



ASTRONOMIA NO ENSINO MÉDIO: UMA ABORDAGEM SIMPLIFICADA A PARTIR
DA TEORIA DA RELATIVIDADE GERAL

Roberto Vinícios Lessa do Couto

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação da Universidade de Brasília (UnB) no Curso de Mestrado Profissional de Ensino de Física (MNPEF), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientador:
Prof. Dr. Marcello Ferreira

Brasília, DF
Agosto de 2020

ASTRONOMIA NO ENSINO MÉDIO: UMA ABORDAGEM SIMPLIFICADA A PARTIR
DA TEORIA DA RELATIVIDADE GERAL

Roberto Vinícios Lessa do Couto

Orientador:
Prof. Dr. Marcello Ferreira

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física da Universidade de Brasília, no Curso de Mestrado Profissional de Ensino de Física (MNPEF), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física

Aprovada por:

Dr. Marcello Ferreira

Dr.^a Laura Paulucci Marinho

Dr. Olavo Leopoldino da Silva Filho

Brasília, DF
Agosto de 2020

FICHA CATALOGRÁFICA

CC871a Couto, Roberto Vinicios Lessa do
Astronomia no Ensino Médio: Uma abordagem simplificada a partir da teoria da relatividade geral / Roberto Vinicios Lessa do Couto; orientador Marcello Ferreira. -- Brasília, 2020.
177 p.

Dissertação (Mestrado - Mestrado Profissional em Ensino de Física) -- Universidade de Brasília, 2020.

1. Ensino de Astronomia.. 2. Teorias de Ensino e Educação. 3. Aprendizagem Significativa. 4. Programa de Filosofia para Crianças. 5. Normatividade e Descritividade. I. Ferreira, Marcello, orient. II. Título.

Dedico esta dissertação a minha amada esposa Luciana.

Agradecimentos

À minha amada esposa Luciana, que me apoia em todos os momentos.

Ao meu orientador e amigo Marcello, que foi essencial para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos membros da banca examinadora, professores Olavo Filho e Laura Paulucci, pelas importantes contribuições ao trabalho.

Ao meu colega de turma e amigo Esdras, pelas conversas e dicas.

Ao meu amigo Ítalo, pelas avaliações prévias.

Aos meus gatos, Puff, Kirk e Spock, companheiros de toda a hora.

À Universidade de Brasília e, em particular, ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física (MNPEF), pela ambiência que viabilizou a realização deste trabalho.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

ASTRONOMIA NO ENSINO MÉDIO: UMA ABORDAGEM SIMPLIFICADA A PARTIR DA TEORIA DA RELATIVIDADE GERAL

Roberto Vinícios Lessa do Couto

Orientador:

Prof. Dr. Marcello Ferreira

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física da Universidade de Brasília (UnB), no Curso de Mestrado Profissional de Ensino de Física (MNPEF), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física

A presente dissertação faz uma investigação acerca da possibilidade de articulação entre a Teoria da Aprendizagem Significativa de David Ausubel e o Programa de Filosofia para Crianças e Adolescentes de Matthew Lipman, com a finalidade de produzir uma sequência didática voltada ao ensino de tópicos de astronomia ligados à gravitação no ensino médio. Inicialmente, é realizada uma análise teórica dos referenciais citados, em que são descritos seus principais aportes e como eles poderiam se articular para o desenvolvimento de um ensino de qualidade – cognitiva e investigativamente. Tópicos de astronomia que integram a aplicação educacional são desenvolvidos, visando subsidiar a eventual formação continuada de professores interessados. A partir disso, é apresentada uma sequência didática dividida em quatro módulos: 1) gravitação universal e sistema solar; 2) relatividade geral; 3) buracos negros; e 4) lentes gravitacionais, articulando as perspectivas teórico-metodológicas da aprendizagem significativa e da constituição de pensamento de ordem superior. Ela se operacionaliza por conteúdos, atividades e formas de abordagens diversificadas, mediadas por tecnologias educacionais digitais e uma avaliação que considerou a proficiência como níveis de expressão das respectivas teorias psicológica e educacional. Como resultados da aplicação dessa sequência didática em uma turma do terceiro ano do ensino médio da rede pública do Distrito Federal, verificou-se, a partir de discussões, questionamentos, comentários e questionários realizados pelos estudantes, que os temas estudados geraram interesse pelo conteúdo, que há indicadores do desenvolvimento de suas habilidades de ordem superior e da evolução de seus conhecimentos, com indícios da ocorrência de aprendizagem significativa e mecânica. Por fim, concluiu-se que a inserção de temas ligados à astronomia e à física moderna e contemporânea são viáveis para serem tratados no ensino médio, mesmo no contexto precário de uma escola pública, em contraposição ao currículo atual de física, desgastado e baseado principalmente na física clássica e em abordagens metodológicas difusas.

Palavras-chave: Ensino de Astronomia. Relatividade Geral. Aprendizagem Significativa. Programa de Filosofia para Crianças. Normatividade e Descritividade. Teorias de Ensino e Educação.

Brasília, DF
Agosto de 2020

ABSTRACT

ASTRONOMY IN HIGH SCHOOL: A SIMPLIFIED APPROACH FROM THE THEORY OF GENERAL RELATIVITY

Roberto Vinícios Lessa do Couto

Supervisor:

Prof. Doc. Marcello Ferreira

Abstract of master's thesis submitted to Programa de Pós-Graduação da Universidade de Brasília (UnB) no Curso de Mestrado Profissional de Ensino de Física (MNPEF), in partial fulfillment of the requirements for the degree Mestre em Ensino de Física.

The present dissertation investigates the possibility of articulation between David Ausubel's Theory of Meaningful Learning and Matthew Lipman's Philosophy Program for Children and Adolescents, with the purpose of producing a teaching unit aimed at teaching astronomy topics related to gravitation in high school. Initially, a theoretical analysis of the mentioned references is carried out, in which their main contributions are described and how they could be articulated for the development of quality teaching - cognitively and investigatively. Astronomy topics that are part of the educational application are developed, aiming to subsidize the eventual continuing education of interested teachers. From this, a teaching unit divided into four modules is presented: 1) universal gravitation and solar system; 2) general relativity; 3) black holes; and 4) gravitational lenses, articulating the theoretical and methodological perspectives of meaningful learning and the constitution of higher order thinking. It is operationalized by content, activities and diversified forms of approaches, mediated by digital educational technologies and an evaluation that considered proficiency as levels of expression of the respective psychological and educational theories. As a result of the application of this teaching unit in a third year class of public high school in the Distrito Federal, it was found, from discussions, questions, comments and questionnaires carried out by the students, that the topics studied generated interest in the content, that there are indicators of the development of their higher order skills and the evolution of their knowledge, with evidence of the occurrence of meaningful and mechanical learning. Finally, it was concluded that the insertion of themes related to astronomy and modern and contemporary physics are viable to be treated in high school, even in the precarious context of a public school, in contrast to the current physics curriculum, worn out and based mainly in classical physics and diffuse methodological approaches.

Keywords: Astronomy teaching. General Relativity. Meaningful Learning. Philosophy for Children Program. Normativity and Descriptivity. Theories of Teaching and Education.

Brasília, DF
August 2020

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tipos de aprendizagem significativa.....	17
Figura 2 – Formas em que a aprendizagem significativa pode ocorrer.	18
Figura 3 – Características das formas de pensar que conduzem ao Pensamento de Ordem Superior.	22
Figura 4 – Partícula se deslocando em direção ao horizonte de eventos.	36
Figura 5 – Astronauta atravessando o horizonte de eventos.....	37
Figura 6 – Buraco negro e seu horizonte de eventos localizado na galáxia M87.	39
Figura 7 – Esquemas de Lentes Gravitacionais.....	41
Figura 8 – Simulação da colisão de dois sóis.	46
Figura 9 – Simulação da colisão de estrelas.	47
Figura 10 – Simulação do Sistema Solar.....	48
Figura 11 – Simulação da Terra.	48
Figura 12 – Imagem de Mercúrio obtida pela sonda Messenger em 2008.	59
Figura 13 – Imagem de Vênus obtida pela sonda Pioneer-Venus Orbiter em 1979.....	59
Figura 14 – Imagem da Terra obtida pelo satélite GOES-16 em 2017.....	59
Figura 15 – Combinação de imagens de Marte obtidas pela sonda Viking Orbiter 1 em 2013.....	59
Figura 16 – Imagem de Júpiter obtida pelo telescópio Hubble em 2019.....	60
Figura 17 – Imagem de Saturno obtida pela sonda Cassini em 2017.	60
Figura 18 – Imagem de Urano obtida pela sonda Voyager 2 em 1986.....	60
Figura 19 – Imagem de Netuno obtida pela sonda Voyager 2 em 1989.....	60
Figura 20 – Modelo 3D da deformação do espaço.	64
Figura 21 – Modelo 3D da deformação do espaço-tempo.....	64
Figura 22 – Concepção artística de um buraco negro.....	80
Figura 23 – Concepção artística de um buraco negro sugando uma estrela.	80
Figura 24 – Buraco negro e seu horizonte de eventos localizado na galáxia M87.	80
Figura 25 – Simulação do Sol como um buraco negro.....	82
Figura 26 – Simulação de um buraco negro e seu disco de acreção.....	83
Figura 27 – Lente gravitacional G2237+0305, também conhecida como Cruz de Einstein. Imagem obtida pelo telescópio Hubble em 1990.	101
Figura 28 – Simulação de Lente gravitacional.	102
Figura 29 – Simulação de Lente gravitacional.	102
Figura 30 – Esquema de formação de múltiplas imagens por uma lente gravitacional.....	107
Figura 31 – Esquema simplificado da formação de múltiplas imagens por uma lente gravitacional.	108
Figura 32 – Arcos formando um sorriso. Imagem obtida pelo telescópio Hubble.	108
Figura 33 – Anel de Einstein quase completo.	109
Figura 34 – Esquema simplificado de lente gravitacional fraca.....	109
Figura 35 – Lente gravitacional fraca atuando sobre a galáxia MACS2129-1.....	110
Figura 36 – Concepção artística de uma microlente gravitacional.....	110
Figura 37 – Aglomerado de galáxias Abell 2218.	111
Figura 38 – Anel de Einstein.....	112
Figura 39 – Múltiplas imagens de objetos formadas por uma lente gravitacional.	113
Figura 40 – Esquema de magnificação do brilho produzido por uma microlente gravitacional.	114
Figura 41 – Matéria escura.....	114
Figura 42 – Resposta N5 para a questão 1 do primeiro questionário.	132
Figura 43 – Resposta N4 para a questão 1 do primeiro questionário.	132
Figura 44 – Resposta N3 para a questão 1 do primeiro questionário.	132
Figura 45 – Resposta N4 para a questão 2 do primeiro questionário.	133
Figura 46 – Resposta N3 para a questão 2 do primeiro questionário.	133

Figura 47 – Resposta N5 para a questão 3 do primeiro questionário.....	134
Figura 48 – Resposta N4 para a questão 3 do primeiro questionário.....	134
Figura 49 – Resposta N3 para a questão 3 do primeiro questionário.....	134
Figura 50 – Resposta N2 para a questão 3 do primeiro questionário.....	135
Figura 51 – Resposta N4 para a questão 1 do segundo questionário.....	136
Figura 52 – Resposta N3 para a questão 1 do segundo questionário.....	136
Figura 53 – Resposta N2 para a questão 1 do segundo questionário.....	136
Figura 54 – Resposta N4 para a questão 2 do segundo questionário.....	137
Figura 55 – Resposta N4* para a questão 2 do segundo questionário.....	137
Figura 56 – Resposta N4 para a questão 3 do segundo questionário.....	138
Figura 57 – Resposta N3 para a questão 3 do segundo questionário.....	138
Figura 58 – Resposta N5 para a questão 1 do terceiro questionário.....	139
Figura 59 – Resposta N4 para a questão 1 do terceiro questionário.....	139
Figura 60 – Resposta N3 para a questão 1 do terceiro questionário.....	139
Figura 61 – Resposta N4 para a questão 2 do terceiro questionário.....	140
Figura 62 – Resposta N3 para a questão 2 do terceiro questionário.....	140
Figura 63 – Resposta N2 para a questão 2 do terceiro questionário.....	140
Figura 64 – Resposta N5 para a questão 3 do terceiro questionário.....	141
Figura 65 – Resposta N3 para a questão 3 do terceiro questionário.....	141
Figura 66 – Resposta N2 para a questão 3 do terceiro questionário.....	141
Figura 67 – Resposta N4 para a questão 4 do terceiro questionário.....	142
Figura 68 – Resposta N3 para a questão 4 do terceiro questionário.....	142
Figura 69 – Resposta N2 para a questão 4 do terceiro questionário.....	142
Figura 70 – Resposta N5 para a questão 5 do terceiro questionário.....	143
Figura 71 – Resposta N5 para a questão 5 do terceiro questionário.....	143
Figura 72 – Resposta N4 para a questão 1 do quarto questionário.....	144
Figura 73 – Resposta N2 para a questão 1 do quarto questionário.....	144
Figura 74 – Resposta N5 para a questão 2 do quarto questionário.....	144
Figura 75 – Resposta N4 para a questão 2 do quarto questionário.....	145
Figura 76 – Resposta N3 para a questão 2 do quarto questionário.....	145
Figura 77 – Resposta N4 para a questão 3 do quarto questionário.....	145
Figura 78 – Resposta N2 para a questão 3 do quarto questionário.....	146
Figura 79 – Resposta N4 para a questão 4 do quarto questionário.....	146
Figura 80 – Resposta N3 para a questão 4 do quarto questionário.....	146
Figura 81 – Resposta N2 para a questão 4 do quarto questionário.....	147
Figura 82 – Resposta N4 para a questão 1 do quinto questionário.....	147
Figura 83 – Resposta N3 para a questão 1 do quinto questionário.....	148
Figura 84 – Resposta N2 para a questão 1 do quinto questionário.....	148
Figura 85 – Resposta N4 para a questão 2 do quinto questionário.....	148
Figura 86 – Resposta N3 para a questão 2 do quinto questionário.....	149
Figura 87 – Resposta N2 para a questão 2 do quinto questionário.....	149
Figura 88 – Resposta N3 para a questão 3 do quinto questionário.....	149
Figura 89 – Resposta N2 para a questão 3 do quinto questionário.....	150
Figura 90 – Resposta N4 para a questão 4 do quinto questionário.....	150
Figura 91 – Resposta N3 para a questão 4 do quinto questionário.....	150
Figura 92 – Resposta N2 para a questão 4 do quinto questionário.....	151
Figura 93 – Resposta N3 para a questão 1 do sexto questionário.....	151
Figura 94 – Resposta N4 para a questão 2 do sexto questionário.....	152
Figura 95 – Resposta N3 para a questão 2 do sexto questionário.....	152

Figura 96 – Resposta N2 para a questão 2 do sexto questionário.....	152
Figura 97 – Resposta N4 para a questão 3 do sexto questionário.....	153
Figura 98 – Resposta N2 para a questão 3 do sexto questionário.....	153
Figura 99 – Resposta N4 para a questão 1 do sétimo questionário.	154
Figura 100 – Resposta N3 para a questão 1 do sétimo questionário.	154
Figura 101 – Resposta N4 para a questão 2 do sétimo questionário.	155
Figura 102 – Resposta N2 para a questão 2 do sétimo questionário.	155
Figura 103 – Resposta N4 para a questão 3 do sétimo questionário.	156
Figura 104 – Resposta N2 para a questão 3 do sétimo questionário.	156
Figura 105 – Resposta N4 para a questão 1 do oitavo questionário.	157
Figura 106 – Resposta N3 para a questão 1 do oitavo questionário.	157
Figura 107 – Resposta N5 para a questão 2 do oitavo questionário.	157
Figura 108 – Resposta N3 para a questão 2 do oitavo questionário.	158
Figura 109 – Resposta N2 para a questão 2 do oitavo questionário.	158
Figura 110 – Resposta N4 para a questão 1 do nono questionário.	159
Figura 111 – Resposta N3 para a questão 1 do nono questionário.	159
Figura 112 – Resposta N2 para a questão 1 do nono questionário.	159
Figura 113 – Resposta N5 para a questão 2 do nono questionário.	160
Figura 114 – Resposta N4 para a questão 2 do nono questionário.	160
Figura 115 – Resposta N3 para a questão 2 do nono questionário.	160
Figura 116 – Resposta N5 para a questão 1a do décimo questionário.....	161
Figura 117 – Resposta N3 para a questão 1a do décimo questionário.....	161
Figura 118 – Resposta N2 para a questão 1a do décimo questionário.....	162
Figura 119 – Resposta N4 para a questão 1b do décimo questionário.	162
Figura 120 – Resposta N2 para a questão 1b do décimo questionário.	162
Figura 121 – Resposta N4 para a questão 2 do décimo questionário.	163
Figura 122 – Resposta N3 para a questão 2 do décimo questionário.	163
Figura 123 – Resposta N4 para a questão 4 do décimo questionário.	164
Figura 124 – Resposta N3 para a questão 4 do décimo questionário.	164
Figura 125 – Resposta N4 para a questão 1 do décimo primeiro questionário.....	165
Figura 126 – Resposta N3 para a questão 1 do décimo primeiro questionário.....	165
Figura 127 – Resposta N4 para a questão 2 do décimo primeiro questionário.....	165
Figura 128 – Resposta N3 para a questão 2 do décimo primeiro questionário.....	166
Figura 129 – Resposta N2 para a questão 2 do décimo primeiro questionário.....	166

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Quantidade de artigos e dissertações por tema e se possuem capítulo de física.	8
Tabela 2 – Características dos Principais Objetos do Sistema Solar.	58
Tabela 3 – Quantidade de ausências dos estudantes às aulas.	117
Tabela 4 – Nível das respostas dadas pelos grupos ao questionário 01.	131
Tabela 5 – Nível das respostas dadas pelos grupos ao questionário 02.	135
Tabela 6 – Nível das respostas dadas pelos grupos ao questionário 03.	138
Tabela 7 – Nível das respostas dadas pelos grupos ao questionário 04.	143
Tabela 8 – Nível das respostas dadas pelos grupos ao questionário 05.	147
Tabela 9 – Nível das respostas dadas pelos grupos ao questionário 06.	151
Tabela 10 – Nível das respostas dadas pelos grupos ao questionário 07.	153
Tabela 11 – Nível das respostas dadas pelos grupos ao questionário 08.	156
Tabela 12 – Nível das respostas dadas pelos grupos ao questionário 09.	158
Tabela 13 – Nível das respostas dadas pelos grupos ao questionário 10.	161
Tabela 14 – Nível das respostas dadas pelos grupos ao questionário 11.	164
Tabela 15 – Número de respostas avaliadas em cada nível para cada questionário.	167

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Estrutura do produto educacional.....	43
Quadro 2 – Estrutura dos planos de aula correspondentes a cada módulo.....	44
Quadro 3 – Referencial teórico e proposta de avaliação das estratégias didáticas apresentadas.....	50
Quadro 4 – Referencial teórico e proposta de avaliação das estratégias didáticas apresentadas.....	67
Quadro 5 – Referencial teórico e proposta de avaliação das estratégias didáticas apresentadas.....	85
Quadro 6 – Referencial teórico e proposta de avaliação das estratégias didáticas apresentadas.....	104

SUMÁRIO

1- Introdução	1
2- Referencial Teórico	12
2.1- A teoria da Aprendizagem Significativa de David Ausubel	13
2.2 - O Programa de Filosofia para Crianças e Adolescentes de Matthew Lipman	20
3- Síntese dos tópicos de Física	27
3.1- Tópicos de Gravitação Universal	27
3.2- Tópicos de Relatividade Restrita e Geral	28
3.3- Tópicos de Buracos Negros	33
3.4- Lentes Gravitacionais	39
4- Produto Educacional	43
Módulo 1 – Gravitação Universal e Sistema Solar	45
Módulo 2 – Relatividade.....	62
Módulo 3 – Buracos Negros	79
Módulo 4 – Lentes Gravitacionais	100
5- Análise da Aplicação	117
5.1- Análise das Aulas	118
5.2- Análise da Aprendizagem.....	129
5.3- Análise dos Questionários	130
5.4- Resumo dos Dados	166
6- Considerações Finais	169
Referências	172

1- Introdução

A astronomia é uma das ciências mais antigas da humanidade. São milênios de observações do céu, que permitiram ao homem determinar, com base na posição dos astros, quando se iniciam as estações do ano, a época certa para o plantio e para a colheita e o tempo mais apropriado para a caça e a pesca. Também é responsável pela percepção dos movimentos cíclicos dos planetas e, com base neles, pela elaboração de calendários complexos.

Ela é um tema que faz parte da curiosidade do senso comum e que desperta a fascinação pelas ciências em crianças, jovens e adultos de todo o mundo. Pesquisas em diversos países – como Inglaterra, Noruega, Finlândia e Brasil – realizadas no âmbito do projeto Rose¹ – *Relevance of Science Education* – verificaram que percepções e curiosidades relacionados à astronomia estão dentre os temas que despertam o interesse de jovens na faixa dos 15 anos de idade, que corresponde ao público que hoje inicia o ensino médio no Brasil (FROES, 2014). Como exemplos, poderiam ser citadas curiosidades acerca da sensação de viver sem peso no espaço, como meteoritos, cometas e asteroides podem causar catástrofes na Terra, como caminhar orientado pelas estrelas, a possibilidade de vida fora da Terra e, também, sobre buracos negros, supernovas e outros objetos no espaço.

Por ser um tema tão popular, e reconhecidamente fundante do pensamento científico moderno, diversos países inserem a astronomia como parte de seus currículos de ciências. Isso se aplica à área de ciências no Brasil, de acordo com as Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio (PCN+ EM) e com a Base Nacional Comum Curricular (BNCC).

Os PCN+ EM (BRASIL, 2002) incluem a astronomia em seu sexto tema estruturador, denominado Universo, Terra e vida. Esse tema destaca a importância de dar aos estudantes uma visão cosmológica das ciências, permitindo-lhes se situarem no universo, entenderem e admirarem as descobertas divulgadas pela mídia, como, por exemplo, a primeira imagem de um buraco negro mostrada em 2019. Ele ainda dá destaque à interação gravitacional e a métodos de investigação de estrelas e galáxias, como, por exemplo, a lei de gravitação universal, a relatividade geral e as lentes gravitacionais.

¹ O projeto Rose é uma colaboração internacional comparativa com o objetivo de identificar fatores importantes para a aprendizagem da ciência e tecnologia e tem como público alvo estudantes do ensino médio (SJØBERG, 2004).

Ainda no âmbito do sexto tema dos PCN+ EM, pode-se destacar, dentro das unidades temáticas sugeridas, três tópicos a serem debatidos:

Compreender as interações gravitacionais, identificando forças e relações de conservação, para explicar aspectos do movimento do sistema planetário, cometas, naves e satélites.

Conhecer as teorias e modelos propostos para a origem, evolução e constituição do Universo, além das formas atuais para sua investigação e os limites de seus resultados no sentido de ampliar sua visão de mundo.

Compreender aspectos da evolução dos modelos da ciência para explicar a constituição do Universo (matéria, radiação e interações) através dos tempos, identificando especificidades do modelo atual (BRASIL, 2002, p. 79).

Já na BNCC², o documento curricular brasileiro mais recente, o tema está inserido na segunda competência específica que os estudantes devem desenvolver para a área de ciências da natureza e suas tecnologias para o ensino médio, com a seguinte redação:

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 e defender decisões éticas e responsáveis.

[...] Nessa competência específica, podem ser mobilizados conhecimentos conceituais relacionados a: [...] espectro eletromagnético; modelos atômicos, subatômicos e cosmológicos; astronomia; evolução estelar; gravitação; mecânica newtoniana; previsão do tempo; história e filosofia da ciência; entre outros (BRASIL, 2017, p. 542).

A BNCC ainda acrescenta que o estudante deve alcançar as seguintes habilidades relacionadas à competência acima:

(EM13CNT201) Analisar e discutir modelos, teorias e leis propostos em diferentes épocas e culturas para comparar distintas explicações sobre o surgimento e a evolução da Vida, da Terra e do Universo com as teorias científicas aceitas atualmente.

[...]

(EM13CNT204) Elaborar explicações, previsões e cálculos a respeito dos movimentos de objetos na Terra, no Sistema Solar e no Universo com base na análise das interações gravitacionais, com ou sem o uso de dispositivos e aplicativos digitais (como softwares de simulação e de realidade virtual, entre outros) (BRASIL, 2017, p. 543).

Pelo exposto, é possível perceber que o ensino de astronomia no ensino médio é incentivado pelos documentos oficiais, bem como o ensino de diversas teorias de diferentes épocas. Isto é, mostrar a evolução de modelos científicos, como a gravitação de Newton e a Relatividade de Einstein, é oportuno pois, além dos tópicos constarem nos documentos oficiais, também podem dar aos estudantes uma visão da ciência como em constante evolução.

² Embora seja documento curricular oficial do Brasil, podemos tecer críticas com relação à BNCC. Consideramos que ela seja resultado de uma frágil articulação política e de pouco diálogo institucional. Ela também enfraquece a autonomia curricular das redes de ensino e dos professores, mesmo que tenha a regionalização como um de seus princípios. Por fim, sob o argumento de homogeneizar a diversidade escolar brasileira, ela, na realidade, flerta com compromissos editoriais e econômicos e com resultados em exames de aferição nacionais e internacionais como o ENEM e o Pisa, por exemplo.

Além disso, a astronomia tem bastante potencial interdisciplinar³ e pode ser relacionada a vários campos do saber. Como exemplo, pode-se abordar o tema da segunda guerra mundial, em que os estudos acerca dos buracos negros foram deixados de lado em função da necessidade dos países envolvidos nos conflitos de obter novas e mais poderosas tecnologias. Com essa articulação, é possível discutir como questões socioeconômicas e culturais de um mundo eurocêntrico foram responsáveis por atrasar estudos científicos não relacionados direta ou indiretamente à área bélica e por acelerar a evolução de temas que garantiriam aos países alguma vantagem sobre os outros. Essa corrida científica culminou em duas bombas atômicas, que mataram centenas de milhares de pessoas, lançadas sobre o Japão em 1945, quando este já não tinha qualquer condição de vencer o conflito, o que permite, ainda, reforçar a questão ética acerca da necessidade desses bombardeios⁴.

Mesmo em face de tantas potencialidades temáticas e metodológicas, os estudantes são pouco expostos aos conhecimentos acerca da astronomia, dentro ou fora da sala de aula. Isso se dá, por um lado, pelas limitações de um sistema de ensino que tardia e desqualificadamente curricularizou as ciências e, por outro, pelos drásticos passivos educacionais que comprometem e desfavorecem a ciência e a discussão sobre a natureza da ciência como atributos de uma formação plena. Sobre isso, Santos (2020) diz o seguinte:

[...] o único elo com o conhecimento mencionado provavelmente será aquele exposto, brevemente, nas salas de aula ou de forma ainda mais efêmera pela imprensa. E, o que é ainda pior, não raramente as informações passadas dessas formas acaba se mostrando confusas, distantes e, o que é ainda mais problemático, expostas de forma incorreta.

Dentre os diversos motivos para isso, pode-se citar a precariedade da qualificação dos professores para lidar com esse assunto. Professores do ensino fundamental, geralmente formados em pedagogia ou ciências biológicas, pouco sabem sobre os conceitos científicos ligados ao tema, que não está institucionalizado em suas formações superiores típicas (LEITE; HOSOUME, 2007).

No ensino médio, em que professores de física comumente são responsáveis pelo assunto – de acordo com o censo escolar 2019, 52,1% dos professores da disciplina não

³ Entendemos que a interdisciplinaridade é um campo epistemológico, que propõe um conjunto sofisticado de referências e metodologias. Mas, de forma funcional, tomamos a ideia de associação articulada e produtiva de campos de conhecimento, inclusive com reelaboração discursiva (SILVA FILHO; FERREIRA, 2018).

⁴ Esse tipo de articulação temática – e mesmo metodológica – é muito bem-vinda no ensino de física. Há correntes teóricas, como é o caso da Educação Ciência-Tecnologia-Sociedade (CTS), que particularmente dele se ocupam. O conhecimento científico é não só importante como condicional para que esse tipo de proposição se viabilize adequadamente. Essa é a potencialidade que queremos demonstrar na alocação estratégica de abordagens cognitivistas em processos de ensino aprendizagem em física, sem com isso cegar o dever crítico, ético, investigativo, problematizador e amplamente vinculado à qualidade epistemológica do saber e ao seu imbricamento sociocultural e político.

possuem qualquer formação na área, seja licenciatura ou bacharelado (INEP, 2020) –, a situação não é muito diferente, uma vez que tópicos relacionados à astronomia raramente constam do rol de disciplinas obrigatórias dos cursos de licenciatura em física brasileiros. Em pesquisa amostral⁵ em projetos pedagógicos dos cursos de licenciatura em física de diferentes universidades públicas brasileiras em 2020 (UnB, UFRR, USP, UFRJ, UFPE e UFRGS), apenas a última continha o tema da astronomia como disciplina obrigatória (UnB, 2017; UFRR, 2018; USP, 2018; UFRJ, 2010; UFPE, 2013; UFRGS, 2018).

Outros motivos podem ser citados: professores que ocupam vagas fora de sua área de formação; difusão, tanto por professores quanto por estudantes, de concepções presentes no senso comum e sem concordância da comunidade científica; e a baixa qualidade dos livros didáticos disponibilizados, que, comumente, dedicam poucas páginas, quando o fazem, à astronomia, lidando com seus conteúdos de forma superficial e incompleta e, até mesmo, trazendo erros históricos e conceituais (JÚNIOR *et al.*, 2018)⁶.

A partir dessas constatações, e tomando como dado a formação insuficiente dos professores responsáveis pelo tema e a baixa qualidade dos materiais didáticos ofertados tanto a eles quanto aos estudantes, pode-se caracterizar o problema de ensino de que origina esta pesquisa: **como analisar teoricamente e propor uma aplicação educacional para minimizar a precariedade do ensino de astronomia no ensino médio, no contexto da educação pública do Distrito Federal?**

Nos limites dessa problemática, diversas iniciativas foram tomadas por pesquisadores brasileiros, por meio de materiais de divulgação científica ou instrucionais, publicação de artigos científicos ou oferta de cursos de extensão, aperfeiçoamento ou pós-graduação *lato sensu* em ensino de astronomia, por diversas instituições de ensino superior. Há, também, iniciativas tomadas em programas de pós-graduação *stricto sensu*, como o mestrado profissional em ensino de astronomia (MPEA) da USP e o mestrado nacional profissional em ensino de física (MNPEF), que incentiva ações voltadas ao ensino de física moderna e contemporânea na educação básica.

⁵ Entendemos que, para as finalidades ilustrativas desse argumento, a pesquisa amostral é suficiente, porque se dá em bases documentais (projetos pedagógicos de cursos de licenciatura em física) que não apresentam, regularmente, diferenças estruturais consideráveis entre as instituições, dadas as suas configurações organizacionais típicas. Buscamos selecionar universidades de diferentes mantenças (federais e estaduais), em todas as regiões geográficas do Brasil.

⁶ O desinteresse editorial pela atualização de temas científicos e pela abordagem de física moderna e contemporânea e de astronomia mereceria uma discussão à parte. Não havendo aqui ocasião para fazê-lo, detemo-nos a fazer constar essa limitação e registrar que ela endossa a preocupação pelo desenvolvimento de pesquisas, aplicações educacionais e materiais instrucionais complementares nesses temas.

Como será melhor detalhado na sequência deste texto, a pesquisa em trabalhos do campo relacionados ao ensino de astronomia constatou a existência de uma variedade de temas tratados. Dentre eles, há propostas que trazem a relatividade como tema principal, porém não foram encontrados trabalhos que abordassem, especificamente, a astronomia a partir dos fenômenos ligados à gravitação, partindo da Gravitação Universal de Newton e chegando à Relatividade Geral de Einstein, incluindo alguns fenômenos por ela explicados, como os Buracos Negros e as Lentes Gravitacionais. A produção de um trabalho que inclua esses tópicos, de forma simplificada e adequada ao nível dos estudantes, parece promissora, pois os leva a perceberem como a ciência evolui com o tempo a partir de contribuições de diferentes pessoas.

Essa proposta também se mostra atraente pois o interesse nato dos estudantes por temas de astronomia (FROES, 2014) pode ser usado como um facilitador da aprendizagem. Além disso, a possibilidade estrutural desse conhecimento de ser abordado em tópicos de forma hierárquica e sequencial, faz com que o conhecimento adquirido em uma aula possa servir de base para a aprendizagem dos tópicos seguintes. Já seu caráter conceitual e empírico permite, didaticamente, uma abordagem dialógica em que os próprios estudantes expõem suas concepções acerca dos temas que, junto com restante da turma e auxiliados pelo professor, são alvo de um debate objetivando alcançarem um conhecimento comum.

Também se percebeu que apenas um pequeno número dos trabalhos analisados apresentou algum material ou texto relativos aos conteúdos de física para efetivamente subsidiar ou complementar a formação dos professores que utilizarão as propostas em suas aulas. Considerando que um dos problemas relacionados ao ensino de astronomia é a má formação dos professores na área, incluir, no desenvolvimento dos trabalhos, seções contendo explicações acerca dos conteúdos abordados nas aulas mostra-se uma ação assertiva no sentido de mitigar esses problemas. Isto é, incluir seções dedicadas exclusivamente aos professores, contendo sínteses ou resumos dos conteúdos que serão levados aos estudantes, pode ser uma ação efetiva no sentido de complementar os conhecimentos desses educadores. Deve-se deixar claro que essa ação não é capaz, sozinha, de resolver o problema complexo da capacitação de professores para lidarem com a disciplina que ministram, mas ela é capaz de amenizá-lo, mesmo que de forma superficial.

Tendo em vista o problema de ensino e os trabalhos na área, uma forma de enfrentá-lo poderia ser com o desenvolvimento de uma sequência didática acompanhada de material teórico para auxiliar o professor na tarefa de ensinar tópicos de astronomia. O material teórico auxiliar

pode ser feito em forma de texto em nível superior ao que será abordado na sequência didática e, ainda assim, em nível não tão complexo a ponto de dificultar o entendimento dos conteúdos.

Já a sequência didática pode ser construída aproveitando-se a facilidade de se hierarquizar didaticamente os temas de estudo, o interesse dos estudantes pela astronomia e seus conhecimentos prévios na área, mesmo que escassos, para formalizar uma intervenção com potencial de levar a esses estudantes uma aprendizagem efetiva do conteúdo. A sequência também deve levar em consideração a figura do estudante e o contexto no qual ele está inserido para apresentar uma metodologia de ensino que também seja capaz de identificar em que nível a aprendizagem está ocorrendo.

Como forma de atender aos itens descritos, pode-se construir a sequência didática tendo como base a articulação de uma perspectiva cognitivista de natureza descritiva, como a de David Ausubel, com uma humanista de natureza normativa, como a de Matthew Lipman. A perspectiva de Ausubel, por meio da sua Teoria da Aprendizagem Significativa (TAS), fornece os subsídios relativos a como ocorre o processo de assimilação de conhecimento que resulta na aprendizagem significativa. Já a perspectiva de Lipman, por meio de seu Programa de Filosofia para Crianças e Adolescentes (PFCA), fornece os elementos metodológicos necessários ao alcance da aprendizagem significativa.

Esse tipo de articulação é sugerida e reforçada por trabalhos no campo como os de Silva Filho *et al* (2020) e Silva Filho e Ferreira (2018) e sua aplicação, no contexto deste trabalho, ficará explícita na seção em que é apresentado o referencial teórico. De partida, parece suficiente sublinhar que a perspectiva cognitivista de Ausubel (1969) buscará empreender mecanismos de descrição da aprendizagem dos alunos acerca de tópicos de astronomia, enquanto que a perspectiva educacional de Lipman (1995) evidenciará questões normativas da forma de estruturação didática para dada finalidade formativa.

Com isso, entende-se como objetivo geral desta dissertação estruturar, aplicar e avaliar uma possível articulação entre a teoria de aprendizagem de David Ausubel e o programa de ensino de Matthew Lipman, de modo a propor uma sequência didática para o ensino de tópicos de astronomia ligados à gravitação, em particular a compreensão da Lei da Gravitação Universal (LGU) como um caso limite da Teoria da Relatividade Geral (TRG), tendo os Buracos Negros e as Lentes Gravitacionais como consequências diretas.

Para o alcance do objetivo geral, são propostos os seguintes objetivos específicos:

- pesquisar como a teoria da aprendizagem significativa e o programa de filosofia para crianças e adolescentes podem ser entrelaçados, visando à aprendizagem de tópicos de astronomia ligados à gravitação;
- investigar configurações de propostas de ensino (ou de aplicações educacionais) de LGU e de TRG no ensino médio, voltadas ao ensino de astronomia, verificando as mais produtivas adequações à teoria da aprendizagem significativa e ao programa de filosofia;
- elaborar, aplicar e avaliar uma sequência didática, para o ensino médio, dos seguintes tópicos, em benefício do ensino de astronomia: LGU, sistema solar, espaço-tempo, curvatura do espaço-tempo, princípio da equivalência, buracos negros – histórico, raio de Schwarzschild, horizonte de eventos, evolução e detecção – e lentes gravitacionais;
- disponibilizar a sequência didática desenvolvida e avaliada a professores do ensino médio, organizada e comentada a partir dos resultados da aplicação educacional, como subsídio à abordagem de tópicos de gravitação voltados ao ensino de astronomia.

Com base nesses objetivos propostos, a metodologia utilizada nesta pesquisa é a translacional, que busca “promover pesquisa interdisciplinar e acelerar a troca bidirecional entre ciência básica e clínica para mover os achados de pesquisa básica do laboratório para ambientes aplicados envolvendo pacientes e populações” (GUIMARÃES, 2013). Este tipo de pesquisa é bastante utilizado na área da saúde e tem sido, mais recentemente, objeto de interesse da área de ensino. Neste particular, a pesquisa translacional busca a interconexão entre os diversos referenciais teóricos existentes e sua aplicação concreta em uma sala de aula, a partir da retroalimentação pesquisa → desenvolvimento de material instrucional → aplicação → análise → revisão do material instrucional.

Desse modo, a escolha metodológica vai ao encontro do objetivo geral dessa dissertação. Isso porque ela busca a aprendizagem de tópicos de astronomia por estudantes do ensino médio, que é a aplicação concreta em sala de aula e, para chegar a isso, ela o faz através da articulação entre as teorias de Ausubel e Lipman, que são os referenciais teóricos.

A pesquisa bibliográfica foi realizada em fevereiro de 2020 a partir de artigos e dissertações encontrados na base de dados da Scielo e no catálogo de teses e dissertações da Capes. A pesquisa nas plataformas procurou trabalhos em língua portuguesa contendo o termo “ensino de astronomia” e considerando o período de publicação de janeiro de 2014 a fevereiro de 2020 e a área do conhecimento de ensino de ciências, ensino de física, física e educação. A aplicação desses filtros ocorre em função da necessidade de se verificar quais conteúdos

relativos ao ensino de astronomia estão sendo objeto de estudo no país recentemente e como esse estudo ocorre.

Na base da Scielo, foram encontrados 12 artigos relativos ao tema. Já no catálogo da Capes, a primeira busca encontrou um número muito grande de trabalhos, razão pela qual decidiu-se restringir a busca apenas às dissertações apresentadas ao MNPEF. Essa escolha se deu em razão de ser um programa nacional, com mais de 60 polos distribuídos pelo País, o que forneceria uma visão mais ampla dos temas e das abordagens relativos ao ensino de astronomia no recorte temporal da pesquisa. Outros programas não foram considerados por serem menores e possuírem menor alcance nacional. Como resultado, foram obtidas 56 dissertações com foco no tema que, somadas aos artigos, perfazem um total de 68 trabalhos acerca do ensino de astronomia.

Todos os trabalhos analisados apresentam propostas didáticas com práticas diversificadas para o ensino de diversos tópicos de astronomia no ensino básico a partir de diferentes referenciais teóricos. Desse total, 37 são referentes ao Sistema Solar ou a seus subtemas, 5 ao tema de manuseio ou construção de instrumentos de observação, 4 à relatividade geral ou seus fenômenos correlatos, 4 à evolução estelar, 4 à astrometria e os outros 14 referem-se a tópicos diversos como, zona habitável, observatórios, planetários, raios cósmicos, matéria escura e constante de Hubble.

Tabela 1 – Quantidade de artigos e dissertações por tema e se possuem capítulo de física.

Tema	Artigos e Dissertações	Possuem Cap. Física
Sistema Solar	37	18
Instrumentos de Observação	5	4
Relatividade Geral	4	1
Evolução Estrelar	4	3
Astrometria	4	3
Astronomia Geral	3	1
Planetários	3	0
Matéria Escura	2	0
Observatórios	2	0
Astronomia Indígena	1	1
Zona Habitável	1	1
Constante de Hubble	1	1
Raios Cósmicos	1	1
Total	68	34

Fonte: Elaboração própria.

Além disso, 34 propostas apresentaram material teórico voltado ao professor, como forma de subsidiar ou complementar seus conhecimentos relativos às propostas didáticas. Desse número, 23 trabalhos apresentaram os textos em nível teórico superior ao do ensino básico, enquanto os outros 11 os apresentaram no mesmo nível exigido dos estudantes alvo das propostas. Esses dados mostram que um número significativo das iniciativas em ensino de astronomia pesquisadas têm contribuição limitada no sentido de melhorar a formação dos professores do ensino básico. A tabela 1 faz um resumo dos dados apresentados.

Dentre os diversos temas abordados, as quatro dissertações com a temática da relatividade geral merecem comentários adicionais, descritos nos próximos parágrafos. Isso porque esse é um tema amplo e capaz de desafiar os conhecimentos do dia a dia dos estudantes, além de também se desdobrar em outros assuntos de interesse, como os buracos negros e as lentes gravitacionais, que compõem a temática de organização da sequência didática contida nesta dissertação.

Sá (2015) faz uma proposta de intervenção didática a partir da Transposição Didática de Yves Chevallard contendo planos de aula e materiais de apoio acerca dos seguintes temas: história da mecânica, 2º postulado da relatividade restrita, dilatação do tempo e contração do espaço, deformação do espaço-tempo, limitações da mecânica newtoniana, equivalência massa/energia e desvio da trajetória da luz. Ele também relata que seu produto educacional foi capaz de motivar os estudantes e de promover uma visão histórica e coletiva da ciência. Por fim, diz que sua sequência didática foi capaz de promover níveis “de aprendizado dos conceitos relativísticos demonstrado nas avaliações foi igual ou superior ao dos conceitos da Mecânica Clássica tradicionalmente ensinada” (SÁ, 2015, p. 140).

A proposta de Freire (2015) faz uso da Teoria da Aprendizagem Significativa de David Ausubel para, a partir de um material didático alternativo no estilo mangá, ensinar tópicos de relatividade restrita e geral, como o princípio da equivalência, a curvatura do espaço-tempo e os buracos negros. Ele também relata que a sequência didática foi bem recebida pelos estudantes, que gostaram do tema desenvolvido e que houve “uma parcela considerável que assimilou o novo conhecimento, modificando seus subsunçores, evidenciados na atividade inicial” (FREIRE, 2015, p. 98).

Souza (2017) também utiliza a Aprendizagem Significativa para, por meio de hipermídias, ensinar conteúdos relativos à gravitação universal, ao princípio da equivalência, à precessão de mercúrio e à cosmologia de forma superficial ao abordar o paradoxo de Olbers, a geometria do universo, a radiação cósmica de fundo, a matéria escura e a energia escura em

uma única aula. Ele também relata que os estudantes alvo de sua intervenção didática se envolveram e se comprometeram com as atividades propostas, mostrando pontualidade, assiduidade e interesse pelos temas apresentados, bem como afirmaram que a hipermídia favoreceu sua aprendizagem.

Oliveira (2017) constrói um material interativo utilizando ambientes virtuais de aprendizagem, tendo como referencial teórico a Aprendizagem significativa, para ensinar a gravitação universal e os buracos negros. Também apresenta uma seção dedicada a apresentar os fundamentos teóricos dos conteúdos abordados em seu material de ensino. Ele também relata que o interesse dos estudantes pelo tema cresceu à medida que as atividades eram propostas, culminando na criação de um clube de astronomia na escola em que o produto foi aplicado e que houve aumento em seu desempenho acadêmico.

Verifica-se que, nesses trabalhos, foram produzidas propostas fracionadas acerca do tema em questão, isto é, sugerem intervenções didáticas envolvendo apenas partes da teoria, levando o estudante a uma visão compartimentada da relatividade. Por fim, apenas Oliveira (2017) apresentou conteúdo teórico voltado exclusivamente ao professor, o que contribui para incentivar a aplicação da proposta pelos educadores, que se sentirão mais confiantes em relação aos seus conhecimentos.

Por fim, é interessante neste ponto enfatizar que a escolha de um referencial teórico dentro da perspectiva cognitivista, como o de Ausubel, não limita abordagens didáticas que criem um ambiente crítico, problematizador, aprofundado ou investigativo, mesmo que também não as mobilize. Isso porque a utilização de um referencial representa apenas uma parte de todo o processo educacional, que é mais amplo e demanda, entre outros, os aspectos citados. Desse modo, cabe ao professor, em comum acordo com o sistema educacional que está inserido verificar como deve proceder para a implementação desse processo educacional em sentido amplo.

É considerando, portanto, todos os elementos relatados até o momento que apresentamos esta pesquisa de mestrado. A presente dissertação está estruturada da seguinte forma: além desta introdução, com a qual esperamos estruturar o problema de pesquisa e ensino e sua justificativa teórica, o segundo capítulo traz os aportes dos referenciais teóricos utilizados e como eles podem se complementar. O terceiro faz um resumo dos conteúdos de física presentes nas aulas; o quarto traz a sequência didática propriamente dita e o quinto, uma descrição da aplicação da sequência didática em uma sala de aula do terceiro ano do ensino

médio regular, bem como a análise dos resultados obtidos nessa aplicação. Finalmente, o sexto capítulo traz considerações complementares acerca do trabalho desenvolvido.

2- Referencial Teórico

No campo educacional, existem diferentes tipos de teorias de aprendizagem: comportamentalistas, cognitivistas e humanistas. As teorias comportamentalistas dão ênfase às respostas que o indivíduo dá aos estímulos externos e têm como alguns nomes de destaque Pavlov, Watson e Skinner. As teorias cognitivistas têm foco na atividade mental humana e se ocupam da recepção, compreensão, armazenamento e uso da informação, tendo como nomes de destaque Bruner, Piaget, Vygotsky e Ausubel. Já as teorias humanistas se interessam pelo ser humano como um todo, seus pensamentos, sentimentos e ações são importantes, não se limitando apenas ao seu intelecto, e têm como nomes de destaque Freire, Rogers, Novak e Lipman (MOREIRA, 2011).

Dentre as teorias de aprendizagem, pode-se fazer outra divisão: as teorias psicológicas de aprendizagem e as teorias de educação. As teorias psicológicas de aprendizagem possuem natureza eminentemente descritiva. Elas são produzidas com o objetivo de explicar os fenômenos relacionados aos processos de aquisição, retenção e utilização do conhecimento, fornecendo as condições necessárias para a ocorrência da aprendizagem. Porém, dão pouca ou nenhuma ênfase em como se deve proceder para que se alcance a aprendizagem (SILVA FILHO *et al.*, 2020).

Já as teorias da educação possuem natureza eminentemente normativa e vão além da descrição; elas têm relação profunda com o tipo de indivíduo que se deseja formar em determinadas condições. Isto porque submetem métodos e valores, além de dar ênfase a aspectos culturais, sociais, éticos, morais etc. (SILVA FILHO *et al.*, 2020).

Essas duas classificações citadas acima não são opostas, mas complementares, pois é no entrelaçamento entre elas que se estrutura de forma mais complexa um processo de ensino. Isto é, as teorias normativas são as responsáveis por selecionar os elementos que consideram mais importantes dentro do contexto de sala de aula e, para alcançar sua finalidade, utiliza-se do suporte das teorias psicológicas de aprendizagem. Em alguns casos, as teorias educacionais podem definir os parâmetros que caracterizam a aprendizagem (SILVA FILHO *et al.*, 2020).

No escopo desta dissertação, esse entrelaçamento é feito a partir das ideias de David Ausubel, com sua Teoria da Aprendizagem Significativa (eminentemente descritiva), e de Matthew Lipman, com seu Programa de Filosofia para Crianças e Adolescentes (eminentemente normativo).

