



**MNPEF** Mestrado Nacional  
Profissional em  
Ensino de Física



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
DO AMAZONAS  
MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA  
POLO 04

Verônica Tavares Barbosa

A CONSTRUÇÃO DE UMA UEPS PARA O ENSINO DO  
EFEITO DOPPLER RELATIVÍSTICO COM ELEMENTOS  
CONTEXTUAIS DA COSMOLOGIA.

Manaus - AM

2023

Verônica Tavares Barbosa

**A CONSTRUÇÃO DE UMA UEPS PARA O ENSINO DO  
EFEITO DOPPLER RELATIVÍSTICO COM ELEMENTOS  
CONTEXTUAIS DA COSMOLOGIA.**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, polo 04 - UFAM / IFAM, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientador: Prof. Dr. Lúcio Fábio Pereira da Silva

Coorientador: Prof. Dr. Minos Martins Adão Neto

Manaus - AM

2023

**Biblioteca IFAM – Campus Manaus Centro**

---

B238c Barbosa, Verônica Tavares.  
A construção de uma UEPS para o ensino do efeito DOPPLER relativístico com elementos contextuais da cosmologia / Verônica Tavares Barbosa. – Manaus, 2023.  
256 p. : il. color.

Dissertação (Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas, *Campus* Manaus Centro; Universidade Federal do Amazonas, 2023.

Orientador: Prof. Dr. Lúcio Fábio Pereira da Silva.

Coorientador: Minos Martins Adão Neto.

1. Física. 2. Efeito Doppler Relativístico. 3. Aprendizagem Significativa. 4. UEPS. I. Silva, Lúcio Fábio Pereira da. (Orient.) II. Adão Neto, Minos Martins. III. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas. IV. Universidade Federal do Amazonas. V. Título.

CDD 530

**Verônica Tavares Barbosa**


Orientador (es):

Prof. Dr. Lúcio Fábio Pereira da Silva

Prof. Dr. Minos Martins Adão Neto


Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, polo 04 – UFAM / IFAM, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Aprovada por:

Documento assinado digitalmente  
 LUCIO FABIO PEREIRA DA SILVA  
Data: 11/01/2024 10:09:40-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>


---

**Prof. Dr. Lúcio Fábio Pereira da Silva – Presidente da Banca – UFAM.**

Documento assinado digitalmente  
 JOSE JAMILTON RODRIGUES DOS SANTOS  
Data: 11/01/2024 10:39:24-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

---

**Prof. Dr. José Jamilton Rodrigues dos Santos – Membro Externo – UEPB.**

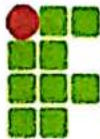
Documento assinado digitalmente  
 IGOR TAVARES PADILHA  
Data: 11/01/2024 10:44:05-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

---

**Prof. Dr. Igor Tavares Padilha – Membro Interno – UFAM.**

Manaus – AM

2023



INSTITUTO FEDERAL  
AMAZONAS

SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
FUNDAÇÃO COORDENAÇÃO DE APERFEIÇOAMENTO DE PESSOAL DE NÍVEL SUPERIOR  
SOCIEDADE BRASILEIRA DE FÍSICA  
PROGRAMA NACIONAL DE MESTRADO EM ENSINO DE FÍSICA  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO AMAZONAS  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS



UFAM

## Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física - Polo 4

### Ata da 61ª Defesa de Dissertação

Aos onze dias do mês de dezembro, do ano de dois mil e vinte e três, às 8h e 57min, por webconferência, ocorreu a Defesa da Dissertação da mestranda **Verônica Tavares Barbosa**, intitulada: **“A CONSTRUÇÃO DE UMA UEPS PARA O ENSINO DO EFEITO DOPPLER RELATIVÍSTICO COM ELEMENTOS CONTEXTUAIS DA COSMOLOGIA”**, do Curso de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, polo 4 das Instituições de Ensino Superior: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas (IFAM) e Universidade Federal do Amazonas (UFAM). A Banca Examinadora foi composta pelo Prof. Dr. Lúcio Fábio Pereira da Silva (UFAM), Prof. Dr. José Jamilton Rodrigues dos Santos (UEPB) e Igor Tavares Padilha (UFAM). O Professor Doutor Lúcio Fábio Pereira da Silva, Presidente, deu início aos trabalhos, convidando os membros a comporem a Banca Examinadora. O Presidente fez a leitura dos procedimentos para defesa de dissertação, e convocou a mestranda para fazer a exposição de seu trabalho que, em seguida, foi arguido pelos membros da Banca Examinadora. Após a arguição, a Banca Examinadora reuniu-se privativamente e decidiu pela aprovação do trabalho. Ao final, os presentes foram chamados para tomarem conhecimento do resultado da avaliação, o Presidente da banca comunicou a interessada que feitas às devidas correções na dissertação, conforme sugestão da banca Examinadora, o discente é obrigado a entregar, na secretaria do polo 4, até sessenta (60) dias após a data da defesa, duas (02) vias impressa e encadernada no formato capa dura, e uma via(01) digital em formato PDF, para os trâmites necessários à concessão do diploma, conforme Resolução Nº.47 – CONSUP/IFAM de 13 de julho de 2015. Nada mais havendo a tratar, foi lavrado a presente Ata que, após lida e aprovada, será assinada pelos presentes.

Documento assinado digitalmente

gov.br

LUÍCIO FÁBIO PEREIRA DA SILVA  
Data: 13/12/2023 11:47:06-0300  
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

---

Prof. Dr. Lúcio Fábio Pereira da Silva  
Presidente - UFAM

Documento assinado digitalmente

gov.br

JOSE JAMILTON RODRIGUES DOS SANTOS  
Data: 13/12/2023 12:16:42-0300  
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

---

Prof. Dr. Jamilton Rodrigues dos Santos  
Membro Externo - UEPB

Documento assinado digitalmente

gov.br

IGOR TAVARES PADILHA  
Data: 13/12/2023 12:00:46-0300  
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

---

Prof. Dr. Igor Tavares Padilha  
Membro Externo - UFAM

*Dedico este trabalho à minha amada filha Luna, meu amor, minha força e inspiração.*

*E também a minha querida irmã Valcilene.*

# Agradecimentos

Agradeço a Deus pelo fôlego da vida e por todas as bênçãos que tenho recebido.

Agradeço à minha família, ao meu esposo Roberto, aos meus amigos de graduação e do curso de mestrado por todo auxílio, palavras de apoio e incentivo direcionados à mim nesta caminhada.

Estendo meus agradecimentos ao meu orientador Prof. Dr. Lúcio Fábio Pereira da Silva pela dedicação, paciência e comprometimento que foram fundamentais para nortear minhas atividades e a conclusão desta dissertação. Muito obrigada!

Agradeço à Sociedade Brasileira de Física pela oportunidade concedida e pelo desenvolvimento do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, tão importante para a busca da excelência no ensino de física.

À FAPEAM pelo apoio financeiro que me permitiu um tempo maior de dedicação para a realização dos trabalhos referentes ao mestrado.

À CAPES, o presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES). Agradeço pelo apoio a esse programa de mestrado.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte dessa formação, o meu muito obrigada!

# RESUMO

A construção de uma UEPS para o ensino do efeito Doppler relativístico com elementos contextuais da Cosmologia.

Verônica Tavares Barbosa

Orientador (es):

Prof. Dr. Lúcio Fábio Pereira da Silva

Prof. Dr. Minos Martins Adão Neto

Esta dissertação discute os resultados da construção e implementação de uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa fundamentada na Teoria da Aprendizagem Significativa de David Ausubel. Sua pretensão é classificar-se como um material potencialmente significativo para o ensino do efeito Doppler relativístico com elementos contextuais da Cosmologia a alunos do terceiro ano do ensino médio. Pensando nos problemas inerentes à transposição didática dessa temática para o ensino básico, buscou-se investigar quais estratégias pedagógicas poderiam auxiliar os alunos na construção da aprendizagem significativa. Para tanto, a UEPS foi organizada em concordância com o sequenciamento de passos estabelecidos por Moreira (2011), e, incorporado a sua estrutura estão os objetos educacionais digitais e a metodologia ativa Peer Instruction. Ressalta-se que essas estratégias se apresentam como alternativas para dinamizar as aulas expositivas e favorecer a participação ativa e colaborativa dos alunos. Com relação a caracterização da pesquisa, a mesma é de natureza bibliográfica, com abordagem qualitativa e quantitativa, e seus objetivos são de caráter exploratório-descritivo. Os resultados da UEPS foram analisados à luz da Taxonomia revisada de Bloom revelando indícios animadores de aquisição, assimilação e construção da aprendizagem significativa.

**Palavras-chave:** Efeito Doppler Relativístico. UEPS. Aprendizagem Significativa.



# ABSTRACT

The construction of a UEPS for teaching the relativistic Doppler effect with contextual elements from Cosmology.

Verônica Tavares Barbosa

Orientador (es):

Prof. Dr. Lúcio Fábio Pereira da Silva

Prof. Dr. Minos Martins Adão Neto

This dissertation discusses the results of the construction and implementation of a Potentially Significant Teaching Unit based on David Ausubel's Theory of Meaningful Learning. Its intention is to classify itself as potentially significant material for teaching the relativistic Doppler effect with contextual elements of Cosmology to third-year high school students. Thinking about the problems inherent in the didactic transposition of this theme to basic education, we sought to investigate which pedagogical strategies could help students in the construction of meaningful learning. To this end, the UEPS was organized in accordance with the sequence of steps established by Moreira (2011), and incorporated into its structure are digital educational objects and the active Peer Instruction methodology. It is noteworthy that these strategies present themselves as alternatives to streamline expository classes and encourage active and collaborative participation by students. Regarding the characterization of the research, it is bibliographic in nature, with a qualitative and quantitative approach, and its objectives are exploratory-descriptive in nature. The UEPS results were analyzed in light of Bloom's revised Taxonomy, revealing encouraging signs of acquisition, assimilation and construction of meaningful learning.

**Key words:** Relativistic Doppler Effect. UEPS. Meaningful Learning.

# Lista de abreviaturas

**AF** Avaliação Formativa

**BNCC** Base Nacional Comum Curricular

**BDTD** Biblioteca Digital de Teses e Dissertações

**DCN** Diretrizes Curriculares Nacionais

**ENEM** Exame Nacional do Ensino Médio

**FMC** Física Moderna e Contemporânea

**FRW** Friedmann-Robertson-Walker (métrica)

**IFAM** Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas

**ITA** Instituto Tecnológico de Aeronáutica

**LDB** Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional

**MNPEF** Mestrado Profissional em Ensino de Física

**PCN's** Parâmetros Curriculares Nacionais

**PCP-EM** Proposta Curricular e Pedagógica do Ensino Médio

**RCA** Referencial Curricular Amazonense

**SCIELO** Scientific Electronic Library Online

**TAS** Teoria da Aprendizagem Significativa

**TRE** Teoria da Relatividade Especial

**TDIC** Tecnologias Digitais da Informação e Comunicação

**UFCAR** Universidade Federal de São Carlos

**UFERSA** Universidade Federal Rural do Semi-Árido

**UFES** Universidade Federal do Espírito Santo

**UEFS** Universidade Estadual de Feira de Santana

# Lista de Figuras

|      |   |    |
|------|---|----|
| 2.1  | Questão conceitual sobre o mesmo conteúdo (teste escrito em 1991). . . . .  | 29 |
| 3.1  | Fonte emitindo o primeiro pulso sonoro e o observador detectando esse pulso. . . . .  | 46 |
| 3.2  | Fonte emitindo o segundo pulso sonoro e o observador detectando esse pulso.   | 47 |
| 3.3  | Onda de choque ou onda de Mach. . . . .   | 49 |
| 3.4  | Ondas de choque produzidas pelas asas de um jato FA 18. . . . .   | 49 |
| 3.5  | Espectro eletromagnético. . . . .   | 52 |
| 3.6  | Espectro da luz visível. . . . .  | 53 |
| 3.7  | Espectro de Fraunhofer para a luz do Sol. . . . .   | 53 |
| 3.8  | Espectro solar com a identificação das linhas de algumas substâncias. . .   | 54 |
| 3.9  | Representação de dois referenciais inerciais $S$ e $S'$ , com $S'$ se movendo com velocidade $v$ no sentido positivo do eixo $x$ do referencial $S$ . . . . .   | 55 |
| 3.10 | Espaçonave em repouso no referencial $S'$ . . . . .   | 60 |
| 3.11 | Espaçonave em movimento no referencial $S$ . . . . .  | 61 |
| 3.12 | Triângulo retângulo para calcular $\Delta t$ no referencial $S$ . . . . .   | 61 |
| 3.13 | Uma barra em repouso no referencial $S'$ , entre os pontos $x'_2$ e $x'_1$ . . . . .  | 62 |
| 3.14 | Efeito Doppler e aberração da luz. . . . .  | 64 |
| 3.15 | Efeito Doppler em nebulosas extragalácticas . . . . .   | 66 |
| 3.16 | Versões bidimensionais dos modelos de curvatura. . . . .  | 73 |
| 3.17 | (À esquerda) Edwin Powell Hubble manuseando o telescópio do Observatório de Monte Wilson. (À direita) Ilustração da placa fotográfica identificada por H335H (“placa Hooker 335 de Hubble”) onde Hubble marcou VAR em vermelho para demonstrar que encontrou uma estrela Cefeida. . | 76 |
| 3.18 | Representação do gráfico apresentado por Hubble em 1929. . . . .  | 77 |
| 3.19 | Representação das linhas de mundo de um Universo isotrópico. . . . .  | 77 |

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 3.20 | Redshift da luz emitida por uma dada galáxia ao longo do nosso cone de luz passado. . . . .                             | 79  |
| 3.21 | A expansão de Hubble e o efeito Doppler. . . . .  | 81  |
| 4.1  | Flashcards confeccionados para as Interatividades baseadas na metodologia ativa Peer Instruction. . . . .               | 86  |
| 4.2  | Participação dos alunos na Interatividade I com a temática sobre o Paradoxo de Olbers. . . . .                          | 88  |
| 4.3  | Projeção de slide sobre a demonstração da equação do efeito Doppler relativístico. . . . .                              | 94  |
| 4.4  | Atividade prática: analogia do balão para ilustrar a expansão do Universo. . . . .                                      | 97  |
| 4.5  | Atividade prática: Expansão sem centro. . . . .   | 98  |
| 4.6  | Aula de encerramento da aplicação da UEPS. . . . .  | 99  |
| 5.1  | Demonstrativo dos índices de respostas certas e erradas da questão 7. . . . .   | 102 |
| 5.2  | Representação do número de acertos e erros obtidos na fase individual e de convencimento referente a questão 3. . . . . | 106 |
| 5.3  | Representação do número de acertos e erros obtidos na fase individual e de convencimento referente a questão 4. . . . . | 107 |
| 5.4  | Relato de aluno sobre a questão 1 da AF1. . . . .   | 109 |
| 5.5  | Copilação da aula sobre a resolução das questões da AF2 sobre dilatação temporal e contração espacial. . . . .          | 110 |
| 5.6  | Representação dos resultados obtidos na avaliação somativa individual. . . . .  | 112 |
| 5.7  | Distribuição das questões na dimensão do conhecimento. . . . .  | 113 |
| 5.8  | Distribuição das questões na dimensão do processo cognitivo. . . . .  | 113 |
| 5.9  | Relato de aluno sobre a questão 1.1 referente a avaliação da UEPS. . . . .  | 115 |
| 5.10 | Relato de aluno sobre a questão 1.2 referente a avaliação da UEPS. . . . .  | 115 |
| 5.11 | Relato de aluno sobre a questão 1.3 referente a avaliação da UEPS. . . . .  | 115 |
| 5.12 | Relato de aluno sobre a questão 2 referente a avaliação da UEPS. . . . .  | 116 |
| 5.13 | Relato de aluno sobre a questão 2 referente a avaliação da UEPS. . . . .  | 116 |

# Lista de Tabelas

|     |  |     |
|-----|--|-----|
| 2.1 | Tabela bidimensional da Taxonomia de Bloom. . . . .  | 35  |
| 2.2 | Levantamento de artigos relacionados a temática de trabalho desta dissertação, e encontrados na Biblioteca Eletrônica Scielo-Brasil (2013-2023). . . . . | 36  |
| 2.3 | Dados da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (2013-2023) sobre a construção de UEPS voltadas para o ensino da relatividade restrita . . . . .     | 36  |
| 2.4 | Dados da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (2013-2023) sobre a construção de UEPS voltadas para o ensino da cosmologia . . . . .                | 37  |
| 2.5 | Dados da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (2013-2023) sobre a utilização da metodologia ativa Peer Instruction. . . . .                        | 37  |
| 2.6 | Levantamento da produção de dissertações relacionadas a temática de trabalho desta dissertação, e encontrados na BDTD (2013-2023). . . . .               | 38  |
| 5.1 | Enquadramento das questões trabalhadas na avaliação diagnóstica. . . . .   | 100 |
| 5.2 | Enquadramento das questões trabalhadas na Peer Instruction. . . . .  | 103 |
| 5.3 | Enquadramento das questões trabalhadas na avaliação formativa 1. . . . .   | 108 |
| 5.4 | Enquadramento das questões trabalhadas na avaliação formativa 2. . . . .   | 109 |
| 5.5 | Enquadramento das questões trabalhadas na avaliação somativa. . . . .  | 111 |
| 5.6 | Enquadramento geral das questões trabalhadas na UEPS. . . . .  | 113 |

# Sumário

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO</b>   | <b>18</b> |
| <b>2</b> | <b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>  | <b>22</b> |
| 2.1      | A Teoria da Aprendizagem Significativa . . . . .  | 22        |
| 2.2      | Unidade de Ensino Potencialmente Significativa - UEPS . . . . .   | 26        |
| 2.3      | A metodologia ativa Peer Instruction como ferramenta para a aprendizagem significativa dos conteúdos de Física. . . . . | 27        |
| 2.4      | Os resultados da aprendizagem a luz da Taxonomia Revisada de Bloom.   | 32        |
| 2.5      | Revisão de literatura . . . . .   | 35        |
| 2.5.1    | Aspectos legais I: BNCC e o ensino de Física. . . . .   | 38        |
| 2.5.2    | Aspectos legais II: Proposta Curricular Amazonense. . . . .   | 40        |
| 2.5.3    | Trabalhos relacionados a temática investigada. . . . .  | 41        |
| <b>3</b> | <b>EFEITO DOPPLER RELATIVÍSTICO</b>   | <b>44</b> |
| 3.1      | O Efeito Doppler . . . . .  | 45        |
| 3.2      | Ondas eletromagnéticas . . . . .  | 50        |
| 3.2.1    | Espectroscopia . . . . .  | 53        |
| 3.3      | Os postulados da Relatividade Restrita . . . . .  | 55        |
| 3.4      | Transformação de Lorentz . . . . .  | 55        |
| 3.4.1    | A transformação de Lorentz e suas consequências . . . . .   | 60        |
| 3.5      | O efeito Doppler da luz . . . . .   | 63        |
| 3.5.1    | Tipos de desvios espectrais . . . . .   | 68        |
| 3.6      | A cosmologia de Hubble . . . . .  | 75        |
| 3.6.1    | A Lei de Hubble . . . . .   | 76        |
| 3.6.2    | A controversa interpretação do redshift. . . . .  | 80        |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| <b>4</b> | <b>METODOLOGIA</b>  | <b>84</b>  |
| 4.1      | Caracterização e natureza da pesquisa . . . . .                 | 84         |
| 4.2      | Encaminhamento teórico e metodológico . . . . .                 | 85         |
| 4.3      | Materiais didáticos . . . . .                                   | 86         |
| 4.4      | Descrição das aulas de aplicação da UEPS . . . . .              | 87         |
| <b>5</b> | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>                                  | <b>100</b> |
| 5.1      | Análise dos resultados da avaliação diagnóstica . . . . .       | 100        |
| 5.2      | Análise dos resultados da Peer Instruction. . . . .             | 102        |
| 5.3      | Análise dos resultados das avaliações formativas . . . . .      | 108        |
| 5.4      | Análise dos resultados da avaliação somativa. . . . .           | 111        |
| 5.5      | Análise geral da UEPS e da aprendizagem significativa . . . . . | 112        |
| 5.6      | Posicionamento dos alunos à respeito da UEPS . . . . .          | 115        |
| <b>6</b> | <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>                                     | <b>118</b> |
|          | <b>REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA</b>                                 | <b>121</b> |
|          | <b>Appendices</b>   | <b>132</b> |
|          | <b>A Produto Educacional</b>                                    | <b>133</b> |
|          | <b>Appendices</b>   | <b>241</b> |
|          | <b>B Avaliação Diagnóstica</b>                                  | <b>242</b> |
|          | <b>Appendices</b>   | <b>245</b> |
|          | <b>C Avaliação Formativa 1</b>                                  | <b>246</b> |
|          | <b>Appendices</b>   | <b>248</b> |
|          | <b>D Avaliação Formativa 2</b>                                  | <b>249</b> |
|          | <b>Appendices</b>   | <b>251</b> |
|          | <b>E Avaliação Somativa Individual</b>                          | <b>252</b> |
|          | <b>Appendices</b>   | <b>256</b> |





# Capítulo 1

## INTRODUÇÃO

A Teoria da Relatividade Restrita teve sua origem após a publicação de uma série de artigos entre 1904 e 1905 por Henry Poincaré, H. A. Lorentz e Albert Einstein que compatibilizaram a Mecânica Clássica com a Eletrodinâmica, permitindo a compreensão da relação entre matéria e energia, e dos fenômenos de altas velocidades, além de abrir caminho para uma nova Física e uma nova Cosmologia.

A Relatividade Restrita está contida em dois postulados que tratam, respectivamente, da equivalência dos referenciais inerciais e da invariabilidade da velocidade da luz. Essa teoria representa uma mudança no pensamento físico universalmente conhecido, na qual conceitos evidentes e fixados como absolutos e imutáveis foram gradualmente redefinidos.

O ensino da Relatividade Restrita, e de todo o novo conhecimento oriundo da Física Moderna e Contemporânea, é indispensável para a formação integral e letramento científico dos alunos do ensino básico, em especial aqueles que estão inseridos no ensino médio, pois, além de conhecer os conceitos, os alunos precisam ser capazes de interpretar e compreender os fenômenos físicos e suas inter-relações (BRASIL, 2018).

Nessa perspectiva, observou-se um movimento promissor de produções acadêmicas voltadas para o ensino médio cujo principal objetivo é abordar os conceitos relevantes das teorias físicas que compõem a FMC, incluindo a Relatividade Restrita. Entretanto, quando se analisa especificamente a teoria de Einstein, constata-se que uma parte significativa das produções ocupam-se dos seus fenômenos “mais famosos”, como a contração espacial, a dilatação temporal e a simultaneidade em detrimento do efeito Doppler relativístico.

O efeito Doppler na Relatividade Restrita apresenta apenas um resultado e depende

da velocidade relativa entre o observador e a fonte emissora, uma vez que a velocidade da luz independe do meio. Diferentemente do efeito Doppler nas ondas mecânicas, como o som, que depende do estudo de situações distintas, com a fonte ou o observador em repouso na atmosfera, ocasionando resultados também diferentes devido à existência do referencial privilegiado, a atmosfera. (NUSSENZVEIG, 1998; ALONSO, 2016; THORNTON, 2016).

A nível de contextualização, o efeito Doppler relativístico pode ser aplicado nos estudos da Astrofísica e da Cosmologia, com ressalvas para as questões de ordem particular dessas aplicações, sobretudo da Cosmologia. No entanto, é possível propor condições coerentes sobre observações cosmológicas que permitam seu tratamento via Relatividade Restrita (JARDIM et al, 2014; RIBOLDI, 2015; OLIVEIRA MENDONÇA, 2018; SOUZA, 2019; NEVES et al, 2020; HORVATH, 2020).

Por outro lado, uma questão extremamente importante e digna de atenção refere-se à aprendizagem dos alunos, pois “só há ensino quando há aprendizagem e esta deve ser significativa” (MOREIRA, 2011, p. 1). A afirmação de Moreira (2011) encontra respaldo na Teoria da Aprendizagem Significativa, que recomenda atenção aos critérios da organização dos conteúdos, a fim de favorecer as duas condições primordiais desta aprendizagem, que referem-se ao potencial do material a ser ensinado/aprendido e à disposição do aluno para aprendê-lo.

Desta forma, a partir do cenário apresentado, surge a seguinte problemática: *Quais estratégias pedagógicas podem auxiliar o ensino do efeito Doppler relativístico a alunos do ensino médio, de forma que o produto final dessa abordagem seja a aprendizagem significativa do conteúdo?*

Diante do exposto, o objetivo dessa dissertação consiste em *construir uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa que versa sobre o ensino do efeito Doppler relativístico com elementos contextuais da Cosmologia e da História da Ciência*. Tendo como objetivos específicos:

- Compreender o efeito Doppler relativístico e suas aplicações.
- Mobilizar habilidades e competências em conhecimentos prévios utilizados para descrever o efeito Doppler relativístico.
- Recorrer aos conhecimentos básicos de Cosmologia e da História da Ciência como

pano de fundo motivador para a aprendizagem do efeito Doppler relativístico.

- Utilizar reflexões críticas sobre as controvérsias conceituais que envolvem o desvio para o vermelho Doppler e o desvio para o vermelho cosmológico.
- Aplicar os objetos educacionais digitais e a metodologia ativa Peer Instruction como agentes instigadores e facilitadores da aprendizagem.

A escolha pela interação da Cosmologia e da História da Ciência como elementos contextuais desta UEPS são justificáveis, pois “dentre todas as ciências exatas, existe um atrativo inegável para os alunos e público em geral nos temas da Astronomia e da Cosmologia” (HORVATH, 2020). Quanto à História da Ciência, seu valor em agregar informações enriquecedoras às discussões do conteúdo é fundamental para que os alunos o compreendam. Acredita-se que o conceito não pode ser ensinado desvinculado do cenário histórico que fora concebido, por isso a História da Ciência pode contribuir de maneira positiva para o desenvolvimento e/ou amadurecimento do conhecimento científico, pensamento crítico e aprendizagem significativa (SANTANA e SANTANA, 2016).

A presente dissertação, além desta introdução, possui quatro capítulos e suas considerações finais. Está estruturada da seguinte forma:

O Capítulo 2 trata da fundamentação teórica no qual é apresentado, de maneira sucinta, um panorama sobre a Teoria da Aprendizagem Significativa de David Ausubel, a UEPS de Marco A. Moreira, a metodologia ativa Peer Instruction de Erick Mazur e a Taxonomia revisada de Bloom. Apresenta-se, ainda, uma breve revisão de literatura que abrange o período de 2013 a 2023, e discute-se as produções relacionadas ao tema de pesquisa desta dissertação.

No Capítulo 3 é apresentado a base teórica fundamental para a compreensão profunda do efeito Doppler e suas implicações na Cosmologia. Por isso, a abordagem inicia com a revisitação ao contexto do efeito Doppler tradicional, ampliando-o para sua caracterização nas ondas eletromagnéticas, do espectro eletromagnético e da Espectroscopia. Os postulados da Relatividade Restrita foram examinados, bem como as transformações de Lorentz e suas consequências, destacando como essa teoria desempenhou o papel crítico na compreensão do efeito Doppler relativístico, revelando sua influência na interpretação das frequências luminosas e, por conseguinte, sua relação com a expansão do Universo.

O Capítulo 4 aborda a metodologia utilizada na UEPS. Neste sentido é apresentada a

natureza da pesquisa, o encaminhamento teórico e metodológico, os materiais didáticos, as estratégias utilizados, além da descrição das aulas de aplicação. Com relação a descrição das aulas, buscou-se detalhar todo o processo da aplicação, os objetivos de cada aula, as atividades realizadas e as avaliações desenvolvidas.

O Capítulo 5 discute os resultados da UEPS à luz da Taxonomia revisada de Bloom. Desta forma, foi realizada uma análise individualizada de cada avaliação aplicada durante as aulas, inclusive das questões envolvidas na metodologia ativa Peer Instruction e da avaliação da UEPS. Traz-se ainda, uma discussão sobre a detecção dos indícios de aprendizagem com base nos pressupostos da Teoria da Aprendizagem Significativa de Ausubel.

Em seguida, apresenta-se as considerações finais desta dissertação.

## Capítulo 2

# FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esse capítulo discute a fundamentação teórica desta dissertação, no qual apresenta-se a Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS) construída para o ensino do efeito Doppler relativístico, e norteadada pela Teoria da Aprendizagem Significativa de David Ausubel. Essa UEPS têm a pretensão de ser um material potencialmente significativo com o objetivo de “facilitar a aprendizagem significativa do conteúdo” (MOREIRA, 2011).

### 2.1 A Teoria da Aprendizagem Significativa

No estudo sobre a aprendizagem, Moreira (1999) destaca três categorias relevantes: a aprendizagem cognitiva, a afetiva e a psicomotora. A aprendizagem cognitiva é caracterizada pelo armazenamento organizado das novas informações na mente do aprendiz. Por outro lado, a aprendizagem afetiva é o resultado das experiências de vida dos indivíduos, e por fim, a aprendizagem psicomotora pode ser entendida como respostas musculares. O autor destaca que apesar das particularidades de cada aprendizagem, elas podem ocorrer de maneira simultânea.

As abordagens e contribuições da Teoria da Aprendizagem Significativa (TAS) de David Ausubel residem no panorama cognitivista, no qual propõe uma explicação para o processo de ensino que almeja alcançar a aprendizagem significativa. Entretanto, para entender como ocorre a construção deste tipo de aprendizagem, alguns aspectos devem ser observados como, por exemplo, a organização das ideias sobre determinado conteúdo e também a compartimentalização dessas informações dentro da estrutura cognitiva do

indivíduo. Haja vista, que o conhecimento contido nessa estrutura cognitiva deve ser relevante, pois seus elementos conceituais mais específicos irão ancorar-se aos mais gerais facilitando assim a aprendizagem.

Referente à aprendizagem escolar, duas dimensões independentes contrastam com a teoria de Ausubel, sendo conhecidas como aprendizagem mecânica e aprendizagem por recepção-descoberta. Na aprendizagem mecânica, a nova informação aprendida pelo aluno praticamente não interage com os conceitos relevantes da sua estrutura cognitiva e acaba por ser armazenada e distribuída arbitrariamente. Entretanto, Ausubel não estabelece uma distinção entre a aprendizagem mecânica e a significativa, isto porque em momentos oportunos, a aprendizagem mecânica pode ser usada para facilitar a aquisição dos novos conceitos, mesmo que isso seja feito inicialmente por meio de uma simples memorização.

Quanto a aprendizagem por recepção e por descoberta, ambas podem ser enquadradas como significativa ou mecânica, pois o que determinará o cenário da aprendizagem é a forma pela qual ocorre o armazenamento do novo conhecimento na estrutura cognitiva do aprendiz. Dessa forma, Moreira (1999, p. 48) destaca que “na aprendizagem receptiva o que deve ser aprendido é apresentado ao aprendiz em sua forma final”, enquanto que na aprendizagem por descoberta “o conteúdo principal deve ser descoberto antes mesmo de ser assimilado utilizando aspectos relevantes de conhecimentos básicos contidos na estrutura cognitiva” (ORNELLAS, 2018, p. 22).

Na prática, sabe-se, a maior parte da instrução, em sala de aula, está orientada para aprendizagem receptiva, situação esta, muitas vezes, criticada pelos defensores da aprendizagem por descoberta ou do chamado “método da descoberta”. Do ponto de vista de aquisição do conhecimento, no entanto, essa crítica é, segundo Ausubel, injustificada, pois, em nenhum estágio do desenvolvimento cognitivo do aprendiz em idade escolar, ele tem que, necessariamente, descobrir os conteúdos a fim de tornar-se apto a compreendê-los e usá-los significativamente (MOREIRA e OSTERMANN, 1999, p. 48).

Do ponto de vista dos processos psicológicos, a aprendizagem por recepção pode ser considerada menos complexa quando comparada à aprendizagem por descoberta, levando em conta que ela só exercerá um papel mais influente quando o aprendiz atingir o nível mais avançado da maturação cognitiva, em que passará a compreender os conceitos apresentados verbalmente, desvencilhando-se do processo indutivo e não-verbal dos primeiros anos de escolarização.

Assim, é através desse movimento dinâmico que a aquisição do conhecimento acontece, mas a aprendizagem significativa só ocorre quando o aprendiz passa a dar significados ao que aprendeu, isto é, consegue organizar e interpretar as novas informações de maneira não arbitrária e não literal. Uma das premissas para a ocorrência da aprendizagem significativa diz respeito à intenção manifestada pelo aluno em querer aprender significativamente o novo conteúdo. Todavia, o material instrucional do novo conteúdo deve ser relacionável à estrutura cognitiva do aluno, pois ao possuir essa característica o material é dito potencialmente significativo (MOREIRA, 1999).

Esta condição envolve dois fatores principais, ou duas condições subjacentes, quais sejam, a natureza do material, em si, e a natureza da estrutura cognitiva do aprendiz. Quanto à natureza do material, ele deve ser “logicamente significativo” ou ter “significado lógico”, i.e., ser suficientemente não-arbitrário e não-aleatório, em si, de modo que possa ser relacionado, de forma substantiva e não-arbitrária, a ideias, correspondentemente relevantes, que se situem dentro do domínio da capacidade humana de aprender. No que se refere à natureza da estrutura cognitiva do aprendiz, nela devem estar disponíveis os conceitos subsunçores específicos, com os quais o novo material é relacionável (MOREIRA e OSTERMANN, 1999, p. 49).

Destaca-se ainda, que o termo material potencialmente significativo não se refere aos métodos ou estratégias adotados para a aula, mas sim aos significados que o aluno atribui a esse material. Por isso, para evidenciar a aprendizagem significativa e contornar as respostas memorizadas provenientes de uma aprendizagem mecânica, Moreira (1999, p. 156) explica que é preciso “formular questões e problemas de uma maneira nova e não familiar, que requeira máxima transformação do conhecimento adquirido”.

Entretanto, caso o professor presuma que o aluno não possui subsunçores específicos referente ao conteúdo a ser aprendido, a inserção das novas informações pode ser feita à luz da aprendizagem mecânica ao passo que os elementos desse novo conhecimento passarão a existir na estrutura cognitiva do aprendiz. Sob essa perspectiva, Ausubel define os organizadores prévios como materiais introdutórios para facilitar a ancoragem da nova informação.

Organizadores prévios são materiais introdutórios, apresentados antes do próprio material a ser aprendido, porém, em um nível mais alto de abstração, generalidade e inclusividade do que esse material. Não são, portanto, sumários, introduções ou “visões gerais do assunto”, os quais são, geralmente, apresentados a um mesmo nível de abstração, generalidade e inclusividade do material que os segue, simplesmente destacando certos aspectos (MOREIRA e OSTERMANN, 1999, p. 53).



Em síntese, os organizadores prévios servem para conectar o que o aluno sabe com o que ele precisa saber e então atribuir-lhes significados. No entanto, seu valor instrucional é limitado, pois não supre totalmente a falta de subsunçores, mas, por outro lado, sua potencialidade está na função de:

Estabelecer, em um nível mais alto de generalidade, inclusividade e abstração, relações explícitas entre o novo conhecimento e o conhecimento prévio adequado do aluno para dar significado aos novos materiais de aprendizagem. Isto porque mesmo tendo os subsunçores adequados muitas vezes o aprendiz não percebe sua relacionabilidade com o novo conhecimento (Moreira, 2011 apud AMORIM e JESUS, 2019, p. 47).

