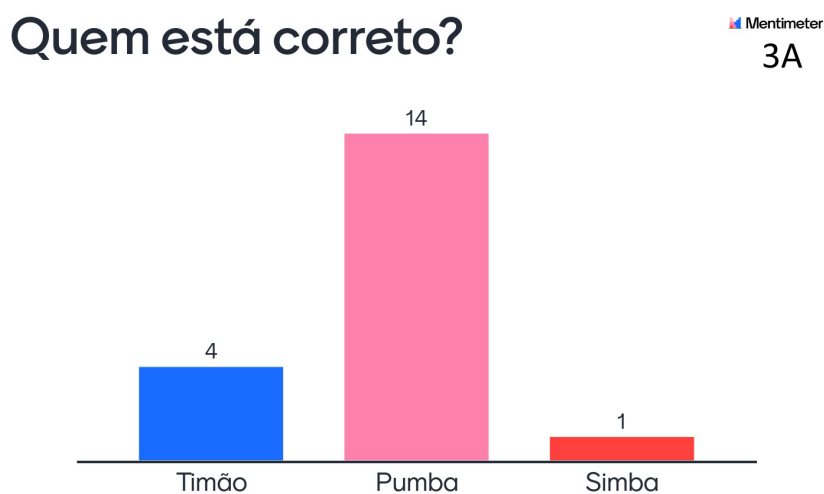


Figura 64 – Resultado da enquete “Quem está correto?” para a turma 3A.

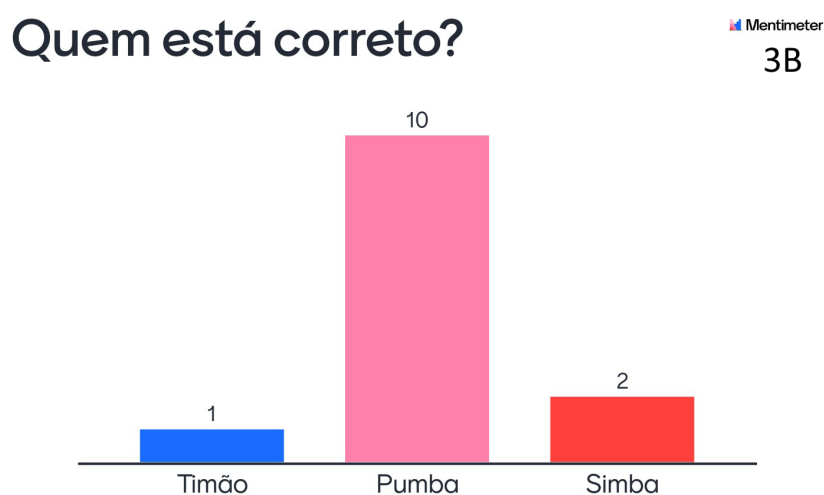


Figura 65 – Resultado da enquete “Quem está correto?” para a turma 3B.

Utilizando os dados fornecidos nas Figuras 64 e 65 pode-se observar que a maioria dos(as) alunos(as) que responderam a enquete acreditaram mais na fala do Pumba do

³ Apesar de não estar completamente correto, a fala do Pumba é a mais próxima do que é uma estrela.

que dos outros integrantes apresentados no vídeo. Após apresentar os resultados para a turma discutimos sobre o que eles perceberam sobre as diferentes visões.

No 3A, os(as) alunos(as) associaram a fala do Timão com coisas que aprendemos no cotidiano como se fossem certas, por exemplo: vaga-lume brilha então estrelas são vaga-lumes. Já no caso do Simba, eles associaram com uma visão mais religiosa. Lembraram inclusive dos comentários que algumas pessoas mais velhas falam, ao dar uma notícia sobre a morte de um ente querido, usando no lugar de “-nome da pessoa- morreu” um tipo de eufemismo como “virou estrelinha”.

Quando perguntei sobre o quanto ter uma crença muda o ponto de vista deles quando o assunto é ciência, os(as) alunos(as) trouxeram a seguinte reflexão:

“Professora, temos que saber separar as coisas.”

“Temos que ter discernimento para entender o que a ciência explica.”

Já o 3B, ao iniciar a discussão, os(as) alunos(as) trouxeram as seguintes reflexões:

- Associaram o Timão com alguém que acredita em Terra Plana.
- Associaram o Pumba com um aluno inteligente que senta na primeira carteira da sala e ainda avisa o professor que tem lição para entregar (esse comentário foi feito de forma a ser uma piada, onde houve um momento de descontração/constrangimento entre a turma). Quando voltaram a responder de forma séria, associaram a fala de Pumba com a de um cientista.
- Associaram a fala do Simba com uma fala religiosa ou supersticiosa.

Buscando abrir mais a discussão, tentei trazer a dúvida sobre crença e ciência e no geral só disseram que durante a votação alguns votaram no que acreditam e outros conforme o que achavam que estava correto.

Esse momento inicial foi de grande importância, pois me deu perspectiva do que eu poderia encontrar de obstáculos perante o tema principal, estrelas massivas. As duas turmas, apesar de possuírem perfis sociais parecidos, tinham perfis estudantis completamente diferentes em relação à física, sendo o 3A uma turma mais reflexiva e curiosa quanto a fenômenos físicos enquanto o 3B não possuía nenhuma afinidade com a disciplina. Além disso, é importante mencionar que ambas as turmas não tinham nenhum tipo de conhecimento sobre Astronomia, a não ser o que já é previsto no sexto ano do Fundamental II (O Sol e o Sistema Solar).

Na Seção 8.1 serão apresentados os resultados a partir da aplicação das duas atividades já mencionadas no início desse capítulo.

8.1 Aplicação das Atividades - Resultados Parciais

A primeira aplicação foi da atividade sobre Luminosidade e Fluxo Estelar e ocorreu após as aulas expositivas sobre Ondas Eletromagnéticas, abordando os tópicos: Propriedades da Luz, Luminosidade e Fluxo Estelar Aparente. Nesse momento eu ainda estava em aula *on-line*, porém alguns(umas) alunos(as) estavam no presencial enquanto outros estavam no *on-line*. Por esse motivo foi decidido que eu passaria a atividade prática para ser realizada em casa com entrega em data específica. Separei a sala em duplas para realizar a atividade, no entanto cada um fazia o experimento em casa sozinho. A dupla só se reuniria para a análise e discussões dos resultados, de preferência em uma reunião em plataformas como *Google Meet*, *Zoom*, *Discord* ou até mesmo *Whats App*.

O envio das respostas junto com a foto do aparato experimental foi realizado via formulário do *Google* (*Google Forms*).

No geral, não houve problema na realização do experimento, porém após receber as discussões e análise dos dados percebi a necessidade de acompanhamento mediado pelo(a) professor(a), além do uso de um ambiente padrão e com iluminação controlada para todos(as) os(as) alunos(as).

Dessa forma, alterei na atividade do produto final algumas observações, como por exemplo a realização da mesma apenas no ensino presencial, como também algumas perguntas do questionário investigativo, para deixar em uma perspectiva focada mais na equação do fluxo luminoso (análise da questão de proporcionalidade), como também em relação à propagação da luz no vácuo.

Além disso, com a aplicação da atividade foi possível perceber que em celulares do tipo *iPhone*, não existia o aplicativo de detecção de luz, dessa forma foi inserida também na atividade uma observação para que o(a) professor(a) forme duplas sempre com pelo menos um dos alunos com um celular que não seja desse modelo.

Os(as) alunos(as) gostaram da atividade, pois foi diferente perto de tudo o que foi realizado durante a pandemia e fez com eles pensassem além do conteúdo que foi aprendido em sala de aula, como pode ser visto através dos comentários deixados via *Google Forms*:

*“Achamos um trabalho consideravelmente tranquilo porém um pouco trabalhoso para montar as respostas. Particularmente na minha opinião (nome do aluno) achei um pouco chato essa parte de analisar os dados, mas gostei da questão 6.”*⁴

“Foi bacana de fazer!!”

“Trabalho simples e que permite que entendamos a relação do brilho e distância, mas nunca é bom falar que foi “fácil” porque... Você sabe, a Lei de Murphy.”

⁴ Questão 6: Seria possível realizar o mesmo experimento dentro de uma câmara de vácuo? Justifique utilizando o que se sabe sobre a propagação de ondas.

“Achamos legal poder ver na prática que é possível medir o brilho aparente de um feixe de luz.”

“Nós achamos o trabalho muito interessante, pois foi bastante intuitivo e fácil quando comparado com os trabalhos feitos ao longo do ensino médio.”

“O trabalho foi dificultoso por conta de sua elaboração, considerando que necessitávamos dos resultados dos dois membros da dupla para conseguirmos responder e tirar conclusões sobre os nossos cálculos, houve uma certa dificuldade no momento de comparar as informações, no entanto, foi uma atividade muito interessante, na qual conseguimos explorar melhor os conteúdos aprendidos em aula, assim como entendê-los, de uma forma que nos aproximou das experiências pré-pandemia, quando estávamos no presencial fazendo esses experimentos durante nossas visitas ao laboratório.”

“Nenhuma crítica ou sugestão. Achamos o trabalho trabalhoso, porém mais fácil do que os outros que já fizemos nos últimos bimestres rs.”

“Nós achamos um experimento simples e que consegue nos ensinar muito, gostamos de mais.”

“Eu achei que esse trabalho foi divertido e bem criativo, mas que ele acabou ficando em cima de outros trabalhos, o que atrapalhou bastante. Também teve uma complicação com o aplicativo, mas era só pedir para um colega, então deu tudo certo.”

A segunda aplicação foi sobre Classificação Estelar e ocorreu após as aulas expositivas sobre o tema de Física Quântica, relacionada aos tópicos: Radiação de Corpo Negro, Função de Planck, Efeito Fotoelétrico, Cores das Estrelas e Classificação Estelar. Nesse momento as aulas ocorreram de forma mista, dessa vez eu estava no presencial junto com alguns(umas) alunos(as) enquanto a outra parte da turma se encontrava no *on-line*. Foi um total de três aulas para a realização da atividade com entrega do pdf editado via e-mail para correção.

Sobre a realização da atividade, os(as) alunos(as) ficaram muito mais engajados com o *Celestia* do que com o experimento anterior sobre Luminosidade. Tiveram alguns problemas, mas foram situações voltadas à matemática, como o uso de notação científica e análise dos dados, cálculo do comprimento de onda utilizando a Lei de Wien e leitura do Diagrama H-R por ser em escala logarítmica. Nesse último caso, foi necessária a inserção de mais dados na escala de luminosidade (eixo y), inclusive tal alteração foi dada como ideia pelos(as) próprios(as) alunos(as).

Durante a aplicação da atividade, pontos importantes foram comentados pelos(as)

alunos(as) como por exemplo:

- Alguns alunos que finalizaram a atividade antes dos colegas, ficaram “passeando” por planetas, explorando o *Celestia*.
- No dia seguinte da aplicação da primeira parte da atividade, alguns vieram me falar que contaram para os pais sobre a atividade, pois estavam muito animados.
- Ao entrar na sala de aula de uma das turmas, ouvi a seguinte pergunta “vamos mexer no Celestia hoje?”. Quando respondi que a atividade tinha sido finalizada e que continuaríamos o conteúdo eles responderam “ahhh” e fizeram cara de tristes.

Em especial, em uma turma que possui grande dificuldade e motivação para as aulas de física por não terem afinidade com a matéria, fizeram comentários muito relevantes. Eles associaram uma parte da atividade (cor da estrela, temperatura e lei de Wien) ao tentar responder uma questão de uma prova enquanto eu aplicava a mesma.

- Aluno x ficou chateado pela constelação não corresponder ao seu signo, mas disse que foi muito interessante perceber isso.
- A turma pediu para que eu trouxesse mais atividades como essa nas aulas.
- Todos disseram que foi uma atividade muito legal.
- Aluno y disse: “entendi hoje a calcular o comprimento de onda”, querendo dizer que entendeu apenas com a atividade a calcular o comprimento de onda a partir da Lei do Deslocamento de Wien.

Um exemplo de atividade que foi enviada para correção, sem as notas e sem a identificação dos(as) alunos(as) estão apresentadas no Anexo D. É importante salientar que foi possível, pela análise das atividades da entregues, quem eram os grupos que estavam acompanhando as instruções da atividade seja no presencial seja no *on-line*, pois as atividades foram entregues fora do modelo do roteiro solicitado.

9 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS DE CONTINUIDADE

O produto final resultante deste projeto é fruto, conforme já apresentado anteriormente, de ideias e das necessidades de alunos(as) que cultivam a curiosidade frente a temas que não são ensinados durante o ensino médio, pois não estão devidamente previstos no planejamento das aulas assim como no próprio currículo, resultado de livros didáticos engessados e com foco maior em conteúdos que são cobrados em grandes vestibulares no Brasil.

Todos os capítulos foram idealizados com uma única estrutura, sendo ela:

- Inicia-se com uma pequena introdução, explicando resumidamente para o(a) professor(a) o que ele(a) irá encontrar no capítulo;
- Um texto base teórico, com as principais informações e dicas que serão necessárias para compreensão do conteúdo para ajudar o(a) professor(a) a aprimorar suas aulas;
- Uma lista de exercícios de revisão e/ou fixação com gabarito e resoluções para serem utilizadas em sala de aula;
- Um roteiro de atividade prática para ser distribuído aos(as) alunos(as);
- Um gabarito da atividade prática para o uso exclusivo do(a) professor(a) para uma correção mais assertiva e padronizada.