A escolha desses referenciais se dá, no caso de Ausubel, por seus aportes teóricos relativos ao processo de assimilação do conhecimento, que pode ocorrer de forma subordinada, superordenada ou combinada em relação a outros conhecimentos já presentes na estrutura cognitiva dos estudantes, dando grande importância ao que eles já sabem, seus subsunçores. O conhecimento assimilado é, então, armazenado na estrutura cognitiva dos estudantes e passa a se relacionar de forma hierarquizada com seus respectivos subsunçores. Essa hierarquia de conhecimentos é semelhante à estrutura de saberes desenvolvidos no âmbito de uma ciência, como a física, sendo este um facilitador de sua aprendizagem.

Já no caso de Lipman, a escolha se dá por sua ênfase no chamado pensamento de ordem superior, que visa desenvolver, nos estudantes, sua capacidade crítica a respeito da sociedade que estão inseridos. Lipman também prescreve um método, as comunidades de investigação, capaz de auxiliar os estudantes a desenvolverem suas habilidades de modo a alcançarem o pensar de ordem superior.

Desse modo, é possível perceber que a aplicação apenas da teoria de Ausubel, que é descritiva, se mostraria insuficiente – ou incongruente, a rigor – em um contexto concreto de sala de aula, uma vez que ela não considera aspectos específicos dos indivíduos participantes do processo educacional. Isto é, por possuir elementos relativos à aquisição de conhecimento essencialmente abstratos, a teoria pouco diz sobre como ensinar determinado estudante dentro de sua sala de aula. Com isso, ao articulá-la à proposta de Lipman, normativa e com ênfase no pensamento, incluem-se nesse processo as variáveis não previstas, relativas aos indivíduos e à forma de ensiná-los.

Tendo em vista o exposto, as subseções seguintes buscam fazer um apanhado da Teoria da Aprendizagem Significativa e do Programa de filosofia para Crianças e Adolescentes bem como mostrar como esses dois aportes teóricos podem trabalhar em conjunto de modo a se obter, ao final, um processo educacional balizado.

2.1- A TEORIA DA APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA DE DAVID AUSUBEL

A aquisição de novas informações acerca de determinado campo conceitual por um indivíduo é altamente influenciada pelos conhecimentos presentes em sua estrutura cognitiva (AUSUBEL, 1968), entendida como uma estrutura hierarquizada e sequencial de fatos, conceitos, proposições, teorias e conhecimento bruto que um indivíduo tem, internamente, à sua disposição em um determinado momento (AUSUBEL; ROBINSON, 1969).

A aprendizagem significativa, conceito de grande importância na teoria de Ausubel, está diretamente relacionada à estrutura cognitiva do sujeito e ocorre quando uma nova informação interage de forma não literal e não arbitrária com elementos relacionáveis, chamados de subsunçores, presentes em sua estrutura cognitiva (AUSUBEL, 1968). A não literalidade da interação indica que ela não será alterada, caso a nova informação seja apresentada ao indivíduo, em outro momento, de forma diferente, porém equivalente. Já a não arbitrariedade indica que a interação deve ocorrer, necessariamente, com os subsunçores relacionados à nova informação (AUSUBEL; ROBINSON, 1969).

Desse modo, todo o conhecimento acumulado por um indivíduo ao longo de sua vida caracteriza sua estrutura cognitiva, cada subconjunto de saberes acerca de determinada área do conhecimento, como a gravitação ou astronomia, caracteriza os subsunçores desse indivíduo em relação à sua respectiva área do saber. Já a aprendizagem significativa de um conteúdo, como a Lei da Gravitação Universal de Newton, ocorre quando os novos conhecimentos interagem de forma não arbitrária e não literal com os subsunçores do estudante, neste caso específico, com seus subsunçores relacionados à gravitação e à astronomia.

Percebe-se diante do exposto que, para a ocorrência da aprendizagem significativa, é necessário que o estudante possua, em sua estrutura cognitiva, um conhecimento que possa ser relacionável ao novo saber, isto é, possua os subsunçores adequados. Porém, essa não é a única condição para a aprendizagem significativa, havendo outras duas.

A segunda condição é que o material apresentado seja relacionável de forma não arbitrária e não literal a uma estrutura cognitiva hipotética que contém os subsunçores adequados ao seu conteúdo, isto é, o material utilizado deve ser logicamente significativo (AUSUBEL; ROBINSON, 1969). Em um caso concreto, quando o material é relacionável aos subsunçores do estudante, ele se torna um material potencialmente significativo para ele.

Observa-se que a aprendizagem significativa está intimamente ligada ao que o estudante já sabe, pois, do contrário, mesmo que o material utilizado possua significado lógico, ele não será relacionado de forma não literal e não arbitrária à sua estrutura cognitiva. Isso faz com que seja de suma importância para o professor descobrir quais subsunçores seus estudantes possuem acerca do tema que se quer ensinar.

Essa sondagem dos subsunçores pode ser realizada, por exemplo, ao mostrar imagens de buracos negros e pedir que os estudantes respondam o que elas representam. A partir das respostas, o professor pode verificar se eles sabem o que são os buracos negros (subsunçores

bem formados), se têm ideias acerca da gravitação e da relatividade (subsunçores em formação) ou se não possuem qualquer conhecimento do tema (não há subsunçores).

Já a terceira condição é que o estudante tenha a intenção de integrar o novo conhecimento de forma não literal e não arbitrária à sua estrutura cognitiva (AUSUBEL; ROBINSON, 1969). Ou seja, a aprendizagem significativa está diretamente ligada ao desejo desse estudante de aprender a nova matéria de ensino e, conseqüentemente, a sua motivação em sala de aula. Desse modo, estratégias diferenciadas, como a apresentação do conteúdo a partir de simulações, demonstrações, vídeos, discussões, entre outras, podem ser facilitadoras da aprendizagem significativa.

De forma sintética, para que o professor possa criar um ambiente propício à ocorrência da aprendizagem significativa, ele deve ter à sua disposição: a) conhecimento dos subsunçores dos seus estudantes; b) material potencialmente significativo para eles e; c) que estejam dispostos a aprender o conteúdo de forma significativa.

A ausência de algum desses itens pode levar à ocorrência da aprendizagem mecânica, em que o novo conhecimento é integrado na estrutura cognitiva do indivíduo de forma arbitrária ou literal (AUSUBEL, 1968), fazendo com que esse novo saber seja incorporado de modo pouco estável pelo sujeito da cognição, o que facilita, assim, seu esquecimento. Por exemplo, um estudante que é apresentado ao tópico de lentes gravitacionais sem possuir subsunçores acerca da deformação espaço-temporal causada por objetos massivos tenderá a aprendê-lo de forma mecânica, uma vez que o novo conhecimento não terá uma base para ancorar-se em sua estrutura cognitiva.

Apesar de parecerem conceitos antagônicos, as aprendizagens significativa e mecânica são complementares. Em muitos casos, o novo conhecimento apresentado é completamente novo para os estudantes e sua aprendizagem somente pode ocorrer de forma mecânica. À medida que mais elementos são adicionados à estrutura cognitiva, eles podem ser utilizados como subsunçores, mesmo que precários, para novos tópicos relativos às suas áreas (MOREIRA, 2011).

Como exemplo, pode-se apresentar uma cena do filme *Interestelar* (2014), em que os personagens orbitam um buraco negro enquanto têm um diálogo explicando o que ele é e também a deformação do espaço-tempo. Ao fazer isso, o professor está promovendo, nos estudantes que não possuem subsunçores adequados, a aprendizagem mecânica desses conceitos, que poderão servir de base para o estudo, mais adiante, dos buracos negros e das lentes gravitacionais, considerados hierarquicamente mais complexos.

Nesse exemplo, o filme faz o papel de um organizador avançado, um material introdutório que apresenta os novos tópicos de forma genérica e inclusiva, de modo a manipular a estrutura cognitiva do estudante, fazendo surgir subsunçores instáveis, acerca dos buracos negros e da deformação do espaço-tempo, que servirão de âncora para o conteúdo a ser ensinado. Caso o estudante possua subsunçores adequados, essa manipulação também pode ser no sentido de fazê-lo perceber sua relevância em relação aos novos tópicos (AUSUBEL; ROBINSON, 1969).

Cabe explicar, acerca do organizador avançado, que os trabalhos em língua portuguesa sobre a aprendizagem significativa traduzem o termo original, *Advance Organizer*, como organizador prévio. Porém, entendemos que essa tradução ocasiona divergência de significado, pois passa a impressão que o organizador é apenas um material introdutório, um prefácio do tema em estudo, quando ele é mais que isso: um material que deliberadamente tenta modificar a estrutura cognitiva do estudante de modo a facilitar a aprendizagem significativa, o que o torna, de fato, organizador avançado.

Esse tipo de aprendizagem - a significativa - pode ser dividido em três tipos, a depender da complexidade como ocorrem as relações na estrutura cognitiva do indivíduo.

O primeiro e mais básico tipo de aprendizagem significativa é a representacional, que consiste, basicamente, na atribuição de significados à símbolos (palavras ou imagens). Nela, o indivíduo relaciona em sua estrutura cognitiva, de forma relativamente não arbitrária e não literal, uma determinada palavra ou imagem ao objeto que representa (AUSUBEL; ROBINSON, 1969). Ocorre principalmente em crianças, mas também pode ocorrer em adultos, quando se deparam com algum símbolo desconhecido, como quando chegam à graduação e se deparam, na disciplina Física 1, com o símbolo matemático da integral \int .

Por exemplo, uma criança, em seus primeiros anos na escola, vê a imagem do planeta Terra em seu livro de ciências, logo abaixo da palavra planeta. Inicialmente ela armazena em sua estrutura cognitiva, tanto a imagem da Terra, quanto a palavra planeta, de forma arbitrária e literal. Em outro momento, ao assistir alguma animação em sua casa, vê um personagem apontando para a Terra e a chamando de planeta. Após algumas situações similares, a criança começa, então, a relacionar a imagem da Terra à palavra planeta.

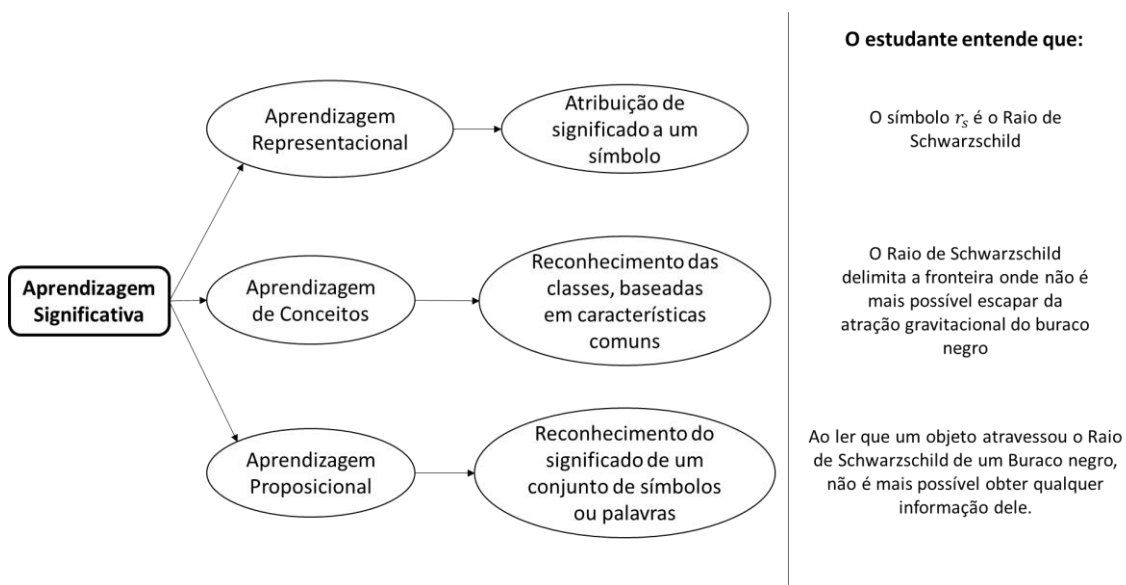
O segundo tipo é a aprendizagem de conceitos, na qual o indivíduo passa a reconhecer uma série de objetos, fenômenos ou acontecimentos, como pertencentes a uma mesma classe, baseado em suas características comuns (AUSUBEL; ROBINSON, 1969).

Voltando ao exemplo anterior, quando a criança encontra outros astros, como Marte ou Saturno, em seu livro didático ou em documentários, também sendo relacionados à palavra planeta, ela passa a perceber suas características comuns, como serem aproximadamente esféricos, grandes, orbitarem o Sol. Isso as faz relacionarem o conjunto dessas características à palavra planeta e não mais apenas à Terra.

O terceiro tipo de aprendizagem é a aprendizagem proposicional, em que o indivíduo entende o significado por traz de um conjunto de palavras ou conceitos, normalmente em forma de sentença. Também entende que esse significado é maior que a soma dos seus significados individuais (AUSUBEL, 1968).

Ainda em relação ao exemplo anterior, a criança lê uma proposição em que é explicado que os planetas do sistema solar orbitam a estrela chamada Sol e consegue entender que, para além dos conceitos isolados de planeta, órbita e estrela é possível perceber a importância do Sol como elemento central do sistema solar. A figura a seguir traz um esquema simplificado desses tipos de aprendizagem:

Figura 1 – Tipos de aprendizagem significativa.



Fonte: Elaboração Própria.

Assim como a aprendizagem significativa pode ser dividida em três tipos, a forma como ocorrem as relações entre o novo material de estudo e os subsunçores do indivíduo durante o processo de ocorrência da aprendizagem significativa também o pode.

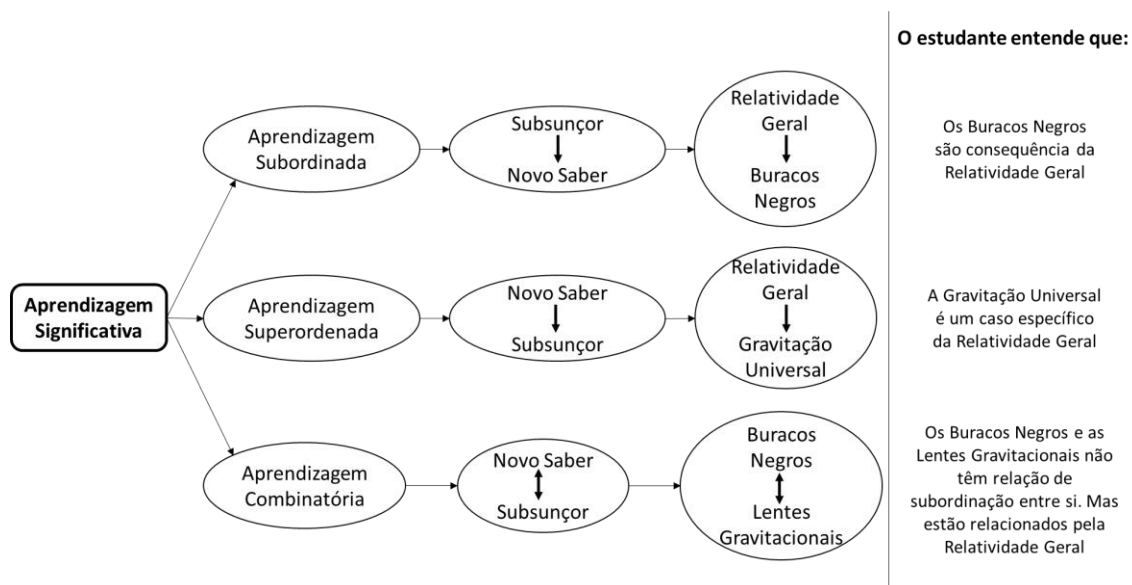
A primeira (e mais comum) forma dessas relações é a subordinada, em que as novas ideias são ancoradas na estrutura cognitiva em uma relação hierárquica inferior aos subsunçores existentes, mais gerais e inclusivos. Isto é, o novo material é visto como uma particularização

de algum conceito já conhecido pelo estudante ou como uma extensão, complementação ou subdivisão desse conceito (AUSUBEL; ROBINSON, 1969).

A segunda forma das relações é a superordenada, em as novas ideias são ancoradas na estrutura cognitiva em uma relação hierárquica superior aos subsunçores existentes. Isto é, o novo conhecimento é visto como um caso geral de um ou mais subsunçores do estudante (AUSUBEL; ROBINSON, 1969).

A última forma das relações é a combinatória, em que o novo material não se encaixa em uma relação hierárquica inferior nem superior aos subsunçores existentes. Isto é, ele não é capaz de ser subordinado nem de ser superordenado por algum subsunçor específico, porém, ainda é relacionável, de modo geral, a um conjunto de conceitos existente na estrutura cognitiva (AUSUBEL, 1968). A figura a seguir mostra um esquema das formas em que a aprendizagem significativa pode ocorrer:

Figura 2 – Formas em que a aprendizagem significativa pode ocorrer.



Fonte: Elaboração Própria.

De modo a explicar melhor como ocorre a aquisição, a retenção e a organização dos novos conhecimentos na estrutura cognitiva do indivíduo, Ausubel (1968) introduz o princípio da assimilação. Esse princípio diz que, durante o processo da aprendizagem significativa, ambos os conceitos, tanto o a ser aprendido, quanto o subsunçor são modificados de modo a formar um novo conceito mais complexo.

Ausubel (1968) exemplifica esse processo a partir de algum conhecimento (A), presente na estrutura do estudante. O novo conhecimento (a) ao qual o estudante é submetido interage com seu respectivo subsunçor (A) e faz com que ambos se modifiquem, formando uma nova

estrutura (A`,a`). Esse subsunçor modificado passa, então, por um novo processo, chamado de assimilação obliteradora, no qual tanto (A`) quanto (a`) tornam-se cada vez menos dissociáveis até que sobre apenas o novo subsunçor (A`), membro mais estável da interação original.

Para que a aprendizagem significativa seja facilitada, deve-se haver a manipulação intencional, por parte do professor, de aspectos relevantes à matéria de ensino na estrutura cognitiva do estudante. Para tanto, devem ser utilizadas seqüências de materiais construídas de forma lógica, organizada e que se utilizem dos conceitos unificadores, inclusivos e gerais dentro do campo em estudo (AUSUBEL, 1968). Essas características são importantes porque a estrutura cognitiva é constituída de elementos organizados e hierarquizados, em que há um conceito central que serve de âncora para outros dentro de cada área do conhecimento.

Com base nessa organização e hierarquização da estrutura cognitiva, Ausubel (1968) entende que o material de ensino deve ser organizado seguindo o princípio da diferenciação progressiva, em que os conceitos mais gerais da matéria de ensino são apresentados primeiro para, só então, serem progressivamente diferenciados em seus conceitos e detalhes mais específicos. Ao afirmar isso, Ausubel se baseia em dois pressupostos:

(a) É menos difícil para seres humanos compreenderem os aspectos diferenciados de um todo mais inclusivo e anteriormente aprendido do que formular esse todo a partir de suas partes diferenciadas e (b) a organização que um indivíduo faz acerca do conteúdo de uma determinada disciplina em sua mente consiste em uma estrutura hierárquica na qual as ideias mais inclusivas ocupam seu ápice e subsumem progressivamente as proposições, conceitos e dados factuais menos inclusivos e altamente diferenciados (AUSUBEL, 1968, p. 152, tradução nossa).

Mesmo entendendo que o material de ensino deve seguir, principalmente, o princípio da diferenciação progressiva, em alguns momentos deve ser considerado o princípio da reconciliação integrativa, em que o material é organizado de modo a explicitar semelhanças e diferenças entre diferentes conceitos e, também, a reconciliar inconsistências reais ou aparentes entre os tópicos apresentados aos estudantes (AUSUBEL; ROBINSON, 1969).

Pelo que foi visto até o momento, é possível perceber que a teoria de Ausubel é predominantemente descritiva, pois, de fato, descreve um método pelo qual o conhecimento é assimilado pelo indivíduo, desde que determinados requisitos sejam atendidos, como a presença de subsunçores adequados e à disposição do estudante em aprender. Ao fazer isso, ela nada informa acerca do tipo de indivíduo que se quer formar, isto é, ela ignora aspectos normativos morais, políticos e históricos, bem como o contexto social no qual o estudante está inserido (FERREIRA *et al.*, 2020).

Desse modo, a teoria de Ausubel sozinha não supre os aspectos normativos necessários para se entender o estudante, com todas as suas características individuais, presente nas salas de aula, mas isso não quer dizer que seja uma falha dela, até porque esse não é o seu compromisso epistemológico.

Então, para se compreender melhor esse estudante e, conseqüentemente, facilitar seu processo de aprendizagem, deve-se fazer uso, também, de alguma teoria a mais e que possua características eminentemente normativas, como é o caso do Programa de Filosofia para Crianças e Adolescentes de Matthew Lipman, que será melhor descrito na subseção a seguir. Isso porque as características normativas da teoria de Lipman, que envolvem o pensar de ordem superior, interagem com as características descritivas de Ausubel de modo a minimizar sua abstração e a fornecer elementos metodológicos direcionados à sala de aula em seu contexto concreto (SILVA FILHO *et al.*, 2020).

Ao fazer com que as teorias, normativas e descritivas, operem conjuntamente, surge uma inter-relação positiva entre elas, na qual ambas são aperfeiçoadas com o objetivo de se obter uma educação que abranja tanto aspectos conteudistas quanto relativos ao indivíduo formado (SILVA FILHO; FERREIRA, 2018). Isto é, Lipman contribui com seus aspectos normativos de forma a se entender os estudantes alvo do processo educacional no contexto concreto de suas salas de aula, a partir da forma como expressam seus pensamentos. Já Ausubel utiliza-se das características exibidas por esses estudantes para, com seus aspectos descritivos, formalizar um método adequado a eles para a ocorrência da aprendizagem significativa.

2.2 - O PROGRAMA DE FILOSOFIA PARA CRIANÇAS E ADOLESCENTES DE MATTHEW LIPMAN

Lipman propõe o pensamento de ordem superior como elemento central de sua teoria. Esse pensar se caracteriza por ser “[...] conceitualmente rico, coerentemente organizado e persistentemente investigativo” (LIPMAN, 1995, p. 37). O objetivo do programa de Lipman é ajudar a desenvolver esse tipo de pensamento nas crianças e adolescentes e, com isso, auxiliá-las a serem mais reflexivas, terem mais consideração e a serem mais razoáveis (LIPMAN; SHARP; OSCANYAN, 1997).

Desse modo, Lipman entende que seu programa é capaz de ajudar os estudantes a pensarem, refletirem e desenvolverem, cada vez mais, sua capacidade de serem criteriosos e a usarem a razão, bem como é capaz de desafiá-los a organizarem e criticarem o que pensam a

respeito dos valores da sociedade que, de algum modo, a escola transforma ou perpetua (SOUZA, 2013).

Já é possível perceber nesse ponto, como Ausubel e Lipman podem se complementar, enquanto para o primeiro, a aprendizagem significativa é seu objetivo maior, para o segundo é o desenvolvimento do pensamento. Com isso, ao trabalharem em conjunto, as propostas se unem visando à aprendizagem significativa de algum tópico ao mesmo tempo que desenvolvem no estudante habilidades importantes para a vida em sociedade.

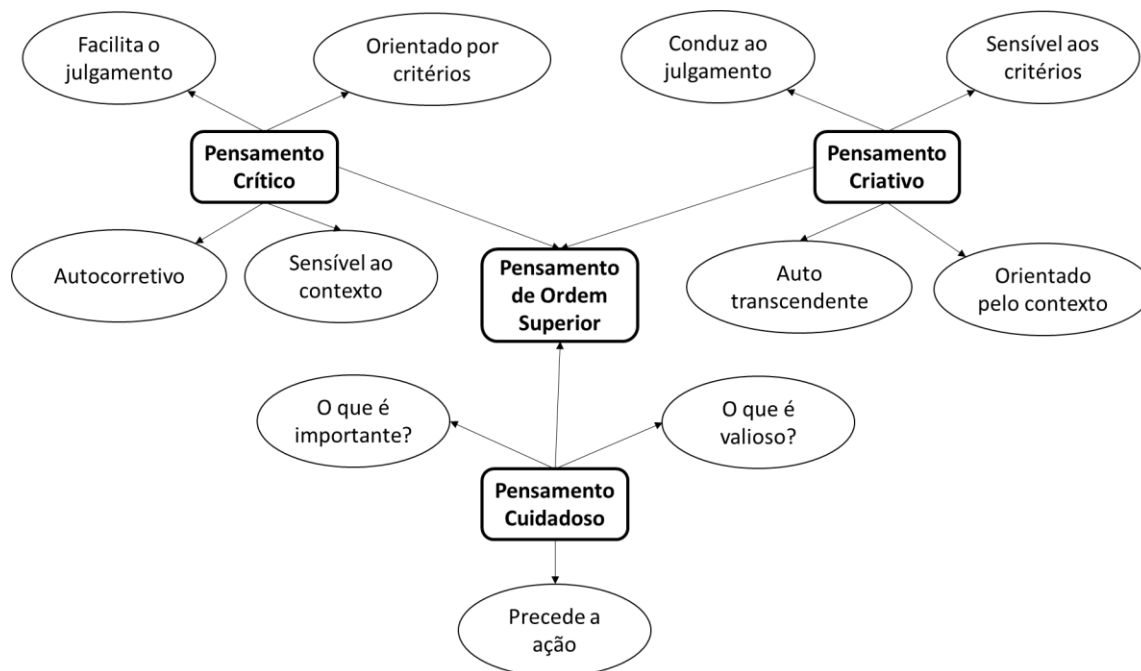
Indivíduos com o pensamento de ordem superior bem desenvolvido tendem a saber melhor quando devem ou não agir, são mais ponderados ao enfrentarem alguma situação nova e também são mais capazes para decidir o melhor momento para adiá-las ou evitá-las, caso entendam ser necessário (LIPMAN; SHARP; OSCANYAN, 1997). Essas características fazem do pensamento de ordem superior uma ferramenta importante para o enfrentamento dos desafios diários existentes no mundo atual. Para que ele seja alcançado, Lipman entende que devem ser desenvolvidas três formas de pensar: a crítica, a criativa e a cuidadosa.

O pensamento crítico é o que “1) facilita o julgamento pois 2) se fundamenta em critérios, 3) é autocorretivo, e 4) é sensível ao contexto” (LIPMAN, 1995, p. 172). É fundamentado por critérios, pois é bem justificado, estruturado e reforçado. É autocorretivo porque busca suas próprias falhas e fraquezas para, então, corrigi-las. É sensível ao contexto, pois reconhece e considera circunstâncias excepcionais, limitações ou eventualidades especiais e, também, configurações globais.

O pensamento criativo é o “[...] que conduz ao julgamento, que é orientado pelo contexto, é auto transcendente e sensível aos critérios” (LIPMAN, 1995, p. 279). É orientado pelo contexto pois, pelo fato de ser criativo, entende melhor as circunstâncias excepcionais, as limitações ou eventualidades especiais e, também, as configurações globais. É autotranscendente porque procura ir além de si mesmo de modo a alcançar a totalidade. É sensível aos critérios pois, apesar de não os priorizar, como no pensamento crítico, ainda os considera.

Já o pensamento cuidadoso é aquele que surge antes da execução de alguma ação e considera tudo o que o indivíduo entende ser importante e valioso para seu argumento (SILVA FILHO; FERREIRA, 2018). A figura a seguir faz um esquema simplificado das características das três formas de pensamento descritas.

Figura 3 – Características das formas de pensar que conduzem ao Pensamento de Ordem Superior.



Fonte: Elaboração própria.

O uso das palavras “sensível a” e “orientado por” indica uma diferença sutil na forma como os pensamentos crítico e criativo lidam com suas características. Ao indicar que um pensamento é “orientado por”, Lipman (1995) sugere uma intensidade maior da característica apontada que se tivesse utilizado “sensível a”.

Nesse mesmo contexto, Lipman (1995) ainda afirma que o pensamento crítico é orientado pela verdade e sensível ao significado enquanto o pensamento criativo é orientado pelo significado e sensível à verdade. Isto é, ambos buscam a verdade e o significado, porém em intensidades diferentes. Ao inserir o cuidado na busca pela verdade e significado, surge uma articulação capaz de levar ao pensamento de ordem superior.

Nesse ponto, é possível perceber mais uma vez a coesão entre Ausubel e Lipman, em que a percepção, pelo professor, do desenvolvimento das três formas de pensar já descritas também pode ser utilizada como um indicador da aprendizagem significativa do tópico em estudo. Nesse sentido, Silva Filho *et al.* (2020) entendem que os comportamentos específicos das formas de pensar, as competências, possibilitam a medição da variável aprendizagem significativa.

Cabe esclarecer que Lipman não se refere às formas de pensar (crítica, criativa, cuidadosa) como competências. Porém, ao entendê-las como tal, faz-se uma aproximação com a sala de aula: “[...] no sentido de especificar quais comportamentos devem ser considerados apropriados para a caracterização de uma aprendizagem significativa e, deste modo, possibilitar

a medição da variável latente ‘aprendizagem significativa’ [...]’ (SILVA FILHO *et al.*, 2020, p. 30).

De modo a se chegar ao pensamento de ordem superior e, conseqüentemente, aos indicativos da ocorrência da aprendizagem significativa, é necessário que o indivíduo desenvolva algumas habilidades cognitivas de ordem superior. De acordo com Lipman (1995), no contexto educacional, essas habilidades são as descritas a seguir.

A habilidade de raciocínio está ligada à prática de se chegar a conclusões, a partir de argumentação solidamente formulada e coesa (investigação), tendo como base apenas algum conhecimento prévio.

A habilidade de formação de conceitos está relacionada à organização de informações em grupos conceituais mais complexos, isto é, perceber vínculos entre conceitos simples com a finalidade de formar conceitos mais complexos.

A habilidade de investigação está relacionada à prática de formular problemas e de solucioná-los, a partir de processos conectados ao método científico e, por isso, é uma prática de autocorreção.

A habilidade de tradução diz respeito à capacidade de transmissão dos significados captados de um sistema de signos para outros sem perda de sentido, isto é, é a capacidade de compreender e reproduzir as informações recebidas em outra linguagem.

Como será visto na análise da aplicação do produto educacional desta dissertação, a seguinte situação pode ser considerada um exemplo da utilização de suas habilidades de raciocínio e de pensamento criativo: um estudante interrompe uma demonstração em que bolinhas de gude simulam objetos celestes sendo arremessados próximos a grandes massas e pergunta se um meteoro irá entrar em órbita caso sua trajetória passe próxima ao Sol na velocidade adequada.

Assim como ocorre com as formas de pensar (as competências), as habilidades de ordem superior são capazes de explicitar as a aquisição das competências. Isto é, a verificação da utilização dessas habilidades é evidência da aprendizagem significativa. Em sentido amplo, ao dizer quais habilidades devem ser desenvolvidas, também se especifica o que caracteriza a aprendizagem significativa (SILVA FILHO *et al.*, 2020).

Como forma de desenvolvimento dessas habilidades e, conseqüentemente, do pensamento de ordem superior e da aprendizagem significativa, Lipman (1995) propõe que as salas de aula sejam transformadas em comunidades de investigação, um elemento metodológico e uma prática concreta para a sala de aula:

[...] na qual os alunos dividem opiniões com respeito, desenvolvem questões a partir das ideias de outros, desafiam-se entre si para fornecer razões a opiniões até então não apoiadas, auxiliarem uns aos outros ao fazer inferências daquilo que foi afirmado e buscar identificar as suposições de cada um (LIPMAN, 1995, p. 31).

Desse modo, a comunidade de investigação é guiada pelo processo dialógico de seus membros e, em um momento inicial, o conhecimento é apresentado pelos próprios estudantes, que externalizam seus conhecimentos prévios (os subsunçores) para, então, serem debatidos entre todos e aperfeiçoados, ou corrigidos, pelo professor (dentro dos processos de diferenciação progressiva e reconciliação integrativa) e, no fim, chegarem a uma conclusão (a aprendizagem significativa).

Uma forma de se viabilizar uma comunidade de investigação em sala de aula é a sua divisão em pequenos grupos, que realizarão um debate interno acerca de algum assunto, introduzido por meio de um organizador prévio, como um texto ou um vídeo. Após essa discussão interna, o professor, então, abre e guia o debate para toda a turma, viabilizando que cada grupo exponha e debata as suas conclusões internas, formando assim uma grande comunidade de investigação.

Exemplo disso é o que foi feito em uma das unidades do produto educacional apresentada neste trabalho. Foi solicitado que os estudantes se dividissem em grupos para leitura e discussão de um pequeno texto acerca do histórico dos estudos dos buracos negros. Após, o professor medeia uma nova discussão, dessa vez entre os grupos, de modo a se chegar a um entendimento comum do tópico tratado.

Para tanto, o professor deve dispor de um roteiro contendo os tópicos que devem ser tratados na discussão, que pode ser em forma de perguntas a serem respondidas pelos grupos como “Os cientistas antes de Einstein já tinham pensado em estruturas como os buracos negros? Como elas eram? Baseadas em que corrente científica?” ou “Como a 2ª GM influenciou a ciência em geral? E a guerra fria?”, por exemplo.

Desse modo, as perguntas atuam de forma a fazer os estudantes expressarem suas opiniões acerca do tema e, também, a ouvirem e pensarem em formas de complementar ou corrigirem os colegas com o objetivo de chegarem a uma resposta de consenso. O professor atua como guia dos estudantes em direção à resposta aceita dentro do contexto científico em estudo.

Dentro do processo defendido por Lipman, a conclusão a que chega a comunidade de investigação é menos relevante que o processo que leva a ela. Isto implica dizer que o objetivo principal das comunidades é o desenvolvimento das habilidades de ordem superior de seus

membros. Porém, ao se fazer com que as ideias de Lipman se articulem às de Ausubel, o professor deve fazer intervenções nos debates de modo a guiar os estudantes à resposta considerada correta dentro do contexto em que está sendo ensinada, visando, com isso, à aprendizagem significativa dos tópicos de ensino. Isto mostra que as propostas não são excludentes, mas complementares, pois o foco passa a ser o alcance da aprendizagem significativa através do desenvolvimento das habilidades de ordem superior.

Pelo exposto, é possível perceber que o professor tem um papel de grande importância, pois ele é o responsável por estabelecer os direcionamentos necessários à obtenção das conclusões adequadas aos tópicos em estudo ao mesmo tempo em que estimula o pensamento de ordem superior.

Nesse contexto, ele é o responsável por construir e apresentar os organizadores prévios e essa intervenção deve ser feita dentro da comunidade de investigação, nunca fora dela, isto é, o professor deve apresentar-se como um igual aos seus estudantes, não como seu superior (SILVA FILHO; FERREIRA, 2018). Desse modo, ele não deve impor sua autoridade aos estudantes, como ocorre corriqueiramente nas aulas expositivas, mas deve participar ativamente da comunidade, ouvindo seus participantes e mostrando os argumentos necessários à obtenção de seus objetivos.

Como resultado da aplicação dos referenciais aqui expostos, o capítulo 4 desta dissertação traz uma sequência didática – para aplicação, preferencialmente, no terceiro ano do ensino médio – cujo propósito é a aprendizagem significativa de tópicos relacionados à gravitação. Essa sequência é composta por quatro módulos, com um total de vinte aulas, em que cada um trata de um subtema específico: 1- Gravitação Universal e Sistema Solar; 2- Relatividade Geral; 3- Buracos Negros e; 4- Lentes Gravitacionais.

O primeiro módulo é estruturado de modo que o professor possa verificar se os estudantes possuem os subsunçores adequados para a ocorrência da aprendizagem significativa da matéria de ensino. Ele também atua como estabilizador e, em caso de sua ausência, gerador desses subsunçores. O segundo módulo utiliza esses subsunçores para introduzir uma nova teoria física na estrutura cognitiva dos estudantes, a relatividade geral. Por sua vez, esses novos conhecimentos atuam como subsunçores para os tópicos abordados nos módulos 3 e 4. No fim, espera-se que o estudante assimile o novo conhecimento de forma hierárquica em sua estrutura cognitiva e entenda que a gravitação universal pode ser entendida como um caso limite da relatividade geral e que os fenômenos dos buracos negros e lentes gravitacionais são consequências diretas dela.

Para tanto, a sequência didática faz uso de estratégias diversificadas de ensino, como vídeos, imagens, simulações, demonstrações, questionários, textos, explicações e discussões, para manter o interesse dos estudantes pela matéria de ensino. As discussões, em especial, têm um papel a mais: o de desenvolver o pensamento de ordem superior dos estudantes. Isso porque é durante cada discussão que a comunidade de investigação ganha força e as habilidades de ordem superior são mais necessárias. Além disso, o desenvolvimento de tais habilidades, que pode ser verificado a partir da evolução das falas dos estudantes durante as discussões pode ser utilizado como um parâmetro para medir a aprendizagem significativa dos tópicos estudados.

3- Síntese dos tópicos de Física

3.1- Tópicos de Gravitação Universal

A ideia da Lei de Gravitação Universal (LGU) foi formalizada por Newton, pela primeira vez, em 1685, na obra intitulada *Sobre os Movimentos dos Corpos e*, de forma definitiva, em 1687, na obra *Princípios Matemáticos da Filosofia Natural* (ROCHA *et al.*, 2002).

Nelas, Newton unifica a física relativa aos corpos terrestres e celestes que, até então, eram tratadas como áreas distintas em uma única lei, a LGU. Essas duas físicas diziam respeito ao que mantinha os corpos presos à Terra e ao que causaria o movimento dos corpos celestes. A LGU traz uma explicação única para esses fenômenos, a de que há uma força de atração mútua entre todos os corpos, que independe de serem terrestres ou celestes e que pode ser resumida na seguinte sentença matemática: em que F é a força de atração, m é a massa dos corpos, G é a constante de gravitação universal e r^2 é a distância entre os corpos:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \hat{r} \quad (1)$$

Isto é, a matéria atrai matéria na razão direta de suas massas e na razão inversa do quadrado das distâncias que as separam.

Um fator de grande importância da LGU é que ela trata como iguais tanto a força que faz um livro cair no chão como a força que faz a Terra orbitar o Sol. Isto é, ela acabou “[...] com mais de dois milênios de dicotomia aristotélica entre o imperfeito e transitório mundo terrestre e o perfeito e imutável universo dos céus” (ROCHA *et al.*, 2002, p. 105).

Cabe esclarecer que, apesar de sua grande obra, Newton não pôde sozinho receber todo o mérito de suas descobertas. Para chegar a elas, ele foi influenciado pelos trabalhos de vários outros cientistas, como Galileu, Brahe, Halley e Kepler, por exemplo.

A LGU, em conjunto com as leis de Newton para o movimento, foi capaz de explicar as Leis de Kepler, que descreviam o movimento dos planetas do Sistema Solar, sem atribuir-lhes uma causa física. A partir dela, também foi possível explicar as pequenas oscilações nas órbitas de Júpiter e de Saturno, que eram devidas à força gravitacional que os próprios planetas exerciam entre si, em escala muito menor que o Sol.

No caso das variações na órbita de Urano, a LGU parecia não ser capaz de explicá-las consistentemente. Porém, de forma independente, os astrônomos Le Verrier e John Adams pensaram na possibilidade de que a órbita de Urano poderia ser influenciada por outro planeta, até então desconhecido, e calcularam sua possível posição. O novo planeta (Netuno) foi

visualizado em 1846, na posição prevista pelos astrônomos (FEYNMAN; LEIGHTON; SANDS, 2008).

Cálculos realizados, entre 1862 e 1904, para o movimento de estrelas binárias, mostraram que a LGU permanecia sólida, mesmo para massas tão grandes; o experimento de Cavendish, em 1797, também mostrou a relação do inverso quadrado de Newton de forma satisfatória. Esta última ainda foi a primeira experiência capaz de calcular o valor da constante de gravitação universal G , obtendo o valor de $G = 6,670 \times 10^{-11} Nm^2/Kg^2$ (FEYNMAN; LEIGHTON; SANDS, 2008).

Desse modo, a LGU de Newton mostrou-se robusta durante mais de dois séculos. Porém, apesar de sua eficiência em descrever vários fenômenos gravitacionais, a LGU ainda falhava ao fazê-lo acerca da órbita de mercúrio, além de não concordar com a relatividade restrita, que, por sua vez, já havia modificado as leis do movimento de Newton. O esforço de Einstein para resolver esses problemas culminou em sua teoria da relatividade geral.

3.2- Tópicos de Relatividade Restrita e Geral

A Teoria da Relatividade Restrita (TRR) foi apresentada por Einstein, em 1905, como forma de corrigir problemas relacionados à mudança de referenciais para as equações de Maxwell do eletromagnetismo. Já a Teoria da Relatividade Geral (TRG) foi apresentada em quatro artigos preliminares, em 1915, e um consolidado em 1916; ela, além de generalizar a TRR para qualquer tipo de referencial, também é uma teoria que modifica as bases da gravitação de Newton.

Iniciando com a TRR, ela é baseada em dois postulados fundamentais:

- 1) "todos os observadores inerciais são equivalentes" (D'INVERNO, 1992, p. 19). Isto é, um observador em um referencial inercial \mathcal{O} deve obter as mesmas leis físicas que outro observador em um referencial \mathcal{O}' ;
- 2) "a velocidade da luz é a mesma em todos os referenciais inerciais" (D'INVERNO, 1992, p. 20). Isto é, dois observadores em referenciais inerciais distintos e se movendo um em relação ao outro devem obter a mesma medida para a velocidade de um fóton observado.

Esses dois postulados levam a resultados importantes acerca do espaço, do tempo, da massa e da energia. São eles:

Contração do comprimento: a medida do comprimento de um objeto depende de sua velocidade em relação ao observador. Quanto mais rápido estiver o objeto, menor será a medida

de seu comprimento para o observador em repouso. Este resultado é descrito pela equação a seguir, em que L_0 é o comprimento do objeto em repouso, L é o comprimento medido pelo observador, c é a velocidade da luz e v é sua velocidade em relação ao observador:

$$L = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (2)$$

Dilatação do tempo: A medida do período de dois relógios idênticos, chamados de 1 e 2, depende de suas velocidades relativas. Um observador no referencial 1 perceberá que o relógio 2 está se atrasando cada vez mais à medida que a velocidade relativa entre os relógios aumenta. Esse efeito é recíproco, isto é, um observador no referencial 2 perceberá o mesmo atraso, porém, com relação ao relógio 1. Este resultado é descrito pela equação a seguir, em que T_0 é o tempo medido pelo relógio no referencial parado e T é o valor medido pelo relógio em movimento:

$$T = \frac{T_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (3)$$

Aumento da massa: a massa de um objeto depende de sua velocidade em relação ao observador. Quanto mais rápido um objeto estiver, maior será a medida de sua massa feita por um observador em repouso. Este resultado pode ser descrito pela equação a seguir, em que m_0 é sua massa em repouso e m é sua massa medida pelo observador:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (4)$$

Relação entre massa e energia: a massa de um objeto é proporcional à sua energia na forma da equação a seguir, em que E é a energia do objeto e m é a massa descrita pela equação 3, anteriormente:

$$E = mc^2 \quad (5)$$

Velocidade Limite: a velocidade da luz representa o limite de velocidade que um objeto por alcançar. Esse limite pode ser percebido combinando-se as equações 4 e 5 da seguinte forma:

$$E = mc^2$$

$$E = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} c^2$$

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (6)$$

Essa equação mostra que a energia necessária para fazer um objeto de massa m alcançar a velocidade da luz seria infinita. A partir desses resultados, pode-se chegar a outra conclusão importante da TRR: nem o tempo nem o espaço são absolutos. Isto é, a medida de seus valores depende do referencial em que são medidos.

Apesar disso, outra grandeza continua invariante, independente do referencial em que é medida. Essa grandeza é chamada de intervalo de espaço-tempo Δs , que, em coordenadas cartesianas, é dado por:

$$\Delta s^2 = -c^2 \Delta t^2 + \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2 \quad (7)$$

Uma consequência dessa invariância do intervalo Δs é a incoerência de continuar a considerar o espaço e o tempo como duas grandezas distintas da natureza, o que fez com que Minkowski, em 1908, os apresentasse como uma grandeza física única, chamada de espaço-tempo (PERUZZO; POTTKER; PRADO, 2014).

A métrica de um espaço de N dimensões quaisquer define quantitativamente como medir distâncias nesse espaço. Como visto anteriormente, o espaço-tempo da TRR possui $N = 4$ dimensões, uma temporal e três espaciais, assim como o espaço-tempo da TRG. O espaço-tempo da TRR é o euclidiano⁷ e sua métrica é a de Minkowski⁸, em que o elemento de linha é dado, em coordenadas cartesianas, por:

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2 \quad (8)$$

E, em coordenadas esféricas⁹, por:

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + dr^2 + r^2 d\theta^2 + (r \sin\theta)^2 d\phi^2 \quad (9)$$

Essa métrica também pode ser escrita em forma de matriz e, com isso, passa-se a ter o chamado tensor de métrica $g_{\mu\nu}$, nas coordenadas cartesianas e esféricas, respectivamente:

⁷ Por espaço-tempo euclidiano entende-se que ele é plano e obedece à geometria euclidiana. Como exemplo, no espaço-tempo euclidiano a soma dos ângulos internos de um triângulo é igual a 180°. Desse modo o espaço-tempo não euclidiano é curvo e não obedece à geometria euclidiana (SOARES, 2013).

⁸ A Métrica de Minkowski recebe esse nome porque foi ele quem mostrou que a TRR de Einstein poderia ser entendida como uma teoria do espaço-tempo quadridimensional (SOARES, 2013).

⁹ O uso dessas coordenadas é interessante para tratar de problemas cuja simetria seja esférica, como planetas e estrelas, por exemplo.

$$g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (r \sin\theta)^2 \end{pmatrix} \quad (11)$$

A métrica de Minkowski define o espaço-tempo plano e seus elementos indicam que eles são isotrópicos e homogêneos, isto é, seus eixos são idênticos em qualquer direção e em qualquer ponto do espaço-tempo. Já o espaço-tempo da TRG é curvo e sua métrica pode ser utilizada para resolver as equações de campo de Einstein.

É interessante, nesse ponto e mesmo que sinteticamente, abordar os princípios que guiaram Einstein na formulação da TRG: de Mach, da equivalência, da Covariância, do Acoplamento Gravitacional Mínimo e da Correspondência (D'INVERNO, 1992). Sua importância se dá porque eles serviram como fonte de ideias para que Einstein formulasse sua teoria e seu estudo facilita o entendimento da TRG, como, por exemplo, a ideia da conexão entre geometria e matéria, resultado direto da teoria, advinda do princípio de Mach.

Cabe deixar claro que Einstein não necessariamente utilizou os princípios de forma completa, mas sim se apropriou de suas ideias centrais. Isso porque parte desses princípios são de natureza filosófica, outra parte possui *status* controverso na comunidade acadêmica e apenas um deles é considerado como princípio-chave. Porém, independentemente de serem aceitos ou não pela comunidade científica, esses princípios foram importantes para Einstein e merecem atenção.

Em essência, o Princípio de Mach postula que não há movimento puro, mas apenas movimento relativo de um corpo em relação a outro. Isto é, para Mach, somente há sentido no movimento de um corpo se ele for relativo a outro corpo.

Se pensado em termos de uma formulação geométrica do universo, podem-se extrair três conclusões do princípio de Mach:

- 1) a distribuição de matéria do universo determina sua geometria;
- 2) se não há matéria no universo, então não há geometria desse universo;
- 3) um corpo em um universo vazio não possuiria qualquer propriedade inercial.

O Princípio da Equivalência pode ser expresso em duas formas – a forte e a fraca – em que ambas se baseiam na hipótese de que a massa inercial de um corpo é igual à sua massa gravitacional. A massa inercial refere-se a quão resistente um corpo é a uma mudança em seu estado de movimento, é a massa da segunda lei de Newton. Já a massa gravitacional refere-se a medida da capacidade de um corpo de criar ou de reagir a um campo gravitacional, é a massa da LGU. Na teoria de Newton, essa equivalência é apenas uma coincidência, porém, na teoria de Einstein, essa hipótese é parte importante de sua formulação.

Em sua forma forte, o princípio da equivalência defende que o movimento de uma partícula de teste gravitacional em um campo gravitacional é independente de sua massa e composição. Essa formulação dá corpo ao famoso experimento de Galileu na torre de Pisa. Vale ressaltar que uma partícula de teste gravitacional sofre a ação de um campo gravitacional externo, porém não o altera nem contribui de qualquer forma para esse campo.