Ainda sobre o processo instrucional, Ausubel propõe alguns princípios sobre a programação eficiente dos conteúdos, sendo eles: a diferenciação progressiva, a reconciliação integrativa, a organização sequencial e a consolidação. Ressalta-se que tanto a diferenciação progressiva quanto a reconciliação integrativas são processos dinâmicos da estrutura cognitiva.

A diferenciação progressiva é vista como um princípio programático da matéria de ensino, segundo o qual as ideias, conceitos, proposições mais gerais e inclusivos do conteúdo devem ser apresentados desde o início da instrução e, progressivamente, diferenciados em termos de detalhes e especificidade. A reconciliação integrativa é o princípio segundo o qual a instrução deve também explorar relações entre ideias, apontar similaridades e diferenças importantes e reconciliar discrepâncias reais ou aparentes (AUSUBEL, 1978, p. 190 apud MOREIRA, 1999, p. 160-161).

A organização sequencial consiste em programar o novo conteúdo instrucional de maneira lógica e coerente para que no decorrer da sua apresentação as ideias mais gerais e inclusivas desse conteúdo seja progressivamente diferenciada, adquirindo novos significados. E, de modo simultâneo, o novo conhecimento passa a ser organizado na estrutura cognitiva do aprendiz juntamente com os conhecimentos preexistentes, isto é, eles se reorganizam para estabelecer suas diferenças e semelhanças, sendo nessa recombinação de elementos que se dá reconciliação integrativa.

Quanto à consolidação, Ausubel argumenta que é aquele segundo o qual insiste-se no domínio do que está sendo estudado, antes da introdução do novo material, fato que assegura “contínua prontidão na matéria de ensino e sucesso na aprendizagem sequencialmente organizada” (MOREIRA, 1999, p. 162).

Na busca por atender as premissas da aprendizagem significativa, principalmente

na promoção das condições necessárias para que ela aconteça, diferentes formas para a organização e sequenciamento dos conteúdos foram desenvolvidos, dos quais destacam-se os mapas conceituais de Joseph Novak<sup>1</sup>, o diagrama V de Gowin<sup>2</sup> e a *Unidade de Ensino Potencialmente Significativa*<sup>3</sup> de Marco Antônio Moreira, conforme detalharemos a seguir.

## 2.2 Unidade de Ensino Potencialmente Significativa - UEPS

A Unidade de Ensino Potencialmente Significativa, conhecida como UEPS e idealizada por Marco Antônio Moreira, é uma espécie de sequência didática que se origina nas teorias da aprendizagem de vários teóricos. Sua filosofia é que “só há ensino quando há aprendizagem e esta deve ser significativa; ensino é o meio, aprendizagem significativa é o fim; materiais de ensino que busquem essa aprendizagem devem ser potencialmente significativos” (MOREIRA, 2011, p. 2).

Moreira (2011) propõe oito passos para a construção de uma UEPS, cujo objetivo é auxiliar o professor no planejamento, organização, aplicação e avaliação da sequência didática a ser trabalhada (MACIEL, 2016). Ressalva-se que é possível, em razão da teoria da aprendizagem escolhida, que alguns princípios recebam maior destaque do que outros, mas em suma a proposta consiste em:

1. Definir o tópico específico a ser abordado (MOREIRA, 2011).
2. Propor situações para o aluno externalizar seu conhecimento prévio (MOREIRA, 2011).
3. Apresentar em nível introdutório através de organizadores prévios o conhecimento que se pretende ensinar (MOREIRA, 2011).
4. Apresentar o conhecimento a ser ensinado/aprendido, levando em conta a diferenciação progressiva (MOREIRA, 2011).

---

<sup>1</sup>O mapa conceitual da UEPS está disponível no link <https://drive.google.com/drive/folders/15EErcs8FUggZdcj5XxfqCGksiRgXuytE?usp=sharing>.

<sup>2</sup>O Diagrama V da UEPS está disponível no link <https://drive.google.com/drive/folders/15EErcs8FUggZdcj5XxfqCGksiRgXuytE?usp=sharing>

<sup>3</sup>A UEPS sobre o efeito Doppler relativístico encontra-se no apêndice A desta dissertação.

5. Retomada dos aspectos gerais do conteúdo em nova apresentação, mas com nível mais elevado de complexidade quando comparada à primeira exposição (MOREIRA, 2011).
6. Concluir a unidade continuando o processo de diferenciação progressiva, mas buscando à reconciliação integrativa do conteúdo em nova apresentação (MOREIRA, 2011).
7. A avaliação da aprendizagem deve ser realizada ao longo da implementação da UEPS, mas também através da ferramenta avaliação somativa individual (MOREIRA, 2011).
8. A avaliação da própria UEPS só será considerada exitosa se a avaliação do desempenho dos alunos fornecer evidências de aprendizagem significativa (captação de significados, compreensão, capacidade de explicar, de aplicar o conhecimento para resolver situações-problema) (MOREIRA, 2011).

Portanto, o modelo de UEPS pode ser entendido como um material potencialmente significativo, pois atende aos aspectos importantes da Teoria da Aprendizagem Significativa, como estrutura, organização, levantamento dos conhecimentos prévios dos alunos e a aplicação de exemplos em diferentes níveis de complexidade. Por apresentar uma estrutura flexível, esse tipo de sequência didática permite que o professor faça adequações que favoreçam o alcance dos objetivos da aprendizagem. Outro ponto extremamente favorável ao uso da UEPS é a possibilidade de inserir atividades colaborativas envolvendo as metodologias ativas.

### **2.3 A metodologia ativa Peer Instruction como ferramenta para a aprendizagem significativa dos conteúdos de Física.**

Existe um leque de metodologias que são classificadas como ativas, e todas possuem o mesmo objetivo comum que é tornar o aluno protagonista do processo de aprendizagem através do seu engajamento participativo e reflexivo nas ações pedagógicas.

A aprendizagem ativa requer uma construção do próprio sujeito ou a aprendizagem não acontecerá. [...] Para o professor, o desafio de transformar um estudante passivo e ouvinte de informações em um estudante que construa seu conhecimento, que tenha a vontade e a oportunidade de vivenciar uma aprendizagem ativa, que, conseqüentemente, leve a uma aprendizagem duradoura. Para o estudante, o desafio de envolver-se e compreender a aprendizagem como um processo que deve ser duradouro e que, sob as condições mencionadas, torna-se significativo (FILHO, 2019, p. 38-39).

O cenário proposto pelas metodologias ativas apresenta características que concordam com as proposições da TAS de Ausubel, pois “a aprendizagem é mais significativa quando motivamos os alunos intimamente, quando eles acham sentido nas atividades que propomos” (MORAN, 2018, p. 43). Dessa forma, é fundamental que alunos e professores estejam comprometidos com o seu papel no processo da aprendizagem. Assim, as estratégias e métodos de ensino devem possibilitar que o aluno adquira, assimile e compreenda os conteúdos, capacitando-os a serem autônomos, críticos e reflexivos diante da construção significativa do seu saber.

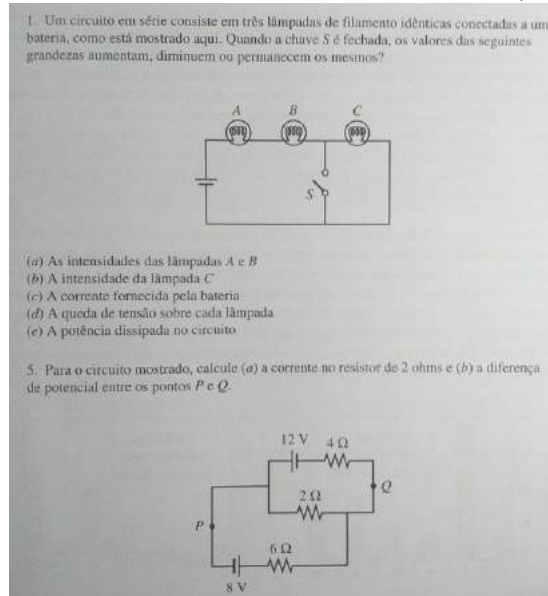
Nesta perspectiva, a Peer Instruction (PI) se apresenta como uma ferramenta eficiente para transformar as salas de aulas e tornar os alunos mais ativos cognitivamente. Esta metodologia visa “explorar a interação entre os estudantes durante as aulas expositivas e focar a atenção dos estudantes nos conceitos que servem de fundamento” (MAZUR, 2015, p. 10). A Peer Instruction surgiu na década de 1990 quando o professor de Física e Física Aplicada de Harvard University, Eric Mazur, constatou que embora o ensino tradicional tenha gerado cientistas extraordinários, as demandas do ensino de Física mudou, bem como a clientela das salas de aula.

Na busca por respostas, o professor Mazur encontrou fundamento para suas inquietações quando se deparou com uma série de artigos que discutiam justamente o fato do aluno iniciante nos estudos da Física possuir fortes crenças do senso comum, tendo os conhecimentos prévios, em sua maioria, baseados apenas na vivência cotidiana e intuições sobre a ocorrência dos fenômenos físicos (MAZUR, 2015). A proposta dos artigos consistia basicamente na aplicação de um teste de sondagem para verificar se os alunos realmente haviam compreendido a teoria.

Ao aplicar o teste para verificar a compreensão conceitual de alguns problemas, o professor Mazur recebeu o seguinte questionamento de um dos seus alunos “Professor Mazur, como devo responder a essas questões? De acordo com que o senhor ensinou

ou conforme o meu jeito de pensar a respeito das coisas?” (MAZUR, 2015, p. 4). Essa dúvida o fez modificar suas abordagens de conteúdos e avaliações, passando a elaborar questões qualitativas simples e quantitativas mais complexas sobre o mesmo conteúdo físico trabalhado nas aulas. Um exemplo do formato adotado por Mazur esta representado na Fig. (2.1).

Figura 2.1: Questão conceitual sobre o mesmo conteúdo (teste escrito em 1991).



Fonte: MAZUR (2015).

Resumidamente, ambas as questões trabalham o conceito de circuitos, no entanto a questão 1 é puramente conceitual e a questão 5 requer algum trabalho algébrico envolvendo as leis de Kirchhoff. Considerando a questão um, 40% dos alunos acreditavam que o “fechamento da chave não alteraria a corrente que circula através da bateria, mas que a corrente se dividiria em duas no nó de cima e voltaria a se juntar no nó de baixo” (MAZUR, 2015, p. 6), o que mostra uma concepção completamente errada, mas ainda assim muitos alunos conseguiram resolver de forma correta o problema matemático.

Para que tivesse uma amostra maior, o professor Mazur passou a formular e aplicar questões com esse formato, e de acordo com os resultados, concluiu que “os estudantes tendem a ser bem melhor quando estão resolvendo problemas de livros convencionais do que quando estão resolvendo problemas conceituais sobre o mesmo tópico” (MAZUR, 2015, p. 6). Isso se deve ao fato do aluno estar mais preocupado em memorizar fórmulas e equações do que realmente compreender a teoria física envolvida na questão.

Para contornar a situação, Mazur passou a elaborar notas de aulas em que detalhava o

tópico trabalhado, dando ao aluno uma visão ampla e concisa do conteúdo. Inicialmente, a distribuição destas notas era feita no final das aulas expositivas, e algum tempo depois, no início de cada semestre. Nos anos seguintes, o trabalho deste professor caracterizou-se tanto pelo foco nos conceitos subjacentes da teoria quanto pela resolução dos problemas, originando assim a Peer Instruction.

O sucesso da Peer Instruction está relacionado, em primeiro lugar, com a leitura prévia do material que deve ser disponibilizado antecipadamente ao aluno, e em segundo lugar, as aulas expositivas devem aprofundar o conteúdo desse material, visando esclarecer as dúvidas, facilitar a compreensão e fornecer exemplos adicionais.

A aplicação da Peer Instruction possui sete etapas distintas:

1. Inicialmente, é recomendado que o professor disponibilize algum material introdutório correspondente ao assunto que será ministrado. Esta etapa visa auxiliar os alunos no processo de aquisição e apropriação dos conceitos básicos do assunto podendo ser feito através de leituras prévias, videoaulas e outras fontes (FILHO et al, 2019).
2. A segunda etapa consiste na aula presencial, onde o professor tecerá breves ponderações sobre o tema, apresentando a turma os conceitos-chaves do conteúdo (MAZUR, 2015).
3. Ao término da apresentação dialogada, o professor aplicará a questão conceitual que abrange o assunto que está sendo discutido na aula, sendo usualmente de múltipla escolha.
4. Nesta etapa, os estudantes, individualmente, deverão analisar a questão e as opções de resposta, no momento oportuno os alunos deverão informar a alternativa escolhida juntamente com alguma argumentação para justificar seu ponto de vista. Após coletar a resposta da turma, o professor deve estar atento aos seguintes casos: *quando a frequência de acertos estiver entre 30% e 70%, recomenda-se que o professor inicie uma discussão para averiguar as argumentações que levaram os alunos a optar por determinada resposta. Entretanto, quando a frequência de acertos for abaixo de 30%, o professor deve retornar a apresentação do assunto abordando-o com mais detalhes, em seguida aplica novamente o teste conceitual.*

*E, para o caso em que as respostas certas atinjam os 70%, a aula pode prosseguir para os próximos tópicos (FILHO et al, 2019; MAZUR, 2015).*

5. A quinta etapa é o cerne da metodologia, isto porque, quando o percentual de respostas certas estiver entre 30% e 70%, inicia-se, com a autorização do professor, uma discussão entre os colegas, preferencialmente duplas, por cerca de 2 minutos. Esse momento pode ser chamado de “fase de convencimento”, pois a dupla deverá entrar em consenso sobre a resposta correta, mas para isso deverão usar argumentos legítimos sobre o conteúdo para convencer o colega a escolher uma alternativa comum entre eles. O papel do professor é mediar os conflitos sem interferir diretamente na resposta. Ao término do tempo estipulado, uma nova votação deve ocorrer (FILHO et al, 2019; MAZUR, 2015).
6. Então, o professor apresenta o resultado da votação resultante da fase de convencimento dos colegas, e caso seja oportuno para o momento, o professor pode requerer que os alunos compartilhem suas justificativas e sob quais circunstâncias ocorreu (ou não) a mudança na escolha da alternativa (FILHO et al, 2019; MAZUR, 2015).
7. Por fim, o professor informa qual das alternativas é a correta. Em seguida, coerente com o resultados, o professor pode apresentar uma nova questão conceitual sobre o mesmo assunto, ou pode dar continuação da aula trabalhando o próximo conceito. Segundo Filho et al (2019, p. 64) “essa decisão dependerá do julgamento do professor sobre a adequação do entendimento atingido pelos estudantes a respeito do conteúdo abordado nas questões” (FILHO et al, 2019; MAZUR, 2015).

É preciso destacar que cada questão conceitual (etapa 3) possui o seguinte formato genérico:

- 1.** Preposição da questão (1 minuto).
- 2.** Tempo para os estudantes pensarem individualmente (1 minuto).
- 3.** Os estudantes anotam suas respostas individuais (1-2 minutos).
- 4.** Os estudantes convencem seus colegas - Peer Instruction (1-2 minutos).
- 5.** Os estudantes anotam as respostas corrigidas (1 minuto).
- 6.** Feedback para o professor: registro das respostas.
- 7.** Explicação da resposta correta (2+ minutos) (MAZUR, 2015, p. 10).

Percebe-se que no detalhamento das etapas de aplicação os resultados dos testes conceituais são prontamente obtidos e identificados pelo professor, e dependendo do objetivo traçado para a aula é possível realizar o levantamento das respostas utilizando

algumas ferramentas como o uso de flashcards inscritos que correspondem às alternativas de respostas (de A a D, por exemplo.), ou empregando a tecnologia através de dispositivos portáteis, plataformas interativas e planilhas.

Diante do exposto, a Peer Instruction apresenta vantagens importantes como a compreensão conceitual da teoria física, desempenho na resolução de problemas, transformação da aula expositiva, participação ativa dos alunos, aumento significativo da confiança e o fortalecimento das relações dentro da sala de aula. Por outro lado, essa ferramenta também possibilita que o professor verifique em qual estágio da aprendizagem seus alunos se encontram, permitindo-o executar alterações no planejamento das atividades e nos métodos de ensino.

Assim, constata-se a existência do entrelaçamento positivo entre a Peer Instruction e a teoria de Ausubel, uma vez que a Peer Instruction possibilita o aprimoramento dos conhecimentos oriundos de uma aprendizagem superordenada, contribuindo de forma relevante para continuação do processo de subsunção derivativa. Podendo ainda, ser utilizada como organizador prévio no intuito de favorecer a diferenciação progressiva e a reconciliação integrativa dos conceitos ou teorias, e resumidamente, gerar o produto final que é a aprendizagem significativa.

## **2.4 Os resultados da aprendizagem a luz da Taxonomia Revisada de Bloom.**

Para discutirmos os resultados da aprendizagem é preciso dar ênfase ao passo que o antecede, isto é, o planejamento. Para Belhot e Ferraz (2010, p. 421) “na educação, decidir e definir os objetivos de aprendizagem significa estruturar, de forma consciente, o processo educacional de modo a oportunizar as mudanças de pensamento, ações e condutas”, por isso planejar o que se pretende ensinar é determinante para a promoção da aprendizagem dos alunos.

Todavia, o planejamento das aulas deve assumir um caráter funcional de maneira que possibilite a aprendizagem dos conteúdos em caráter conceitual, procedimental e atitudinal. Mas, para que tudo ocorra como esperado é necessário definir os objetivos de forma clara, de modo que o processo de ensino seja compreensível para os alunos, e não fique implícito somente ao entendimento do professor.



Pensando nos objetivos educacionais e nos resultados da aprendizagem, alguns pesquisadores sugerem a utilização de instrumentos como as taxonomias. Dentre elas, no cenário educacional, a mais usada é a taxonomia de Bloom que é fruto das pesquisas de um grupo de estudiosos que, em 1948, passou a classificar as metas e objetivos da educação em domínios específicos: o cognitivo, o afetivo e o psicomotor.

*Cognitivo*: relacionado ao aprender, dominar um conhecimento. Envolve a aquisição de um novo conhecimento, do desenvolvimento intelectual, de habilidade e de atitudes. Inclui reconhecimento de fatos específicos, procedimentos padrões e conceitos que estimulam o desenvolvimento intelectual constantemente. *Afetivo*: relacionado a sentimentos e posturas. Envolve categorias ligadas ao desenvolvimento da área emocional e afetiva, que incluem comportamento, atitude, responsabilidade, respeito, emoção e valores. *Psicomotor*: relacionado a habilidades físicas específicas (BELHOT e FERRAZ, 2010, p. 422-423).

Contudo, ligados a estes domínios existe subcategorias organizadas hierarquicamente com níveis de complexidades diferentes, por exemplo, com relação as categorias do domínio cognitivo estão: conhecimento, compreensão, aplicação, análise, síntese e avaliação. Do domínio afetivo são: receptividade, resposta, valorização, organização e caracterização. E as categorias do domínio psicomotor foram definidas a: imitação, manipulação, articulação e naturalização (BELHOT e FERRAZ, 2010).

Em relação à ascensão dos níveis de complexidade do domínio afetivo, psicomotor e cognitivo, a condição indispensável é que ela ocorra da categoria mais simples para a mais complexa, pois o aluno só poderá compreender e aplicar determinado conceito, se o tiver conhecido anteriormente, ocorrendo, o aprimoramento das categorias iniciais.

Ao direcionar suas pesquisas para os objetivos cognitivos, Bloom e seu grupo de pesquisa, constatou que “nas mesmas condições de ensino (desconsiderando as variáveis externas ao ambiente educacional) todos os alunos aprendiam, mas se diferenciavam em relação ao nível de profundidade e abstração do conhecimento adquirido” (BLOOM; HASTIN; MADDAUS, 1971 apud BELHOT e FERRAZ, 2010, p. 423). Todavia, a diferença apontada teria relação com as estratégias e com a organização do que seria ensinado/aprendido.

Os processos categorizados pela Taxonomia dos Objetivos Cognitivos de Bloom, além de representarem resultados de aprendizagem esperados, são cumulativos, o que caracteriza uma relação de dependência entre os níveis e são organizados em termos de complexidades dos processos mentais (BELHOT e FERRAZ, 2010, p. 424).

Apesar das contribuições referentes à padronização hierárquica dos objetivos educacionais realizada pela taxonomia de Bloom, alguns pesquisadores, na década de 90, iniciaram o processo de revisão desta taxonomia adequando-a às novas demandas da educação moderna. Essa versão foi publicada em 2001 por Lorin Anderson e David Krathwohl (BELHOT e FERRAZ, 2010).

A taxonomia revisada de Bloom apresenta uma nova roupagem para as categorias do domínio cognitivo, em que “o tipo de conhecimento passou a ser designado por substantivos e os processos para atingi-los passaram a ser descritos por verbos” (AMARAL e TREVISAN, 2016, p. 454). Dentre as mudanças houve a renomeação dos níveis e inversão de categorias dos níveis superiores. Os verbos são: 1. *lembrar*, 2. *entender*, 3. *aplicar*, 4. *analisar*, 5. *sintetizar*, 6. *Criar* (BELHOT e FERRAZ, 2010).

Outra novidade foi a revisão da subcategoria *conhecimento* no domínio cognitivo, pois na versão revisada da taxonomia foi nomeada de *dimensão do conhecimento*, com subcategorias: *nível 1* representa o conhecimento factual/efetivo, *nível 2* denota o conhecimento conceitual, *nível 3* é o conhecimento procedural e o *nível 4* refere-se ao conhecimento metacognitivo. Em suma, para Belhot e Ferraz (2010), a revisão de Anderson et al (2001) proporcionou um aspecto bidimensional a versão revisada, dividindo o conhecimento como processo e como conteúdo assimilado, conforme podemos constatar nas palavras do autor:

Na nova estrutura proposta na Taxonomia de Bloom “revisada”, a dimensão conhecimento (conteúdo) e de processos cognitivos foi mais claramente diferenciada, e isso originou um novo modelo de utilização que tem como estrutura uma tabela bidimensional denominada de Tabela Bidimensional da Taxonomia de Bloom (ANDERSON et al., 2001 apud BELHOT e FERRAZ, 2010, p. 427).

Assim, em um contexto prático, o professor pode inserir os objetivos da aprendizagem propostos em seu plano de ensino na intersecção entre as dimensões do conhecimento e do processo cognitivo. Ressalva-se que os objetivos não precisam necessariamente seguir a cronologia das aulas, podem pertencer a mais de uma célula e não é preciso preencher todas as células. A utilização da tabela bidimensional, análoga a Tabela (2.1), permite que o professor visualize o que está relacionado a aquisição do conhecimento e ao desenvolvimento de habilidade e competência dos alunos (BELHOT e FERRAZ, 2010).

Tabela 2.1: Tabela bidimensional da Taxonomia de Bloom.

|                 | Lembrar | Entender | Aplicar | Analisar | Avaliar | Criar |
|-----------------|---------|----------|---------|----------|---------|-------|
| Efetivo/Factual |         |          |         |          |         |       |
| Conceitual      |         |          |         |          |         |       |
| Procedural      |         |          |         |          |         |       |
| Metacognitivo   |         |          |         |          |         |       |

Fonte: Adaptada de FERRAZ; BELHOT (2010).

## 2.5 Revisão de literatura

A revisão de literatura realizada para esta dissertação e produto educacional utilizou os dados da biblioteca eletrônica SCIELO Brasil e da Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD), com o objetivo de realizar o levantamento prévio da produção acadêmica que se relaciona ao tema da pesquisa.

Para tanto, na plataforma Scielo-Brasil as pesquisas foram realizadas utilizando palavras-chaves e sentenças de frases, assim ao inserirmos as palavras “ensino de física” obtivemos o resultado de três mil oitocentos e cinquenta e quatro produções, para refinar essa coleta, utilizamos a seguinte configuração de filtragem: coleção brasileira, ano de publicação de 2013 ao primeiro semestre de 2023, área temática physics, e o tipo de literatura foi artigos.

Obedecendo a regra para a filtragem realizou-se nova pesquisa para “ensino de física” na qual obtivemos o resultado de novecentos e setenta e três artigos publicados. Na segunda pesquisa estávamos interessados em fazer o levantamento sobre o “ensino da relatividade restrita”, desse modo obtivemos o total de seis publicações. E, em relação ao “ensino da cosmologia” obtivemos o resultado de dezessete publicações, porém quando direcionamos ao ensino médio esse resultado foi reduzido para apenas duas publicações.

As pesquisas direcionadas ao uso da metodologia ativa Peer Instruction resultou em oito artigos, referente a Taxonomia revisada de Bloom apenas um artigo, e quanto ao uso das UEPS somente dois artigos. Ressaltamos que todos os artigos mencionados neste item foram publicados no periódico Revista Brasileira de Ensino de Física.

Tabela 2.2: Levantamento de artigos relacionados a temática de trabalho desta dissertação, e encontrados na Biblioteca Eletrônica Scielo-Brasil (2013-2023).

|                                 | Quantidade  | Tipo          |
|---------------------------------|-------------|---------------|
| Ensino de Física                | 973         | Artigo        |
| Ensino da Relatividade Restrita | 06          | Artigo        |
| Ensino da Cosmologia            | 17          | Artigo        |
| Ensino da Cosmologia no E.M     | 02          | Artigo        |
| Peer Instruction                | 08          | Artigo        |
| Taxonomia Rev. Bloom            | 01          | Artigo        |
| <b>Total de produção</b>        | <b>1007</b> | <b>Artigo</b> |

Fonte: Elaboração da própria autora (2023).

Na BDTD, todas as consultas consideraram o período de 2013 a 2023, e idioma de língua portuguesa. Quanto aos descritores, eles mudavam de acordo com o objetivo das consultas, por exemplo, o primeiro descritor usando foi “UEPS + ensino + física”, no qual foram encontradas cento e trinta e três produções, sendo cento e vinte duas dissertações de mestrado e onze teses de doutorado. Salientamos que dentre as UEPS desenvolvidas nos programas de mestrado, cinco delas tiveram origem no MNPEF, todas da instituição UFSCAR, cujas defesas ocorreram de 2015 a 2022.

Relacionado ao descritor “UEPS + ensino + relatividade + restrita” somente três UEPS eram direcionadas para o ensino da relatividade restrita, e todas foram desenvolvidas no MNPEF, das instituições UFSCAR e IFAM/Polo 04, respectivamente.

Tabela 2.3: Dados da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (2013-2023) sobre a construção de UEPS voltadas para o ensino da relatividade restrita

|        | Quantidade | Tipo        | Ano  |
|--------|------------|-------------|------|
| UFSCAR | 02         | Dissertação | 2015 |
| IFAM   | 01         | Dissertação | 2022 |

Fonte: Elaboração da própria autora (2023).

A partir do descritor “UEPS + ensino + cosmologia” foram catalogadas cinco dissertações de mestrado, entretanto uma produção estava duplicada.

Tabela 2.4: Dados da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (2013-2023) sobre a construção de UEPS voltadas para o ensino da cosmologia

|       | Quantidade | Tipo        | Ano         |
|-------|------------|-------------|-------------|
| UFSC  | 02         | Dissertação | 2016 e 2017 |
| UFABC | 01         | Dissertação | 2016        |
| UNB   | 01         | Dissertação | 2018        |

Fonte: Elaboração da própria autora (2023).

No tocante ao “ensino da cosmologia no ensino médio” foram encontrados vinte e quatro produções, sendo dezoito dissertações e seis teses. Com uma dissertação desenvolvida no MNPEF, da instituição UFERSA, defendida em 2020.

Quanto à metodologia ativa, utilizamos o descritor “peer + instruction” obtendo uma amostra de oitenta e uma produções, sendo sessenta e nove dissertações e doze teses de doutorado. Estes trabalhos estão relacionados às diversas áreas do conhecimento, mas destacamos seis dissertações voltadas para o ensino de física.

Tabela 2.5: Dados da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (2013-2023) sobre a utilização da metodologia ativa Peer Instruction.

|       | Quantidade | Tipo        | Ano               |
|-------|------------|-------------|-------------------|
| UFS   | 01         | Dissertação | 2016, 2019 e 2021 |
| UFRJ  | 01         | Dissertação | 2017              |
| UFES  | 01         | Dissertação | 2018              |
| UTFRR | 01         | Dissertação | 2021              |

Fonte: Elaboração da própria autora (2023).

E, por último realizamos o levantamento das produções envolvendo ensino do efeito Doppler relativístico, para tanto foi encontrado apenas uma dissertação de mestrado, desenvolvida na instituição UFES e defendida em 2019. Concernente as buscas referente a Taxonomia revisada de Bloom foi obtido o total de trinta e oito produções, divididas em trinta e três dissertações e cinco teses. As áreas do conhecimento dessas produções englobam as Ciências Humanas, Sociais, Biológicas, da Computação e também as Ciências Exatas e da Terra. Destacamos que no programa de mestrado MNPEF foi desenvolvida apenas uma dissertação, na instituição UEFS e defendida em 2015.

Dessa forma, ao reunirmos todos os resultados das pesquisas na BDTD encontramos

cento e setenta e nove dissertações de mestrado desenvolvidas no período de 2013 ao primeiro semestre de 2023, conforme apresenta a Tabela (2.6).

Tabela 2.6: Levantamento da produção de dissertações relacionadas a temática de trabalho desta dissertação, e encontrados na BDTD (2013-2023).

|                                      | Quantidade | Tipo               |
|--------------------------------------|------------|--------------------|
| MNPEF                                | 16         | Dissertação        |
| Outros programas no ensino de física | 163        | Dissertação        |
| <b>Total de produção</b>             | <b>179</b> | <b>Dissertação</b> |

Fonte: Elaboração da própria autora (2023).

Assim, ao realizar o levantamento dessas produções, buscou-se analisar em quais bases teóricas estavam enquadradas, as metodologias adotadas, os materiais e recursos empregados, além dos resultados e contribuições para a aprendizagem, haja vista que, para direcionar a pesquisa da referida dissertação, necessitávamos de informações relevantes que servissem de base para engendrar o raciocínio.

### 2.5.1 Aspectos legais I: BNCC e o ensino de Física.

O tratamento das temáticas da Física Moderna e Contemporânea no ensino básico encontra amparo legal na legislação educacional brasileira, além de um movimento promissor para fazê-lo com excelência e não apenas como simples sugestão em notas de rodapé. Os Parâmetros Curriculares Nacionais do Ensino Médio, por exemplo, já recomendavam que os assuntos da FMC fossem tratados a qualquer momento e em qualquer série, uma vez que tais conceitos convergem para o amadurecimento da visão crítica do aluno (BRASIL, 2000).

Outro documento extremamente importante para a educação nacional é a Base Nacional Comum Curricular. A BNCC está organizada em competências e habilidades, dentre elas temos dez competências gerais que “estão articuladas aos princípios éticos, estéticos e políticos da LDB e das DCN e que perpassam todas as áreas do conhecimento” (BRASIL, 2018, p. 18), e visam o desenvolvimento intelectual, social, emocional, físico e cultural do aluno. Entretanto, consideraremos neste manuscrito somente as competências e habilidades discriminadas para a *Área de Ciências da Natureza e suas Tecnologias*, conforme descrição:

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) (BRASIL, 2018, p. 539).

Em síntese, as particularidades de cada competência direcionada às Ciências da Natureza e suas Tecnologias pode ser interpretada da seguinte forma: Na (1) é tratada a relação entre a ciência, tecnologia e a sociedade tendo como tema central a matéria e energia. A (2) pretende possibilitar ao aluno ferramentas que o permita argumentar sobre temas como a vida, a Terra e o Universo, isto é, em linhas gerais, propõe o desenvolvimento do senso crítico dos estudantes. E, por fim, mas não menos importante, a (3) está ligada a questão tecnológica ou letramento científico. Desta forma, a base desta área esta fundamentada nos conhecimentos interdisciplinares e contextualizados das ciências que a compõem (BRASIL, 2018).

Assim, podemos inferir que as competências gerais da BNCC estão relacionadas ao que é esperado para o estudante durante todo seu processo de escolarização. Já as competências específicas referem-se a mobilização do conhecimento cognitivo que o aluno deve apresentar em cada etapa de ensino (BRASIL, 2018). No entanto, não é somente a parte cognitiva que deve prevalecer, mas o pleno desenvolvimento do conjunto de atitudes e valores, além das habilidades práticas e socioemocionais.

Portanto, examinar as orientações gerais e específicas da BNCC e interpretá-las de maneira correta, é crucial para o planejamento e desenvolvimento das ações pedagógicas que buscam atingir os objetivos da educação básica, pois a aplicação dessas competências são favoráveis ao trabalho didático mais contextualizado e significativo, uma vez que uma abordagem fragmentada não agrega a viabilização do saber.

## 2.5.2 Aspectos legais II: Proposta Curricular Amazonense.

O currículo do ensino médio no Estado do Amazonas é norteado pela Proposta Curricular e Pedagógica do Ensino Médio, que por sua vez atende as concepções advindas do Referencial Curricular Amazonense/Etapa Ensino Médio e também da BNCC do Ensino Médio.

A BNCC do ensino médio apresenta o conjunto de aprendizagens a serem desenvolvidas nos alunos desta etapa do ensino, destaca ainda as competências gerais, as competências por área e as habilidades respectivas a essas áreas do conhecimento. Entretanto, nota-se que ela não define especificamente quais conteúdos por disciplina o professor irá trabalhar em cada série.

Em vista disso, os estados e municípios possuem a prerrogativa de organizar um documento que seja responsável por conduzir a elaboração dos seus currículos e por contemplar as particularidades local, favorecendo assim as aprendizagens essenciais do novo ensino médio. Desse modo, no Estado do Amazonas, esse papel é exercido pelo Referencial Curricular Amazonense (AMAZONAS, 2018).

Delimitando-nos ao ensino da Física no estado do Amazonas, o RCA estabelece:

No tocante ao componente curricular Física, o ensino deve levar os estudantes a desenvolverem competências e habilidades, para entender e analisar aspectos cotidianos como: uso racional e consciente das fontes de energia, e qual o impacto para um desenvolvimento econômico sustentável; as questões que envolvem a mobilidade pública; possibilitar a familiarização com temas ligados à Cosmologia, como Buracos Negros e Big Bang, que podem explicar a origem e o destino do Universo, e outros (AMAZONAS, 2018, p. 174-175).

É preciso trabalhar o componente curricular Física de modo a estabelecer um ambiente de aprendizagem efetivo e que proporcione ao aluno subsídios para o pleno desenvolvimento de suas habilidades e competências, capacitando-o para aplicar tais conhecimentos físicos de forma consciente e racional nos diferentes contextos da sua prática cotidiana. Nessa perspectiva, seguindo os critérios do RCA, a nova PCP-EM foi organizada com o objetivo de entregar “um currículo capaz de oportunizar não só as aprendizagens essenciais para o enfrentamento dos desafios contemporâneos, mas também contribuir para a formação de cidadãos (...)” (AMAZONAS, 2021, p. 5), conforme estabelecido pelo RCA.