Ainda em relação aos capítulos, partiu-se primeiramente dos conteúdos disciplinares de Física Moderna para encaixar depois um tema norteador em relação à Astronomia. Tendo como base iniciar pelo estudo de estrelas massivas para poder finalizar estudando buracos negros, aproveitou-se da revisão de ondas eletromagnéticas e propriedades da luz para começar a falar sobre estrelas de uma forma geral, dando ênfase então no Capítulo 4 na luminosidade e no fluxo estelar. A apresentação desses temas resultou em uma atividade prática onde os(as) alunos(as) podem medir a luminosidade de uma fonte de luz (utilizada para representar uma estrela) e analisar a equação do fluxo luminoso de dessa fonte. Depois disso, tendo como continuação os conteúdos sobre radiação de corpo negro, função de Planck e efeito fotoelétrico, foi fácil relacionar tais tópicos com as cores das estrelas e sua classificação apresentando inclusive o Diagrama H-R no Capítulo 5 e tendo como resultado uma atividade prática que visa não só o entendimento sobre classificação das estrelas mas desmitificar e apresentar de forma didática a diferença entre Astronomia (ciência) e Astrologia (pseudociência).

Para os conteúdos sobre radioatividade, física nuclear, decaimentos alfa, beta e gama e reações nucleares, foi proposto no Capítulo 6 o estudo da evolução e nucleossíntese de estrelas massivas, tendo como atividade proposta o estudo e análise de elementos químicos presentes em uma supernova e por fim, no Capítulo 7, o tema mais esperado por todos(as) os(as) alunos(as), os famosos buracos negros, tendo como base de estudo a relatividade restrita e geral, fornecendo uma atividade para estudar tais objetos astronômicos que tanto fascinam por sua existência e complexidade. No Anexo B é possível verificar resumidamente os tópicos e atividades aqui explicadas.

Nos casos em que as atividades foram testadas com as duas turmas, foi possível perceber de uma forma geral que os(as) alunos(as) receberam as aulas e atividades de uma forma entusiasmada, permanecendo engajados até o final das mesmas. Para o período pelo qual, essas atividades foram realizadas (momento esse que consistiu em um ensino misto devido a pandemia do COVID 19), mais importante do que a aprendizagem para os futuros vestibulares que aqueles(as) alunos(as) realizariam em alguns meses, foi perceber a alegria e a motivação em vivenciar uma atividade diferente dentro da sala de aula.

Além das sequências didáticas propostas no produto final desse projeto, foi produzido o artigo que está no Anexo F, buscando discutir sobre quais eram as necessidades dos(as) professores(as) e quais eram as necessidades dos(as) alunos(as) enquanto explicava sobre o Sol dentro da sala de aula e como particularmente era difícil encontrar materiais em que o professor(a) pudesse explicar sobre as camadas do Sol fazendo sempre uma ligação com a física. Assim, surgiu a ideia de criar esse produto paralelo ao proposto no projeto de mestrado, sendo o mesmo publicado em dezembro de 2021 pela Revista Brasileira de Ensino de Física (Almeida e Gregorio-Hetem, 2021).

Considerando que apenas duas das quatro atividades foram realizadas em sala de aula é importante ressaltar que nenhuma das aplicações tiveram o objetivo de entender, qualificar ou quantificar qual foi o nível de aprendizagem que os(as) alunos(as) obtiveram com as aulas e com as atividades específicas. O principal foco do trabalho foi verificar a aplicabilidade em sala de aula, porém é importante observar que há a possibilidade de novos trabalhos dando continuidade a esse aqui apresentado, podendo ter como resultados artigos que evidenciem por exemplo a análise de conteúdo qualitativo, aprendizagem significativa ou ensino por investigação.

Referências

- Abbagnano, N. (1970). *Dicionário de Filosofia*. Editora Mestre Jou.
- Abt, H. A., Meinel, A., Morgan, W. e Tapscott, I. (1968). An atlas of low-dispersion grating stellar spectra. *An Atlas of low-dispersion grating stellar spectra*.
- Almeida, P. A. D. e Gregorio-Hetem, J. (2021). Aspectos do sol observados em diferentes faixas espectrais. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 44(e20210405).
- Ausubel, D. P. e Novak, J. D. e. H. H. (1980). *Psicologia educacional*. Interamericana, Rio de Janeiro.
- Bacich, L., Neto, A. T. e de Mello Trevisani, F. (2015). *Ensino Híbrido: Personalização e Tecnologia na Educação*. Penso Editora.
- Bagnato, V. e Pratavieira, S. (2015). Luz para o progresso do conhecimento e suporte da vida. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 37:4206–1.
- Bandecchi, M., Bretones, P. e Horvath, J. (2019a). O equilíbrio e a estrutura estelar em uma abordagem simples: a seqüência principal. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 41.
- Bandecchi, M., Horvath, J. e Bretones, P. (2019b). O equilíbrio estelar e a existência de uma massa máxima para as estrelas. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 41.
- Barojas, J. (1988). Cooperative networks in physics education. Relatório técnico, American Institute of Physics, New York.
- Benjamin, C. (2012). *Autobiografia Científica e Outros Ensaio*s. Editora Contraponto. Tradução do texto redigido por Max Planck para a Academia de Ciências de Halle em 1958, disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/phb1.19580140401>.
- Brasil (2000). Parâmetros Curriculares Nacionais: Ensino Médio - PCNEM. *Orientações Curriculares do Ensino Médio, Brasília-MEC/SEB*.
- Brasil (2015). *Ministério da Educação (MEC). Base Nacional Comum Curricular (BNCC)*. <http://basenacionalcomum.mec.gov.br>. Acesso em 16 de Fevereiro de 2021.
- Britannica. Einar hertzprung. <https://www.britannica.com/biography/Einar-Hertzprung>. Acesso em 20 de Novembro de 2019.

- Britannica. Henry-norris-russell. <https://www.britannica.com/biography/Henry-Norris-Russell>. Acesso em 20 de Novembro de 2019.
- Carroll, B. W. e Ostlie, D. A. (2007). *An Introduction to Modern Astrophysics*. Pearson. Segunda Edição.
- Castro, A. M. C., Espírito Santo, C. F. A., Barata, R. C. e Almouloud, S. A. (2020). Desafios para o professor de ciências e matemática revelados pelo estudo da bncc do ensino médio. *Revista Eletrônica de Educação Matemática*, 15(2):1–32.
- Cestari, T. N. (2018). Uma proposta de ensino de fundamentos de astronomia e astrofísica via ensino sob medida.
- Chaisson, E. e McMillan, S. (2006). *Astronomy: A Beginner's Guide to the Universe*. Benjamin Cummings.
- Chung, K. (2001). *Introdução à física nuclear*. EdUERJ.
- de Almeida, G. (2014). A refração atmosférica e os seus problemas nas observações astronômicas. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 31(2):410–420.
- de Moura, F. A. e Vianna, P. O. (2019). O ensino de física moderna baseado no filme interestelar: Abordagem didática para a aprendizagem significativa. *Research, Society And Development*, 8(3):01–16.
- Einstein, A. (2003). *A Teoria da Relatividade Especial e Geral*. Tradução do Original em Alemão por Carlos Almeida Pereira.
- Eisberg, R. e Resnick, R. (1985). *Quantum Physics of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei, and Particles*. Wiley. Second Edition.
- Fernandes Junior, R. C., Kanaan, A. e Gomes, J. M. S. d. M. (2002). As ferramentas do astrônomo. *Observatórios Virtuais, Florianópolis*, páginas 1–10.
- Ferraro, N. G., Torres, C. M. A. e Penteado, P. C. M. (2018). *Vereda Digital - Física*. Editora Moderna. Volume Único (Parte III).
- Friça, A. C., Dal Pino, E., Sodré Jr, L. e Jatenco-Pereira, V. (2000). *Astronomia: Uma Visão Geral do Universo*.
- Frões, A. L. D. (2014). Astronomia, astrofísica e cosmologia para o ensino médio. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 36(3):1–15.
- Gouw, A. M. S. e Bizzo, N. M. V. (2016). A percepção dos jovens brasileiros sobre suas aulas de ciências. *Educar em Revista*, páginas 277–292.
- Griffiths, D. J. (1999). *Introduction to Electrodynamics*. Pearson. Terceira Edição.

- Halliday, D., Resnick, R. e Krane, K. S. (2004). *Física 4*, volume 4. LTC.
- Harvard College Observatory (2019). Great refractor. <https://hco.cfa.harvard.edu/facilities/GreatRefractor>. Acesso em 15 de Novembro de 2019.
- Hawking, S. (2017). *Buracos Negros: Palestra da BBC Reith Lectures*.
- Horvath, J. E. (2013). Uma proposta para o ensino da astronomia e astrofísica estelares no ensino médio. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 35.
- Horvath, J. E. (2019). *As Estrelas na Sala de Aula: uma Abordagem Para o Ensino da Astronomia Estelar*. Livraria da Física, São Paulo.
- Horvath, J. E. (2021). Subsídios para uma discussão da formação das estrelas na sala de aula. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 43.
- Horvath, J. E., Lugones, G., Scarano Jr, S., Teixeira, R. e Allen, M. P. (2011). *Cosmologia Física - do Micro ao Macro Cosmos e Vice-Versa*. Editora Livraria da Física. Segunda Edição.
- Hypolitto, D. (2009). Formação docente em tempos de mudança. *Revista Integração*, 14(56).
- Junior, P. C., Cristina, A. e Silva, C. C. (2013). Parceria entre a educação formal e não formal visando inovações curriculares: o ensino de física moderna a partir da física solar. *Enseñanza de las ciencias: revista de investigación y experiencias didácticas*, (Extra):786–790.
- Junior, P. D. C. e Silva, C. C. (2011). O sol: uma abordagem interdisciplinar para o ensino de física moderna. *anais ENPEC*, páginas 1–12.
- Kirchhoff, G. (1860). Ueber die fraunhofer'schen linien. *Annalen der Physik*, 185(1):148–150.
- Lang, K. R. (1980). *Astrophysical Formulae*. Springer.
- Lino, A. e Fusinato, P. A. (2011). A influência do conhecimento prévio no ensino de física moderna e contemporânea: um relato de mudança conceitual como processo de aprendizagem significativa. *Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia*, 4(3).
- Marchi, M. C. d. B. (2017). A contribuição de annie jump cannon para a classificação espectral de harvard. Tese de Doutorado (PUC-SP).
- Marder, L. (1970). *An Introduction to Relativity*. Longman. Segunda Edição.

- Marranghello, G. F. e Pavani, D. B. (2011a). Astronomia e física moderna: Duas necessidades, uma solução. *I Simpósio Nacional de Educação em Astronomia*. Rio de Janeiro.
- Marranghello, G. F. e Pavani, D. B. (2011b). Utilizando a câmera fotográfica digital como ferramenta para distinguir as cores das estrelas. *A Física na escola*. São Paulo. Vol. 12, no. 1 (maio 2011), p. 20-26.
- Moderna (2021). Base nacional comum curricular - material para o professor (ensino médio). https://anec.org.br/wp-content/uploads/2021/04/Moderna-BNCC-EM_E-book-para-o-PROFESSOR.pdf. Acesso em 06 de Julho de 2021.
- Napoleão, T. A. (2018). Guia de estudos: Astrofísica estelar para o ensino médio. <http://www.astro.iag.usp.br/~guia/>. Acesso em 06 de Julho de 2021.
- NASA (2019). Black hole math. www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/black_hole_math.pdf. Acesso em 04 de Maio de 2020.
- Okuno, E. e Yoshimura, E. M. (2016). *Física das radiações*. Oficina de Textos.
- Oliveira Filho, K. d. S. e Saraiva, M. d. F. O. (2004). *Astronomia e Astrofísica*, volume 780.
- Ostermann, F. e Moreira, M. A. (2016). Uma revisão bibliográfica sobre a área de pesquisa “física moderna e contemporânea no ensino médio”. *Investigações em ensino de ciências*, 5(1):23-48.
- Pereira, R. V. e Mizukoshi, J. K. (2019). Relatividade restrita. <https://propg.ufabc.edu.br/mnpef-sites/relatividade-restrita/>. Acesso em 05 de Janeiro de 2021.
- Perimeter Institute (2021). Recursos educacionais digitais gratuitos do Perimeter Institute para docentes. <https://resources.perimeterinstitute.ca/collections/astrophysics-cosmology>. Acesso em 06 de Julho de 2021.
- Ricardo, E. C. (2004). Ministério da educação MEC. *Secretaria de Educação Média e Tecnológica. Física*. Brasília-MEC/Semtec.
- Rutherford, E. (1899). Uranium radiation and the electrical conduction produced by it. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 47(284):109-163.
- Serway, R. A. e Jewett Jr, J. (2014). *Mecânica Clássica e Relatividade*. Cengage Learning. Quinta Edição.
- Silva, J. A. S. e Braidante, M. E. F. (2018). Aprendizagem significativa: concepções na formação inicial de professores de ciências. *Revista Insignare Scientia-RIS*, 1(1).

- Silva, M. P. C. (2016). A observação da lua com instrumentos ópticos e o ensino de astronomia: Articulações entre a experimentação e a sala de aula. Dissertação, Universidade de São Paulo.
- Silva, M. R. D. (2018). A bncc da reforma do ensino médio: o resgate de um empoeirado discurso. *Educação em revista*, 34.
- Silva, S. M. d. (2015). Uma experiência de inserção de astronomia e física moderna no ensino médio a partir do sol. Dissertação de Mestrado, Brasil.
- Silva Jr., R. S. (2017). Reflexões sobre o ensino da física moderna no ensino médio. *Revista Bases de la Ciencia*.
- Süssekind, M. L. (2019). A bncc e o “novo” ensino médio: reformas arrogantes, indolentes e malévolas. *Retratos da escola*, 13(25):91–107.
- Tipler, P. A. e Llewellyn, R. (2014). *Física Moderna*. LTC. Sexta Edição.
- UFRGS (2019). A teoria de planck. https://www.if.ufrgs.br/tex/fis142/fismod/mod03/m_s02.html. Acesso em 15 de Dezembro de 2021.
- Weyl, H. (1958). *Textos Fundamentais da Física Moderna*. Fundação Calouste Gulbenkian.
- Zabala, A. (2015). *A prática educativa: como ensinar*. Penso Editora.
- Zeilik, M. e Gregory, S. (1998). *Introductory Astronomy and Astrophysics*. Quarta Edição.