Já em sua forma fraca, o princípio da equivalência entende que o campo gravitacional está acoplado a tudo. Isto é, a matéria tanto é fonte quanto responde a um campo gravitacional e, pela equivalência massa/energia, esta última se comporta da mesma maneira. Em outras palavras, nenhum corpo pode ser blindado do campo gravitacional.

A última afirmação pode ser relativizada, pelo menos localmente. Os efeitos gravitacionais podem ser removidos se for adotado um referencial em queda livre se movendo junto à partícula de teste, mencionada anteriormente. Com isso, caso a variação do campo gravitacional seja pequena, ele será eliminado do problema, o que leva a outra forma de se escrever o princípio da equivalência: não existem experimentos locais capazes de distinguir a queda livre em um campo gravitacional do movimento uniforme no espaço na ausência desse campo.

O Princípio da Covariância Geral enuncia que todas as equações físicas devem possuir formas tensoriais. Esse princípio parte de outro, o de que todos os observadores são equivalentes, independentemente de estarem em referências inerciais ou não. Isto é, qualquer observador deve ser capaz de descobrir as leis da natureza e as escrever na forma tensorial garantindo que tanto o referencial adotado como o sistema de coordenadas utilizado são irrelevantes na obtenção de suas formas finais. Ainda assim, a escolha de um referencial adequado pode facilitar o desenvolvimento do resultado final.

O Princípio do acoplamento gravitacional mínimo assevera que, na generalização da relatividade restrita para a relatividade geral, não devem ser adicionados termos contendo explicitamente o tensor de curvatura. Isso porque mais de uma equação é possível na transição

da relatividade restrita para a geral e, de modo a limitar as possibilidades, deve-se escolher a mais simples possível.

Por fim, o Princípio da Correspondência declara que toda nova teoria deve concordar com os resultados experimentais da teoria atual dentro de seus limites de validade. Para a TRG, isto significa que, por um lado, ela deve concordar com a relatividade especial na ausência de campos gravitacionais e, por outro, ela deve concordar com a gravitação newtoniana para campos gravitacionais fracos e baixas velocidades. Fundamentado nesses princípios e após muito trabalho, Einstein chegou às suas célebres equações de campo:

$$R_{\alpha\beta} - \frac{1}{2}g_{\alpha\beta}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\alpha\beta} \quad (12)$$

Em que $R_{\alpha\beta}$ é o tensor de Ricci que descreve a curvatura do espaço-tempo; R é o escalar de Ricci; $g_{\alpha\beta}$ é o tensor métrico que depende do sistema de coordenadas utilizado; G é a constante de gravitação universal de Newton e; $T_{\alpha\beta}$ é o tensor momento-energia que depende da distribuição e movimento da massa\energia e do campo eletromagnético.

De forma resumida, essas equações englobam os seguintes conceitos (RIVELLES, 2006):

- 1) a massa/energia é causadora da curvatura do espaço-tempo. Isto é, a geometria do espaço-tempo é determinada pela quantidade de matéria presente nele;
- 2) a curvatura do espaço-tempo determina o movimento da matéria. Isto é, a geometria do espaço-tempo determina como a matéria se move;
- 3) a gravitação é resultado da curvatura do espaço-tempo.

A partir relatividade geral de Einstein novas áreas de estudo surgiram, como, por exemplo, uma das soluções de suas equações traz a possibilidade da existência de estruturas extremamente densas chamadas de buracos negros, que recentemente, em 2019, foram observadas diretamente pela primeira vez. Outro exemplo é a possibilidade de que os astros poderiam atuar como telescópios naturais ou lentes gravitacionais, uma vez que suas massas curvam o espaço-tempo, desviando a luz que passa próxima a eles. Ambos os tópicos serão revisados nos próximos parágrafos.

3.3- Tópicos de Buracos Negros

Buracos negros são regiões no espaço-tempo em que a gravidade é tão alta que é capaz de aprisionar até a luz e, para entender como eles surgem, deve-se entender o ciclo de vida das estrelas, descrito nos parágrafos seguintes conforme ensinado por Saraiva, Filho e Müller

(2012). Sintetizando, a estabilidade de uma estrela decorre do equilíbrio entre a força gravitacional das partículas que a compõem, que tende a comprimi-la, e a força das reações nucleares no seu núcleo, sob a forma de pressão de radiação, que tende a expandi-la.

Em uma estrela isolada comum, essas reações nucleares ocorrem na conversão de hidrogênio em hélio e, à medida que ela emite radiação, mais reações são necessárias para que se mantenha estável até que, eventualmente, o hidrogênio no seu centro se esgota. Nesse ponto, estrelas com massas entre $0,08 M_{\odot}$ e $0,45 M_{\odot}$ não alcançam temperatura alta o suficiente para iniciar a fusão do hélio e se tornam anãs brancas com núcleo de hélio.

Já em estrelas com massas entre $0,45 M_{\odot}$ e $8 M_{\odot}$, os núcleos encolhem até atingirem temperatura suficiente para iniciar a fusão de hélio em carbono e parte em oxigênio. Enquanto isso, suas camadas externas ainda queimam hidrogênio, fazendo suas áreas aumentarem substancialmente, o que faz com que as estrelas se tornem gigantes vermelhas. Quando o hélio do núcleo se esgota, elas passam para a fase de supergigantes, porém, seus núcleos não alcançam temperaturas suficientes para fundir o carbono. Finalmente, elas ejetam suas camadas externa sob a forma de nebulosas planetárias e se tornam anãs brancas, com núcleos de carbono e oxigênio.

As estrelas com massas entre $8 M_{\odot}$ e $25 M_{\odot}$ conseguem continuar a queima de elementos mais pesados em seu núcleo, fundindo o carbono e outros elementos até chegar no ferro, cuja fusão consome energia ao invés de liberá-la. Com o fim das reações nucleares que mantinham o equilíbrio hidrostático das estrelas, seus núcleos sofrem compressões gravitacionais agressivas, que são freadas pela pressão derivada de efeitos quânticos e, então, são ricocheteadas de volta, gerando uma gigantesca explosão, chamada de supernova, que deixa como resíduo uma estrela de nêutrons. Isto é, a compressão da estrela teve força suficiente para unir seus prótons e elétrons, mas não foi capaz de comprimir essas estruturas.

Por fim, estrelas com massa acima de $25 M_{\odot}$, além da supernova, produzirão uma compressão gravitacional muito violenta, impossível de ser contida sequer por interações nucleares. Desse modo, toda estrela colapsará e se concentrará em um único ponto, uma singularidade, formando um buraco negro estelar.

Os buracos negros formados pelo processo descrito são chamados de buracos negros estelares e possuem massas estimadas que variam de $7 M_{\odot}$ até $70 M_{\odot}$ (Schutz, 2009). Eles são identificados, de forma indireta, desde a década de 1970, utilizando-se telescópios de raios-x. Essa identificação é feita a partir das emissões das partículas que são sugadas para o interior desses buracos negros e acabam sendo altamente aceleradas.

Porém, a partir da década de 1990, e com a melhora na resolução dos equipamentos utilizados, começaram a ser identificados os chamados buracos negros supermassivos, com massas que variam de $10^6 M_{\odot}$ a $10^{10} M_{\odot}$, sendo o mais próximo da Terra localizado no centro da Via Láctea e chamado de Sagitário A*, com massa aproximada de $4,3 \times 10^6 M_{\odot}$.

Observações astronômicas resultantes dos novos equipamentos mostraram que esse tipo de buraco negro é relativamente comum e quase todas as galáxias que são próximas o suficiente para permitirem sua identificação mostraram possuir um exemplar desse tipo de estrutura.

Seu processo de formação está associado ao das próprias galáxias, porém a forma dessa associação ainda não é consenso entre os pesquisadores. Não se sabe se eles nasceram antes das galáxias e guiaram seus desenvolvimentos ou se desenvolveram junto com elas. Também não é conhecido se já nasceram com suas massas gigantescas ou se começaram como buracos negros estelares e aumentaram de tamanho com o tempo ao colidirem com outros buracos negros ou ao sugarem matéria próxima a eles.

Por fim, buracos negros com massas intermediárias, entre $70 M_{\odot}$ e $10^4 M_{\odot}$, apesar de não terem qualquer restrição para sua existência, ainda não foram identificados na natureza. Porém, algumas poucas observações, como as recentemente feitas por Lin *et al* (2020), ao analisarem a fonte de raios-X 3XMM J215022.4-055108 trazem resultados interessantes indicando a existência real desse tipo de buraco negro.

Os buracos negros são uma consequência natural da TRG e foram previstos teoricamente por Karl Schwarzschild quando encontrou, em 1915, a primeira e mais simples solução para as equações de campo de Einstein, antes mesmo da publicação do artigo consolidando a TRG em 1916 (SAA, 2016).

Essa solução foi obtida para o exterior de uma distribuição esférica de massa no espaço-tempo vazio e, apesar de aparentar ser restrita, é relevante para a modelagem astronômica de estrelas e de buracos negros. Seu elemento de linha, em coordenadas esféricas, é dado por:

$$ds^2 = -\left(1 - \frac{2GM}{rc^2}\right) c^2 dt^2 + \left(1 - \frac{2GM}{rc^2}\right)^{-1} dr^2 + r^2 d\theta^2 + (r \operatorname{sen}\theta)^2 d\phi^2 \quad (13)$$

Desse modo, seu tensor de métrica é dado por:

$$g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} -\left(1 - \frac{2GM}{rc^2}\right) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \left(1 - \frac{2GM}{rc^2}\right)^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (r \operatorname{sen}\theta)^2 \end{pmatrix} \quad (14)$$

A métrica de Schwarzschild define um espaço-tempo curvo e, assim como a métrica de Minkowski, homogêneo e isotrópico. É possível perceber que, para $r \rightarrow \infty$, a métrica de Schwarzschild é reduzida à de Minkowski. Isto significa que o espaço-tempo distante de grandes concentrações de massa é plano.

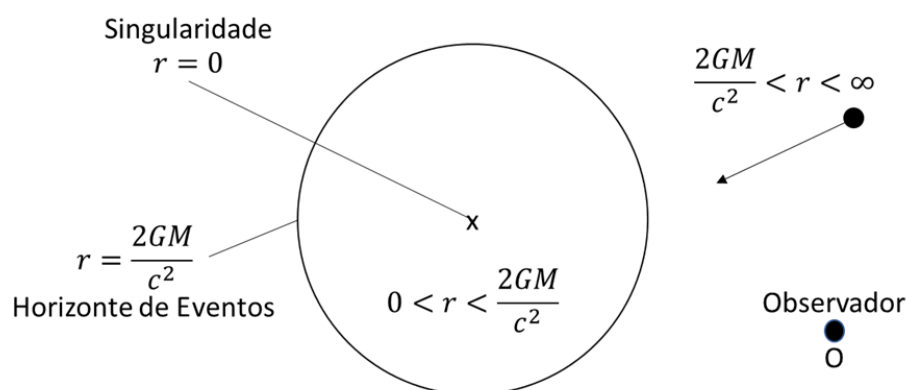
Também se verificam duas situações importantes, a partir da métrica de Schwarzschild: a primeira ocorre quando $r = 0$ e a segunda ocorre quando $r = \frac{2GM}{c^2}$. Ambas as situações parecem levar a singularidades em que a curvatura do espaço-tempo se tornaria infinita.

A primeira situação representa uma singularidade real, porém sua existência é dada, pela comunidade científica, como uma falha da TRG, que seria corrigida com o desenvolvimento de uma teoria gravitacional quântica (SCHUTZ, 2009).

Já a segunda situação representa apenas uma singularidade aparente e pode ser solucionada com uma mudança de coordenadas. Apesar disso, a superfície formada em torno da concentração de massa em que $r = \frac{2GM}{c^2}$, também chamado de raio de Schwarzschild, ainda é significativa e recebe o nome de horizonte de eventos.

Um horizonte de eventos é a fronteira no espaço-tempo que separa eventos que podem se comunicar com um observador distante de eventos que não podem (SCHUTZ, 2009). Para entender essa definição, pode-se imaginar uma partícula movendo-se do infinito em direção à superfície, conforme Figura 4.

Figura 4 – Partícula se deslocando em direção ao horizonte de eventos.



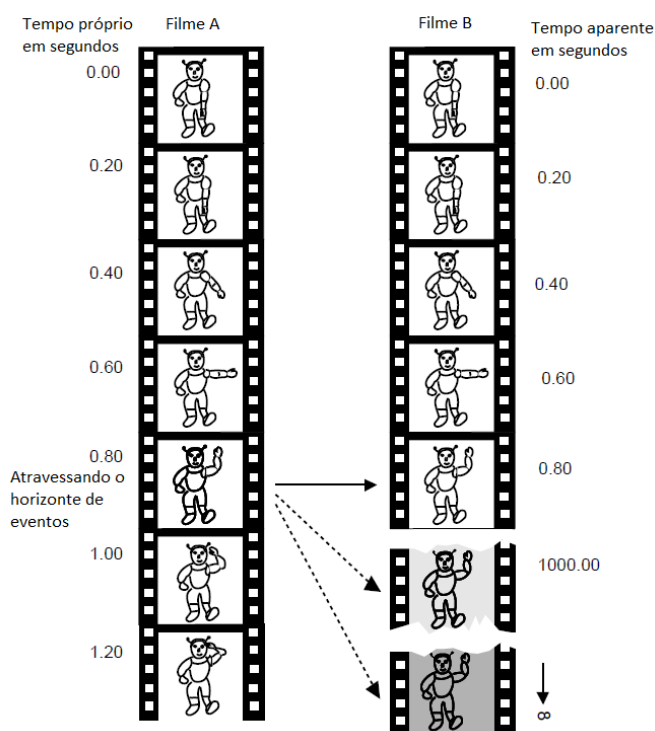
Fonte: Elaboração própria.

Esse exemplo pode ser dividido em três regiões distintas: I. $r > \frac{2GM}{c^2}$, II. $r = \frac{2GM}{c^2}$ e III. $r < \frac{2GM}{c^2}$.

Na região I, no referencial da partícula, ela é atraída em direção à singularidade e qualquer fóton emitido por ela é capaz de chegar ao observador no ponto O. Além disso, ela segue sua trajetória sem perceber qualquer mudança no espaço-tempo ao seu redor, atravessaria a região II e entraria na região III até alcançar a singularidade. Porém, na região III, nenhum fóton emitido pela partícula é capaz de chegar ao observador. Isso porque a curvatura do espaço-tempo, após a região II, é tão grande que nem a luz consegue escapar dela.

Já o observador, em seu referencial, vê a partícula se aproximando da região II e, à medida que ela chega mais perto, a percebe desaparecer aos poucos até sumir completamente. Isso porque, ao se aproximar da região II, o tempo passa mais devagar para a partícula até parar quando ela alcança $r = \frac{2GM}{c^2}$. Desse modo, os fótons emitidos por ela tendem a sofrer um desvio para o vermelho, cada vez mais forte e, com isso, o observador percebe sua emissão cada vez mais espaçada no tempo. O nome horizonte de eventos decorre do efeito descrito que se assemelha a um barco sumindo no horizonte da Terra, mas por motivo diferente, conforme Figura 5.

Figura 5 – Astronauta atravessando o horizonte de eventos.



Fonte: Adaptada de Luminet (1998).

O buraco negro descrito pela solução de Schwarzschild é muito simples, sua única variável é a quantidade de massa que possui. Porém, outros tipos também podem ocorrer, a depender dos parâmetros utilizados para encontrar as soluções das equações de campo.

Se for considerado que a massa geradora do buraco negro está carregada eletricamente, chega-se à solução de Reissner-Nordstrom. Agora, caso seja considerado que o buraco negro esteja girando, isto é, possua momento angular L , chega-se à solução de Kerr para as equações de campo e que representa melhor os buracos negros encontrados na natureza.

Apesar da dificuldade de se caracterizar os detalhes da estrutura dos buracos negros, uma vez que nada consegue sair além de seus horizontes de eventos, algumas de suas propriedades gerais são conhecidas e são utilizadas em modelos complexos dos fenômenos astrofísicos. São elas (SCHUTZ, 2009):

- a) qualquer buraco negro isolado eventualmente se tornará estacionário e, como consequência, ele pode ser caracterizado por apenas duas grandezas: sua massa total M e seu momento angular total L . Isso implica dizer que, independente do que o buraco negro tenha sido antes e de quantas grandezas eram necessárias para caracterizá-lo, apenas essas duas, massa e momento angular, são necessárias;
- b) caso não esteja isolado, o buraco negro pode conter uma carga elétrica Q que pode ser medida a partir da Lei de Gauss, utilizando-se alguma superfície adequada. Apesar disso, seu campo elétrico é usualmente considerado desprezível pelos astrofísicos por entenderem que o colapso gravitacional deixa uma carga residual pouco significativa;
- c) caso o colapso gravitacional seja aproximadamente esférico, todas as distribuições de massa não esféricas serão ejetadas na forma de ondas gravitacionais, resultando em um buraco negro estacionário do tipo Kerr. Caso o momento angular L seja igual a zero, o resultado será um buraco negro do tipo Schwarzschild;
- d) a área total do horizonte de eventos de um buraco negro não estacionário não decresce com o tempo¹⁰. Isso implica que ela pode aumentar devido à absorção de matéria em seu interior ou na colisão de dois buracos negros, porém um único buraco negro não pode espontaneamente se bifurcar em dois menores.

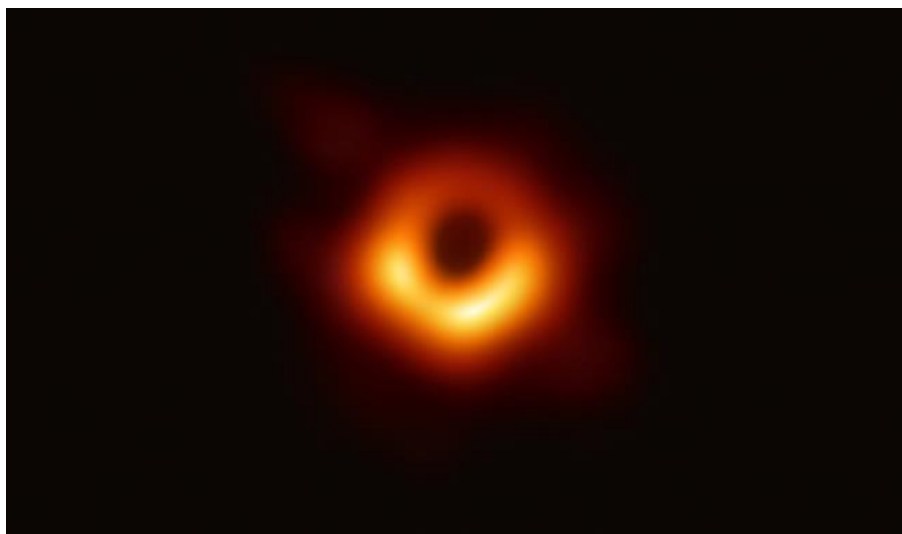
Outro aspecto relevante acerca dos buracos negros é sua detecção. Apesar de suas massas gigantescas, o raio de Schwarzschild faz com que seus tamanhos sejam relativamente pequenos, o que, somado ao fato de não emitirem radiação, fez com que sua detecção somente

¹⁰ Essa propriedade considera que a densidade de energia local da matéria (ρ) do buraco negro é positiva. Caso sejam considerados efeitos quânticos, em que ρ pode assumir valores negativos, há a possibilidade de emissão de radiação, chamada de Radiação Hawking, pelo buraco negro, o que levaria ao decréscimo da área de seu horizonte de eventos (SCHUTZ, 2009).

fosse possível de forma indireta, por mais de um século. Com isso, os buracos negros eram identificados com base nos efeitos gravitacionais que produzem em seus arredores e não com sua visualização direta. Somente em 2019, com o avanço tecnológico, foi possível obter uma imagem direta de um buraco negro, replicada na Figura 6.

Essa imagem mostra o horizonte de eventos do buraco negro supermassivo com cerca de 6,5 bilhões de massas solares localizado no centro da galáxia M87, em que a área escura no centro representa seu horizonte de eventos e a iluminada representa seu disco de acreção. Ela foi obtida e divulgada em 2019 pelo Event Horizon Telescope (EHT), uma colaboração internacional, composta por mais que 200 cientistas, em que oito radiotelescópios localizados na Terra trabalharam juntos para formar um grande telescópio virtual do tamanho do planeta e com resolução angular suficiente para capturar a imagem ilustrada na Figura 6 (EHT, 2019).

Figura 6 – Buraco negro e seu horizonte de eventos localizado na galáxia M87.



Fonte: Event Horizon Telescope (2019).

3.4- Lentes Gravitacionais

O efeito de lenteamento gravitacional ocorre quando a trajetória da luz é modificada ao passar por uma região do espaço-tempo curvada, devido aos efeitos de uma concentração de massa.

As primeiras previsões para a deflexão gravitacional da luz foram feitas com base na teoria newtoniana por Henry Cavendish, em 1784 e, de forma independente, por Johann Söldner em 1801 (SCHUTZ, 2009). Ambos chegaram ao seguinte resultado para o ângulo de deflexão

α de um raio de luz que passa a uma distância r do centro de massa de um objeto qualquer de massa M :

$$\alpha = \frac{2GM}{c^2 r} \quad (15)$$

De acordo com essa relação, um raio de luz que passe tangente à superfície do Sol deveria sofrer uma deflexão de 0,87 segundos de arco em sua trajetória. A TRG também prevê a deflexão da luz que passar próxima a alguma concentração de massa. O ângulo de deflexão é dado por:

$$\alpha = \frac{4GM}{c^2 r} \quad (16)$$

Desse modo, o mesmo raio de luz descrito deve sofrer uma deflexão de 1,84 segundos de arco, valor esse que é exatamente o dobro do previsto pela teoria newtoniana. A explicação para tal valor é que a teoria clássica somente é capaz de fazer previsões para a componente temporal g_{00} do espaço-tempo, enquanto a TRG, além da parte temporal, também é capaz de fazer previsões para a componente espacial g_{rr} (SCHUTZ, 2009).

Essa discussão mostra que a TRG não foi a primeira a prever a deflexão gravitacional da luz. Sua importância para o fenômeno é devido a prevê-lo, de forma mais acurada, que sua antecessora. Além disso, a deflexão da luz foi o primeiro teste experimental da TRG.

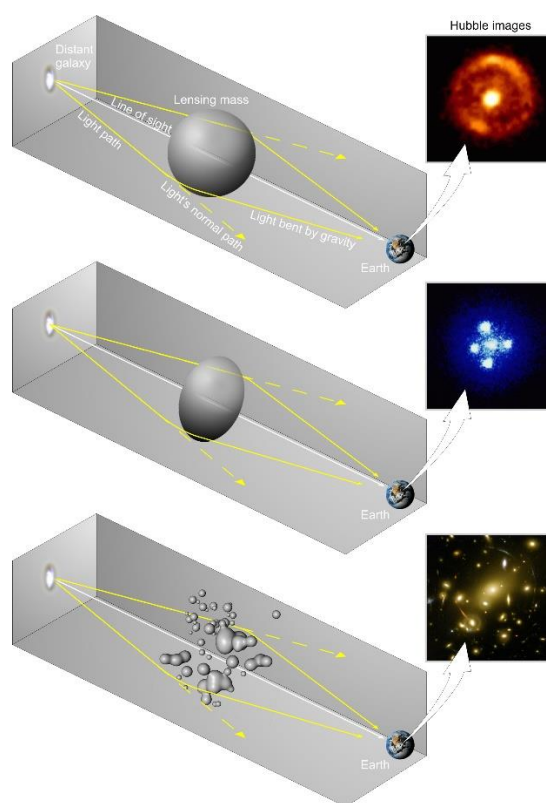
Em 1919, durante um eclipse solar, duas expedições britânicas foram enviadas para colher dados da deflexão da luz de um conjunto de estrelas causada pelo Sol. Uma equipe liderada por Andrew Crommelin foi para a cidade de Sobral, no Brasil, enquanto a outra, liderada por Arthur Eddington, foi para a Ilha do Príncipe, na costa oeste da África. Por questões meteorológicas, os dados da equipe enviada ao Brasil ficaram melhores que os da equipe enviada à África. Isso porque, durante o pico do eclipse, o céu estava nublado na Ilha do Príncipe, enquanto, em Sobral, o céu estava limpo (CRISPINO, 2019).

Após a análise dos dados obtidos, seus resultados foram divulgados, em novembro de 1919, durante um encontro da Sociedade Real e da Sociedade Astronômica Real e indicavam que a teoria de Einstein estava de acordo com o desvio medido. Um fato interessante da divulgação desses resultados é que uma equipe britânica foi responsável pela primeira validação da teoria de um cientista alemão, apenas um ano após o fim da primeira guerra mundial.

Voltando ao lenteamento gravitacional, tendo em vista a quantidade de massa espalhada pelo universo, pode-se afirmar que a Terra recebe, a todo momento, raios de luz que foram defletidos gravitacionalmente em algum ponto do espaço-tempo. Em geral, esses raios de luz não fornecem qualquer informação nova ou interessante para estudos.

Porém, há casos especiais em que a Terra, o objeto emissor e o objeto defletor estão posicionados de tal forma que a luz recebida por um observador na Terra traz informações valiosas acerca do objeto emissor. Isso ocorre quando alguma concentração de massa está posicionada entre a Terra e o astro emissor de fótons, fazendo com que os três estejam alinhados ou quase alinhados. Nessa configuração, o objeto central é chamado de lente gravitacional, enquanto o objeto emissor é chamado de objeto lenteado, conforme descrito na Figura 7.

Figura 7 – Esquemas de Lentes Gravitacionais.



Fonte: ESA/Hubble (2004).

Como resultado desse alinhamento, a luz que chega à Terra pode revelar objetos que estavam escondidos atrás da lente gravitacional ou que estavam distantes demais para serem observados diretamente. Também pode mostrar várias imagens de um mesmo objeto, aumentar seu brilho aparente e, inclusive, mostrar onde há um campo gravitacional, mesmo que não se possa observar o que o está criando. A depender de como se dá o arranjo descrito, diferentes classificações de lentes gravitacionais podem surgir.

Nas **lentes fortes**, a lente possui grande massa, a geometria do arranjo é favorável e a deflexão da luz é relativamente alta. Isso faz com que o observador veja múltiplas imagens, arcos e, caso o alinhamento seja exato, um anel, também chamado de Anel de Einstein.

Nas **lentes fracas**, a lente também possui grande massa, porém a geometria do arranjo é menos favorável. Isso faz com que os objetos lenteados pareçam cisalhados, deformando-se em arcos cujo centro é a lente gravitacional, e, desse modo, sua distribuição pareça menos aleatória.

Nas **microlentes gravitacionais**, a lente possui pouca massa e a geometria do arranjo é muito favorável. Pelo tamanho da lente, os efeitos vistos nas lentes fortes não são formados e o que ocorre é a magnificação aparente do brilho do objeto lenteado.

4- Produto Educacional

Este capítulo é resultado da articulação dos referenciais teóricos discutidos no capítulo 2 direcionados ao ensino de tópicos de física relativos à gravitação. Ele leva em consideração, além dos documentos curriculares oficiais (BNCC e PCN+ EM), trabalhos do campo de ensino de astronomia e a experiência do professor/autor dessa dissertação em sala de aula. Como resultado, ele apresenta uma sequência didática contendo atividades diversificadas e que se utilizam de várias tecnologias educacionais (vídeos, demonstrações, simulações em computador, discussões em grupos, questionários, entre outras) voltadas à aprendizagem de astronomia pelos estudantes.

A sequência didática é composta por quatro módulos, totalizando 20 aulas duplas (10 encontros), acerca dos seguintes subtemas: 1- Gravitação Universal e Sistema Solar; 2- Relatividade Geral; 3- Buracos Negros e; 4- Lentes Gravitacionais. O quadro a seguir mostra a estrutura geral do produto:

Quadro 1 – Estrutura do produto educacional.

Módulos	Aulas	Matéria de Ensino	Atividades Propostas
1 – Gravitação Universal e Lentes Gravitacionais	1 e 2	Gravitação Universal	Vídeo, projeção de imagens, explicações do professor, simulações em computador, leitura de texto, discussões em grupos e questionários.
	3 e 4	Gravitação Universal e Sistema Solar	
2 – Relatividade Geral	5 e 6	Espaço-Tempo	Vídeo, projeção de imagens, explicações do professor, dinâmica com a turma, simulações em computador, leitura de textos, discussões em grupos e questionários.
	7 e 8	Curvatura do Espaço-Tempo	
	9 e 10	Princípio da Equivalência	
3 – Buracos Negros	11 e 12	Histórico dos Buracos Negros	Vídeos, projeção de imagens, explicações do professor, simulações em computador, leitura de textos, discussões em grupos e questionários.
	13 e 14	Raio de Schwarzschild e Horizonte de Eventos	

	15 e 16	Formação e Detecção de Buracos Negros	
4 – Lentes Gravitacionais	17 e 18	Lentes Gravitacionais e suas Classificações	Projeção de imagens, explicações do professor, simulações em computador, leitura de textos, produção de um vídeo e questionários.
	19 e 20	Utilizações das Lentes Gravitacionais	

Fonte: Elaboração própria.

Cada módulo foi construído como um plano de aula, baseado no proposto por Ferreira e Silva Filho (2019). Desse modo, o quadro a seguir faz uma breve descrição das seções dos planos de aula:

Quadro 2 – Estrutura dos planos de aula correspondentes a cada módulo.

Seção	Descrição
Identificação	Traz o rol de itens identificadores da aula.
Objetivo Principal	Estabelece o que se espera da aula como um todo.
Objetivos Complementares	Apresenta os conteúdos a serem abordados na aula.
Conhecimentos Relevantes	Descreve os conhecimentos prévios necessários aos estudantes para um bom andamento da aula.
Metodologia	Mostra sob qual referencial teórico a aula foi construída, sua estrutura geral e, também, são descritas todas as estratégias didáticas que devem ocorrer.
Recursos Necessários	Enumera todos os recursos necessários à correta condução das estratégias didáticas descritas anteriormente.
Referencial Teórico e Proposta de Avaliação	Associa cada estratégia didática ao aporte do referencial didático utilizado e propõe como avaliá-la à luz desse referencial.
Sugestões de Leituras Complementares	Apresenta uma lista de alguns textos ou vídeos que devem ser sugeridos aos estudantes de modo a complementar o que foi visto no módulo.

Fonte: Elaboração Própria.

Após essas breves explicações gerais acerca da sequência didática, o restante do capítulo a descreve em detalhes, trazendo cada módulo separadamente e incluindo seus respectivos apêndices, com textos de apoio, questionários e roteiros para as demonstrações e discussões.

Módulo 1 – Gravitação Universal e Sistema Solar

1. Identificação

Nível de ensino	Médio
Docente responsável	Roberto Vinícios Lessa do Couto
Área do conhecimento	Física
Tema da aula	Mecânica e Astronomia
Título (Tópico) da aula	Gravitação Universal e Sistema Solar
Tipo predominante	Teórica
Duração prevista	4 aulas de 50 minutos cada (3h20)

2. Objetivo principal

Discutir tópicos de astronomia ligados ao estudo da Lei da Gravitação Universal de Newton e do Sistema Solar, visando ao entendimento inicial dos tópicos e à apresentação do sistema do qual a Terra faz parte.

3. Objetivos complementares

- Apresentar a força gravitacional.
- Apresentar a Lei da Gravitação Universal.
- Apresentar os principais componentes do Sistema Solar.

4. Conhecimentos introdutórios relevantes

Para que a aula tenha êxito, é necessário que os estudantes tenham conhecimentos básicos sobre forças e massa, pois esses conceitos servirão de base para o desenvolvimento da Lei da Gravitação Universal.

5. Metodologia

Este módulo didático foi construído tendo como base a teoria da aprendizagem significativa¹¹ de David Ausubel e os pressupostos das comunidades de investigação¹² propostas no programa de filosofia para crianças de Matthew Lipman.

¹¹ A aprendizagem significativa é um conceito central na teoria de Ausubel e ocorre quando uma nova informação interage de modo não arbitrário e não literal com algum conceito pré-existente na estrutura cognitiva de um sujeito (MOREIRA, 2011).

¹² Uma comunidade de investigação se estabelece a partir do diálogo entre os estudantes, que apresentam os conteúdos de forma introdutória a partir de suas próprias suposições (SILVA FILHO; FERREIRA, 2018).

Pela extensão do conteúdo, o módulo pode ser dividido em duas partes, com uma aula dupla cada. As aulas são eminentemente teóricas e contam com a interação entre professor e alunos, conforme as estratégias descritas a seguir:

5.1. Estratégias didáticas - Parte 01

- a) Mostrar o vídeo **Cavendish Gravity Experiment Time Lapse Version 1**¹³.
- b) Soltar alguns objetos no chão e perguntar aos estudantes se o fenômeno mostrado no vídeo possui alguma relação com a queda dos objetos e que relação é essa.
- c) Explicar que todos os corpos com massa atraem-se mutuamente e que, conseqüentemente, os fenômenos mostrados possuem a mesma natureza, a força gravitacional.
- d) Explicar que a força gravitacional é uma força universal, isto é, ela age em todos os corpos com massa e sempre no sentido de uni-los. Desse modo, pode-se dizer que todos os corpos atraem todos outros.
- e) Abrir o simulador **Universe Sandbox**²¹⁴ e realizar três simulações de tempo de colisão entre estrelas, variando suas massas entre cada colisão. Na primeira, colidir dois sóis a uma distância de $10^8 km$, na segunda um sol e uma estrela mais massiva, como a Achernar (6,7 massas solares) e, por último, duas estrelas massivas.

Figura 8 – Simulação da colisão de dois sóis.



Fonte: Universe Sandbox (2015).

- f) Solicitar que os estudantes formem grupos com quatro ou cinco componentes cada e mediar uma discussão entre os grupos, conforme roteiro constante do Apêndice 1A
- g) Explicar que a força que age sobre os corpos é diretamente proporcional às suas massas e que essa força é sempre de atração, isto é, sempre no sentido de unir os corpos. Desse modo, quando a massa dos corpos é aumentada nas simulações, a força entre eles aumenta e,

¹³ O vídeo faz uma demonstração qualitativa do experimento de Cavendish, mostrando a atração gravitacional entre corpos e se encontra na plataforma Youtube, disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=11sLusnVZwM>. Acesso em 05 jan. 2019.

¹⁴ O simulador se encontra disponível na plataforma de jogos eletrônicos **Steam**, no endereço <https://store.steampowered.com/app/230290/>. Acesso em 17 dez. 2018.

pela segunda lei de Newton, a aceleração de cada corpo também aumenta, fazendo com que as estrelas colidam mais rapidamente.

h) Solicitar que os grupos respondam à questão 1 constante do Apêndice 1B.

i) Abrir novamente o simulador e realizar uma simulação envolvendo uma estrela central de grande massa e quatro outras menores e iguais entre si, todas com velocidades iniciais nulas em relação umas às outras, porém separadas no mesmo plano por ângulos de 90° e a diferentes distâncias da estrela central.

Figura 9 – Simulação da colisão de estrelas.



Fonte: Universe Sandbox (2015).

j) Mostrar, durante a simulação, que, com exceção do momento inicial, as velocidades instantâneas das estrelas são diferentes. Para isso, parar a simulação algumas vezes e mostrar a velocidade das estrelas a cada momento.

k) Mediar uma discussão entre os grupos, conforme roteiro constante do APÊNDICE 1C.

l) Explicar que a força que age sobre os corpos também depende de outro fator, a distância entre eles. Quanto mais distante os corpos estiverem, menor será a força entre eles.

m) Explicar que essa relação não é linear, isto é, a força não diminui na mesma proporção que a distância entre os corpos. Essa relação é quadrática, ou seja, a força diminui de forma proporcional ao quadrado da distância entre os corpos.

n) Solicitar que os grupos respondam à questão 2, constante do Apêndice 1B.

5.2. Estratégias didáticas - Parte 02

o) Explicar que, ao unir os fatores mostrados anteriormente, a força gravitacional segue a seguinte relação: $F \propto \frac{m_1 m_2}{r^2}$, em que m_1 e m_2 são as massas dos corpos e r é a distância entre eles. Para que essa relação de proporcionalidade se torne uma igualdade, deve-se adicionar uma constante de proporcionalidade, chamada de constante gravitacional G , cujo valor

aproximado é $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{Nm^2}{kg^2}$. Desse modo, a força gravitacional é dada por: $F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$.

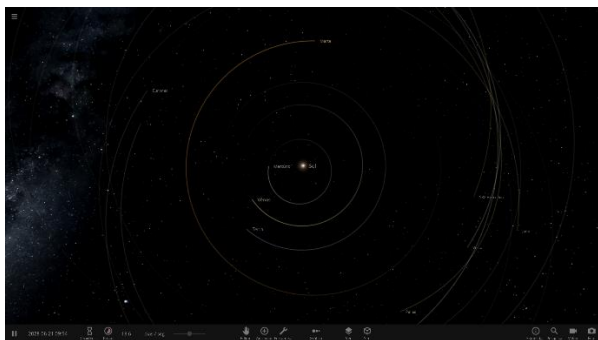
p) Solicitar que os grupos respondam à questão 3, constante do Apêndice 1B.

q) Explicar que as órbitas dos planetas são consequência da força gravitacional que o Sol exerce sobre eles.

r) Explicar que a forma aproximadamente esférica do Sol e dos planetas também é consequência da força gravitacional que faz com que grandes grupos de pequenas partículas se atraiam mutuamente para um mesmo ponto em comum. Mesmo os planetas rochosos sofrem esses efeitos, porque a quantidade de massa de um planeta, inclusive os menores, é grande o suficiente para moldar sua forma em torno do seu centro gravitacional.

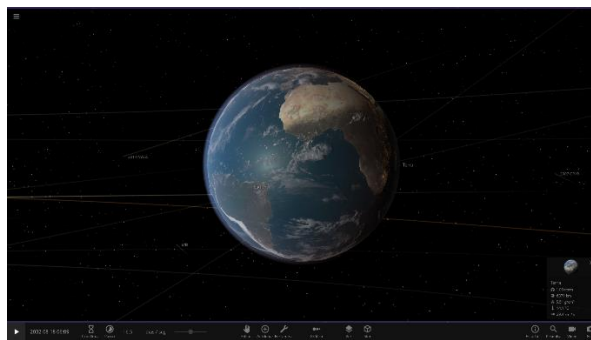
s) Abrir uma simulação do Sistema Solar e mostrar seus principais componentes: o Sol, os planetas e suas órbitas.

Figura 10 – Simulação do Sistema Solar.



Fonte: Universe Sandbox (2015).

Figura 11 – Simulação da Terra.



Fonte: Universe Sandbox (2015).

t) Entregar, para leitura, o **texto de apoio 1.1 – Características e Curiosidades sobre o Sistema Solar**, constante do Apêndice 1D e o utilizar em conjunto com a simulação do Sistema Solar.

u) Solicitar que os grupos respondam as questões constantes do Apêndice 1E.

6. Recursos necessários

Para a correta aplicação dessa sequência didática, são necessários os seguintes recursos: quadro, giz/pincel, equipamento multimídia com vídeo e áudio, computador e o simulador Universe Sandbox².

7. Referencial teórico e proposta de avaliação

O referencial teórico das estratégias didáticas apresentadas e suas formas de avaliação estão descritas no Quadro 3.

Como elementos formais de avaliação, devem ser utilizadas as respostas dadas aos questionários, comparando-as com as respostas esperadas indicadas nos seus respectivos apêndices. Para tanto, deve-se levar em consideração que não é possível constatar a ocorrência da aprendizagem significativa, mas podem ser encontrados indícios de sua ocorrência.

Esses indícios podem ser verificados na percepção de uma mudança de pensamento quanto ao conteúdo ensinado, em posicionamentos apresentados em formato diferente do mostrado didaticamente e em conclusões que resultem em novos conhecimentos que não foram objeto de ensino. Desse modo, as respostas dadas pelos estudantes não precisam, necessariamente, estar corretas, desde que demonstrem a evolução dos seus subsunçores.

Como forma de complementar a avaliação acima, também podem ser levadas em consideração a efetiva participação dos estudantes nas atividades e as discussões realizadas.

8. Sugestões de Leituras complementares

Como forma de complementar os estudos sobre o tema, sugerir aos estudantes as seguintes atividades:

- Ler o texto **Leis de Newton e Forças Gravitacionais**, do instituto de física da UFRGS, disponível em http://www.if.ufrgs.br/~riffel/notas_aula/introducaoAstro/notas_aula/Introducao_Astro_Aula4.pdf. Acesso em 13 fev. 2019.
- Assistir ao vídeo **Tema 07: O Sistema Solar (Parte 1)**, do curso de astrofísica geral realizado pela UFSC, disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=C-kV1fPOZNS&feature=youtu.be>. Acesso em 20 fev. 2019.
- Assistir ao vídeo **Tema 08: O Sistema Solar (Parte 2)**, do curso de astrofísica geral realizado pela UFSC, disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=QD-WfkfUIW8&feature=youtu.be>. Acesso em 20 fev. 2019.

Quadro 3 – Referencial teórico e proposta de avaliação das estratégias didáticas apresentadas.

Matéria de Ensino	Estratégia Didática	Referencial	Proposta de Avaliação
Força Gravitacional	a e b	O vídeo, a dinâmica e o questionamento funcionam como um organizador prévio para a força gravitacional. As respostas à questão mostram os subsunçores dos estudantes.	Interrupções dos estudantes com perguntas e comentários ao professor indicam a ocorrência da diferenciação progressiva dos seus subsunçores.
	c e d	As explicações buscam promover a diferenciação progressiva dos subsunçores identificados acerca da força gravitacional.	
Força dependente das massas	e	As simulações buscam a diferenciação progressiva dos tópicos em estudo. Também buscam manter o interesse dos estudantes pela matéria de ensino.	Interrupções dos estudantes com perguntas e comentários ao professor indicam a ocorrência da diferenciação progressiva dos seus subsunçores, bem como demonstram o interesse pela matéria de ensino. Perguntas envolvendo mudanças nos parâmetros da simulação também indicam interesse dos estudantes. Caso ocorra esse tipo de comentário, pode-se mudar os parâmetros e refazer a simulação, desde que não se fuja ao tópico em estudo.

	f	<p>A divisão em grupos busca promover a implementação de pequenas comunidades de investigação.</p> <p>A discussão entre os grupos busca fazer da sala de aula uma grande comunidade de investigação.</p> <p>A mediação do professor também busca a diferenciação progressiva da força gravitacional como dependente das massas dos corpos.</p>	<p>A verificação de que as comunidades de investigação estão em funcionamento deve ser feita pela observação das interações entre os estudantes. Essas interações devem ocorrer no sentido de buscar entender melhor os conceitos em estudo e de confrontos entre entendimentos diferentes. Caso isso não ocorra naturalmente, deve-se tentar instigar os estudantes pedindo que eles expliquem para os demais o seu entendimento sobre o assunto.</p>
	g	<p>A explicação busca continuar o processo de diferenciação progressiva anterior.</p>	<p>Interrupções dos estudantes com perguntas e comentários ao professor indicam a ocorrência da diferenciação progressiva dos seus subsunçores.</p>
	h	<p>A questão busca encontrar indícios da aprendizagem significativa dos conceitos estudados.</p>	<p>Os indícios da ocorrência de aprendizagem significativa podem ser obtidos a partir das respostas dadas na questão. Deve-se procurar respostas que abordem os tópicos de formas diferentes das que foram apresentadas aos estudantes. As respostas esperadas devem ser no mesmo sentido das indicadas nas questões, mas não precisam ser iguais.</p>
Força dependente da distância	i e j	<p>A simulação busca a diferenciação progressiva dos tópicos em estudo. Também busca manter o interesse dos estudantes pela matéria de ensino.</p>	<p>Interrupções dos estudantes com perguntas e comentários ao professor indicam a ocorrência da diferenciação progressiva dos seus subsunçores, bem como demonstram o interesse pela matéria de ensino. Perguntas envolvendo mudanças nos parâmetros da simulação também indicam interesse dos estudantes.</p>

			Caso ocorra esse tipo de comentário, pode-se mudar os parâmetros e refazer a simulação, desde que não se fuja ao tópico em estudo.
	k	A discussão entre os grupos busca fazer da sala de aula uma grande comunidade de investigação. A mediação do professor também busca a diferenciação progressiva da força gravitacional como dependente da distância entre os corpos.	A verificação de que as comunidades de investigação estão em funcionamento deve ser feita pela observação das interações entre os estudantes. Essas interações devem ocorrer no sentido de buscar entender melhor os conceitos em estudo e de confrontos entre entendimentos diferentes. Caso isso não ocorra naturalmente, deve-se tentar instigar os estudantes pedindo que eles expliquem para os demais o seu entendimento sobre o assunto.
	l e m	As explicações buscam continuar o processo de diferenciação progressiva anterior.	Interrupções dos estudantes com perguntas e comentários ao professor indicam a ocorrência da diferenciação progressiva dos seus subsunçores.
	n	A questão busca encontrar indícios da aprendizagem significativa dos conceitos estudados.	Os indícios da ocorrência de aprendizagem significativa podem ser obtidos a partir das respostas dadas na questão. Deve-se procurar respostas que abordem os tópicos de formas diferentes das que foram apresentadas aos estudantes. As respostas esperadas devem ser no mesmo sentido das indicadas nas questões, mas não precisam ser iguais.

Constante gravitacional e Lei da Gravitação Universal	o	A explicação busca promover a diferenciação progressiva da força gravitacional ao introduzir a constante gravitacional. Também busca a reconciliação integrativa dos conceitos estudados ao uni-los na Lei da Gravitação Universal.	Interrupções dos estudantes com perguntas e comentários ao professor indicam a ocorrência da diferenciação progressiva e da reconciliação integrativa dos seus subsunçores.
	p	A questão busca encontrar indícios da aprendizagem significativa dos conceitos estudados.	Os indícios da ocorrência de aprendizagem significativa podem ser obtidos a partir das respostas dadas na questão. Deve-se procurar respostas que abordem os tópicos de formas diferentes das que foram apresentadas aos estudantes. As respostas esperadas devem ser no mesmo sentido das indicadas nas questões, mas não precisam ser iguais.
Sistema Solar	q e r	As explicações buscam promover a diferenciação progressiva da Gravitação Universal ao mostrar algumas de suas consequências.	Interrupções dos estudantes com perguntas e comentários ao professor indicam a ocorrência da diferenciação progressiva dos seus subsunçores.

	s	A simulação busca a diferenciação progressiva dos tópicos em estudo. Também busca manter o interesse dos estudantes pela matéria de ensino.	Interrupções dos estudantes com perguntas e comentários ao professor indicam a ocorrência da diferenciação progressiva dos seus subsunçores, bem como demonstram o interesse pela matéria de ensino. Perguntas envolvendo mudanças nos parâmetros da simulação também indicam interesse dos estudantes. Caso ocorra esse tipo de comentário, pode-se mudar os parâmetros e refazer a simulação, desde que não se fuja ao tópico em estudo.
	t	O texto e a explicação buscam continuar a diferenciação progressiva anterior.	Interrupções dos estudantes com perguntas e comentários ao professor indicam a ocorrência da diferenciação progressiva dos seus subsunçores.
	u	O questionário busca encontrar indícios de aprendizagem significativa dos conceitos estudados.	Os indícios da ocorrência de aprendizagem significativa podem ser obtidos a partir das respostas dadas no questionário. Deve-se procurar respostas que abordem os tópicos de formas diferentes das que foram apresentadas aos estudantes. As respostas esperadas devem ser no mesmo sentido das indicadas nas questões, mas não precisam ser iguais.

Fonte: Elaboração própria.

MÓDULO 1 - APÊNDICE 1A

Roteiro de Discussão 1.1

- 1) Quais são as principais diferenças entre cada simulação?
- 2) O que aconteceria caso fossem realizadas outras simulações com estrelas ainda mais massivas?
- 3) Qual é a relação entre a massa das estrelas e o tempo de colisão?
- 4) Qual é a relação entre a massa das estrelas e a força gravitacional?

MÓDULO 1 - APÊNDICE 1B

Questionário 1.1

- 1) Por que o tempo de colisão das estrelas é diferente em cada simulação?

Padrão esperado de resposta: O tempo é diferente devido a força gravitacional ser diferente em cada simulação. Apesar das distâncias serem as mesmas, a massa das estrelas varia e isso faz com que a força gravitacional varie em cada simulação.

Desse modo, à medida que a massa aumenta, a força que uma estrela exerce sobre a outra também aumenta e, conseqüentemente, o tempo para a colisão diminui.