A Proposta Curricular e Pedagógica do Novo Ensino Médio apresenta, portanto, a todos os profissionais da Educação em seu texto introdutório todas as peculiaridades acerca do currículo, contextualizando o ensino médio no Estado do Amazonas perpassando pela Formação Básica, suas Áreas do conhecimento e organizadores curriculares. Em seguida são apresentados os Itinerários Formativos com seus eixos estruturantes e os focos pedagógicos; e, por fim, as Modalidades e Especificidades do Ensino Médio com todas as orientações para a Implementação do Currículo com suas concepções e orientações para a elaboração do Projeto Político Pedagógico de cada unidade de ensino (AMAZONAS, 2021, p. 6).

Outro ponto relevante é que a PCP-EM “considera a continuidade da proposta do Ensino Fundamental, em que os objetos de conhecimento do Componente Curricular Ciências serão aprofundados nos Componentes Curriculares de Biologia, Física e Química (...)” (AMAZONAS, 2021, p. 303). Dessa forma, o aluno terá a oportunidade de ampliar seus conhecimentos e sua compreensão acerca de temas vistos no ensino fundamental, porém por uma nova ótica.

Assim, a PCP-EM vem conduzir e nortear os professores e seus estudantes aos novos e desafiadores caminhos que a educação amazonense precisa trilhar, além de contribuir significativamente para a consolidação, aprofundamento e garantia de um ensino de qualidade.

### **2.5.3 Trabalhos relacionados a temática investigada.**

O ensino da Relatividade Restrita no ensino médio apresenta alguns desafios dos quais, podemos citar as dificuldades inerentes à transposição didática dessa temática para o ensino básico, os obstáculos semióticos matemáticos e os obstáculos epistemológicos quais não são independentes (BACHELARD, 1996). Neste sentido, priorizamos a utilização de produções cujo área de investigação é o ensino de tópicos da Relatividade Restrita e da Cosmologia direcionados aos alunos do ensino médio, assim como outros conteúdos relacionados.

A dissertação de mestrado de Lima (2018) intitulada “Uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa com o aplicativo TRE Einstein para ensinar a Relatividade Restrita” aborda como o emprego da tecnologia no ensino de Física, especialmente no tocante da Relatividade Restrita, pode transformar a dinâmica das salas de aulas, tendo em conta que o formalismo teórico e matemático desta teoria requer algum grau de abstração.

Para tal, Lima (2018) desenvolveu uma UEPS a fim de apoiar-se aos contributos desta ferramenta para provocar a aprendizagem significativa nos seus alunos. Neste sentido, estruturou as etapas de ensino obedecendo os aspectos sequenciais estabelecidos, diversificou os recursos didáticos e inseriu como estratégias para fins de revisão do tema o uso do aplicativo TRE Einstein com atividades de aprendizagem relacionada a Relatividade Restrita.

Ainda sobre o uso da UEPS como metodologia facilitadora da aprendizagem significativa, a dissertação de mestrado de Oliveira Mendonça (2018) apresenta-se como proposta para a inserção de tópicos da Cosmologia à alunos do ensino médio. Sua produção têm fundamento teórico na aprendizagem significativa de Ausubel, e aproveitando-se da sugestão de Moreira (2011) quanto a diversificação de estratégias de ensino, o autor produziu um texto autoral sobre a Cosmologia utilizando-o como material de consulta durante a aplicação da UEPS. Incluiu em seu trabalho as TDIC através de recortes de vídeos para introduzir os conteúdos cosmológicos e o software Stellarium para simular o objeto de estudo da Cosmologia, o Universo.

Notadamente, tanto as dissertações de Lima (2018) e Oliveira Mendonça (2018) quanto outras produções pesquisadas, tendem a abordar os fenômenos relativísticos e cosmológicos através de uma perspectiva mais qualitativa e conceitual. Essa tendência pode ser atribuída, a nível operacional, as complicações oriundas da abstração matemática necessária e da base algébrica que se assentam a Relatividade e a Cosmologia. Todavia, Carageorge (2020) em sua dissertação de mestrado “sequência didática para ensinar a Relatividade Geral no ensino médio” apresenta um contexto compatível de aplicação deste formalismo a turmas do ensino médio.

Casageorge (2020) ressalta o quão desafiante é trabalhar a Relatividade Geral no ensino médio, principalmente porque os alunos não possuem qualquer conhecimento prévio acerca da base matemática desta teoria. Por isso, em sua sequência didática o autor utiliza a experimentação como um caminho possível, mas também introduz algum trabalho algébrico acerca dos conteúdos não convencionais ao ensino médio como os tópicos da geometria não euclidiana, as noções básicas da Relatividade Geral, a métrica e os fenômenos gravitacionais. Destacamos que essa pesquisa foi desenvolvida em um minicurso com quatro aulas à alunos do ensino médio que almejam concorrer ao certame do ITA.

Todavia, uma questão levantada por Casageorge (2020) nos emite um alerta que refere-se ao pouco conhecimento prévio que os alunos possuem acerca do efeito Doppler. Tal fato é preocupante, pois mostra quão delicado é o alcance da interpretação correta do fenômeno tanto no viés clássico como no relativístico. Por isso, é importante trabalhar efetivamente a diferenciação do fenômeno nos diferentes tipos de ondas e a aplicabilidade dele em cenários como da medicina, do trânsito e da Cosmologia. Uma proposta interessante é adotar a História da Ciência como pano de fundo para abordar as interpretações e utilização do fenômeno.

Neste sentido, Jardim et al (2014) e Neves et al (2020) discutem em seus artigos algumas questões controversas que podem se originar da fragilidade interpretativa e simplista do fenômeno e da Ciência. Para Jardim et al (2020) a História e Filosofia da Ciência nas aulas de Física é uma estratégia que busca significar o contexto em que o fenômeno se apresenta e também a evolução do seu entendimento nas diferentes épocas, a fim de que o entendimento equivocado do fenômeno não seja perpetuado. Esta estratégia fortalece a aquisição do conhecimento e contorna as dificuldades referente os obstáculos epistemológicos a respeito do conceito.

Por fim, ainda sobre as controvérsias, o artigo de Horvath (2020) traz uma rica discussão sobre os perigos de usar analogias didáticas para “tentar” explicar fenômenos que extrapolam as ideias do senso comum, como o caso da expansão do Universo em razão do efeito Doppler, ou afirmar que nada pode viajar com velocidade superior a  $c$ , tudo isso sem considerar uma série de apontamentos que residem na explicação física de cada caso.

# Capítulo 3

## EFEITO DOPPLER

## RELATIVÍSTICO

Neste capítulo, examinamos os princípios essenciais que sustentam nossa compreensão do Universo em uma escala cósmica. Nosso foco recai sobre os fundamentos físicos do efeito Doppler relativístico e como ele se relaciona ao fenômeno do desvio para o vermelho observado na Astronomia. Além disso, traçamos paralelos entre as bases da Relatividade Restrita e da lei de Hubble, explorando suas interconexões e distinções.

Com base em uma apresentação teórica, exploramos as raízes do efeito Doppler relativístico. Esse fenômeno, fundamentado na Teoria da Relatividade Restrita de Einstein, apresenta peculiaridades quando consideramos velocidades próximas à da luz, influenciando nossa percepção das frequências luminosas emitidas por objetos distantes. Analisamos ainda, o desvio para o vermelho (redshift) no espectro de frequências, uma característica crucial para entender a expansão do Universo. Também abordamos as distinções entre o efeito Doppler clássico e o relativístico, enfatizando seu papel na determinação das distâncias cósmicas e na dinâmica galáctica.

Estabelecendo conexões entre os elementos fundamentais da Relatividade Restrita e os princípios subjacentes à lei de Hubble, examinamos a intersecção entre essas teorias. A teoria da Relatividade, revolucionando nossa percepção de espaço e tempo, é complementada pela observação de que o Universo está em expansão constante, conforme postulado por Edwin Hubble. Nossa análise revela como a Relatividade Restrita e as observações de galáxias distantes convergem para explicar o desvio para o vermelho cosmológico.

Desta forma, ao desvendar os alicerces do efeito Doppler relativístico e sua relação

com o desvio para o vermelho, este capítulo busca estabelecer uma compreensão profunda das leis físicas que regem as escalas cósmicas. A análise minuciosa das interações entre a Relatividade Restrita e a expansão do Universo não apenas enriquece nossa perspectiva do Cosmos, mas também aprimora nossa habilidade de decifrar os enigmas que permeiam o espaço-tempo cósmico.

### 3.1 O Efeito Doppler

O efeito Doppler é um fenômeno ondulatório que se origina devido o movimento relativo entre a fonte emissora e o observador em relação ao meio de propagação da onda, no qual o observador percebe uma mudança na frequência aparente da onda (ALONSO, 2015). A primeira verificação experimental foi realizada em 1845 por Christophorus Henricus Diedericus Buys Ballot (1817-1890) ao colocar vários músicos dentro de um vagão aberto de uma locomotiva em movimento. Atribui-se a descoberta desse fenômeno ao físico Christian A. Doppler, em 1842.

O efeito Doppler ocorre em todos os tipos de ondas, independentemente da sua natureza, isto é, seja mecânica ou eletromagnética. Por exemplo, quando um pato está nadando em uma lagoa, nota-se a formação de círculos concêntricos na superfície da água que se propagam com certa velocidade e que em determinado instante de tempo chegaram até as margens da lagoa.

Para ondas, como o som, podemos estudar esse fenômeno considerando alguns cenários. Por exemplo, considere a situação em que o emissor de uma fonte sonora  $E$  e um observador  $O$  estão se movendo em linha reta com velocidade  $v_E$  e  $v_O$  em relação ao ar, respectivamente. Ressalva-se que, essas velocidades são menores que a velocidade do som, e que a frequência emitida ou detectada estão relacionadas da seguinte forma:

$$\nu_A = \frac{v_s \pm v_O}{v_s \pm v_E} \nu \quad (3.1)$$

que é conhecida como equação geral do efeito Doppler.

Quanto a escolha entre o sinal positivo ou negativo deve-se aplicar a seguinte regra:

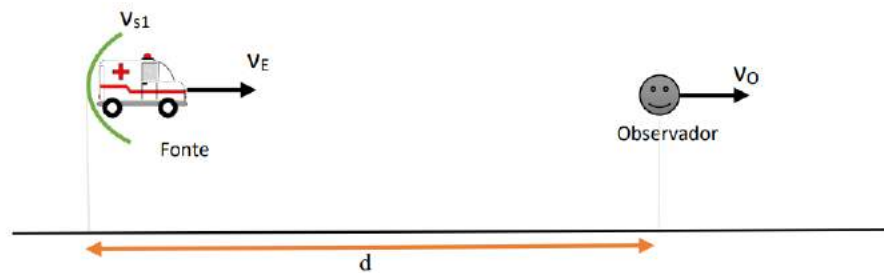
Quando o movimento do detector ou da fonte é no sentido de aproximá-los, o sinal da velocidade deve resultar em um aumento da frequência. Quando o movimento do detector ou da fonte é no sentido de afastá-los, o sinal da velocidade deve resultar em uma diminuição da frequência (HALLIDAY, 2012, p. 166)

Para a aplicação desta regra é necessário analisar tanto o movimento do observador quanto da fonte emissora do som, isto é, para um observador que se aproxima da fonte do som utiliza-se o sinal positivo no numerador, mas caso o observador esteja se afastando do emissor deve-se usar o sinal negativo no numerador, ou ainda, quando o observador estiver parado substitui-se a velocidade por zero. Com relação ao movimento do emissor, caso o emissor esteja se movendo na direção do observador usa-se o sinal negativo no denominador, porém se o emissor estiver se afastando do observador o sinal usado no denominador deverá ser o positivo, e na situação de repouso a velocidade do emissor é zero (HALLIDAY, 2012).

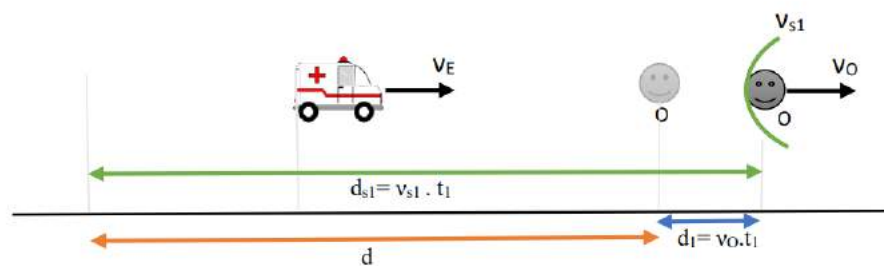
Voltando ao exemplo, no instante  $t = 0$ , enquanto a distância entre a fonte e o observador era dada por  $d$  foi emitido o primeiro pulso sonoro pelo emissor  $E$ . Após o instante de tempo  $t_1$ , o observador  $O$  detectou esse primeiro pulso, mas  $O$  havia se deslocado da posição inicial tendo percorrido a distância de  $d_1 = v_o t_1$ , conforme mostra a Fig. (3.1).

Figura 3.1: Fonte emitindo o primeiro pulso sonoro e o observador detectando esse pulso.

Emissão do primeiro pulso sonoro.



Deteção do primeiro pulso sonoro.



Fonte: Elaborado pela própria autora (2023).

Analisando essas distâncias mais criteriosamente, nota-se que

$$d + d_1 = d_s \quad (3.2)$$

$$d = d_s - d_1,$$

e realizando as devidas substituições dos valores, podemos organizar a expressão para obter

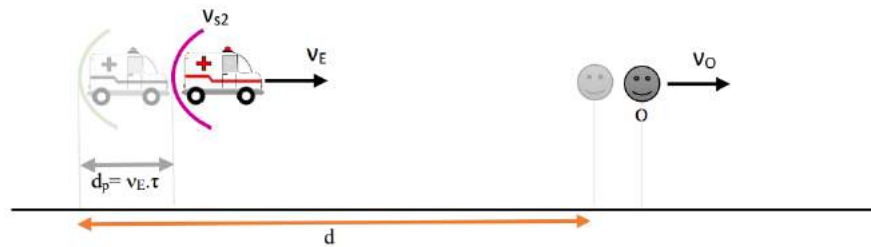
$$d = v_s \cdot t_1 - v_O \cdot t_1 \quad (3.3)$$

$$d = (v_s - v_O)t_1,$$

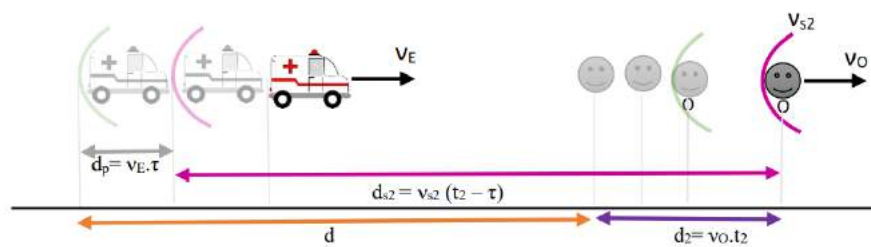
que representa a distância que separa o emissor  $E$  do observador  $O$ .

Todavia, por um momento, suponha que essa fonte  $E$  continuou emitindo outros pulsos de ondas que conseqüentemente se propagaram pelo ar. Assim, para este cenário, podemos considerar que antes da detecção do primeiro pulso sonoro, um segundo pulso sonoro foi emitido, conforme podemos verificar na Fig. (3.2).

Figura 3.2: Fonte emitindo o segundo pulso sonoro e o observador detectando esse pulso.  
Emissão do segundo pulso sonoro.



Detecção do segundo pulso sonoro.



Fonte: Elaborado pela própria autora (2023).

Na Fig. (3.2) observa-se que a segunda emissão sonora se propagou a uma distância

de  $d_p = v_E \tau$ , com  $\tau$  representando o período de uma oscilação completa de onda. A distância percorrida pelo som nesta segunda emissão é dada por  $d_{s2} = v_s(t_2 - \tau)$ , e a última informação refere-se a distância percorrida pelo observador desde sua posição inicial até a detecção do segundo pulso sonoro, sendo  $d_2 = v_O t_2$ .

Analisando essas distâncias temos que

$$d - v_E \tau = d_{s2} - d_2 \quad (3.4)$$

$$d - v_E \tau = v_s(t_2 - \tau) - v_O t_2$$

$$d = v_s t_2 - v_s \tau - v_O t_2 + v_E \tau$$

$$d = (v_s - v_O)t_2 - (v_s - v_E)\tau.$$

Comparando as equações (3.3) e (3.4), temos

$$(v_s - v_O)t_2 - (v_s - v_E)\tau = (v_s - v_O)t_1, \quad (3.5)$$

e organizando-a, obtém-se a expressão

$$(v_s - v_O)(t_2 - t_1) = (v_s - v_E)\tau, \quad (3.6)$$

na qual o termo  $(t_2 - t_1)$  é a diferença de tempo dos pulsos sonoros emitidos. Desta forma

$$(v_s - v_O)\Delta t = (v_s - v_E)\tau. \quad (3.7)$$

Sabendo que  $\Delta t = \frac{1}{\nu_A}$  e  $\tau = \frac{1}{\nu}$ , podemos substituir em (3.7)

$$(v_s - v_O)\frac{1}{\nu_A} = (v_s - v_E)\frac{1}{\nu} \quad (3.8)$$

e organizando os termos, encontra-se a relação

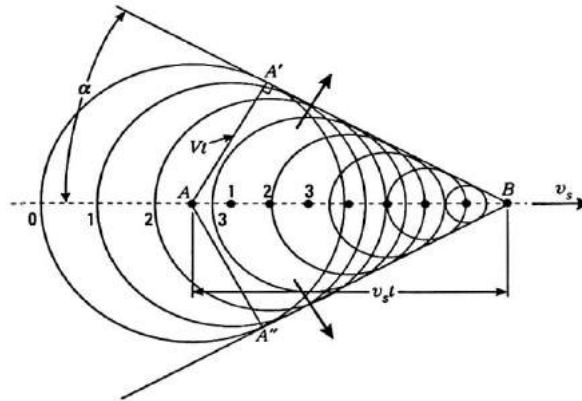
$$\nu_A = \frac{v_s - v_O}{v_s - v_E}\nu. \quad (3.9)$$

Esta é a equação geral do efeito Doppler para o caso em que a fonte emissora está se movendo na direção do observador. Para a demonstração dos outros casos de aplicação, o raciocínio é análogo, porém existe a necessidade de cuidados quanto a regra dos sinais, pois a condição de estudo pretendido mudaria os sinais tanto no numerador quanto no denominador.



É interessante apresentar também a situação em que o observador está parado e a fonte movendo-se com velocidade maior que a velocidade do som. Nestas condições, a fonte emissora desloca-se rapidamente acompanhando suas próprias frentes de ondas produzidas em instantes anteriores.

Figura 3.3: Onda de choque ou onda de Mach.



Fonte: ALONSO (2015).

A Fig. (3.3) mostra as posições que cada frente de onda teve origem e também que a combinação delas produz uma envoltória chamada de *cone de Mach* (HALLIDAY, 2012). Neste caso, a linha de movimento da fonte é o eixo do cone, cuja abertura  $\alpha$  é dada por

$$\text{sen } \alpha = v/v_s. \quad (3.10)$$

A superposição dessas frentes de ondas na superfície do cone de Mach podem ocasionar uma “elevação e uma queda abrupta da pressão do ar quando a superfície passa por um ponto qualquer” (HALLIDAY, 2012, p. 170), resultando numa onda de choque.

Figura 3.4: Ondas de choque produzidas pelas asas de um jato FA 18.



Fonte: HALLIDAY (2012).

## 3.2 Ondas eletromagnéticas

As ondas são perturbações que se propagam transportando energia sem transportar matéria, através de um meio. São classificadas em ondas mecânicas, eletromagnéticas, de superfície, longitudinais e transversais. Independentemente da natureza da onda, existe aspectos que descrevem seu comportamento.

1. A amplitude (A) refere-se a máxima da onda em relação a sua posição de equilíbrio.
2. O comprimento de onda ( $\lambda$ ) é a distância entre dois pontos idênticos de uma onda, podendo ser medido de uma crista à outra ou de vale a vale.
3. A frequência ( $\nu$ ) é o número de ciclos de onda que ocorre em um segundo.
4. A velocidade de propagação é a velocidade que a onda se propaga através do meio.

Dentre as ondas mencionadas somente a eletromagnética não requer um meio material para propagação. Este tipo de onda está relacionada com oscilações elétricas e magnéticas. De certo modo, podemos dizer que é o campo elétrico e magnético que avançam no espaço (NASCIMENTO, 2019).

As perturbações eletromagnéticas se propagam no espaço com velocidade da luz, desta forma, considerando o vácuo como meio, utilizaremos o valor da constante elétrica  $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} N^{-1}m^{-2}C^2$  e da constante magnética  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} N s^2 C^{-2}$ , para encontrar o valor da velocidade da luz no vácuo, isto é,

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (3.11)$$

$$c = \frac{1}{\sqrt{4\pi \times 10^{-7} \times 8,85 \times 10^{-12}}}$$

$$c = 2,99 \cdot 10^8 m/s.$$

As ondas eletromagnéticas foram previstas por James C. Maxwell ao realizar uma síntese fundamental na Física unificando os fenômenos elétricos, magnéticos e ópticos. O trabalho de Maxwell originou um conjunto de equações, conhecidas por *equações de Maxwell*.

$$\text{div} \vec{E} = 0 \quad (3.12)$$

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad (3.13)$$

$$\text{rot}\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t} \quad (3.14)$$

$$\text{rot}\vec{B} = \mu_0\epsilon_0\frac{\partial\vec{E}}{\partial t} \quad (3.15)$$

Perceba que na equação (3.15) o termo  $\mu_0\epsilon_0\frac{\partial\vec{E}}{\partial t}$  foi introduzido por Maxwell na Lei de Ampère, com o objetivo de tornar as equações do Eletromagnetismo compatíveis com a conservação de carga, dada pela equação da continuidade (BARCELOS NETO, 2015).

$$\text{div}\vec{j} + \frac{\partial\rho}{\partial t} = 0. \quad (3.16)$$

Considerando a equação (3.14) podemos aplicar o operador rotacional em ambos os lados, isto é,

$$\text{rot}\text{rot}\vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t}\text{rot}\vec{B}. \quad (3.17)$$

Usando a identidade

$$\text{rot}\text{rot}\vec{f} = \text{grad}\text{div}\vec{f} - \nabla^2\vec{f},$$

temos que

$$\text{grad}\text{div}\vec{E} - \nabla^2\vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t}\text{rot}\vec{B}, \quad (3.18)$$

e considerando as equações (3.12) e (3.15), obtemos

$$\nabla^2\vec{E} - \mu_0\epsilon_0\frac{\partial^2\vec{E}}{\partial t^2} = 0. \quad (3.19)$$

Semelhantemente, podemos aplicar o operador rotacional em ambos os lados da equação (3.15) para chegar à expressão

$$\nabla^2\vec{B} - \mu_0\epsilon_0\frac{\partial^2\vec{B}}{\partial t^2} = 0. \quad (3.20)$$

Este resultado nos permite concluir que o campo eletromagnético satisfaz à equação da onda (BARCELOS NETO, 2015)<sup>1</sup>.

É importante destacar algumas características particulares das ondas eletromagnéticas, pois “os campos elétrico e magnético oscilam perpendicularmente à direção de propagação, sendo também perpendiculares entre si” (NASCIMENTO, 2019, p. 26). Os

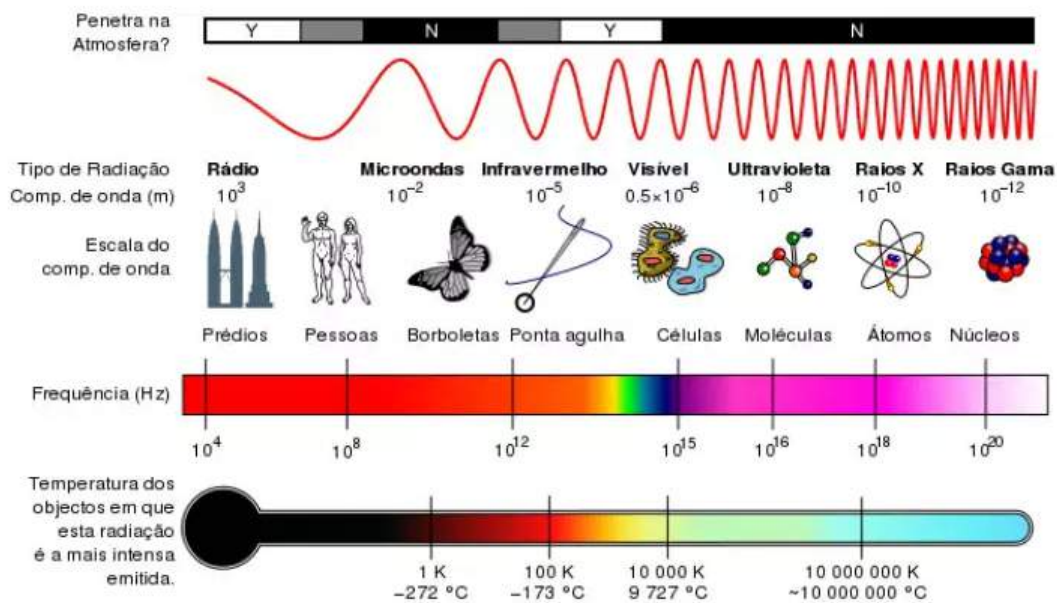
---

<sup>1</sup>Para a verificação e acompanhamento do rigor matemático e formalismo físico acerca das Ondas é sugerido como material para leituras complementares as obras de Alonso (2015) e Nussenzveig (1998).

módulos do campo elétrico e do campo magnético oscilam em concordância de fase, isto é, quando um dos campos é máximo, o outro é máximo também. Podemos mencionar também que a polarização destas ondas depende da orientação dos campos, podendo ser classificadas em linear, circular ou elíptica.

As ondas eletromagnéticas são caracterizadas em termos dos comprimentos de onda ou frequências e estão organizadas em ordem crescente dos comprimentos de ondas ou decrescente nas frequências em um espectro eletromagnético (BARCELOS NETO, 2015).

Figura 3.5: Espectro eletromagnético.



Fonte: WIKIPEDIA (2023).

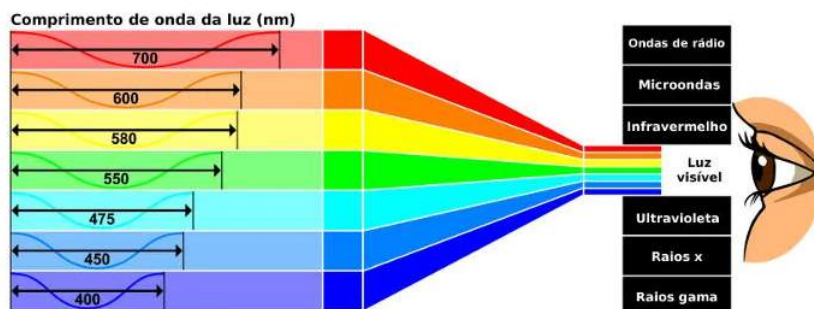
Na Fig. (3.5)<sup>2</sup> nota-se a existência de ondas eletromagnéticas que possuem baixas e altas frequências, essas radiações são imperceptíveis aos olhos humanos, a exemplo, temos as ondas de rádio, micro-ondas, infravermelho, raios gama, raio X e ultravioleta, respectivamente. Todavia, na estreita faixa das frequências entre  $4,28 \times 10^{14}$  Hz a  $7,5 \times 10^{14}$  Hz, com comprimentos de ondas de entre  $700\text{nm}$  (vermelho) e  $400\text{nm}$  (azul), está compreendida a faixa da luz visível.

No espectro da luz visível existe ondas intermediárias que estão divididas em cores sensíveis a percepção do olho humano e correspondem a diferentes frequências, conforme mostra a Fig. (3.6)<sup>3</sup>.

<sup>2</sup>Imagem disponível em [https://pt.wikipedia.org/wiki/Espectro\\_eletromagn%C3%A9tico](https://pt.wikipedia.org/wiki/Espectro_eletromagn%C3%A9tico). Acessado em 05 de agosto de 2022.

<sup>3</sup>Imagem disponível em <https://s3.static.brasilecola.uol.com.br/img/2019/05/espectro-visivel.jpg>. Acessado em 05 de agosto de 2022.

Figura 3.6: Espectro da luz visível.



Fonte: BRASIL ESCOLA (2023).

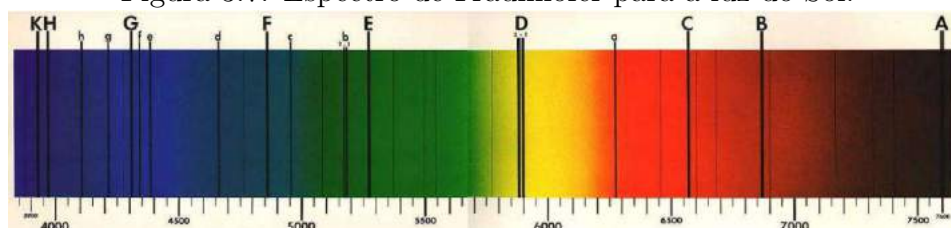
### 3.2.1 Espectroscopia

A Espectroscopia é técnica utilizada para investigar a interação entre a radiação eletromagnética e a matéria, isto é, “é o estudo da luz através de suas cores componentes, que aparecem quando a luz passa através de um prisma ou de uma rede de difração” (OLIVEIRA FILHO, 2004, p. 197).

É comum atribuir às análises de Newton acerca da luz como sendo o primeiro estudo envolvendo a Espectroscopia. Em seu trabalho, Newton descobriu que ao passar a luz branca por um prisma, ela se decompunha em outras cores, que por sua vez formavam o que conhecemos como o espectro da luz visível. Todavia, essa luz branca se assemelha a luz emitida pelo Sol, por isso as pesquisas se concentraram na luz solar (OLIVEIRA FILHO, 2004).

Outro importante trabalho desenvolvido utilizando a Espectroscopia foi executado por Fraunhofer quando descobriu linhas escuras no espectro da luz vinda do Sol, passando a identificá-las com letras maiúsculas e minúsculas. As letras maiúsculas estão na ordem do maior para o menor comprimento de onda e representam as linhas mais fortes, já as linhas mais fracas estão expressadas por letras minúsculas, conforme a Fig. (3.7).

Figura 3.7: Espectro de Fraunhofer para a luz do Sol.



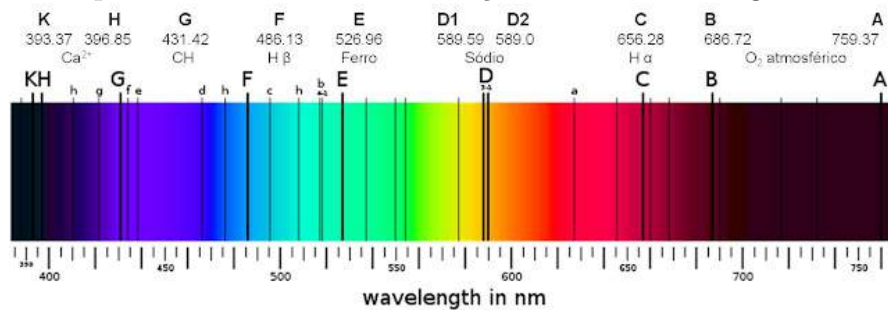
Fonte: MULLER et al (2013).

As explicações para as descobertas de Fraunhofer foram dadas pelo químico Bunsen e pelo físico Kirchhoff, que concluíram que essas linhas escuras eram de absorção atômica devido a existência de alguns elementos químicos na atmosfera do Sol, que evaporavam. Essa interpretação foi baseada nas análises experimentais da dupla, que estabeleceram o princípio da absorção, após um estudo sistemático das linhas espectrais de vários tipos de metais (MULLER et al, 2013).

Kirchhoff observou ainda que, passando a luz do Sol através de uma chama de sódio, as linhas D do Sol ficavam ainda mais fortes e 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 (MULLER et al, 2013, p. 4)

Desta forma, constataram que as camadas frias eram responsáveis pelas linhas escuras do espectro solar, e ao comparar o espectro detectaram as linhas de magnésio, cálcio, cromo, cobalto, zinco, bário e nitrogênio (OLIVEIRA FILHO, 2004), conforme ilustrado na Fig. (3.8)<sup>4</sup>

Figura 3.8: Espectro solar com a identificação das linhas de algumas substâncias.



Fonte: BLOG VENTOS DO UNIVERSO (2012).

A Espectroscopia possui vasta aplicação na Astronomia, sendo utilizada para medir o deslocamento da frequência de uma onda eletromagnética emitida por um objeto em movimento. Segundo Oliveira Filho (2004, p. 213) o uso da Espectroscopia “é a derivação da velocidade radial, isto é, a velocidade do objeto na linha de visada, utilizando o efeito Doppler”, conforme veremos na Seção (3.6).

<sup>4</sup>Imagem disponível em <http://ventosdouniverso.blogspot.com/2012/02/sumario-para-o-blogonauta-1.html>. Acessado em 13 de setembro de 2023.

### 3.3 Os postulados da Relatividade Restrita

A Teoria da Relatividade Restrita de Albert Einstein está contida em dois postulados

I: As leis dos fenômenos físicos são as mesmas em todos os sistemas de referência inerciais (isto é, somente o movimento relativo dos sistemas inerciais pode ser medido. O conceito de movimento relativo para “repouso absoluto” não faz sentido). II: A velocidade da luz (em espaço livre) é uma constante universal, independente de qualquer movimento relativo da fonte e do observador (THORNTON, 2016, p. 487).

O postulado I estende o princípio da relatividade de Galileu a todos os fenômenos físicos, inclusive os eletromagnéticos. E, conseqüentemente descarta a hipótese da existência de referenciais privilegiados, pois afirma que todos os referenciais inerciais são equivalentes. O postulado II confirma mais uma vez as equações de Maxwell como sendo leis fundamentais da Física. Einstein postulou que a velocidade da luz tinha o mesmo valor  $c$  para todos os sistemas de referenciais inerciais, implicando que o segundo postulado está de acordo com o primeiro (THORNTON, 2016).

### 3.4 Transformação de Lorentz

Os resultados apontados pelas experiências de Michelson-Morley sinalizaram que além da inexistência do éter, existia a necessidade da formulação de um novo conjunto de transformação para as grandezas físicas que pudessem descrever os fenômenos de maneira equivalente frente as mudanças de um referencial para o outro.

Considerando os postulados da Relatividade Restrita, as expressões matemáticas que viriam satisfazê-los são conhecidas como as *transformações de Lorentz*, pois esse novo tipo de transformação tornam as leis da Física relativisticamente covariantes. Neste sentido, observe a Fig. (3.9):

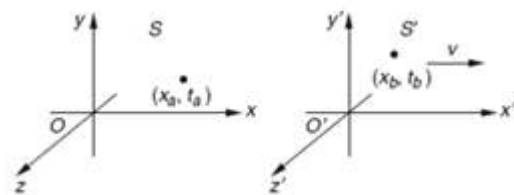


Figura 3.9: Representação de dois referenciais inerciais  $S$  e  $S'$ , com  $S'$  se movendo com velocidade  $v$  no sentido positivo do eixo  $x$  do referencial  $S$ .

Fonte: TIPLER (2017).

Na Fig. (3.9) estão representadas as coordenadas  $x$ ,  $y$ ,  $z$  e  $t$  de um evento no referencial  $S$ , e as coordenadas  $x'$ ,  $y'$ ,  $z'$  e  $t'$  do mesmo evento, mas no referencial  $S'$  que se move com velocidade uniforme  $v$  em relação a  $S$  (TIPLER, 2017).