A Base Nacional Comum Curricular - BNCC

Ciências da Natureza e suas Tecnologias

Todas as atividades apresentadas nesta dissertação foram norteadas pelas competências e habilidades previstas pela BNCC (Brasil, 2015). Nesse anexo apresentam-se informações extraídas da Base em sua forma integral. Antes de apresentá-las, são aqui descritas as siglas adotadas nos códigos indicados em cada habilidade para que os(as) professores(as) possam implementá-las em sala de aula com maior facilidade.

As siglas das habilidades são divididas em códigos que definem as seguintes informações:

EM → indica que a habilidade específica é direcionada para o Ensino Médio;

13 → a habilidade pode ser utilizada em todos os anos do Ensino Médio, isso quer dizer, do 1º ao 3º ano do Ensino Médio;

CNT → informa a sigla da área do conhecimento em que a habilidade está trabalhando, que neste caso é Ciências da Natureza e suas Tecnologias;

Os últimos três números informados nos códigos das habilidades indicam a competência que se trabalhará e a posição da habilidade dentro dessa competência.

Exemplo:

EM13CNT103 - essa habilidade é destinada para todo o Ensino Médio (**EM**), para qualquer ano (**13**), está dentro da área de Ciências da Natureza (**CNT**) e é a terceira habilidade dentro da Competência 1 (**103**).

Competências Gerais

- Valorizar e utilizar os conhecimentos historicamente construídos sobre o mundo físico, social, cultural e digital para entender e explicar a realidade, continuar aprendendo e colaborar para a construção de uma sociedade justa, democrática e inclusiva.
- Exercitar a curiosidade intelectual e recorrer à abordagem própria das ciências, incluindo a investigação, a reflexão, a análise crítica, a imaginação e a criatividade, para investigar causas, elaborar e testar hipóteses, formular e resolver problemas e criar soluções (inclusive tecnológicas) com base nos conhecimentos das diferentes áreas.
- Valorizar e fruir as diversas manifestações artísticas e culturais, das locais às mundiais, e também participar de práticas diversificadas da produção artístico-cultural.
- Utilizar diferentes linguagens – verbal (oral ou visual-motora, como Libras, e escrita), corporal, visual, sonora e digital –, bem como conhecimentos das linguagens

artística, matemática e científica, para se expressar e partilhar informações, experiências, ideias e sentimentos em diferentes contextos e produzir sentidos que levem ao entendimento mútuo.

- Compreender, utilizar e criar tecnologias digitais de informação e comunicação de forma crítica, significativa, reflexiva e ética nas diversas práticas sociais (incluindo as escolares) para se comunicar, acessar e disseminar informações, produzir conhecimentos, resolver problemas e exercer protagonismo e autoria na vida pessoal e coletiva.
- Valorizar a diversidade de saberes e vivências culturais e apropriar-se de conhecimentos e experiências que lhe possibilitem entender as relações próprias do mundo do trabalho e fazer escolhas alinhadas ao exercício da cidadania e ao seu projeto de vida, com liberdade, autonomia, consciência crítica e responsabilidade.
- Argumentar com base em fatos, dados e informações confiáveis, para formular, negociar e defender ideias, pontos de vista e decisões comuns que respeitem e promovam os direitos humanos, a consciência socioambiental e o consumo responsável em âmbito local, regional e global, com posicionamento ético em relação ao cuidado de si mesmo, dos outros e do planeta.
- Conhecer-se, apreciar-se e cuidar de sua saúde física e emocional, compreendendo-se na diversidade humana e reconhecendo suas emoções e as dos outros, com autocrítica e capacidade para lidar com elas.
- Exercitar a empatia, o diálogo, a resolução de conflitos e a cooperação, fazendo-se respeitar e promovendo o respeito ao outro e aos direitos humanos, com acolhimento e valorização da diversidade de indivíduos e de grupos sociais, seus saberes, identidades, culturas e potencialidades, sem preconceitos de qualquer natureza.
- Agir pessoal e coletivamente com autonomia, responsabilidade, flexibilidade, resiliência e determinação, tomando decisões com base em princípios éticos, democráticos, inclusivos, sustentáveis e solidários.

Competências Específicas para o Ensino Médio em Ciências da Natureza

1. Analisar fenômenos naturais e processos tecnológicos, com base nas relações entre matéria e energia, para propor ações individuais e coletivas que aperfeiçoem processos produtivos, minimizem impactos socioambientais e melhorem as condições de vida em âmbito local, regional e/ou global.
2. Construir e utilizar interpretações sobre a dinâmica da Vida, da Terra e do Cosmos para elaborar argumentos, realizar previsões sobre o funcionamento e a evolução dos seres vivos e do Universo, e fundamentar decisões éticas e responsáveis.

3. Analisar situações-problema e avaliar aplicações do conhecimento científico e tecnológico e suas implicações no mundo, utilizando procedimentos e linguagens próprios das Ciências da Natureza, para propor soluções que considerem demandas locais, regionais e/ou globais, e comunicar suas descobertas e conclusões a públicos variados, em diversos contextos e por meio de diferentes mídias e tecnologias digitais de informação e comunicação (TDIC).

Habilidades Baseadas nas Competências Específicas

- EM13CNT103: Utilizar o conhecimento sobre as radiações e suas origens para avaliar as potencialidades e os riscos de sua aplicação em equipamentos de uso cotidiano, na saúde, na indústria e na geração de energia elétrica.
- EM13CNT106: Avaliar tecnologias e possíveis soluções para as demandas que envolvem a geração, o transporte, a distribuição e o consumo de energia elétrica, considerando a disponibilidade de recursos, a eficiência energética, a relação custo/benefício, as características geográficas e ambientais, a produção de resíduos e os impactos socioambientais.
- EM13CNT204: Elaborar explicações e previsões a respeito dos movimentos de objetos na Terra, no Sistema Solar e no Universo com base na análise das interações gravitacionais.
- EM13CNT205: Utilizar noções de probabilidade e incerteza para interpretar previsões sobre atividades experimentais, fenômenos naturais e processos tecnológicos, reconhecendo os limites explicativos das ciências.
- EM13CNT301: Construir questões, elaborar hipóteses, previsões e estimativas, empregar instrumentos de medição e representar e interpretar modelos explicativos, dados e/ou resultados experimentais para construir, avaliar e justificar conclusões no enfrentamento de situações-problema sob uma perspectiva científica.
- EM13CNT302: Comunicar, para públicos variados, em diversos contextos, resultados de análises, pesquisas e/ou experimentos – interpretando gráficos, tabelas, símbolos, códigos, sistemas de classificação e equações, elaborando textos e utilizando diferentes mídias e tecnologias digitais de informação e comunicação (TDIC) –, de modo a promover debates em torno de temas científicos e/ou tecnológicos de relevância sociocultural.

B Plano de Aula

| Conteúdo Específico | Conteúdos Relacionados | Tempo Estimado | Habilidades BNCC | Modo de Aplicação da Atividade Prática |
|----------------------------|--|-----------------------|--|---|
| Ondas Eletromagnéticas | Luminosidade e Fluxo Estelar | Entre 3 e 5 Aulas | EM13CNT301 | Ensino Presencial |
| Física Quântica | Classificação Estelar | Entre 3 e 5 Aulas | EM13CNT106 EM13CNT301 EM13CNT302 | Ensino Presencial Ensino Híbrido EAD |
| Física Nuclear | Evolução Estelar e a Produção de Elementos | Entre 3 e 6 Aulas | EM13CNT103 EM13CNT205 EM13CNT301 | Ensino Presencial Ensino Híbrido (Apresentação do Simulador deve ser feita Presencialmente) |
| Relatividade | Buracos Negros | Entre 4 e 6 Aulas | EM13CNT204 EM13CNT301 EM13CNT302 | Ensino Presencial (Parte I e II) Ensino Híbrido (Parte I Presencial e Parte II Online) EAD (Parte II) |

| Capítulo | Conteúdos Abordados | Tema da Atividade Prática |
|--|--|---|
| Luminosidade e Fluxo Estelar | Ondas Eletromagnéticas Propriedades da Luz Luminosidade e Fluxo Estelar Aparente | Estudando a Equação do Brilho Aparente de uma Estrela |
| Classificação Estelar | Radiação de Corpo Negro Função de Planck Efeito Fotoelétrico As Cores das Estrelas Classificação Estelar Diagrama H-R | Classificando Estrelas da Minha Constelação |
| Evolução Estelar e a Produção de Elementos | Radioatividade Física Nuclear Decaimentos α , β e γ Reações Nucleares Evolução Estelar Nucleossíntese Estelar | Analisando os Elementos Químicos de uma Supernova |
| Buracos Negros | Relatividade Restrita Relatividade Geral Buracos Negros | Observando Buracos Negros |

C Dados Estelares

Fonte: *An Introduction to Modern Astrophysics* (Carroll e Ostlie, 2007)

Classe de Luminosidade V - Sequência Principal

| Tipo | T_{efetiva} (K) | L/L_{\odot} | R/R_{\odot} | Tipo | T_{efetiva} (K) | L/L_{\odot} | R/R_{\odot} |
|------|--------------------------|---------------|---------------|------|--------------------------|---------------|---------------|
| O5 | 42000 | 499000 | 13,4 | G0 | 5940 | 1,25 | 1,06 |
| O6 | 39500 | 324000 | 12,2 | G2 | 5790 | 1,07 | 1,03 |
| O7 | 37500 | 216000 | 11,0 | G8 | 5310 | 0,656 | 0,96 |
| O8 | 35800 | 147000 | 10,0 | K0 | 5150 | 0,552 | 0,93 |
| B0 | 30000 | 32500 | 6,7 | K1 | 4990 | 0,461 | 0,91 |
| B1 | 25400 | 9950 | 5,2 | K3 | 4690 | 0,318 | 0,86 |
| B2 | 20900 | 2920 | 4,1 | K4 | 4540 | 0,263 | 0,83 |
| B3 | 18800 | 1580 | 3,8 | K5 | 4410 | 0,216 | 0,80 |
| B5 | 15200 | 480 | 3,2 | K7 | 4150 | 0,145 | 0,74 |
| B6 | 13700 | 272 | 2,9 | M0 | 3840 | 0,077 | 0,63 |
| B7 | 12500 | 160 | 2,7 | M1 | 3660 | 0,050 | 0,56 |
| B8 | 11400 | 96,7 | 2,5 | M2 | 3520 | 0,032 | 0,48 |
| B9 | 10500 | 60,7 | 2,3 | M3 | 3400 | 0,020 | 0,41 |
| A0 | 9800 | 39,4 | 2,2 | M4 | 3290 | 0,013 | 0,35 |
| A1 | 9400 | 30,3 | 2,1 | M5 | 3170 | 0,0076 | 0,29 |
| A2 | 9020 | 23,6 | 2,0 | M6 | 3030 | 0,0044 | 0,24 |
| A5 | 8190 | 12,3 | 1,8 | M7 | 2860 | 0,0025 | 0,20 |
| A8 | 7600 | 7,13 | 1,5 | | | | |
| F0 | 7300 | 5,21 | 1,4 | | | | |
| F2 | 7050 | 3,89 | 1,3 | | | | |
| F5 | 6650 | 2,56 | 1,2 | | | | |
| F8 | 6250 | 1,68 | 1,1 | | | | |

Classe de Luminosidade III - Gigantes Vermelhas

| Tipo | T _{efetiva} (K) | L/L _☉ | R/R _☉ | Tipo | T _{efetiva} (K) | L/L _☉ | R/R _☉ |
|------|--------------------------|------------------|------------------|------|--------------------------|------------------|------------------|
| O5 | 39400 | 741000 | 18,5 | G0 | 5470 | 29 | 6,0 |
| O6 | 37800 | 519000 | 16,8 | G2 | 5300 | 31 | 6,7 |
| O7 | 36500 | 375000 | 15,4 | G8 | 4800 | 44 | 9,6 |
| O8 | 35000 | 277000 | 14,3 | | | | |
| | | | | K0 | 4660 | 50 | 10,9 |
| B0 | 29200 | 84700 | 11,4 | K1 | 4510 | 58 | 12,5 |
| B1 | 24500 | 32200 | 10,0 | K3 | 4260 | 79 | 16,4 |
| B2 | 20200 | 11100 | 8,6 | K4 | 4150 | 93 | 18,7 |
| B3 | 18300 | 6400 | 8,0 | K5 | 4050 | 110 | 21,4 |
| B5 | 15100 | 2080 | 6,7 | K7 | 3870 | 154 | 27,6 |
| B6 | 13800 | 1200 | 6,1 | | | | |
| B7 | 12700 | 710 | 5,5 | M0 | 3690 | 256 | 39,3 |
| B8 | 11700 | 425 | 5,0 | M1 | 3600 | 355 | 48,6 |
| B9 | 10900 | 263 | 4,5 | M2 | 3540 | 483 | 58,5 |
| | | | | M3 | 3480 | 643 | 69,7 |
| A0 | 10200 | 169 | 4,1 | M4 | 3440 | 841 | 82,0 |
| A1 | 9820 | 129 | 3,9 | M5 | 3380 | 1100 | 96,7 |
| A2 | 9460 | 100 | 3,7 | M6 | 3330 | 1470 | 116,0 |
| A5 | 8550 | 52 | 3,3 | M7 | - | - | - |
| A8 | 7830 | 33 | 3,1 | | | | |
| | | | | | | | |
| F0 | 7400 | 27 | 3,2 | | | | |
| F2 | 7000 | 24 | 3,3 | | | | |
| F5 | 6410 | 22 | 3,8 | | | | |
| F8 | - | - | - | | | | |