- 2) Por que a velocidade das estrelas em cada instante específico é diferente, mesmo elas sendo todas iguais?

Padrão esperado de resposta: A velocidade das estrelas é diferente em cada instante devido a força gravitacional ser diferente em cada estrela. Apesar de serem iguais, a distância de cada estrela até a central é diferente e isso faz com que a força gravitacional exercida em cada uma varie.

Desse modo, à medida que a distância aumenta, a força que a estrela central exerce sobre cada uma das demais diminui e, conseqüentemente, suas velocidades também diminuem.

- 3) Por que não se observa, no cotidiano, dois corpos quaisquer se aproximando devido a força gravitacional?

Padrão esperado de resposta: Não se observa esse fenômeno porque a força gravitacional entre corpos com pouca massa é muito pequena. Isso porque a constante gravitacional possui um valor extremamente baixo $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{Nm^2}{kg^2}$.

Desse modo, dois corpos com baixos valores de massa exercem uma força gravitacional entre eles com valor desprezível em comparação com todas as outras forças que atuam sobre eles.

MÓDULO 1 - APÊNDICE 1C

Roteiro de Discussão 1.2

- 1) Quais são as principais diferenças entre cada estrela da simulação?
- 2) O que aconteceria caso fossem realizadas outras simulações com as estrelas posicionadas mais distantes da estrela central?
- 3) Qual é a relação entre a distância das estrelas e suas respectivas velocidades instantâneas?
- 4) Qual é a relação entre a distância das estrelas e a força gravitacional?

MÓDULO 1 - APÊNDICE 1D

Texto de Apoio 1.1 – Características e Curiosidades sobre o Sistema Solar

A Tabela 2 a seguir mostra algumas características dos principais objetos que compõem o Sistema Solar.

Tabela 2 – Características dos Principais Objetos do Sistema Solar.

Objeto do Sistema Solar	Distância do Sol (Milhões de km)	Período Translação (anos terrestres)	Período de Rotação	Diâmetro (km)	Massa (em relação à Terra)	Densidade (g/cm ³)	Temperatura (°C)	Número de Satélites Conhecidas
Sol	-	-	25-34 dias	1.391.000	330.000	1,41	5.800 a 15.000.000	-
Mercúrio	57	0,24	58,65 dias	4.876	0,05	5,43	-184 a 465	0
Vênus	107	0,62	-243,16 dias	12.107	0,81	5,25	449	0
Terra	150	1,00	23h 56min	12.755	1	5,52	15	1
Marte	229	1,88	24h 37min	6.794	0,11	3,95	-123 a 36	2
Júpiter	777	11,86	9h 55min	143.983	317	1,33	-153	79
Saturno	1.429	29,45	10h 13min	12.536	97	0,69	-184	62
Urano	2.871	84,00	17h 12min	51.117	14,6	1,29	-184	27
Netuno	4.496	164,77	16h 17min	49.527	17	1,64	-223	14

Fonte: Elaboração Própria.

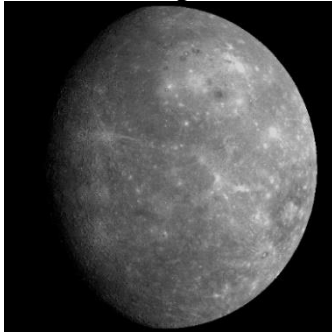
Algumas curiosidades podem ser verificadas a partir desses dados:

- O período de rotação do Sol aumenta conforme se distancia do equador em direção aos polos, sendo 25 dias no equador e 34 dias nos polos.
- O valor negativo no período de rotação de Vênus indica que o planeta gira em sentido contrário aos demais objetos.
- A massa do Sol corresponde à 99,85% de toda a massa do Sistema Solar. Isso faz com que ele seja o centro gravitacional do Sistema Solar. Isso não significa que ele seja, necessariamente, o centro das órbitas dos planetas, uma vez que elas são elípticas.

- A temperatura do Sol varia de cerca de 5.800°C na superfície até 15.000.000°C no seu núcleo.
- A temperatura de Mercúrio varia de -184°C durante a noite até 465° durante o dia.
- A temperatura média de Vênus é de 449°C. Isso deve-se ao efeito estufa extremo do planeta, que mantém sua temperatura alta, mesmo durante a noite.
- A temperatura média da Terra é de 15°C. Isso também se deve ao efeito estufa, mais ameno que em Vênus. Se não fosse por ele, a Terra sofreria com variações extremas de temperatura, como as que ocorrem em Mercúrio, porém em menor intensidade e, caso ele se intensifique, a Terra pode sofrer com altas temperaturas, assim como ocorre em Vênus.
- Os 22 anéis de saturno são formados basicamente por pequenas partículas com tamanhos variando de alguns centímetros até poucos metros e compostas por gelo e poeira.
- Plutão deixou de ser considerado um planeta em 2006 devido à redefinição do termo planeta pela União Astronômica Internacional (UAI).

As figuras abaixo mostram imagens dos oito planetas do Sistema Solar.

Figura 12 – Imagem de Mercúrio obtida pela sonda Messenger em 2008.



Fonte: Nasa, 2008.

Figura 14 – Imagem da Terra obtida pelo satélite GOES-16 em 2017.



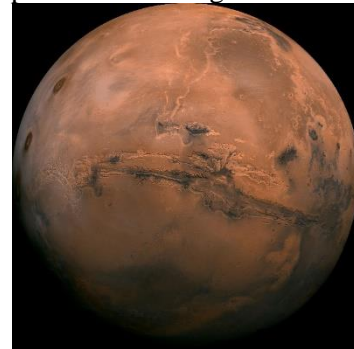
Fonte: Nasa, 2017.

Figura 13 – Imagem de Vênus obtida pela sonda Pioneer-Venus Orbiter em 1979.



Fonte: Nasa, 1979.

Figura 15 – Combinação de imagens de Marte obtidas pela sonda Viking Orbiter 1 em 2013.



Fonte: Nasa, 2013.

Figura 16 – Imagem de Júpiter obtida pelo telescópio Hubble em 2019.



Fonte: Nasa, 2019.

Figura 18 – Imagem de Urano obtida pela sonda Voyager 2 em 1986.



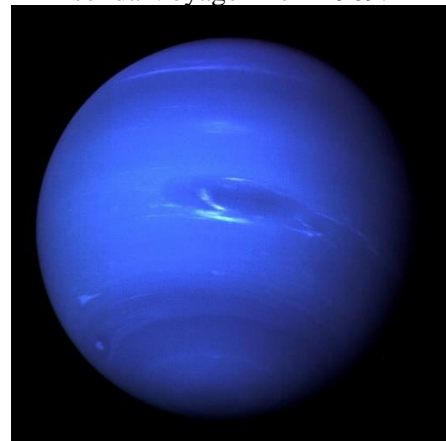
Fonte: Nasa, 1986.

Figura 17 – Imagem de Saturno obtida pela sonda Cassini em 2017.



Fonte: Nasa, 2017.

Figura 19 – Imagem de Netuno obtida pela sonda Voyager 2 em 1989.



Fonte: Nasa, 1989.

MÓDULO 1 - APÊNDICE 1E

Questionário 1.2

1) Se a força gravitacional do Sol faz com que todos os corpos sejam atraídos para ele, por que os planetas não caem no Sol?

Padrão esperado de resposta: Eles não caem no Sol porque possuem dois movimentos, um causado pela força gravitacional que os atraiem em direção ao sol e outro, em linha reta, devido a inércia. A combinação desses dois movimentos nas velocidades adequadas faz com que os planetas percorram trajetórias elípticas e não caiam no Sol.

2) O que aconteceria com a órbita dos planetas do Sistema Solar se o Sol desaparecesse subitamente?

Padrão esperado de resposta: Todos os objetos aprisionados pela gravidade solar seriam instantaneamente soltos para vagar livremente pelo espaço. Suas trajetórias seriam tangentes à órbita que estavam no momento do desaparecimento do Sol.

3) Por que os quatro planetas mais distantes do Sol possuem mais satélites que os demais?

Padrão esperado de resposta: A massa desses planetas é consideravelmente maior que a dos demais, o que é um facilitador para a formação de seus satélites (em maior parte) em conjunto com a formação dos próprios planetas, bem como para a captura de objetos (em menor parte) pelos campos gravitacionais.

Módulo 2 – Relatividade

1. Identificação

Nível de ensino	Médio
Docente responsável	Roberto Vinícios Lessa do Couto
Área do conhecimento	Física
Tema da aula	Relatividade
Título (Tópico) da aula	Relatividade
Tipo predominante	Teórica
Duração prevista	6 aulas de 50 min cada (5 horas)

2. Objetivo principal

Discutir tópicos de astronomia ligados ao estudo da Teoria da Relatividade de Einstein, visando ao entendimento inicial de termos básicos.

3. Objetivos complementares

- Apresentar o conceito de espaço-tempo.
- Apresentar a possibilidade de curvatura do espaço-tempo.
- Apresentar o princípio da equivalência.

4. Conhecimentos introdutórios relevantes

Para que a aula tenha êxito, é necessário que os estudantes tenham conhecimentos básicos sobre a atração gravitacional newtoniana, pois esse conceito será contraposto e modificado com a introdução da deformação do espaço-tempo. Noções prévias de espaço e de tempo também são importantes para o desenvolvimento do conceito relativístico de espaço-tempo.

5. Metodologia

Este módulo didático foi construído tendo como base a teoria da aprendizagem significativa¹⁵ de David Ausubel e os pressupostos das comunidades de investigação¹⁶ propostas no programa de filosofia para crianças de Matthew Lipman.

¹⁵ A aprendizagem significativa é um conceito central na teoria de Ausubel e ocorre quando uma nova informação interage de modo não arbitrário e não literal com algum conceito pré-existente na estrutura cognitiva de um sujeito (MOREIRA, 2011).

¹⁶ Uma comunidade de investigação se estabelece a partir do diálogo entre os estudantes, que apresentam os conteúdos de forma introdutória a partir de suas próprias suposições (SILVA FILHO; FERREIRA, 2018).

Pela extensão do conteúdo, o módulo pode ser dividido em três partes, com uma aula dupla cada. As aulas são eminentemente teóricas e contam com a interação entre professor e alunos, conforme as estratégias descritas a seguir:

5.1. Estratégias didáticas – Parte 01

a) Iniciar a aula propondo que os estudantes se dividam em grupos com quatro ou cinco integrantes e distribuir uma cópia do texto de apoio 2.1, constante do Apêndice 2A, solicitando que o leiam.

b) Mediar uma discussão entre os grupos sobre os tópicos abordados, seguindo o roteiro constante do Apêndice 2B.

c) Pedir que os estudantes respondam, com seus grupos, ao questionário 2.1 do texto de apoio constante do Apêndice 2A.

d) Realizar a dinâmica constante do Apêndice 2C.

e) Explicar que, apesar de poderem ser medidos de formas distintas, o tempo e o espaço não são entidades separadas e formam uma única grandeza física chamada de espaço-tempo, com a parte temporal sendo caracterizada pelas três dimensões já conhecidas (altura, largura e comprimento) e a parte espacial sendo caracterizada pela quarta dimensão (tempo).

f) Caso surjam dúvidas acerca da existência de quatro dimensões, fazer uma breve explanação utilizando as percepções como ponto de partida. Essa explicação pode ser feita mostrando que as dimensões espaciais são percebidas pelos sentidos humanos como tato e visão e a dimensão temporal é percebida com a degradação das estruturas, sejam naturais ou artificiais, por exemplo, o envelhecimento do corpo humano ou a ferrugem em um portão antigo.

5.2. Estratégias didáticas – Parte 02

g) Explicar que serão apresentadas duas cenas do filme *Interestelar*¹⁷ (*Interestelar*, 2014) (01:02:00–01:06:10 e 01:08:00–01:18:08), totalizando 14 minutos e 18 segundos. Esclarecer que, nessas cenas, os personagens realizam uma missão em um planeta orbitando muito próximo a um buraco negro e que o referido filme teve como consultor científico o físico americano Kip Thorne, um dos vencedores do prêmio Nobel de física de 2017, por seus trabalhos acerca das ondas gravitacionais. Desse modo, apesar de ser um filme de ficção

¹⁷ *Interestelar*. Direção de Christopher Nolan. EUA: Warner Bros. Pictures, 2014. 1 disco bluray (169 min).

científica, ele tem base conceitual qualificada e os fenômenos mostrados têm fundamentação científica.

h) Mediar uma discussão seguindo o roteiro constante do Apêndice 2D.

i) Explicar que Einstein postulou que a velocidade da luz é constante e, como consequência de sua famosa equação $E = mc^2$, a maior possível no universo; acrescentar que, para que isso seja verdade, é necessário que o espaço-tempo possa ser modificado. Desse modo, o tempo pode passar de forma diferente para duas pessoas, como ocorreu no filme, e o espaço pode ser modificado, alterando a trajetória de qualquer ente que passe por ele.

j) Explicar que, de acordo com Einstein, a massa gera uma deformação do espaço-tempo. Isto é, qualquer corpo submetido a um campo gravitacional sofre os efeitos da modificação do espaço-tempo. A diferença na passagem de tempo entre os personagens devido ao campo ocasionou o envelhecimento do personagem que ficou na nave. Os astronautas que desceram para o planeta estavam sujeitos a um efeito gravitacional mais alto em relação ao que ficou na nave e, por isso, o tempo passou mais devagar para eles. Além disso:

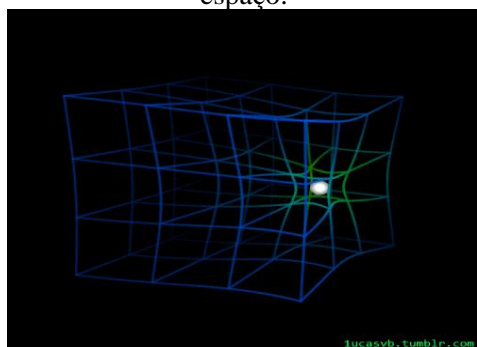
i) Observadores em movimento relativo e em referenciais distintos medindo o tempo e o comprimento de um mesmo corpo obtêm valores diferentes para suas medidas porque, para cada observador, o corpo está com uma velocidade diferente.

ii) Independentemente do referencial adotado, um corpo sujeito a uma aceleração verificará que medidas de seu tempo e espaço em relação a outro corpo sujeito a aceleração distinta da sua são diferentes.

k) Explicar que esses resultados levam à conclusão de que nem o tempo nem o espaço são absolutos, isto é, que eles dependem da escolha do referencial.

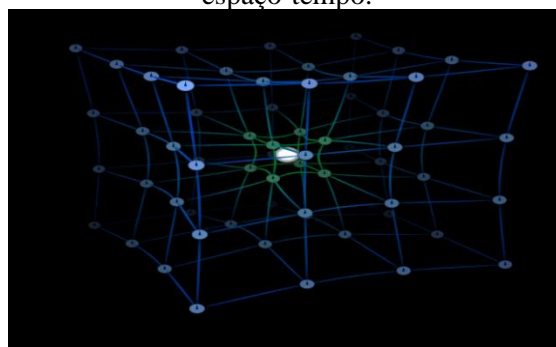
l) Mostrar esses efeitos nas figuras¹⁸ a seguir:

Figura 20 – Modelo 3D da deformação do espaço.



Fonte: BARBOSA, 2016.

Figura 21 – Modelo 3D da deformação do espaço-tempo.



Fonte: BARBOSA, 2016.

¹⁸ As figuras são melhor visualizadas por meio de seus links originais, pois a figura 20 é um GIF animado, enquanto a figura 21 foi capturada de um vídeo.

5.3. Estratégias didáticas – Aula 03

- m) Realizar a demonstração constante do Apêndice 2E.
- n) Pedir que os estudantes respondam, em grupos, ao questionário 2.2, constante no Apêndice 2F.
- o) Questionar os estudantes se aceleração e gravidade podem ser consideradas equivalentes.
- p) Explicar o experimento mental do elevador proposto por Einstein para mostrar a equivalência entre aceleração e gravidade.
- q) Pedir que os estudantes discutam possíveis consequências dessa equivalência.
- r) Finalizar a aula solicitando que os estudantes respondam ao questionário 2.3, presente no Apêndice 2G.

6. Recursos necessários

Para a correta aplicação dessa sequência didática, são necessários os seguintes recursos: quadro, giz/pincel, equipamento multimídia com vídeo e áudio e computador.

7. Referencial teórico e proposta de avaliação

O referencial teórico das estratégias didáticas apresentadas e suas formas de avaliação estão descritas no Quadro 4.

Como elementos formais de avaliação, devem ser utilizadas as respostas dadas aos questionários, comparando-as com as respostas esperadas indicadas nos seus respectivos apêndices. Para tanto, deve-se levar em consideração que não é possível constatar a ocorrência da aprendizagem significativa, mas podem ser encontrados indícios de sua ocorrência.

Esses indícios podem ser verificados na percepção de uma mudança de pensamento quanto ao conteúdo ensinado, em posicionamentos apresentados em formato diferente do mostrado didaticamente e em conclusões que resultem em novos conhecimentos que não foram objeto de ensino. Desse modo, as respostas dadas pelos estudantes não precisam, necessariamente, estar corretas, desde que demonstrem a evolução dos seus subsunçores.

Como forma de complementar a avaliação acima, também podem ser levadas em consideração a efetiva participação dos estudantes nas atividades e as discussões realizadas.

8. Sugestões de atividades complementares

Como forma de complementar os estudos sobre o tema, o professor pode sugerir aos estudantes as seguintes atividades:

- Assistir ao filme **Interestelar** (2014) de Christopher Nolan.
- Assistir ao vídeo **Como funciona a influência da Lua nas marés**, disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=sYss-N7EnEw>. Acesso em 10 ago. 2019.
- Ler o texto sobre as foças de maré do Instituto de Física da UFRGS, disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/fis02001/aulas/aulafordif.htm>. Acesso em 10 ago. 2019.

Quadro 4 – Referencial teórico e proposta de avaliação das estratégias didáticas apresentadas.

Matéria de Ensino	Estratégia Didática	Referencial Teórico	Proposta de Avaliação
Conceitos de espaço e tempo	a	<p>A divisão em grupos busca promover a implementação de pequenas comunidades de investigação.</p> <p>A leitura do texto dentro das pequenas comunidades busca iniciar o processo de diferenciação progressiva dos subsunçores de tempo e espaço provavelmente já presentes na estrutura cognitiva dos estudantes. Uma identificação prévia desses subsunçores pode ser obtida ao ouvir o que está sendo discutido dentro dos grupos.</p>	<p>A verificação de que as comunidades de investigação estão em funcionamento deve ser feita pela observação das interações entre os estudantes. Essas interações devem ocorrer no sentido de buscar entender melhor os conceitos em estudo e de confrontos entre entendimentos diferentes. Caso isso não ocorra naturalmente, deve-se tentar instigar os estudantes, solicitando que eles expliquem para os demais o seu entendimento sobre o assunto.</p>
	b	<p>A discussão entre os grupos busca fazer da sala de aula uma grande comunidade de investigação. Também busca fazer com que os estudantes mostrem seus subsunçores, caso ainda não o tenham feito.</p> <p>A mediação do professor também busca promover a diferenciação progressiva dos subsunçores dos estudantes acerca dos conceitos de espaço e tempo.</p>	

	c	O questionário busca encontrar indícios de aprendizagem significativa dos conceitos de tempo e espaço.	Os indícios da ocorrência de aprendizagem significativa podem ser obtidos a partir das respostas dadas no questionário. Deve-se procurar respostas que abordem os tópicos de formas diferentes das que foram apresentadas aos estudantes. As respostas esperadas devem ser no mesmo sentido das indicadas nas questões, mas não precisam ser iguais.
Espaço-tempo	d	A dinâmica funciona como um organizador prévio para o conceito de espaço-tempo.	Interrupções dos estudantes com perguntas e comentários ao professor indicam a ocorrência da diferenciação progressiva e da reconciliação integrativa dos seus subsunçores.
	e	A explicação busca promover a reconciliação integrativa dos subsunçores de espaço e de tempo.	
	f	A explicação adicional busca promover a diferenciação progressiva do conceito de espaço-tempo.	
Deformação do espaço-tempo	g	A cena mostrada funciona como um organizador prévio para a deformação do espaço-tempo. Também busca manter o interesse dos estudantes pela matéria de ensino.	Comentários sobre a cena mostrada ou sobre o filme como um todo são indícios do interesse dos alunos. Questionamentos sobre outros temas, como o buraco negro da cena ou viagens espaciais também demonstram o interesse pela matéria ensinada.
	h	A discussão busca dar continuidade à comunidade de investigação. A partir da mediação do professor, a discussão também busca promover a diferenciação progressiva do conceito de espaço-tempo.	A efetiva participação dos estudantes, com perguntas ou comentários ao professor e aos seus colegas de turma mostram que a comunidade de investigação está em ação.

	i, j e k	A explicação busca continuar o processo de diferenciação progressiva do conceito de espaço-tempo.	Interrupções dos estudantes com perguntas e comentários ao professor indicam a ocorrência da diferenciação progressiva dos seus subsunçores. Questionamentos sobre a validade da teoria de Newton mostram indícios da aprendizagem significativa.
	l	As imagens buscam continuar a diferenciação progressiva mostrando os conceitos estudados por outro ângulo.	
	m	A demonstração também busca continuar o processo de diferenciação progressiva do espaço-tempo. Ela também introduz a relatividade como uma teoria da gravitação.	
	n	O questionário busca encontrar indícios de aprendizagem significativa do conceito de espaço-tempo.	
Equivalência entre aceleração e gravidade	o	O questionamento funciona como um organizador prévio ao sugerir uma ligação entre o conceito de aceleração e o de gravidade.	Interrupções dos estudantes com perguntas e comentários ao professor indicam a ocorrência da reconciliação integrativa dos seus subsunçores. A efetiva participação dos estudantes, com perguntas ou comentários ao professor e aos seus colegas de turma mostram que a comunidade de investigação está em ação.
	p	A explicação busca a reconciliação integrativa entre a aceleração e a gravidade.	
	q	A discussão traz novamente a comunidade de investigação. Também busca encontrar indícios da aprendizagem significativa da equivalência entre aceleração e gravidade.	

	r	As questões buscam indícios da aprendizagem significativa dos tópicos estudados.	Os indícios da ocorrência de aprendizagem significativa podem ser obtidos a partir das respostas dadas no questionário. Deve-se procurar respostas que abordem os tópicos de formas diferentes das que foram apresentadas aos estudantes. As respostas esperadas devem ser no mesmo sentido das indicadas nas questões, mas não precisam ser iguais. Respostas complementares que conectem as situações das questões com buracos negros ou lentes gravitacionais também são indícios de aprendizagem significativa.
--	---	--	--

Fonte: Elaboração própria.

MÓDULO 2 - APÊNDICE 2A

Texto de Apoio 2.1 – Conceitos de Espaço e de Tempo

Segundo Santana (2019), em uma visão realista da física, os sistemas do mundo já estão dados, existem por si só, da forma como são e, entre eles, há relações e movimento. A partir das relações entre os entes físicos, podem ser introduzidas algumas noções físicas básicas como o comprimento, o espaço e o tempo.

O conceito de comprimento nasce com a escolha de um sistema que será o padrão, uma régua. Ao comparar um objeto qualquer com o padrão tem-se o seu comprimento e o número obtido representa a grandeza física chamada distância.

Utilizando as noções de direção, de distância e de eixos reais (altura, largura e comprimento), pode-se caracterizar o conjunto de localidades, ou posições, que um sistema pode ocupar em uma relação estática com os outros. Esse conjunto representa o *espaço* e a mudança da posição de um sistema para outra posição dentro desse espaço é denominada *movimento*.

A noção de tempo nasce da comparação de quão rápido um sistema muda com relação aos outros. Para realizar essa comparação, é necessária, assim como ocorre com o comprimento, a escolha de um padrão, um relógio, que, neste caso, deve possuir um padrão repetitivo. O número obtido dessa comparação representa a grandeza física chamada *tempo*.

Questionário 2.1

1) Tendo como base uma visão realista da física, discorra sobre a existência do espaço e do tempo.

Padrão esperado de resposta: O espaço e o tempo existem independentemente da visão subjetiva do ser humano.

2) Como é obtida a medida da grandeza física distância?

Padrão esperado de resposta: Primeiro deve-se escolher algo que servirá como um padrão e um modelo para comparação, como uma régua, por exemplo. Após, deve-se comparar esse padrão com o que se quer medir. O valor obtido a partir da comparação desse padrão com o objeto a ser medido é denominado distância.

3) Explique o conceito de espaço.

Padrão esperado de resposta: Espaço é o conjunto de localidades possíveis que um sistema pode ocupar em uma relação estática com outros.

4) Explique o conceito de tempo.

Padrão esperado de resposta: Tempo é a medida resultante da comparação de quão rápido um sistema muda com relação aos outros utilizando um padrão que se repete de forma cíclica.

5) Tendo como base a forma como são obtidas as medidas de tempo, é possível obter um valor exato para o tempo? Explique sua resposta.

Padrão esperado de resposta: Não, porque sempre vai existir um erro associado à medida realizada.

MÓDULO 2 - APÊNDICE 2B

Roteiro de Discussão 2.1

Durante a discussão, deve-se tentar guiar os estudantes a responderem ou comentarem os tópicos das questões abaixo:

- 1) O que é o espaço?
- 2) O que é o tempo?
- 3) Eles existem realmente ou são invenções humanas?
- 4) O que é a medida de algo?
- 5) Como aumentar a precisão de uma medida?

MÓDULO 2 - APÊNDICE 2C

Dinâmica para o Espaço-Tempo

- 1) Questionar os estudantes se o espaço e o tempo são grandezas distintas.

As respostas devem ser na direção de que são diferentes.

- 2) Pedir que algum estudante se levante, vá para a porta da sala e verifique o horário em seu relógio.

- 3) Pedir que outro estudante se levante, ocupe o lugar que o primeiro estava e verifique o horário no mesmo relógio utilizado antes.

- 4) Pedir que os estudantes voltem aos seus lugares e questionar a turma qual é a posição dos dois estudantes no momento da medida no relógio.

As respostas devem indicar que eles estavam no mesmo lugar.

- 5) Questionar a turma qual informação falta para entender por completo a posição dos estudantes.

As respostas devem indicar que falta informar o horário em que a posição foi medida.

- 6) Pedir que dois estudantes se levantem. Um deles deve ocupar um canto da sala e o segundo deve ocupar outro canto da sala. Verificar a hora que o relógio marca.

- 7) Pedir que os estudantes voltem para seus lugares e perguntar se a medida do relógio é suficiente para entender por completo a posição dos estudantes.

As respostas devem indicar que falta o local que cada aluno ocupava.

Obs.: Caso as respostas destoem das esperadas, deve-se intervir retomando subsunções originais.

MÓDULO 2 - APÊNDICE 2D

Roteiro de Discussão 2.2

Durante a discussão, deve-se tentar guiar os estudantes a responderem ou comentarem os tópicos das questões abaixo:

- 1) Ao voltar para a nave, o que eles perceberam que aconteceu com seu colega que ficou?
- 2) Quanto tempo o astronauta disse que passou para ele?
- 3) O tempo passou de forma diferente para eles? Isso é possível?
- 4) É possível saber quanto tempo os astronautas ficaram no planeta Miller?
- 5) Se o tempo pode passar de forma diferente para duas pessoas, vocês acham que o espaço é do mesmo tamanho em qualquer lugar? Vocês acham que o tamanho de um objeto pode mudar?
- 6) O que causou o efeito temporal sobre os astronautas?
- 7) Pode haver outra causa?
- 8) O que poderia causar a contração do espaço?

Durante essa discussão, podem surgir questionamentos acerca das ondas gigantes mostradas no filme. Caso aconteçam, deve-se explicar que elas ocorrem devido à força de maré, que não é o tópico da aula, mas uma explicação resumida pode ser vista no vídeo **Como funciona a influência da Lua nas marés**, disponível na plataforma Youtube no endereço <https://www.youtube.com/watch?v=sYss-N7EnEw>, acesso em 10 ago. 2019. Uma explicação completa pode ser encontrada na página do Instituto de Física da UFRGS no seguinte endereço <http://www.if.ufrgs.br/fis02001/aulas/aulafordif.htm>, acesso em 10 ago. 2019.

MÓDULO 2 - APÊNDICE 2E

Demonstração da gravidade

Materiais:

- Um lençol tamanho solteiro.
- Duas esferas pesadas (aproximadamente 5 kg cada);
- Esferas leves (bolinhas de gude, de ping-pong, de tênis);

Procedimentos

a) Pedir que quatro estudantes segurem e estiquem o lençol, tentando manter a tensão constante.

b) Colocar uma das esferas pesadas no centro do lençol esticado.

c) Explicar que o lençol funciona como se fosse o espaço-tempo e, ao colocar a esfera no centro, ele sofreu uma alteração em seu formato, assim como o próprio espaço-tempo sofre uma alteração nas proximidades de corpos massivos.

d) Complementar a explicação de que os modelos são apenas uma representação da realidade. Para isso, pode-se comparar o lençol e o modelo em 3D das figuras explicando que eles representam partes do espaço-tempo, mas não conseguem simular toda a natureza. O lençol, por exemplo, tem apenas duas dimensões, enquanto as figuras conseguem mostrar três dimensões, porém o espaço-tempo é uma entidade física com quatro dimensões.

e) Jogar uma esfera leve no lençol esticado de modo a fazê-la dar uma volta na esfera pesada.

f) Fazer uma comparação entre a volta dada pela esfera leve e a órbita de um planeta e explicar que a esfera leve não entra em órbita ao redor da pesada devido ao atrito com o lençol e com o ar, que a faz parar.

g) Jogar várias esferas leves seguidamente com velocidades distintas de modo a tentar fazer algumas darem voltas em torno da esfera pesada e outras passem direto pelo lençol sem dar nenhuma volta.

h) Explicar que as esferas mais lentas caem rapidamente para o centro do lençol, enquanto as mais rápidas passam direto por ele, sofrendo pequenas alterações no seu curso. Já as esferas com velocidades intermediárias conseguem dar uma ou duas voltas antes de caírem no centro. Porém, independente da velocidade, elas sempre sofrem algum desvio ao se aproximarem da esfera pesada, maior se passam próximas e menor se passam distantes.

i) Recolher o material e pedir que os estudantes voltem para seus grupos.

MÓDULO 2 - APÊNDICE 2F

Questionário 2.2

1) Como a constância da velocidade da luz alterou as concepções sobre espaço e sobre o tempo?

Padrão esperado de resposta: Ao postular que a velocidade da luz é constante faz-se necessário que o tempo e o espaço não sejam mais absolutos, ou seja, que relógios e réguas em movimento relativo e em diferentes referenciais meçam valores diferentes para o tempo e o espaço.

2) Explique a relação entre um corpo massivo e o espaço-tempo ao seu redor?

Padrão esperado de resposta: Conforme propôs Newton, a gravidade é a partir de corpos massivos. Para Einstein, a gravidade distorce o espaço-tempo. Portanto, corpos massivos alteram o espaço-tempo ao seu redor.

3) Como essa relação ocorre?

Padrão esperado de resposta: Nas proximidades dos corpos massivos o tempo passa mais lentamente que longe deles e o espaço se torna mais curvo a medida que se aproxima de corpos massivos.

4) Explique as diferenças entre a lei de gravitação de Newton e a relatividade de Einstein.

Padrão esperado de resposta: Para Newton, massa atrai massa de forma instantânea, isto é, caso o Sol desaparecesse neste momento, a Terra seria imediatamente solta para vagar livremente no universo. O tempo e o espaço são absolutos, possuindo o mesmo valor, independente do referencial escolhido.

Para Einstein, o espaço e o tempo deixam de ser absolutos, sendo alterados pela quantidade de massa próxima. Além disso, a massa curva o espaço ao seu redor, fazendo com que a trajetória de outros entes seja desviada para sua direção, porém, não mais de forma instantânea, mas com velocidade limitada à da luz.

MÓDULO 2 - APÊNDICE 2G

Questionário 2.3

1) O que ocorreria com a trajetória de um raio de luz que passa próximo a uma estrela?

Padrão esperado de resposta: o raio de luz muda sua trajetória em direção à estrela devido à deformação do espaço-tempo causada por ela. Também podem ser feitos desenhos indicando essa mudança de trajetória.

2) O que ocorreria com essa trajetória se a massa dessa estrela fosse aumentada cada vez mais?

Padrão esperado de resposta: a mudança na trajetória se tornaria maior a medida que a massa da estrela aumentasse, devido à deformação do espaço-tempo, podendo fazer uma espiral até o raio de luz cair na estrela. Um desenho mostrando essa mudança também pode ser feito.

3) Se, no lugar do raio de luz da questão um, fosse um tripulante em uma nave espacial viajando próximo a uma estrela, qual seria sua percepção do ocorrido? Como outra pessoa, em um planeta distante dessa estrela descreveria o ocorrido com a nave e seu tripulante?

Padrão esperado de resposta: O tripulante perceberia uma força atraindo ele e a nave para próximo dessa estrela, enquanto veria seu relógio funcionando normalmente. Já uma pessoa distante veria a nave fazendo uma curva em direção à estrela e perceberia que seu relógio marca a hora mais rapidamente que o relógio do tripulante.

4) Tendo em vista os novos conhecimentos mostrados, a teoria de Newton para a gravitação é suficiente para entender todos os fenômenos mostrados? Ela deixou de ser válida?

Padrão esperado de resposta: A teoria de Newton não é suficiente para entender os novos fenômenos, mas ela não perde completamente sua validade, uma vez que ainda pode ser utilizada para entender muitos fenômenos que ocorrem em referenciais não acelerados e com objetos com pouca massa.

Módulo 3 – Buracos Negros

1. Identificação

Nível de ensino	Médio
Docente responsável	Roberto Vinícios Lessa do Couto
Área do conhecimento	Física
Tema da aula	Astronomia
Título (Tópico) da aula	Buracos Negros
Tipo predominante	Teórica
Duração prevista	6 aulas de 50 minutos cada (5 horas)

2. Objetivo principal

Discutir tópicos de astronomia ligados ao estudo de buracos negros como consequência da relatividade, visando ao aprofundamento de seus conceitos.

3. Objetivos complementares

- Apresentar um breve histórico dos buracos negros.
- Apresentar o raio de Schwarzschild.
- Apresentar o Horizonte de Eventos.
- Mostrar como surgem os buracos negros.
- Mostrar formas de detecção dos buracos negros.
- Mostrar a primeira imagem de um buraco negro.

4. Conhecimentos introdutórios relevantes

Para que a aula tenha êxito, é necessário que os estudantes tenham conhecimentos básicos sobre a atração gravitacional dos corpos e sobre a deformação do espaço-tempo gerada pela massa e energia, pois esses conceitos servirão de base para o desenvolvimento dos tópicos relativos aos buracos negros.

5. Metodologia

Este módulo didático foi construído tendo como base a teoria da aprendizagem significativa¹⁹ de David Ausubel e os pressupostos das comunidades de investigação²⁰ propostas no programa de filosofia para crianças de Matthew Lipman.

Pela extensão do conteúdo, o módulo pode ser dividido em três partes, com uma aula dupla cada. As aulas são eminentemente teóricas e contam com a interação entre professor e alunos, conforme as estratégias descritas a seguir:

5.1. Estratégias didáticas – Parte 01

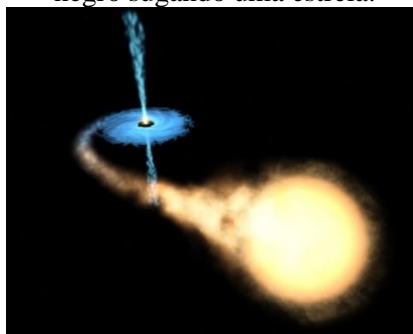
- a) Mostrar as figuras a seguir.

Figura 22 – Concepção artística de um buraco negro.



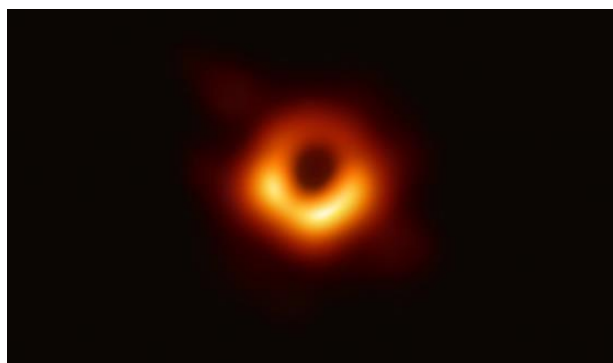
Fonte: Nasa, 2013.

Figura 23 – Concepção artística de um buraco negro sugando uma estrela.



Fonte: Nasa, 2002.

Figura 24 – Buraco negro e seu horizonte de eventos localizado na galáxia M87.



Fonte: ESO, 2019.

- b) Questionar oralmente os estudantes se eles sabem o que elas representam e se estão relacionadas com a gravitação. De modo a auxiliá-los, utilizar questionamentos que os

¹⁹ A aprendizagem significativa é um conceito central na teoria de Ausubel e ocorre quando uma nova informação interage de modo não arbitrário e não literal com algum conceito pré-existente na estrutura cognitiva de um sujeito (MOREIRA, 2011).

²⁰ Uma comunidade de investigação se estabelece a partir do diálogo entre os estudantes, que apresentam os conteúdos de forma introdutória a partir de suas próprias suposições. (SILVA FILHO; FERREIRA, 2018).

direcionem à resposta correta como, por exemplo, “O que está acontecendo nas figuras?”, “Vocês conseguem ver que a matéria está sumindo quando cai na parte escura?” e “O que vocês acham que é essa parte escura das figuras?”. Nos questionamentos, usar termos como sugando, atraindo ou lugar escuro, por exemplo.

c) Explicar que se tratam de buracos negros, regiões no espaço-tempo com uma concentração de massa tão grande que nem a luz consegue escapar de seu campo gravitacional e esse que fenômeno se origina como resultado da gravitação e da relatividade estudados nas aulas anteriores.

d) Solicitar que a turma se divida em grupos de quatro ou cinco alunos e, para cada um, devem ser entregues cópias do texto de apoio 3.1 – Um breve Histórico dos Buracos Negros, constante do Apêndice 3A, para leitura.

e) Mediar uma discussão entre os grupos acerca do texto de apoio, seguindo o roteiro constante do Apêndice 3B.

f) Solicitar que os estudantes respondam, com seus grupos, ao questionário 3.1 constante do Apêndice 3C.

5.2. Estratégias didáticas – Parte 02

g) Explicar o raio de Schwarzschild. Para tanto, explicar que o raio de Schwarzschild delimita a fronteira onde não é mais possível escapar da atração gravitacional do buraco negro e que ele aparece dentro da solução encontrada por Schwarzschild para as equações de Einstein. Ele pode ser calculado a partir da expressão $r_s = \frac{2GM}{c^2}$ e seu valor pode ser utilizado para estimar o tamanho do buraco negro formado por uma estrela, caso ela possa se transformar em um.

h) Mostrar aos estudantes o vídeo **Black Hole Size Comparison 2018**²¹.

i) Utilizar o vídeo para explicar o horizonte de eventos de um buraco negro. Para tanto, explicar que o horizonte de eventos é a fronteira que indica o ponto onde não é mais possível retornar, caso seja atravessado, isto é, ele separa os eventos que estão aprisionados pelo buraco negro dos eventos que não estão. Deve-se tomar o cuidado de esclarecer que o horizonte de eventos não é uma superfície física, ele representa uma fronteira matemática, isto é, ele não é palpável.

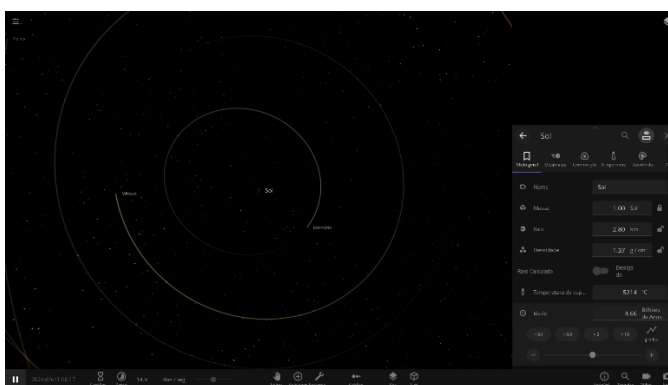
²¹ O vídeo se encontra na plataforma Youtube, disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=FBchtOfZJSM>. Acesso em: 19 ago. 2019.

j) Deve-se mostrar também que, apesar da quantidade de massa contida em um buraco negro, seu tamanho é relativamente pequeno se comparado ao restante dos objetos astronômicos, como galáxias e aglomerados de galáxias.

k) Solicitar que os estudantes respondam ao questionário 3.2 contido no Apêndice 3D.

l) Abrir o simulador **Universe Sandbox**²² e realizar uma simulação do sistema solar, como a sugerida na questão 02 do questionário 3.2, em que o Sol tem seu raio diminuído além do seu raio de Schwarzschild.

Figura 25 – Simulação do Sol como um buraco negro



Fonte: Universe Sandbox (2015).

5.3. Estratégias didáticas – Parte 03

m) Apresentar o vídeo **Buracos Negros Estelares**²³.

n) Entregar o texto de apoio 3.2 – **Como Nascem os Buracos Negros**, constante do Apêndice 3E, para leitura.

o) Mediar uma discussão entre os grupos acerca do vídeo e do texto de apoio conforme roteiro constante do Apêndice 3F.

p) Solicitar que os estudantes respondam ao questionário 3.3, constante do Apêndice 3G.

q) Entregar o texto de apoio 3.3 – **Como Detectar Um buraco Negro**, constante do Apêndice 3H, para leitura.

r) Explicar que não é possível obter uma imagem direta de um buraco negro e o mais próximo que se pode chegar dela é conseguir “fotografar” sua sombra rodeada de matéria

²² O simulador se encontra disponível na plataforma de jogos eletrônicos **Steam**, no endereço <https://store.steampowered.com/app/230290/>.

²³ O vídeo se encontra na plataforma Youtube, disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=rBKvz88q8J4>. Acesso em: 22 nov. 2018.

ao seu redor. Porém, mesmo essa imagem é difícil de ser conseguida uma vez que, como visto anteriormente, os buracos negros são relativamente pequenos e a matéria ao seu redor emite tanta radiação que acaba por ofuscar a sombra do horizonte de eventos do buraco negro.

s) Explicar que a dificuldade de se obter essa imagem é tão grande que apenas em 2019, mais de cem anos após a publicação da TRG, os cientistas conseguiram obtê-la.

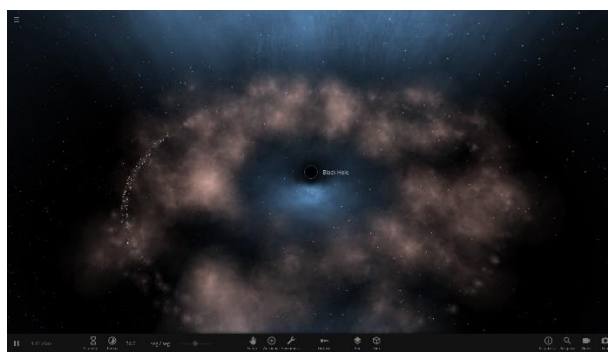
t) Mostrar a reportagem **primeira imagem de um buraco negro encanta cientistas**²⁴ (GLOBO, 2019).

u) Explicar que a imagem é do buraco negro localizado no centro da galáxia Messier 87 (M87) e foi obtida pelo Event Horizon Telescope (EHT), a partir da combinação de oito rádio telescópios²⁵ espalhados pelo planeta que, juntos, funcionam como um gigantesco telescópio, o EHT, do tamanho da Terra. O EHT reuniu petabytes de dados que foram processados em supercomputadores para, ao final, obter a imagem do buraco negro.

v) Explicar que outros telescópios ainda podem entrar para o EHT, o que fará com que suas próximas imagens sejam ainda melhores e que possa obter imagens de outros buracos negros, como o localizado no centro da Via láctea.

w) Mostrar novamente as figuras do item “a” e explicar que tanto a figura 18, quanto a 19 são apenas concepções artísticas de buracos negros, enquanto a figura 20 é a imagem real obtida pelos cientistas. Abrir o simulador **Universe Sandbox**² e realizar uma simulação de um buraco negro supermassivo com seu disco de acreção ao redor, de modo a ilustrar o que ocorre com o buraco negro real.

Figura 26 – Simulação de um buraco negro e seu disco de acreção.



Fonte: Universe Sandbox (2015).

²⁴ JORNAL Nacional. Apresentado por Willian Bonner e Renata Vasconcellos. Rio de Janeiro: Rede Globo de Televisão, 11 abr. 2019, 20 h. Duração 2 minutos e 28 segundos. Reportagem sobre como foram obtidas as primeiras imagens de um buraco negro. Disponível em: <https://globoplay.globo.com/v/7534273/programa/>. Acesso em 12 abr. 2019.

²⁵ Os telescópios são: ALMA, APEX, the IRAM 30-meter telescope, the James Clerk Maxwell Telescope, the Large Millimeter Telescope Alfonso Serrano, the Submillimeter Array, the Submillimeter Telescope, and the South Pole Telescope.

x) Mostrar mais uma vez as figuras do item “a” e solicitar que os estudantes respondam ao Questionário 3.4, constante do Apêndice 3I.

6. Recursos necessários

Para a correta aplicação dessa sequência didática, são necessários os seguintes recursos: quadro, giz/pincel, equipamento multimídia com vídeo e áudio, computador e o simulador Universe Sandbox².

7. Proposta de Avaliação (com referencial teórico)

O referencial teórico das estratégias didáticas apresentadas e suas formas de avaliação estão descritas no Quadro 5.

Como elementos formais de avaliação, devem ser utilizadas as respostas dadas aos questionários, comparando-as com as respostas esperadas indicadas nos seus respectivos apêndices. Para tanto, deve-se levar em consideração que não é possível constatar a ocorrência da aprendizagem significativa, mas podem ser encontrados indícios de sua ocorrência.

Esses indícios podem ser verificados na percepção de uma mudança de pensamento quanto ao conteúdo ensinado, em posicionamentos apresentados em formato diferente do mostrado didaticamente e em conclusões que resultem em novos conhecimentos que não foram objeto de ensino. Desse modo, as respostas dadas pelos estudantes não precisam, necessariamente, estar corretas, desde que demonstrem a evolução dos seus subsunçores.

Como forma de complementar a avaliação acima, também podem ser levadas em consideração a efetiva participação dos estudantes nas discussões realizadas.

8. Sugestões de Leituras complementares

Como forma de complementar os estudos sobre o tema, são sugeridos os seguintes textos:

- Buracos Negros – texto disponível no site do Instituto de Física da UFRGS no endereço <http://www.if.ufrgs.br/~thaisa/buracos-negros/>. Acesso em 23 nov. 2018.
- Cem anos de buracos negros – artigo de Alberto Saa de 2016, publicado na Revista Brasileira de Ensino de Física e disponível em <http://www.scielo.br/pdf/rbef/v38n4/1806-1117-rbef-38-04-e4201.pdf>.

Quadro 5 – Referencial teórico e proposta de avaliação das estratégias didáticas apresentadas.