A transformação de Galileu é exitosa para os fenômenos de baixas velocidades. Contudo, vamos generalizar a transformada da posição para

$$x' = \gamma(x - vt), \quad (3.21)$$

com  $\gamma \rightarrow 1$  para  $v \ll c$ . Essa equação nos garante que cada evento em  $S$  corresponde a um e somente um evento em  $S'$ .

A transformação inversa é dada por

$$x = \gamma(x' + vt'), \quad (3.22)$$

que descreve o movimento da origem  $O$  do referencial  $S$  tanto em  $S$  quanto em  $S'$ . Note que ocorre apenas a mudança na velocidade relativa dos dois referenciais inerciais (THORNTON, 2016).

Seguindo a demonstração, vamos recorrer ao postulado da covariância para que  $\gamma = \gamma'$ , e substituindo o valor de  $x'$  da equação (3.21) na equação (3.22), obtemos

$$\gamma vt' = x - \gamma^2 x + \gamma^2 vt, \quad (3.23)$$

com  $\gamma^2 = \frac{1}{1-\beta^2}$ . Assim,

$$\gamma vt' = \frac{-\beta^2 x}{1-\beta^2} + \frac{1}{1-\beta^2} vt. \quad (3.24)$$

como  $1 - \beta^2 = \frac{1}{\gamma^2}$  e  $\beta = \frac{v}{c}$ . Dividindo ambos os lados da igualdade por  $\gamma v$  obtêm-se a expressão de  $t'$

$$t' = \gamma \left( t - \frac{vx}{c^2} \right). \quad (3.25)$$

Esse resultado representa a transformação temporal de um evento do referencial  $S$  para o  $S'$ . Note que a ideia de tempo absoluto é desprezada nesta transformação.

As transformações de Lorentz de um evento do referencial  $S$  para o  $S'$  são escritas



como

$$\begin{aligned}
 x' &= \gamma(x - vt) & (3.26) \\
 y' &= y \\
 z' &= z \\
 t' &= \gamma \left( t - \frac{vx}{c^2} \right).
 \end{aligned}$$

Para as transformações de Lorentz de  $S'$  para  $S$ , basta substituir  $v$  por  $-v$  além de trocar as quantidades dimensionais e não dimensionais da equação (3.26) (THORNTON, 2016).

$$\begin{aligned}
 x &= \gamma(x' + vt') & (3.27) \\
 y &= y' \\
 z &= z' \\
 t &= \gamma \left( t' + \frac{vx'}{c^2} \right).
 \end{aligned}$$

Para Alonso (2018) os resultados expressos pela transformação de Lorentz, em sua grande maioria, podem ser reduzidos as transformações de Galileu, mas para isso  $v \rightarrow 0$  ou  $c \rightarrow \infty$ , porém a mudança mais importante é com relação ao espaço e ao tempo.

## 1. Transformação das velocidades

Se derivarmos a expressão (3.26) encontraremos a transformação das velocidades medidas nos referenciais  $S$  e  $S'$ . Assim, a velocidade de determinada partícula medida em  $S$  é dada por

$$V_x = \frac{dx}{dt}, \quad V_y = \frac{dy}{dt}, \quad V_z = \frac{dz}{dt}. \quad (3.28)$$

De modo semelhante, as componentes da velocidade em  $S'$  são

$$V'_{x'} = \frac{dx'}{dt'}, \quad V'_{y'} = \frac{dy'}{dt'}, \quad V'_{z'} = \frac{dz'}{dt'}$$

derivando pela regra da cadeia  $\frac{dx'}{dt'} = \frac{dx'}{dt} \frac{dt}{dt'}$  a expressão  $x' = \gamma(x - vt)$  da equação (3.26), temos

$$\frac{dx'}{dt'} = \gamma \left( \frac{dx}{dt} - v \right) = \gamma(V_x - v), \quad (3.29)$$

observe que  $x$  depende de  $t'$ , mas  $t$  não está em função de  $t'$ , pois, neste caso, eles não são iguais.

Usando a transformação temporal de Lorentz chegamos a

$$\frac{dt}{dt'} = \gamma \left( 1 + \frac{v}{c^2} \frac{dx'}{dt'} \right) = \gamma \left( 1 + \frac{vV'_{x'}}{c^2} \right), \quad (3.30)$$

organizando o resultado temos que

$$V'_{x'} = \gamma(V_x - v)\gamma \left( 1 + \frac{vV'_{x'}}{c^2} \right). \quad (3.31)$$

Vamos agora isolar  $V'_{x'}$  e dividir ambos os lados por  $\gamma^2$ , obtendo

$$V'_{x'} \left( 1 + \frac{v^2}{c^2} - \frac{V_x v}{c^2} + \frac{v^2}{c^2} \right) = (V_x - v), \quad (3.32)$$

e com um pouco mais de manipulação algébrica chegamos a

$$V'_{x'} = \frac{V_x - v}{1 - \frac{vV_x}{c^2}}. \quad (3.33)$$

Idem para  $V'_{y'}$  e  $V'_{z'}$ , ou seja,

$$\begin{aligned} V'_{y'} &= \frac{dy'}{dt'} = \frac{V_y \sqrt{1 - v^2/c^2}}{1 - vV_x/c^2} \\ V'_{z'} &= \frac{dz'}{dt'} = \frac{V_z \sqrt{1 - v^2/c^2}}{1 - vV_x/c^2}. \end{aligned} \quad (3.34)$$

Este conjunto de equações é “a regra para comparação da velocidade de um corpo, medida por dois observadores, em movimento relativo de translação uniforme” (ALONSO, 2018, p. 151). No caso particular de movimento paralelo ao eixo  $x$ ,  $V_x = v$ ,  $V'_x = V'$ ,  $V_y = V_z = V'_y = V'_z = 0$  (BARCELO NETO, 2015). Assim

$$v' = \frac{v - V}{1 - \frac{V}{c^2} v}. \quad (3.35)$$

Dada as informações podemos determinar se o segundo postulada da Relatividade Restrita é satisfeito. Assim, um observador no sistema  $S$  mede a velocidade do pulso de luz  $V' = c$  na direção de  $x$ . Da equação (3.35), outro observador em  $S'$  mede

$$v' = \frac{c - V}{1 - \frac{V}{c^2} c} = \frac{c - V}{c - V} c = c \quad (3.36)$$

conforme exige o postulado da constância da luz.

## 2. Transformação da aceleração.

As transformações de Lorentz para a aceleração são encontradas de maneira análoga a forma pela qual obtivemos as velocidades, isto é,

$$a'_{x'} = \frac{dV'_{x'}}{dt'} = \frac{dV'_{x'}}{dt} \frac{dt}{dt'}.$$

as relações a serem obtidas referem-se as acelerações de uma partícula que está em repouso relativo a  $R'$ , as medidas serão realizadas por dois observadores que também estão em movimento relativo. Dessa forma, usando  $V'_{x'}$  na equação (3.33), e considerando que o  $V_x = v$  é devido a condição de repouso relativo da partícula, encontra-se as transformações de Lorentz para a aceleração desta partícula

$$a'_{x'} = \frac{a_x \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{3/2}}{\left(1 - \frac{vV_x}{c^2}\right)^3}. \quad (3.37)$$

$$a'_{y'} = \left( a_y + a_x \frac{\frac{vV_y}{c^2}}{1 - \frac{vV_x}{c^2}} \right) \frac{1 - \frac{v^2}{c^2}}{\left(1 - \frac{vV_x}{c^2}\right)^2}. \quad (3.38)$$

$$a'_{z'} = \left( a_z + a_x \frac{\frac{vV_z}{c^2}}{1 - \frac{vV_x}{c^2}} \right) \frac{1 - \frac{v^2}{c^2}}{\left(1 - \frac{vV_x}{c^2}\right)^2}. \quad (3.39)$$

Note que a equação da aceleração (3.37) é diferentes das demais relações obtidas quando se utiliza as transformações de Galileu, isto é, diferem de  $a'_{x'} = a_x$ ,  $a'_{y'} = a_y$  e  $a'_{z'} = a_z$ , pois no cenário das transformações de Galileu “a aceleração de uma partícula é a mesma para todos os observadores em movimento relativo de translação uniforme” (ALONSO, 2018, p. 138).

Perceba também que utilizando as transformações de Lorentz, a aceleração não têm a mesma medida para os dois observadores em movimento relativo uniforme, ou seja, “a exigência da invariância da velocidade da luz em todos os referenciais em movimento relativo uniforme destrói a invariância da aceleração” (ALONSO, 2018, p. 153).

### 3.4.1 A transformação de Lorentz e suas consequências

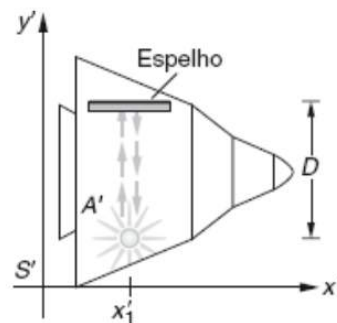
A transformação de Lorentz nos mostra que a relação entre os instantes de um evento medidos em  $S$  e  $S'$  depende do ponto onde ocorreu (BARCELOS NETO, 2015). E, o fator de escala  $\gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$  que aparece na equação (3.26) traz algumas consequências significativas.

#### 1 Dilação do tempo.

Entende-se por intervalo de tempo como aquele que decorre entre dois eventos medido por um observador. E, evento “é uma ocorrência específica que acontece num dado ponto do espaço em certo instante” (ALONSO, 2018, p. 155). Assim, o tempo decorrido entre esses dois eventos é, então, um intervalo de tempo.

Com o objetivo de compreender como o fenômeno da dilatação do tempo ocorre vamos considerar a seguinte experiência: Suponha um observador  $A'$  em repouso dentro de um foguete no sistema de referência  $S'$ , tendo fixo no teto desse foguete um espelho. O observador  $A'$  emite um feixe de luz em direção ao teto que atinge o espelho e reflete de volta em direção ao observador  $A'$ , conforme mostra a Fig. (3.10)

Figura 3.10: Espaçonave em repouso no referencial  $S'$ .



Fonte: TIPLER (2017).

Então, o observador  $A'$  verifica que o intervalo de tempo entre o trajeto de ida e volta do feixe de luz produzido por seu dispositivo é dado por

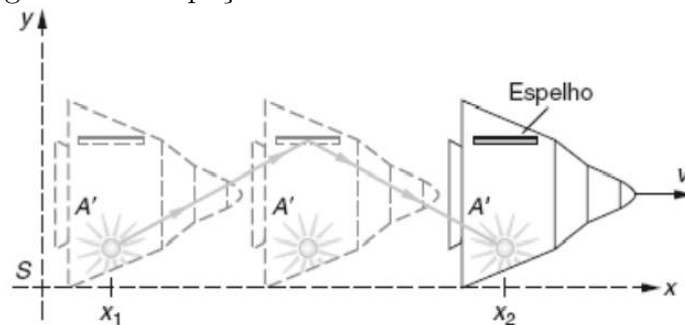
$$\Delta t' = \frac{2D}{c}, \quad (3.40)$$

devido a luz viajar com velocidade  $c$ .

Agora, vamos analisar a situação dos dois eventos (emissão e detecção do feixe de luz) sob a perspectiva de um observador no referencial  $S$ . Para esse observador em  $S$ ,

os eventos ocorrem em posições diferentes,  $x_1$  e  $x_2$ , de acordo com a Fig. (3.11).

Figura 3.11: Espaçonave em movimento no referencial  $S$ .

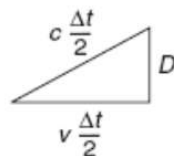


Fonte: TIPLER (2017).

Note que o foguete se desloca a direita de  $S'$  com velocidade  $v$ , assim o observador  $A'$  se deslocou a uma distância de  $v\Delta t$ , com  $\Delta t$  sendo o intervalo de tempo entre a ocorrência dos dois eventos no referencial  $S$ . Na Fig. (3.11) nota-se ainda, que a distância percorrida em  $S$  é maior que em  $S'$ , mas a velocidade da luz é a mesma para os dois referenciais, assim com base no segundo postulando da Relatividade Restrita podemos calcular  $\Delta t$  em termos do  $\Delta t'$ .

Estabelecendo a relação entre os intervalos de tempo, vamos analisar a Fig. (3.12) que ilustra a trajetória do feixe de luz observada pelos dois observadores em seus respectivos sistemas referenciais.

Figura 3.12: Triângulo retângulo para calcular  $\Delta t$  no referencial  $S$ .



Fonte: TIPLER (2017).

Aplicando o Teorema de Pitágoras no triângulo retângulo da Fig. (3.12), obtêm-se

$$\left(\frac{c\Delta t}{2}\right)^2 = D^2 + \left(\frac{v\Delta t}{2}\right)^2, \quad (3.41)$$

e operando matematicamente o teorema encontra-se a expressão para  $\Delta t$ , sendo

$$\Delta t = \frac{2D}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (3.42)$$

Como  $\Delta t' = \frac{2D}{c}$  vamos substituir na Eq. (3.42)

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (3.43)$$

$$\Delta t = \gamma \Delta t'$$

$$\Delta t = \gamma \tau.$$

com  $\tau$  sendo o intervalo de tempo próprio e  $\gamma$  é o fator de Lorentz cujo valor é sempre maior de 1, assim  $\Delta t > \Delta t'$ .

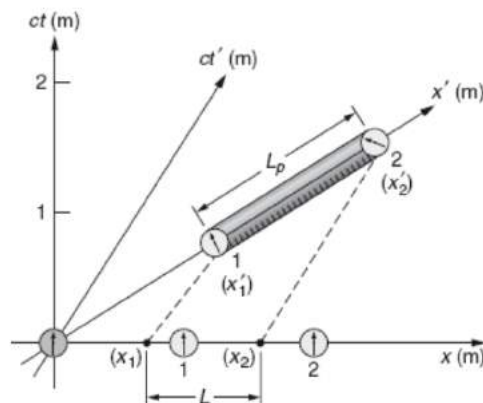
Portanto, a equação (3.43) expressa a dilatação do tempo e nos diz que, quando os eventos “ocorrem em um corpo em movimento relativo ao observador eles parecem ter uma duração maior do que quando eles ocorrem em um corpo em repouso relativo ao observador” (ALONSO, 2018, p. 155).

## 2. Contração do comprimento.

Segundo Alonso (2018, p. 154) “o comprimento de um objeto pode ser definido como a distância entre seus pontos extremos”. Para medir o comprimento de um objeto que está se movendo relativisticamente, é preciso que o observador registre simultaneamente as posições dos dois pontos extremos (ALONSO, 2018).

Destaca-se que a dilatação temporal também afeta o comprimento de um objeto, assim vamos recorrer novamente a uma experiência de pensamento para trabalharmos essa correlação entre os dois fenômenos. Desta forma, considere uma barra em repouso no referencial  $S'$ , conforme a Fig. (3.13), na qual uma das extremidades da barra está em  $x'_2$  e a outra em  $x'_1$ .

Figura 3.13: Uma barra em repouso no referencial  $S'$ , entre os pontos  $x'_2$  e  $x'_1$ .



Fonte: TIPLER (2017).

Note que o comprimento próprio da barra é  $L_p = x'_2 - x'_1$ , pois a barra está em repouso no referencial  $S'$ . Então, vamos experimentar o caso em que a barra está sendo medida a partir de outro referencial inercial chamado de  $S$ , onde a barra está se deslocando para a direita com velocidade  $v$ .

Para  $S$ , o comprimento da barra é  $L = x_2 - x_1$ , neste caso  $x_2$  representa a posição de uma das extremidades da barra em  $t_2$ , e  $x_1$  é a posição da outra extremidade no mesmo instante  $t_1 = t_2$ .

$$\begin{aligned}x'_2 &= \gamma(x_2 - vt_2) \\x'_1 &= \gamma(x_1 - vt_1),\end{aligned}\tag{3.44}$$

dessa forma, obtêm-se a expressão

$$\begin{aligned}x'_2 - x'_1 &= \gamma(x_2 - x_1) \\x_2 - x_1 &= \frac{1}{\gamma}(x'_2 - x'_1) \\x_2 - x_1 &= \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}(x'_2 - x'_1),\end{aligned}\tag{3.45}$$

que ainda pode ser expressa como

$$L = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}L_p,\tag{3.46}$$

sendo está a equação que representa a contração do comprimento.

Portanto, a equação (3.46) nos permite concluir que a contração de comprimento da barra ocorreu somente para o observador no referencial  $S$ , devido sua medida ter sido realizada quando a barra estava em movimento. Por outro lado, o observador no referencial da barra em  $S'$  apenas a observa em repouso, por isso, têm-se em relatividade, que os objetos parecem ser mais curtos, ou seja,  $L < L_p$  (ALONSO, 2018).

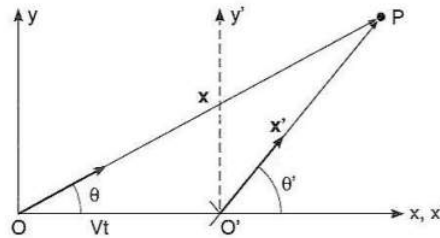
### 3.5 O efeito Doppler da luz

Discutimos na Seção (3.1) o efeito Doppler nas ondas sonoras, mas como podemos interpretá-lo quando substituímos o som pela luz?

O efeito Doppler para ondas eletromagnéticas deve ser discutido separadamente porque, em primeiro lugar, ondas eletromagnéticas não consistem em matéria em movimento, e, portanto, a velocidade da fonte relativamente ao meio não entra em discussão; em segundo lugar, sua velocidade de propagação é  $c$  e é a mesma para todos os observadores, não importando seu movimento relativo. O efeito Doppler para ondas eletromagnéticas deve ser, necessariamente, calculado aplicando-se o princípio da relatividade (ALONSO, 2015, p. 347).

Vamos considerar dois observadores em sistemas de referenciais inerciais distintos, uma onda eletromagnética plana dada pela função  $\sin(kx - \omega t)$  multiplicada por um fator conveniente de amplitude, com  $k$  sendo o número de ondas angular e  $\omega$  a frequência angular (ALONSO, 2015).

Figura 3.14: Efeito Doppler e aberração da luz.



Fonte: NUSSENZVEIG (1998).

Para o observador fixo  $x$  em relação a outro sistema inercial de referência, as coordenadas  $x$  e  $t$  devem ser substituídas por  $x'$  e  $t'$  dadas pela transformação de Lorentz (3.26), pois do ponto de vista da equação de onda, a solução da onda é uma função, e portanto é um escalar, fato que não permite uma mudança na forma da função (seno ou cosseno), porém, os argumentos ( $kx - \omega t$ ) são afetados. Assim, ele escreverá para sua função  $\sin(k'x' - \omega't')$ , onde  $k'$  e  $\omega'$  não são necessariamente os mesmos que para o outro observador (ALONSO, 2015).

O efeito Doppler da luz obedece ao princípio da Relatividade Restrita, assim a expressão  $kx - \omega t$  deve permanecer invariante, dessa forma teremos

$$kx - \omega t = k'x' - \omega't'.$$

Usando a transformação recíproca de Lorentz para  $x$  e  $t$  apresentada na equação (3.27), temos

$$k(\gamma(x' + vt')) - \omega(\gamma(t' + \frac{v}{c^2}x')) = k'x' - \omega't' \quad (3.47)$$



ou

$$k\gamma x' + kv t' \gamma - \omega \gamma t' + \frac{\omega v}{c^2} x' \gamma = k' x' - \omega' t' \quad (3.48)$$

organizando a expressão em termos do  $x'$  e  $t'$ , devemos encontrar

$$\frac{k - \omega v/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} x' - \frac{\omega - kv}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} t' = k' x' - \omega' t', \quad (3.49)$$

como  $x'$  e  $t'$  são independentes temos portanto

$$k' = \frac{k - \omega v/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad \omega' = \frac{\omega - kv}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}. \quad (3.50)$$

Lembrando que  $\omega = ck$ , podemos escrever ou uma ou outra dessas equações sob a forma

$$\omega' = \omega \frac{1 - v/c}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}. \quad (3.51)$$

Para velocidades pequenas, isto é,  $v \ll c$ , podemos aproximar o denominador por 1, resultando em

$$\omega' = \omega \left(1 - \frac{v}{c}\right),$$

que representa o movimento do observador em relação à fonte, segundo a linha de propagação.

A equação (3.51) relaciona as frequências  $\omega$  e  $\omega'$  medida pelos observadores  $O$  e  $O'$  quando  $O'$  está se movendo ao longo do eixo  $X$  com a velocidade  $v$  relativa a  $O$  (ALONSO, 2015). Entretanto, quando o movimento relativo entre eles não é ao longo da linha de propagação, é válida a equação (3.52)

$$\omega' = \omega \frac{1 - (v/c) \cos \theta}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad (3.52)$$

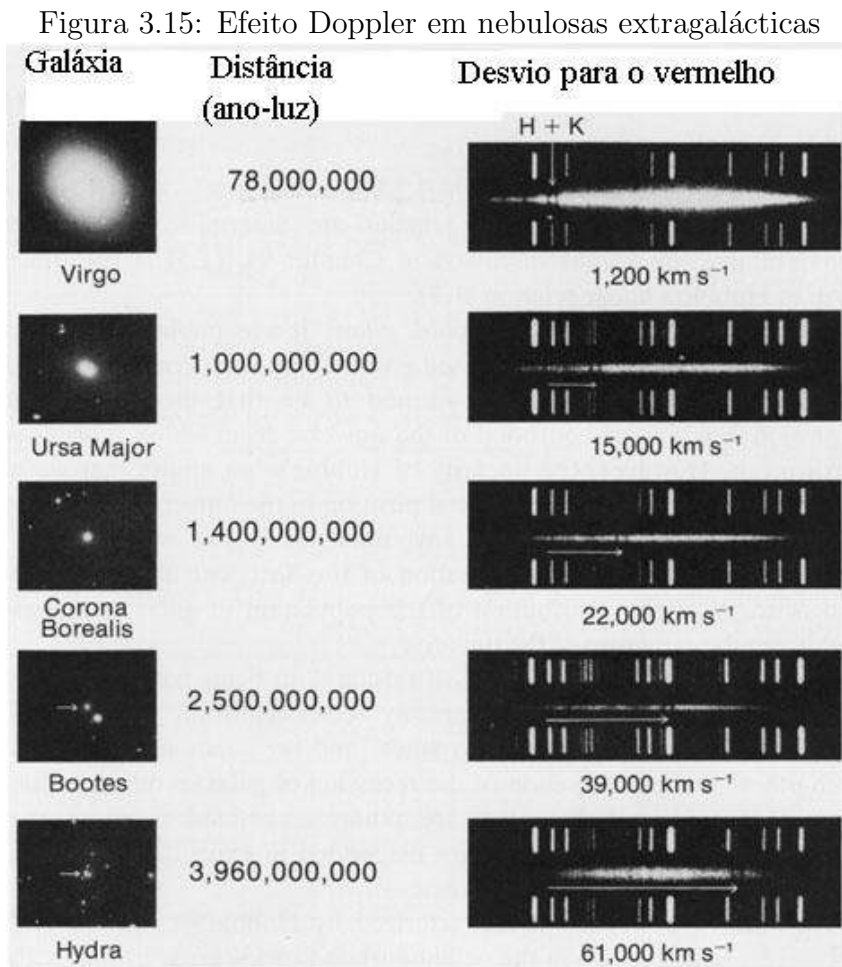
com  $\theta$  sendo o ângulo entre a direção de propagação e a direção do movimento relativo.

Uma análise bastante interessante consiste em supor um observador  $O$  parado em relação a uma fonte emissora de onda luminosa, na qual a fonte e o observador se afastam reciprocamente. Para um observador  $O'$  em outro referencial, a frequência observada será menor, isto é, maior será o comprimento de onda (ALONSO, 2015).

Assim, utilizando os conhecimentos sobre o espectro da luz visível sabemos que quando a luz apresenta deslocamentos no sentido dos maiores comprimentos de onda, dizemos que está ocorrendo um desvio para o vermelho. Porém, quando têm-se menores

comprimentos de ondas, o desvio sofrido é para o azul espectral. Essas interpretações podem ser aplicadas satisfatoriamente ao estudo dos espectros estelares, uma vez que permitem estimar a velocidade que corpos estelares se afastam (ALONSO, 2015).

A Fig. (3.15) ilustra o desvio para o vermelho das linhas H e K, correspondente a análise espectroscópica do elemento químico cálcio observado no espectro de algumas nebulosas.



Fonte: SOARES (2017).

Na descrição da figura (3.15) temos o nome da galáxia observada, sua distância em ano-luz e o desvio para o vermelho de cada uma delas. É perceptível também a existência de algumas setas que indicam o deslocamento dessas linhas. Analisando a imagem constata-se que “quanto maior a velocidade de afastamento maior a distância da nebulosa” (ALONSO, 2015, p. 349).

Voltando a equação (3.52), vimos que foi aplicado à fase da onda  $kx - \omega t$  o princípio da relatividade, mas destacamos que existe outras possibilidades para encontrar está relação,

como, por exemplo, atribuindo certa energia ( $E = h\nu$ ) e quantidade de movimento ( $p = h/\lambda$ ) a radiação agrupados ao conceito de fóton, o que através de um cálculo simples e fazendo uso das transformações de Lorentz, conclui-se que o conceito de fóton apareceria como um consequência teórica do princípio da relatividade (ALONSO, 2015).

É possível provar também, a relação entre a equação (3.52) e o efeito Doppler, ou seja, ao analisarmos a situação a partir do ângulo  $\theta$  que se forma entre a direção de propagação da onda eletromagnética e a direção do movimento relativo de dois observadores chega-se a relação

$$\omega' = \omega \frac{1 - (v/c) \cos \theta}{\sqrt{1 - v^2/c^2}},$$

que é a mesma equação (3.52).

Acompanhando o exemplo de Alonso (2015), podemos deduzir a relação que exprime o efeito da aberração da luz, para isso vamos analisar a direção de propagação de uma onda eletromagnética plana determinada por dois observadores em movimento relativo. Sucintamente, vamos supor a fonte em repouso em relação ao observador  $O$  que vê a onda eletromagnética se propagando em uma direção que faz um ângulo  $\theta$  com o eixo dos  $X$ , o qual coincide com a direção do movimento relativo dos dois observadores. Então devemos ter

$$p'_x = \frac{p_x - vE/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}.$$

Mas  $p_x = p \cos \theta$ , de forma análoga, para o observador  $O'$ ,  $p'_x = p' \cos \theta'$ . Portanto, colocando  $E = cp$ , temos

$$p' \cos \theta' = p \frac{\cos \theta - v/c}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}.$$

Se fizermos  $p = h/\lambda = h\omega/2\pi c$  e, da mesma forma, para  $p'$ , cancelando os fatores comuns, obteremos

$$\omega' \cos \theta' = \omega \frac{\cos \theta - v/c}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}.$$

Combinando essa Eq. com a (3.52), para eliminar as frequências, obtemos

$$\cos \theta' = \frac{\cos \theta - v/c}{1 - (v/c) \cos \theta}, \quad (3.53)$$

que relaciona as direções de propagação da onda eletromagnética como seriam determinadas por dois observadores.

### 3.5.1 Tipos de desvios espectrais

Existe ainda dois outros tipos de fenômenos que se relacionam com a alteração na frequência da luz emitida por objetos distantes, conhecidos como desvio para o vermelho gravitacional e desvio para o vermelho cosmológico, dos quais detalharemos a seguir.

#### 1 Desvio para o vermelho gravitacional.

O efeito Doppler gravitacional ou desvio das raízes espectrais para o vermelho gravitacional é uma das previsões da Relatividade Geral, sendo evidenciada experimentalmente em 1960 através do trabalho de Pound e Rebka e Snider por meio da utilização de fótons gama que mostraram mudanças significativas entre as frequências emitida e observada (TORT, 2018; CUSTODIO, 2019). Em linhas gerais esse experimento “não deixa dúvidas que a Teoria da Relatividade Geral prevê corretamente o deslocamento das frequências em presença de um campo gravitacional” (TORT, 2018, p. 12).

O desvio para o vermelho gravitacional mesmo sendo previsto pela Relatividade Geral, pode ser obtido a partir da Relatividade Restrita e do princípio da equivalência, por isso vamos trabalhar nesses dois viés. Na Física que conhecemos existe dois tipos de massa de um corpo, a *massa inercial* e a *massa gravitacional*.

A massa inercial de um corpo “é uma medida da resistência que um corpo oferece a qualquer tentativa de alteração do seu estado de movimento” (TORT, 2018, p. 1). Pela segunda lei de Newton a massa inercial pode ser escrita como:

$$m_i = \frac{\|\mathbf{F}\|}{\|\mathbf{a}\|}. \quad (3.54)$$

Pela Gravitação Universal de Newton temos a definição de massa gravitacional, dada por

$$m_g = \frac{r^2 \|\mathbf{F}\|}{GM}, \quad (3.55)$$

na qual  $G$  é a constante de gravitação e  $M$  é a massa gravitacional.

Por outro lado, o peso de um corpo pode ser descrito por

$$\mathbf{P} = m_g \mathbf{g}, \quad (3.56)$$

com  $\|\mathbf{g}\| = \frac{GM}{r^2}$ .

Um dos princípios que impulsionou Einstein a generalizar sua teoria ficou conhecido como *princípio da equivalência*, e utilizando-o podemos tornar as massas equivalentes, isto é,

$$m_i = m_g. \quad (3.57)$$

Por outro lado, na Relatividade Restrita existe uma relação muito importante entre a energia, a massa inercial e a velocidade da luz no vácuo, representada por

$$E = m_i c^2. \quad (3.58)$$

Outra relação bastante conhecida refere-se a energia de um fóton, expressa por  $E = h\nu$ , na qual  $h$  é a constante de Planck e  $\nu$  é a frequência.

Acompanhando a exemplificação de Tort (2018)<sup>5</sup>, o cenário da emissão de um fóton em posição vertical para cima em um campo gravitacional uniforme  $g$  que aponta na direção contrária para baixo. Para este caso, o campo gravitacional exerce um trabalho sobre o fóton, fato que o faz mudar sua energia, isto é,

$$dE = h d\nu \quad (3.59)$$

$$h d\nu = W_g = m_g d\Phi$$

e  $\Phi$  é o potencial gravitacional definido por  $\Phi = -GM/r$ .

Fazendo uso do princípio da equivalência, podemos escrever

$$h d\nu = -m_i d\Phi. \quad (3.60)$$

Utilizando a relação massa-energia já que  $m_i$  se relaciona com a frequência por meio desta relação, temos

$$m_i = \frac{E}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2} \quad (3.61)$$

com alguma manipulação algébrica e substituindo esta relação em (3.60), obtêm-se

$$\frac{d\nu}{\nu} = -\frac{d\Phi}{c^2}. \quad (3.62)$$

---

<sup>5</sup>Para melhor detalhamento e acompanhamento das discussões verificar a referência Alexandre Tort, disponível em [https://www.academia.edu/36184179/0\\_efeito\\_Doppler\\_gravitacional](https://www.academia.edu/36184179/0_efeito_Doppler_gravitacional). Acessado em 14 de setembro de 2023.

Integrando a expressão

$$\ln\left(\frac{\nu_R}{\nu_E}\right) = -\frac{1}{c^2}[\Phi(r_R) - \Phi(r_E)] \quad (3.63)$$

com  $R$  e  $E$  subscritos sendo o emissor e o receptor. Em seguida, vamos utilizar a expressão do potencial gravitacional para escrever o resultado da integração da equação (3.63) na forma de

$$\frac{\nu_R}{\nu_E} = \exp\left[\frac{GM}{c^2}\left(\frac{1}{r_R} - \frac{1}{r_E}\right)\right] \quad (3.64)$$

e expandindo a exponencial  $e^x \approx 1 + x$ , podemos reescrevê-la como

$$\frac{\nu_R}{\nu_E} \approx 1 - \frac{gH}{c^2} \quad (3.65)$$

com  $H = r_R - r_E$ , e  $g = GM/r_E^2$  que é a aceleração da gravidade na posição do emissor. Sendo também o resultado que foi testado por Pound e Rebka.

Sob a perspectiva da Relatividade Geral podemos analisar o desvio para o vermelho gravitacional utilizando a métrica de Schwarzschild

$$ds^2 = -\left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right) c^2 dt^2 + \frac{dr^2}{1 - \frac{2GM}{c^2 r}} + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2), \quad (3.66)$$

onde  $M$  é a massa total da distribuição e  $R$  é o raio. Karl Schwarzschild possibilitou o entendimento sobre a geometria do espaço próximo à uma massa pontual.

Para o caso de dois eventos separados no espaço-tempo determinado por uma distribuição de massa esfericamente simétrica (TORT, 2018), em que  $t$ ,  $r$ ,  $\theta$  e  $\phi$  são coordenadas de um dos observadores. No limite  $r \gg \frac{2GM}{c^2}$ , a métrica se reduz a

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + dr^2 + r^2 (d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2) \quad (3.67)$$

que de acordo com a Relatividade Restrita equipara-se ao espaço de Minkowski em coordenadas esféricas (TORT, 2018). Considerando o espaço plano de Minkowski, a métrica de Schwarzschild pode ser positiva, negativa ou nula, classificando-se em tipo espaço ( $ds^2 > 0$ ), tipo tempo ( $ds^2 < 0$ ) e tipo luz ( $ds^2 = 0$ ).

Definindo o raio de Schwarzschild como

$$r_s := \frac{2GM}{c^2}. \quad (3.68)$$

podemos reescrever a equação (3.66) na forma

$$ds^2 = - \left(1 - \frac{r_s}{r}\right) c^2 dt^2 + \frac{dr^2}{1 - \frac{r_s}{r}} + r^2 d\phi^2 \quad (3.69)$$

fato que possibilita escrever a métrica do tipo tempo, como

$$c^2 d\tau^2 = \left(1 - \frac{r_s}{r}\right) c^2 dt^2 - \frac{dr^2}{1 - \frac{r_s}{r}} - r^2 d\phi^2 \quad (3.70)$$

e do tipo espaço

$$d\sigma^2 = - \left(1 - \frac{r_s}{r}\right) c^2 dt^2 + \frac{dr^2}{1 - \frac{r_s}{r}} + r^2 d\phi^2. \quad (3.71)$$

Destaca-se que a métrica de Schwarzschild só é válida para  $r > r_s$ , no entanto para  $r = r_s$  existe uma singularidade no coeficiente que multiplica  $dr^2$ , e para  $r < r_s$  deve ocorrer uma inversão de sinais. Entretanto, caso um corpo esférico tenha um raio menor do que  $r_s$ , este será considerado um buraco negro (TORT, 2018).

A partir dessas colocações, vamos trabalhar o efeito Doppler gravitacional de uma onda luminosa de comprimento de onda  $\lambda_E$  emitida por uma fonte no ponto  $r = r_E$  e  $\phi = \phi_E$  durante o intervalo de tempo próprio  $d\tau_E$ , sendo percebida pelo receptor no ponto  $r = r_R$  e  $\phi = \phi_R$  durante o intervalo de tempo próprio  $d\tau_R$  (TORT, 2018).