Classe de Luminosidade (Aproximadamente) Iab - Supergigantes

| Tipo | T_{efetiva} (K) | L/L_☉ | R/R_☉ | Tipo | T_{efetiva} (K) | L/L_☉ | R/R_☉ |
|-------------|--------------------------------|------------------------|------------------------|-------------|--------------------------------|------------------------|------------------------|
| O5 | 40900 | 1140000 | 21,2 | G0 | 5370 | 30300 | 202 |
| O6 | 38500 | 998000 | 22,4 | G2 | 5190 | 30800 | 218 |
| O7 | 36200 | 877000 | 23,8 | G8 | 4700 | 32400 | 272,0 |
| O8 | 34000 | 769000 | 25,3 | | | | |
| | | | | K0 | 4550 | 33100 | 293,0 |
| B0 | 26200 | 429000 | 31,7 | K1 | 4430 | 34000 | 314,0 |
| B1 | 21400 | 261000 | 37,3 | K3 | 4190 | 36100 | 362,0 |
| B2 | 17600 | 157000 | 42,8 | K4 | 4090 | 37500 | 386,0 |
| B3 | 16000 | 123000 | 45,8 | K5 | 3990 | 39200 | 415,0 |
| B5 | 13600 | 79100 | 51,1 | K7 | 3830 | 43200 | 473,0 |
| B6 | 12600 | 65200 | 53,8 | | | | |
| B7 | 11800 | 54800 | 56,4 | M0 | 3620 | 51900 | 579,0 |
| B8 | 11100 | 47200 | 58,9 | M1 | 3490 | 60300 | 672,0 |
| B9 | 10500 | 41600 | 61,8 | M2 | 3370 | 72100 | 791,0 |
| | | | | M3 | 3210 | 89500 | 967,0 |
| A0 | 9980 | 37500 | 64,9,0 | M4 | 3060 | 117000 | 1220,0 |
| A1 | 9660 | 35400 | 67,3 | M5 | 2880 | 165000 | 1640,0 |
| A2 | 9380 | 33700 | 69,7 | M6 | 2710 | 264000 | 2340,0 |
| A5 | 8610 | 30500 | 78,6 | M7 | - | - | - |
| A8 | 7910 | 29100 | 91,1 | | | | |
| | | | | | | | |
| F0 | 7460 | 28800 | 102,0 | | | | |
| F2 | 7030 | 28700 | 114,0 | | | | |
| F5 | 6370 | 29100 | 140,0 | | | | |
| F8 | 5750 | 29700 | 174,0 | | | | |

D Respostas dos(as) Alunos(as)
Atividade sobre Classificação Estelar

4.6 Roteiro de Atividade Prática - Aluno(a)

A Astrologia, é uma pseudociência empregada muitos anos antes do nascimento da própria Astronomia. A partir dela povos inteiros identificavam momentos corretos para plantio e colheita ou até mesmo, em modo mais religioso, a possibilidade de um evento cataclísmico, ao se depararem por exemplo com um Eclipse Total do Sol.

Quando a Astrologia chegou aos Gregos, eles relacionaram que a posição de uma certa constelação no momento do nascimento de uma criança, estaria diretamente relacionada com a sua personalidade durante a sua vida.

Apesar da Astronomia e a Astrologia andarem juntas durante um bom tempo, foi Tycho Brahe e Johannes Kepler, que revolucionaram com suas descobertas fazendo uma ruptura entre os dois temas. Hoje sabemos que por causa do movimento de precessão do nosso Planeta Terra as constelações que são usadas como apoio para a Astrologia mudam com o passar dos anos.

Vamos fazer um tour pelo céu do dia em que cada um de vocês nasceram para entender melhor não só a validade da Astrologia, mas principalmente como as estrelas se classificam?






Foto da constelação Cruzeiro do Sul (à direita da imagem) junto com as estrelas da constelação de Centauro, Rigil Kentaurus e Hadar (à esquerda da imagem), também conhecidas como Alpha Centauri e Beta Centauri respectivamente. Fonte: NASA/Yuri Beletsky².

² Crédito da Imagem: <https://apod.nasa.gov/apod/ap070517.html>.

Procedimento

Parte I - Uso do aplicativo no Android ou iOS

1. Abra o aplicativo Celestia.
2. Clique no botão  e vá em Configurações;
3. Clique em Hora Atual e depois em Selecionar Hora;
4. Coloque a data e hora do seu nascimento no formato dd/MM/yyyy HH:mm:ss e clique em OK;
Exemplo: 01/01/2020 01:02:03.
5. Volte para a tela inicial onde temos a Terra como foco e altere o botão de visualização de modo objeto  para modo de câmera ;
6. Localize o Sol utilizando mexendo na própria tela do celular;
7. Nesse momento você poderá ver em qual constelação (região demarcada por uma linha avermelhada) o Sol estava no dia em que você nasceu. Anote o nome dessa constelação.



Parte II

1. Escolha duas estrelas dentro da área que consta sua constelação e clique em cima delas.

Importante: Essas Estrelas não podem ser repetidas dentro do seu grupo.

2. Utilizando os dados obtidos pelo Celestia e as informações dadas no **Material de Apoio** dessa atividade, complete a **Tabela de Dados do Grupo**, referente às estrelas escolhidas por cada um do grupo:

3. Marque no Diagrama H-R disponibilizado também no **Material de Apoio**, cada uma das estrelas informadas na **Tabela de Dados do Grupo** e responda o Questionário de Investigação.

| Tabela de Dados do Grupo | | | | | |
|------------------------------|--|--|---|---|--|
| Nome Aluno (a) | | | | | |
| Constelação | Sagitário | Sagitário | Leão | Leão | |
| Estrela 1 | | | | | |
| Nome da Estrela | Nunki | Alcobah | Chetam | Denebola | |
| Tipo Espectral | B ₂ | F ₂ | A ₂ | A ₃ | |
| Luminosidade (L_{\odot}) | 632 | 1500 | 102 | 14.4 | |
| Classe de Luminosidade | V | II | IV | V | |
| Temperatura Superficial (K) | 20.600 | 7350 | 9000 | 8600 | |
| Cor da Estrela | Azulada | Amanelada | Branca | Branca | |
| Comprimento de Onda (m) | $1,9 \times 10^{-4}$ | $3,9 \times 10^{-4}$ | $3,2 \cdot 10^{-4}$ | $3,3 \cdot 10^{-4}$ | |
| Estrela 2 | | | | | |
| Nome da Estrela | Rukbat | Antob. Posterior | Zosma | Algieha | |
| Tipo Espectral | B ₈ | F ₀ | A ₅ | K ₁ | |
| Luminosidade (L_{\odot}) | 69.4 | 28.3 | 26 | 214 | |
| Classe de Luminosidade | V | IV | IV | III | |
| Temperatura Superficial (K) | 12300 | 7150 | 8100 | 4600 | |
| Cor da Estrela | azulada | amarelo | Branca | Laranja | |
| Comprimento de Onda (m) | $2,3 \cdot 10^{-4}$ | $4 \cdot 10^{-4}$ | $3,5 \cdot 10^{-4}$ | $6,3 \cdot 10^{-4}$ | |

Questionário de Investigação

- Podemos validar as informações da Astrologia (Signos do Zodíaco), segundo as informações que vocês retiraram durante essa atividade? Justifique.

Não, pois não há estudos científicos que comprovem, de fato, que a posição de uma constelação definiria a personalidade de uma pessoa. A astrologia não passa de uma crença grega antiga.

- Essas estrelas caíram em qual posição no Diagrama H-R?

(Analisar Diagrama no Material de Apoio)

- | | |
|------------|-------------------|
| • Nunki | • Rukbat |
| • Alhadah | • Antok posterior |
| • Chetov | • Zarma |
| • Demehela | • Algieha |

- Como os parâmetros influenciam na classificação das estrelas. Justifique em termos de proporção.

Sabendo que as estrelas são classificadas em tamanho e cor, podemos afirmar que quanto maior a luminosidade, maior será seu tamanho e quanto maior a temperatura, mais interna (proximidade ao coração) será o seu tipo espectral.

Material de Apoio

Importante: Abaixo, algumas dicas de onde obter cada uma das informações contidas na Tabela de Dados do Grupo, para você não se perder!

- Constelação, Nome da Estrela, Tipo Espectral, Luminosidade, Classe de Luminosidade e Temperatura Superficial → Celestia;
- Classe de Luminosidade → Tabela de Classe de Luminosidade (Tabela 6);
- Cor da Estrela → Tabela de Classificação Espectral por Tipo Espectral e Cor (Tabela 5);
- Comprimento de onda → Lei de Deslocamento de Wien.

Exemplo:

Tabela 4 – Tabela de dados de exemplo utilizando as informações baseadas na Figura 4.2.

| Tabela de Dados | |
|------------------------------|---------|
| Constelação | Gêmeos |
| Nome da Estrela | Castor |
| Tipo Espectral | A2 |
| Luminosidade (L_{\odot}) | 48,6 |
| Classe de Luminosidade | V (Anã) |
| Temperatura Superficial (K) | 8970 |
| Cor da Estrela | Branca |

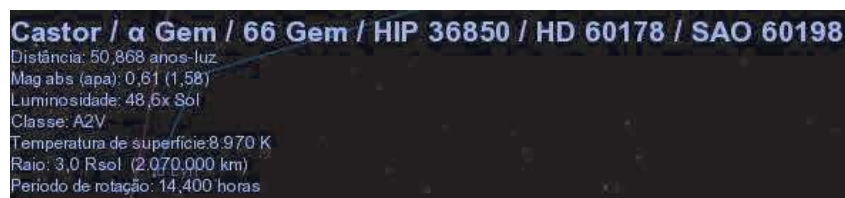


Figura 4.2 – Exemplo de uma estrela da constelação de Gêmeos, selecionada no *Software Celestia*.

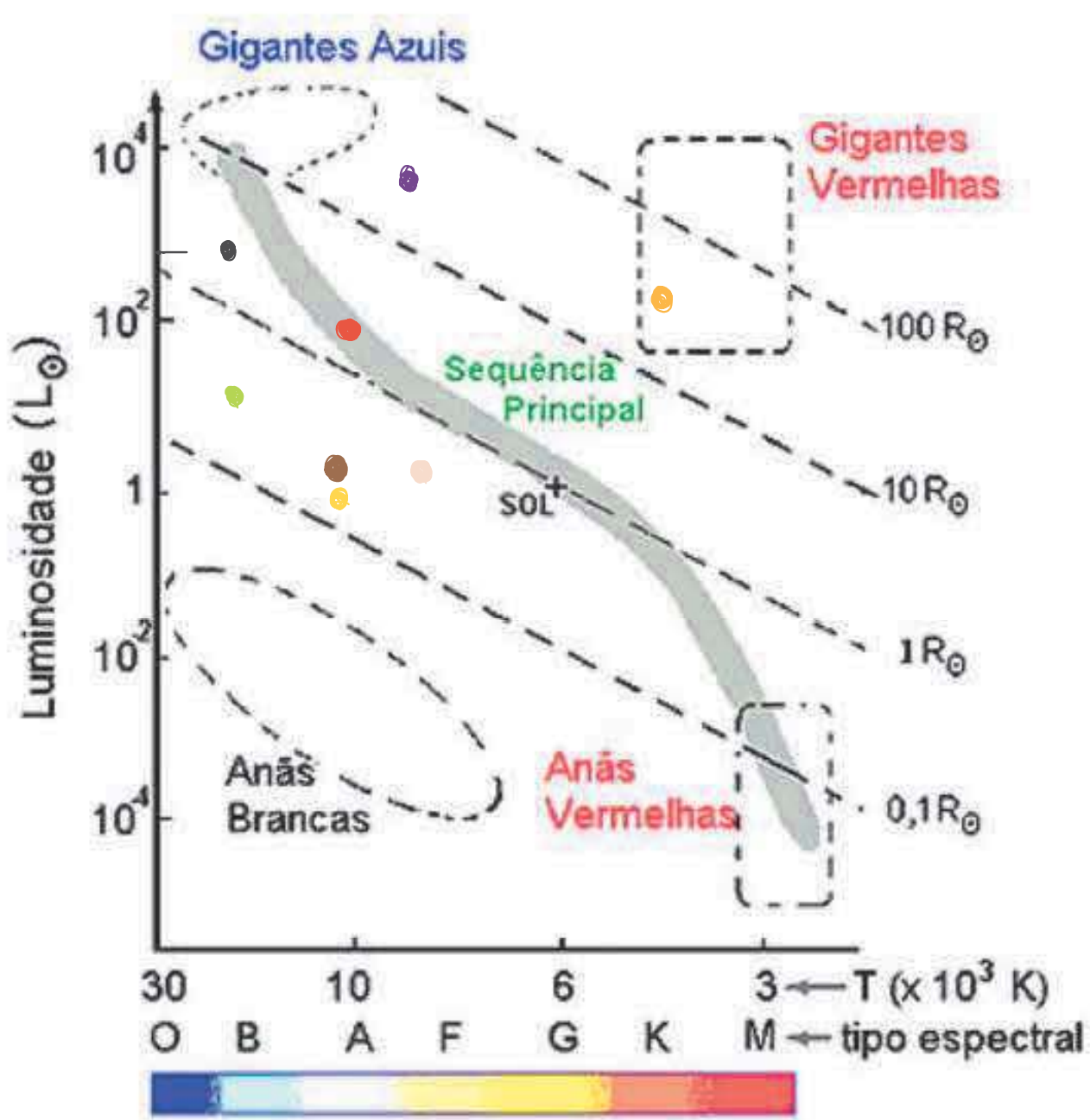
Tabela 5 – Classificação Espectral por Tipo Espectral e Cor.

| Tipo Espectral | Cor |
|----------------|-----------|
| O | Azul |
| B | Azulada |
| A | Branca |
| F | Amarelada |
| G | Amarela |
| K | Laranja |
| M | Vermelha |

Tabela 6 – Classe de Luminosidade.

| Classe | Magnitude |
|--------|-------------------------------|
| Ia | Supergigantes Superbrilhantes |
| Ib | Supergigantes |
| II | Gigantes Brilhantes |
| III | Gigantes |
| IV | Subgigantes |
| V | Anãs (Sequência Principal) |

Lei de Deslocamento de Wien: $\lambda_{m\acute{a}x} \cdot T = 2,898 \cdot 10^{-3} m \cdot K$

Figura 4.3 – Diagrama H-R ³.