Matéria de Ensino	Estratégia Didática	Referencial	Proposta de Avaliação
Introdução aos Buracos Negros	a e b	As imagens e o questionamento funcionam como um organizador prévio para o tópico de buracos negros. As respostas ao questionamento podem identificar os subsunçores dos estudantes acerca dos buracos negros.	Interrupções dos estudantes com perguntas e comentários ao professor indicam a ocorrência da diferenciação progressiva dos seus subsunçores.
	c	A explicação busca iniciar o processo de diferenciação progressiva dos conceitos de relatividade estudados no módulo anterior, introduzindo o conceito de buracos negros.	
Histórico dos Buracos Negros	d	A leitura do texto busca a diferenciação progressiva do conceito de buracos negros. Também busca a reconciliação integrativa de tópicos de história e de ciências.	A verificação de que as comunidades de investigação estão em funcionamento deve ser feita pela observação das interações entre os estudantes, com perguntas ou comentários ao professor e aos seus colegas de turma. Essas interações devem ocorrer no sentido de buscar entender melhor os conceitos em estudo e de

	e	A discussão entre os grupos busca fazer da sala de aula uma grande comunidade de investigação. Também busca fazer com que os estudantes externalizem seus subsunçores. A mediação do professor também busca promover a diferenciação progressiva dos subsunçores dos estudantes acerca dos conceitos de buracos negros.	confrontos entre entendimentos diferentes. Caso isso não ocorra naturalmente, deve-se tentar instigar os estudantes pedindo que eles expliquem para os demais o seu entendimento sobre o assunto.
	f	O questionário busca encontrar indícios de aprendizagem significativa dos tópicos estudados.	Os indícios da ocorrência de aprendizagem significativa podem ser obtidos a partir das respostas dadas no questionário. Deve-se procurar respostas que abordem os tópicos de formas diferentes das que foram apresentadas aos estudantes. As respostas esperadas devem ser no mesmo sentido das indicadas nas questões, mas não precisam ser iguais.
Raio de Schwarzschild e Horizonte de Eventos	g	A explicação busca a diferenciação progressiva do conceito de buracos negros, introduzindo o raio de Schwarzschild.	Interrupções dos estudantes com perguntas e comentários ao professor indicam a ocorrência da diferenciação progressiva dos seus subsunçores.
	h	O vídeo funciona como organizador prévio para o conceito de horizonte de eventos. Também busca manter o interesse dos estudantes pela matéria de ensino.	Comentários sobre o vídeo mostrado são indícios do interesse dos alunos. Questionamentos e comparações do tamanho dos buracos negros com outras estruturas do universo também demonstram o interesse pela matéria de ensino.

	i e j	As explicações buscam promover a diferenciação progressiva do raio de Schwarzschild, introduzindo o horizonte de eventos.	Interrupções dos estudantes com perguntas e comentários ao professor indicam a ocorrência da diferenciação progressiva dos seus subsunçores.
	k	O questionário busca encontrar indícios de aprendizagem significativa dos tópicos estudados.	Os indícios da ocorrência de aprendizagem significativa podem ser obtidos a partir das respostas dadas no questionário. Deve-se procurar respostas que abordem os tópicos de formas diferentes das que foram apresentadas aos estudantes. As respostas esperadas devem ser no mesmo sentido das indicadas nas questões, mas não precisam ser iguais.
	l	A simulação busca a diferenciação progressiva dos tópicos em estudo. Também busca manter o interesse dos estudantes pela matéria de ensino.	Interrupções dos estudantes com perguntas e comentários ao professor indicam a ocorrência da diferenciação progressiva dos seus subsunçores, bem como demonstram o interesse pela matéria de ensino. Perguntas envolvendo mudanças nos parâmetros da simulação também indicam interesse dos estudantes. Caso ocorra esse tipo de comentário, pode-se mudar os parâmetros e refazer a simulação, desde que não se fuja ao tópico em estudo.
Como surgem os Buracos Negros	m	O vídeo busca promover a diferenciação progressiva do conceito de buracos negros, introduzindo o tópico de como são criados.	Comentários sobre o vídeo mostrado são indícios do interesse dos alunos.
	n	O texto busca continuar a diferenciação progressiva do tópico sobre como são criados os buracos negros.	A efetiva participação dos estudantes, com perguntas ou comentários ao professor e aos seus colegas de

	o	A discussão busca dar continuidade à comunidade de investigação. A partir da mediação do professor, a discussão também busca promover a diferenciação progressiva do conceito do tópico estudado.	turma mostram que a comunidade de investigação está em ação.
	p	O questionário busca encontrar indícios de aprendizagem significativa dos tópicos estudados.	Os indícios da ocorrência de aprendizagem significativa podem ser obtidos a partir das respostas dadas no questionário. Deve-se procurar respostas que abordem os tópicos de formas diferentes das que foram apresentadas aos estudantes. As respostas esperadas devem ser no mesmo sentido das indicadas nas questões, mas não precisam ser iguais.
Detecção de Buracos Negros	q	O texto busca promover a diferenciação progressiva do conceito de buracos negros, mostrando formas de detectá-los.	Interrupções dos estudantes com perguntas e comentários ao professor indicam a ocorrência da diferenciação progressiva dos seus subsunçores.
	r e s	As explicações buscam continuar a diferenciação progressiva do tópico em estudo.	
Primeira Imagem de um Buraco Negro	t	A reportagem busca promover a diferenciação progressiva do conceito de buracos negros ao mostrar a primeira imagem desse objeto. Também busca a diferenciação progressiva do pensamento geral de que a ciência estudada na escola é estática ao mostrar um resultado recente de uma teoria de mais de cem anos atrás.	Questionamentos e comentários acerca da reportagem indicam a ocorrência da diferenciação progressiva dos subsunçores.
	u, v e w	As explicações buscam continuar a diferenciação progressiva dos tópicos em estudo.	Interrupções dos estudantes com perguntas e comentários ao professor indicam a ocorrência da diferenciação progressiva dos seus subsunçores.

	x	<p>A simulação busca a diferenciação progressiva dos tópicos em estudo. Também busca manter o interesse dos estudantes pela matéria de ensino.</p>	<p>Interrupções dos estudantes com perguntas e comentários ao professor indicam a ocorrência da diferenciação progressiva dos seus subunçores, bem como demonstram o interesse pela matéria de ensino. Perguntas envolvendo mudanças nos parâmetros da simulação também indicam interesse dos estudantes. Caso ocorra esse tipo de comentário, pode-se mudar os parâmetros e refazer a simulação, desde que não se fuja ao tópico em estudo.</p>
	y	<p>O questionário busca encontrar indícios de aprendizagem significativa dos tópicos estudados.</p>	<p>Os indícios da ocorrência de aprendizagem significativa podem ser obtidos a partir das respostas dadas no questionário. Deve-se procurar respostas que abordem os tópicos de formas diferentes das que foram apresentadas aos estudantes. As respostas esperadas devem ser no mesmo sentido das indicadas nas questões, mas não precisam ser iguais.</p>

Fonte: Elaboração própria.

MÓDULO 3 - APÊNDICE 3A

Texto de Apoio 3.1 – Um Breve Histórico dos Buracos Negros

Muito antes da Teoria da Relatividade Geral (TRG), no século XVIII, John Michell, astrônomo e geólogo inglês, propôs, em uma carta enviada à Henry Cavendish, em 1783, a existência de estrelas que seriam invisíveis para qualquer observador, que ele chamou de estrelas negras. Para Michell, as estrelas negras gerariam uma atração gravitacional tão forte que não permitiriam que a luz escapasse delas.

Essa definição de estrelas negras era totalmente baseada na mecânica clássica de Newton e, a partir dela, Michell concluiu que se existissem objetos com a mesma densidade que o Sol, porém com diâmetro 500 vezes maior, eles não poderiam ser vistos, uma vez que a luz nunca conseguiria sair desses corpos gigantescos.

Desse modo, percebe-se que o conceito de buracos negros é anterior à Teoria da Relatividade Geral (TRG), porém já se assemelha ao conceito atual dessas estruturas físicas, em que um buraco negro é uma região no espaço-tempo em que há uma concentração tão grande de massa que nem a luz consegue escapar de seu campo gravitacional.

Esse conceito moderno de buraco negro é previsto pela Teoria da Relatividade Geral de Albert Einstein, publicada em março de 1916, mas já apresentada em quatro artigos preliminares em novembro de 1915.

Originalmente, Einstein não chegou a uma solução para as equações da TRG, porém, Karl Schwarzschild, astrônomo e físico alemão, apenas um mês após a publicação dos artigos preliminares da TRG, enviou para Einstein uma solução exata para suas equações, que ficou conhecida como solução de Schwarzschild.

Dentre outros fenômenos, a solução de Schwarzschild previu a existência dos buracos negros. Porém, a ideia de corpos extremamente densos, em que sua atração gravitacional seria tão forte que nem a luz poderia escapar não agradou aos cientistas da época, nem mesmo o próprio Einstein entendia que isso seria fisicamente possível. Para eles, os buracos negros seriam mera possibilidade matemática da solução de Schwarzschild, não existindo no mundo físico.

Esse pensamento começou a mudar pouco antes da segunda guerra mundial, com as contribuições de Subrahmanyan Chandrasekhar (Chandra) e de Julius Robert Oppenheimer, que mostraram a possibilidade de ocorrência de um colapso gravitacional em corpos massivos,

fazendo surgir os corpos extremamente densos necessários para a existência de um buraco negro.

Durante a Segunda Guerra Mundial, as pesquisas sobre temas não bélicos, incluídas nesse grupo as pesquisas sobre buracos negros, foram deixadas de lado em função da necessidade dos países em obter mais poderio tecnológico e armamentista que seus adversários.

Terminada a guerra, o estudo dos buracos negros voltou a tomar fôlego no final da década de 1950 com a interpretação correta do raio de Schwarzschild feita por David Finkelstein e continuou em duas grandes correntes: a soviética, liderada por Yakov Borisovich Zel'dovich, e a americana, liderada por John Archibald Wheeler, responsável por difundir o nome Buraco Negro.

MÓDULO 3 - APÊNDICE 3B

Roteiro de Discussão 3.1

Durante a discussão, deve-se tentar guiar os estudantes a responderem ou comentarem os tópicos das questões abaixo:

- 1) Os cientistas antes de Einstein já tinham pensado em estruturas como os buracos negros? Como elas eram? Baseadas em que corrente científica?
- 2) Quem foram alguns dos cientistas que continuaram e complementaram os trabalhos de Einstein? Como foi esse processo?
- 3) Por que, inicialmente, os cientistas não acreditavam na existência real dos buracos negros, mesmo que os cálculos apontassem para sua existência?
- 4) Como a 2ª GM influenciou a ciência em geral? E a guerra fira?

MÓDULO 3 - APÊNDICE 3C

Questionário 3.1

1) Elenque as diferenças entre o conceito de estrelas negras de John Michell e os buracos negros como definidos atualmente.

Padrão esperado de resposta: As estrelas negras de Michell seriam corpos gigantesco, com diâmetro 500 vezes maior que o do Sol, porém, com densidade semelhante a ele e que, devido a grande quantidade de matéria, gerariam uma força gravitacional tão forte que a luz produzida por eles seria atraída de volta para sua superfície.

Já um buraco negro é uma região no espaço-tempo com uma concentração de massa tão grande que nem a luz pode escapar de seu campo gravitacional.

Desse modo, a estrela de Michell seria invisível porque não consegue liberar a luz produzida por ela, enquanto um buraco negro é invisível por aprisionar qualquer raio de luz que adentre sua fronteira.

2) Explique porque, mesmo com uma solução exata das equações de Einstein, os cientistas da época não acreditavam na existência dos buracos negros.

Padrão esperado de resposta: Eles entendiam que a solução das equações de Einstein era apenas uma possibilidade matemática e não existiria no mundo físico. Isso porque era necessário um corpo extremamente denso para gerar um buraco negro e essa alta densidade de matéria ainda não era prevista pelas teorias científicas da época.

Desse modo, apesar de ser uma solução matemática para as equações de Einstein, os buracos negros só poderiam ser considerados caso fossem obtidas provas empíricas de sua existência ou caso sua estrutura teórica tivesse respaldo em outras teorias já com aceitação científica.

3) Explique porque, somente após a segunda guerra mundial, o estudo dos buracos negros tomou fôlego.

Padrão esperado de resposta: Em parte, porque os esforços científicos foram desviados para a guerra e, após seu fim, voltaram para suas áreas de interesse fortalecidas pela disputa ocorrida entre EUA x URSS na guerra fria.

MÓDULO 3 - APÊNDICE 3D

Questionário 3.2

1) Explique como o raio de Schwarzschild pode ser utilizado para determinar o tamanho do buraco negro que um corpo celeste formaria se ele pudesse ser transformado em um.

Padrão esperado de resposta: O raio de Schwarzschild indica a distância do centro até a borda do buraco negro formado por uma quantidade de massa m . Desse modo, sabendo a massa de um corpo celeste qualquer, pode-se calcular seu raio de Schwarzschild e descobrir o tamanho do buraco negro que seria formado por esse corpo caso sua massa estivesse interna ao raio de Schwarzschild.

2) Caso o Sol se tornasse um buraco negro, explique o que aconteceria com a órbita dos planetas no sistema solar. Qual seria o tamanho desse buraco negro?

Padrão esperado de resposta: Nada aconteceria com as órbitas dos corpos pertencentes ao sistema solar. Isso porque a massa total do Sol permaneceria a mesma e, uma vez que ela é responsável pelas órbitas, nada seria alterado.

$$r_s = \frac{2GM}{c^2}$$

$$r_s = \frac{2 * 6,674 * 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2} * 1,989 * 10^{30} \text{ kg}}{(2,998 * 10^8 \text{ m s}^{-1})^2}$$

$$r_s = 2,953 * 10^3 \text{ m}$$

Desse modo, caso toda a massa do Sol colapsasse, ele formaria um buraco negro de aproximadamente 3 Km de raio.

3) Explique a relação entre o raio de Schwarzschild e o horizonte de eventos de um buraco negro.

Padrão esperado de resposta: O valor do raio de Schwarzschild indica a localização do horizonte de eventos de um buraco negro.

MÓDULO 3 - APÊNDICE 3E

Texto de Apoio 3.2 – Como Nascem os Buracos Negros

Buracos Negros são formados a partir dos restos de estrelas de massas muito altas que, durante sua vida, estão em equilíbrio hidrostático, no qual sua força gravitacional é contrabalanceada por sua pressão interna, fazendo com que a estrela fique estável. Caso a pressão interna seja maior que a força gravitacional, a estrela vai se expandir e caso a força da gravidade seja maior que a pressão interna, a estrela irá diminuir de tamanho.

Quando chega ao final de sua vida, a estrela já não tem combustível suficiente para manter o equilíbrio hidrostático e a força gravitacional passa a vencer a pressão interna. Desse desequilíbrio, podem surgir as seguintes estruturas:

- Uma **Anã Branca**, caso a estrela original possua até 8 massas solares (M_{sol});
- Uma **Estrela de Nêutrons**, se sua massa inicial for de 8 M_{sol} a 25 M_{sol} e;
- Um **Buraco Negro**, caso a estrela tenha massa entre 25 M_{sol} e 100 M_{sol} .

Para estrelas com massas maiores que 100 M_{sol} , durante sua evolução, parte de sua massa será ejetada devido a pressão interna de radiação até que ela fique com massa menor que 100 M_{sol} e termine sua vida como uma das opções descritas.

Desse modo, buracos negros originados diretamente a partir de restos de estrelas são chamados de buracos negros estelares. Porém, já foram detectados buracos negros com massas milhões de vezes a massa do Sol, chamados de buracos negros supermassivos.

A princípio parece estranha a existência de um buraco negro com massa milhões de vezes maior que a do Sol, uma vez que eles surgem a partir de estrelas mortas. Mas deve-se lembrar que um buraco negro não é estático no espaço-tempo e ele sempre pode absorver mais massa de alguma fonte externa, como uma estrela próxima ou mesmo ele pode se fundir com outro buraco negro, formando, ao final, um buraco negro muito maior que o original. Assim, com o passar do tempo, o buraco negro estelar pode tornar-se um buraco negro supermassivo.

MÓDULO 3 - APÊNDICE 3F

Roteiro de Discussão 3.2

Durante a discussão, deve-se tentar guiar os estudantes a responderem ou comentarem os tópicos das questões abaixo:

- 1) Como surgem os buracos negros?
- 2) O Sol poderia se transformar em um buraco negro?
- 3) Os buracos negros podem aumentar seu tamanho? E diminuir?

MÓDULO 3 - APÊNDICE 3G

Questionário – 3.3

1) Explique de que modo a pressão interna das estrelas é contrabalanceada pela gravidade.

Padrão esperado de resposta: As reações nucleares que ocorrem no interior das estrelas geram energia, esquentando o material, o que faz com que elas tendam a se expandir, porém a atração gravitacional das partículas que as constituem fazem com que elas tendam a se contrair. Durante seu tempo de vida, essas duas forças são quase equivalentes, com pequeno ganho das reações nucleares, o que faz com que as estrelas se expandam lentamente e de forma estável.

2) Explique como pode ser feita a detecção de um buraco negro e elabore outro modo de detecção diferente dos mostrados nos exemplos dados.

Padrão esperado de resposta: Pode-se detectar um buraco negro ao observar objetos celestes orbitando ao redor de um ponto vazio e verificando que suas massas são muito altas para serem invisíveis e não serem buracos negros. Também se pode detectar através do disco de acreção, composto de gás aquecido e que emite raios-X que podem ser captados por um observador distante.

MÓDULO 3 - APÊNDICE 3H

Texto de Apoio 3.3 – Como Detectar um Buraco Negro

Uma vez que um buraco negro não emite qualquer tipo de partícula ou radiação, sua detecção direta não é possível. Ou seja, um buraco negro não pode ser visto por nenhum instrumento conhecido atualmente e, caso um telescópio fosse apontado na posição exata em que um buraco negro se encontra, nada dentro do seu horizonte de eventos iria aparecer em suas imagens.

Porém, um buraco negro pode ser detectado de maneiras indiretas. Ele cria um campo gravitacional a sua volta, ou seja, ele pode capturar, em sua órbita, outros objetos celestes fora de seu horizonte de eventos.

Por estarem fora do horizonte de eventos, esses objetos podem emitir partículas e radiação normalmente, que podem ser detectadas por algum observador distante. Desse modo, esse observador distante veria um objeto celeste aparentemente orbitando o vazio e, como isso não é possível fisicamente, esse vazio deve ser um buraco negro. O fator importante é obter o valor da massa desse objeto e verificar que ela é muito alta em um volume pequeno para ser invisível e não ser um buraco negro.

Outra forma indireta de detecção seria a partir do gás de uma estrela próxima ao buraco negro. O buraco negro captura parte do gás dessa estrela em seu disco que acreção, composto de gás aquecido e que emite raios-X que podem ser captados por um observador distante.

MÓDULO 3 - APÊNDICE 3I

Questionário 3.4

1) De que modo os buracos negros representados nas figuras estão ligados à gravitação?

Padrão esperado de resposta: Os buracos negros estão ligados à gravitação devido a imensa quantidade de massa concentrada que possuem. Por isso, eles possuem um campo gravitacional fortíssimo, capaz de alterar o espaço-tempo ao seu redor de tal modo que nem a luz consegue escapar.

2) Por que pode-se inferir que essas imagens representam buracos negros?

Padrão esperado de resposta: nas imagens é possível perceber que toda a matéria está sendo atraída para uma região em comum e, ao entrar nela, parece desaparecer. Além disso, essa região é escura, não emitindo radiação ou não permitindo que ela escape.

Módulo 4 – Lentes Gravitacionais

1. Identificação

Nível de ensino	Médio
Docente responsável	Roberto Vinícios Lessa do Couto
Área do conhecimento	Física
Tema da aula	Relatividade
Título (Tópico) da aula	Lentes Gravitacionais
Tipo predominante	Teórica
Duração prevista	4 aulas de 50 min cada (3h20)

2. Objetivo principal

Abordar tópicos de astronomia ligados ao estudo das lentes gravitacionais, visando à sua compreensão e à discussão de sua importância nos estudos sobre exoplanetas e matéria escura.

3. Objetivos complementares

- Introduzir o fenômeno das lentes gravitacionais.
- Apresentar os diferentes tipos de lentes gravitacionais.
- Discutir formas de utilização das lentes gravitacionais.

4. Conhecimentos introdutórios relevantes

Para que a aula tenha êxito, é necessário que os estudantes tenham conhecimentos básicos sobre a dilatação do espaço-tempo causada por corpos massivos, pois esse fenômeno é responsável pelo desvio da luz, fazendo surgir as lentes gravitacionais.

5. Metodologia

Este módulo didático foi construído tendo como base a teoria da aprendizagem significativa²⁶ de David Ausubel e os pressupostos das comunidades de investigação²⁷ propostas no programa de filosofia para crianças de Matthew Lipman.

²⁶ A aprendizagem significativa é um conceito central na teoria de Ausubel e ocorre quando uma nova informação interage de modo não arbitrário e não literal com algum conceito pré-existente na estrutura cognitiva de um sujeito (MOREIRA, 2011).

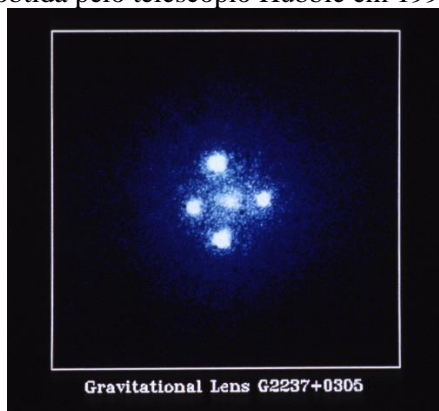
²⁷ Uma comunidade de investigação se estabelece a partir do diálogo entre os estudantes, que apresentam os conteúdos de forma introdutória a partir de suas próprias suposições (SILVA FILHO; FERREIRA, 2018).

Pela extensão do conteúdo a ser abordado, o módulo pode ser dividido em duas partes, com uma aula dupla cada. As aulas são eminentemente teóricas (expositivas) e contam com a interação entre professor e alunos, conforme as estratégias descritas a seguir:

5.1. Estratégias didáticas – Parte 1

- a) Apresentar a Figura 27, a seguir:

Figura 27 – Lente gravitacional G2237+0305, também conhecida como Cruz de Einstein. Imagem obtida pelo telescópio Hubble em 1990.



Fonte: ESA/Hubble, 1990.

- b) Perguntar aos estudantes quantos objetos diferentes eles observam na imagem.
- c) Esclarecer que há apenas dois objetos diferentes na imagem: uma galáxia, ao centro, e quatro imagens do mesmo quasar²⁸ ao redor dessa galáxia.
- d) Explicar que a imagem representa o fenômeno chamado de Lente Gravitacional. Ele é previsto pela Relatividade Geral e ocorre devido à curvatura do espaço-tempo provocada pelos corpos massivos.
- e) Solicitar que os estudantes se dividam em grupos com quatro ou cinco componentes e entregar, para leitura, uma cópia do texto de apoio 4.1 – Lentes Gravitacionais, constante do Apêndice 4A.
- f) A leitura do texto deve ser realizada concomitantemente às explicações do professor, que deve projetar suas figuras enquanto explica o que representa cada uma delas.
- g) Solicitar que os grupos respondam ao questionário 4.1, constante do Apêndice 4B, que aborda os tópicos de lentes gravitacionais tratados até o momento.

²⁸ Um quasar é uma intensa fonte de rádio formada por uma densa concentração de estrelas e gás centradas em um gigantesco buraco negro que produz mais energia que uma galáxia inteira devido à aceleração de suas partículas sendo engolidas por ele. Seu nome deriva do latim *quasi-stellar*, pois seu brilho, azulado na região do visível, se assemelha ao de uma estrela (PERUZZO; POTTKER; PRADO, 2014).

h) Solicitar que os grupos produzam, para a próxima aula, um vídeo de até dois minutos explicando o que são as lentes gravitacionais e qual seria a sua importância para a astronomia e cosmologia. A forma de produção do vídeo pode ser deixada a critério dos estudantes, preferencialmente com o uso dos próprios smartphones, mas se pode sugerir que façam um vlog, uma animação ou um esquete.

5.2. Estratégias didáticas – Parte 02

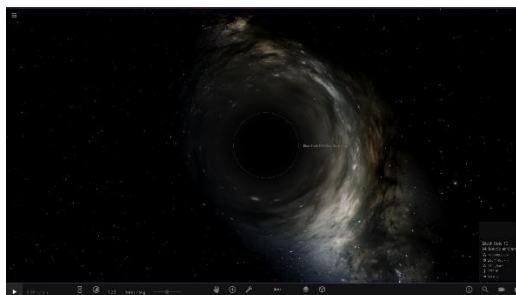
i) Abrir o simulador Universe Sandbox²⁹ e realizar uma simulação de lentes gravitacionais produzidas por um buraco negro. Essa simulação possui parâmetros pouco limitados e se deve manipulá-la de modo a mostrar diferentes tipos de lentes formadas. Para tanto, deve-se mudar a posição do observador de modo a ser possível a visualização de vários tipos de lentes gravitacionais.

Figura 28 – Simulação de Lente gravitacional.



Fonte: Universe Sandbox (2015).

Figura 29 – Simulação de Lente gravitacional.



Fonte: Universe Sandbox (2015).

j) Entregar aos grupos, para leitura, uma cópia do texto de apoio 4.2 – Algumas Utilizações das Lentes Gravitacionais, constante do Apêndice 4C.

k) A leitura do texto deve ser realizada concomitante com explicações do professor, que deve projetar suas figuras enquanto explica o que representa cada uma delas.

l) Solicitar que os grupos respondam ao questionário 4.2, constante do Apêndice D, acerca das formas de utilização das lentes gravitacionais.

6. Recursos necessários

Para a correta aplicação dessa sequência didática, são necessários os seguintes recursos: quadro, giz/pincel, equipamento multimídia com vídeo e áudio e computador, *smartphones* ou câmeras de vídeo e o simulador Universe Sandbox².

²⁹ O simulador se encontra disponível na plataforma de jogos eletrônicos **Steam**, no endereço <https://store.steampowered.com/app/230290/>. Acesso em 17 dez. 2018.

7. Referencial teórico e proposta de avaliação

O referencial teórico das estratégias didáticas apresentadas e suas formas de avaliação estão descritas no Quadro 6.

Como elementos formais de avaliação, devem ser utilizadas as respostas dadas aos questionários, comparando-as com as respostas esperadas (indicadas nos respectivos apêndices) e o conteúdo do vídeo produzido em atividade extraclasse. Para tanto, deve-se levar em consideração que não é possível constatar a aprendizagem significativa, embora possam ser encontrados indícios de sua ocorrência.

Esses indícios podem ser verificados na percepção de uma mudança de pensamento quanto ao conteúdo ensinado, em posicionamentos apresentados em formato diferente do mostrado didaticamente (por exemplo, na forma de proposicionamento e discussão ou no percurso utilizado para solucionar problemáticas com variados níveis de complexidade) e em conclusões que resultem em novos conhecimentos que não foram objeto de ensino. Desse modo, embora se busquem posicionamentos com adequação científica, em uma primeira instância, a análise dada às respostas dos estudantes devem privilegiar a evolução dos seus subsunçores em detrimento à reprodução de padrões.

Como forma de complementar a avaliação acima, também pode ser levada em consideração a efetiva participação dos estudantes nas atividades propostas.

8. Sugestões de Leituras complementares

Como forma de complementar os estudos sobre o tema, pode-se sugerir aos estudantes as seguintes atividades:

- Ler o texto “Lentes Gravitacionais” do Instituto de Física da UFRGS, disponível em: <http://lilith.fisica.ufmg.br/~dsoares/ensino/1-10/lentes-gravitacionais-fernando.pdf>. Acesso em 25 set. 2019. O texto traz um breve contexto histórico das lentes gravitacionais.
- Ler o texto “Lentes Gravitacionais” publicado na Folha de São Paulo, disponível em: <https://www1.folha.uol.com.br/fsp/ciencia/fe2810200104.htm>. Acesso em 30 set. 2019. O texto revisa o assunto tratado no módulo.
- Ouvir a entrevista de João Steiner ao Jornal da USP, disponível em: <https://jornal.usp.br/atualidades/os-incriveis-efeitos-das-lentes-gravitacionais/>. Acesso em 30 set. 2019. A entrevista também faz uma revisão dos assuntos tratados no módulo.

Quadro 6 – Referencial teórico e proposta de avaliação das estratégias didáticas apresentadas.

Matéria de Ensino	Estratégia Didática	Aportes do Referencial Teórico	Proposta de Avaliação
Lentes Gravitacionais	a, b e c	A imagem, o questionamento e a explicação funcionam como um organizador prévio para as lentes gravitacionais. As respostas ao questionamento mostram os subsunçores dos estudantes.	Interrupções dos estudantes com perguntas e comentários ao professor indicam a ocorrência da diferenciação progressiva dos seus subsunçores.
	d	A explicação busca promover a diferenciação progressiva dos subsunçores identificados acerca das lentes gravitacionais. Também busca promover a reconciliação integrativa do fenômeno em estudo ao mostrá-lo como uma consequência natural da relatividade geral.	
Tipos de Lentes Gravitacionais	e	A divisão em grupos busca promover a implementação de pequenas comunidades de investigação.	A verificação de que as comunidades de investigação estão em funcionamento deve ser feita pela observação das interações entre os estudantes. Essas interações devem ocorrer no sentido de buscar entender melhor os conceitos em estudo e de confrontos entre entendimentos diferentes. Caso isso não ocorra naturalmente, deve-se tentar instigar os estudantes solicitando que eles expliquem para os demais o seu entendimento sobre o assunto.
	f	A leitura do texto e a explicação do professor buscam promover a diferenciação progressiva do tópico de lentes gravitacionais.	Interrupções dos estudantes com perguntas e comentários ao professor indicam a ocorrência da diferenciação progressiva dos seus subsunçores.

	g		Os indícios da ocorrência de aprendizagem significativa podem ser obtidos a partir das respostas dadas nas questões. Deve-se procurar respostas que abordem os tópicos de formas diferentes das que foram apresentadas aos estudantes. As respostas esperadas devem ser no mesmo sentido das indicadas nas questões, mas não precisam ser iguais.
	h	O questionário e o vídeo buscam encontrar indícios da aprendizagem significativa dos tópicos estudados. A produção do vídeo também busca manter o interesse dos estudantes pela matéria de ensino.	Os indícios da ocorrência de aprendizagem significativa no vídeo podem ser encontrados nas falas dos estudantes e na apresentação visual dos tópicos abordados, que devem mostrar o conteúdo de forma diferente da abordada no texto e nas explicações do professor. Devem ser levadas em consideração falas em concordância com o estudado e não necessariamente iguais.
Formas de Utilização das Lentes Gravitacionais	i	A simulação busca continuar o processo de diferenciação progressiva anterior. Também busca manter o interesse dos estudantes pela matéria de ensino.	Interrupções dos estudantes com perguntas e comentários ao professor indicam a ocorrência da diferenciação progressiva dos seus subsunçores, bem como demonstram o interesse pela matéria de ensino. Perguntas envolvendo mudanças nos parâmetros da simulação também indicam interesse dos estudantes. Caso ocorra esse tipo de comentário, pode-se mudar os parâmetros e refazer a simulação, desde que não se fuja ao tópico em estudo.
	j	A divisão em grupos busca manter em funcionamento as pequenas comunidades de investigação formadas anteriormente.	A verificação de que as comunidades de investigação estão em funcionamento deve ser feita pela observação das interações entre os estudantes. Essas interações devem ocorrer no sentido de buscar entender melhor os conceitos em estudo e de confrontos entre entendimentos diferentes.

			Caso isso não ocorra naturalmente, deve-se tentar instigar os estudantes pedindo que eles expliquem para os demais o seu entendimento sobre o assunto.
	k	A leitura do texto e a explicação do professor buscam promover a diferenciação progressiva do tópico de lentes gravitacionais.	Interrupções dos estudantes com perguntas e comentários ao professor indicam a ocorrência da diferenciação progressiva dos seus subsunçores.
	l	O questionário busca encontrar indícios da aprendizagem significativa dos tópicos estudados.	Os indícios da ocorrência de aprendizagem significativa podem ser obtidos a partir das respostas dadas nas questões. Deve-se procurar respostas que abordem os tópicos de formas diferentes das que foram apresentadas aos estudantes. As respostas esperadas devem ser no mesmo sentido das indicadas nas questões, mas não precisam ser iguais.

Fonte: Elaboração própria.

MÓDULO 4 - APÊNDICE 4A

Texto de Apoio 4.1 – Lentes Gravitacionais

Uma lente gravitacional é um efeito, previsto pela teoria da relatividade geral de Einstein, que consiste na mudança da trajetória dos raios de luz devido à distorção do espaço-tempo provocado por objetos com massa. Isto é, a massa dos objetos faz com que os raios de luz sejam curvados, funcionando, assim, de forma análoga a uma lente de aumento ou a um par de óculos, por exemplo. Uma lente gravitacional ocorre em qualquer escala, desde aglomerados de galáxias, com efeitos facilmente perceptíveis, até pequenos corpos, como uma bola de tênis, porém, com efeitos tão pequenos que não é possível verificá-los.

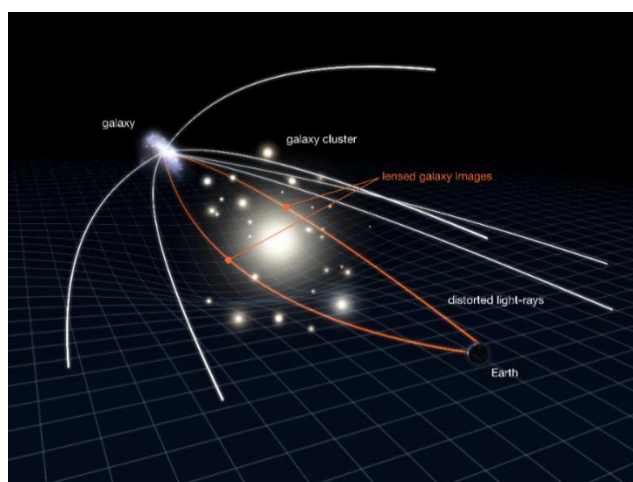
Os efeitos das lentes gravitacionais podem ser divididos em alguns regimes principais:

Lentes Fortes

Produzem efeitos mais extremos, sendo facilmente percebidas e dependem da posição relativa dos objetos participantes do efeito. Alguns exemplos são descritos e ilustrados a seguir:

- Múltiplas imagens – Uma lente gravitacional pode produzir diversas imagens de um mesmo objeto que, dependendo da trajetória percorrida pela luz, podem mostrá-los em diferentes fases temporais. Isto é, cada imagem pode mostrar o objeto com uma idade diferente.

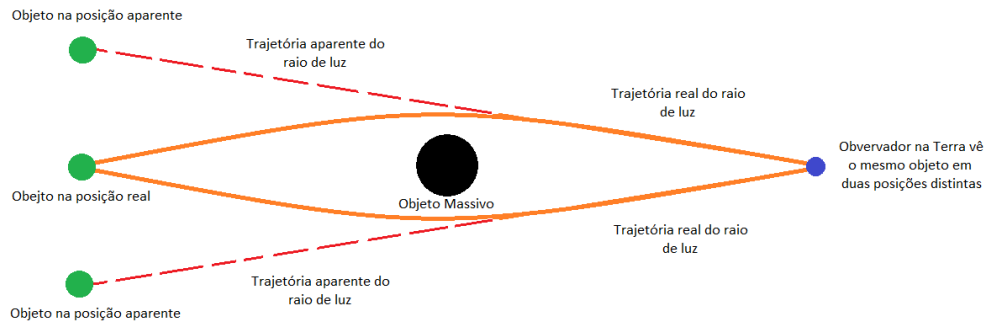
Figura 30 – Esquema de formação de múltiplas imagens por uma lente gravitacional.



Fonte: ESA/Hubble, 2011.

A Figura 30 mostra uma lente gravitacional criada pelo cluster de galáxias no centro da imagem. Esse cluster curva o espaço-tempo ao seu redor, fazendo com que os raios de luz (em laranja) da galáxia atrás dele percorram uma trajetória curva e cheguem na Terra formando duas imagens dessa galáxia.

Figura 31 – Esquema simplificado da formação de múltiplas imagens por uma lente gravitacional.

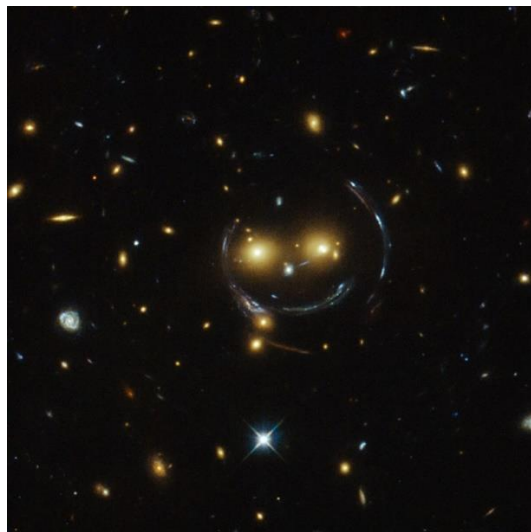


Fonte: Elaboração própria.

A Figura 31 mostra um esquema simplificado da trajetória percorrida pelos raios de luz da Figura 30. As duas imagens são formadas porque o observador na Terra vê os raios de luz como se eles tivessem percorrido trajetórias retilíneas e, com isso, como se tivessem vindo de diferentes posições.

- Arcos – Uma lente gravitacional pode distorcer a imagem de um objeto fazendo com que ela forme um arco de circunferência.

Figura 32 – Arcos formando um sorriso. Imagem obtida pelo telescópio Hubble.

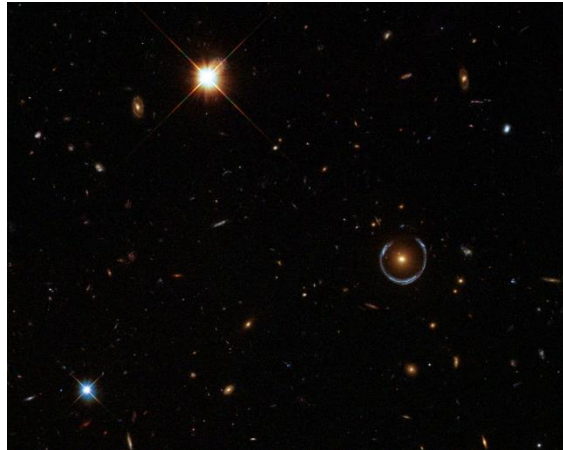


Fonte: Nasa, 2015.

A Figura 32 mostra uma lente gravitacional formando arcos que fazem parecer um rosto sorrindo para a foto do Hubble.

- Anel de Einstein – Quando o alinhamento entre os objetos participantes da lente é grande, os arcos podem se transformar em um anel, conhecido como Anel de Einstein.

Figura 33 – Anel de Einstein quase completo.

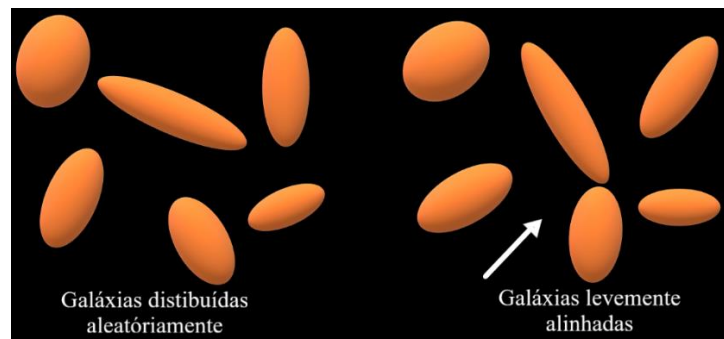


Fonte: ESA/Hubble, 2011.

Lentes Fracas

Produzem efeitos mais discretos, sendo mais difíceis de serem detectadas. Essas lentes provocam pequenas mudanças no formato dos objetos observados, como um esticamento ou uma mudança em sua orientação.

Figura 34 – Esquema simplificado de lente gravitacional fraca.

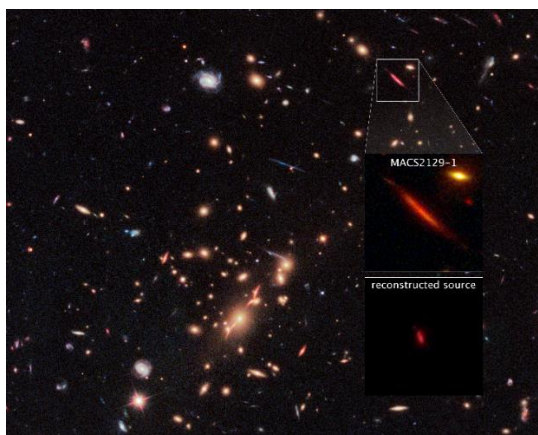


Fonte: Elaboração própria.

A Figura 34 mostra, de forma simplificada, o efeito de uma lente gravitacional fraca. Nela, é possível ver que as galáxias, distribuídas de forma aleatória no espaço, tendem a se alinhar devido aos efeitos da lente.

A Figura 35 mostra uma lente gravitacional atuando sobre a galáxia MACS2129-1. A lente provoca uma mudança em sua orientação, um esticamento de seu tamanho e, também, um aumento no seu brilho aparente.

Figura 35 – Lente gravitacional fraca atuando sobre a galáxia MACS2129-1.

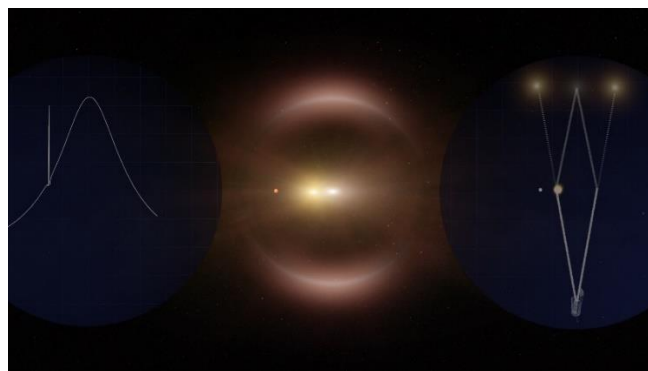


Fonte: ESA/Hubble, 2017.

Microlentes gravitacionais

São produzidas por corpos menores, como estrelas ou mesmo planetas. As microlentes ocorrem quando um objeto de menor porte fica entre o observador e o objeto observado e tem como efeito a convergência dos raios de luz emitidos, fazendo com que ele aumente seu tamanho e seu brilho aparentes.

Figura 36 – Concepção artística de uma microlente gravitacional.



Fonte: Nasa, 2016.

Uma animação da microlente gravitacional da Figura 36³⁰ pode ser vista no site da Nasa, através do link <https://svs.gsfc.nasa.gov/20242>.

³⁰ Fonte: NASA's Goddard Space Flight Center Conceptual Image Lab. Disponível em: <https://svs.gsfc.nasa.gov/20242>. Acesso em 16 set. 2019.

MÓDULO 4 - APÊNDICE 4B

Questionário 4.1

- 1) Observe a Figura 37, a seguir, para então responder às questões apresentadas.

Figura 37 – Aglomerado de galáxias Abell 2218.



Fonte: ESA/Hubble, 2008.

- a) Por que há objetos deformados em meio a objetos não deformados na figura?

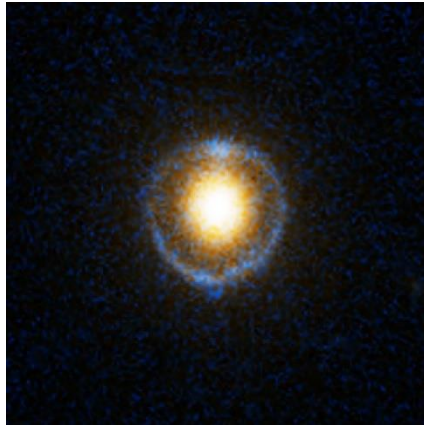
Padrão esperado de resposta: A figura mostra objetos deformados porque a luz emitida por eles passou por uma ou mais regiões em que o espaço-tempo estava deformado devido à ação de um campo gravitacional. Essa deformação ocorre de acordo com o previsto pela relatividade geral e faz com que os raios de luz façam curvas durante seus trajetos. Esse fenômeno é chamado de lente gravitacional.

- b) Onde está localizada a maior concentração de massa do aglomerado? Explique sua resposta.

Padrão esperado de resposta: A massa está concentrada próxima ao centro da figura. Isso porque é possível perceber que os desvios e arcos formados tendem a envolver essa área da figura, mostrando que o espaço-tempo está mais curvado nessa região e, assim, ela possui mais massa que as demais áreas da figura.

- 2) Na Figura 38, a seguir, pode-se observar duas galáxias atuando para a formação do fenômeno conhecido como Anel de Einstein.

Figura 38 – Anel de Einstein.



Fonte: ESA/Hubble, 2005.

Explique o papel de cada galáxia na formação do Anel de Einstein da figura.

Padrão esperado de resposta: A galáxia de cor amarela age como lente gravitacional, deformando o espaço-tempo ao seu redor devido à sua massa. Já a de cor azul é a galáxia lenteada, isto é, a luz emitida por ela que, a princípio, não poderia ser vista por um observador na Terra é desviada ao passar próxima à galáxia amarela, que faz esses raios de luz convergirem.

O formato circular da galáxia azul é devido a posição relativa de alinhamento entre as duas galáxias e o observador na Terra.

3) Faça um esboço da atuação de uma microlente gravitacional.

Padrão esperado de resposta: O esboço deve estar de acordo com a teoria.

4) Um buraco negro pode atuar como uma lente gravitacional? Explique sua resposta.

Padrão esperado de resposta: Sim, um buraco negro também pode atuar como uma lente gravitacional. Isso porque fora de seu horizonte de eventos um buraco negro age como qualquer outro objeto com massa e, por isso, também deforma o espaço-tempo ao seu redor, desviando qualquer raio de luz que passe perto dele de sua trajetória inicial.

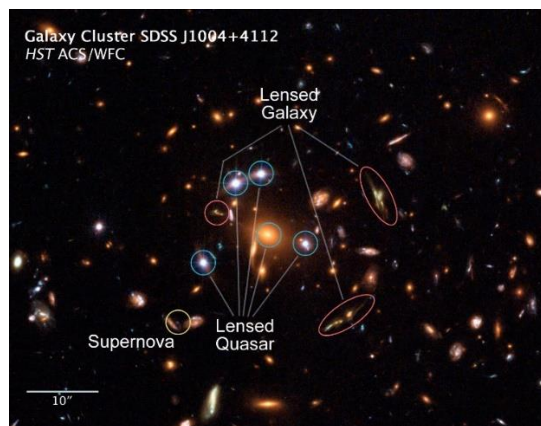
MÓDULO 4 - APÊNDICE 4C

Texto de Apoio 4.2 – Algumas Utilizações das Lentes Gravitacionais

Evolução de objetos cósmicos

As lentes gravitacionais podem ser utilizadas para estudar diferentes fases da evolução de um objeto cósmico. Quando uma lente produz múltiplas de imagens de uma galáxia, por exemplo, cada imagem pode ter uma diferença temporal de milhares ou milhões de anos e, assim, pode-se estudar como a galáxia evoluiu nesse intervalo de tempo.

Figura 39 - Múltiplas imagens de objetos formadas por uma lente gravitacional.



Fonte: ESA/Hubble, 2006.

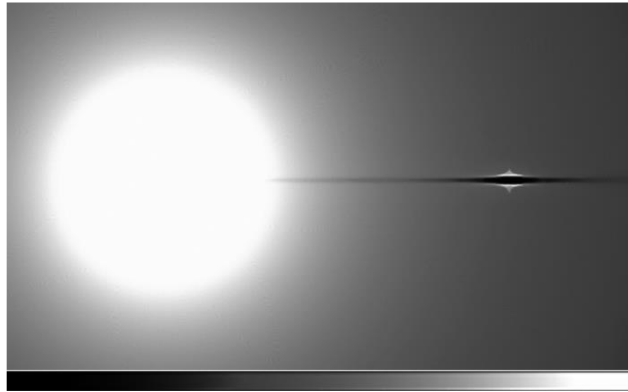
A Figura 39 mostra cinco imagens de um mesmo quasar e três imagens de uma mesma galáxia. As formas diferentes dos objetos são devidas a trajetória percorrida pela luz em cada imagem. Desse modo, o tempo para chegar até o observador também será diferente e, com isso, pode-se estudar os objetos em três estágios de desenvolvimento, no caso da galáxia, e em cinco estágios, no caso do quasar.

Detecção de objetos de difícil visualização

As microlentes gravitacionais podem ser utilizadas para detectar objetos que, sem elas, são invisíveis para os telescópios, por estarem muito distantes ou por terem seu brilho ofuscado por outros objetos mais chamativos.

Como as microlentes focalizam e aumentam o brilho desses objetos, eles se tornam mais fáceis de serem visualizados e identificados. Tendo como base as microlentes, técnicas mais avançadas podem encontrar até mesmo planetas orbitando outras estrelas, os chamados exoplanetas.

Figura 40 – Esquema de magnificação do brilho produzido por uma microlente gravitacional.



Fonte: Almeida e Nascimento (2019).

A Figura 40 mostra o aumento do brilho de um objeto (a esquerda), provocado por uma microlente gravitacional. Devido ao brilho da estrela (a direita), normalmente não é possível detectar objetos próximos orbitando a estrela. Porém, quando essa estrela está em posição favorável, ela pode magnificar o brilho de alguma outra estrela que esteja atrás dela. Com isso, caso essa primeira estrela possua algum objeto que a orbite, ele também irá magnificar o brilho da segunda estrela, porém em intensidade muito menor. Desse modo, a partir de análises apuradas, é possível verificar se esse objeto é um exoplaneta ou não.