Em ambos os eventos  $dr = d\phi = 0$ , e neste caso  $ds^2 = -cd\tau^2$ , assim o intervalo tipo tempo fica

$$d\tau_E = \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r_E}\right) c^2 dt^2, \quad (3.72)$$

e no receptor

$$d\tau_R = \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r_R}\right) c^2 dt^2. \quad (3.73)$$

Os comprimentos de ondas do emissor é  $\lambda_E = cd\tau_E$  e do receptor é definidos por  $\lambda_R = cd\tau_R$ . Dessa forma,

$$\frac{\lambda_E}{\lambda_R} = \frac{d\tau_E}{d\tau_R} = \frac{\left(1 - \frac{2GM}{c^2 r_E}\right)^{1/2}}{\left(1 - \frac{2GM}{c^2 r_R}\right)^{1/2}}. \quad (3.74)$$

Neste caso  $h\nu = c$  é válida, então podemos escrever essa expressão em termos da

frequência de emissão e de recepção, além de considerar o raio de Schwarzschild. Assim, obtemos a seguinte expressão

$$\frac{\nu_R}{\nu_E} = \frac{\left(1 - \frac{r_S}{r_E}\right)^{1/2}}{\left(1 - \frac{r_S}{r_R}\right)^{1/2}}. \quad (3.75)$$

Utilizando está relação e realizando algumas manipulações algébricas necessárias é possível chegar aos mesmos resultados obtidos por Pound e Rebka, isto é,

$$\frac{\nu_R}{\nu_E} = 1 - \frac{gH}{c^2}, \quad (3.76)$$

que representa o desvio para o vermelho gravitacional. E,

$$\frac{\nu_R}{\nu_E} = 1 + \frac{gH}{c^2}, \quad (3.77)$$

com  $\nu_R > \nu_E$  que representa o desvio para o azul gravitacional.

## 2 Desvio para o vermelho cosmológico.

O Modelo Cosmológico Padrão (MPC) assenta-se sob três pilares fundamentais:

1. A Teoria da Relatividade Geral de Einstein;

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^2}T_{\mu\nu}$$

2. Uma teoria clássica da matéria como fluido perfeito.

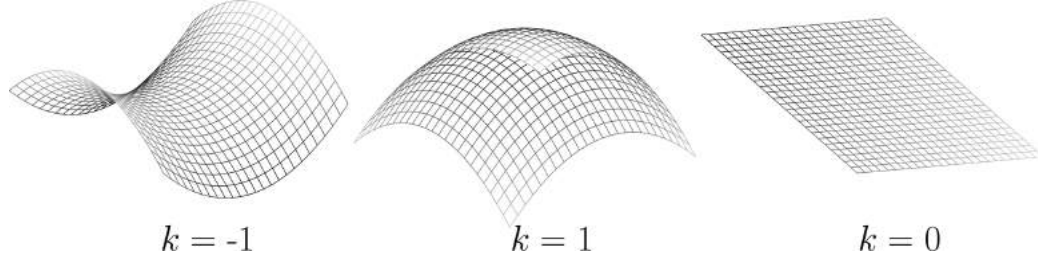
$$T_{\mu\nu} = pg_{\mu\nu} + (p + \rho)v_\mu v_\nu$$

3. O princípio cosmológico predizendo que, em grandes escalas, o Universo é homogêneo e isotrópico, isto é, não existe lugar e nem direção privilegiadas.

A hipótese do princípio cosmológico é satisfeita por três classes de geometria distintas, indicadas pelo parâmetro de curvatura  $k = -1$  (universo hiperbólico, infinito),  $k = 1$  (universo fechado e finito),  $k = 0$  (universo plano, infinito).



Figura 3.16: Versões bidimensionais dos modelos de curvatura.



ADERALDO (2020).

A métrica mais geral que satisfaz as condições de isotropia, homogeneidade e expansão do Universo para a geometria do espaço-tempo é a métrica de Friedmann-Robertson-Walker (OLIVEIRA FILHO, 2004):

$$ds^2 = c^2 dt^2 - a(t)^2 \left[ \frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2) \right], \quad (3.78)$$

na qual  $k$  é o parâmetro da curvatura que determinará a geometria do Universo,  $(r, \theta, \varphi)$  são coordenadas esféricas adimensionais (coordenadas comoveis), e  $a(t)$  é o fator de escala que define as distâncias do Universo.

Para tratarmos do redshift cosmológico, vamos analisar a luz de uma galáxia que viaja numa geodésica nula  $ds^2 = 0$ , com  $d\theta = d\varphi = 0$ . Nessa configuração a métrica de FRW se reduz a

$$\frac{cdt}{a(t)} = \pm \frac{dr}{\sqrt{1 - kr^2}}. \quad (3.79)$$

Continuando a análise, vamos acompanhar o exemplo dado por Ferrari (2019), que basicamente consiste em observar duas frentes de ondas monocromática para medi-las enquanto se afastam durante a expansão. A primeira emissão ocorre na posição  $r_e$  no instante  $t_e$  e é detectada em  $r_0 = 0$  e  $t_0$ . A segunda frente de onda emitida em  $t_e + \Delta t_e$  é observada em  $t_0 + \Delta t_0$ . Com esses dados, integra-se a (3.79) tanto para a primeira emissão de frente de onda

$$\int_{t_e}^{t_0} \frac{cdt}{a(t)} = \int_{r_e}^0 \frac{dr}{\sqrt{1 - kr^2}}, \quad (3.80)$$

quanto para a segunda emissão de frente de onda

$$\int_{t_e + \Delta t_e}^{t_0 + \Delta t_0} \frac{cdt}{a(t)} = \int_{r_e}^0 \frac{dr}{\sqrt{1 - kr^2}}. \quad (3.81)$$

Vamos, então, subtrair as equações (3.80) e (3.81) que se referem ao percurso das

frentes de ondas (FERRARI, 2019),

$$\int_{t_e}^{t_0} \frac{cdt}{a(t)} - \int_{t_e+\Delta t_e}^{t_0+\Delta t_0} \frac{cdt}{a(t)} = 0, \quad (3.82)$$

e a partir dessa operação encontra-se a expressão

$$\int_{t_e}^{t_e+\Delta t_e} \frac{cdt}{a(t)} = \int_{t_0}^{t_0+\Delta t_0} \frac{cdt}{a(t)}. \quad (3.83)$$

Todavia, ao desprezarmos as variações de  $a(t)$  que surgem a partir dos seus intervalos, podemos integrar a equação (3.83) e obter

$$\frac{\Delta t_e}{a(t_e)} = \frac{\Delta t_0}{a(t_0)}, \quad (3.84)$$

neste caso,  $\Delta t$  pode ser reescrito como  $\lambda = c\Delta t$ , uma vez que  $\Delta t$  representa o intervalo entre as cristas das frentes de ondas, desse modo a equação (3.84) torna-se

$$\frac{\lambda_0}{\lambda_e} = \frac{a(t_0)}{a(t_e)} \quad (3.85)$$

e sabendo que

$$\frac{d\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c} = z$$

com  $v \ll c$ , temos

$$\frac{\lambda_0 - \lambda_e}{\lambda_e} = z \quad (3.86)$$

ou

$$1 + z = \frac{\lambda_0}{\lambda_e} \quad (3.87)$$

ou ainda

$$1 + z = \frac{a(t_0)}{a(t_e)}. \quad (3.88)$$

Esse desvio para o vermelho (ou redshift) foi observado por Hubble, e é correto chamá-lo de desvio para o vermelho cosmológico, pois ocorre devido a expansão do Universo. Outro significado da expressão é que o fator de escala  $a(t)$  do Universo em seu momento atual (considerando a situação hipotética) é maior do que era quando as frentes de ondas monocromática foram emitidas pelas galáxias.

Podemos obter a lei de Hubble expandindo o fator de escala  $a(t)$  em série de Taylor e substituindo na equação (3.88), isto é,

$$z = \frac{a(t_0)}{a(t_e)} - 1 \approx \frac{a_0}{a_0(1 + (t - t_0)\dot{a}_0/a_0)} - 1 \approx \frac{\dot{a}_0}{a_0}(t_0 - t) = H_0L, \quad (3.89)$$

na qual  $H_0$  é o parâmetro de Hubble e  $L \approx (t_0 - t)c$  é a distância das galáxias. Caso, o objetivo seja medir a distância temporal que um objeto está da Terra, “basta que consideremos  $a_0 = 1$  e  $t = 1$  para os valores do fator de escala e de tempo, em um movimento dominado por matéria ( $a \sim t^{\frac{2}{3}}$ )” (CORREIA, 2009, p. 20), e utilizando a equação (3.88) o tempo em função do  $z$  é

$$t = \frac{1}{(1 + z)^{\frac{3}{2}}}. \quad (3.90)$$

Essa expressão significa que quanto mais distante um objeto está da Terra maior é o seu desvio para o vermelho ou redshift, de igual modo, quer dizer que essa luz foi emitida há muito tempo atrás e que viajou longínquas distâncias até chegar à nós. A lei de Hubble, basicamente diz que “quanto mais distante está um objeto, mais no passado ele está” (CORREIA, 2009, p. 21).

### 3.6 A cosmologia de Hubble

As contribuições científicas de Edwin Powell Hubble foram indiscutivelmente importantes para o estudo do Universo, Hubble foi “o primeiro a obter a prova de que o Universo visível estava muito além dos limites da Via-Láctea” (NEVES, 2000, p. 190). Uma das suas grandes descobertas foi realizada com o auxílio do telescópio de cem polegadas do Observatório de Monte Wilson, quando passou a observar à “Grande Nebulosa de Andrômeda” ou M31, descobrindo um tipo de estrela que apresentava um padrão característico das estrelas variáveis conhecidas na própria Via-Láctea, eram Cefeidas (NEVES, 2000; OLIVEIRA FILHO, 2004), conforme mostra a Fig. (3.17)<sup>6</sup>.

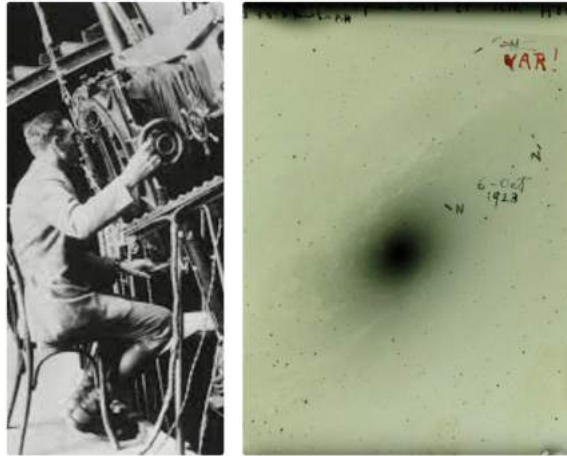
As Cefeidas são conhecidas como velas-padrão, assim Hubble assumiu que as estrelas variáveis observadas no sistema estelar M31 deveriam seguir a relação descoberta por Henrietta Leavitt. Então, em 1924 conseguiu determinar a distância da nebulosa de Andrômeda, provando que na verdade, Andrômeda era uma galáxia independente da

---

<sup>6</sup>Montagem de imagens obtidas na galeria do Carnegie Observatories (2022)

nossa Galáxia (OLIVEIRA FILHO, 2004).

Figura 3.17: (À esquerda) Edwin Powell Hubble manuseando o telescópio do Observatório de Monte Wilson. (À direita) Ilustração da placa fotográfica identificada por H335H (“placa Hooker 335 de Hubble”) onde Hubble marcou VAR em vermelho para demonstrar que encontrou uma estrela Cefeida.



Fonte: Copilação da autora (2023).

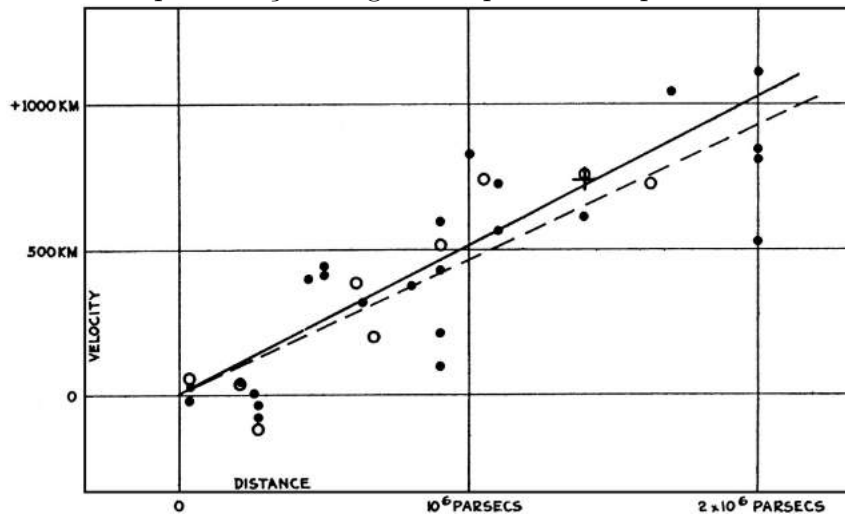
Fazendo um adendo, a relação período-luminosidade das Cefeidas utilizada por Hubble foi encontrada por Henrietta Leavitt ao realizar um trabalho extraordinário catalogando uma quantidade significativa de estrelas variáveis desde que começou a trabalhar como voluntária no Observatório de Harvard em 1895. Uma estrela variável pode ser entendida como aquela cuja a “magnitude aparente varia com o tempo” (BATALHA e CAMPOS, 2015, p. 3), e ao aprofundar suas pesquisas, Henrietta observou que as estrelas com brilho mais intenso apresentavam períodos maiores que as demais, levando-a a deduzir a relação entre o período e a luminosidade, cujo resultado foi publicado na circular 173 da Universidade de Harvard.

### 3.6.1 A Lei de Hubble

Em 1929, Hubble publicou o artigo *A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae*, no qual apresenta o resultado das pesquisas realizadas juntamente com Milton Humason. Essas pesquisas envolveram a observação das distâncias de algumas dezenas de nebulosas com suas respectivas velocidades de afastamento, e em posse desses dados, Hubble concluiu que quanto mais distante da Terra estar uma

galáxia, maior seria sua velocidade de afastamento.

Figura 3.18: Representação do gráfico apresentado por Hubble em 1929.



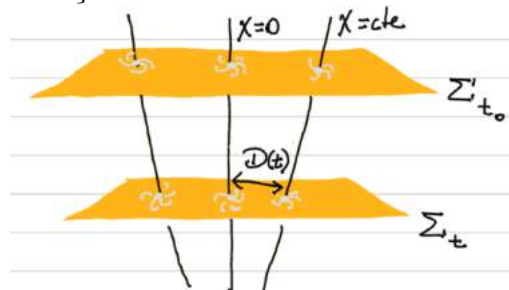
Fonte: HUBBLE (1929) apud BAGDONAS (2018).

A dupla Hubble e Humason refizeram todas as medidas realizadas por Vesto Slipher, no entanto aplicaram métodos independentes para medir as velocidades e as distâncias. Por exemplo, para as velocidades utilizaram os desvios espectrais da luz emitida por essas galáxias, e para a distância empregaram o método das velas-padrão. Um aspecto importante da lei de Hubble é que ela adequa-se naturalmente ao cenário do Universo homogêneo, isotrópico e em expansão.

### 1. Lei de Hubble Geométrica

Vamos obter a expressão da lei de Hubble geométrica, considerando o seguinte cenário.

Figura 3.19: Representação das linhas de mundo de um Universo isotrópico.



Fonte: VANZELLA (2022).

Na Fig (3.19)<sup>7</sup> temos a representação das linhas de mundo de observadores que veem

<sup>7</sup>Imagem retirada da aula EAD do professor Daniel Vanzella do IFSC-USP. Disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=sTlpcKtJ0T0>. Acessado em 26 de setembro de 2023.

a seção espacial do Universo de acordo com o que estabelece o princípio cosmológico, isto é, isotrópico. Observe que  $D(t)$  é a distância física entre a coordenada ( $\chi = 0$ ) e a coordenada ( $\chi = cte$ ) medida ao longo da  $\sum_t$  (VANZELLA, 2022).

$$D(t) = a(t)\chi. \quad (3.91)$$

Por outro lado, para calcular a taxa de afastamento dessas galáxias medidas numa mesma seção espacial é preciso calcular a derivada temporal de  $D(t)$ , isto é,

$$v_r := \frac{dD}{dt} = \frac{da\chi}{dt} = \frac{\dot{a}}{a}a\chi = \frac{\dot{a}}{a}D \quad (3.92)$$

note que a derivada atua somente no fator de escala. Outra informação importante é que  $\frac{\dot{a}}{a}$  é o parâmetro de Hubble.

Conclui-se que, em qualquer instante  $t$ , a taxa que duas galáxias se afastam uma da outra é exatamente proporcional à distância entre elas:

$$v_r(t) = H(t)D(t) \quad (3.93)$$

onde

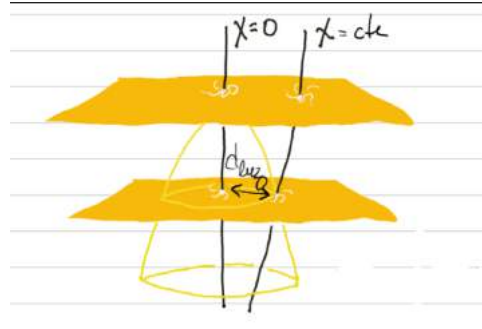
$$H(t) := \frac{\dot{a}}{a} = \frac{d(\ln a(t))}{dt}$$

é o chamado *parâmetro de Hubble* no instante  $t$ . O valores de  $H(t)$  hoje,  $H_0 := H(t_0)$ , é chamada de **constante de Hubble** (VANZELLA, 2022). Ao analisarmos a lei de Hubble, nota-se uma dependência linear entre a velocidade de recessão  $v_r(t)$  e a distância entre as galáxias, por isso pode-se dizer que quanto maior a distância, maior será a velocidade de recessão. E, caso a seção espacial esteja definida, a  $v_r(t)$  pode ser muito maior a velocidade da luz (VANZELLA, 2022).

## 2. Lei de Hubble Observacional

Para trabalhar a lei de Hubble observacional é comum utilizar a analogia do balão, no entanto, a linearidade impressa nessa analogia entre a velocidade de afastamento e a distância das galáxias desenhadas no balão, não é observada dessa forma na realidade. Na verdade ela envolve grandezas que não temos acesso, isto é, relaciona grandezas que não podem ser medidas do nosso ponto de observação. Segundo Vanzella (2022) o afastamento das galáxias ocorre pelo redshift da luz que foi emitida ao longo do nosso cone de luz passado, e não por uma medida direta de  $v_r$ .

Figura 3.20: Redshift da luz emitida por uma dada galáxia ao longo do nosso cone de luz passado.



Fonte: VANZELLA (2022)

Acompanhando a figura (3.20)<sup>8</sup>, percebe-se que caso um observador em  $\chi = 0$  queira acessar as informações a respeito da distância de uma galáxia em  $\chi = cte$ , ele precisará investigar a posição dessa galáxia a partir da intersecção da linha de mundo dela com o seu cone de luz passado. Sob essa perspectiva, a relação mais acertada para essa finalidade é vincular  $z$  a  $d_{luz}$ ,

$$d_{luz} = c a \int_t^{t_0} \frac{d\bar{t}}{a(\bar{t})} = \int_a^{a_0} \frac{d\bar{a}}{\dot{\bar{a}}} \quad (3.94)$$

da qual obtêm-se a expressão

$$d_{luz}(z) = \frac{c}{(1+z)} \int_0^z \frac{d\bar{z}}{H(\bar{z})}. \quad (3.95)$$

onde  $d_{luz}$  é o raio do cone de luz passado num dado instante  $t$ , e quanto maior o valor do redshift  $z$  mais para o passado o observador verá a localização da galáxia, isso implica que menor era o Universo.

Usando

$$a = \frac{a_0}{(1+z)} \implies da = -\frac{a_0}{(1+z)^2} dz = -\frac{a^2}{a_0} dz,$$

e  $H(z)$  é o parâmetro de Hubble em função do redshift:

$$H(z) = \left. \frac{\dot{a}(t)}{a(t)} \right|_{t=t(z)}.$$

Para Vanzella (2022) a lei de Hubble observacional revela a dependência da relação entre  $z$  e  $d_{luz}$  com a história do parâmetro de Hubble e não exclusivamente de seu valor

<sup>8</sup>Para melhor detalhamento e acompanhamento das discussões relacionadas a Seção (3.6.1), visitar a aula do professor Daniel Vanzella, disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=sTlpcKtJOT0>. Acessado em 26 de setembro de 2023.

num dado instante de tempo. Resumidamente, as observações acerca da evolução do Universo tornam-se possível através da relação entre a distância e o redshift do Universo.

Embora a relação entre  $z$  e  $d_{luz}$  seja, sem dúvidas, mais significativa do ponto de vista observacional, ela ainda não é a relação que de fato é colocada à prova pelas observações de fato realizadas. Isso porque embora tenhamos substituído a velocidade  $v_r$  - impossível de se observar - pelo redshift  $z$  - este sim diretamente mensurável a grandeza  $d_{luz}$  (distância entre galáxias medida ao longo de cada superfície  $\sum_t$ ) também não é diretamente mensurável em escalas cosmológicas. Daí surge a necessidade de definições mais convenientes, do ponto de vista observável de distâncias (VANZELLA, 2022, p. 4).

### 3.6.2 A controversa interpretação do redshift.

Comumente, é atribuído a Hubble a descoberta da expansão do Universo, mas Hubble diz apenas que os redshift encontrados “representam ou efeitos Doppler, recessão física da nebulosa, ou a ação de algum princípio ainda não identificado na natureza” (Hubble, 1942 apud Neves, 2000), nota-se que o próprio Hubble tinha dúvidas acerca da interpretação correta sobre os desvios das raias espectrais das galáxias distantes. No entanto, há de se destacar que algum tipo de redshift Hubble detectou, mas qual?

Segundo o autor Neves (2000, p. 201) Hubble “descobriu o redshift cosmológico associando ao desvio das raias espectrais em termos de velocidade aparente”, pois o astrônomo utilizava a “conversão de  $z$  em uma velocidade através da fórmula do desvio Doppler” (SOARES, 2009, p. 3). Mas, cabe lembrarmos as características de cada tipo de redshift.

**Desvio para o vermelho cosmológico:** presumivelmente causado, nas cosmologias relativistas, pela expansão do espaço cósmico, como estabelecido no Modelo Padrão da Cosmologia (MPC). Existem modelos relativistas em contração, e neste caso o desvio será para o azul; isto pode ocorrer, por exemplo, no modelo de Friedmann fechado. **Desvio para o vermelho Doppler:** causado pelos movimentos intrínsecos das galáxias. Ele pode ser um desvio para o azul também. Aqui, devem ser considerados os movimentos tanto do emissor da radiação quanto do detector (o observador). Os movimentos do observador também devem ser removidos para se chegar ao desvio Doppler intrínseco das galáxias. **Desvio para o vermelho gravitacional:** efeito relativista descoberto por Einstein, o qual ocorre quando a luz percorre um campo gravitacional variável, ou, na linguagem da Teoria da Relatividade Geral, um espaço-tempo curvo. Este é, em geral, o menor dos três. Ele pode ser um desvio para o azul também. A radiação sofre um desvio para o vermelho ao deixar a galáxia emissora e um desvio para o azul ao penetrar na Via Láctea e atingir o observador na Terra (SOARES, 2012, p. 17).

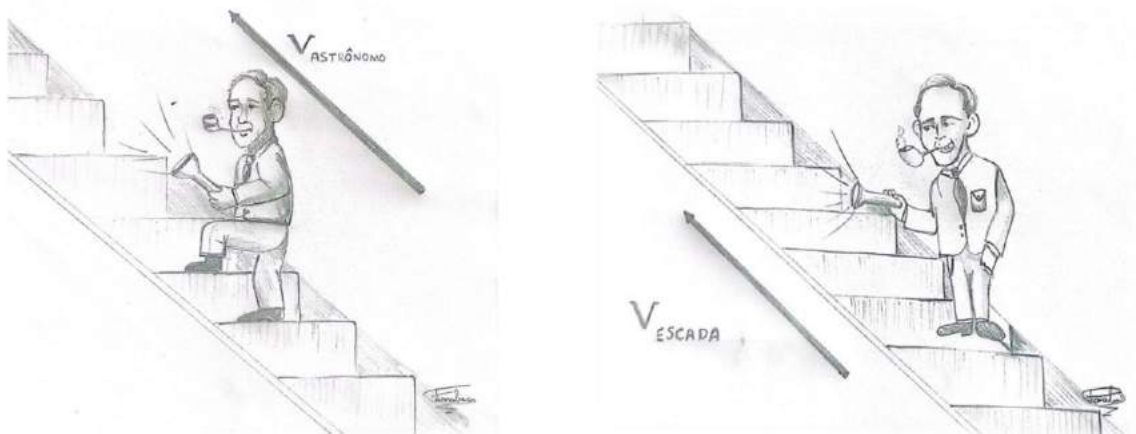


Neste sentido, muitas vezes nos deparamos com aplicações que dificultam ainda mais a diferenciação e compreensão dos tipos de redshift, pois como o desvio para o vermelho cosmológico é pequeno a sua “visualização” é contaminada pelos outros tipos de redshift, por isso a análise destes fenômenos deve ser realizada de forma criteriosa, haja vista a complexidade da separação entre os redshift quando se observa a luz vinda de galáxias distantes (HARRISON, 1999; SOARES, 2012).

O autor Horvath (2020) descreve quatro situações envolvendo o ensino da Cosmologia que ao invés de facilitar a aprendizagem dos conceitos podem gerar mais conflitos, sendo elas: (1) atribuir a expansão do Universo ao efeito Doppler, (2) dar caráter absoluto à  $c$ , (3) a extensão do Universo observável, (4) o “esticamento” dos objetos individuais com a expansão.

O enredo para introduzir a situação (1) não é apropriado, pois a expansão do Universo não tem relação com o efeito Doppler, apesar de ser possível, para baixos redshift, descrevê-la em termos da expressão do efeito Doppler. Os autores Horvath (2020) e Muller; Saraiva; Oliveira Filho (2020) ressaltam que a expansão de Hubble ocorre devido o esticamento do espaço-tempo e este, por sua vez, “carrega” os objetos estelares consigo. Uma boa aproximação é utilizar a analogia da expansão do Universo e o efeito Doppler, representado na Fig. (3.21).

Figura 3.21: A expansão de Hubble e o efeito Doppler.



Fonte: Elaborado pela própria autora (2023).

Na ilustração a esquerda, Horvath (2020) considera a visão dada por De Sitter que atribui ao efeito Doppler os desvios espectrais observados por Hubble. Dessa forma, a escada rolante que está fixa representa o espaço-tempo, mas o motor de funcionamento

da escada está com defeito fazendo com que o personagem astrônomo suba ela levando consigo uma lanterna que o ilumina. Dessa forma, o deslocamento Doppler que a luz sofre é devido a velocidade do personagem astrônomo.

Já na ilustração à direita, a escada está em pleno funcionamento e isso significa que o espaço-tempo está se expandindo, assim o personagem astrônomo não precisa marchar os degraus, pois é arrastado pela escada rolante. Perceba que não existe o fenômeno Doppler nesse caso, uma vez que a luz emitida pela lanterna está no referencial próprio. Desse modo, a expansão corresponde a velocidade da escada rolante ou espaço-tempo (HORVATH, 2020).

A situação (2) refere-se ao fato de atribuímos, sempre e a quaisquer cenário, um caráter absoluto a velocidade da luz, pois nos baseamos no postulado da Relatividade Restrita de que nada pode viajar mais rápido que a velocidade da luz. Entretanto, a Relatividade Restrita não é aplicável a Cosmologia, então não faz sentido utilizá-la como parâmetro para discutir os modelos de Universo.

Nesse sentido, podemos tomar como exemplo o modelo inflacionário em que constata-se a existência de objetos estelares, como as galáxias, que possuem velocidade de recessão superiores a velocidade da luz. Contudo, é importante destacar que a “Relatividade Restrita é aplicável à propagação *no* espaço-tempo, não à expansão *do* espaço-tempo, que é governado pela Relatividade Geral” (HORVATH, 2020, n.p).

Também leva a várias confusões o fato de não considerar conjuntamente tanto a propagação dos fótons quanto a própria expansão do Universo. Esta é a origem da crença de que não podemos ver uma galáxia que tem velocidade maior que  $c$ , já que a luz por ela emitida nunca chegaria até nós. De fato, no caminho da luz, o horizonte cresce e quando os fótons “entram” nele, chegarão até a Terra fatalmente e a galáxia será vista (HORVATH, 2020, n.p).

Desta forma, como o Universo visível cresce com o tempo, os fótons são os responsáveis por trazer as informações da galáxia cujo a luz emitida está sendo observada aqui na Terra, e mesmo que está galáxia esteja se afastando rapidamente de nós, ainda recebemos suas informações visto que os fótons já entraram no horizonte (HORVATH, 2020).

A situação (3) apresenta mais um equívoco e refere-se a extensão do Universo observável, pois é comum confundir a extensão com a idade do Universo. Sucintamente, entende-se por Universo observável como sendo uma “porção” do Cosmos que contém

tudo o que já foi observado daqui da Terra através da luz oriunda dos objetos estelares que chegam até nós.

Para calcular a idade do Universo podemos tomar o evento Big Bang como referência para a iniciar essa contagem, então estima-se que a idade do Universo é de aproximadamente 13,8 bilhões de anos-luz, mas essa informação nos dá a falsa ideia que qualquer objeto dentro do Universo visível estaria distante, no máximo, por 13,8 bilhões de anos-luz. Entretanto, estaríamos atribuindo esse valor para o raio da distância, porém por definição o diâmetro equivale duas vezes o raio, então o diâmetro desse universo observável é de 27,6 bilhões de anos-luz. No entanto, nada estaria mais distante da realidade! “a idade do Universo limita a distância que podemos ver” (MULLER, 2013, n.p).

Se calcularmos a distância até a galáxia quando o fóton chega até nós utilizando um modelo cosmológico em expansão, o resultado é aproximadamente 3 vezes maior. As estimativas que “fixam” o raio de Hubble multiplicando (idade x  $c$ ) não levam em conta que enquanto os fótons viajam vemos progressivamente uma fração maior do Universo, e estão erradas numericamente e conceitualmente (HORVATH, 2020, n.p).

Por fim, a situação (4) trata sobre como a expansão afeta os objetos individuais. A literatura disponível sobre o tema diz que os objetos individuais não sofrem alterações de tamanho ou esticamentos devido a expansão, pois a gravidade que os sustenta é capaz de estabilizar as consequências provocadas pela expansão, tornando-as imperceptíveis.

# Capítulo 4

## METODOLOGIA

Para o desenvolvimento desta pesquisa alguns métodos, técnicas e instrumentos foram empregados com o objetivo de validar os resultados desta investigação. Assim, neste capítulo será feito o detalhamento de todo processo.

### 4.1 Caracterização e natureza da pesquisa

Esta pesquisa teve início com o levantamento bibliográfico em fontes primárias e secundárias com o objetivo de conhecer os métodos, perspectivas e visões que outros pesquisadores aplicaram em investigações anteriores. Por esse motivo, a natureza das fontes desta pesquisa enquadra-se como uma pesquisa bibliográfica que segundo Severino (2016, p. 131) “é aquela que se realiza a partir do registro disponível, decorrente de pesquisas anteriores, em documentos impressos, como livros, artigos e teses etc”.

Considerando os objetivos, a pesquisa caracteriza-se como exploratória-descritiva já que tínhamos a intenção de explorar, explicar e possibilitar novos conhecimentos acerca da temática de estudo. Todavia, mesmo mesclando esses dois vieses é possível tratá-los separadamente de acordo com suas particularidades. Neste sentido, a pesquisa exploratória “busca apenas levantar informações sobre determinado objeto, delimitando assim um campo de trabalho, mapeando as condições de manifestação desse objeto” (SEVERINO, 2016, p. 132). Por outro lado, a pesquisa descritiva visa “[...] descrever as características de determinada população ou fenômeno ou o estabelecimento de relações entre as variáveis” (SEVERINO, 2016, p. 132).

A pesquisa encontra apoio na abordagem qualitativa e quantitativa ao ponto que

outros autores consideram que ambas se interligam e se complementam (PRODANOV, 2013, p. 71). Assim, a abordagem quantitativa é aquela que podemos quantificar e representar os dados coletados utilizando recursos estatísticos, fato que pode favorecer a interpretação dessas amostras. E a abordagem qualitativa dá ênfase a interpretação, pois preocupa-se com o processo em si e esse comportamento é fundamental para que a análise dos resultados seja eficiente e precisa (PRODANOV, 2013).

## 4.2 Encaminhamento teórico e metodológico

O planejamento e execução da UEPS atendeu os pressupostos estabelecidos pela Teoria da Aprendizagem Significativa de David Ausubel, e resumidamente, atendeu a sequência de oito passos orientada por Moreira (2011), fato que possibilitou uma abordagem didática mais eficiente, considerando algumas características pertinentes como a interação do novo conhecimento com aqueles previamente adquiridos.

A seleção do público-alvo desta UEPS considerou aspectos como: o retorno das aulas presenciais depois do período pandêmico de Coronavírus (2020-2022), e quais turmas poderiam ser beneficiadas com o desenvolvimento desta pesquisa, visto que a educação, assim como a sociedade, sofreu perdas inestimáveis durante essa pandemia. Sob essa ótica, optou-se por realizar a investigação junto aos alunos inseridos no terceiro ano do ensino médio, haja vista que essas turmas são finalistas e que não tiveram acesso ao ensino de Física integral e de qualidade.

Com relação a avaliação dos resultados, utilizamos a Taxonomia revisada de Bloom como instrumento catalizador para a organização das estratégias e monitoramento dos resultados em busca da aprendizagem significativa. Essa taxonomia foi adotada em vista da mobilização das habilidades e competências dos alunos, a fim de capacitá-los nos diferentes domínios de conhecimento e cognição (BELHOT e FERRAZ, 2010).

Quanto ao encaminhamento metodológico, essa UEPS valeu-se da metodologia ativa Peer Instruction de Eric Mazur (2015) para embasar os testes conceituais aplicados. A Peer Instruction é uma ferramenta que pretende auxiliar os professores a desafiar seus alunos a pensar nos diversos contextos que a Física se apresenta. Assim, seu objetivo é “explorar a interação entre os estudantes durante as aulas expositivas e focar a atenção dos estudantes nos conceitos que servem de fundamento” (MAZUR, 2015, p. 10).

### 4.3 Materiais didáticos

Em nossa primeira visita na escola fomos recepcionados pela gestora e pelo professor regente da disciplina de Física das turmas de terceiro ano, na qual apresentamos a proposta de trabalho, os materiais didáticos e os recursos pedagógicos que utilizaríamos. A partir desse encontro recebemos algumas orientações quanto ao horário cedido para a aplicação da UEPS, a turma e quantitativo de alunos, assim como orientações sobre o uso dos equipamentos e funcionamento das dependências da escola como o laboratório de informática.

Outra questão discutida refere-se a internet da escola, pois tínhamos algumas atividades desenvolvidas em uma plataforma online, porém as salas de aula não possuíam acesso à rede e o uso do laboratório de informática deveria ser previamente agendado. Assim, fora decido fazer algumas adaptações nesses materiais. Então, o Quiz das interatividades foi adaptado para o programa Power Point, no qual foi utilizado recursos do próprio programa como animações e hiperlink para deixá-lo mais dinâmico e divertido. Outra iniciativa foi confeccionar um conjunto de flashcards para a coleta das respostas dessas questões conceituais.