³ Crédito da Imagem: Figura Adaptada <http://www.telescopiosnaescola.pro.br/coresdastrelas.pdf>

E Artigo Publicado - RBEF

- Almeida, P. A. D. e Gregorio-Hetem, J. (2021). Aspectos do sol observados em diferentes faixas espectrais. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 44(e20210405). DOI: <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2021-0405> (em anexo).

Aspectos do Sol observados em diferentes faixas espectrais

Aspects of the Sun observed at different spectral ranges

P. A. D. Almeida^{*1}, J. Gregorio-Hetem¹

¹Universidade de São Paulo, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, São Paulo, SP, Brasil.

Recebido em 16 de novembro de 2021. Aceito em 22 de novembro de 2021.

A busca por novas metodologias e estratégias para transformar as aulas de Física mais próximas da realidade dos(as) estudantes do Ensino Médio, faz com que professores(as) criem novas atividades com ideias diferentes das que são usualmente apresentadas em livros didáticos.

Nesse contexto, utilizou-se o Sol como base conhecida para explicar os conceitos de ondas eletromagnéticas e radiação de corpo negro, abordando esse conteúdo por meio da Função de Planck, da Lei de Wien e da Lei de Stefan-Boltzmann de uma forma aplicada, com o uso de um programa desenvolvido para esse fim, e de imagens astronômicas obtidas com tecnologia de ponta, visando tornar o aprendizado mais significativo.

O objetivo é apresentar a possibilidade do uso de informações relativas ao Sol como tema norteador para o aprendizado dos conteúdos de Física Moderna, motivando os(as) estudantes durante o processo educativo. Além disso, apresenta-se um resumo dos conceitos básicos relacionados ao Sol, buscando levar aos(as) professores(as) uma forma de compreender os processos físicos que explicam as diferentes características solares observadas em faixas espectrais específicas.

Palavras-chave: Estrelas, Estrutura solar, Espectro eletromagnético, Radiação de corpo negro, BNCC.

The search for new methodologies and strategies to bring physics classes closer to the reality of high school students, prompts teachers to create new activities with novel ideas, different from those that are usually found in textbooks.

In this context, the Sun was used as a known basis to explain the concepts of electromagnetic waves and black body radiation, approaching this content with the use of the Planck function, the Wien's law and the Stefan-Boltzmann law in practical activities by using a code developed by us, and astronomical images obtained through cutting edge technology, making the learning process more significant.

The goal is to present the possibility of using information related to the Sun as a guiding theme for the learning of Modern Physics topics, motivating students during the educational process. In addition, a summary of the basic concepts related to the Sun is presented, endeavoring to provide teachers with a way to understand the physical processes that explain how different solar characteristics are observed in specific spectral ranges.

Keywords: Stars, Solar structure, Electromagnetic spectrum, Black body radiation, BNCC.

1. Introdução

Por muitas vezes os(as) alunos(as) perdem a motivação de determinado assunto, pois não conseguem relacioná-lo com o cotidiano ou com o futuro profissional que almejam. Segundo o livro “A sala de aula inovadora: estratégias pedagógicas para fomentar o aprendizado ativo”, de Fausto Camargo e Thuinie Daros [1], nos traz uma reflexão sobre o tema.

“Se os alunos conseguem estabelecer relações entre o que aprendem no plano intelectual e as situações reais, experimentais e profissionais ligadas a seus estudos, certamente a aprendizagem será mais significativa e enriquecedora [1].”

De acordo com a reflexão acima, e seguindo a proposta de Ausubel [2], a base da aprendizagem significativa

está fundamentada na conexão entre o conhecimento prévio do(a) aluno(a) e o novo conteúdo a ser assimilado, de forma que o processo de aquisição de conhecimento seja dinâmico [3, 4]. Nesse sentido, a contextualização é necessária para evitar um aprendizado mecânico, no qual as informações são memorizadas, como no exemplo em que o aluno aprendeu a usar uma fórmula, mas não compreendeu o sentido de realizar uma dada operação matemática [5]. Com esse argumento, Anastasiou [6] sugere que se tenha em mente a diferença entre as ações de “aprender” (que significa tomar conhecimento) e “apreender” que está relacionada com segurar, entender e compreender. Segundo a autora, “para apreender é preciso agir, exercitar-se, informar-se, tomar para si, apropriar-se, entre outros fatores...”. É a partir deste conceito básico teórico que se justifica a importância da aprendizagem ativa e significativa.

Os(As) professores(as) por outro lado, buscam incessantemente diferentes formas para atribuir sentido ao que se é dado em sala de aula e ao mesmo tempo

* Endereço de correspondência: paula.almeida@usp.br

cumprir o projeto pedagógico e os conteúdos dos livros didáticos disponibilizados pela escola. Os Parâmetros Curriculares Nacionais do Ensino Médio (PCN) para a área de Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias, traz uma reflexão sobre o assunto:

“É preciso discutir qual Física ensinar para possibilitar uma melhor compreensão do mundo e uma formação para a cidadania mais adequada. Sabemos todos que, para tanto, não existem soluções simples ou únicas, nem receitas prontas que garantam o sucesso. Essa é a questão a ser enfrentada pelos educadores de cada escola, de cada realidade social, procurando corresponder aos desejos e esperanças de todos os participantes do processo educativo, reunidos através de uma proposta pedagógica clara [7].”

No contexto das realidades do(a) professor(a) e do(a) aluno(a), é necessário pensar em novas possibilidades dentro da sala de aula. Segundo Zabala [8], é interessante que o(a) professor(a) monte situações didáticas que coloquem o(a) aluno(a) como protagonista de seu aprendizado, mesmo que sua aula ainda tenha uma base no conteúdo previsto pelo currículo escolar, porém com um significado intrínseco baseado na realidade de cada aluno(a), não apenas nomes, fórmulas e regras para serem memorizadas e sim um conteúdo interconectado com seu cotidiano. Nesse formato, o(a) professor(a) deve sair do papel de controlador do saber, para assumir um papel ainda mais desafiador e importante para a aprendizagem, o de mediador, orientando seus(as) alunos(as) nos diversos caminhos que podem ser traçados dentro de uma determinada atividade. Para isso o(a) professor(a) deve ter conhecimento básico em relação ao assunto da atividade que será colocada em prática em sala de aula, pois assim terá autonomia para a escolha de recursos didáticos baseados na realidade escolar de seus(as) alunos(as) e nos seus interesses, de forma a ser flexível quando necessário [8–10].

O Sol é a estrela mais conhecida por nós, não somente pelo fato que nosso sistema planetário é regido por ele, mas também por ser responsável pela vida e energia do nosso planeta. Fenômenos como auroras boreais e austrais são ligadas diretamente com a atividade solar, assim como análises de variações de temperatura da Terra, além das interferências nas comunicações. Tratam-se de temas de impacto no cotidiano, tornando as pesquisas voltadas para o Sol cada vez mais específicas e que dependem de tecnologia de ponta. Pela proximidade com temas da atualidade, o estudo do Sol se configura em uma excelente contextualização para a aprendizagem significativa por meio de um processo dinâmico. Além disso, como se pode constatar durante as aulas de Ciências da Natureza, a curiosidade é inerente ao jovem, que tem prazer em compreender a origem dos fenômenos e como se dá a produção de conhecimentos

sobre os mesmos. Essa curiosidade é ainda mais estimulada quando são abordadas tecnologias avançadas e relacionadas com pesquisa científica. Sabemos que as metodologias de ensino tradicional, baseadas em processos de aprendizagem mecânica e de memorização, são aquelas que desestimulam a curiosidade natural, criando o desinteresse dos(as) alunos(as) em estudar tópicos relacionados com as ciências exatas, por exemplo. Assim, surge a motivação em utilizar o Sol como objeto de estudo e propor neste artigo atividades práticas relacionadas com o espectro eletromagnético e a radiação de corpo negro.

Para analisar a atual situação das atividades e/ou sequências didáticas disponíveis para os(as) professores(as) do ensino médio, foi feito um levantamento bibliográfico e percebeu-se que há grandes esforços em utilizar o tema Sol dentro da sala de aula, principalmente nos anos finais do ensino médio. Foram encontrados trabalhos sobre potência do Sol, efeito estufa e o aquecimento global [11, 12], física moderna com foco em espectroscopia, radiação de corpo negro e modelos atômicos [13–17] e por fim estrelas de forma mais geral, com menções ao Sol sendo sempre utilizado como exemplo básico e conhecido [18, 19]. Os artigos em geral apresentam bons indicadores teóricos para que o(a) professor(a) realize as atividades propostas, porém nenhum dos artigos aqui mencionados trazem atividades que visam a análise das características do Sol.

Foi considerando todo esse contexto que a atividade proposta nesse artigo foi criada. O(A) professor(a) então terá subsídios para colocar seus(as) alunos(as) para refletirem, analisarem e discutirem em grupos sobre o tema proposto. Assim, o(a) aluno(a) terá os conteúdos que fazem parte do currículo do terceiro ano do ensino médio, como ondas eletromagnéticas e radiação de corpo negro, como também terá acesso a uma atividade prática sobre um assunto pouco discutido nos anos finais da educação básica, mas muito relevante para o conhecimento em geral.

Além da aplicação na última etapa da educação básica, o(a) professor(a) poderá utilizar esse material para a criação de projetos dos chamados itinerários formativos que são previstos pela BNCC [29].

O artigo é subdividido da seguinte forma: a Seção 2 apresenta a motivação em se desenvolver a atividade proposta, alinhada com algumas das competências e habilidades previstas na BNCC. Para fornecer aos(as) professores(as) um embasamento dos conceitos básicos relacionados com o tema de estudo do presente trabalho, na Seção 3 são resumidas as principais características físicas das estruturas interna e externa do Sol. A Seção 4 descreve as diferentes missões espaciais e os aspectos relacionados ao espectro eletromagnético e a radiação de corpo negro explorados na atividade prática proposta. Finalmente, as conclusões são discutidas na Seção 5, e três apêndices são dedicados ao fornecimento de material de apoio.

2. Desenvolvimento das Atividades

A atividade proposta nesse artigo tem como base algumas estratégias de ensino e aprendizagem ativa e significativa [5, 6] discutida na Seção 1. Segundo Vygotsky [20], a apropriação de conhecimentos e habilidades se dá por meio da interação entre estudantes. Além disso, o desenvolvimento cognitivo depende do contexto em que o indivíduo está inserido [21]. As habilidades em trabalhos grupais são fundamentais, advindas do desenvolvimento da *inteligência relacional* [6], ou seja “a capacidade de os indivíduos serem competentes na interação com outros seres humanos no contexto grupal onde atuam” [22]. Justifica-se também o uso da pesquisa científica e tecnologia de ponta como forma de estímulo ao aprendizado, visando combater o mecanicismo e promover a interpretação, a espontaneidade e a auto-organização [23].

Seguindo tais marcos teóricos, dentre as diversas estratégias de ensino-aprendizagem [24–28] compiladas por Anastasiou [6], adotamos duas: “estudo dirigido” e “ensino com pesquisa”, que mais se aproximam dos objetivos a serem alcançados no presente trabalho. Tais metodologias podem ser aplicadas, mediadas pelo(a) professor(a), por meio de trabalho em equipe a partir de uma atividade de análise, construída conforme algumas competências, como o desenvolvimento de ideias a partir de reflexões, argumentação oral e escrita, capacidade analítica e de síntese, utilizando para este fim, análises por comparação, leitura e interpretação de texto. Com essas competências, a atividade visa que o(a) estudante tenha uma base geral para uma discussão fundamentada e argumentativa sobre não somente a estrutura solar, mas também sobre os comprimentos de onda no qual o Sol pode ser estudado, os satélites capazes de receber essas informações (espectro eletromagnético) e por fim sobre o ciclo solar, percebendo que para determinados momentos do ciclo, o Sol pode nos apresentar diferentes estados, como por exemplo, número de manchas solares.

A atividade proposta também está alinhada à BNCC, focada principalmente na Competência 3 apresentada abaixo:

Investigar situações-problema e avaliar aplicações do conhecimento científico e tecnológico e suas implicações no mundo, utilizando procedimentos e linguagens próprios das Ciências da Natureza, para propor soluções que considerem demandas locais, regionais e/ou globais, e comunicar suas descobertas e conclusões a públicos variados, em diversos contextos e por meio de diferentes mídias e tecnologias digitais de informação e comunicação (TDIC) [29].

Utilizando especificamente as seguintes habilidades:

(EM13CNT301) Construir questões, elaborar hipóteses, previsões e estimativas,

empregar instrumentos de medição e representar e interpretar modelos explicativos, dados e/ou resultados experimentais para construir, avaliar e justificar conclusões no enfrentamento de situações-problema sob uma perspectiva científica [29].

(EM13CNT302) Comunicar, para públicos variados, em diversos contextos, resultados de análises, pesquisas e/ou experimentos, elaborando e/ou interpretando textos, gráficos, tabelas, símbolos, códigos, sistemas de classificação e equações, por meio de diferentes linguagens, mídias, tecnologias digitais de informação e comunicação (TDIC), de modo a participar e/ou promover debates em torno de temas científicos e/ou tecnológicos de relevância sociocultural e ambiental [29].