Detecção de Matéria Escura

As lentes gravitacionais também podem ser utilizadas para a detecção da quantidade de matéria escura espalhada pelo universo.

Figura 41 – Matéria escura.



Fonte: Nasa, 2017.

A Figura 41 mostra a distribuição de matéria comum (rosa) ao centro e de matéria escura³¹ (azul) ao lado. Utilizando-se técnicas apuradas pode-se verificar que a matéria comum não seria suficiente para produzir os efeitos observados na lente gravitacional, sendo necessária uma quantidade muito maior de matéria, a matéria escura, para produzi-los.

A distribuição observada na figura é resultado da colisão de dois aglomerados de galáxias. A matéria escura se distancia mais rapidamente porque interage apenas gravitacionalmente, enquanto a matéria comum fica para trás porque interage de outras formas, além da gravitacional.

³¹ Matéria escura é o nome dado à matéria que não emite radiação eletromagnética e, desse modo, não é possível sua detecção direta por meios conhecidos atualmente. A única forma de interação conhecida é a gravitacional (PERUZZO; POTTKER; PRADO, 2014).

MÓDULO 4 - APÊNDICE 4D

Questionário 4.2

1) Explique como as lentes gravitacionais podem ser utilizadas para entender como algumas estruturas do universo evoluem.

Padrão esperado de resposta: Devido aos efeitos das lentes gravitacionais, um observador na Terra pode visualizar um mesmo objeto em diferentes fases de sua vida e entender como ele passa de um estado inicial para outro um pouco mais avançado.

2) Explique como uma lente gravitacional pode ser utilizada na visualização de uma estrela e de um exoplaneta no espaço.

Padrão esperado de resposta: Uma lente gravitacional pode desviar a trajetória dos raios de luz emitidos por algum objeto de modo a focalizá-los, fazendo com que seu brilho aparente aumente e tornando-o mais fácil de visualizá-lo.

Do mesmo modo, um exoplaneta pode agir como uma lente gravitacional aumentando um pouco o brilho de sua estrela, o que seria um indício de sua existência.

5- Análise da Aplicação

O produto foi aplicado em uma turma do terceiro ano do ensino médio de uma escola pública localizada em Ceilândia, cidade satélite do Distrito Federal. Essa turma era composta por um total de vinte e nove alunos frequentes, os quais se dividiram em oito grupos fixos, com os membros escolhidos por eles próprios, para realizarem as tarefas solicitadas. Isso foi feito para facilitar a implementação das pequenas comunidades de investigação, uma vez que a afinidade entre seus membros é um facilitador do diálogo almejado pelas comunidades.

Uma característica dos estudantes da escola é o alto índice de ausências às aulas e a turma de aplicação não foge a esse padrão. Foram realizados treze encontros no total e a Tabela 3, a seguir, mostra a quantidade de faltas em cada aula, que resultou em uma média de 31,30% de alunos ausentes por aula.

Tabela 3 – Quantidade de ausências dos estudantes às aulas.

Aula	Nº de Ausências	Ausências
1	7	24,14%
2	10	34,48%
3	14	48,28%
4	4	13,79%
5	6	20,69%
6	14	48,28%
7	13	44,83%
8	11	37,93%
9	6	20,69%
10	8	27,59%
11	8	27,59%
12	1	3,45%
13	16	55,17%
Média	9,07	31,30%

Fonte: Elaboração própria.

Essas ausências não se concentravam nos mesmos estudantes, sendo distribuídas de forma quase homogênea por toda a turma, o que afetou negativamente seu desempenho de modo geral.

Os trabalhos de Pontili e Kassouf (2007) e de Costa, Guimarães e Rocha (2015) listam alguns fatores que estimulam a baixa frequência escolar, como a renda per capita da família dos estudantes, a escolaridade do chefe da família, a cor dos estudantes, negros e pardos têm maior probabilidade de faltarem às aulas que brancos, problemas econômicos e familiares, desmotivação e aspectos físicos e organizacionais da escola.

O público da escola onde foi aplicado o produto se enquadra no rol citado, pois é composto, principalmente, por moradores do Pôr do Sol e do Sol Nascente, regiões com baixa escolaridade, 64,15% não possuem o ensino médio completo, baixa renda per capita, de R\$ 622,30, e de maioria negra ou parda, 66,83% se declaram dessa forma (CODEPLAN, 2015).

A partir desses dados é possível inferir o porquê do alto número de ausências dos estudantes, porém apenas uma pesquisa regional e específica sobre o assunto mostraria as razões de forma mais adequada.

A alta quantidade de ausências relatada teve impactos na aprendizagem dos estudantes, uma vez que viam o conteúdo de forma descontínua, o que dificulta a aquisição ou a modificação dos subsunçores existentes em suas estruturas cognitivas. Desse modo, a própria aprendizagem significativa é prejudicada, pois é altamente dependente dos conhecimentos prévios dos alunos.

Em relação à aplicação, foram realizados treze encontros, totalizando vinte e seis horas-aula, enquanto o previsto no produto seria de vinte horas-aula. Isso ocorreu devido aos seguintes fatores: a hora-aula na unidade de ensino é de apenas quarenta e cinco minutos, a dispensa dos alunos no último horário ocorria quinze minutos antes do horário estabelecido e o início do intervalo foi adiantado em vinte minutos em duas ocasiões. Desse modo, os encontros extras foram necessários, porém não representaram grandes empecilhos ao desenvolvimento do conteúdo.

As próximas subseções fazem uma análise detalhada de como ocorreram as aulas com os estudantes e acerca do nível de aprendizagem resultante delas.

5.1- Análise das Aulas

De modo geral, as aulas ocorreram sem problemas e com participação dos estudantes acima da que ocorre em aulas normais, o que demonstra que houve interesse pela matéria de ensino. Colaboram com essa conclusão, informações dos próprios estudantes, quando questionados pelo professor em duas ocasiões, na metade e no final da aplicação, sobre o que pensavam das aulas e do conteúdo ministrado, em que responderam que gostaram do conteúdo dado e da forma como ocorreram os encontros, com várias atividades diferenciadas.

No decorrer das atividades, o professor frequentemente buscava encontrar os subsunçores dos estudantes. Para isso, eram feitas perguntas orais como “Vocês acham que esses fenômenos estão relacionados?”, “O que vocês estão vendo nesse momento?”, “Vocês conseguem ver algo diferente acontecendo?”, “Vocês acham que esse fenômeno é realmente possível?”, entre outras. Desse modo, a participação era estimulada, bem como o

funcionamento da comunidade de investigação. Como facilitador, o professor sempre informava que, no momento, não seria importante dar a resposta correta, mas entender o que estava acontecendo. Essa estratégia já era usada pelo professor em suas aulas normais, o que foi um facilitador adicional para que os estudantes expressassem seus pensamentos.

Percebeu-se que os estudantes demonstravam maior entusiasmo durante as simulações realizadas e quando eram mostradas imagens dos fenômenos e astros estudados, o que foi um facilitador para verificação de indícios de aprendizagem significativa e de desenvolvimento de habilidades de ordem superior. Já durante as explicações do professor, em geral, os estudantes estavam atentos, mas pouco participativos, o que foi um impeditivo para que se possa fazer qualquer tipo de inferência acerca da aprendizagem significativa.

As discussões realizadas tiveram boa participação dos estudantes e revelaram, com frequência, a utilização e exercício das habilidades de ordem superior necessárias ao desenvolvimento do pensar de ordem superior.

A seguir, é feita uma análise de como ocorreu cada aula realizada.

Primeira Aula

Nessa aula, foi mostrada aos estudantes uma reprodução adaptada do experimento de Cavendish em vídeo e uma simulação em computador, foi solicitado que os estudantes respondessem à questão um do questionário 1.1 e foram feitas as explicações constantes no roteiro do produto.

Durante a apresentação do vídeo, percebeu-se que os estudantes se espantaram ao verem os pesos presos à régua serem atraídos pelas bolas de boliche, demonstrando ausência de subsunçores acerca da gravitação.

Durante a primeira simulação, em que são colididas duas estrelas de mesma massa (dois sóis), um dos estudantes percebeu e mostrou aos demais que a velocidade instantânea das estrelas aumentava a medida que elas se aproximavam.

Durante a segunda simulação, em que são colididas duas estrelas de massas diferentes (um Sol e uma Achernar), um estudante observou que, mesmo possuindo massas diferentes, ambas as estrelas estavam se movimentando e aumentando suas velocidades, porém em taxas diferentes. Em suas palavras “As duas estrelas estão se mexendo” e “A maior está ficando mais lenta que a pequena”. Outro aluno observou que o tempo necessário para a colisão foi menor que na simulação anterior.

A terceira simulação, em que, novamente, duas estrelas de massas iguais (duas Achernar) sofrem uma colisão, os estudantes perceberam que o tempo necessário para a colisão diminuía, em relação à simulação anterior.

Após as simulações, o professor iniciou a discussão 1.1 perguntando à turma qual era a diferença entre cada uma. Algumas das respostas obtidas foram: “A cor das estrelas”, “O tempo para baterem”, “A velocidade de atração” “O tamanho das estrelas” e “A massa das estrelas”.

Ao perguntar o que aconteceria caso as estrelas tivessem mais massa, teve respostas como “Elas seriam maiores” “O tempo seria menor” e “Elas bateriam mais rápido”.

Ao serem perguntados acerca da relação entre a massa e o tempo de colisão, os grupos concordaram em dizer que “Quanto mais massa, mais rápido elas batem”.

Na última pergunta, a respeito da relação entre a massa e a força gravitacional, alguns grupos repetiram a resposta anterior “Quanto mais massa, mais rápido elas batem”, demonstrando fragilidade no conceito de força. Outros grupos responderam que “Quanto maior é a massa, mais forte é a força”

O professor fez uma explicação conforme o roteiro do produto e pede que os grupos respondam à primeira pergunta do questionário 1.1.

As repostas dadas durante a discussão, em conjunto com os comentários durante as simulações, indicam que os estudantes estavam atentos às simulações e conseguiram relacionar os dados mostrados aos fenômenos simulados, indicando o uso de habilidades de ordem superior de raciocínio, formação de conceitos, investigação e tradução.

Segunda Aula

Nessa aula, foi mostrada uma simulação em que uma estrela central muito massiva atrai, ao mesmo tempo, quatro estrelas iguais e de pouca massa separadas da estrela central por diferentes distâncias, foi realizada uma discussão acerca da simulação, foram respondidas a segunda e a terceira perguntas do questionário 1.1 e foram feitas as explicações constantes do roteiro do produto.

Na simulação, os estudantes perceberam que a estrela mais próxima era a que possuía a maior velocidade instantânea.

Ao ouvirem a primeira pergunta da discussão 1.2, acerca das diferenças das estrelas da simulação, os grupos responderam que “A estrela do meio é bem maior”, “Cada estrela está mais longe da outra”, “O tamanho das estrelas é igual” e “A distância faz diferença na velocidade”.

Ao responderem a segunda pergunta, em relação ao que aconteceria se fossem adicionadas estrelas mais distantes na simulação, os grupos responderam que “A velocidades delas ia ser menor” e “Porque estavam mais distantes”.

A terceira pergunta, acerca da relação entre a distância das estrelas e suas velocidades, foi preponderantemente respondida com “Quanto mais distante, menor vai ser a velocidade”.

Ao serem perguntados acerca da relação entre a distância e a força gravitacional, os grupos responderam que “Quanto mais próximas, maior será a força entre as estrelas”.

O professor fez a explicação constante no roteiro do produto, foi pedido que os grupos respondessem à segunda pergunta do questionário 1.1 e, após, feita a última explicação pelo professor.

Durante a explicação acerca da constante gravitacional e da lei da gravitação universal em sua forma matemática os estudantes demonstraram pouco interesse pela matéria, se dispersando em conversas sem relação com a aula ou mexendo em seus celulares. Como causa provável, pode-se indicar a ausência dos subsunçores relacionados a equações matemáticas.

Apesar do desinteresse por essa parte da aula, o seguinte diálogo entre um estudante e o professor pode ser destacado:

Estudante: “Professor, o Sol está atraindo a Terra, não está?”

Professor: “Sim, ele atrai a Terra e todos os outros objetos do sistema solar.”

Estudante: “Então por que a gente não cai no Sol?”

Professor: “Sua pergunta é muito interessante, mas ela já é assunto da próxima aula e, por isso, vou respondê-la amanhã.”

Essa pergunta demonstra fortemente o uso das habilidades de investigação e de raciocínio, direcionadas ao pensar criativo, por parte desse aluno, além de ser um indício de aprendizagem significativa do conteúdo, pois ele chegou à conclusão, tendo como base apenas o que havia sido mostrado até o momento, que a Terra deveria colidir com o Sol sem ter sido direcionado pelo professor.

Ademais, os estudantes estavam participativos durante a simulação e a discussão. Suas participações mostram novamente o uso de habilidades de ordem superior de raciocínio, formação de conceitos, investigação e tradução.

Terceira Aula

Nessa aula, foi mostrada uma simulação do sistema solar, em que são apresentados o Sol, os planetas e suas órbitas, bem como imagens reais desses planetas. Foram feitas a leitura

em grupos do texto de apoio 1.1, a resolução do questionário 1.2 e as explicações constantes do roteiro do produto e acerca do questionamento de um estudante, relatado na aula anterior.

A aula foi iniciada com a explicação da órbita dos planetas, o que respondeu à pergunta feita na aula anterior. Durante a explicação, percebeu-se que a turma estava pouco participativa, com poucos questionamentos, provavelmente porque eram necessários conhecimentos prévios sobre vetores para o melhor entendimento do tópico.

Após, a leitura do texto de apoio foi feita juntamente com o professor, enquanto este mostrava imagens dos planetas e fazia comentários sobre eles. Durante as explicações, percebeu-se que os estudantes estavam atentos, porém quase não houve comentários ou questionamentos acerca das informações passadas. Dessa forma, não é possível tecer comentários acerca do desenvolvimento das habilidades de ordem superior ou da presença de indícios da ocorrência da aprendizagem significativa.

Ao final da aula, os grupos responderam ao questionário 1.2.

Quarta Aula

Nessa aula, foi feita a leitura, em grupos, do texto de apoio 2.1 e foi realizada a discussão 2.1 com o auxílio do professor para explicar os conceitos após a participação dos estudantes.

A aula foi iniciada com a leitura do texto de apoio 2.1 e, logo após, o professor iniciou a discussão perguntando o que é espaço, obtendo como respostas “O espaço é o local que um objeto ocupa”, “Conjunto de comprimento, largura e distância”, “Conjunto de locais que um objeto ocupa”.

A segunda pergunta, acerca do que é o tempo, teve como respostas “Escolha de um padrão com movimento repetitivo”, “Comparação de como um sistema muda”.

A terceira pergunta, acerca da existência do tempo e o espaço, teve como respostas “Eles existem, mas o ser humano deu uma forma para eles”, “É uma invenção humana, ele criou para ter noção do espaço e tempo”, “É uma coisa que existe, só que não nasceu com esse nome. O homem só deu nome para eles.”, “Já existiam, só que com o passar do tempo o homem passou a usar eles”.

A quarta pergunta, acerca do que é a medida de algo, teve como respostas “Saber a distância entre um ponto e outro”, “Noção de um lugar para outro”, “É saber o tempo que demora” e “É comparar as coisas”.

A última questão, sobre como aumentar a precisão de uma medida, teve como respostas “Colocar um padrão no padrão”, “Pegar uma régua que mede em metros. Depois pegar uma

régua que mede em centímetros” e “Pegar outra régua que mede em milímetros”. Após ouvir essas respostas, um estudante pergunta “Desse jeito, nunca dá para conseguir uma medida perfeita?”.

Essa última pergunta do estudante mostra indícios fortes de aprendizagem significativa, uma vez ele foi capaz de perceber, por si só, que não seria possível obter uma medida exata. Além disso, essa participação e, de modo geral, as respostas dos estudantes mostram mais uma vez a utilização das habilidades de ordem superior de raciocínio, formação de conceitos, investigação e tradução.

Quinta Aula

Nessa aula, os grupos responderam ao questionário 2.1, foi realizada uma dinâmica envolvendo o conceito de espaço-tempo, foram feitas explicações pelo professor, conforme o roteiro do produto, foram mostradas duas cenas do filme Interestelar e foi feita a discussão 2.2

Após terminar o questionário, a dinâmica acerca do espaço-tempo foi iniciada com participação e interesse dos estudantes. Ao final, um dos estudantes concluiu em voz alta, sem ter sido instigado pelo professor, que “Então a gente precisa saber o lugar e a hora para saber onde uma pessoa está”, demonstrando indícios de aprendizagem significativa do tema e o uso de suas habilidades de ordem superior.

Durante a explicação do professor acerca do espaço-tempo quadridimensional, os estudantes estavam novamente atentos, mas pouco participativos e, ao receberem a informação de que vivem em um universo com quatro dimensões, acharam estranha a ideia, porém a aceitaram sem questionamentos. Esse comportamento indica que o tema foi aprendido de forma mecânica.

Durante as cenas do filme, os estudantes demonstraram entusiasmo e interesse pelo que estava ocorrendo, também demonstraram espanto com as ondas gigantes e com o envelhecimento do personagem mostrados nas cenas.

A discussão feita após as cenas mostradas envolvia perguntas diretas acerca do que se passou no filme e perguntas para instigar o uso das habilidades de ordem superior.

Após terem chegado à conclusão de que o tempo passou de forma diferente no planeta e na nave espacial, um dos estudantes questionou “E na Terra, o tempo também passou diferente?”. Essa pergunta apresenta indícios de aprendizagem significativa do tema, pois o estudante fez uma inferência que não estava em discussão a partir do fenômeno mostrado no filme. Também mostra o uso de suas habilidades de ordem superior.

Ao serem questionados sobre a possibilidade de o espaço ser diferente em diferentes regiões, os grupos responderam “Se o tempo pode passar diferente, o espaço não é igual em todo lugar” e “Se o tempo e o espaço são uma coisa só, se um pode mudar, o outro também pode”.

Por fim, ao serem questionados sobre as possíveis causas para o efeito temporal, os estudantes responderam “O buraco negro”, “A gravidade do buraco negro” e “O tamanho do buraco negro”. As falas dos estudantes indicam inferências e deduções acerca do tema em estudo, mostrando o uso de habilidades de raciocínio, formação de conceitos, investigação e tradução.

Sexta Aula

Nessa aula, foram feitas explicações pelo professor, conforme roteiro do produto, foram mostrados modelos da deformação do espaço-tempo, foi feita uma demonstração, a partir de uma analogia, envolvendo um corpo massivo e a deformação espaço-temporal causada por ele e foi respondido, pelos grupos, o questionário 2.2.

Durante as explicações do professor, mais uma vez, percebeu-se que os estudantes estavam atentos, porém pouco participativos. Desse modo, não é possível fazer inferências acerca da aprendizagem significativa ou da utilização de habilidades de ordem superior.

A demonstração teve boa participação dos estudantes, que mostraram interesse no que estava ocorrendo. Enquanto a demonstração era realizada, um dos estudantes a interrompeu perguntando “Se um meteoro passar perto do Sol na velocidade certa, ele vai ficar girando pra sempre no buraco?”. A pergunta foi feita enquanto o professor jogava bolinas de gude com diferentes velocidades próximas a um peso sobre um lençol esticado e mostra indícios de aprendizagem significativa do tema e mostra a utilização das habilidades de raciocínio e de criatividade desse estudante.

A aula terminou com os estudantes respondendo ao questionário 2.2.

Sétima Aula

Nessa aula, foram feitas explicações pelo professor conforme roteiro do produto, foi respondido o questionário 2.3 e foi iniciado o módulo de buracos negros com o professor mostrando algumas imagens de buracos negros

Durante a explicação, que envolvia o experimento mental de Einstein do elevador, percebeu-se que, além de estarem prestando atenção, os estudantes estavam participativos.

Alguns apresentaram dificuldades em entender o experimento em si e faziam perguntas de modo a tentar entendê-lo melhor enquanto outros se espantaram ao chegarem à conclusão que se estivessem em um elevador em queda livre, sentiriam efeitos semelhantes a de um astronauta na Estação Espacial Internacional. Essas participações mostram interesse pela matéria de ensino e utilização de suas habilidades de ordem superior.

Após, os grupos responderam ao questionário 2.3.

Enquanto as imagens dos fenômenos eram mostradas, a maior parte dos estudantes as identificaram corretamente como sendo de buracos negros e que estes “Sugam tudo que existe”, “Têm relação com a teoria do filme”, “Têm muita massa em pouco espaço”, mostrando a existência de subsunçores acerca do tema em suas estruturas cognitivas. Por fim, o professor complementou essas falas explicando o que são os buracos negros.

Oitava Aula

Nessa aula, o texto de apoio 3.1 foi lido em grupos, foi feita a discussão 3.1 e foi respondido o questionário 3.1.

Após a leitura do texto a discussão foi iniciada com uma pergunta sobre como eram as estruturas análogas aos buracos negros, pensadas antes de Einstein e foram dadas as seguintes respostas “Eram estrelas negras”, “Não emitem luz”, “Eram muito grandes”, “Não podem ser vistas” e “Tinham a gravidade tão alta que nem a luz consegue sair de lá”

A segunda pergunta, acerca de como se deram os estudos que complementaram os trabalhos de Einstein, teve como respostas “Um monte de cientistas ajudaram”, “Cada um tentou resolver uma parte” e “O Einstein não conseguiu resolver tudo sozinho”.

A terceira pergunta, acerca da não aceitação inicial, pelos cientistas, da existência dos buracos negros não teve respostas dos estudantes, mas sim uma mesma pergunta feita por vários alunos “Se a matemática estava certa, por que eles não acreditavam?”. Esse questionamento demonstra que os estudantes aceitam a matemática como balizadora da ciência e não os fenômenos físicos como tal. Apesar disso, também demonstra pensamento crítico e investigativo, pois lhes foi apresentado um fato contrário a suas convicções e eles queriam entender por que estavam errados.

A quarta pergunta, acerca de como a segunda guerra e a guerra fria influenciaram os estudos dos buracos negros teve como respostas “Eles precisavam de tecnologia”, “Eles precisavam de armas”, “Os cientistas estavam fazendo armas” e “Os países queriam mostrar para os outros que eram mais poderosos”.

Essas respostas, de modo geral, mostram a utilização das habilidades de ordem superior dos estudantes.

Por fim, a aula foi finalizada com os grupos respondendo ao questionário 3.1.

Nona Aula

Nessa aula, foram feitas explicações, pelo professor, conforme o roteiro do produto, foi mostrado um vídeo com um comparativo do tamanho de vários buracos negros espalhados pelo universo e foi respondido o questionário 3.2.

A aula foi iniciada com uma explicação do professor acerca do raio de Schwarzschild, em que os estudantes estavam atentos, porém pouco participativos, impossibilitando inferências acerca de sua aprendizagem ou da utilização das habilidades de ordem superior.

Durante a mostra do vídeo, percebeu-se aumento na participação dos estudantes, que se mostravam espantados com o tamanho dos objetos mostrados e interessados em saber algumas curiosidades sobre eles como sua localização, a distância que estão da Terra, o que aconteceria se tivesse um buraco negro perto da Terra e o que aconteceria se uma pessoa fosse sugada por um. Todas essas curiosidades demonstradas pelos estudantes indicam o exercício de suas habilidades de investigação.

Após, foi feita uma explicação acerca do horizonte de eventos de um buraco negro em que os estudantes estavam atentos e participaram como perguntas como, “O que tem dentro do buraco negro?”, “Dentro do horizonte, ele é sólido?” e “O que acontece quando a gente passa pelo horizonte de eventos?”. Essas perguntas mostram a utilização das habilidades de ordem superior de raciocínio, formação de conceitos, investigação e tradução.

Por fim, os grupos responderam ao questionário 3.2.

Décima Aula

Nessa aula, foi feita uma simulação em computador, foi mostrado um vídeo abordando o processo de formação dos buracos negros, foi realizada a discussão 3.2 e o questionário 3.3 foi respondido em grupos.

Antes de realizar a simulação o professor refez a segunda pergunta do questionário 3.2, acerca do que aconteceria com a órbita dos planetas do sistema solar caso o Sol se transformasse em um buraco negro. Houve divergência nas respostas dos estudantes, porém uma se destaca “Não ia acontecer nada. Isso porque a massa do Sol ia ficar igual e a gravidade dele também” demonstrando indícios de aprendizagem significativa dos tópicos estudados, uma vez que o

estudante conseguiu fazer uma inferência baseada no conjunto de tópicos estudados e não apenas em um único. Também demonstra a utilização de suas habilidades de raciocínio, investigação e tradução.

O resultado da simulação realizada deixou os estudantes bastante entusiasmados e curiosos acerca do que aconteceria com a Terra e com os seres humanos sem a luz do Sol. O vídeo mostrado também chamou a atenção dos estudantes, que questionaram alguns dos tópicos abordados como a velocidade da luz e a dificuldade de se encontrar um buraco negro. Essas participações demonstram interesse pela matéria de ensino e a utilização de suas habilidades de investigação.

A primeira pergunta da discussão, acerca de como surgem os buracos negros, teve como respostas “De restos de estrelas”, “A partir de estrelas mortas”, “A partir de estrelas gigantes” e “Quando as estrelas perdem estabilidade”.

A segunda pergunta, sobre a possibilidade de o Sol se transformar em um buraco negro, teve como respostas “Não pode, porque ele é pequeno”, “Tem que ser grande pra virar um buraco negro” e “Ele precisa de mais massa”.

A terceira pergunta, acerca da possibilidade de um buraco negro aumentar ou diminuir de tamanho, teve como respostas “Pode aumentar sim, porque ele suga outras coisas para dentro”, “Aumenta sempre que algo cai dentro dele” e “Não dá pra diminuir porque nada consegue sair de dentro dele”.

Essas respostas demonstram as habilidades de raciocínio, de formação de conceitos, de investigação e de tradução dos estudantes, além de serem indícios da ocorrência de aprendizagem significativa dos tópicos estudados.

Por fim, os grupos responderam ao questionário 3.3.

Décima Primeira Aula

Nessa aula, foi feita a leitura do texto de apoio 3.3, foram feitas as explicações conforme o roteiro do produto, foi mostrada uma reportagem sobre a primeira imagem de um buraco negro, foi feita uma simulação em computador de um buraco negro supermassivo e foi respondido o questionário 3.4.

Durante a explicação sobre as formas de se detectar os buracos negros os estudantes estavam atentos, mas pouco participativos e, por isso, não é possível fazer qualquer inferência acerca da aprendizagem significativa ou do uso das habilidades de ordem superior.

A reportagem chamou a atenção dos estudantes, que fizeram perguntas como “Como os cientistas tiraram essa foto?”, “Como é possível juntar esse monte de telescópio em um só?” e “Como funciona a câmera desses telescópios?”. Esse comportamento demonstra interesse pela matéria de ensino e desenvolvimento das habilidades de ordem superior de raciocínio e de investigação.

A simulação também chamou a atenção dos estudantes. Como ela possui parâmetros flexíveis, os estudantes pediram para o professor mudar a posição do observador e inserir objetos, como planetas e estrelas, próximos ao buraco negro.

Um dos estudantes questionou “O senhor (professor) só mostrou os buracos negros de cima. O que acontece se a gente tentar ver um de lado?”, referindo-se às imagens em que os discos de acreção estão situados no plano de visualização.

Outro estudante observou que as estrelas atrás do buraco negro apareciam deformadas e questionou “Professor, isso tem a ver com o espaço estar torto perto do buraco negro?”.

Essas perguntas demonstram a utilização das habilidades de ordem superior de raciocínio, investigação, formação de conceitos e tradução dos estudantes, além de serem indícios a ocorrência de aprendizagem significativa.

Décima Segunda Aula

Nessa aula, foi mostrada a imagem de uma lente gravitacional, foram feitas explicações conforme roteiro do produto, foi realizada a leitura do texto de apoio 4.1 em conjunto com as explicações do professor, foi respondido o questionário 4.1 e foi solicitada a produção de um vídeo, estilo vlog, de até dois minutos de duração em que os grupos deveriam explicar o que são e como podem ser utilizadas as lentes gravitacionais.

A imagem mostrada, de uma lente gravitacional do tipo múltiplas imagens de quasar, fez os estudantes discutirem quantos objetos estavam sendo representados nela. Alguns entendiam haver apenas um objeto, uma estrela, replicado mais quatro vezes, enquanto outros diziam haver cinco objetos diferentes, que seriam galáxias. Ao expressar esses entendimentos, mostraram possuir subsunçores acerca de astronomia básica, mas ainda não demonstraram ter desenvolvido os subsunçores sobre as consequências da deformação espaço-temporal necessários para o bom desenvolvimento do módulo de lentes gravitacionais.

Apesar da ausência dos subsunçores, os estudantes ainda expressaram curiosidade sobre o fenômeno que estava sendo mostrado e o professor utilizou esse sentimento para fazer uma breve revisão dos tópicos passados, fazendo sua conexão com as lentes gravitacionais.

Durante a leitura e explicação do texto de apoio percebeu-se que os estudantes estavam atentos e interessados em saber o que era cada uma das imagens mostradas. Eles faziam perguntas e comentários como “Se a gente estivesse em outro lugar do espaço, a gente não ia ver a galáxia desse jeito?”, “Então, quando a gente olha para uma lente dessas (múltiplas imagens), a gente está vendo a passado e o presente do quasar”. Essas manifestações mostram interesse pela matéria de ensino e desenvolvimento das habilidades de raciocínio, formação de conceitos, investigação e tradução.

A aula foi finalizada com os grupos respondendo ao questionário 4.1 e com o professor solicitando a produção do vídeo acerca das lentes gravitacionais.

Décima Terceira Aula

Nessa aula, foi feita uma simulação de lentes gravitacionais produzidas por um buraco negro, foi realizada a leitura do texto de apoio 4.2 e conjunto com explicações do professor e o questionário 4.2 foi respondido.

A simulação novamente chamou a atenção dos estudantes que, além de se mostrarem entusiasmados, conseguiram identificar os tipos de lentes gravitacionais formados, demonstrando indícios de aprendizagem significativa.

Assim como na aula anterior, a leitura e explicação do texto de apoio chamou a atenção dos estudantes, principalmente quando as imagens eram projetadas na parede. Alguns alunos conseguiram identificar, ao serem questionados, onde estava a maior concentração de massa nas imagens, demonstrando indícios de aprendizagem significativa do tema.

A aula foi finalizada com a resolução, pelos grupos, do questionário 4.2.

Nessa aula, também deveriam ter sido entregues pelos estudantes os vídeos solicitados na aula anterior. Porém, apesar de terem tido cinco dias para realizarem a tarefa, nenhum dos grupos se dispôs a fazê-la e, quando questionados sobre os motivos, informaram simplesmente que não tiveram vontade de produzir o vídeo.

Essa atitude não surpreendeu porque os estudantes da escola têm o costume, em sua maioria, de não realizar as tarefas passadas para casa, mesmo quando é dado mais tempo para tal.

5.2- Análise da Aprendizagem

Em relação à aprendizagem da matéria de ensino, a sondagem dos subsunçores dos estudantes foi feita durante as aulas, no início de cada módulo, a partir das respostas dadas aos

questionamentos orais feitos conforme o roteiro de atividades, bem como ao ouvir os que os alunos discutiam dentro das pequenas comunidades de investigação.

Essa sondagem revelou que os estudantes possuíam poucos subsunçores nos quais os novos conhecimentos pudessem se ancorar. Mesmo sendo conteúdo programático do primeiro ano, a gravitação universal não foi estudada, conforme eles mesmos informaram³² e, desse modo, tinham apenas conhecimentos elementares acerca do sistema solar e dos planetas que o compõem, tinham noção que Einstein foi um grande cientista, porém não tinham ideia do que ele fez para merecer o status que lhe é dado, já ouviram falar de buracos negros, no sentido de que eles conseguiriam sugar tudo para seu interior, porém não sabiam que essas estruturas são consequências da Relatividade Geral, tinham ideias básicas do que são os telescópios, porém nunca tinham ouvido falar das lentes gravitacionais e, por fim, seus conhecimentos matemáticos são elementares, tendo dificuldades para realizarem operações de multiplicação e divisão.

O produto foi construído de modo a tentar minimizar as dificuldades causadas pela ausência de subsunçores dos estudantes, com sua estrutura sendo organizada para que um módulo sirva de subsunçor para o seguinte. Em parte, essa estratégia deu certo, porém o excesso de faltas dos alunos acabou prejudicando a formação e estabilização dos novos subsunçores e, conseqüentemente, a ocorrência da aprendizagem significativa.

Ainda em relação à aprendizagem, as páginas seguintes fazem uma análise das respostas dos estudantes aos questionários aplicados durante as aulas e, ao final é apresentado um resumo dessa análise.

5.3- Análise dos Questionários

No decorrer da aplicação do produto foi solicitado aos estudantes que respondessem onze questionários, com um total de trinta e seis questões, acerca dos temas abordados nas aulas. Considerando as ausências às aulas, um total de 243 respostas foram analisadas e classificadas em cinco níveis, conforme o grau de conhecimento demonstrado. Cada nível é descrito a seguir:

Nível 1 (N1): reúne todas as questões deixadas em branco.

Nível 2 (N2): reúne as respostas em total desacordo com a matéria de ensino. Nesse nível, os estudantes não demonstram qualquer indício de aprendizagem significativa acerca do tópico abordado na questão.

³² Essa informação foi confirmada pelo professor que ministrou as aulas para os estudantes no primeiro ano.

Nível 3 (N3): reúne as respostas que demonstram entendimento precário do tema abordado. Nesse nível, os estudantes ainda não mostram indícios de aprendizagem significativa e suas ideias, apesar de estarem relacionadas ao tópico da questão, são resultados de aprendizagem mecânica ou de confusão entre conceitos.

Nível 4 (N4): reúne as respostas que demonstram entendimento intermediário do tema abordado. Nesse nível, os estudantes mostram indícios de aprendizagem significativa ao expor entendimento das relações entre os fenômenos, porém ainda não conseguem expressá-las de forma completa.

Nível 5 (N5): reúne as respostas que demonstram entendimento adequado do tema abordado. Nesse nível, os estudantes mostram indícios de aprendizagem significativa e conseguem expor suas ideias de forma adequada, abordando os tópicos conforme os objetivos das aulas.

Com base nesses níveis, os questionários dos grupos foram avaliados e seus resultados são expostos a seguir:

Questionário 01 – Gravitação Universal

Esse questionário foi respondido no decorrer da aula, com cada questão tendo sido proposta após uma atividade específica e sete grupos participaram da atividade, com os resultados expostos na Tabela 4 a seguir:

Tabela 4 – Nível das respostas dadas pelos grupos ao questionário 01.

Questão	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8
1	4	4	4	5	3	4	5	-
2	4	4	4	3	3	3	4	-
3	4	4	2	2	3	5	4	-

Fonte: Elaboração própria.

Os dados mostram indícios de aprendizagem significativa, com quatorze das vinte e uma respostas avaliadas como N4 ou N5 e de aprendizagem mecânica, com cinco respostas N3.

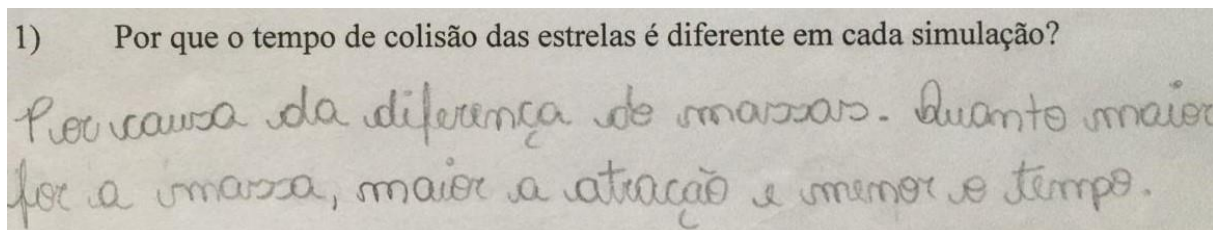
A seguir, são mostrados os resultados de cada questão:

Questão 1.1

A primeira questão foi respondida após os estudantes observarem três simulações envolvendo a relação entre o aumento de massa de corpos e o tempo que demoram para colidir.

Ela apresenta duas respostas N5, quatro N4 e uma N3. As figuras a seguir ilustram alguns exemplos das respostas dos estudantes:

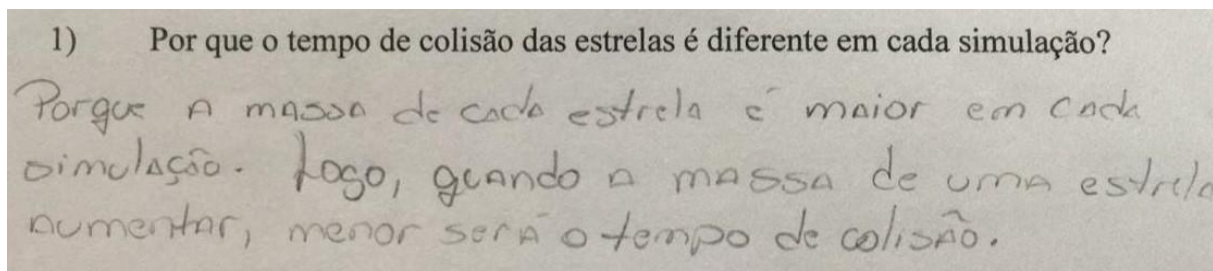
Figura 42 – Resposta N5 para a questão 1 do primeiro questionário.



Fonte: Registros das aulas.

A resposta mostra que o grupo entendeu a relação entre a massa das estrelas e a força gravitacional entre elas e desta com o tempo para a colisão.

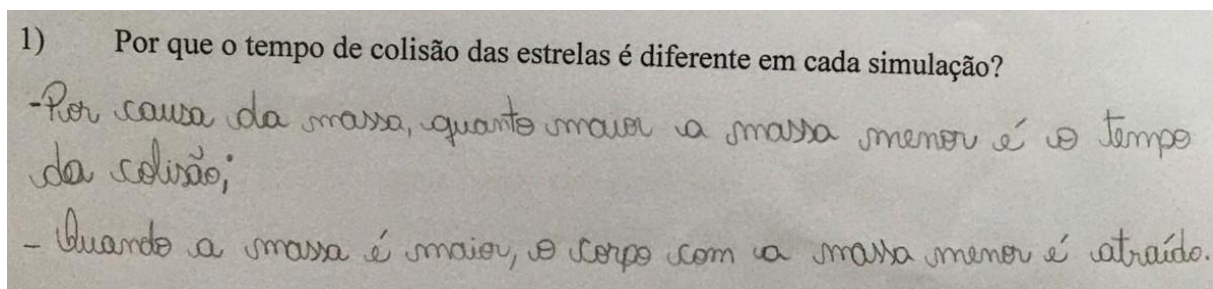
Figura 43 – Resposta N4 para a questão 1 do primeiro questionário.



Fonte: Registros das aulas.

A resposta mostra que o grupo relacionou o aumento da massa das estrelas com a diminuição do tempo de colisão, porém não mencionou a relação com a força gravitacional.

Figura 44 – Resposta N3 para a questão 1 do primeiro questionário.



Fonte: Registros das aulas.

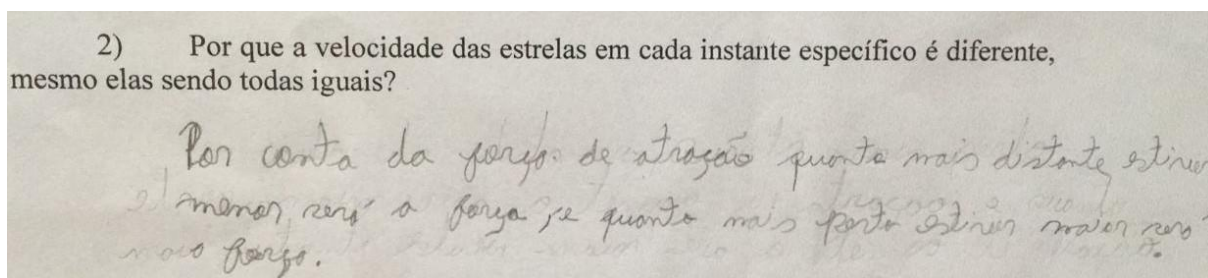
A resposta mostra que o grupo, assim como o anterior, relacionou o aumento de massa das estrelas com a diminuição do tempo de colisão sem mencionar a força gravitacional, porém acrescentou, de forma incorreta, a informação de que apenas o corpo de menor massa é atraído indicando confusão acerca do tema.

Questão 1.2

A segunda questão foi respondida após os estudantes observarem uma simulação envolvendo a relação da distância entre as estrelas com o tempo para colisão e com suas velocidades instantâneas.

Ela apresenta quatro respostas N4 e três N3. As figuras a seguir ilustram alguns exemplos das respostas dos estudantes:

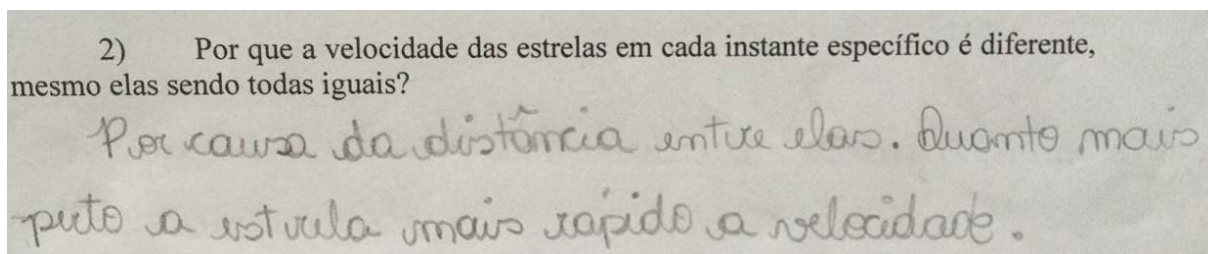
Figura 45 – Resposta N4 para a questão 2 do primeiro questionário.



Fonte: Registros das aulas.

A resposta mostra que o grupo relacionou a força gravitacional com o inverso da distância entre as estrelas, porém não mencionou que essa relação é quadrática e também não relacionou com a velocidade.

Figura 46 – Resposta N3 para a questão 2 do primeiro questionário.



Fonte: Registros das aulas.

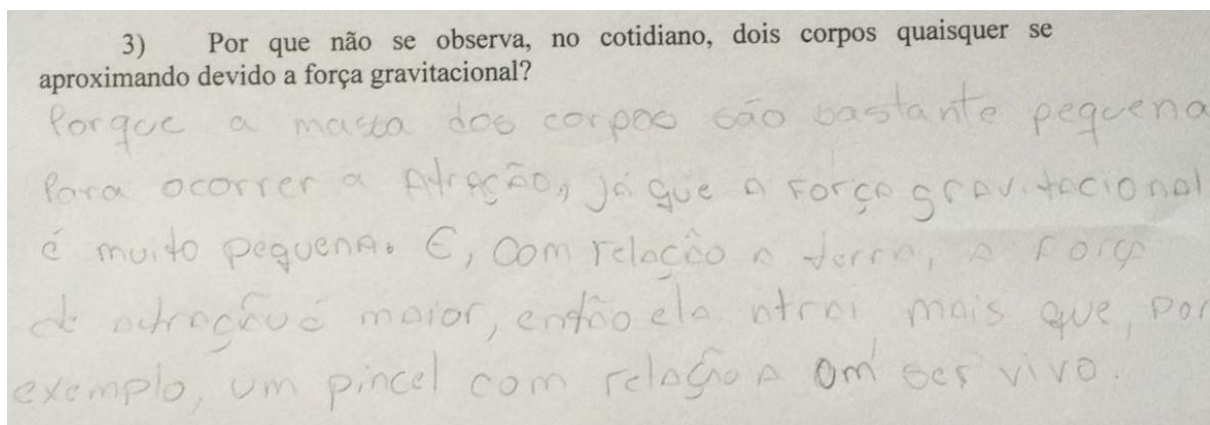
A resposta mostra que o grupo relacionou a velocidade das estrelas com a distância entre elas, porém não mencionou sua relação com a força gravitacional, indicando que houve aprendizagem mecânica do tópico, uma vez que se limitou a descrever o fenômeno mostrado na simulação sem explicar sua causa.

Questão 1.3

A terceira questão foi respondida após explicação do professor da Lei da Gravitação Universal na forma da equação $F = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$.

Ela apresenta uma resposta N5, três N4, uma N3 e duas N2. As figuras a seguir ilustram alguns exemplos das respostas dos estudantes:

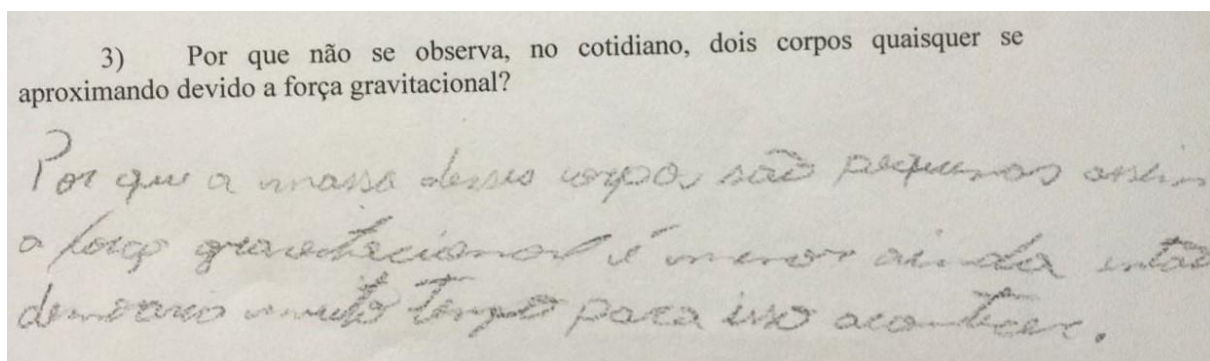
Figura 47 – Resposta N5 para a questão 3 do primeiro questionário.



Fonte: Registros das aulas.

A resposta mostra que o grupo relacionou a pequena massa dos corpos à intensidade desprezível, mas ainda assim existente, da força gravitacional entre eles e, por isso, não haveria atração. Adicionalmente, comentou um exemplo dado em sala de aula em que a intensidade da força gravitacional entre a Terra e um ser vivo é muito maior que a força entre um pincel e esse mesmo ser vivo.

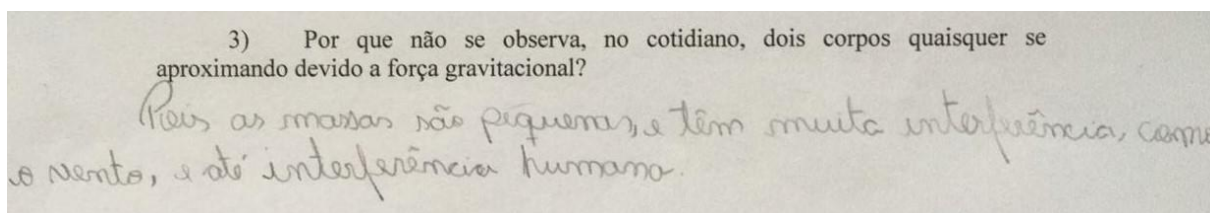
Figura 48 – Resposta N4 para a questão 3 do primeiro questionário.



Fonte: Registros das aulas.

A resposta mostra que o grupo relacionou a intensidade da força gravitacional à pequena massa dos corpos, porém de maneira superficial.

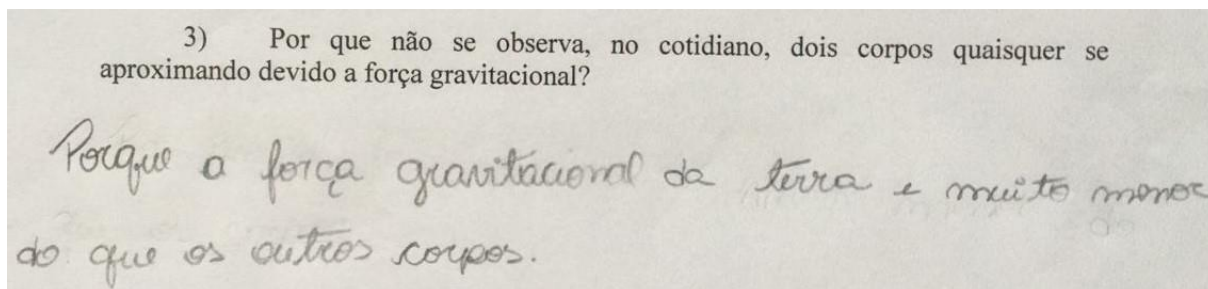
Figura 49 – Resposta N3 para a questão 3 do primeiro questionário.