Figura 4.1: Flashcards confeccionados para as Interatividades baseadas na metodologia ativa Peer Instruction.



Fonte: Elaborado pela própria autora (2023).

A coleta das respostas foi feita de forma direta, pois quando as etapas da Peer Instruction eram finalizadas os alunos sinalizavam suas respostas usando seus flashcards, que por sua vez eram contabilizados, então ocorria o seguinte: se a resposta da maioria correspondesse, por exemplo, a letra C essa alternativa era marcada no quizz, e em caso de resposta certa surgia uma figurinha GIF<sup>1</sup> com a palavra “acertou”. Em contrapartida,

<sup>1</sup>GIF é uma sigla em inglês que significa Graphics Interchange Format (Fonte: Portal de Notícia g1).

tida, se a alternativa estivesse errada surgia outro GIF com a palavra “errou”, e neste caso, retornávamos para o slide contendo o enunciado do problema para nova rodada de explicações.

Quanto as formas de avaliação, utilizamos inicialmente a avaliação diagnóstica, no decorrer da aplicação da UEPS duas avaliações formativas, e ao final, uma avaliação somativa individual. Esses instrumentos nos permitiu fazer o levantamento dos conhecimentos prévios dos alunos sobre a temática trabalhada, analisar o processo de aprendizagem dos novos conteúdos e quantificar se houve ou não assimilação e conseqüentemente aprendizagem significativa. E, por visar a aprendizagem significativa buscamos diversificar a ação combinamos às aulas expositivas leituras de textos e infográficos, atividades práticas e uso dos objetos educacionais digitais.

## 4.4 Descrição das aulas de aplicação da UEPS

Com a autorização para a aplicação da UEPS, nos encaminhamos para a sala de aula do 3º ano, turma 06, e público de 30 alunos. Neste breve momento, manifestamos a satisfação e gratidão de tê-los como participantes da pesquisa, orientamos como seriam realizadas as atividades, agendamos as datas das aulas e distribuimos os textos sobre o paradoxo de Olbers e as unidades de distâncias cosmológicas. Por fim, agradecemos a receptividade da turma, da gestora e do professor.

### **Aula 1**

Nesta aula objetivou-se a aplicação da avaliação diagnóstica, a sensibilização de temas cosmológicos como o paradoxo de Olbers e as unidades de distâncias cósmicas. Desta forma, transcorrido o período da avaliação fora apresentada a estratégia Peer Instruction, sua finalidade e formato nas aulas. Outra medida foi a distribuição dos flashcards explicando que seriam utilizados durante as votações das interatividades.

Para iniciar a aula expositiva, os alunos foram questionados à respeito do paradoxo de Olbers para a averiguação da existência ou não de subsunçores sobre o assunto. Em seguida, a palavra paradoxo foi definida, apresentando também alguns exemplos de paradoxos famosos na Física. Em seguida, exibiu-se um vídeo sobre o Paradoxo de Olbers juntamente com suas alternativas de respostas, dando início a primeira interatividade da UEPS. Assim, obedecendo ao sequenciamento de passos da Peer Instruction, pri-

meiro houve a fase individual seguida da votação, no entanto o índice de acertos não foi satisfatório, então fora iniciado a fase de convencimento dos colegas.

Entretanto, mesmo finalizando a fase de convencimento, o índice de respostas certas permanecia não sendo atingido, então foram trabalhados os aspectos históricos do Universo conhecido por Olbers, haja vista que no século XIX o Cosmos era compreendido de forma diferente da qual se compreende agora. Na época de Olbers, o Universo era tido como infinito, estático, homogêneo, isotrópico, imutável, euclidiano e físico, por isso fazia todo sentido que o céu noturno fosse claro como o dia, isto é, esse número infinito de estrelas estaria distribuído uniformemente por todo o céu. E para melhor ilustrar essa concepção, foram utilizados algumas projeções de slides e também a analogia da floresta.

Em seguida, retornou-se ao enunciado para análise individual das alternativas no intuito de esclarecer as inconsistências de cada uma, mas também foi oportunizado que o aluno refletisse sobre cada caso e assim formulasse suas justificativas. A reavaliação da questão conceitual rendeu 77% de acertos nesta votação.

Figura 4.2: Participação dos alunos na Interatividade I com a temática sobre o Paradoxo de Olbers.



Fonte: Acervo pessoal da autora (2023) .

Continuando a aula, iniciou-se o tópico das unidades de distâncias utilizadas na Cosmologia. Em diálogo breve procurou-se saber quais conhecimentos sobre essas unidades os alunos detinham, neste sentido detectou-se que a unidade mais conhecida por eles era o ano-luz, a partir daí foram apresentados o parsec e a unidade astronômica. Questionou-se ainda, o motivo pelo qual é mais conveniente usar essas unidades cósmicas do que o quilômetro ou o metro, e por acreditar ser oportuno, foi iniciada uma brevemente revisão sobre as unidades de distâncias usuais, as grandezas físicas e as potências de base 10.



Trabalhou-se também algumas curiosidades sobre as viagens para o espaço que já foram realizadas, a quantidade de pessoas que estiveram fora do nosso planeta, os instrumentos de pesquisa que realizam expedições espaciais, como é o caso das sondas Voyager I e II. E para fundamentar a utilização das unidades parsec, ano-luz e unidade astronômica em detrimento ao quilômetro, exibiu-se um vídeo sobre as distâncias já percorridas pelas sondas Voyager, no qual mostra números extremamente grandes que fogem a compreensão humana. Um dos exemplos utilizados foi da distância entre a Alfa Centauro e a Terra, pois apesar de ser a estrela mais próxima do nosso planeta Terra, Alfa Centauro está a 41.560.000.000.000 Km, isto é, 41.560 trilhões de quilômetros distante de nós (DAVIS, 2011).

Em seguida, aplicou-se mais uma interatividade no formato da Peer Instruction, mas optou-se por fazê-la considerando os conhecimentos prévios dos alunos adquiridos de maneira empírica, isto é, a partir da vivência cotidiana deles. O desempenho na votação foi excelente, pois todos responderam corretamente a questão ainda na fase da individual da atividade. Assim, avançando no conteúdo fora utilizado novo vídeo para introduzir o conceito de unidade astronômica (UA) e do ano luz, e posteriormente essas unidades foram trabalhadas individualmente.

Antes da definição da unidade parsec, a turma foi questionada sobre o fenômeno da paralaxe, mas as respostas soaram defasadas, por isso realizou-se um experimento simples para facilitar tal entendimento. No primeiro momento foi desenhado uma estrela no quadro, em seguida foi solicitado que os alunos erguessem o polegar na direção do desenho e fechassem o olho esquerdo, depois realizassem o mesmo procedimento, desta vez, com o olho direito fechado. Após esse momento, buscou-se coletar o feedback da turma, questionando se eles haviam notado alguma diferença e discutindo os significados.

Prosseguindo a aula, o vídeo abordando o parsec foi exibido, sendo trabalhado também os múltiplos kiloparsec, megaparsec e gigaparsec, além de demonstrarmos que 1 parsec equivale a 3,26 ano-luz, e também 206.265 unidade astronômica. Com o encerramento da aula foi distribuído aos alunos a cópia do texto “O que é a Teoria da Relatividade?”<sup>2</sup>, e o infográfico sobre a cronologia de Albert Einstein produzido a partir do texto “Einstein: Uma breve cronologia”<sup>3</sup>.

---

<sup>2</sup>Encontrado em: [http://www.bertolo.pro.br/fisica\\_cosmologia/RELATIVIDADE.htm](http://www.bertolo.pro.br/fisica_cosmologia/RELATIVIDADE.htm). Acessado em 03 de abril de 2022.

<sup>3</sup>Encontrado em: <http://www.sbfisica.org.br/fne/Vol16/Num1/cronologia.pdf>. Acessado em 03 de abril de 2022.

## Aula 2

Está aula teve como objetivo apresentar a Teoria da Relatividade Restrita e seus postulados, assim como suas implicações nas profundas modificações do pensamento físico. Antes de iniciar a exposição do novo conteúdo fora aplicado a avaliação formativa 1 que trazia questões relacionadas ao assunto ministrado na aula 1.

Durante a aula expositiva foram projetados alguns slides sobre os aspectos históricos do surgimento da Relatividade Restrita, ponderando brevemente sobre os problemas da luz e do Eletromagnetismo que não puderam ser resolvidos do ponto de vista clássico. Assim, iniciou-se as abordagens sobre *a relatividade que estamos acostumados*<sup>4</sup> sendo tratados os conceitos de tempo, espaço, simultaneidade e velocidade (da luz). Pensando em mobilizar os subsunçores dos alunos acerca do conceito de movimento e referencial deu-se início a interatividade III da Peer Instruction. Contudo, os resultados obtidos através das votações não foram satisfatórios.

Então, para mediar os conflitos iniciou-se uma apresentação detalhada acerca das alternativas de respostas, questionando à turma se conseguiam perceber os pontos fracos dessas possíveis respostas, levando-os a refletir sobre as situações. Após essa breve exposição foi autorizado mais dois minutos para a discussão entre os pares, seguida de uma nova votação, na qual apresentou 83,33% de acertos.

Prosseguindo a aula, os conceitos de evento e observador foram redefinidos, explicando-os do ponto de vista da Relatividade Restrita. Para isso, optou-se por trabalhar um quadro comparativo entre a concepção newtoniana e a relativística sobre os conceitos de espaço, tempo e simultaneidade. Em seguida, os alunos foram questionados acerca dos postulados da Relatividade Restrita, e no intuito de melhorar o entendimento sobre o assunto, foi projetado o slide intitulado *o absoluto torna-se relativo!*<sup>5</sup>.

Para as discussões acerca da simultaneidade relativística aplicou-se a Interatividade IV, porém o índice de respostas certas e erradas ficou muito próximo, por isso foi preferível utilizar o trecho do documentário Genius do canal National Geographic<sup>6</sup>, em que o intérprete de Einstein faz uma espécie de experimento de pensamento para explicar a simultaneidade, e a partir da exibição deste vídeo a turma agregou novos significados

<sup>4</sup>Título retirado da seção do texto “O que é a Teoria da Relatividade?” distribuído no final da aula 1.

<sup>5</sup>Título retirado da seção do texto “O que é a Teoria da Relatividade?” distribuído no final da aula 1.

<sup>6</sup>A série Genius contém 10 episódios que retratam a vida de Albert Einstein. O recorte utilizado nesta aula teve duração de um minuto e trinta e seis segundos, e está disponível em [https://www.youtube.com/watch?v=H\\_w6mYPniFM](https://www.youtube.com/watch?v=H_w6mYPniFM). Acessado em 25 de abril de 2022.

para as justificativas dadas durante a reaplicação interatividade.

Em seguida, trabalhou-se mais uma mudança de paradigma, nomeada de *a relatividade do tempo*. Inicialmente foi apresentado a definição de tempo clássico que, segundo Nussenzveig (1998, p. 185) “o tempo é absoluto, verdadeiro e matemático, por sua própria natureza, sem relação a nada externo, permanece sempre semelhante e imutável”. Em contraste com esta definição utilizou-se o vídeo sobre a dilatação temporal<sup>7</sup> para inserir a concepção relativística do tempo e deduzir a equação da dilatação temporal.

Para enriquecer as discussões sobre a dilatação temporal fora exibido novo trecho do vídeo sobre o fenômeno temporal<sup>8</sup> que tratava exatamente sobre o paradoxo dos irmãos gêmeos. A ideia era mostrar para os alunos que a interpretação deste problema é feita de maneira equivocada por isso surge o paradoxo, então optou-se por trabalhar a incoerência do caso.

Referente *a relatividade das distâncias* fora explicado que a medida das distâncias feita por observadores em diferentes referenciais também precisou ser reinterpretada. Neste sentido, projetou-se alguns slides para explicar que a análise desta consequência se inicia com a adoção de um sistema de referência, no intuito de determinar quem está em repouso ou em movimento, e em relação à quê. Assim, através de um exemplo-didático foi tratado a dedução da equação da contração do espaço, destacando que “os corpos em movimento sofrem uma determinada contração na direção do movimento” (EINSTEIN, 2005, p. 37).

O término da aula pautou-se na conclusão das discussões sobre a Relatividade Restrita, e também na distribuição dos textos sobre “O Efeito Doppler: uma cantora correndo a maratona desafina?”<sup>9</sup>, e sobre “O espectro eletromagnético”<sup>10</sup>.

### **Aula 3**

Essa aula teve como objetivo apresentar o fenômeno do efeito Doppler da luz. O início da aula foi marcado pela utilização do simulador PHET sobre as ondas, fato que

---

<sup>7</sup>Encontrado em: <https://www.youtube.com/watch?v=MVeXopuYNTM>. Acessado em 24 de abril de 2022. Usar os primeiros três minutos do vídeo.

<sup>8</sup>Encontrado em: <https://www.youtube.com/watch?v=MVeXopuYNTM>. Acessado em 24 de abril de 2022. Editar o vídeo utilizando o trecho de três minutos e vinte segundos a quatro minutos e vinte e sete segundos

<sup>9</sup>Encontrado em: <https://seara.ufc.br/pt/producoes/nossas-producoes-e-colaboracoes/secoes-especiais-de-ciencia-e-tecnologia/tintim-por-tintim/fisica/>. Acessado em 24 de abril de 2022.

<sup>10</sup>Encontrado em: <https://www.parquecientec.usp.br/passeio-virtual/tudo-sao-ondas/o-espectro-eletromagnetico>. Acessado dia 24 de abril de 2022.

possibilitou mostrar a formação de ondas na água, no som e na luz. Foram revisadas algumas características das ondas, como a frequência, a amplitude e o comprimento de onda, além de diferenciar o meio de propagação de acordo com o tipo de onda apresentado no simulador.

Sobre o efeito Doppler foi explicado que trata-se de um fenômeno ondulatório, por isso ocorre em qualquer tipo de onda, inclusive nas ondas eletromagnéticas. Para verificação dos conhecimentos prévios acerca do fenômeno, projetou-se a interatividade V que retratava a situação na qual duas pessoas estavam em um ponto de ônibus quando observam uma ambulância com a sirene ligada se aproximar delas. No entanto, quando a ambulância se afasta, as pessoas percebem que o som emitido pela sirene torna-se diferente.

Desse modo, foi solicitado que os alunos refletissem sobre a situação, iniciando assim a fase individual da metodologia ativa, porém esta etapa não foi exitosa. Com isso, a turma foi autorizada a formar duplas para iniciar a fase de convencimento dos colegas, durante esse breve momento algumas dúvidas sobre o enunciado foram esclarecidas. Transcorrido o tempo estipulado foi apurado em nova votação o total de 86,67% das respostas corretas.

Considerando a importância do conteúdo fora necessário trabalhar os aspectos relevantes do efeito Doppler, uma vez que poderiam ser utilizados nas instâncias superiores relacionado ao efeito Doppler relativístico. Assim, partindo da definição, o efeito Doppler ocorre “quando a fonte de uma onda e o observador estiverem em movimento relativo, em relação ao meio material em que as ondas se propagam, a frequência das ondas observadas será diferente da frequência da fonte” (ALONSO, 2015, p. 295)).

Em seguida, fora exibido o vídeo “Efeito Doppler: aplicações no dia a dia”<sup>11</sup> para revisar o fenômeno, interpretar os casos em que o observador está em repouso e a fonte em movimento ou vice-versa, além de estudar os sinais da equação geral do fenômeno a partir dos casos de aproximação e afastamento da fonte e do observador.

Partindo para as exposições do efeito Doppler relativístico, destacou-se a necessidade de dissociá-lo do efeito Doppler tradicional, pois em primeiro lugar “ondas eletromagnéticas não consistem em matéria em movimento, e, portanto, a velocidade da fonte relativamente ao meio não entra em discussão” (ALONSO, 2015, p. 347). Em segundo lugar, “sua velocidade de propagação é  $c$  e é a mesma para todos os observadores, não

---

<sup>11</sup>Encontrado em: <https://www.youtube.com/watch?v=rGAI1bwMmyQ>. Acessado em 19 de maio de 2023. Utilizar os primeiros um minuto e dez segundos de duração.

importando seu movimento relativo” (ALONSO, 2015, p. 347).

Contudo, fora realizado uma aproximação qualitativa do fenômeno para o cenário relativístico, pois quando a luz se aproxima de determinado referencial, seu comprimento de onda aparente é menor, ocasionando um desvio para o azul (ou blueshift). Entretanto, se a luz se afasta desse referencial, seu comprimento de onda aparente é maior e ocorre um desvio para o vermelho (ou redshift). Para trabalhar a questão dos desvios nas linhas espectrais, a VI questão conceitual foi iniciada.

Com a projeção do enunciado foi dado início a fase individual da Peer Instruction seguida da sua votação, mas nesse primeiro momento o índice de acertos não foi alcançado. Assim, as duplas foram formadas, iniciando a fase de convencimento dos colegas, na qual resultou em 73,33% de acertos. No entanto, mesmo com o resultado positivo da PI, fora exibido um vídeo sobre o espectro eletromagnético que possibilitou a abordagem do espectro da luz visível e a organização em termos das frequências e dos comprimentos de onda. Em seguida, fora apresentado algumas aplicações que utilizam o princípio do efeito Doppler da luz, como, por exemplo, no trânsito e na medicina.

Para trabalhar a aplicação no trânsito utilizou-se o trecho do vídeo “Efeito Doppler: aplicações no dia a dia.”<sup>12</sup> que abordava os radares portáteis utilizados por agentes da Polícia Rodoviária Federal nas rodovias brasileiras para coibir o excesso de velocidade cometido por motoristas infratores. Explicou-se o funcionamento dos equipamentos, e em seguida foi deduzida a equação do fenômeno na luz.

A equação do efeito Doppler relativístico foi deduzida, conforme mostra a Fig. (4.3), no qual apresentamos uma situação com dois sistemas de referências inerciais, em que o observador  $O$  encontra-se no referencial  $S$  e a fonte em  $S'$  se movendo com velocidade  $v$  em relação ao referencial do observador. Continuando a análise, o evento 1 ocorre quando a fonte emite sua primeira frente de onda e algum tempo depois é detectada pelo observador em  $S$ . O evento 2 refere-se a descrição da segunda emissão de frente de onda em  $S'$  e que instantes depois é percebida pelo observador  $O$  no referencial  $S$ .

Sobre a equação encontrada, discutiu-se seu significado e desdobramentos, isto é, para o caso de  $v > 0$  o observador nota que a fonte está se aproximando e este cenário recebe o nome de desvio para o azul (blueshift), e portanto  $\nu > \nu'$ . Entretanto, quando  $v < 0$  a fonte está se afastando e esse fenômeno é o desvio para o vermelho (redshift), neste

---

<sup>12</sup>Encontrado em: <https://www.youtube.com/watch?v=rGAI1bwMmyQ>. Acessado em 24 de maio de 2022. Utilizar a partir de dois minutos e onze segundos a três minutos e doze segundos de duração.

sentido  $\nu < \nu'$  (SIQUEIRA, 2020).

Figura 4.3: Projeção de slide sobre a demonstração da equação do efeito Doppler relativístico.

The slide is titled "Equação do Efeito Doppler Relativístico". It is divided into several sections:

- Situação:** Three diagrams illustrating the Doppler effect in different scenarios: a source moving towards an observer, a source moving away, and a source moving perpendicular to the line of sight.
- Importante:** A central flowchart with the following steps:
  - Frente de Onda
  - $x = \Delta t c$
  - Fonte emissora
  - $r = \Delta t v$
  - Frequência
  - $\nu = c/\lambda$
  - Comprimento de onda
  - $\lambda = (c - v)\Delta t$
- Substituindo:**
  - $\nu = \frac{c}{(c - v)\Delta t}$  (1)
  - reescrevendo,
  - $\nu = \frac{\Delta t^{-1}}{1 - \frac{v}{c}}$  (2)
  - sendo  $\Delta t$  o tempo dilatado. E, pela Relatividade Restrita o tempo próprio é,
  - $\Delta t = \gamma \Delta t'$  (3)
  - e substituindo,
  - $\nu = \frac{(\gamma \Delta t')^{-1}}{(1 - v/c)}$  (4)
  - No referencial  $S'$ , a frequência é:
  - $\nu' = 1/\Delta t'$ , ou  $\nu' = (\Delta t')^{-1}$  (5)
  - Substituindo (5) em (4)
  - $\nu = \nu' \frac{\gamma^{-1}}{1 - v/c}$  (6)
  - Com  $v/c = \beta$  e  $(\gamma)^{-1} = \sqrt{1 - \beta^2}$ , assim (6) fica
  - $\nu = \nu' \sqrt{\frac{1 + \beta}{1 - \beta}}$

Fonte: Elaborado pela própria autora (2023).

Ao encerrar as abordagens do assunto, foram distribuídas as cópias dos textos “Espectro, a digital das estrelas”<sup>13</sup> e “Quem foi Edwin P. Hubble”<sup>14</sup>, classificadas como atividades pós-aula.

#### Aula 4

Essa aula tinha por objetivo aprofundar as discussões acerca do efeito Doppler relativístico, trabalhar aplicação deste fenômeno na Cosmologia, e estudar a lei de Hubble. No início da aula fora aplicado a avaliação formativa 2 que continha questões relacionadas aos conteúdos das aulas 2 e 3.

No início da aula expositiva foi lançada as seguintes perguntas: Como sabemos que a galáxia de Andrômeda irá colidir com a nossa Galáxia nos próximos bilhões de anos? Como o efeito Doppler pode auxiliar no entendimento dessa previsão? Qual papel é exercido pela luz nesta questão? Para respondê-las destacamos que a luz exerce papel fundamental na explicação destas questões, por isso relembramos brevemente alguns pontos do espectro da luz visível. Explicamos também que a luz proveniente de galáxias distantes é estudada através da Espectroscopia.

Assim, fora apresentado o campo de estudo da Espectroscopia, explicando que o

<sup>13</sup>Encontrado em: <https://planeta.rio/espectro-a-digital-das-estrelas/>. Acessado em 28 de maio de 2022.

<sup>14</sup>Encontrado em <http://www.vidrariadelaboratorio.com.br/quem-foi-edwin-powell-hubble/>. Acessado em 28 de maio de 2022.

avanço desta área de pesquisa contribuiu significativamente para os estudos do Universo. Para tal, projetou-se alguns slides contendo informações sobre as descobertas de Fraunhofer, Kirchoff e Bunsen. Fora mencionado também os resultados do casal Huggins que determinaram a velocidade de afastamento da estrela Sirius em relação a Terra utilizando o método Doppler-Fizeau (DE ALCANTARA, 2015).

Para contextualizar o movimento de aproximação da galáxia de Andrômeda foi preferível utilizar a animação “Efeito Doppler da luz”<sup>15</sup> que ilustra o movimento de aproximação e afastamento de uma estrela. O uso desta animação permitiu que os alunos visualizassem a ocorrência do fenômeno Doppler na luz, pois quando a estrela se afastava a luz emitida sofria um desvio para o vermelho, mas quando a estrela se aproximava a luz era desviada para o azul.

Outro trabalho mencionado acerca desse assunto refere-se as pesquisas de Vestphaler que estudou os espectros de luz oriundos de algumas estrelas e de nebulosas espirais utilizando a Espectroscopia. No tocante dos espectrogramas relacionados à galáxia de Andrômeda, todos evidenciaram o deslocamento Doppler para o azul espectral apontando à ocorrência do blueshift (DE ALCANTARA, 2015; BAGDONAS, 2015). Essa descoberta significava que “a nebulosa de Andrômeda estaria se aproximando do Sistema Solar com uma velocidade de aproximadamente 300 km/h, a maior velocidade já observada para corpos astronômicos até então” (BAGDONAS, 2015, p. 80).

Ainda utilizando a animação, retornou-se a Espectroscopia para explicar que cada elemento químico emite uma “cor” de radiação que o caracteriza, por exemplo, se a estrela observada for rica em sódio, o observador na Terra espera ver uma luz amarela vinda dessa estrela (“digital espectroscópica” do sódio). No entanto, quando a estrela se aproxima do observador ela emite uma frequência maior e por esse motivo seu espectro de emissão tende a apresentar uma coloração diferente da esperada, podendo ter tons de verde, azul ou violeta (desvio para o azul). Em contrapartida, caso o movimento seja de afastamento, a frequência será menor e o espectro de emissão tenderá para as cores laranja ou vermelho (desvio para o vermelho), equivalente ao que foi mostrado na animação.

Outro astrônomo que obteve resultados extraordinários investigando a luz emitida por galáxias distantes foi Edwin Powell Hubble. Para familiarizar a turma utilizou-se

---

<sup>15</sup>Encontrado em: [https://www.youtube.com/watch?v=8jQfN\\_YjZgg](https://www.youtube.com/watch?v=8jQfN_YjZgg). Acessado em 26 de maio de 2022.

algumas projeções de slides abordando a cronologia de Hubble, suas contribuições para o avanço da Astronomia Observacional e conseqüentemente da Cosmologia, além de imagens desse astrônomo manuseando o telescópio do Observatório de Monte Wilson. Em seguida, a lei de Hubble foi apresentada, bem como o gráfico das velocidades radiais em função da distância.

A interpretação dos resultados de Hubble mostrou que quanto mais distante da Terra estava uma galáxia maior era sua velocidade de afastamento, isto é, quanto mais distante, mais desviada para o vermelho estaria a luz emitida por ela. Mas esse resultado já era conhecido, pois estaria ocorrendo na luz o equivalente ao fenômeno que acontece nas ondas mecânicas, o efeito Doppler. Todavia, essa descoberta era mais significativa, na verdade o espaço entre as galáxias estava de alguma forma esticando, era a primeira evidencia que o Universo estava em expansão.

Para mostrar como ocorre esse “esticamento” do espaço entre as galáxias projetamos a animação “Expansão do Universo”<sup>16</sup> seguida de uma discussão para abordar seus significados. E finalizando a aula, foram resolvidos alguns exemplos envolvendo a lei de Hubble, a fim de interpretar a constante de proporcionalidade ou constante de Hubble, além de ter sido possível trabalhar em instância superior as unidades de distâncias cosmológicas estudadas na aula 1.

## **Aula 5**

Os objetivos dessa aula consistia em aprofundar as discussões sobre a lei de Hubble e a expansão do Universo, discutir as controvérsias conceituais sobre os tipos de redshift, e aplicar a avaliação somativa individual e da UEPS. No entanto, no início da aula, optou-se por trabalhar detalhadamente os procedimentos matemáticos de dois problemas envolvendo a dilatação temporal e da contração espacial, essa tomada de decisão pautou-se nas dificuldades apresentadas pelos alunos durante a avaliação formativa 2.

Essa aula foi classificada como integradora, por isso adotou-se uma postura mais prática, a fim de que os alunos pudessem exprimir o novo conhecimento adquirido. Nesse sentido, buscou-se retornar as discussões da lei de Hubble, enfatizando sua importância para o estudo do Universo, pois conforme dito na aula anterior, a constante de Hubble ( $H_0$ ) determina a taxa da expansão. Projetou-se novamente a animação sobre a expansão do Universo, além de pontuar o emprego do efeito Doppler no trânsito, na medicina e

---

<sup>16</sup>Encontrado em: <http://www.if.ufrgs.br/~fatima/ead/animacao-expansao.html>. Acessado em 29 de maio de 2022.



na Cosmologia, lembrando-os dos tipos de desvios espectrais. Em seguida, a turma foi orientada a dividir-se em duplas para a execução de uma atividade prática.

Figura 4.4: Atividade prática: analogia do balão para ilustrar a expansão do Universo.



Fonte: Acervo pessoal da autora (2023).

Para a execução da atividade, as duplas receberam balões, caneta marcador e fita métrica. Na sequência, os alunos foram orientados a inflar um pouco o balão para obter a primeira medida entre as galáxias. Outra orientação foi quanto a escolha das galáxias que serviriam de referencial para a medição das distâncias, após essa adoção de referencial, os alunos inflaram novamente o balão coletando as novas medidas, repetindo esse procedimento por mais uma vez.

Em posse dos resultados, organizou-se uma roda de conversa que foi norteada a partir dos seguintes questionamentos: O que aconteceu com a galáxia que estava mais próxima do referencial? O que aconteceu com a galáxia que estava mais afastada do referencial? Esse universo-experimento possui centro? As galáxias se expandiram quando o balão foi inflado? Podemos relacionar os resultados dessa atividade com a lei de Hubble?

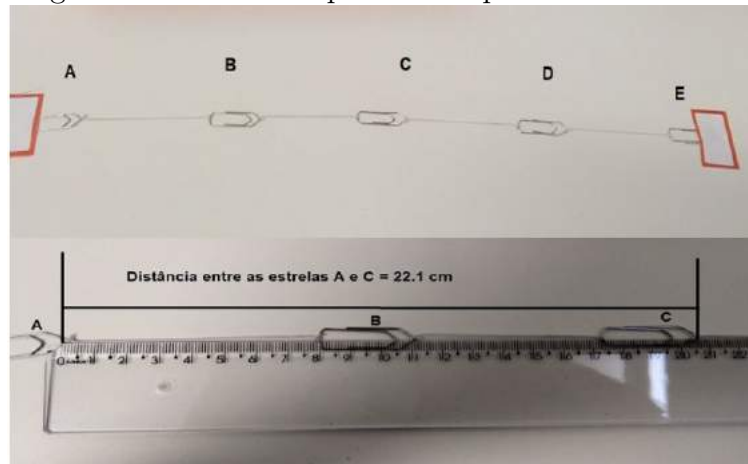
As respostas dos alunos acerca dessa atividade foram animadoras, pois reconheceram situações válidas para as discussões, como, por exemplo, que não imaginavam que a expansão do Universo ocorresse dessa forma, e perceberam também, que o tempo levado para inflar o balão poderia representar, de certa forma, o tempo que o espaço leva para esticar e afastar as galáxias umas das outras. Essas observações mostrou que os alunos estavam compreendendo a atividade e sua relação com os conteúdos estudados.

Quanto as coletas, os alunos evidenciaram através das suas notas que as galáxias próximas não tiveram um afastamento significativo, ao contrário das galáxias que estavam mais distantes. Então, para reorganizar o experimento mostrou-se a turma as

limitações do modelo balão, por exemplo, o Universo não tem centro.

Para contornar essa situação outra atividade foi utilizada, denominada expansão sem centro<sup>17</sup>, na qual foi construída uma fileira com cinco cliques amarrados com elásticos de diversos tamanhos, e nas extremidades dessa fileira de cliques fora destacado dois alunos para esticá-la quando fosse necessário. Como no balão, cada clipe representava uma galáxia, sendo duas dessas galáxias as referências para iniciar as medições. Dessa forma, as medidas foram sendo obtidas conforme os alunos esticavam as extremidades da fileira de cliques.

Figura 4.5: Atividade prática: Expansão sem centro.



Fonte: SATO (2019).

Destaca-se que esses dados foram organizados em uma tabela. Para calcular a expansão subtraía-se à distância final pela inicial, utilizando as duas referências para as medidas (o primeiro clipe à direita e o terceiro clipe), fato que resultou em duas tabelas. Em posse dos resultados, foi montado o gráfico da expansão em função da distância e traçado a reta, com um cálculo simples encontrou-se o coeficiente angular dessa reta (SATO, 2019). Dessa forma, os alunos puderam verificar a semelhança entre a execução desta atividade e o gráfico da velocidade em função da distância apresentado por Hubble. Com isso, conseguimos demonstrar e discutir que independente da galáxia que é tomada como referencial, a expansão ocorre da mesma maneira, sem que seja necessário definirmos um centro.

Voltando ao experimento do balão trabalhou-se a controvérsia acerca das galáxias, estrelas ou planetas esticarem ou não com a expansão do Universo. Para isso, os desenhos

<sup>17</sup>Encontrado em: <https://www.blogs.unicamp.br/tortaprimordial/expansao-sem-centro/>. Acessado em 18 de setembro de 2022.

feitos no balão foram substituídos por moedas organizadas uniformemente na superfície do balão. Após inflar o balão, realizou-se uma breve comparação entre o que aconteceu com os desenhos e com as moedas, mostrando que a expansão do Universo não afeta o tamanho dos objetos celestes.

Outra questão trabalhada nessa roda de conversa refere-se à atribuição da expansão do Universo ao efeito Doppler. Na verdade, ocorre que a luz vinda de outras galáxias e que viaja grandes distâncias com velocidade  $c$  é afetada, isto é, a onda luminosa sofre um esticamento é isso dá a falsa impressão que houve um aumento do comprimento de onda. Então, quando Hubble propôs que quanto mais distante estivesse uma galáxia, mais desviada para o vermelho estaria a luz emitida por ela, não era o efeito Doppler que causava esse desvio, mas sim a própria expansão que esticava o comprimento de onda da luz observada (MULLER, 2013).

Caso o fenômeno da expansão do Universo fosse causado devido o efeito Doppler da luz deveria existir um movimento relativo entre a fonte e observador, mas neste caso específico, as galáxias distantes não apresentam esse comportamento. Assim, para este cenário é mais oportuno dizer que o “redshift cosmológico” causa a expansão do Universo. Para encerrar a roda de conversa fora projetado o vídeo “Por que o céu é escuro à noite”<sup>18</sup> para tratar, sucintamente, a solução do paradoxo a partir da expansão do Universo<sup>19</sup>. Em seguida houve a aplicação da avaliação somativa individual.

Figura 4.6: Aula de encerramento da aplicação da UEPS.



Fonte: Acervo pessoal da autora (2023).

<sup>18</sup>Encontrado em: <https://www.sbfisica.org.br/v1/portalpion/index.php/materiais-didaticos/153-por-que-o-ceu-e-escuro-a-noite>. Acessado em 10 de junho de 2022.

<sup>19</sup>Os slides de aplicação deste produto educacional estão disponíveis no link <https://drive.google.com/drive/folders/15EErcs8FUggZdcj5XxfqCGksiRgXuytE?usp=sharing>.

# Capítulo 5

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo discute-se os resultados obtidos nas avaliações e nas atividades da Peer Instruction. A seleção das questões e suas respectivas análises foram pautadas de acordo com os pressupostos da Taxonomia revisada de Bloom, por isso cada avaliação gerou uma tabela bidimensional. A utilização desta taxonomia facilitou a verificação dos indícios da aprendizagem significativa a respeito dos conteúdos trabalhados na UEPS.

### 5.1 Análise dos resultados da avaliação diagnóstica

A aplicação da avaliação diagnóstica<sup>1</sup> teve como objetivo fazer o levantamento dos conhecimentos prévios dos alunos acerca dos conteúdos da UEPS.

Tabela 5.1: Enquadramento das questões trabalhadas na avaliação diagnóstica.

|                 | Lembrar   | Entender | Aplicar | Analisar  | Avaliar | Criar |
|-----------------|-----------|----------|---------|-----------|---------|-------|
| Efetivo/Factual | Questão 2 |          |         | Questão 4 |         |       |
|                 | Questão 7 |          |         | Questão 6 |         |       |
| Conceitual      | Questão 1 |          |         |           |         |       |
|                 | Questão 3 |          |         |           |         |       |
|                 | Questão 5 |          |         |           |         |       |
| Procedural      |           |          |         |           |         |       |
| Metacognitivo   |           |          |         |           |         |       |

Fonte: Adaptada de FERRAZ; BELHOT (2010).