(EM13CNT303) Interpretar textos de divulgação científica que tratem de temáticas das Ciências da Natureza, disponíveis em diferentes mídias, considerando a apresentação dos dados, tanto na forma de textos como em equações, gráficos e/ou tabelas, a consistência dos argumentos e a coerência das conclusões, visando construir estratégias de seleção de fontes confiáveis de informações [29].

A atividade começa contemplando as habilidades EM13CNT301 e EM13CNT303 onde os grupos deverão fazer uma leitura e interpretação de um texto de divulgação científica que está disponível no início do roteiro da atividade. A partir dessa leitura os grupos analisarão por inspeção visual as imagens que revelam diferentes características do Sol, chegando em algumas possíveis conclusões utilizando como base um questionário. Já a habilidade EM13CNT302 foi contemplada ao final da atividade, onde cada grupo deverá elaborar um texto do tipo Divulgação Científica, apresentando as descobertas feitas e discutidas com os colegas do grupo e da turma.

A atividade proposta foi dividida em duas partes, com objetivos distintos mas, interligados. A Parte I tem como objetivo entender as diferentes camadas do Sol, por meio de inspeção visual de imagens observadas em três faixas espectrais. Essa parte da atividade pode ser aplicada no Terceiro Ano do Ensino Médio como revisão de ondas eletromagnéticas para que o(a) professor(a) tenha subsídios para iniciar os conteúdos de Física Moderna. Já a Parte II da atividade tem como objetivo entender a relação entre a temperatura de uma estrela e em qual comprimento de onda ocorre o máximo da emissão de luz. Além de propor a resolução de problemas relacionados com a cor das estrelas e sua relação com a temperatura, são sugeridas outras aplicações, tais como determinação do fluxo estelar e a quantização de energia.

Essa parte da atividade também pode ser aplicada para o Terceiro Ano do Ensino Médio no conteúdo sobre radiação de corpo negro.

Buscou-se para esse artigo materiais que fossem acessíveis para qualquer tipo de escola, seja ela pública ou privada.

A escolha do uso das figuras foi pensada para que o maior número de professores(as) possam utilizar como recurso didático dentro da sala de aula, sem a necessidade de se preocuparem com direitos autorais (pelo uso das imagens). Zabala, em seu livro “A prática educativa” [8], apresenta uma reflexão que mostra a importância desse tipo de recurso na hora da escolha de um livro didático ou de uma sequência didática.

“As imagens estáticas, [...], são úteis como suporte para as exposições dos professores e úteis como complemento esclarecedor de muitas das ideias que se querem comunicar, tanto através de esquemas como imagens ou ilustrações que ajudem na elaboração e na construção de conceitos, assim, como para a exposição das fases de determinados conteúdos procedimentais. São instrumentos que facilitam o diálogo em classe e ajudam a centrar a atenção do grupo com relação a um objeto de estudo comum. Também são instrumentos para a criação de formas expressivas e comunicativas, que os alunos podem utilizar em suas exposições em aula [8].”

Além do uso de imagens, os recursos computacionais facilitam o aprendizado do(a) aluno(a), principalmente quando o assunto não é viável em uma experimentação mais palpável.

“Os programas de computador podem exercer uma função inestimável como suporte para qualquer trabalho de simulação de processos que, por suas características, podem ser perigosos ou cuja realização pode ser complexa [8].”

O uso de recursos tecnológicos, também faz parte de algumas habilidades da BNCC e para que isso seja implementado nas atividades práticas sugeridas, desenvolvemos um código que calcula e apresenta graficamente a curva de radiação de corpo negro, de forma comparativa entre o Sol e estrelas de diferentes temperaturas.

Apresenta-se a seguir alguns tópicos que foram utilizados como base teórica para a criação da atividade proposta nesse artigo. Esses tópicos foram organizados não somente com o foco voltado ao currículo comum do terceiro ano do ensino médio, como em livros didáticos, mas principalmente para o entendimento do(a) professor(a) para uma aplicação eficaz da atividade dentro da sala de aula. Conforme notado por Horvath [30], são raras as ocasiões em que educadores são expostos de forma aprofundada à Física envolvida nos temas de

Astronomia, sendo de interesse a produção de materiais que contribuam para sua formação continuada.

3. Princípios físicos envolvidos na atmosfera e no interior solar

A radiação de corpo negro, expressa pela Função de Planck, fornece uma boa aproximação para representar a emissão estelar. Na Seção 3.1 apresentamos a função de Planck e sua relação com os conceitos abordados na atividade proposta neste trabalho.

A eficiência da transferência de energia por radiação depende da opacidade, em função da estrutura do interior estelar, ou seja, se é convectivo ou radiativo. Algumas das características do interior e da atmosfera de estrelas semelhantes ao Sol, com enfoque nos processos de convecção e efeitos do campo magnético, são abordadas nas Seções 3.2 e 3.3 para descrever as características observáveis em diferentes faixas espectrais, tais como granulação e manchas solares, por exemplo. São características que também se relacionam com o ciclo de atividade solar discutido na Seção 3.4.

3.1. Radiação estelar

O que se observa na superfície solar está relacionado com a forma em que a energia, produzida em seu interior por processos nucleares, é transportada para o exterior estelar. Devido à opacidade no interior da estrela, os fótons realizam caminhos aleatórios em sucessivas colisões e espalhamentos através do conteúdo estelar (elétrons e partículas de gás). Os fótons escapam da estrela graças a uma tendência do caminho direcionado para fora, que é devida ao gradiente de pressão de radiação. A pressão total de radiação produzida por fótons em todos comprimentos de onda (λ) depende da radiação de corpo negro, expressa pela função de Planck:

$$B_{\lambda}(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \left[e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right]^{-1}, \quad (1)$$

onde $c = 2,9979 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$ é a velocidade da luz, $h = 6,6262 \times 10^{-34} \text{ J s}$ é a constante de Planck e $k = 1,38062 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$ é a constante de Boltzmann.

É interessante notar que o termo $\frac{hc}{\lambda}$ que aparece na exponencial da Eq. (1) define a energia mínima de uma onda eletromagnética de frequência f , conhecida por *quantum* de energia: $E = hf$.

A função de Planck fornece uma estimativa do brilho estelar em função da temperatura da estrela e do comprimento de onda (vide Fig. 1). Considerando um corpo negro de temperatura T e elemento de área superficial (dA), a quantidade de energia radiante por unidade de tempo, em um intervalo de comprimento de onda ($d\lambda$), atravessando o ângulo sólido ($d\Omega$) é expressa por:

$$B_{\lambda}(T) d\lambda dA \cos\theta d\Omega. \quad (2)$$

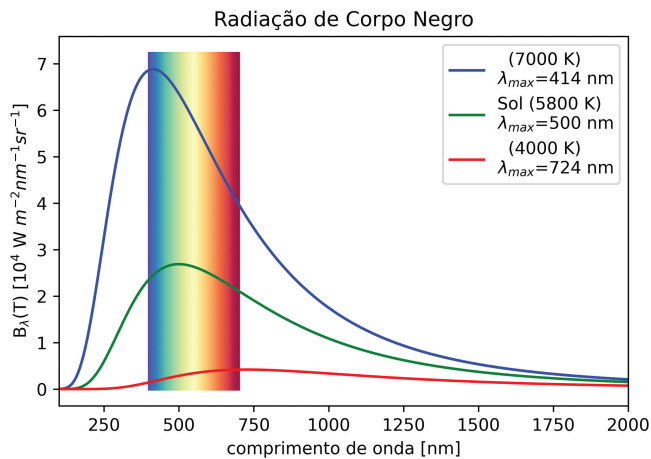


Figura 1: Curva da Função de Planck obtida para o Sol, indicando que seu máximo de emissão ocorre na faixa do visível. Para comparação, é apresentada a curva para uma estrela mais quente e outra mais fria.

em unidades de $W m^{-2} nm^{-1} sr^{-1}$, onde $\cos \theta$ indica a direção de radiação¹. Para obtenção da luminosidade da estrela de raio R realiza-se a integral da Eq. (2) em toda superfície estelar e em todas as direções, o que leva a:

$$L_{\lambda}d\lambda = 4\pi^2 R^2 B_{\lambda}(T)d\lambda. \tag{3}$$

Assim, a luminosidade é uma característica intrínseca da estrela, dependendo apenas de sua temperatura e seu raio. Por outro lado, o fluxo monocromático de radiação coletado a uma dada distância (d) é obtido pela lei do inverso do quadrado da distância, na qual a luminosidade é dividida pela área de uma esfera de raio d :

$$F_{\lambda}d\lambda = \frac{L_{\lambda}d\lambda}{4\pi d^2} = \pi \left(\frac{R^2}{d^2}\right) B_{\lambda}(T)d\lambda. \tag{4}$$

Para estimar o fluxo total de radiação, integramos a função de Planck em todos os comprimentos de onda:

$$B(T) = \int B_{\lambda}(T)d\lambda = \frac{\sigma T^4}{\pi}, \tag{5}$$

onde $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$ é a constante de Stefan-Boltzmann. Desta forma temos o fluxo dado por:

$$F = \left(\frac{R}{d}\right)^2 \sigma T^4, \tag{6}$$

nas unidades de $W m^{-2}$. Aplicando a Eq. (6) para os dados $R = 6,9598 \times 10^8$ m (raio do Sol, R_{\odot}), e $d = 1,49598 \times 10^{11}$ m = 1 ua (unidade astronômica), que corresponde à distância entre a Terra e o Sol, temos uma expressão para a irradiância solar total (TSI) incidente na Terra. Rodríguez Gómez *et al.* [31] e Carlesso *et al.* [32] apresentam os conceitos básicos

relacionados com a radiação solar e seus impactos na Terra.

O monitoramento da TSI, como por exemplo do SORCE/TIM², apresentado por Kopp [33], mostra variações correlacionadas com o ciclo de atividade solar.

A temperatura da superfície solar, também chamada temperatura efetiva (T_{ef}), pode ser estimada partir da Eq. (6), em função do valor da TSI. Por exemplo, $T_{ef} = 5770$ K foi estimada por Cahalan *et al.* [35] adotando $F = TSI = 1360,8 W m^{-2}$ [36]. Nos cálculos de modelos solares, Bahcall *et al.* [37] adotam $F = 1369 W m^{-2}$, que corresponde à luminosidade solar $L_{\odot} = 3,844 \times 10^{26} W$ e temperatura $T_{ef} = 5780$ K.

Para simplificar os cálculos, vamos adotar $T_{ef} \sim 5800$ K em uma importante aplicação que relaciona cor e temperatura estelar, um dos conceitos abordados na atividade proposta no presente trabalho. Trata-se da lei de Wien, utilizada para estimar a região espectral onde ocorre o pico de máxima intensidade. Esse pico é determinado quando a derivada da função de Planck é nula: $\frac{dB_{\lambda}(T)}{d\lambda} = 0$, que leva à solução:

$$\lambda_{max} T = 0,002897755 m K. \tag{7}$$

Para ilustrar a aplicação da lei de Wien, utilizando o Sol como exemplo, vamos calcular o comprimento de onda λ_{max} em ocorre o seu máximo de emissão. Utilizando a Eq. (7) de forma aproximada, tem-se que:

$$\begin{aligned} \lambda_{max} &= \frac{0,0029 (m K)}{T (K)} \\ \lambda_{max} &= \frac{0,0029}{5800} (m) \\ \lambda_{max} &\approx 5 \times 10^{-7} m \approx 500 nm. \end{aligned}$$

Logo, é possível perceber que para essa temperatura, o Sol tem seu pico de emissão em um comprimento de onda aproximadamente igual a 500 nm, conforme ilustrado na Fig. 1, onde são também comparadas as curvas da função de Planck para outras estrelas, uma mais fria e outra mais quente que o Sol. Nota-se que o pico de emissão é mais alto para a estrela mais quente e deslocado para a região do azul no espectro. No caso da estrela mais fria, o máximo de emissão é menos intenso e ocorre na região do vermelho. No Apêndice A são descritas as ferramentas computacionais sugeridas para os(as) professores(as) reproduzirem a Fig. 1 para diversas temperaturas estelares.

3.2. Processo de convecção

A estrutura em camadas distribuídas no interior das estrelas depende de sua massa e das condições físicas, como densidade e temperatura. No caso das estrelas de massa semelhante à do Sol, o núcleo é radiativo e o envoltório é convectivo.

¹ Adotamos aqui o sistema de coordenadas esféricas em que o ângulo θ é medido com relação ao eixo perpendicular ao elemento de área dA , ou seja, à superfície estelar.

² Solar Radiation and Climate Experiment/Total Irradiance Monitor [34]

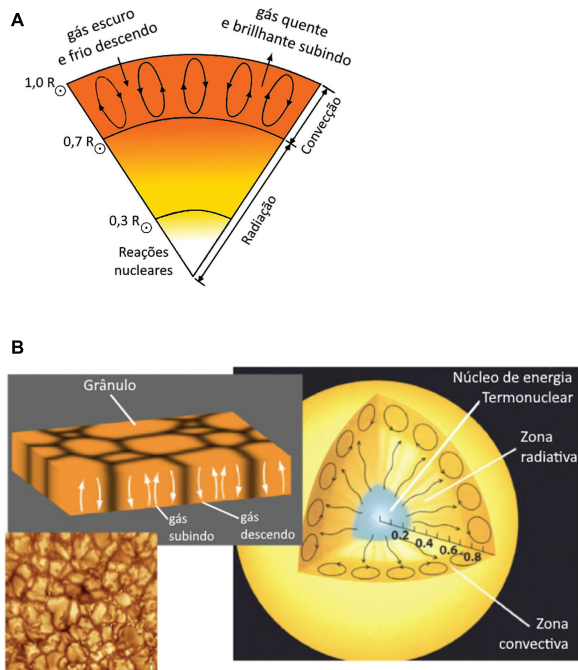


Figura 2: Esquema da estrutura interna do Sol, indicando o raio estimado que define o núcleo central, onde ocorrem as reações termonucleares, e as camadas que estabelecem as zonas de radiação e de convecção. Detalhes da superfície granular e as células de convecção são mostrados no lado esquerdo do painel B.