Fonte: Registros das aulas.

A resposta mostra que o grupo atribuiu a não aproximação dos corpos às massas pequenas, porém não relacionou com a força gravitacional. Também relacionou com interferências do vento e humana sem explicar o contexto em que elas ocorreriam, indicando a presença de aprendizagem mecânica do tópico.

Figura 50 – Resposta N2 para a questão 3 do primeiro questionário.



Fonte: Registros das aulas.

A resposta do grupo indica que, no contexto cotidiano, a força gravitacional da Terra seria menor que a dos outros corpos, o que está em desacordo com a matéria de ensino e indica que sequer houve aprendizagem mecânica desse tópico.

Questionário 02 – Gravitação e Sistema Solar

Esse questionário foi respondido por cinco grupos, com os resultados expostos na Tabela 5 a seguir:

Tabela 5 – Nível das respostas dadas pelos grupos ao questionário 02.

Questão	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8
1	2	4	3	-	3	-	-	2
2	4*	4*	4	-	4	-	-	4
3	4	4	4	-	3	-	-	3

Fonte: Elaboração própria.

A segunda questão se mostrou mal elaborada, não deixando claro o que era esperado como resposta. Desse modo, a avaliação levou em consideração os dois tipos respostas possíveis para ela e utilizou o símbolo * para destacar as respostas dadas a partir da interpretação não intencional.

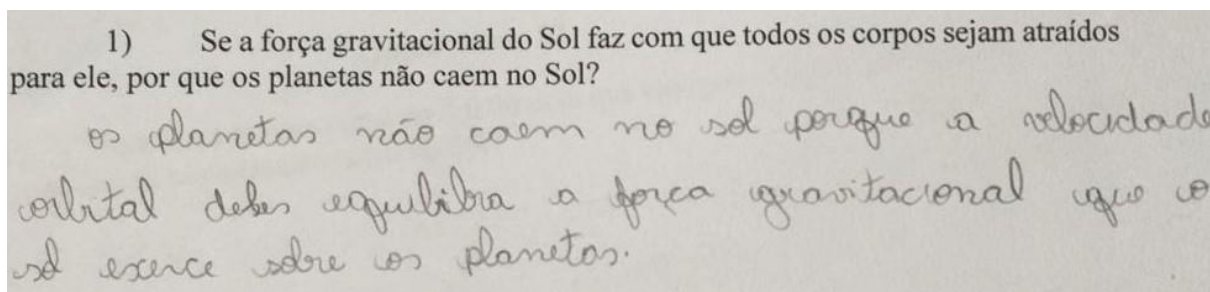
Os dados mostram indícios de aprendizagem significativa, com nove das quinze respostas avaliadas como N4 ou N5 e de aprendizagem mecânica, com quatro respostas N3.

A seguir, são mostrados os resultados de cada questão:

Questão 2.1

A primeira questão apresenta uma resposta N4, duas N3 e duas N2. As figuras a seguir ilustram alguns exemplos das respostas dos estudantes:

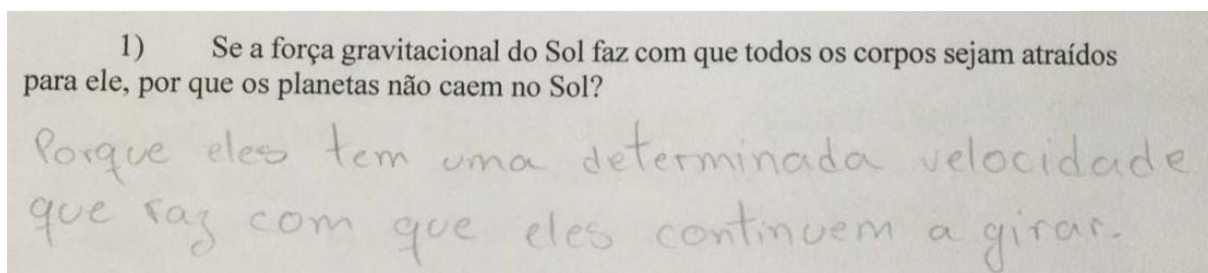
Figura 51 – Resposta N4 para a questão 1 do segundo questionário.



Fonte: Registros das aulas.

A resposta do grupo foi no sentido de há um equilíbrio entre a velocidade orbital dos planetas e a força gravitacional que o Sol exerce sobre eles, porém não explicita que os planetas possuem dois movimentos, um radial, devido à força gravitacional e outro tangencial, devido à inércia.

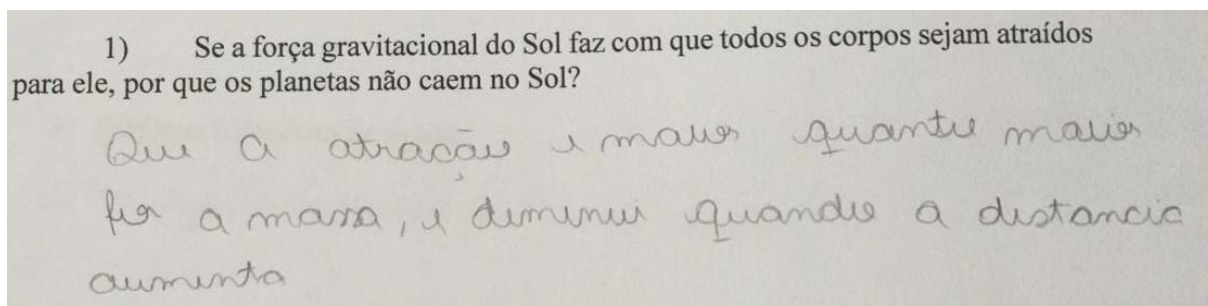
Figura 52 – Resposta N3 para a questão 1 do segundo questionário.



Fonte: Registros das aulas.

A resposta mostra que o grupo relacionou a órbita dos planetas a suas velocidades, porém não informa como se dá essa relação nem como a força gravitacional atua no fenômeno, indicando, desse modo, a presença de aprendizagem mecânica do tópico.

Figura 53 – Resposta N2 para a questão 1 do segundo questionário.



Fonte: Registros das aulas.

A resposta não tem coerência com o que foi perguntado, demonstrando que não houve aprendizagem do tópico.

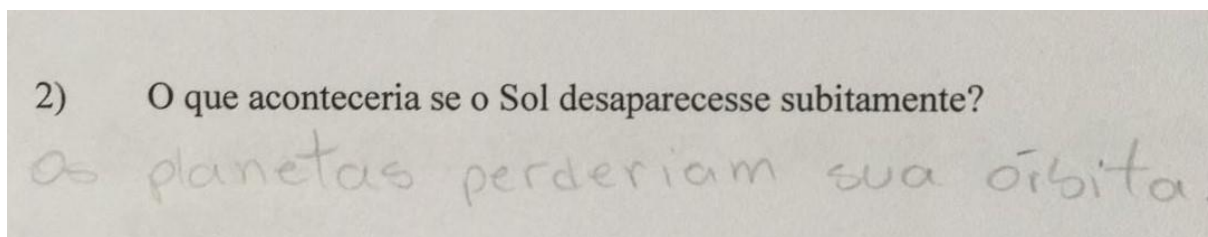
Questão 2.2

Após a aplicação da segunda questão, percebeu-se que sua redação não era clara acerca do que estava sendo questionado, e as repostas dos grupos refletiram essa confusão.

O texto original da questão “O que aconteceria se o Sol desaparecesse subitamente?” deveria ser substituído por “O que aconteceria com a órbita dos planetas do Sistema Solar se o Sol desaparecesse subitamente?”. Com isso, a intenção original da questão estaria clara.

A questão apresenta três respostas N4 e duas N4*. As figuras a seguir ilustram alguns exemplos das repostas dos estudantes:

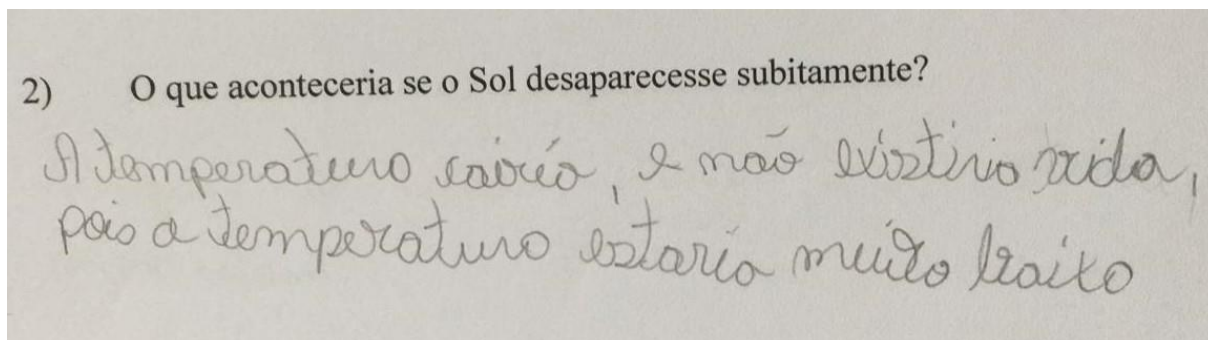
Figura 54 – Resposta N4 para a questão 2 do segundo questionário.



Fonte: Registros das aulas.

A resposta do grupo mostra que os planetas perderiam suas órbitas, porém não indica de que forma isso ocorreria.

Figura 55 – Resposta N4* para a questão 2 do segundo questionário.



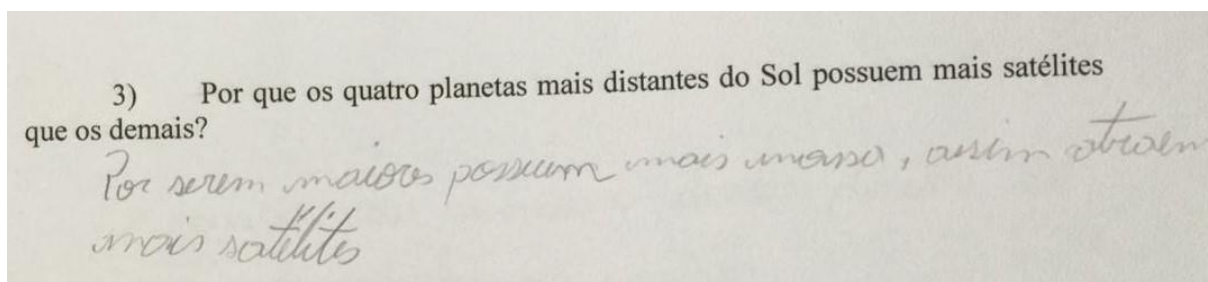
Fonte: Registros das aulas.

A resposta do grupo, apesar de não atender à intenção original da questão, explica que a vida na Terra acabaria por não ter mais sua fonte de energia, o Sol.

Questão 2.3

A terceira questão apresenta três respostas N4 e duas N3. As figuras a seguir ilustram alguns exemplos das repostas dos estudantes:

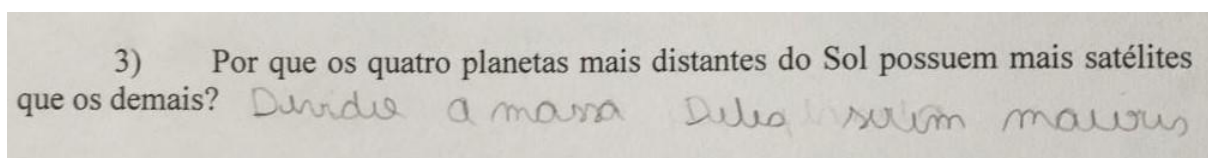
Figura 56 – Resposta N4 para a questão 3 do segundo questionário.



Fonte: Registros das aulas.

A resposta mostra que o grupo relacionou a quantidade de massa dos planetas às suas capacidades de atraírem mais satélites, porém não relacionou a massa à força gravitacional nem a quantidade de satélites com o processo de formação dos planetas.

Figura 57 – Resposta N3 para a questão 3 do segundo questionário.



Fonte: Registros das aulas.

A resposta mostra que o grupo relacionou a quantidade de satélites à massa dos planetas, porém não explica como essa relação ocorre, mostrando aprendizagem mecânica do tema.

Questionário 03 – Espaço e Tempo

Esse questionário foi respondido por oito grupos com os resultados expostos na Tabela 6 a seguir:

Tabela 6 – Nível das respostas dadas pelos grupos ao questionário 03.

Questão	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8
1	5	3	5	1	5	4	5	3
2	4	3	3	2	4	4	2	3
3	3	3	5	3	3	3	2	2
4	2	3	4	3	4	4	4	2
5	2	2	5	1	1	5	1	2

Fonte: Elaboração própria.

Os dados mostram indícios de aprendizagem significativa, com quinze das quarenta respostas avaliadas como N4 ou N5 e de aprendizagem mecânica, com doze respostas N3.

A seguir, são mostrados os resultados de cada questão:

Questão 3.1

A primeira questão apresenta quatro respostas N5, uma N4, duas N3 e uma N1. As figuras a seguir ilustram alguns exemplos das respostas dos estudantes:

Figura 58 – Resposta N5 para a questão 1 do terceiro questionário.

1) Tendo como base uma visão realista da física, discorra sobre a existência do espaço e do tempo.

O espaço tempo sempre existiu, e os humanos para estudar e usar os seus fatos deu nome e mecanismo.

Fonte: Registros das aulas.

A resposta do grupo indica que o espaço e o tempo existem e são independentes da visão humana.

Figura 59 – Resposta N4 para a questão 1 do terceiro questionário.

1) Tendo como base uma visão realista da física, discorra sobre a existência do espaço e do tempo.

O espaço e tempo já foram dados, pois já existia na natureza, com esse descobrimento o homem deu forma a ele.

Fonte: Registros das aulas.

A resposta do grupo mostra que o espaço e o tempo sempre existiram, porém também indica que foram descobertos pelo homem.

Figura 60 – Resposta N3 para a questão 1 do terceiro questionário.

1) Tendo como base uma visão realista da física, discorra sobre a existência do espaço e do tempo.

Em uma visão realista física, os sistemas do mundo já estão dados, existem por si só, da forma como são e, entre eles, há relações e movimentos.

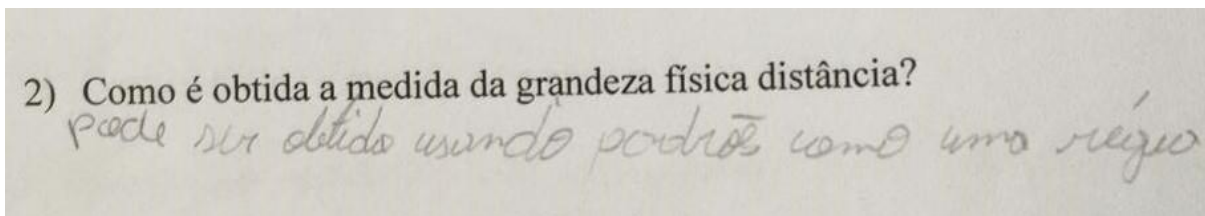
Fonte: Registros das aulas.

A resposta do grupo é uma cópia do texto de apoio, indicando aprendizagem mecânica do tema.

Questão 3.2

A segunda questão apresenta três respostas N4, três N3 e duas N2. As figuras a seguir ilustram alguns exemplos das respostas dos estudantes:

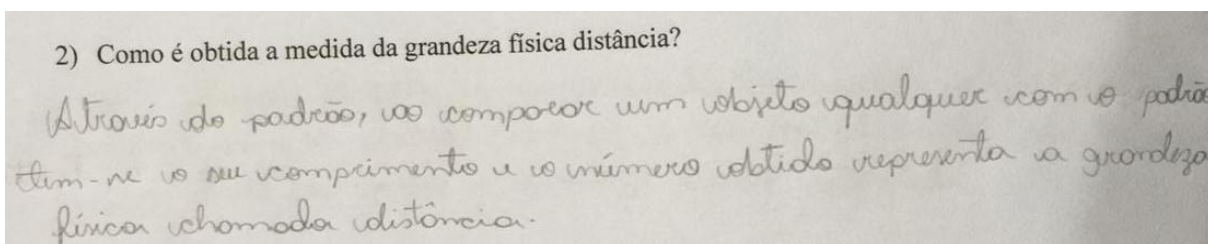
Figura 61 – Resposta N4 para a questão 2 do terceiro questionário.



Fonte: Registros das aulas.

A resposta do grupo mostra que se deve utilizar um padrão para obtenção da distância, porém não informa que a grandeza física é obtida da comparação desse padrão com o que se está medindo.

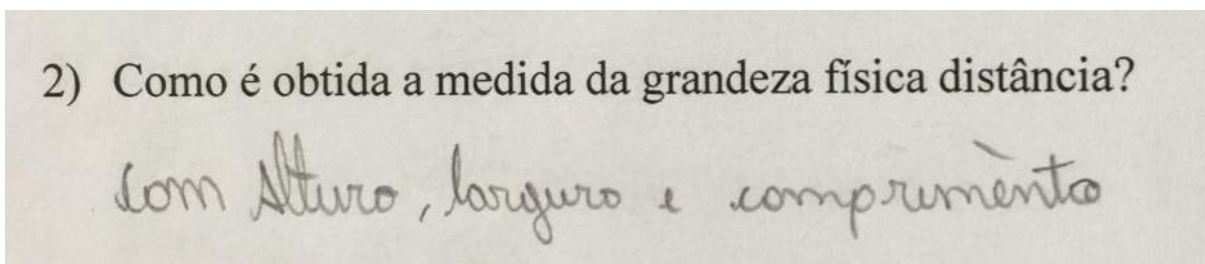
Figura 62 – Resposta N3 para a questão 2 do terceiro questionário.



Fonte: Registros das aulas.

A resposta do grupo é uma cópia do texto de apoio, indicando aprendizagem mecânica do tema.

Figura 63 – Resposta N2 para a questão 2 do terceiro questionário.



Fonte: Registros das aulas.

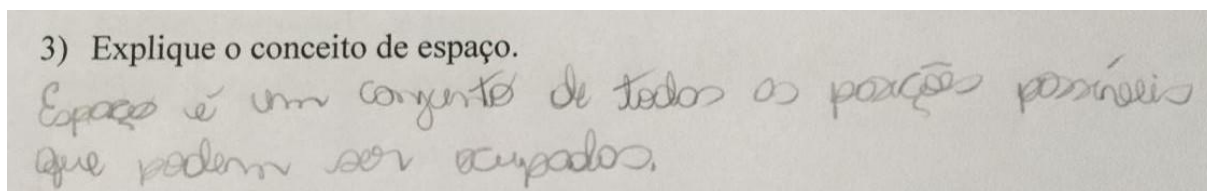
A resposta do grupo é incoerente.

Questão 3.3

A terceira questão pede que os estudantes expliquem o conceito de espaço. Por se tratar de uma definição, apresenta dificuldades maiores que as outras para se encontrar indícios de aprendizagem significativa.

Ela apresenta uma resposta N5, cinco N3 e duas N2. As figuras a seguir ilustram alguns exemplos das respostas dos estudantes:

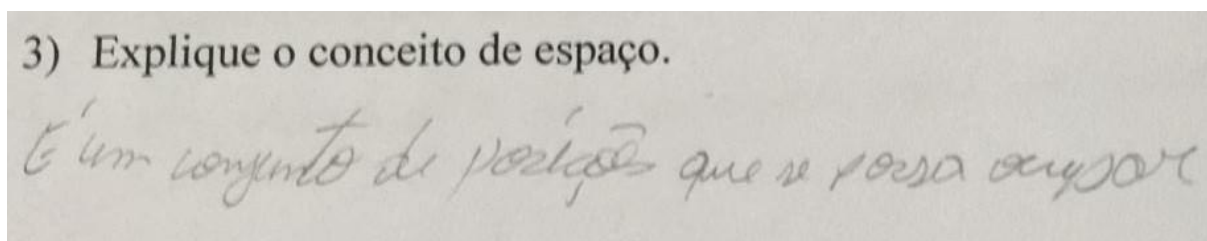
Figura 64 – Resposta N5 para a questão 3 do terceiro questionário.



Fonte: Registros das aulas.

A resposta do grupo mostra que o espaço é um conjunto de todas as localidades que podem ser ocupadas.

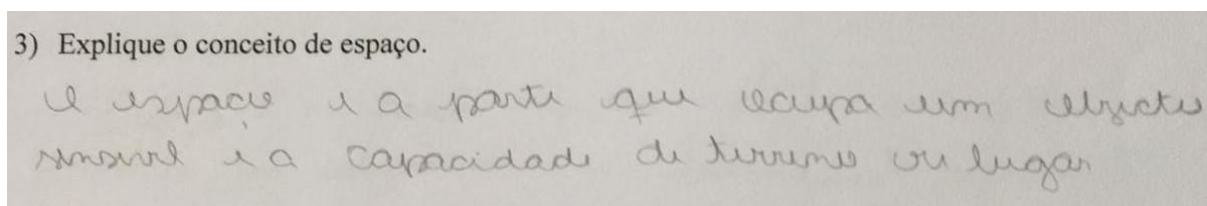
Figura 65 – Resposta N3 para a questão 3 do terceiro questionário.



Fonte: Registros das aulas.

A resposta do grupo mostra que o espaço é um conjunto de localidades que podem ser ocupadas, porém não informa que esse conjunto abrange todas as posições possíveis e nem as relaciona a outros objetos.

Figura 66 – Resposta N2 para a questão 3 do terceiro questionário.



Fonte: Registros das aulas.

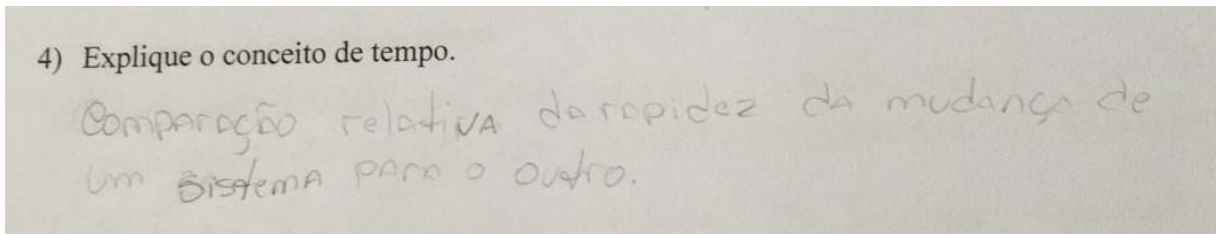
A resposta do grupo é incoerente.

Questão 3.4

A quarta questão pede que os estudantes expliquem o conceito de tempo. Assim como a anterior, também apresenta dificuldades maiores que as outras para se encontrar indícios de aprendizagem significativa.

Ela apresenta quatro respostas N4, duas N3 e duas N2. As figuras a seguir ilustram alguns exemplos das respostas dos estudantes:

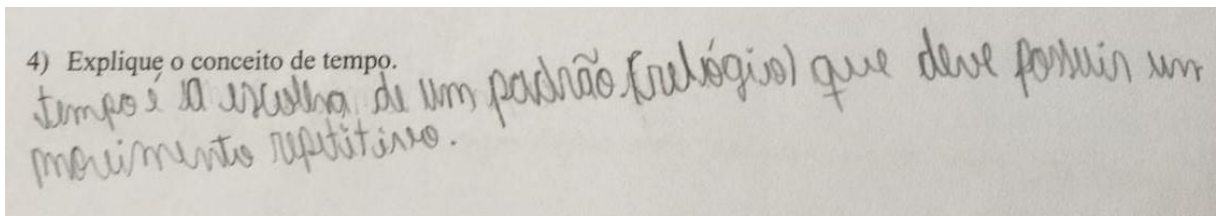
Figura 67 – Resposta N4 para a questão 4 do terceiro questionário.



Fonte: Registros das aulas.

A resposta do grupo mostra que o tempo está relacionado à comparação da rapidez com que um sistema muda com relação a outro. Porém, não informa que essa comparação deve ser feita utilizando um padrão cíclico, como um relógio.

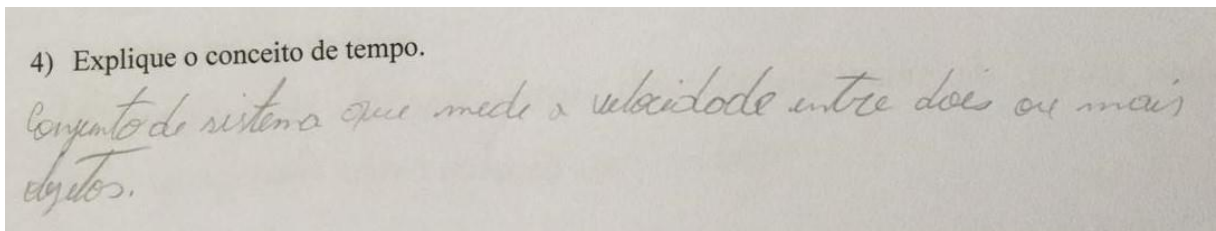
Figura 68 – Resposta N3 para a questão 4 do terceiro questionário.



Fonte: Registros das aulas.

A resposta do grupo associa o tempo apenas à escolha de um padrão, mostrando aprendizagem mecânica do tópico.

Figura 69 – Resposta N2 para a questão 4 do terceiro questionário.



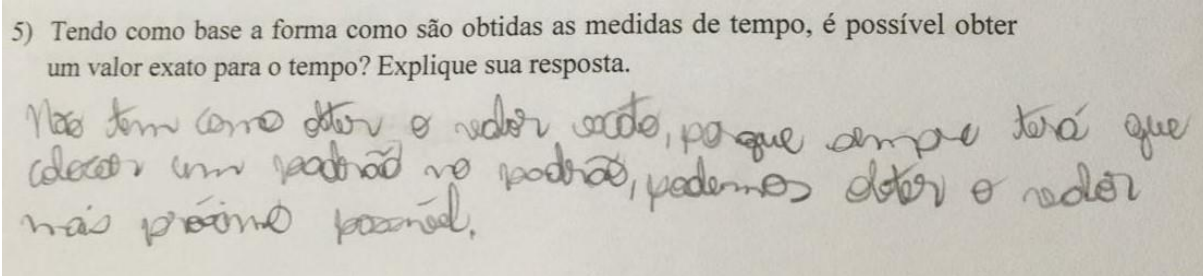
Fonte: Registros das aulas.

A resposta do grupo é incoerente.

Questão 3.5

A quinta questão apresenta duas respostas N5, três N2 e três N1. As figuras a seguir ilustram alguns exemplos das respostas dos estudantes:

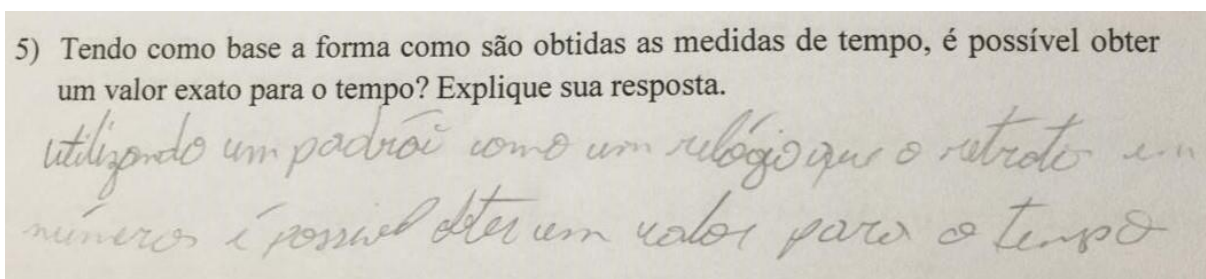
Figura 70 – Resposta N5 para a questão 5 do terceiro questionário.



Fonte: Registros das aulas.

A resposta do grupo mostra que sempre será obtido um valor aproximado para o tempo. Isso porque sempre vai existir um erro associado à medida realizada.

Figura 71 – Resposta N5 para a questão 5 do terceiro questionário.



Fonte: Registros das aulas.

A resposta do grupo é incoerente.

Questionário 04 – Deformação do Espaço-Tempo

Esse questionário foi respondido por oito grupos com os resultados expostos na Tabela 7 a seguir:

Tabela 7 – Nível das respostas dadas pelos grupos ao questionário 04.

Questão	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8
1	2	4	2	4	1	2	2	2
2	1	1	3	1	5	3	4	4
3	1	1	2	1	1	2	2	4
4	1	1	2	2	4	3	2	3

Fonte: Elaboração própria.

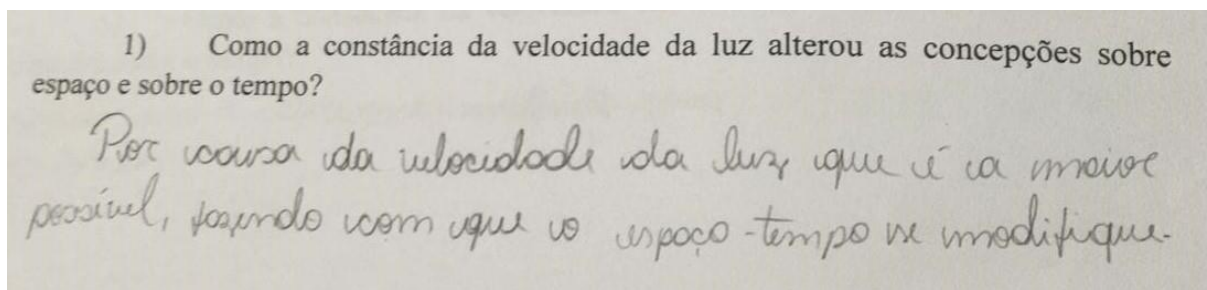
Os dados mostram indícios de aprendizagem significativa, com sete das trinta e duas respostas avaliadas como N4 ou N5 e de aprendizagem mecânica, com quatro respostas N3.

A seguir, são mostrados os resultados de cada questão:

Questão 4.1

A primeira questão apresenta duas respostas N4, cinco N2 e uma N1. As figuras a seguir ilustram alguns exemplos das respostas dos estudantes:

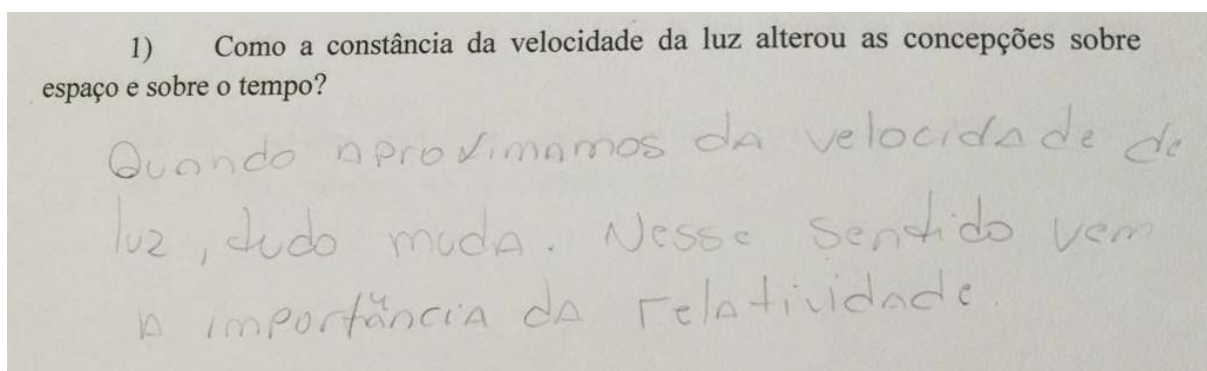
Figura 72 – Resposta N4 para a questão 1 do quarto questionário.



Fonte: Registros das aulas.

A resposta do grupo relaciona a velocidade da luz à modificação do espaço-tempo, porém não informa que é o fato de ela ser constante que faz com que o espaço e o tempo deixem de ser absolutos e passem a ser maleáveis.

Figura 73 – Resposta N2 para a questão 1 do quarto questionário.



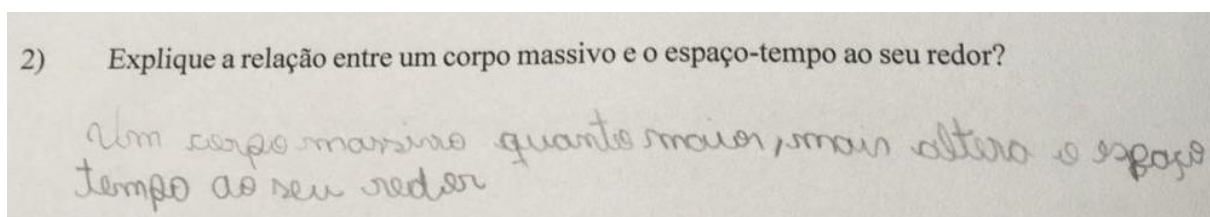
Fonte: Registros das aulas.

A resposta do grupo é incoerente.

Questão 4.2

A segunda questão apresenta uma resposta N5, duas N4, duas N3 e três N1. As figuras a seguir ilustram alguns exemplos das respostas dos estudantes:

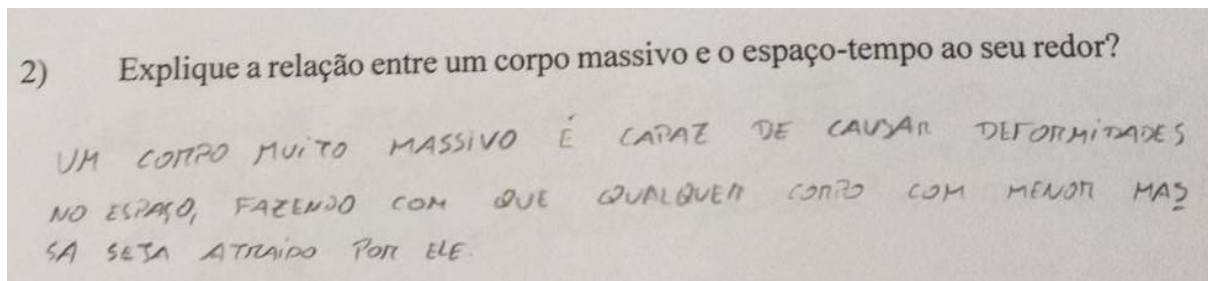
Figura 74 – Resposta N5 para a questão 2 do quarto questionário.



Fonte: Registros das aulas.

A resposta do grupo mostra que quanto mais massa um corpo possui, mais forte são os efeitos da alteração do espaço-tempo ao seu redor.

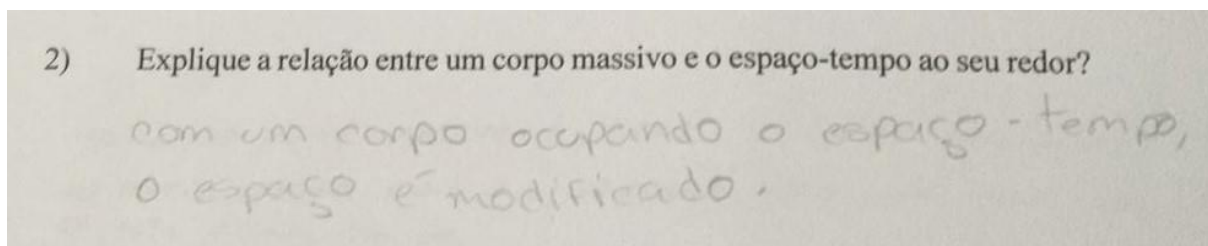
Figura 75 – Resposta N4 para a questão 2 do quarto questionário.



Fonte: Registros das aulas.

A resposta do grupo mostra que um corpo massivo é capaz de alterar o espaço ao seu redor, porém também mostra que o espaço seria dissociado do tempo.

Figura 76 – Resposta N3 para a questão 2 do quarto questionário.



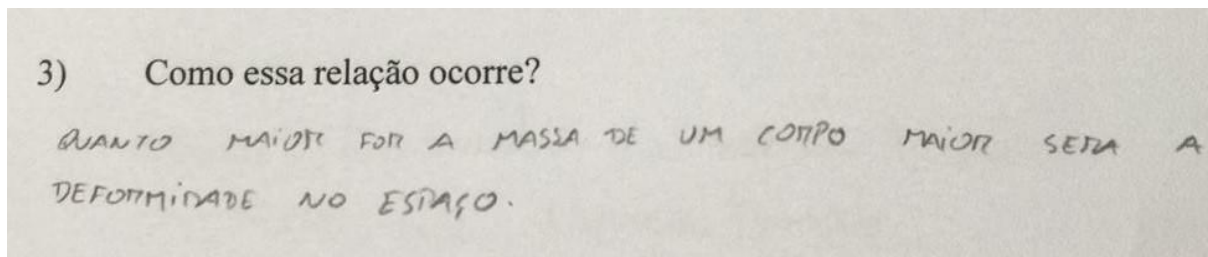
Fonte: Registros das aulas.

A resposta do grupo mostra que um corpo é capaz de modificar o espaço dissociado do tempo, porém os conceitos são apresentados de forma confusa, indicando aprendizagem mecânica.

Questão 4.3

A terceira questão apresenta uma resposta N4, três N2 e quatro N1. As figuras a seguir ilustram alguns exemplos das respostas dos estudantes:

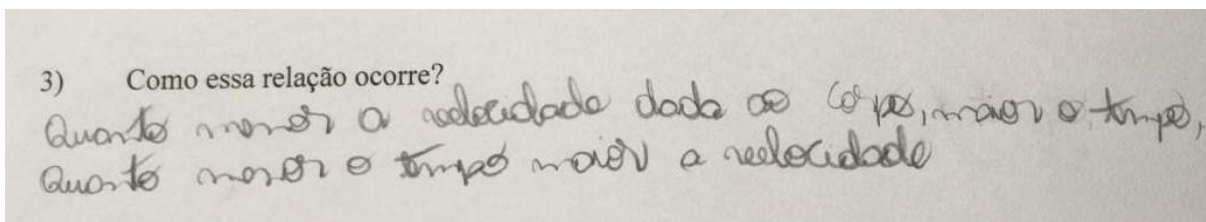
Figura 77 – Resposta N4 para a questão 3 do quarto questionário.



Fonte: Registros das aulas.

A resposta do grupo mostra que quanto mais massa, mais deformado será o espaço, porém não explica como ocorre a deformação da parte temporal.

Figura 78 – Resposta N2 para a questão 3 do quarto questionário.



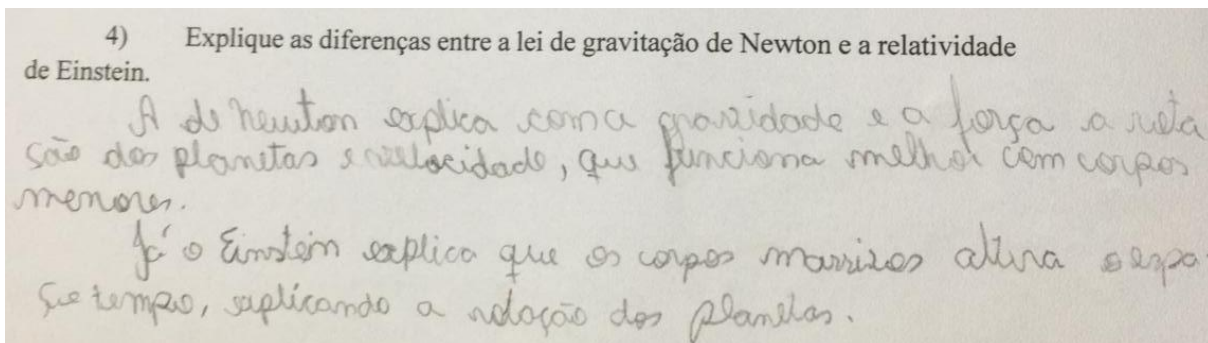
Fonte: Registros das aulas.

A resposta do grupo é incoerente.

Questão 4.4

A quarta questão apresenta uma resposta N4, duas N3, três N2 e duas N1. As figuras a seguir ilustram alguns exemplos das respostas dos estudantes:

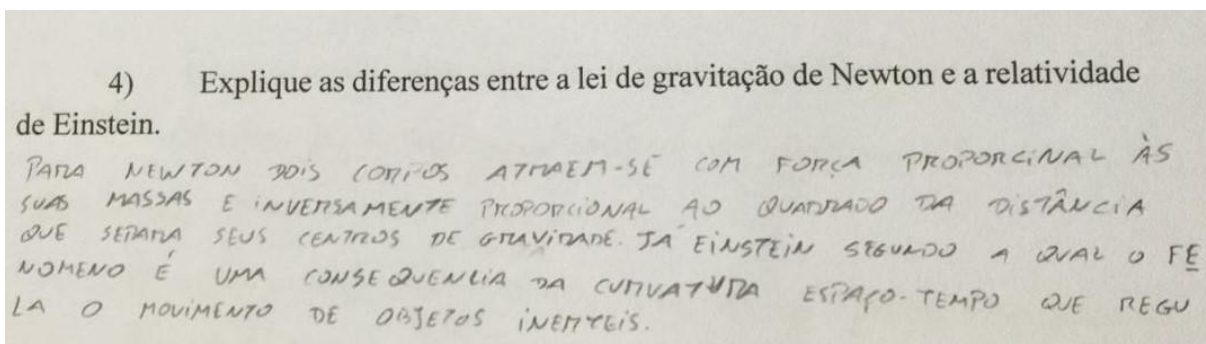
Figura 79 – Resposta N4 para a questão 4 do quarto questionário.



Fonte: Registros das aulas.

A resposta do grupo mostra a diferença entre a força gravitacional de Newton e a deformação do espaço-tempo de Einstein. Também mostra que a gravitação de Newton ainda pode ser utilizada em escalas pequenas.

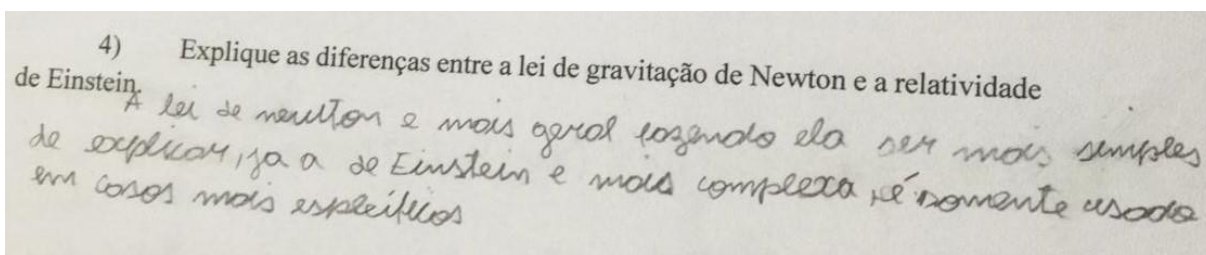
Figura 80 – Resposta N3 para a questão 4 do quarto questionário.



Fonte: Registros das aulas.

A resposta do grupo é cópia do site Wikipédia.

Figura 81 – Resposta N2 para a questão 4 do quarto questionário.



Fonte: Registros das aulas.

A resposta do grupo não atende ao que foi pedido na questão.

Questionário 05 – Efeitos da Relatividade

Esse questionário foi respondido por oito grupos com os resultados expostos na Tabela 8 a seguir:

Tabela 8 – Nível das respostas dadas pelos grupos ao questionário 05.

Questão	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8
1	3	4	2	2	4	3	4	2
2	4	4	2	2	3	4	4	2
3	3	3	2	2	3	3	4	3
4	3	4	2	2	4	3	4	3

Fonte: Elaboração própria.

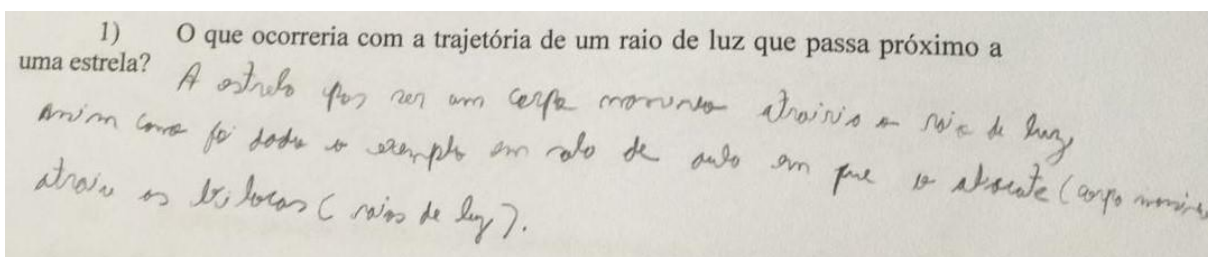
Os dados mostram indícios de aprendizagem significativa, com onze das trinta e duas respostas avaliadas como N4 e de aprendizagem mecânica, com onze respostas N3.

A seguir, são mostrados os resultados de cada questão:

Questão 5.1

A primeira questão apresenta três respostas N4, duas N3 e três N2. As figuras a seguir ilustram alguns exemplos das respostas dos estudantes:

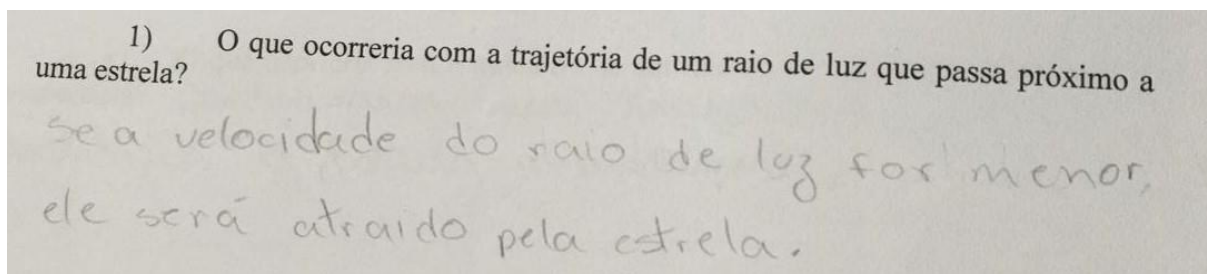
Figura 82 – Resposta N4 para a questão 1 do quinto questionário.



Fonte: Registros das aulas.

A resposta do grupo mostra que o raio de luz seria atraído pela estrela, porém não explica que essa atração ocorre devido à deformação espaço-temporal causada pela estrela.

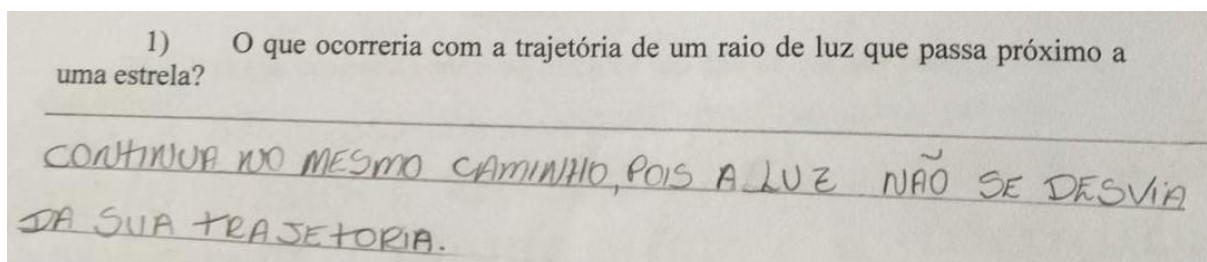
Figura 83 – Resposta N3 para a questão 1 do quinto questionário.



Fonte: Registros das aulas.

A resposta do grupo indica que o raio de luz seria atraído pela estrela, porém também indica que a velocidade da luz não é constante.

Figura 84 – Resposta N2 para a questão 1 do quinto questionário.



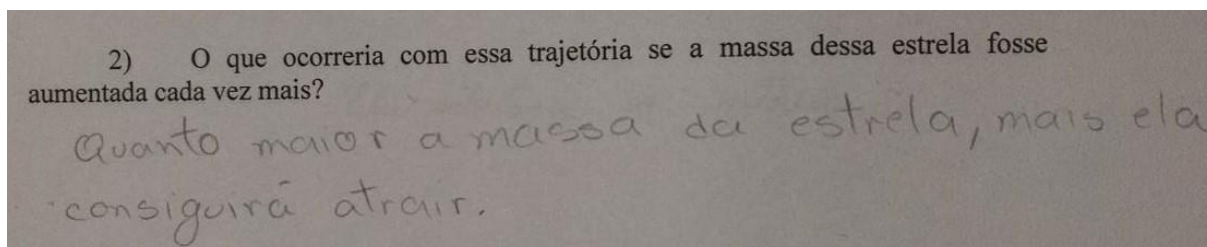
Fonte: Registros das aulas.