A questão um questionava os alunos se eles concordavam ou não com a afirmação

<sup>1</sup>A avaliação diagnóstica da UEPS encontra-se no apêndice D desta dissertação.

de que a Física seria uma ciência completa e terminada, não havendo nada mais a ser descoberto. Esse é um contexto que foi trabalhado nas aulas seguintes com base na História da Ciência, em que buscou-se retratar o pensamento dos cientistas no início do século XIX, que acreditavam não haver mais nada a ser descoberto pela Física.

Resumidamente, as respostas dadas para essa questão mostraram que 56,67% dos alunos estavam convictos que a Física não é uma ciência terminada, pois acreditavam que mesmo após tantas descobertas ainda há muito a ser pesquisado e construído nos diferentes campos da Física. Outros 26,67% justificaram que a Física já conseguiu explicar praticamente tudo, então concordaram que é uma ciência concluída; e 16,67% deixaram a questão sem resposta.

A questão dois era de múltipla escolha e solicitava que o aluno relacionasse o cientista responsável pelo desenvolvimento da Teoria da Relatividade Restrita, tendo dentre as opções: Galileu, Newton, Planck e Einstein. O resultado apresentado foi bastante positivo, pois todos os alunos marcaram corretamente a resposta apontando Albert Einstein como o cientista que tem relação direta com o desenvolvimento deste pilar da Física Moderna e Contemporânea.

Quanto à questão três procurou-se verificar se o aluno conhecia os dois postulados da Relatividade Restrita. Essa abordagem foi oportuna, pois toda a temática desenvolvida na UEPS possuía relação direta com tais postulados, contudo os resultados apresentados indicaram que o conhecimento da turma era muito limitado sobre o assunto, uma vez que 33,33% dos alunos responderam a questão parcialmente correta, conseguindo explicar ao menos um dos postulados; 26,67% erraram totalmente e 40% deixaram a questão sem resposta.

A questão quatro trouxe uma breve contextualização sobre a Relatividade Restrita no sentido da revolução provocada no pensamento científico do século XX. O problema trabalhou a contração do espaço e como essa contração ocorre. Assim, 43,33% dos alunos concordaram com a afirmativa de que os corpos se contraem no sentido do movimento, porém somente 10% conseguiram justificar parcialmente a questão e os demais não teceram quaisquer justificativas a respeito. Outros 50% discordaram, mas não justificaram porque os corpos não se contraem no sentido do movimento e 6,67% dos alunos deixaram a questão em branco.

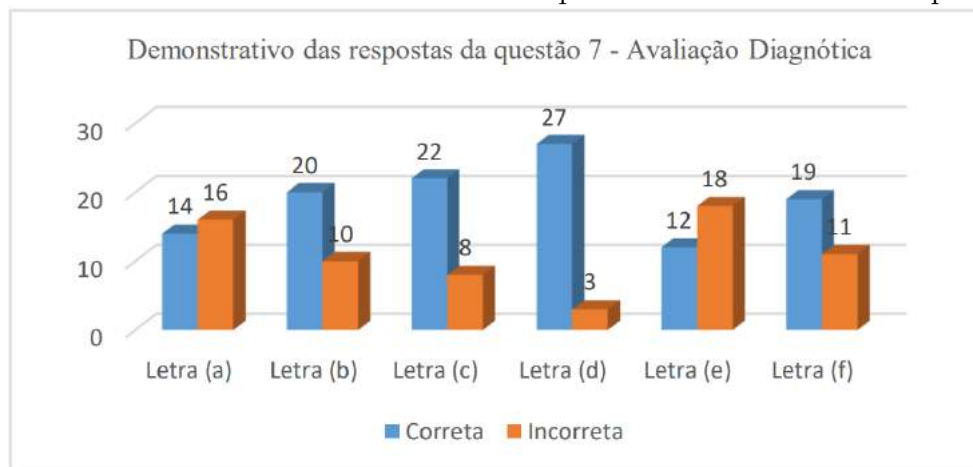
A questão cinco solicitava que o aluno dissertasse sobre os referenciais inerciais, neste

sentido obtivemos 63,33% de respostas corretas; 23,33% de incorretas e 13,33% deixaram a questão sem resposta.

A questão seis abordou a situação em que alguns passageiros estavam sentados dentro de um ônibus que se deslocava com determinada velocidade em trajetória retilínea. Os alunos deveriam refletir sobre o problema, avaliando se os passageiros estavam parados ou em movimento. Dos resultados obtidos, 53,33% fizeram colocações corretas sobre a situação, 30% erraram suas respostas e 16,67% deixaram a questão em branco.

A questão sete tratou do efeito Doppler, na qual foram apresentadas as características do fenômeno tanto nas ondas sonoras quanto nas luminosas. Para tanto, os alunos deveriam analisar se essas afirmativas estavam corretas ou incorretas, de modo que os resultados apresentados foram os seguintes: letra (a) 46,67% de acertos e 53,33% de erros; letra (b) 66,67% de acertos e 33,33% de erros; letra (c) 73,33% de acertos e 26,67% de erros; letra (d) 90% de acertos e 10% de erros; letra (e) 40% de acertos e 60% de erros; letra (f) 63,33% de acertos e 36,67% de erros.

Figura 5.1: Demonstrativo dos índices de respostas certas e erradas da questão 7.



Fonte: Elaborado pela própria autora (2023).

## 5.2 Análise dos resultados da Peer Instruction.

As questões conceituais denominadas interatividades foram trabalhadas como organizadores prévios, e também buscavam detectar a existência de conhecimento prévios acerca de cada novo assunto tratado nas aplicações da UEPS. As questões foram selecionadas e avaliadas conforme a Taxonomia revisada de Bloom, e sua execução valeu-se das orientações estabelecidas pela metodologia ativa Peer Instruction.

Essas interatividades tinham ainda, a missão de propiciar um ambiente dinâmico, interativo e colaborativo para que os alunos participassem ativamente das aulas e da construção do conhecimento. Desta forma, a Tabela (5.2) mostra de forma sucinta quais dimensões do conhecimento e do processo cognitivo o aluno é convidado a utilizar para chegar as respostas das interatividades.

Tabela 5.2: Enquadramento das questões trabalhadas na Peer Instruction.

|                 | Lembrar   | Entender  | Aplicar   | Analisar  | Avaliar | Criar |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|-------|
| Efetivo/Factual | Questão 1 |           |           | Questão 1 |         |       |
|                 | Questão 2 |           |           |           |         |       |
|                 | Questão 3 |           |           |           |         |       |
|                 | Questão 4 |           |           |           |         |       |
|                 | Questão 5 |           |           |           |         |       |
|                 | Questão 6 |           |           |           |         |       |
| Conceitual      |           | Questão 1 | Questão 3 |           |         |       |
|                 |           | Questão 3 | Questão 5 |           |         |       |
|                 |           | Questão 4 |           |           |         |       |
|                 |           | Questão 5 |           |           |         |       |
|                 |           | Questão 6 |           |           |         |       |
| Procedural      |           |           |           |           |         |       |
| Metacognitivo   |           |           |           |           |         |       |

Fonte: Adaptada de FERRAZ; BELHOT (2010).

Para essas questões conceituais esperava-se que o aluno fosse capaz de chegar às respostas ao recorrer às habilidades cognitivas previamente adquiridas, por isso foram priorizadas questões que pudessem ser classificadas nos verbos *lembrar*, *entender*, *aplicar* e *analisar*. Destaca-se que os verbos *avaliar* e *criar* não foram requeridos nas interatividades. Contudo, nesse primeiro momento, o foco das questões conceituais trabalhadas voltava-se para a coleta de informações sobre os subsunçores, no entanto, conforme as aulas desenvolviam-se, essas problemáticas retornavam para as discussões, porém em nível mais avançado de complexidade.

A questão 1 abordou o Paradoxo de Olbers, que basicamente questiona porque o céu

noturno é escuro. Essa questão teve como objetivo inicial a sensibilização dos fenômenos físicos e cosmológicos que se apresentam no nosso dia-a-dia. Contudo, estendeu-se ao contexto das unidades de distâncias cósmicas, e ao final da aplicação da UEPS voltou a discussão para ser analisada sob a ótica da expansão do Universo.

Voltando a análise da Tabela (5.2), o aluno deveria lembrar (verbo da dimensão de processo cognitivo) de informações relevantes que tivessem relação com a problemática de cada questão, a partir disso, deveria atribuir (verbo analisar) significados, reconhecendo-o nos diferentes contextos apresentados. O mesmo vale para o domínio do conhecimento, pois o aluno deveria recorrer às definições, conceitos, métodos e regras em nível básico (conhecimento efetivo/fatual) e então realizar conexões pertinentes para a resolução.

Por outro lado, as questões 3, 5 e 7 estavam relacionadas ao verbo aplicar, desta forma, ao realizar a leitura dos enunciados, o aluno deveria expressar apropriação conceitual acerca das características do fenômeno Doppler, e ao utilizar tais conhecimentos prévios fosse capaz de compreender e comparar as situações nas quais o fenômeno é aplicável.

Analisemos agora cada questão conceitual baseada na Peer Instruction, bem como os resultados destas aplicações.

*Questão 1 (adaptada)<sup>2</sup>*: Você já se perguntou como o céu noturno tão repleto de estrelas pode ser escuro? Não faria mais sentido que ele fosse brilhante como o dia? Sobre a solução do Paradoxo de Olbers, qual das alternativas é a resposta correta? (a) A poeira estelar absorve a luz das estrelas distantes. (b) O Universo tem uma quantidade finita de estrelas. (c) O Universo não existiu por todo sempre. (d) O Universo está se expandindo, por isso as estrelas estão obscurecendo.

O desenvolvimento desta questão foi muito importante para identificar em quais níveis cognitivos os alunos poderiam ser avaliados. Na fase individual recolhemos 10% de respostas corretas e na fase de convencimento da Peer Instruction somente 26,67% dos alunos foram convencidos a alterar sua resposta, porém esse resultado não nos permitiu avançar. Então, iniciamos uma rodada de explicação e durante o diálogo fora possível coletar alguns relatos que merecem destaque:

“Nunca parei para pensar sobre a escuridão do céu noturno” (Aluno do 3º 6).

“Acredito que isso ocorra por causa do movimento de rotação do nosso planeta”, (Aluno do 3º 6).

---

<sup>2</sup>Extraída e adaptada do texto Enigma da escuridão da noite, disponível em <http://www.if.ufrgs.br/tex/fis01043/20022/FranciscoK/olbers.htm>



A partir destas narrativas, a aula expositiva iniciou com a definição de paradoxo e a exemplificação de alguns paradoxos famosos na Física. Em seguida, foi exibido o trecho de um vídeo para trabalhar a descrição do Universo conhecido por Olbers no início do século XIX, pois foi a partir do conhecimento daquela época que Olbers formulou este paradoxo. Ao término da exposição foi reaplicada a questão conceitual partindo da fase de convencimento dos colegas, e este trabalho colaborativo resultou em 77% de acertos.

*Questão 2:* Algum dia, olhando para o céu estrelado você já se perguntou qual a distância entre as estrelas? (a) As estrelas estão muito perto de nós. (b) As estrelas estão muito longe de nós. (c) As estrelas estão a uma mesma distância de nós.

A aplicação desta questão visava introduzir o estudo das unidades distâncias cósmicas utilizadas pela Cosmologia, para isso optamos por fazê-la considerando os conhecimentos previamente adquiridos, de maneira empírica, a partir da vivência dos alunos. O desempenho dos alunos foi excelente, pois todos responderam corretamente a questão ainda na fase da individual da interatividade.

*Questão 3 (UEPB-adaptada)<sup>3</sup>:* Um professor de Física verificando em sala de aula que todos os seus alunos encontravam-se sentados, passou a fazer as seguintes afirmações para que eles refletissem e recordassem alguns conceitos de movimento. Das afirmações seguintes formuladas pelo professor, a única correta é: (a) Pedro (aluno da sala) está em repouso em relação aos demais colegas, mas todos nós estamos em movimento em relação à Terra. (b) Mesmo para mim (professor), que não paro de andar, seria possível achar um referencial em relação ao qual eu estivesse em repouso. (c) A velocidade dos alunos que eu consigo observar agora, sentados em seus lugares, é nula para qualquer observador humano. (d) Como não há repouso absoluto, nenhum de nós está em repouso, em relação a nenhum referencial.

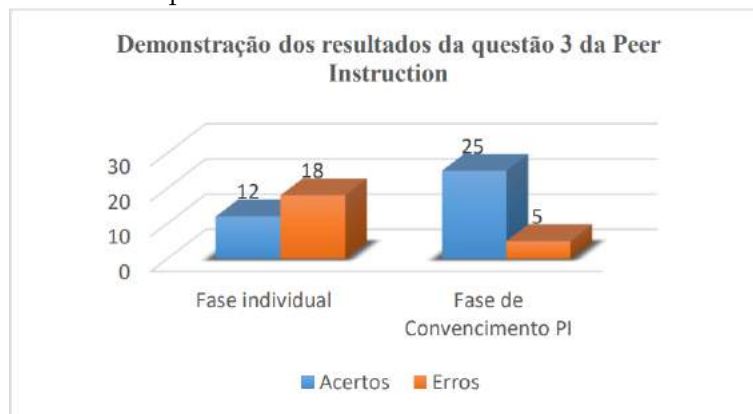
Esta questão buscou averiguar os conhecimentos prévios sobre movimento e algumas relações simples envolvendo sistema de referência, neste sentido iniciou-se as fases da Peer Instruction. Na votação da fase individual somente 40% das respostas estavam corretas, então prosseguindo para a fase de convencimento dos colegas, mas sem sucesso também. Então, buscou-se mediar os conflitos explicando detalhadamente cada alternativa e apontando possíveis inconsistências, levando-os a refletir sobre o fato. Após a exposição foi dado mais dois minutos para que os alunos pudessem discutir com seus

---

<sup>3</sup>Encontrada em <https://educacionalplenus.com.br/cinematica-exercicio-16/>

pares a reaplicação da questão, em seguida iniciou-se nova votação rendendo-nos 83,33% de acertos.

Figura 5.2: Representação do número de acertos e erros obtidos na fase individual e de convencimento referente a questão 3.



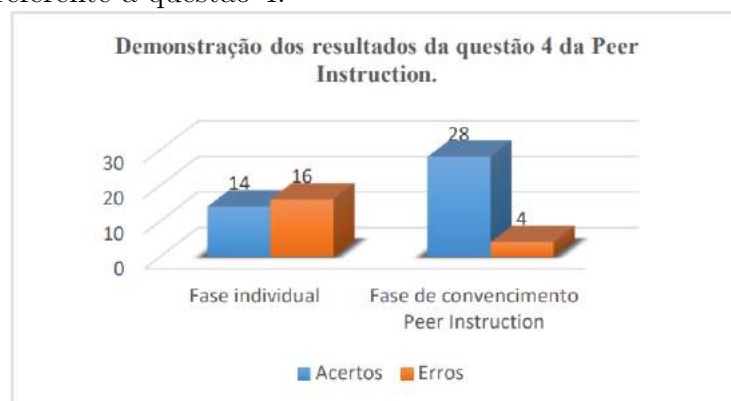
Fonte: Elaborado pela própria autora (2023).

*Questão 4:* Considere o observador A em pé na estação, enquanto vê um trem movendo-se a sua direita com velocidade  $v$ . No interior do trem, sentado exatamente no meio, está o observador B. De repente, o trem é atingido por dois relâmpagos ao mesmo tempo. Das afirmações a seguir, a única correta é: (a) Os eventos são simultâneos para ambos. (b) Os eventos são simultâneos para o observador A, mas não são simultâneos para o observador B.

A aplicação desta questão objetivou trabalhar as primeiras mudanças no pensamento clássico sobre o fenômeno da simultaneidade a partir do advento da Relatividade Restrita e seus postulados. Desta forma, iniciando os procedimentos da metodologia ativa Peer Instruction averiguou-se que 46,67% dos alunos responderam corretamente, mas como o índice não permitia prosseguir para o próximo tópico da aula, iniciou-se a fase de convencimento dos colegas, porém a turma permaneceu dividida quanto a resposta correta.

Este cenário mostrou que o contexto da problemática é compreendido, contudo há alguma divergência de entendimento, então utilizou-se o trecho do documentário Genius, no qual o interprete de Einstein faz um experimento de pensamento para explicar a situação. Na sequência foi reaplicada a questão, cedendo mais dois minutos para que houvesse a fase de convencimento dos colegas e em nova votação 93,33% responderam corretamente.

Figura 5.3: Representação do número de acertos e erros obtidos na fase individual e de convencimento referente a questão 4.



Fonte: Elaborado pela própria autora (2023).

*Questão 5 (UFRN-RN):* Duas pessoas, que estão no ponto de ônibus, observam uma ambulância que delas se aproxima com a sirene de advertência ligada. Percebem que, ao passar por elas, o som emitido da sirene se torna diferente daquele percebido durante a aproximação. Por outro lado, comentando esse fato, elas concordam que o som mudou de uma tonalidade aguda para uma mais grave à medida que ambulância se distanciava. Tal mudança é explicada pelo efeito Doppler, segundo o qual, para essa situação, a: (a) Amplitude do som diminuiu. (b) Frequência do som diminuiu. (c) Frequência do som aumentou. (d) Amplitude do som aumentou.

Está é uma questão de vestibular selecionada a partir do objetivo de coletar e ressignificar possíveis subsunçores relacionados ao efeito Doppler nas ondas sonoras. Assim, na votação da fase individual 56,67% dos alunos responderam corretamente. Dando seguimento aos passos genéricos da metodologia, a turma foi instruída à dividir-se em duplas e iniciar a fase de convencimento dos colegas, nesta votação foram alcançados 86,67% de respostas corretas. Destacamos que mesmo alcançado esse expressivo resultado um vídeo sobre o efeito Doppler foi exibido, a fim de refinar o entendimento acerca do fenômeno.

*Questão 6 (Unilago-adaptada)<sup>4</sup>:* A luz visível, com comprimento de onda entre 400nm e 700nm, constitui apenas uma pequena “janela” de todo o espectro eletromagnético. Em outros intervalos de comprimento de onda, a radiação eletromagnética recebe outros nomes. Assinale a afirmativa correta: (a) Corrente elétrica, radiação ultravioleta e raio X. (b) Radiação gama, ondas de rádio, raio x e radiação infravermelho. (c) Radiação

<sup>4</sup><https://www.projetoagathaedu.com.br/questoes-vestibular/fisica/ondulatória/ondas-eletromagneticas.php>

beta, radiação de fundo e radiação ultravioleta. (d) Radiação gama, radiação de fundo e corrente elétrica.

A abordagem desta questão estava relacionada ao estudo do espectro eletromagnético, em especial do espectro da luz visível. Na votação da fase individual, 22% dos alunos acertaram a questão, e na votação da fase de convencimento dos colegas apurou-se 73,33% das respostas corretas. Destaca-se que mesmo alcançando o excelente índice de acertos fora utilizado um vídeo para contextualizar as características do espectro eletromagnético, da faixa da luz visível e da organização das frequências.

### 5.3 Análise dos resultados das avaliações formativas

A avaliação formativa<sup>5</sup> é aquela realizada continuamente no decorrer das aulas, os autores Hadji (2001) e Caseiro (2008) afirmam que a avaliação formativa é “aquela que se situa no centro da ação de formação”, e a utilização desse tipo de avaliação é benéfica para o processo de construção da aprendizagem significativa.

Tabela 5.3: Enquadramento das questões trabalhadas na avaliação formativa 1.

|                 | Lembrar | Entender | Aplicar   | Analisar | Avaliar   | Criar |
|-----------------|---------|----------|-----------|----------|-----------|-------|
| Efetivo/Factual |         |          |           |          |           |       |
| Conceitual      |         |          | Questão 2 |          | Questão 1 |       |
| Procedural      |         |          | Questão 3 |          |           |       |
|                 |         |          | Questão 4 |          |           |       |
| Metacognitivo   |         |          |           |          |           |       |

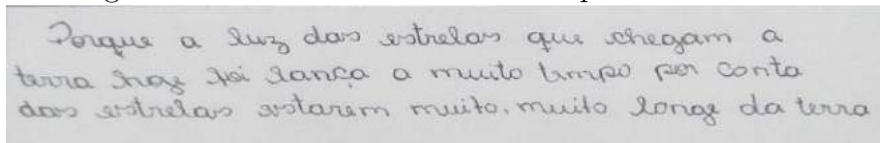
Fonte: Adaptada de FERRAZ; BELHOT (2010).

A questão 1 foi classificada na dimensão do processo cognitivo avaliar e no domínio conceitual do conhecimento, para resolvê-la o aluno deveria ser capaz de tecer argumentos a respeito da afirmativa proposta como problema, entretanto esse parecer necessitava ser fundamentado no que foi estudado sobre as longínquas distâncias cósmicas. O enunciado desta questão solicitava que o aluno justificasse a seguinte afirmação *Olhar à noite para um céu estrelado é como olhar para o passado*. As respostas da turma foi semelhante aos relatos abaixo, por isso concluiu-se que os alunos compreenderam o novo conhecimento

<sup>5</sup>As avaliações formativas 1 e 2 da UEPS encontram-se nos apêndices E e F, respectivamente, desta dissertação.

de forma correta.

Figura 5.4: Relato de aluno sobre a questão 1 da AF1.



Fonte: Acervo pessoal da autora (2023).

A questão 2 ilustrou a categoria aplicar com domínio conceitual, pois para solucioná-la o aluno deveria lembrar da definição de ano-luz, utilizando-o para solucionar o problema. O índice de acertos da questão representou 83,33% das respostas.

As soluções das questões 3 e 4 estavam relacionadas ao verbo aplicar associadas à algum conhecimento procedimental. Para resolver os problemas, o aluno deveria lembrar das unidades de distâncias cósmicas e da velocidade da luz, e então organizar esses conhecimentos para aplicá-los na resolução dos problemas propostos. Sob essa perspectiva, os resultados foram convincentes, pois 56,67% dos alunos calcularam corretamente a questão 3 e 66,67% a questão 4.

Tabela 5.4: Enquadramento das questões trabalhadas na avaliação formativa 2.

|                 | Lembrar                             | Entender | Aplicar   | Analisar | Avaliar | Criar |
|-----------------|-------------------------------------|----------|-----------|----------|---------|-------|
| Efetivo/Factual | Questão 3                           |          |           |          |         |       |
| Conceitual      | Questão 1<br>Questão 2<br>Questão 3 |          |           |          |         |       |
| Procedural      | Questão 4                           |          | Questão 4 |          |         |       |
|                 | Questão 5                           |          | Questão 5 |          |         |       |
| Metacognitivo   |                                     |          |           |          |         |       |

Fonte: Adaptada de FERRAZ; BELHOT (2010).

As questões 1, 2 e 3 eram objetivas de múltipla escolha e faziam referência a Relatividade Restrita e seus postulados. Sob a perspectiva da Taxonomia revisada de Bloom, foram classificadas na dimensão do processo cognitivo lembrar e entender com conhecimento efetivo/factual e conceitual, pois os alunos deveriam lembrar de fatos específicos sobre os postulados da Relatividade Restrita e também sobre o efeito Doppler da luz, além de compreendê-las conceitualmente.

O rendimento dos alunos nessas questões foi satisfatório visto que foram assuntos bastante discutidos nas aulas expositivas e com participação considerável da turma. Assim, os percentuais de acertos foi de 76,67%, 66,67%, e 86,67% para as questões 1, 2 e 3, respectivamente. Sobre ao resultado da questão 2, buscou-se investigar junto a turma quais dúvidas permaneciam acerca do assunto. Dentre os relatos, alguns alunos disseram que interpretaram erroneamente o enunciado e também que algumas transformações de unidades haviam sido esquecidas, por isso optou-se por explicar detalhadamente cada alternativa, a fim de contornar esses conflitos.

As questões 4 e 5 foram enquadradas na dimensão de processo cognitivo entender e aplicar com domínio de conhecimento procedural, pois suas soluções requeriam a utilização e manipulação das equações da dilatação temporal e da contração espacial. Os resultados foram animadores, entretanto os índices de erros sinalizou que algo no processo de ensino poderia ser melhorado. A questão 4 teve 60% de respostas certas, e na questão 5 somente 53,33% dos alunos realizaram corretamente os cálculos.

Figura 5.5: Copilação da aula sobre a resolução das questões da AF2 sobre dilatação temporal e contração espacial.



Fonte: Acervo pessoal da autora (2023).

Na aula subsequente a aplicação da avaliação formativa 2 fora reservado alguns minutos para a resolução das questões 4 e 5 desta avaliação, pois apesar do índice de acertos ter sido maior que dos erros, a margem entre os resultados não era satisfatório, pois não

demonstrava com clareza se havia ocorrido a aprendizagem desses conteúdos. Assim, inicialmente as equações da dilatação temporal e da contração espacial foram destacadas, em seguida foi realizada a leitura dos enunciados para coletar os dados contidos neles e então realizou-se os procedimentos matemáticos acerca dos fenômenos relativísticos de cada questão com a participação da turma, conforme mostra a Fig. (5.5).

## 5.4 Análise dos resultados da avaliação somativa.

Para encerrar a aplicação da UEPS foi realizada a avaliação somativa individual<sup>6</sup> com os seguintes objetivos: constatar quais habilidades e competências foram desenvolvidas pelo aluno, consolidar os conhecimentos recém-adquiridos e conectá-los àqueles preexistentes e analisar os resultados dessa avaliação.

A Tabela (5.5) ilustra quais domínios cognitivos e do conhecimento foram contemplados na classificação das questões desta avaliação.

Tabela 5.5: Enquadramento das questões trabalhadas na avaliação somativa.

|                 | Lembrar | Entender  | Aplicar   | Analisar | Avaliar   | Criar |
|-----------------|---------|-----------|-----------|----------|-----------|-------|
| Efetivo/Factual |         |           |           |          |           |       |
| Conceitual      |         | Questão 1 |           |          | Questão 1 |       |
|                 |         | Questão 2 |           |          | Questão 2 |       |
|                 |         | Questão 3 |           |          | Questão 3 |       |
|                 |         | Questão 4 |           |          | Questão 6 |       |
|                 |         | Questão 5 |           |          |           |       |
|                 |         | Questão 6 |           |          |           |       |
| Procedural      |         | Questão 5 | Questão 4 |          | Questão 5 |       |
|                 |         |           | Questão 5 |          |           |       |
| Metacognitivo   |         |           |           |          |           |       |

Fonte: Adaptada de FERRAZ; BELHOT (2010).

Nessa avaliação todas as questões foram classificadas na dimensão do processo cognitivo entender, pois o aluno deveria ser capaz de fazer uso dos conhecimentos adquiridos nas aulas de aplicação da UEPS, dos quais foram chamados de conhecimentos básicos. Todavia, algumas destas questões também ilustraram as categorias aplicar e avaliar.

<sup>6</sup>A avaliação somativa individual da UEPS encontra-se no apêndice G desta dissertação.

Quanto a dimensão do conhecimento, as questões são predominantemente conceituais e procedimentais.



Figura 5.6: Representação dos resultados obtidos na avaliação somativa individual.

O desempenho dos alunos nesta avaliação somativa individual foi satisfatório, uma vez que as questões 1, 2, 3 e 6 atingiram os percentuais de acertos de 60%, 80%, 63,33% e 86,67% respectivamente, tais questões são majoritariamente objetivas.

Por outro lado, as questões 4 e 5 foram caracterizadas por um viés mais subjetivo envolvendo o estudo de gráficos e manipulação algébrica, isto posto, os resultados foram os seguintes: 76,67% de acertos na questão 4 e 93,33% de respostas corretas na questão 5.

Os resultados dessa avaliação mostram que os alunos, em sua grande maioria, conseguiu caminhar rumo ao alcance dos níveis superiores de aprendizado, conforme dispõe a Taxonomia revisada de Bloom e também dentro do que foi estabelecido para essa UEPS.

## 5.5 Análise geral da UEPS e da aprendizagem significativa

O desenvolvimento das ações da UEPS visaram construir a aprendizagem significativa, por isso foram adotadas estratégias pedagógicas favoráveis à atuação ativa e colaborativa dos alunos. As aulas expositivas foram mescladas com atividades práticas, resolução de exemplos-didáticos, leitura de textos, empregos dos objetos digitais (animações, simula-



dor PHET e vídeos editados) e da metodologia ativa Peer Instruction.

Outra vertente trabalhada em função da aprendizagem significativa foi a seleção das questões de acordo com as orientações estabelecidas pela Taxonomia revisada de Bloom.

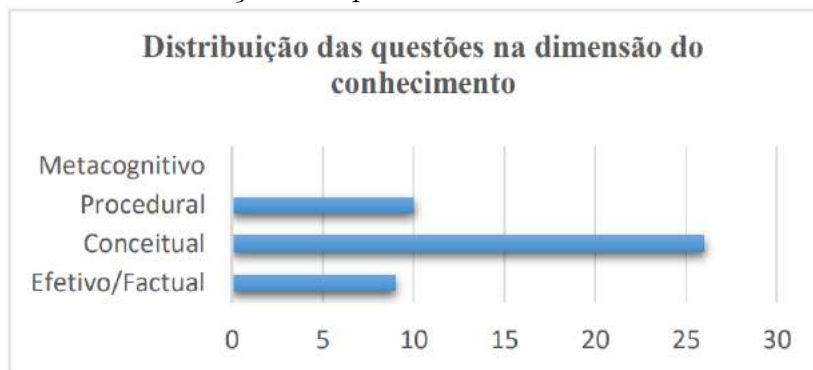
Tabela 5.6: Enquadramento geral das questões trabalhadas na UEPS.

|                 | Lembrar | Entender | Aplicar | Analisar | Avaliar | Criar |
|-----------------|---------|----------|---------|----------|---------|-------|
| Efetivo/Factual | 10      |          |         | 3        |         |       |
| Conceitual      |         | 18       | 4       |          | 5       |       |
| Procedural      |         | 3        | 6       |          | 1       |       |
| Metacognitivo   |         |          |         |          |         |       |

Fonte: Adaptada de FERRAZ; BELHOT (2010).

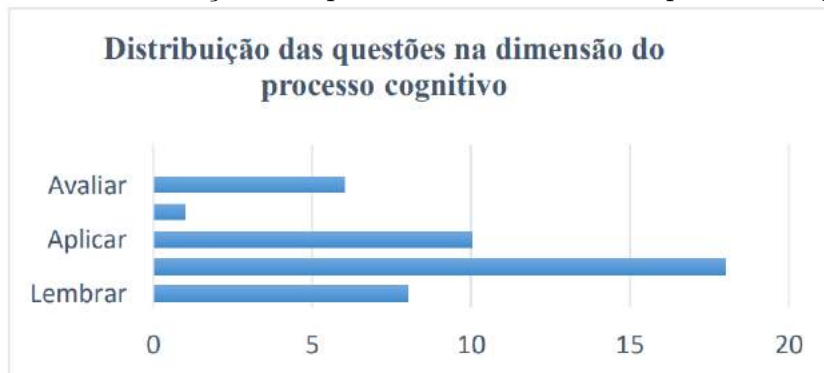
As Fig. (5.8) e (5.7) mostram a disposição das questões quanto sua distribuição na dimensão do processo cognitivo e do conhecimento.

Figura 5.7: Distribuição das questões na dimensão do conhecimento.



Fonte: Adaptada de FERRAZ; BELHOT (2010).

Figura 5.8: Distribuição das questões na dimensão do processo cognitivo.



Fonte: Adaptada de FERRAZ; BELHOT (2010).

Nota-se, na Tabela bidimensional (5.6) e nas Fig. (5.8) e (5.7), que o quantitativo de questões referente ao *conhecimento conceitual* é maior, e a *dimensão do processo cognitivo entender* foi a mais privilegiada. Essa conduta foi adotada no intuito de auxiliar o aluno a dar novos significados aos seus conhecimentos prévios, para então usá-los em contextos superiores e sofisticados, como é o caso da Relatividade Restrita e da Cosmologia.

Apesar da diversificação das questões para atender os diferentes níveis de cognição e conhecimento, não foi exigido situações que envolvessem a dimensão do conhecimento metacognitivo e do processo cognitivo criar, pois envolvem os níveis das instâncias superiores de aprendizado e compreensão, e requerem maior tempo para serem trabalhadas. Se contemplássemos essas classes por exemplo, o aluno deveria dominar os conhecimentos estratégicos e interdisciplinares, para então, a partir deles fosse capaz de elaborar ideias originais. No entanto, a UEPS não tinha tempo hábil para essa implementação naquele momento da aplicação.

As interatividades da Peer Instruction mostrou-se uma importante ferramenta da aprendizagem, pois o engajamento dos alunos na fase de convencimento dos colegas foi crucial para modificar os percentuais de respostas obtidos na fase individual. Todavia, notou-se que as leituras pós-aula, em certos casos, não foram realizadas com o rigor necessário para a interpretação correta do assunto e isso refletiu negativamente nos resultados das interatividades. Essas leituras serviram de guias introdutórios para os conteúdos, na qual esse tipo de iniciação favoreceu a aplicação da UEPS.

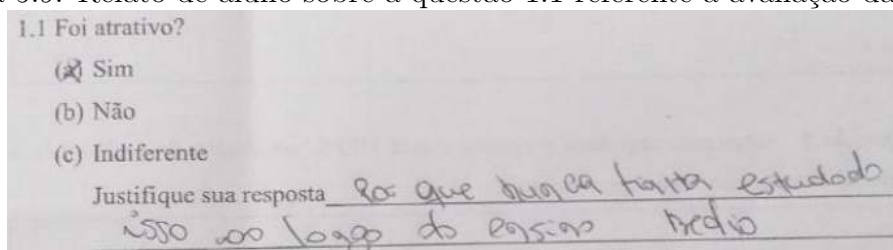
Referente as avaliações, os índices mostraram-se animadores e permitiram avaliar que os alunos avançaram níveis significativos de cognição e conhecimento. Os resultados da avaliação diagnóstica mostraram que os alunos possuíam subsunçores acerca da temática de estudo, porém eram ideias sem justificativas plausíveis. Todavia, a partir das aulas da UEPS esse cenário passou a ser modificado, possibilitando que a turma refinasse os conhecimentos preexistentes, melhorando gradativamente seus argumentos e tornando-os coerentes com o pensamento científico. Dito isto, atribui-se os excelentes resultados das avaliações à mudança de atitude dos alunos frente a construção do próprio saber.

## 5.6 Posicionamento dos alunos à respeito da UEPS

As discussões deste item pauta-se no feedback dos alunos a respeito dos conteúdos, das estratégias e da metodologia utilizada na UEPS<sup>7</sup>. Desta forma, a questão 1 buscou sondar como a metodologia ativa Peer Instruction e demais estratégias adotadas na UEPS impactaram na aquisição do conhecimento e da aprendizagem.

Os alunos mostraram-se favoráveis as estratégias empregadas, pois tornaram as aulas menos cansativas permitindo a aprendizagem dos novos conteúdos de maneira dinâmica e interativa, conforme constata-se nos relatos das Fig. (5.9), (5.10) e (5.11)

Figura 5.9: Relato de aluno sobre a questão 1.1 referente a avaliação da UEPS.