Para melhor entender a forma que a energia, gerada no núcleo estelar, é transportada para fora, devemos lembrar os conceitos de termodinâmica, que estabelecem um critério para o início da convecção no interior da estrela. A condição necessária para que a convecção seja mais dominante que a radiação nas regiões profundas da estrela é que o gradiente de temperatura se torne maior do que a variação dT/dr no caso adiabático. Esta é a condição em que uma “bolha” de gás quente continuará a subir, em vez de voltar a descer, depois de ter se deslocado para cima. Com base em modelos estelares (por exemplo [38], [39]) e adotando as condições físicas da região central do Sol (dados de [37]), estima-se que atualmente o Sol é puramente radiativo abaixo de $r \sim 0,7R_{\odot}$, como ilustrado na Fig. 2. A explicação física para isso é a opacidade na parte mais externa do Sol, que é alta o suficiente para inibir o transporte de energia por radiação. A Fig. 2 também destaca os detalhes que apresentam o movimento do gás quente ascendente e do gás frio descendente nas células de convecção. A aparência granular da fotosfera solar é devida à ocorrência destas células de convecção, cujo topo é brilhante (gás quente) e as bordas escuras (gás frio que desce pelas bordas da célula).

3.3. Características da fotosfera e da cromosfera solar

Quando os fótons produzidos no interior estelar chegam à superfície, eles escapam para o espaço atravessando

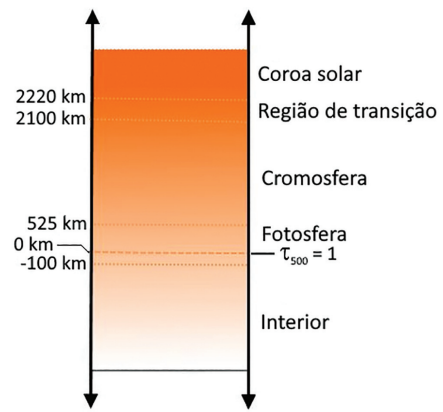


Figura 3: A espessura das camadas da atmosfera solar. Adaptado de [40].

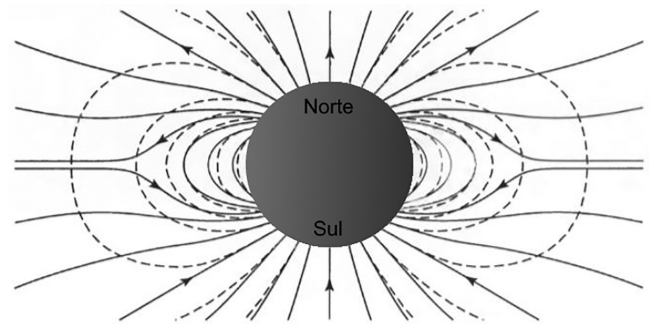


Figura 4: Esquema descrevendo de forma geral o campo magnético no Sol. As linhas tracejadas indicam o campo de um perfeito dipolo magnético. Adaptado de [40].

livremente a primeira camada externa do Sol, chamada fotosfera. Como pode ser visto na Fig. 3, o início desta região é definido quando o gás torna-se menos opaco que no interior estelar, expresso pela profundidade óptica³ $\tau_{\lambda} < 1$.

Na fotosfera se observa a granulação solar, formada por pequenas (diâmetros ~ 700 km) regiões brilhantes contornadas por regiões escuras. O aspecto granular se deve a essas regiões transitórias, que desaparecem em cerca de 5 a 10 minutos, correspondendo ao topo das células convectivas.

As manchas solares são características típicas da fotosfera solar. Elas aparecem mais escuras, por se tratarem de regiões mais frias, onde ocorre inibição da emissão de fótons, devido à concentração de linhas de campo magnético. Neste caso, as manchas solares ocorrem em grupos e aos pares, associados aos polos magnéticos, acompanhando a direção da rotação do Sol. É o movimento de cargas no interior da estrela que causa o efeito dínamo e produz o campo magnético neste caso (vide ilustração na Fig. 4).

³ Para o comprimento de onda ~ 500 nm, a profundidade óptica $\tau_{500} = 1$ indica o início da região em que o gás se encontra no regime opticamente fino.

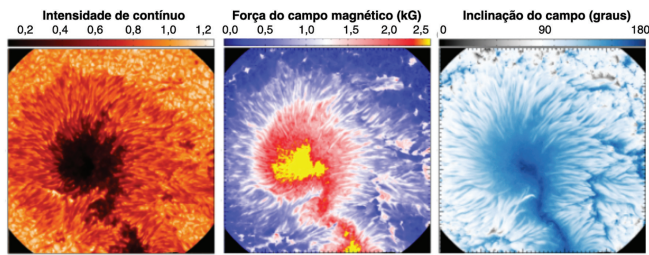


Figura 5: Imagem de mancha solar e simulações da distribuição de campo magnético ao seu redor, com base nos dados do Swedish 1-m Solar Telescope [42]. Adaptado de [41].

Na Fig. 5 temos um exemplo de mancha solar observada na fotosfera. Estas estruturas têm em média um diâmetro de 10000 km, ou seja, quase 2 vezes o diâmetro da Terra. A aparência da estrutura filamentar observada na penumbra (região menos escura ao redor da mancha) indica a presença das linhas de campo magnético.

A confirmação da existência de fortes campos magnéticos associados às manchas solares é obtida pela observação das linhas espectrais que aparecem subdivididas pelo efeito Zeeman. Essa subdivisão das linhas, aparecendo em comprimentos de onda levemente deslocados, se deve aos fótons produzidos quando há transição de elétrons entre sub-níveis atômicos degenerados, que foram alterados pela presença de campos magnéticos, adquirindo pequenas variações de energia. Os painéis do centro e da direita na Fig. 5 mostram simulações indicando intensidade e direção do campo magnético, com base no efeito Zeeman observado na linha de Fe em 617,3 nm, que são resultados do estudo de Solanki *et al.* [41].

A camada localizada acima da fotosfera é chamada cromosfera, que se estende por cerca de 1600 km. A densidade diminui por um fator de 10^4 , enquanto que a temperatura aumenta a partir de 4400 K até atingir 10000 K. Estas condições físicas são favoráveis para a formação de linhas espectrais que não são produzidas nas baixas temperaturas e altas densidades da fotosfera. Destacam-se as linhas do hidrogênio da série de Balmer, como $H\alpha$ (656,28 nm) por exemplo, cuja predominância favorece o aspecto avermelhado observado na cromosfera, notado mais facilmente no início ou no final de eclipse total do Sol. Com um filtro adequado para restringir apenas a passagem de fótons da emissão $H\alpha$ é possível notar importantes sub-estruturas da cromosfera, como a supergranulação, em escala muito maior (30000 km) que a observada na fotosfera, além de, por exemplo, os filamentos verticais transitórios, chamados espículos, através dos quais ocorre movimento de material.

3.4. Atividade solar

Embora as complexas características observadas na atmosfera solar sejam transientes, muitas delas

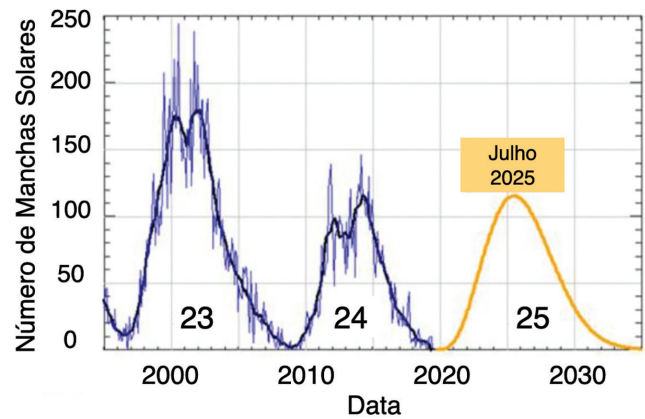


Figura 6: Número de manchas solares observadas nos ciclos de atividade solar 23 e 24, indicando as medidas a cada mês (azul) e os valores médios (preto). De acordo com as previsões, o ciclo 25 (linha amarela) tem máximo esperado para julho de 2025. Adaptado da imagem disponibilizada pelo *Space Weather Prediction Center/NOAA*.

correspondem a fenômenos relacionados a mudanças no campo magnético global do Sol e seus ciclos de atividade. O evento eruptivo, conhecido como *flare* (ou clarão) solar, ocorre na forma de ejeção de partículas carregadas (raios cósmicos) em função de perturbações nos arcos formados pelas linhas de campo magnético e um mecanismo que envolve alta produção de energia associada com a reconexão das linhas magnéticas. Além dos *flares*, outro evento eruptivo (ou de atividade) é conhecido como proeminência solar, que está relacionado à uma instabilidade do arco magnético, mas em vez de emissão de radiação refere-se a movimento de massa, na forma de gás sendo ejetado do Sol.

A intensidade dos *flares* e das proeminências cresce com a maior atividade solar, assim como o aumento do número de manchas solares. O acompanhamento das contagens do número de manchas tem sido realizado desde os tempos de Galileu, permitindo a identificação do ciclo solar de 11 anos, bem como um ciclo de inversão de polos do campo magnético a cada período de 22 anos, sempre ocorrendo durante um mínimo de atividade (menos contagens de manchas solares). A variação do número de manchas solares⁴, observadas no período de 1995 a 2019, é apresentada na Fig. 6, na qual é possível notar no ciclo 23 uma média de cerca de 180 manchas contadas nos meses de máxima atividade, enquanto que no ciclo 24 o máximo está em torno de 100. A previsão do comportamento da atividade solar para o ciclo 25, que se iniciou em dezembro de 2019, é estimado a partir de diferentes tipos de simulações e estudos estatísticos, tais como [43–45], dentre os mais recentes.

⁴ <https://www.weather.gov/news/201509-solar-cycle>

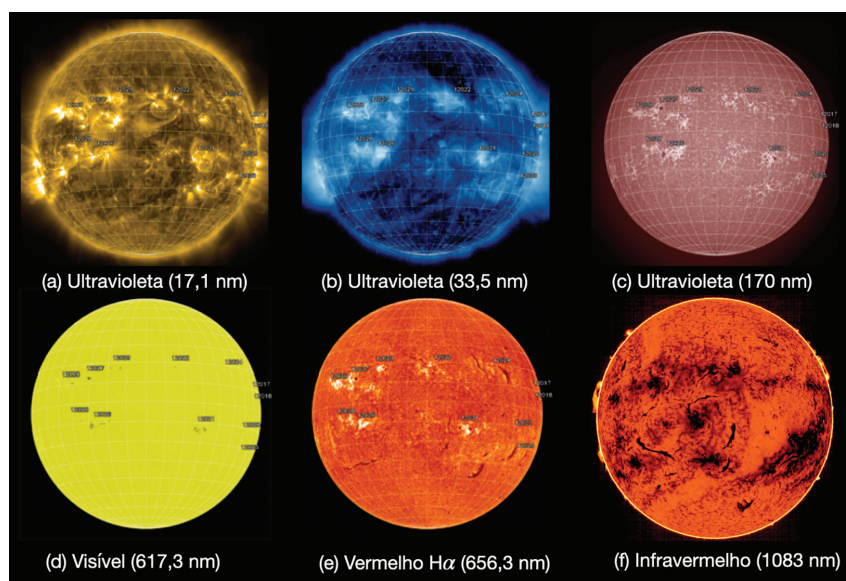


Figura 7: Imagens do Sol em diferentes faixas do espectro eletromagnético obtidas pelo satélite SDO em 03/4/2014 com os instrumentos AIA (imagens a, b e c); HMI (d) e GNH (e). Os números anotados sobre as imagens identificam 12 regiões ativas. A imagem (f) foi obtida pelo NSO, em 05/02/2002.

4. Estudando o Sol em diferentes comprimentos de onda

Toda informação proveniente do Universo é obtida a partir de instrumentos próprios para coletar as diferentes formas de radiação. Esses instrumentos estão associados à análise de determinados comprimentos de onda, fornecendo-nos informações específicas das condições físicas dos astros, como por exemplo nas diferentes camadas do Sol. A Fig. 7 apresenta as imagens do Sol em várias faixas do espectro eletromagnético, sendo possível observar diversas características solares discutidas na Seção 3. Para ilustrar o máximo de atividade solar que ocorreu mais recentemente (ciclo 24), foram selecionadas as imagens obtidas pelo satélite SDO (*Solar Dynamics Observatory*) com os instrumentos AIA (*Atmospheric Imaging Assembly*) operando em três diferentes comprimentos de onda do ultravioleta [46]; HMI (*Helioseismic and Magnetic Imager*) para detecção na faixa do visível [47, 48]; e GNH (*Global High Resolution H-alpha Network*)⁵ para mapeamento da emissão H α . Para tais imagens, disponibilizadas pelo grupo de Física Solar do *Trinity College Dublin*⁶ são indicadas as regiões ativas identificadas pelo NOAA *Space Weather Prediction Center*. O painel (f) da Fig. 7 corresponde a uma imagem obtida no infravermelho próximo ($\lambda = 1,083\mu\text{m}$) pelo NSO (*National Solar Observatory at Kitt Peak*)⁷. Essa imagem no infravermelho foi obtida no ciclo 23, o que explica as diferenças na distribuição de regiões ativas com relação aos painéis (a)-(e).

⁵ <http://www.bbo.njit.edu/Research/Halpha/>

⁶ <https://www.solarmonitor.org/>

⁷ Colaboração NSF/NOAO, NASA/GSFC, NOAA/SE <https://nispdata.nso.edu/ftp/kpvt/daily/medres/02.02>

O SOHO (*Solar and Heliospheric Observatory*) e o *Hinode* são duas missões que foram enviadas para estudar o Sol em detalhes. A partir do SOHO e do *Hinode* foi possível obter as imagens fornecidas na atividade de análise proposta nesse trabalho que se encontram no Apêndice C.