1.1 Foi atrativo?

(a) Sim

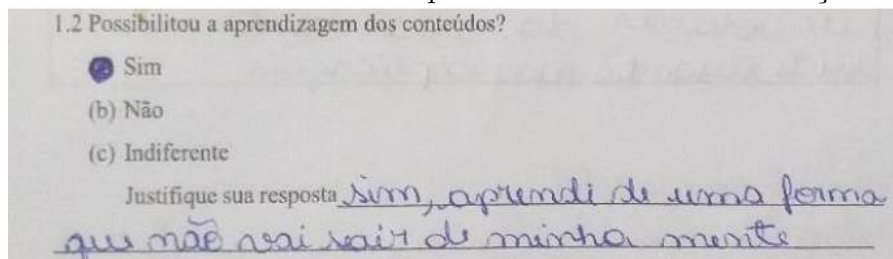
(b) Não

(c) Indiferente

Justifique sua resposta Por que nunca tinha estudado isso ao longo do ensino médio

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 5.10: Relato de aluno sobre a questão 1.2 referente a avaliação da UEPS.



1.2 Possibilitou a aprendizagem dos conteúdos?

(a) Sim

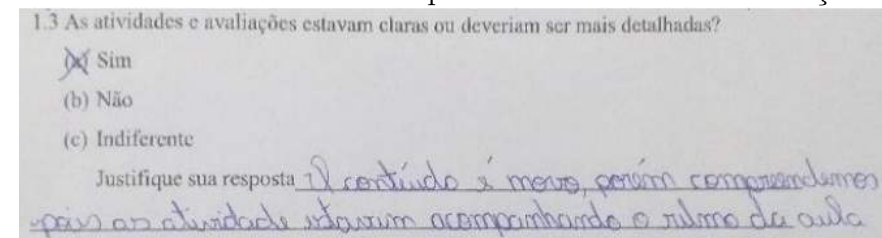
(b) Não

(c) Indiferente

Justifique sua resposta sim, aprendi de uma forma que não sei sair de minha mente

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 5.11: Relato de aluno sobre a questão 1.3 referente a avaliação da UEPS.



1.3 As atividades e avaliações estavam claras ou deveriam ser mais detalhadas?

(a) Sim

(b) Não

(c) Indiferente

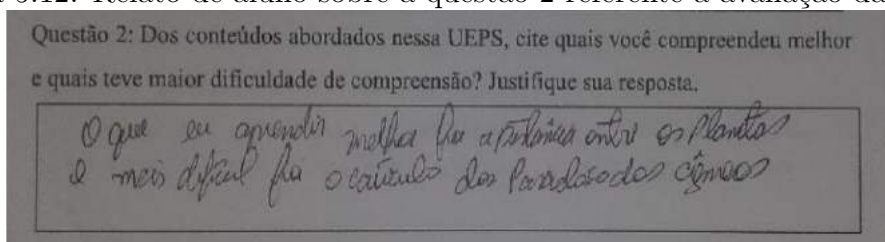
Justifique sua resposta O conteúdo é novo, porém compreendemos pois as atividades estavam acompanhando o ritmo da aula

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

<sup>7</sup>A avaliação da UEPS encontra-se no apêndice H desta dissertação

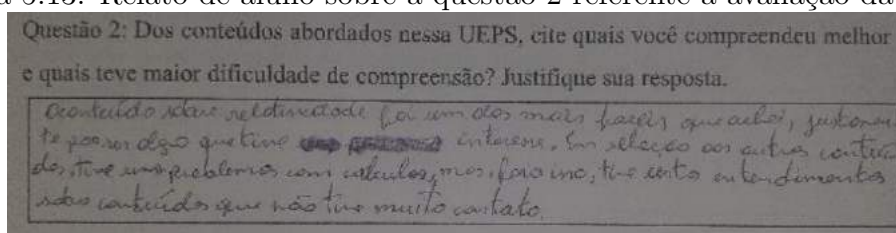
Na questão 2 realizou-se um levantamento de quais assuntos os alunos compreenderam melhor e quais sentiram mais dificuldades. Dentre os relatos de maior dificuldade estão os cálculos envolvendo a contração do espaço, a dilatação do tempo e os problemas envolvendo a unidade parsec e a lei de Hubble. O conteúdo que compreenderam melhor foi o efeito Doppler da luz, justamente porque eles já tinham maior familiaridade com o efeito Doppler sonoro.

Figura 5.12: Relato de aluno sobre a questão 2 referente a avaliação da UEPS.



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 5.13: Relato de aluno sobre a questão 2 referente a avaliação da UEPS.



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

A questão 3 tratou dos objetos educacionais digitais, com o intuito de verificar se o uso de animações, vídeos, simulador e textos para leituras nas aulas de Física favorecem ou atrapalham a aprendizagem dos conteúdos. Nesta perspectiva, os alunos mostraram-se favoráveis ao uso dessas ferramentas, pois a visualização do fenômeno através desses recursos auxilia a compreensão.

Na questão 4 fora solicitado que os alunos dissertassem sobre a Peer Instruction, destacando as vantagens de utilizá-la nas aulas de Física. Desse modo, os relatos foram semelhantes aos destacados:

“Em todo o ensino médio, não sei se por causa da pandemia, mas nunca ouvir falar nessa metodologia ativa e eu gostei muito porque as vezes a gente pensa que não sabe o assunto, mas temos sim algumas ideias e essa metodologia fez a gente pensar diferente” (Aluno A, 3º 06).

“Eu gostei dessa metodologia e do uso das plaquinhas porque ficou mais divertida a aula e as leituras do textos fizeram eu querer pesquisar mais para estar preparada na hora da aula, foi muito legal” (Aluno B, 3º 06).

“Senti um pouco de dificuldade nas primeiras interatividades, mas depois eu entendi como era os passos e aprendi de uma forma diferente, gostei muito” (Aluno C, 3º 06).

Com base nas respostas desta questão, percebeu-se que os alunos ficaram bastante entusiasmados em participar das fases dessa metodologia e isso favoreceu a aprendizagem significativa dos conteúdos. Outro ponto mencionado pelos alunos refere-se ao uso dos flashcards, pois o momento das votações era o ponto forte das interatividades tornando as aulas mais divertidas, dinâmicas e colaborativas.

Por fim, a questão 5 solicitava que os alunos fizessem sugestões de melhorias e críticas a respeito da UEPS no intuito de adequá-la às demandas da aprendizagem. Neste sentido, as críticas voltaram-se mais para a limitação do tempo de aplicação porque foram poucas aulas e também para o uso do simulador que deveria ter sido mais utilizado. Das sugestões de melhoria, solicitaram que fosse ministrado um minicurso desta UEPS para que tivessem mais tempo para os desdobramentos da ação.

## Capítulo 6

# CONSIDERAÇÕES FINAIS

Quando nos propusemos a trabalhar a temática do efeito Doppler relativístico no ensino médio levamos em conta a ampliação do entendimento deste fenômeno a partir das concepções da Teoria da Relatividade Restrita, além da possibilidade de inserir ao contexto de estudo discussões oportunas do campo da Cosmologia, como, por exemplo, o estudo relacionado a velocidade de afastamento dos objetos estelares tal qual a interpretação desses resultados.

Para tanto, ao realizamos o levantamento da literatura encontramos-o em vários livros destinados ao ensino superior onde seu tratamento é mais detalhado a despeito das coleções direcionados à educação básica que tratam do fenômeno em pequenas seções, e no sentido de contextualização do efeito Doppler da luz sem muito aprofundamento. Constatamos ainda, que são poucas as produções acadêmicas desenvolvidas com o foco no ensino do efeito Doppler relativístico para o público do ensino médio, talvez esse comportamento se justifique pelas dificuldades inerentes da visualização do fenômeno na prática, ou ainda pela abstração matemática oriunda de sua base algébrica.

Diante disso, esta dissertação teve a pretensão de construir uma UEPS sobre o ensino do efeito Doppler relativístico com elementos contextuais da Cosmologia e da História da Ciência, em vista de solucionar o problema da pesquisa que procurava saber quais estratégias pedagógicas poderiam auxiliar o ensino do efeito Doppler relativístico a alunos do ensino médio, de modo que o produto final dessa abordagem fosse a aprendizagem significativa do conteúdo.

Nesta senda, incorporamos a UEPS os princípios da metodologia ativa Peer Instruction visando atender os dois primeiros objetivos específicos da pesquisa o qual estabele-

ciam que os alunos deveriam compreender o efeito Doppler relativístico e suas aplicações, além de mobilizar suas habilidades e competências em conhecimentos prévios utilizados para compreender o fenômeno. Com isso, verificou-se que o uso da Peer Instruction contribuiu positivamente para o desenvolvimento da aprendizagem significativa, pois através das atividades colaborativas foi possível integrar o aluno efetivamente ao processo de construção do conhecimento permitindo-os relembrar, aperfeiçoar e aprofundar seus subsunçores, rendeu-nos resultados satisfatórios.

A utilização de elementos contextuais da Cosmologia e da História da Ciência ligadas ao ensino da temática e apontadas no terceiro e quarto objetivo específico pautou-se na inegável atração que temas cosmológicos e astrofísicos despertam nos alunos, mas que também geram bastante confusão devido a frágil compreensão dos conceitos abstratos envolvidos nesses estudos.

Por isso, trouxemos para a discussão a História da Ciência a fim de trabalharmos os momentos históricos e algumas interpretações controversas entre o redshift devido o efeito Doppler relativístico e o redshift devido a expansão do Universo. Os resultados verificados mostram quão conveniente foi trabalhar a temática considerando suas inter-relações com a História da Ciência, e com as aplicações práticas do princípio do efeito Doppler da luz no trânsito, na medicina e na Cosmologia.

Observando o público alvo da UEPS e o último objetivo específico, adicionamos alguns objetos educacionais digitais com a finalidade de dar suporte aos alunos concernente a compreensão do efeito Doppler relativístico, visto que a observação desse fenômeno transcende e muito as percepções da realidade cotidiana. Desse modo, no decorrer da aplicação identificamos a boa recepção dos alunos quanto ao uso dos recursos digitais nas aulas, pois facilitaram a formação de ideias e conceitos, bem como a melhoria dos índices de respostas corretas tanto nas atividades de convencimento dos colegas quanto nas avaliações, e partindo para uma visão global desta utilização podemos classificá-la como exitosa.

Em posse dos resultados encorajadores da UEPS concluímos que a associação de diferentes estratégias pedagógicas para o ensino do efeito Doppler relativístico aos alunos do ensino médio contribuiu qualitativamente para a autonomia dos alunos com relação aos estudos e engajamento durante as aulas, assim como a compreensão do conteúdo e das atividades propostas aprimorando as discussões pautadas no conhecimento científico

adquirido. Os resultados evidenciaram ainda indícios animadores da aprendizagem significativa dos conteúdos, fato que nos permite concluir que os alunos refinaram seus subsunçores sobre o efeito Doppler atribuindo-lhe novo significado e estendendo-o a contextos superiores no tocante da Relatividade Restrita e da Cosmologia.

Portanto, esperamos que os resultados desta dissertação possam contribuir para a reflexão de abordagens adequadas no ensino da Física, em especial da Relatividade Restrita e do efeito Doppler relativístico. Nessa perspectiva, trouxemos para a discussão algumas estratégias consideradas oportunas para o favorecimento da aprendizagem significativa dos conteúdos. Pensando nisso, uma sugestão para trabalhos futuros é o desenvolvimento de oficinas, minicursos e materiais de apoio para o ensino do efeito Doppler relativístico voltados para o aperfeiçoamento dos professores de Física do ensino médio quanto a abordagem desta temática.



# Referências Bibliográficas

- [1] ADERALDO, Vinicius S.; GONÇALVES, Victor P. **Uma introdução à evolução do Universo segundo sua geometria e composição**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 42, p. e20200050, 2020. Disponível em <https://www.scielo.br/j/rbef/a/x3z78vTSLtgPQqb9mMvtcGd/?lang=pt&format=pdf>. Acessado em 14 de setembro de 2023.
- [2] ALONSO, Marcelo. **Física: um curso universitário**, v. 2 Campos e ondas / Marcelo Alonso, Edward J. Finn; Giorgio Moscati (coord.); tradução Ivan C. Nascimento, Curt E. Hennies. – 2. ed. brasileira – São Paulo: Blucher, 2015.
- [3] ALONSO, Marcelo. **Física: um curso universitário**, v.1 mecânica [livro eletrônico]/Marcelo Alonso, Edward J. Finn; Giorgio Moscati (coord.): tradução de Mário A. Guimarães...[et al]. – 2. ed. brasileira – São Paulo: Blucher, 2018.
- [4] AMAZONAS. **Referencial Curricular Amazonense**, 2019. Disponível em <https://www.sabermais.am.gov.br/pagina/jornada-pedagogica-2020-referencial-curricular>. Acessado em 09 de março de 2022.
- [5] AMAZONAS. Secretaria de Estado de Educação. **Proposta Curricular e Pedagógica Ensino Médio (PCP-EM)**. 2021. Disponível em <https://www.sabermais.am.gov.br/pagina/novo-ensino-medio-amazonas>. Acessado em 09 de março de 2022.
- [6] ANDERSON, L. W.; KRATHWOHL, K. R. A. **Taxonomy for learning, teaching and assessing: a revision of Blooms taxonomy or educational objectives**. New York: Longman, 2001.

- [7] ASARI, Natália Vale. **Notas de Física Geral IV**. 2018. Notas de aula, 105 f. Disponível em <http://minerva.ufsc.br/~natalia/teaching/FSC5194-2018-1/FSC5194-20181.pdf>. Acessado em 29 de abril de 2022.
- [8] AUSUBEL, D. P.; NOVAK, J. D; HANESIAN, H. **Educational psychology: a cognitive view**. 2nd. ed. New York, Holt Rinehart and Winston, 1978.
- [9] AUSUBEL, D. P.; NOVAK, J. D; HANESIAN, H. **Psicologia educacional**. 2 ed. Rio de Janeiro: Interamericana, 1980.
- [10] AUSUBEL, D. P. **A aprendizagem significativa: a teoria de David Ausubel**. São Paulo: Moraes, 1982.
- [11] BACHELARD, Gaston. **A formação do espírito científico: contribuição para uma psicanálise do conhecimento**. Rio de Janeiro: Contraponto, 1996.
- [12] BARCELOS NETO, João. **Teoria eletromagnética: parte clássica** / João Barcelos Neto. - São Paulo: Editora Livraria da Física, 2015.
- [13] BAGDONAS, Alexandre. **Controvérsias envolvendo a natureza da Ciência em sequências didáticas sobre a cosmologia**. Tese (Doutorado em Ensino de Física) - Universidade de São Paulo. São Paulo, 2015. Disponível em [https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/81/81131/tde-14092015-112555/publico/Alexandre\\_Henrique\\_Bagdonas.pdf](https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/81/81131/tde-14092015-112555/publico/Alexandre_Henrique_Bagdonas.pdf). Acessado em 21 de julho de 2022.
- [14] BATALHA, Alexendre; CAMPOS, Lissa. **Estrelas Cefeidas e RR Lyrae**. Notas de aula. 2015, 8 f. Universidade de São Paulo. Disponível em [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/394076/mod\\_resource/content/1/Cefeidas.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/394076/mod_resource/content/1/Cefeidas.pdf). Acessado em 06 de julho de 2023.
- [15] BELHOT, R. V; FERRAZ, A. P. C. M. **Taxonomia de Bloom: revisão teórica e apresentação das adequações do instrumento para definição de objetivos instrucionais**. Gestão e Produção. São Paulo, v. 17, n 2, p. 421-431, 2010. Disponível em <https://www.scielo.br/j/gp/a/bRkFgcJqbGCDp3HjQqFdqBm/?format=pdf&lang=pt..> Acessado em 16 de março de 2022.

- [16] BONI, Keila Tatiana. **História da Física** / Keila Tatiana Boni. - Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2018.
- [17] BLOOM, B.S.; MADAUS, G. F. e HASTINGS, J. T. **Manual de Avaliação Formativa e Somativa da Aprendizagem do Aluno**. Nova York: McGraw-Hill, 1971.
- [18] BRASIL. Lei nº. 9.394, de 20 de dezembro de 1996. **Estabelece as Diretrizes e Bases da educação nacional**. Legislação, Brasília, DF, dez. 1996. Disponível em [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/L9394.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9394.htm). Acessado em 05 de fevereiro de 2022.
- [19] BRASIL. Secretaria de Educação Média e Tecnológica, **Parâmetros Curriculares Nacionais - Ensino Médio: Parte III: Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias**. Brasília: MEC/SEMTEC, 2000. Disponível em <http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/ciencian.pdf>. Acessado em 05 de fevereiro de 2022.
- [20] BRASIL. Ministério da Educação. **Bases Legais - Parâmetros Curriculares Nacionais Ensino Médio**. Brasília, 2000. Disponível em <http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/blegais.pdf>. Acessado em 05 de fevereiro de 2022.
- [21] BRASIL. Ministério da Educação. Secretaria de Educação Básica.. **Diretrizes Curriculares Nacionais Gerais da Educação Básica** / Ministério da Educação. Secretária de Educação Básica. Diretoria de Currículos e Educação Integral. Brasília: MEC, SEB, DICEI, 2013. 542p. Disponível em <http://portal.mec.gov.br/docman/julho-2013-pdf/13677-diretrizes-educacao-basica-2013-pdf/file>. Acesso em: 6 fevereiro de 2022.
- [22] BRASIL. Ministério da Educação. **Base Nacional Comum Curricular**. Brasília, 2018. Disponível em [http://basenacionalcomum.mec.gov.br/images/BNCC\\_EI\\_EF\\_110518-versaofinal\\_site.pdf](http://basenacionalcomum.mec.gov.br/images/BNCC_EI_EF_110518-versaofinal_site.pdf). Acesso em: 05 fevereiro 2022.
- [23] CARUSO, Francisco. **Física moderna: origens clássicas e fundamentos quânticos** / Francisco Caruso; Vitor Oguri. - 2. ed. - Rio de Janeiro: LTC, 2016.

- [24] CARAGEORGE, Edward Cespedes. **Uma proposta de sequência didática para ensino da relatividade geral no ensino médio**. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2020, p. 161f. Disponível em [https://www.if.ufrj.br/~pef/producao\\_academica/dissertacoes/2020\\_Edward\\_Carageorge/dissertacao\\_Edward\\_Carageorge.pdf](https://www.if.ufrj.br/~pef/producao_academica/dissertacoes/2020_Edward_Carageorge/dissertacao_Edward_Carageorge.pdf). Acessado em 23 de janeiro de 2023.
- [25] CASEIRO, Cíntia Camargo Furquim. **Avaliação formativa: concepção, prática e dificuldades**. Nuances: estudos sobre Educação. Presidente Prudente, SP, ano XIV, v. 15, n. 16, p. 141-161, jan./dez. 2008. Disponível em <https://revista.fct.unesp.br/index.php/Nuances/article/view/181/251>. Acessado em 19 de março de 2022.
- [26] CORREIA, Maury Duarte. **Formalismo de Hamilton-Jacobi em sistemas cosmológico** / Maury Duarte Correia. Dissertação de Mestrado (mestrado em Física). Universidade Federal de Pernambuco . Recife: O Autor, 2009, 64 fls. Disponível em [https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/6141/1/arquivo2375\\_1.pdf](https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/6141/1/arquivo2375_1.pdf). Acessado em 14 de setembro de 2023.
- [27] CUSTÓDIO, Paulo. **Introdução à relatividade geral** [Material didático ou instrucional] / Paulo Sérgio Custódio. UNIFESP, São Paulo, 2019. Disponível em [https://www.academia.edu/42051056/Relatividade\\_Geral](https://www.academia.edu/42051056/Relatividade_Geral). Acessado em 14 de setembro de 2023.
- [28] DE ALCANTARA, Marlon Cesar; LEAL, Karel Pontes. **Edwin Hubble & the Puzzle of Astronomical Red Shifts**. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de São Paulo, 2015. Disponível em [https://scholar.google.com.br/scholar?hl=pt-BR&as\\\_sdt=0\%2C5&q=edwin+hubble+\%5C\%26+the+puzzle+of+astronomical+red+shifts&btnG=](https://scholar.google.com.br/scholar?hl=pt-BR&as\_sdt=0\%2C5&q=edwin+hubble+\%5C\%26+the+puzzle+of+astronomical+red+shifts&btnG=). Acessado em 21 de julho de 2022.
- [29] DE JESUS, R. T.; GOMES DE AMORIM, R. G. **Proposta de uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa para Ensinar Física de Partículas por meio de Jogos de Cartas**. Revista do Professor de Física, [S. l.], v. 3, n. 1, p.

- 47784, 2019. DOI: 10.26512/rpf.v3i1.22573. Disponível em <https://periodicos.unb.br/index.php/rpf/article/view/22573>. Acesso em: 19 março 2022.
- [30] EINSTEIN, Albert. **Sobre o princípio da relatividade e suas implicações**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 27, p. 37-61, 2005.
- [31] FERRARI, Fabrício. **Introdução a Cosmologia: uma visão contemporânea**. 2019. 113 slides. Disponível em <https://www.ferrari.pro.br/home/documents/FFerrari-Cosmologia.pdf>. Acessado em 16 de março de 2023.
- [32] FILHO, G. E.; SAUER, L. Z.; ALMEIDA, N. N.; VILLAS-BOAS, V. **Uma nova sala de aula é possível: aprendizagem ativa na educação em engenharias** / Gabriel Elmôr Filho ... [et al.] - 1. ed. - Rio de Janeiro: LTC, 2019.
- [33] GHEDIN, Evandro. **Teorias Psicopedagógicas do Ensino Aprendizagem**. Boa Vista: UERR Editora, v. 309, 2012. Disponível em [https://www.nelsonreyes.com.br/Teorias\\_Psicopedagogicas\\_Evandro\\_Ghedin.pdf](https://www.nelsonreyes.com.br/Teorias_Psicopedagogicas_Evandro_Ghedin.pdf). Acessado em 05 de março de 2022.
- [34] HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **FUNDAMENTOS DE FÍSICA: MECÂNICA**. 9.ed. Rio de Janeiro:LTC, 2012. v. 1. 340 p.
- [35] HARRISON, Edward. Robert. **Cosmology: the Science of the universe** / Edward R. Harrison. Cambridge University Press, Cambridge, 1999.
- [36] HORVATH, Jorge Ernesto. **Alguns conceitos no ensino da Cosmologia que quase sempre levam a confusão**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 42, 2020. Disponível em [scielo.br/j/rbef/a/QsjCxJg8MryWPfb6SNtBqMs/?format=pdf&lang=pt](https://scielo.br/j/rbef/a/QsjCxJg8MryWPfb6SNtBqMs/?format=pdf&lang=pt). Acessado em 28 de julho de 2022.
- [37] HUBBLE, Edwin P. **Extra-galactic nebulae**. In: A Source Book in Astronomy and Astrophysics, 1900-1975. Harvard University Press, 1979. p. 716-724. Disponível em <https://www.degruyter.com/document/doi/10.4159/harvard.9780674366688.c113/html>. Acessado em 30 de junho de 2022.
- [38] HUBBLE, Edwin. **A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae**. Proceedings of the national academy of sciences, v. 15,

- n. 3, p. 168-173, 1929. Disponível em <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.15.3.168>. Acessado em 30 de junho de 2022.
- [39] HUBBLE, Edwin. **The problem of the expanding universe**. Science, v. 95, n. 2461, p. 212-215, 1942. Disponível em <https://www.science.org/doi/10.1126/science.95.2461.212>. Acessado em 30 de junho de 2022.
- [40] HADJI, C. A avaliação - regras do jogo: das intenções aos instrumentos. Portugal: Porto Editora, 1994.
- [41] JARDIM, W; GUERRA, A. **Discutindo o Universo em Expansão; Utilização de Controvérsias e Programas de Análise de Áudio no Ensino de Cosmologia**. In: 3rd Latin American Conference IHPST. Anais. SANTIAGO DE CHILE, 2014, p. 322-332 Disponível em <http://laboratoriogrecia.cl/wp-content/uploads/2015/05/TADEU-GUERRA-C040.pdf>. Acessado em 25 de julho de 2022.
- [42] KRAGH, Helde. **Cosmology and Controversy: The Historical Development of Two Theories of the Universe**. Princeton, Princeton University Press, 1996.
- [43] LIMA, José Ademir Sales de; SANTOS, R. C. **100 Anos da Cosmologia Relativística (1917-2017). Parte I: Das Origens à Descoberta da Expansão Universal (1929)**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 40, 2017. Disponível em <https://www.scielo.br/j/rbef/a/syJKNsc7qxWMG6zh6yP4Rsc/?format=html&lang=pt>. Acessado em 22 de julho de 2022.
- [44] LIMA, Georgetes Melo de. **Uma unidade de ensino potencialmente significativa com o aplicativo TER Einstein para ensinar a relatividade especial**. Dissertação (mestrado profissional em ensino de física) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2018, 131 f. Disponível em <https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/27052>. Acessado em 12 de março de 2022.
- [45] MAZUR, Eric. **Peer instruction: a revolução da aprendizagem ativa** / Eric Mazur; tradução: Anatólio Laschuk. - Porto Alegre : Penso, 2015.
- [46] MACIEL, Rafael Ramos. **A Astronomia nas aulas de Física: uma proposta de utilização de Unidades de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS)**.

Dissertação (Mestrado Profissional em Ensino de Física) - Universidade Federal de Santa Catarina. Araranguá, SC, 2016, 94p. Disponível em <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/178264>. Acessado em 10 de abril de 2022.

- [47] MORAN, José; BACICH, Lilian. **Metodologias ativas para uma educação inovadora: uma abordagem teórico-prática** [recurso eletrônico] / Organizadores, Lilian Bacich, José Moran. - Porto Alegre: Penso, 2018. Disponível em [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7722229/mod\\\_resource/content/1/Methodologias-Ativas-para-uma-Educacao-Inovadora-Bacich-e-Moran.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7722229/mod\_resource/content/1/Methodologias-Ativas-para-uma-Educacao-Inovadora-Bacich-e-Moran.pdf). Acessado em 10 de março de 2022.
- [48] MOREIRA, Marco Antonio, 1942. **Teorias de Aprendizagem** / Marco Antônio Moreira. - São Paulo: EDU,1999.
- [49] MOREIRA, Marco Antonio. **Teorias construtivistas** / Marco Antônio Moreira, Fernanda Ostermann. - Porto Alegre: Instituto de Física - UFRGS, 1999. Disponível em [https://www.if.ufrgs.br/public/tapf/n10\\_moreira\\_ostermann.pdf](https://www.if.ufrgs.br/public/tapf/n10_moreira_ostermann.pdf). Acessado em 17 de abril de 2022.
- [50] MOREIRA, M.A. **Unidades de Enseñanza potencialmente significativas - UEPS**. Aprendizagem Significativa em Revista / Meaningful Learning Review, Vol. 1, n. 2, pp. 43-63, 2011. Texto traduzido: Unidades de Ensino Potencialmente Significativas - UEPS. Disponível na página pessoal do Prof. Marco Antônio Moreira <https://www.if.ufrgs.br/~moreira/UEPSport.pdf>. Acessado em 19 de março de 2022.
- [51] MULLER, Alexei Machado. **Fundamentos de Astronomia e Astrofísica para o ensino superior na modalidade a distância** [recurso eletrônico] / Alexei Machado Muller, Dra. Maria de Fátima Oliveira Saraiva e Dr. Kepler de Souza Oliveira Filho. - Porto Alegre: UFRGS, Instituto de Física, 2013. Disponível em [http://lief.if.ufrgs.br/pub/cref/n30\\_Muller](http://lief.if.ufrgs.br/pub/cref/n30_Muller). Acessado em 7 de junho de 2022.
- [52] NASCIMENTO, Marcílio da Silva. **Efeito Doppler no ensino médio: uma sequência de ensino de ondulatória com prática, uso de TICS e metodologia ativa**. 2019. 113 f. (Dissertação de Mestrado Nacional Profissional

- de Ensino de Física) - Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, 2019. Disponível em [https://educapes.capes.gov.br/bitstream/capes/716382/3/T2017\\_Marcilio\%20da\%20Silva\%20Nascimento\\_Dissertacao.pdf](https://educapes.capes.gov.br/bitstream/capes/716382/3/T2017_Marcilio\%20da\%20Silva\%20Nascimento_Dissertacao.pdf). Acessado em 23 de janeiro de 2023.
- [53] NUSSENZVEIG, Herch Moysés. **Curso De Física Básica - vol. 4** / H. Moysés Nussenzveig - 1. ed. - - São Paulo: Editora Blucher, 1998.
- [54] NEVES, M. C. D. **A Questão Controversa da Cosmologia Moderna: Hubble e o Infinito - Parte 1**. In: Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v.17, n.2, p.189-204, 2000. Disponível em <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/6772>. Acessado em 25 de julho de 2022.
- [55] ORNELLAS FARIAS, A. J. **A psicologia educacional da aprendizagem significativa aplicada a programação escolar**. Revista Psicologia & Saberes [S. I]. v. 7, n. 8, p. 20-40, 2018. Disponível em <https://revistas.cesmac.edu.br/psicologia/article/view/772/643>. Acessado em 17 de abril de 2022.
- [56] OLIVEIRA FILHO, Kepler de Souza, SARAIVA, Maria de Fátima Oliveira. **Astronomia e Astrofísica**, 2. ed. São Paulo: Ed. Livraria da Física, 2004.
- [57] OLIVEIRA MENDONÇA, Marcos. **Proposta de construção de uma sequência didática abordando tópicos de cosmologia no ensino médio**. 2018. 180 f., il. Dissertação (Mestrado Profissionalizante em Ensino de Física) - Universidade de Brasília, Brasília, 2018. Disponível em <http://repositorio.unb.br/handle/10482/34595>. Acessado em 23 de março de 2023.
- [58] PEREIRA, Juliana Cougo. **Morfometria de Galáxias: assimetria**. Dissertação (Mestrado em Física) - Universidade Federal do Rio Grande. Rio Grande, 2014. Disponível em <https://repositorio.furg.br/handle/1/6638>. Acessado em 19 de junho de 2023.
- [59] PELIZZARI, A.; KRIEGL, M. L ; BARON, M. P.; DOROCINSKI, S. I. **Teoria da Aprendizagem Significativa segundo Ausubel**. Revista PEC, Curitiba, v. 2, n. 1, p. 37-42, 2002. Disponível em [https://rfp.sesc.com.br/moodle/pluginfile.php/2423/mod\\_resource/content/1/Teoria\\_aprendizagem\\_significativa.pdf](https://rfp.sesc.com.br/moodle/pluginfile.php/2423/mod_resource/content/1/Teoria_aprendizagem_significativa.pdf). Acessado em 27 de maio de 2022.



- [60] PRODANOV, Cleber Cristiano. **Metodologia do trabalho científico** [recurso eletrônico]: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico / Cleber Cristiano Prodanov, Ernani Cesar de Freitas. - 2. ed. - Novo Hamburgo: Feevale, 2013. Disponível em <https://www.feevale.br/Comum/midias/0163c988-1f5d-496f-b118-a6e009a7a2f9/E-book\%20Metodologia\%20do\%20Trabalho\%20Cientifico.pdf>. Acessado em 26 de julho de 2021.
- [61] RIBOLDI, Bruno Marconi. **A construção de uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS) para ensinar relatividade utilizando animações e o game A slower speed of light**. Dissertação (Mestrado Profissional em Ensino de Física) - Universidade Federal de São Carlos. São Paulo, 2016. 115 p. Disponível em <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/8039>. Acessado em 23 de março de 2023.
- [62] SANTANA, Meirivanha de Souza. **A importância da história no ensino de ciências: análise do livro de ciências utilizado em escolas do município de São Raimundo Nonato-PI**. In: Colóquio Internacional Educação e Contemporaneidade, 10., Sergipe. Anais eletrônico [...] Sergipe: Educon, 2016, p. 2-10. Disponível em [https://ri.ufs.br/bitstream/riufs/8919/15/A\\_importancia\\_da\\_historia\\_no\\_ensino\\_de\\_ciencias\\_analise\\_do\\_livro.pdf](https://ri.ufs.br/bitstream/riufs/8919/15/A_importancia_da_historia_no_ensino_de_ciencias_analise_do_livro.pdf). Acessado em 09 de agosto de 2022.
- [63] SIQUEIRA, Gustavo Almeida. **Conceitos Físicos em Métodos de Detecção de Exoplanetas: Método Doppler**. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Física) - Universidade Federal de Mato Grosso. - Barra do Garças - MT, 2020 - 60p. :il. (algumas color.); 30 cm.
- [64] SEVERINO, Antônio Joaquim, 1941 - **Metodologia do trabalho científico** / Antônio Joaquim Severino. - 24. ed. rev. e atual. ? São Paulo: Cortez, 2016
- [65] SOUZA, Ronaldo Eustáquio de. **Introdução à Cosmologia** / Ronaldo E. de Souza. - 2. ed. rev. e atual. - São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2019.
- [66] SOARES, Domingos Sávio de Lima. **Ensaio de cosmologia moderna** [livro eletrônico] / Domingos Savio de Lima Soares. - Belo Horizonte: Ed. do Autor,

2021. Disponível em [https://www.researchgate.net/publication/355306305\\_Ensaios\\_de\\_cosmologia\\_moderna](https://www.researchgate.net/publication/355306305_Ensaios_de_cosmologia_moderna). Acessado em 16 de novembro de 2022.
- [67] SHU, Frank. **The physical Universe; An Introduction to Astronomy**. Mill Valley: Universe Science Books, 1982.
- [68] TORIBIO, Alan Miguel Velásquez. **História da Física** / Alan Miguel Velásquez Toribio. - Vitória: Universidade Federal do Espírito Santo, Secretaria de Ensino a Distância, 2012. 78 p.
- [69] THORNTON, Stephen T. **Dinâmica clássica de partículas e sistemas** / Stephen T. Thornton, Jerry B. Marion; tradução All Tasks; revisão técnica Fábio Raia. - São Paulo: Cengage Learning, 2016.
- [70] TORT, Alexandre. **O efeito Doppler gravitacional**. Notas de aula, 13 f. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2018. Disponível em [https://www.academia.edu/36184179/0\\_efeito\\_Doppler\\_gravitacional](https://www.academia.edu/36184179/0_efeito_Doppler_gravitacional). Acessado em 14 de setembro de 2023.
- [71] TREVISAN, A. L; AMARAL, R. G. **A Taxionomia revisada de Bloom aplicada à avaliação: um estudo de provas escritas de Matemática**. Ciência e Educação, Bauru, v. 22, p. 451-464, 2016. Disponível em <https://www.scielo.br/j/ciedu/a/PGX4mJD5LKdqbpPpTZgYTN/?format=pdf&lang=pt>. Acessado em 16 de março de 2022.
- [72] VANZELLA, Daniel. **Relatividade Geral I: Equações de Friedmann, parâmetros cosmológicos e “redshift” cosmológico**. YouTube, 1 de julho de 2022. Aula online. Disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=BiYyCAxi2sQ&t=743s>. Acessado em 14 de setembro de 2023.
- [73] VANZELLA, Daniel. **Relatividade Geral I: Lei de Hubble, distância luminosa e angular e horizonte de partículas**. YouTube, 1 de setembro de 2022. Aula online. Disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=sTlpcKtJ0T0&t=2577s>. Acessado em 26 de setembro de 2023.
- [74] VASCONCELOS, Bárbara Cibele Ribeiro de. **Populações estelares em galáxias com formação estelar**. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Física).

- Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016, 65 f. Disponível em <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/44911>. Acessado em 19 de junho de 2023.