A nave espacial SOHO é uma missão com consórcio entre a NASA e a Agência Espacial Europeia (ESA), que tem como um dos objetivos investigar as camadas mais externas da atmosfera solar, como a Fotosfera, a Cromosfera e a Coroa Solar. O SOHO possui 12 instrumentos de observação diferentes, que trabalham independentes, onde dois deles são de particular interesse para este artigo: o MDI⁸ (*Michelson Doppler Imager*) e o EIT (*Extreme Ultraviolet Imaging*) [49].

Já o *Hinode* é um satélite que possui colaboração entre as agências espaciais do Japão (JAXA), Estados Unidos (NASA) e Europa (ESA) além do *Particle Physics and Astronomy Research Council* (PPARC) do Reino Unido. Esse satélite tem como principal objetivo estudar os campos magnéticos solares afim de entender melhor as erupções solares. Para isso, possui três instrumentos de observação e análise sendo um deles o XRT (*X-Ray Telescope*) [51]. Embora os princípios físicos que envolvem as emissões de altas energias, em particular relacionadas à coroa solar, sejam diferentes dos conceitos básicos apresentados na Seção 3, as observações em raios-X são incluídas aqui de forma ilustrativa, para demonstrar que a radiação solar ocorre em todas as frequências de ondas eletromagnéticas, revelando diferentes características relacionadas a uma ampla faixa de energias envolvidas.

⁸ O SOHO/MDI foi encerrado em 12/4/2011 [50].

5. Considerações Finais

Este artigo mostra uma forma de apresentar os conteúdos de ondas eletromagnéticas e de radiação de corpo negro, utilizando como objeto de estudo o Sol. As atividades foram pensadas com foco na determinação de características estelares, como cor, temperatura e fluxo emitido, usando ferramentas computacionais gráficas, cálculos, comparações com tabelas, e análise visual de imagens fornecidas pelo(a) professor(a), trazendo dessa forma competências e habilidades da BNCC que são importantes para serem desenvolvidas dentro de sala de aula.

O intuito principal da atividade é que os alunos e alunas trabalhem de forma colaborativa, aprendendo em conjunto, conteúdos que normalmente são abstratos na educação básica, trazendo motivação e entusiasmo, juntamente com a produção e educação científica. Além disso, espera-se motivar os professores a reverem conceitos básicos relacionados ao Sol, de forma a compreender os processos físicos que explicam as diferentes características solares observadas em diferentes faixas espectrais.

O material de apoio está dividido em três partes. O Apêndice A é dedicado à atividade computacional, com o código desenvolvido no presente trabalho para gerar o gráfico da curva de corpo negro, com uso alternativo de linguagem de programação e de *software*. O Apêndice B contém a atividade que deve ser entregue para os(as) alunos(as) e o Apêndice C, o Gabarito da mesma atividade, incluindo as imagens a serem analisadas. Uma versão *online* destes dois apêndices está disponível na formatação adequada para impressão e uso em sala de aula.

Material Suplementar

O seguinte material *online* está disponível para este artigo:

Apêndice A – Atividade Computacional

Apêndice B – Atividade de Análise: O Sol e os Comprimentos de Onda

Apêndice C – Atividade de Análise: O Sol e os Comprimentos de Onda – Gabarito

Referências

- [1] F. Camargo e T. Daros, *A sala de aula inovadora estratégias pedagógicas para fomentar o aprendizado ativo* (Penso Editora, Porto Alegre, 2018).
- [2] D.P. Ausubel, *Aquisição e retenção de conhecimentos: Uma perspectiva cognitiva* (Editora Plátano, Lisboa, 2003).
- [3] M.A. Moreira, *Uma abordagem cognitivista ao Ensino de Física: a teoria da aprendizagem de David Ausubel como sistema de referência para organização do ensino de ciências* (Editora da UFRGS, Porto Alegre, 1983).
- [4] A. Pelizzari, M.L. Kriegel, M.P. Baron, N.T.L. Finck e S.I. Dorocinski, *Revista PEC* **2**, 37 (2002).
- [5] O. Reboul, *O Que É Aprender* (Livreria Almedina, Coimbra, 1982).
- [6] L.G.C. Anastasiou e L.P. Alves, *Processos de ensinagem na universidade: pressupostos para as estratégias de trabalho em sala de aula* (Ed. Uninville, Joinville, 2007).
- [7] MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO, *Parâmetros Curriculares Nacionais: Ensino Médio (Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias)* (Ministério da Educação, Brasília, 2000).
- [8] A. Zabala, *A prática educativa: como ensinar* (Penso Editora, Porto Alegre, 2015).
- [9] J.A.S. Silva e M.E.F. Braidante, *Revista Insignare Scientia* **1**, 1 (2018).
- [10] D.G. Pérez, *Enseñanza de las ciencias: revista de investigación y experiencias didácticas* **9**, 69 (1991).
- [11] M.A. Rodrigues, *HOLOS* **1**, e5442 (2020).
- [12] R.S.R. Rodrigues e J.G. Carlos, *Caminho Aberto: Revista de extensão do IFSC* **6**, 15 (2019).
- [13] F.B. Santana e P.J.S. dos Santos, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **34**, 555 (2017).
- [14] P.C. Junior, A. Cristina e C.C. Silva, *Enseñanza de las ciencias: revista de investigación y experiencias didácticas*, 786 (2013).
- [15] P.D.C. Junior e C.C. Silva, em: *VIII Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciência – ENPEC* (Campinas, 2011).
- [16] S.M. Silva, *Uma experiência de inserção de astronomia e física moderna no ensino médio a partir do sol*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal (2015).
- [17] F.F. Guimarães, *Proposta de sequência didática para o estudo da radiação do corpo negro no ensino médio*. Dissertação de Mestrado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão (2018).
- [18] J.E. Horvath, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **35**, 4501 (2013).
- [19] G.F. Marranghello e D.B. Pavani, *A Física na escola* **12**, 20 (2011).
- [20] L.S. Vygotsky, *A formação social da mente* (Martins Fontes, São Paulo, 1988).
- [21] K.S. Silva e L.S. Fonseca, *Teorias da aprendizagem: perfis de práticas no ensino de ciências e matemática* (Instituto Federal do Sergipe, Aracaju, 2019).
- [22] L.C. Osório, *Psicologia grupal: uma nova disciplina para advento de uma nova era* (Artmed, Porto Alegre, 2003).
- [23] E. Morin, *Complexidade e transdisciplinaridade: a reforma da universidade e do ensino fundamental* (Editora da UFRN, Natal, 2000).
- [24] J.D. Bordenave, *Estratégias de ensino-aprendizagem* (Vozes, Petrópolis, 2001), 22^a ed.
- [25] M.A. Behrens, *O paradigma emergente e a prática pedagógica* (Champagnat, Curitiba, 1999).
- [26] P. Meirieu, *Aprender...sim, mas como?* (Artes Médicas, Porto Alegre, 1998).
- [27] M.T. Masetto, *Competência pedagógica do professor universitário* (Summus, São Paulo, 2003).
- [28] I.P.A. Veiga, *Técnicas de ensino: por que não?* (Papyrus, Campinas, 1991).

- [29] <http://basenacionalcomum.mec.gov.br>, acessado em 07/12/2020.
- [30] J.E. Horvath, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **43**, e20210237 (2021).
- [31] J.M. Rodríguez Gómez, F. Carlesso, L.E. Vieira e L. Da Silva, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **40**, e3312 (2018).
- [32] F. Carlesso, J.M.R. Gómez, L.E.A. Vieira, G.S. Savonov, L.A. Berni, e L.L. Costa, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **41**, e20180220 (2019).
- [33] G. Kopp, *Solar Physics* **296**, 133 (2021).
- [34] G. Kopp, SORCE Level 3 Total Solar Irradiance Daily Means V019, disponível em: <https://doi.org/10.5067/7C82ZHS0OPFR>.
- [35] R.F. Cahalan, P. Ajiuchi e G. Yataz, arXiv:2109.08736 (2021).
- [36] G. Kopp e J.L. Lean, *Geophysical Research Letters* **38**, L01706 (2011).
- [37] J.N. Bahcall, M.H. Pinsonneault e S. Basu, *The Astrophysical Journal* **555**, 990 (2001).
- [38] G. Schaller, D. Schaerer, G. Meynet e A. Maeder, *Astronomy and Astrophysics, Supplement Series* **96**, 269 (1992).
- [39] C. Charbonnel, W. Däppen, D. Schaerer, P.A. Bernasconi, A. Maeder, G. Meynet e N. Mowlavi, *Astronomy and Astrophysics, Supplement Series* **135**, 405 (1999).
- [40] B.W. Carroll e D.A. Ostlie, *An introduction to modern astrophysics* (Pearson Addison Wesley, São Francisco, 2007).
- [41] S.K. Solanki, J.C. del Toro Iniesta, J. Woch, A. Gandorfer, J. Hirzberger, A. Alvarez-Herrero, T. Appourchaux, V. Martínez Pillet, I. Pérez-Grande, E. Sanchis Kilders *et al.*, *Astronomy & Astrophysics* **642**, A11 (2020).
- [42] G.B. Scharmer, K. Bjelksjo, T.K. Korhonen, B. Lindberg, B. Petterson, em: *Proceedings SPIE, Vol. 4853, Innovative Telescopes and Instrumentation for Solar Astrophysics*, (Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, Waikoloa, 2003), p. 341.
- [43] Q.J. Wang, J.C. Li e L.Q. Guo, *Research in Astronomy and Astrophysics* **21**, 012 (2021).
- [44] V.M.S. Carrasco e J.M. Vaquero, *Research Notes of the AAS* **5**, 181 (2021).
- [45] Y. Xiong, J. Lu, K. Zhao, M. Sun e Y. Gao, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **505**, 1046 (2021).
- [46] J.R. Lemen, A.M. Title, D.J. Akin, P.F. Boerner, C. Chou, J.F. Drake, D.W. Duncan, C.G. Edwards, F.M. Friedlaender, G.F. Heyman *et al.*, *Solar Physics* **275**, 17 (2012).
- [47] Y. Liu, P.H. Scherrer, J.T. Hoeksema, J. Schou, T. Bai, J.G. Beck, M. Bobra, R.S. Bogart, R.I. Bush, S. Couvidat, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series* **455**, 337 (2012).
- [48] P.H. Scherrer, J. Schou, R.I. Bush, A.G. Kosovichev, R.S. Bogart, J.T. Hoeksema, Y. Liu, T.L. Duvall Jr. e J. Zhao, A.M. Title *et al.*, *Solar Physics* **275**, 207 (2012).
- [49] https://www.nasa.gov/mission_pages/soho/index.html, acessado em: 23/11/2020.
- [50] NASA, *Michelson Doppler Imager (MDI)*, disponível em: <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/experiment/displ ay.action?id=1995-065A-12>, acessado em: 25/07/2021.
- [51] NASA, *Hinode: Mission to the Sun*, disponível em: https://www.nasa.gov/mission_pages/hinode/mission.html, acessado em: 23/11/2020.

F Carta de Autorização

- Anuência para a realização de pesquisa enviada ao Centro de Ensino São José, escola escolhida para a análise de dados da pesquisa (em anexo).

CARTA DE AUTORIZAÇÃO

ANUÊNCIA PARA A REALIZAÇÃO DE PESQUISA

À

Direção e Coordenação do Centro de Ensino São José

Prezados,

Solicitamos a autorização institucional para a realização da pesquisa a ser realizada no Centro de Ensino São José, pela mestrandia Paula Aline Durães Almeida de Souza Santos, professora de física, portadora do CPF 350.482.628-24, aluna regular do curso de pós-graduação do Programa de Mestrado Profissional em Ensino de Astronomia, do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, sob a orientação da Professora Doutora Jane Cristina Gregorio Hetem, com o objetivo de contribuir para o ensino de física moderna utilizando como tema norteador a astrofísica, mais precisamente utilizando a evolução de estrelas massivas. Para a realização deste trabalho se fará necessária a utilização de dados que serão colhidos através de formulários, exercícios e provas dos alunos e alunas participantes do terceiro ano do ensino médio dos anos de 2018, 2019, 2020 e principalmente 2021. Além disso, ressaltamos que as atividades a serem desenvolvidas não ocasionarão prejuízos no cumprimento dos conteúdos a serem ministrados no ano letivo. Asseguramos que os dados coletados durante a pesquisa estão sob a proteção da Lei Geral de Proteção de Dados (LGPD - Lei Nº 13.709, de 14 de agosto de 2018), preservando explicitamente a identidade do participante e sem oferecer riscos do compartilhamento de quaisquer dados pessoais fornecidos para o projeto.

Ressaltamos que a pesquisa ocorrerá de acordo com a Resolução Nº 510, de 07 de abril de 2016 do Conselho Nacional de Saúde (CNS/MS), que trata da pesquisa envolvendo seres humanos. Informamos a garantia de solicitar e receber esclarecimentos antes, durante e depois do desenvolvimento da pesquisa que seja decorrente desta participação. Ademais, informamos que não haverá nenhuma despesa para esta instituição que seja decorrente da



participação da pesquisa, assim como há a liberdade de retirar a participação a qualquer momento sem penalização alguma.

Na certeza de um acolhimento favorável, agradecemos antecipadamente a atenção e ficamos à disposição para quaisquer esclarecimentos adicionais que se fizerem necessários.



Paula Aline Durães Almeida de Souza Santos

Concordamos com a solicitação

Não concordamos com a solicitação



Simone C. Pellegrini

Diretora Geral
RG: 29.267.570-7

Direção Centro de Ensino São José



Sabrina Zapata

RG: 29.267.448-X
Coord. Pedagógica

Coordenação Centro de Ensino São José