A resposta do grupo está em desacordo com a matéria de ensino, indicando que os subsunçores formados no estudo da ótica geométrica não foram modificados.

Questão 5.2

A segunda questão apresenta quatro respostas N4, uma N3 e três N2. As figuras a seguir ilustram alguns exemplos das respostas dos estudantes:

Figura 85 – Resposta N4 para a questão 2 do quinto questionário.



Fonte: Registros das aulas.

A resposta do grupo mostra que a massa da estrela está diretamente relacionada a sua capacidade de atrair o raio de luz, porém não inclui a deformação do espaço-tempo na explicação.

Figura 86 – Resposta N3 para a questão 2 do quinto questionário.

2) O que ocorreria com essa trajetória se a massa dessa estrela fosse aumentada cada vez mais?

- A velocidade da atração seria maior.

Fonte: Registros das aulas.

A resposta do grupo mostra que o raio de luz seria atraído com mais intensidade, porém a forma como isso aconteceria não fica clara.

Figura 87 – Resposta N2 para a questão 2 do quinto questionário.

2) O que ocorreria com essa trajetória se a massa dessa estrela fosse aumentada cada vez mais?

TEM DUAS POSSIBILIDADES: DE A MASSA SER GRANDE O SUFICIENTE PARA OBSTRUIR O RAIO DE LUZ OU ELA PODE CRESCER O SUFICIENTE, MESMO ASSIM O RAIO DE LUZ CONTINUA NA MESMA TRAJETÓRIA.

Fonte: Registros das aulas.

A resposta do grupo não está de acordo com a matéria de ensino.

Questão 5.3

A terceira questão não estava clara em seu comando, por isso ele foi adaptado e apresentado oralmente aos estudantes. Desse modo, onde lê-se “se fosse um tripulante em uma nave espacial, qual seria sua percepção do ocorrido?” foi substituído por “Se, no lugar do raio de luz da questão um, fosse um tripulante em uma nave espacial viajando próximo a uma estrela, qual seria sua percepção do ocorrido?”.

A questão apresenta uma resposta N4, cinco N3 e duas N2. As figuras a seguir ilustram alguns exemplos das respostas dos estudantes:

Figura 88 – Resposta N3 para a questão 3 do quinto questionário.

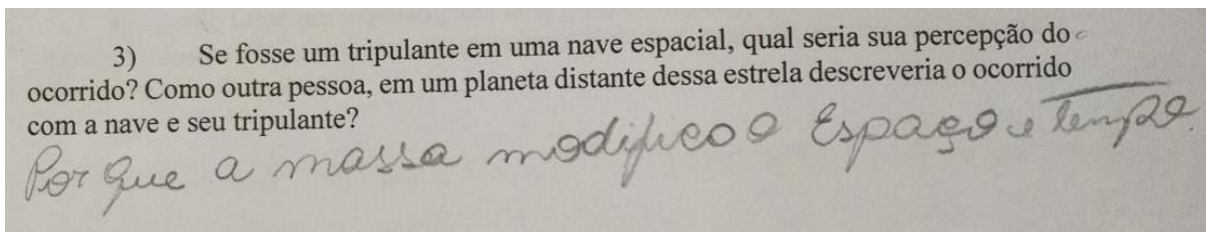
3) Se fosse um tripulante em uma nave espacial, qual seria sua percepção do ocorrido? Como outra pessoa, em um planeta distante dessa estrela descreveria o ocorrido com a nave e seu tripulante?

minha percepção, seria a observação do espaço-tempo sendo modificado, por conta da gravidade, e o tempo menor. outra pessoa perceberia, a modificação do espaço-tempo, pois o tempo seria diferente pro tripulante.

Fonte: Registros das aulas.

A resposta do grupo mostra que os dois observadores perceberiam efeitos diferentes, porém os conceitos estão confusos, indicando a aprendizagem mecânica dos tópicos.

Figura 89 – Resposta N2 para a questão 3 do quinto questionário.



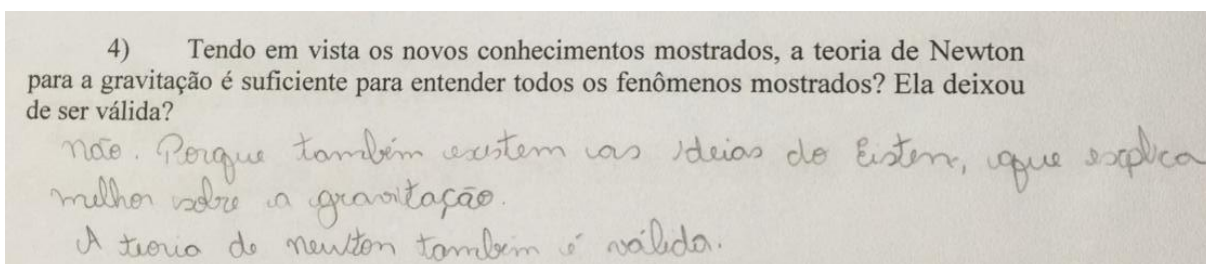
Fonte: Registros das aulas.

A resposta do grupo, apesar de não estar errada, não responde à questão.

Questão 5.4

A quarta questão apresenta três respostas N4, três N3 e duas N2. As figuras a seguir ilustram alguns exemplos das respostas dos estudantes:

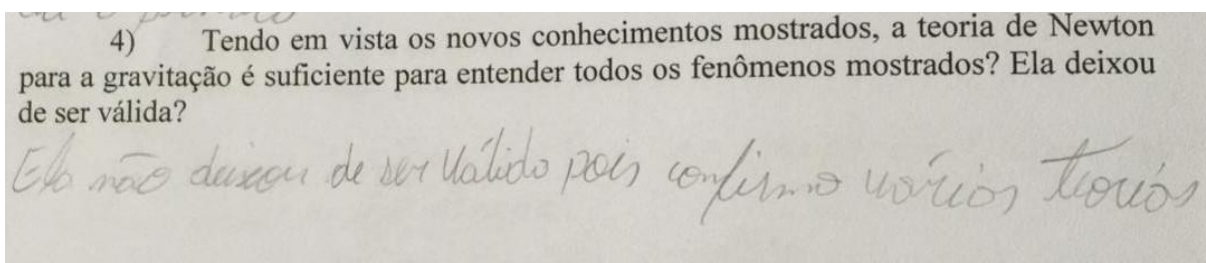
Figura 90 – Resposta N4 para a questão 4 do quinto questionário.



Fonte: Registros das aulas.

A resposta do grupo mostra que a gravitação de Newton não é suficiente para entender todos os fenômenos, mas ainda não deixou de ser válida, porém não explica em quais situações ela pode ser utilizada.

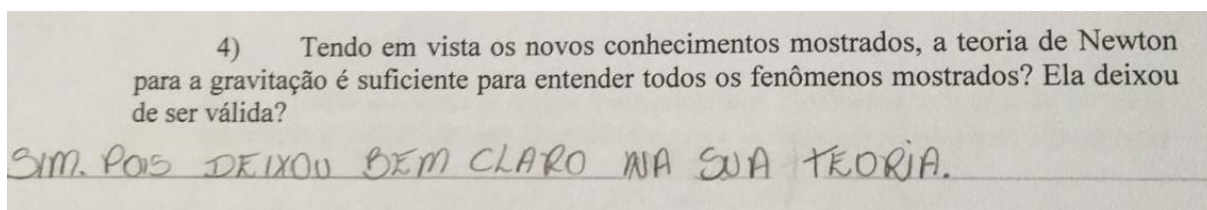
Figura 91 – Resposta N3 para a questão 4 do quinto questionário.



Fonte: Registros das aulas.

A resposta do grupo mostra que a teoria de Newton não deixou de ser válida, mas não explica em quais situações e nem se ela é suficiente para entender os fenômenos mostrados.

Figura 92 – Resposta N2 para a questão 4 do quinto questionário.



Fonte: Registros das aulas.

A resposta do grupo é incoerente.

Questionário 06 – Histórico dos Buracos Negros

Esse questionário foi respondido por seis grupos com os resultados expostos na Tabela 9 a seguir:

Tabela 9 – Nível das respostas dadas pelos grupos ao questionário 06.

Questão	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8
1	3	3	3	3	-	3	3	-
2	3	4	4	3	-	2	3	-
3	4	2	2	2	-	4	2	-

Fonte: Elaboração própria.

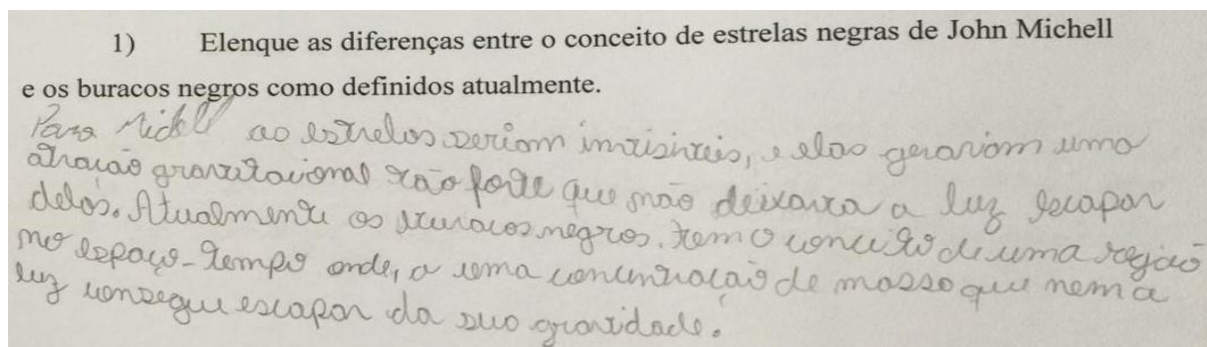
Os dados mostram indícios de aprendizagem significativa, com quatro das dezoito respostas avaliadas como N4 e de aprendizagem mecânica, com nove respostas N3.

A seguir, são mostrados os resultados de cada questão:

Questão 6.1

A primeira questão apresenta seis respostas N3. A figura a seguir ilustra um exemplo das respostas dos estudantes:

Figura 93 – Resposta N3 para a questão 1 do sexto questionário.



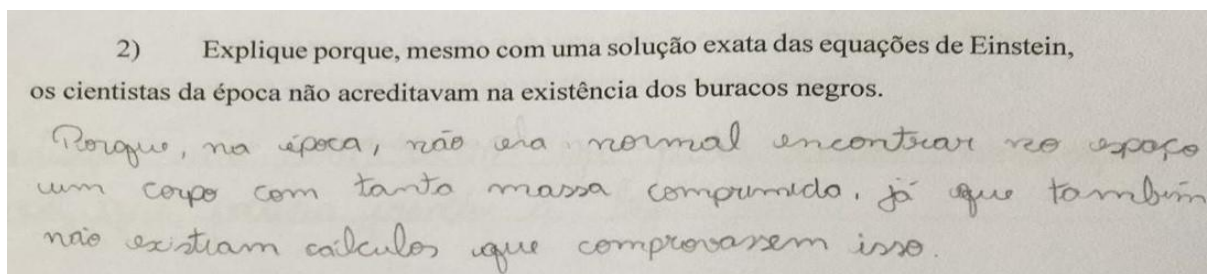
Fonte: Registros das aulas.

A resposta do grupo é quase uma cópia do texto de apoio, com pequenas modificações.

Questão 6.2

A segunda questão apresenta duas respostas N4, três N3 e uma N2 e as figuras a seguir, ilustram alguns exemplos das respostas dos estudantes:

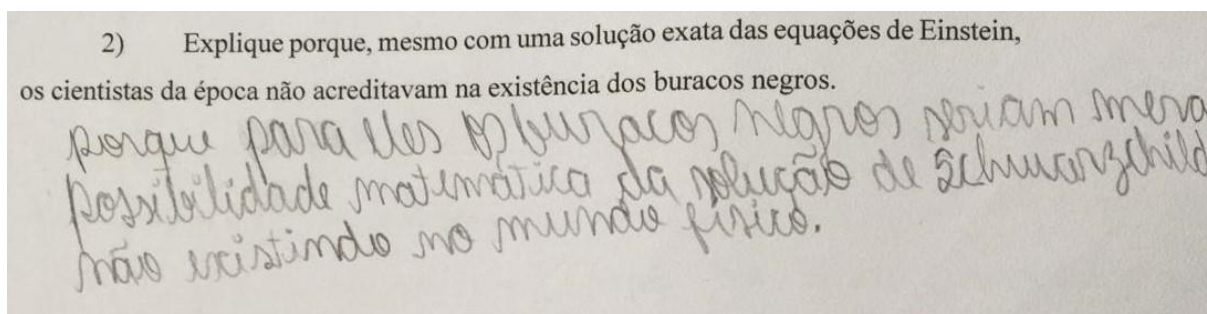
Figura 94 – Resposta N4 para a questão 2 do sexto questionário.



Fonte: Registros das aulas.

A resposta do grupo mostra que a não aceitação dos buracos negros estava relacionada à falta de respaldo para a existência de corpos extremamente densos.

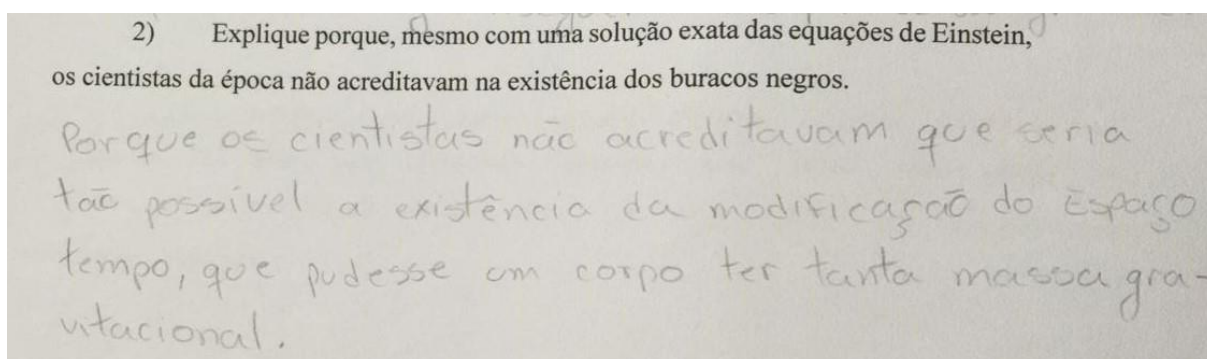
Figura 95 – Resposta N3 para a questão 2 do sexto questionário.



Fonte: Registros das aulas.

A resposta do grupo é uma cópia do texto de apoio.

Figura 96 – Resposta N2 para a questão 2 do sexto questionário.



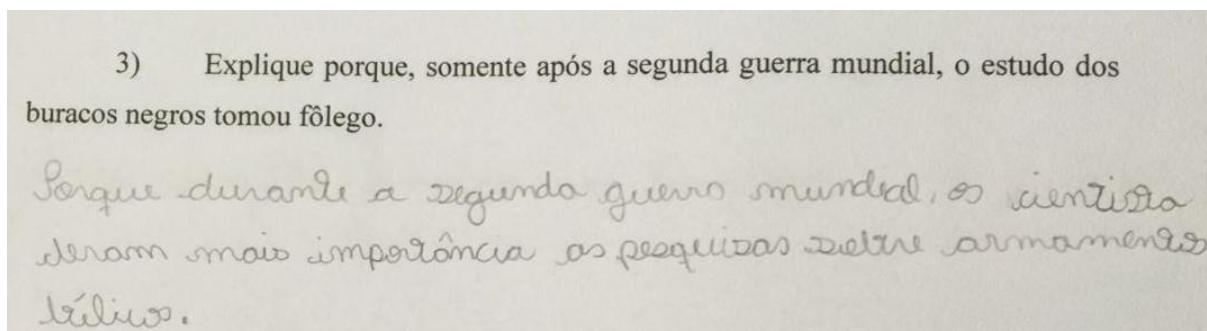
Fonte: Registros das aulas.

A resposta do grupo é incoerente.

Questão 6.3

A terceira questão apresenta duas respostas N4 e quatro N2. As figuras a seguir ilustram alguns exemplos das respostas dos estudantes:

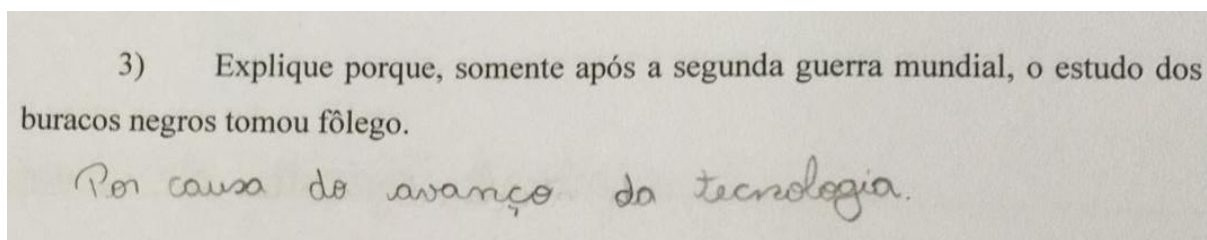
Figura 97 – Resposta N4 para a questão 3 do sexto questionário.



Fonte: Registros das aulas.

A resposta do grupo mostra que os esforços científicos foram desviados para a área bélica durante a segunda guerra, mas não cita a guerra fria como fator que impulsionou vários tipos de estudos científicos.

Figura 98 – Resposta N2 para a questão 3 do sexto questionário.



Fonte: Registros das aulas.

A resposta do grupo não responde à questão.

Questionário 07 – Raio de Schwarzschild e Horizonte de Eventos

Esse questionário foi respondido por cinco grupos com os resultados expostos na Tabela 10 a seguir:

Tabela 10 – Nível das respostas dadas pelos grupos ao questionário 07.

Questão	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8
1	3	-	3	1	-	3	4	-
2	2	-	2	4	-	2	2	-
3	1	-	2	4	-	4	2	-

Fonte: Elaboração própria.

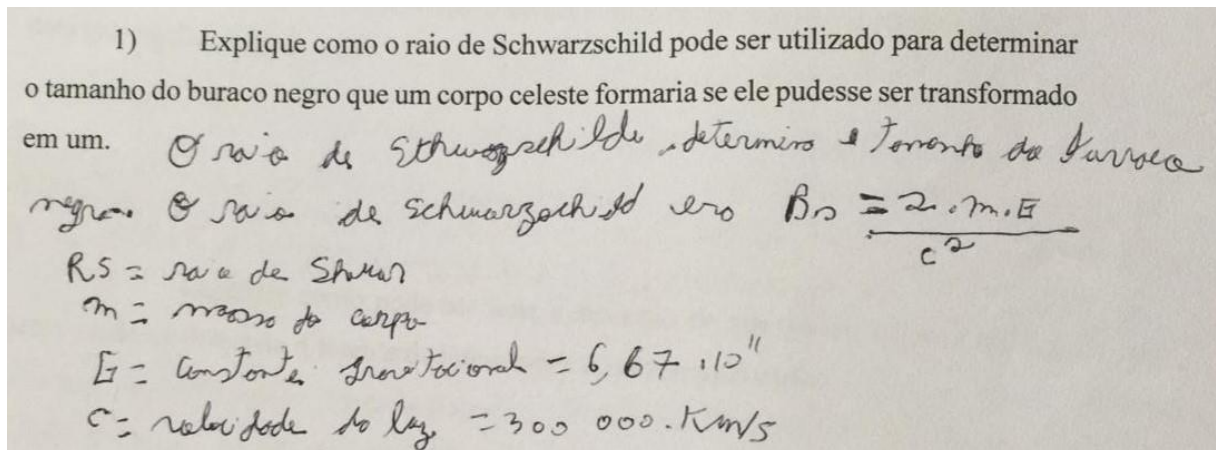
Os dados mostram indícios de aprendizagem significativa, com quatro das quinze respostas avaliadas como N4 e de aprendizagem mecânica, com três respostas N3.

A seguir, são mostrados os resultados de cada questão:

Questão 7.1

A primeira questão apresenta uma resposta N4, três N3 e uma N1. As figuras a seguir ilustram alguns exemplos das respostas dos estudantes:

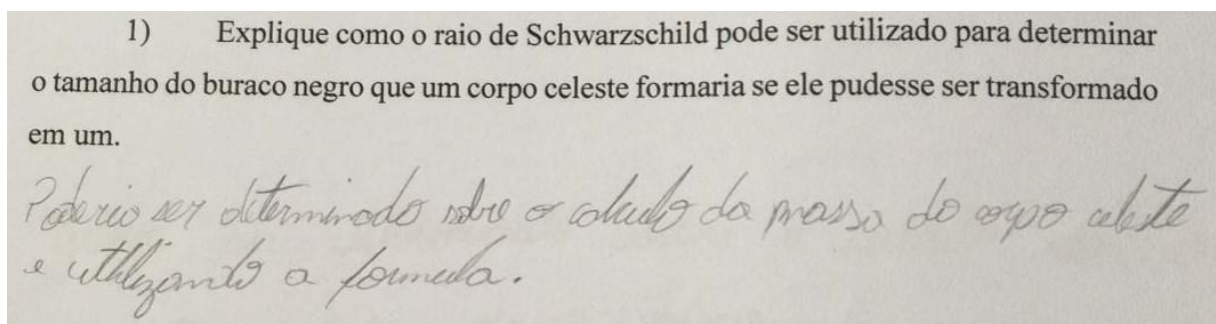
Figura 99 – Resposta N4 para a questão 1 do sétimo questionário.



Fonte: Registros das aulas.

A resposta do grupo mostra que o raio de Schwarzschild determina o tamanho do buraco negro, porém não informa que esse tamanho depende apenas da massa do corpo que originaria o buraco negro.

Figura 100 – Resposta N3 para a questão 1 do sétimo questionário.



Fonte: Registros das aulas.

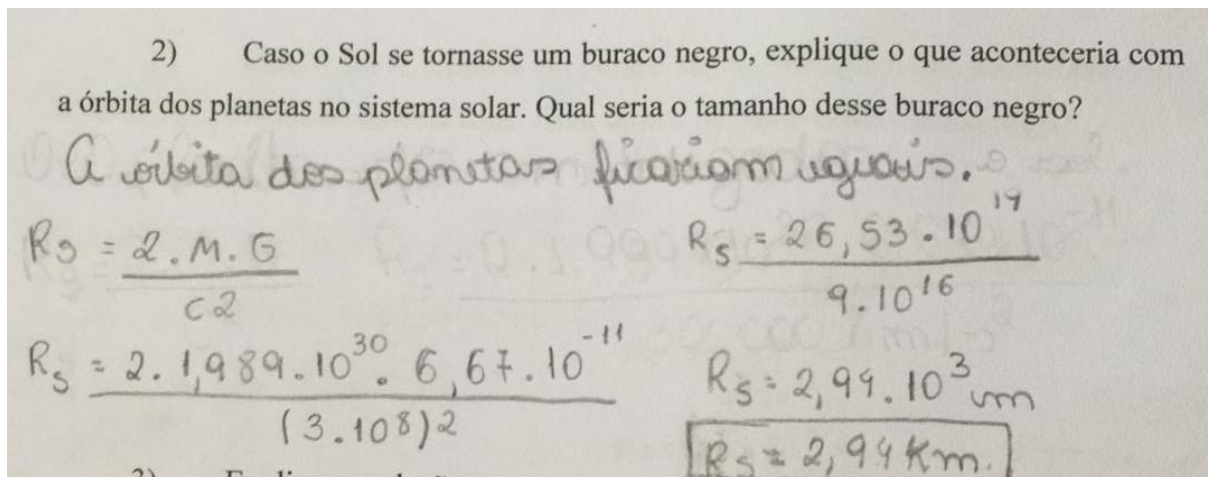
A resposta do grupo apresenta os conceitos, porém de forma confusa.

Questão 7.2

O cálculo do tamanho hipotético do buraco negro formado pelo Sol teve que ser feito pelo professor no quadro, uma vez que os estudantes demonstraram não possuir os subsunçores adequados para sua realização.

A segunda questão apresenta uma resposta N4 e quatro N2. As figuras a seguir ilustram alguns exemplos das respostas dos estudantes:

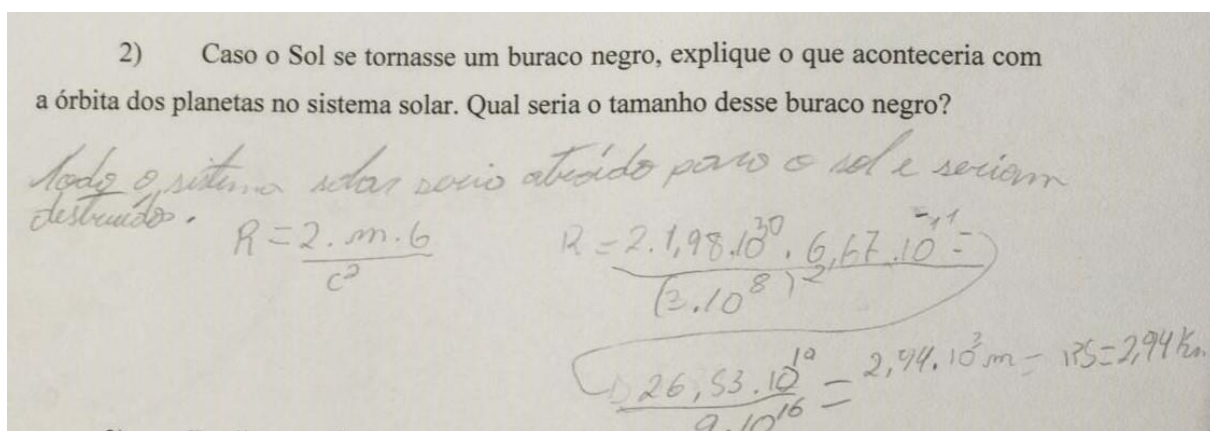
Figura 101 – Resposta N4 para a questão 2 do sétimo questionário.



Fonte: Registros das aulas.

A resposta do grupo indica que a órbita dos planetas não seria alterada, porém não explica que isso deve-se a relação da órbita com a massa do Sol.

Figura 102 – Resposta N2 para a questão 2 do sétimo questionário.



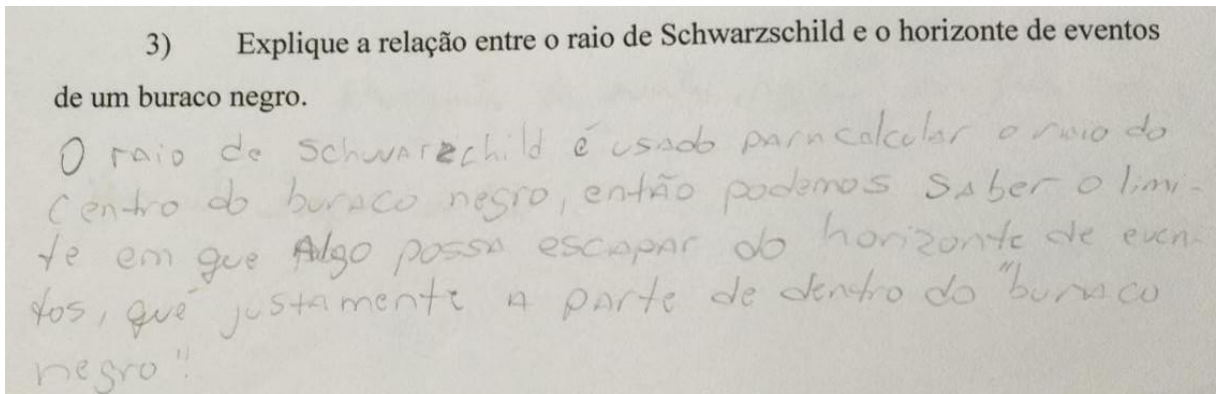
Fonte: Registros das aulas.

A resposta do grupo está em desacordo com a matéria de ensino.

Questão 7.3

A terceira questão apresenta duas respostas N4, duas N2 e uma N1. As figuras a seguir ilustram alguns exemplos das respostas dos estudantes:

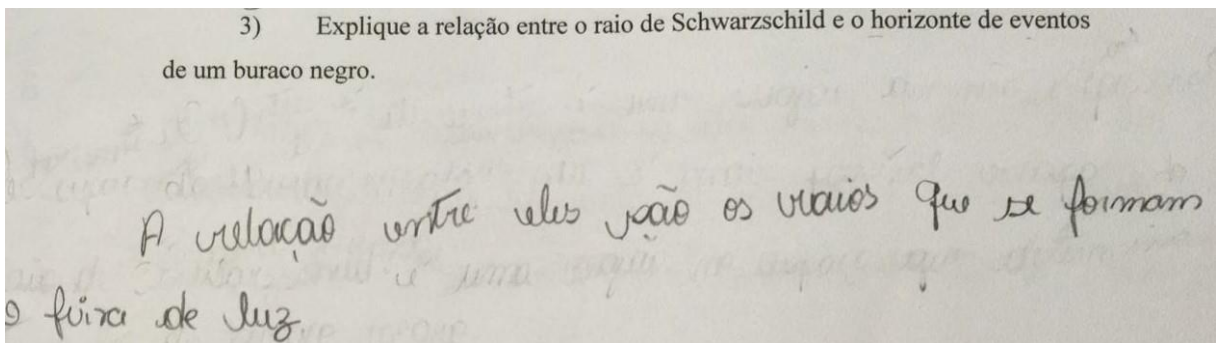
Figura 103 – Resposta N4 para a questão 3 do sétimo questionário.



Fonte: Registros das aulas.

A resposta do grupo indica que o raio de Schwarzschild pode ser utilizado para calcular onde se encontra o horizonte de eventos, porém faz uma confusão ao afirmar que o horizonte de eventos seria a parte de dentro do buraco negro.

Figura 104 – Resposta N2 para a questão 3 do sétimo questionário.



Fonte: Registros das aulas.

A resposta do grupo é incoerente.

Questionário 08 – Buracos Negros 1

Esse questionário foi respondido por sete grupos com os resultados expostos na Tabela 11 a seguir:

Tabela 11 – Nível das respostas dadas pelos grupos ao questionário 08.

Questão	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8
1	3	3	3	3	4	3	-	3
2	3	3	3	2	5	3	-	3

Fonte: Elaboração própria.

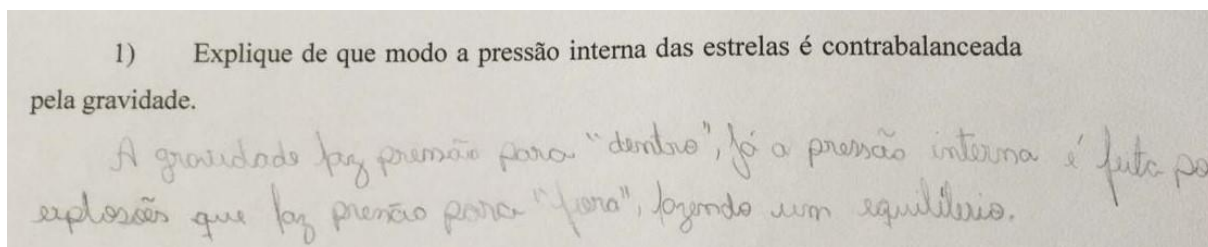
Os dados mostram indícios de aprendizagem significativa, com duas das quatorze respostas avaliadas como N4 ou N5 e de aprendizagem mecânica, com onze respostas N3.

A seguir, são mostrados os resultados de cada questão:

Questão 8.1

A primeira questão apresenta uma resposta N4 e seis N3. As figuras a seguir ilustram alguns exemplos das respostas dos estudantes:

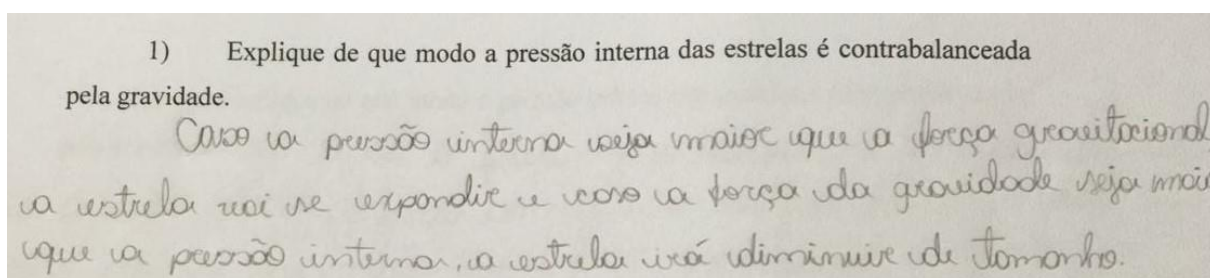
Figura 105 – Resposta N4 para a questão 1 do oitavo questionário.



Fonte: Registros das aulas.

A resposta do grupo mostra como ocorre o equilíbrio hidrostático das estrelas. Porém, relacionaram a pressão interna das estrelas a explosões.

Figura 106 – Resposta N3 para a questão 1 do oitavo questionário.



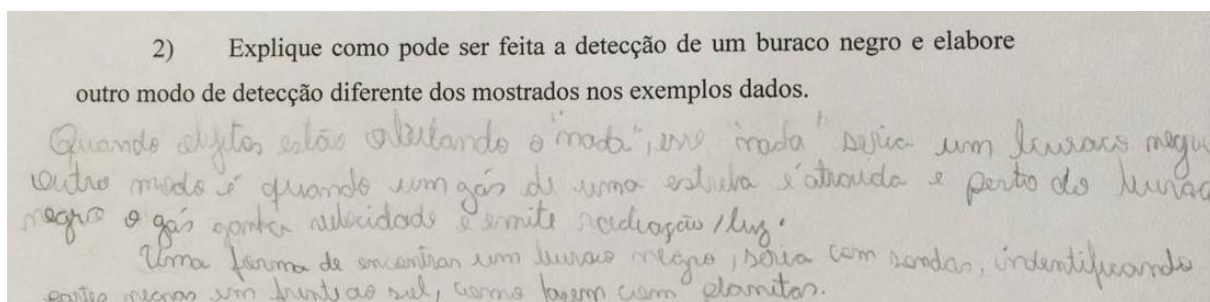
Fonte: Registros das aulas.

A resposta do grupo é cópia do texto de apoio.

Questão 8.2

A segunda questão apresenta uma resposta N5, cinco N3 e uma N2. As figuras a seguir ilustram alguns exemplos das respostas dos estudantes:

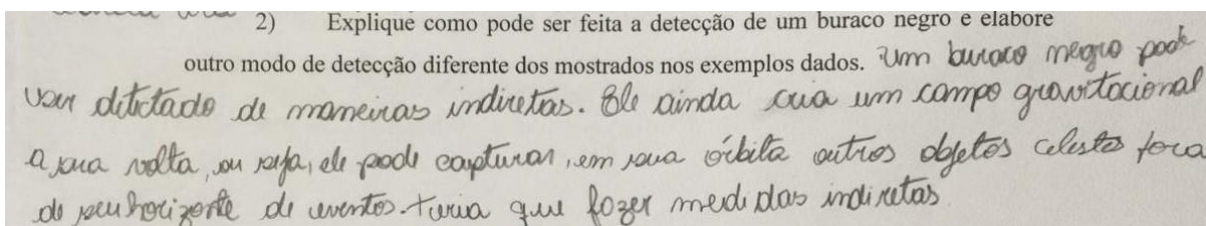
Figura 107 – Resposta N5 para a questão 2 do oitavo questionário.



Fonte: Registros das aulas.

A resposta do grupo mostra duas formas de detecção de buracos negros e, também, faz uma tentativa de criar um método para sua detecção.

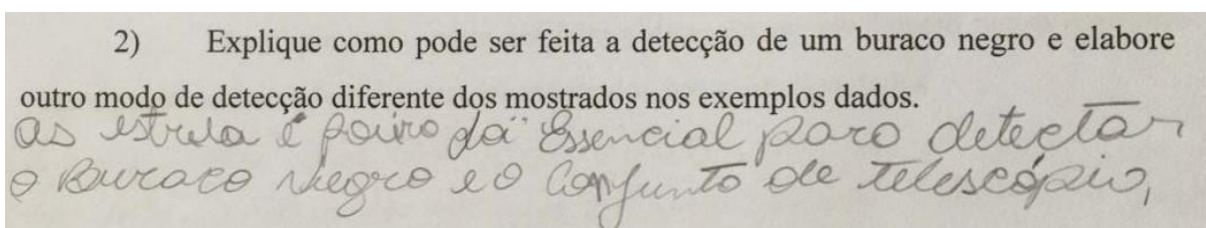
Figura 108 – Resposta N3 para a questão 2 do oitavo questionário.



Fonte: Registros das aulas.

A resposta do grupo é uma cópia do texto de apoio.

Figura 109 – Resposta N2 para a questão 2 do oitavo questionário.



Fonte: Registros das aulas.

A resposta do grupo é incoerente.

Questionário 09 – Buracos Negros 2

Esse questionário foi respondido por seis grupos com os resultados expostos na Tabela 12 a seguir:

Tabela 12 – Nível das respostas dadas pelos grupos ao questionário 09.

Questão	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8
1	3	2	2	4	2	3	-	-
2	4	3	4	1	4	5	-	-

Fonte: Elaboração própria.

Os dados mostram indícios de aprendizagem significativa, com cinco das doze respostas avaliadas como N4 ou N5 e de aprendizagem mecânica, com três respostas N3.

A seguir, são mostrados os resultados de cada questão:

Questão 9.1³³

A primeira questão apresenta uma resposta N4, duas N3 e três N2. As figuras a seguir ilustram alguns exemplos das respostas dos estudantes:

³³ As imagens das questões do nono questionário aparecem com numeração três e quatro porque, para fins de economia de papel da escola, foram impressas na mesma folha do oitavo questionário. Apesar disso, sua aplicação foi feita conforme roteiro do produto educacional desta dissertação.

Figura 110 – Resposta N4 para a questão 1 do nono questionário.

3) De que modo os buracos negros representados nas figuras estão ligados à gravitação? Os buracos negros "sugam" tudo que está em sua volta por sua massa ser extremamente grande, daí a força gravitacional é muito forte.

Fonte: Registros das aulas.

A resposta do grupo relaciona a massa dos buracos negros à força gravitacional, porém não cita a deformação do espaço-tempo.

Figura 111 – Resposta N3 para a questão 1 do nono questionário.

3) De que modo os buracos negros representados nas figuras estão ligados à gravitação? Estas figuras a gravitação pois podemos ver as partículas orbitando o buraco negro.

Fonte: Registros das aulas.

A resposta do grupo mostra que a órbita das partículas em torno dos buracos negros está relacionada à gravitação, porém de forma precária.

Figura 112 – Resposta N2 para a questão 1 do nono questionário.

3) De que modo os buracos negros representados nas figuras estão ligados à gravitação? Pela massa ser muito densa, a gravidade é distorcida e suga tudo para dentro do buraco.

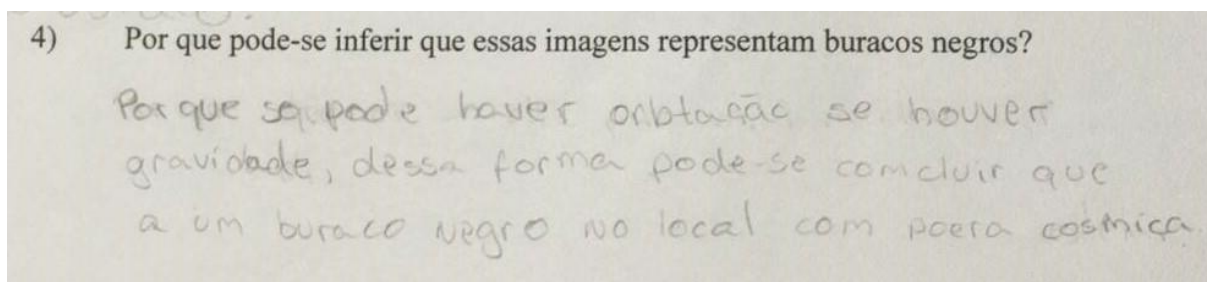
Fonte: Registros das aulas.

A resposta do grupo não está de acordo com a matéria de ensino.

Questão 9.2

A segunda questão apresenta uma resposta N5, três N4, uma N3 e uma N1. As figuras a seguir ilustram alguns exemplos das respostas dos estudantes:

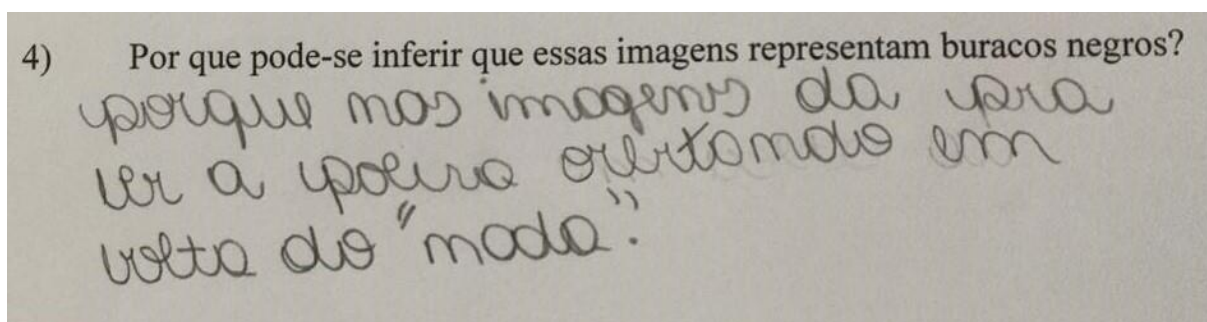
Figura 113 – Resposta N5 para a questão 2 do nono questionário.



Fonte: Registros das aulas.

A resposta do grupo mostra que um corpo somente pode estar em órbita se houver outro corpo para gerar um campo gravitacional e caso não se possa ver esse corpo gerador, ele pode ser um buraco negro.

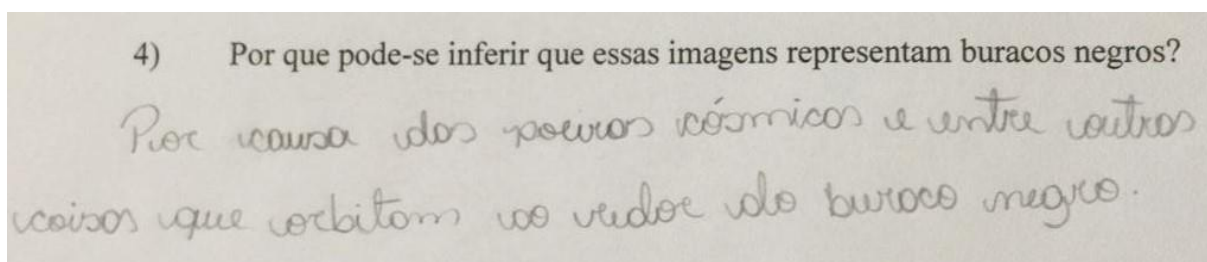
Figura 114 – Resposta N4 para a questão 2 do nono questionário.



Fonte: Registros das aulas.

A resposta do grupo tenta mostrar o mesmo que a resposta do grupo anterior, porém falta explicar melhor o que ocorre.

Figura 115 – Resposta N3 para a questão 2 do nono questionário.



Fonte: Registros das aulas.

A resposta do grupo apresenta entendimento inicial da matéria de ensino.

Questionário 10 – Lentes Gravitacionais

Esse questionário foi respondido por seis grupos com os resultados expostos na Tabela 13 a seguir:

Tabela 13 – Nível das respostas dadas pelos grupos ao questionário 10.

Questão	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8
1a	3	3	2	-	3	3	-	5
1b	4	2	2	-	4	4	-	4
2	3	3	3	-	4	4	-	4
3	1	1	1	-	1	1	-	1
4	3	3	3	-	3	3	-	4

Fonte: Elaboração própria.

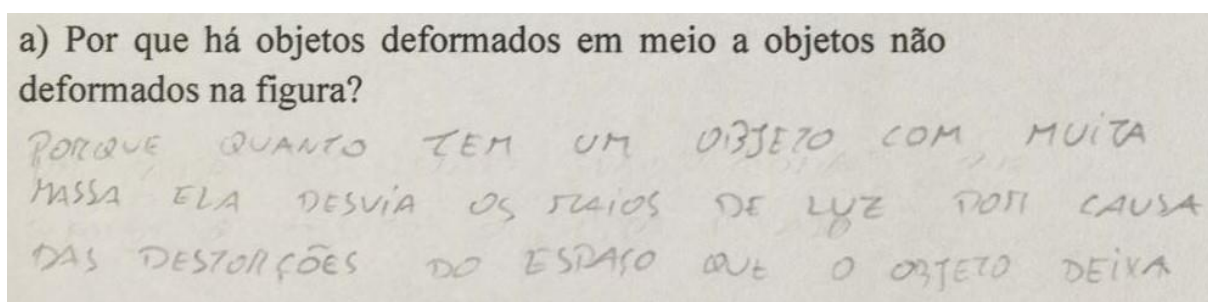
Os dados mostram indícios de aprendizagem significativa, com nove das trinta respostas avaliadas como N4 ou N5 e de aprendizagem mecânica, com doze respostas N3.

A seguir, são mostrados os resultados de cada questão:

Questão 10.1a³⁴

A primeira questão, parte a, apresenta uma resposta N5, quatro N3 e uma N2. As figuras a seguir ilustram alguns exemplos das respostas dos estudantes:

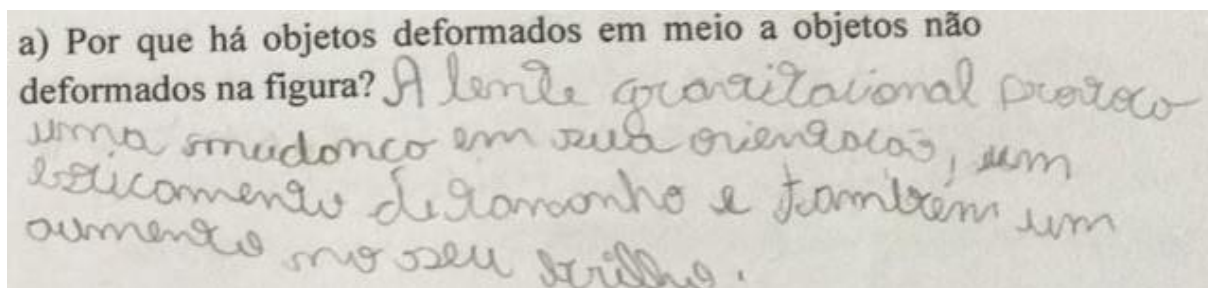
Figura 116 – Resposta N5 para a questão 1a do décimo questionário.



Fonte: Registros das aulas.

A resposta do grupo mostra que a deformação dos objetos está relacionada à deformação do espaço-tempo causada por outro objeto com muita massa.

Figura 117 – Resposta N3 para a questão 1a do décimo questionário.



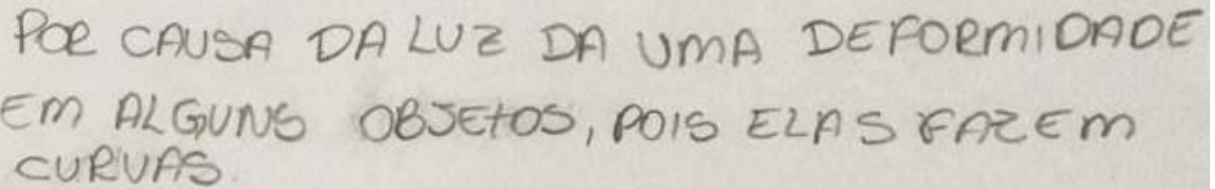
Fonte: Registros das aulas.

³⁴ As questões 1a e 1b do décimo questionário se referem à Figura 37, que mostra uma imagem do aglomerado de galáxias Abell 2218.

A resposta do grupo é uma cópia do texto de apoio

Figura 118 – Resposta N2 para a questão 1a do décimo questionário.

a) Por que há objetos deformados em meio a objetos não deformados na figura?



POE CAUSA DA LUZ DA UMA DEFORMIDADE EM ALGUNS OBJETOS, POIS ELAS FAZEM CURVAS.

Fonte: Registros das aulas.

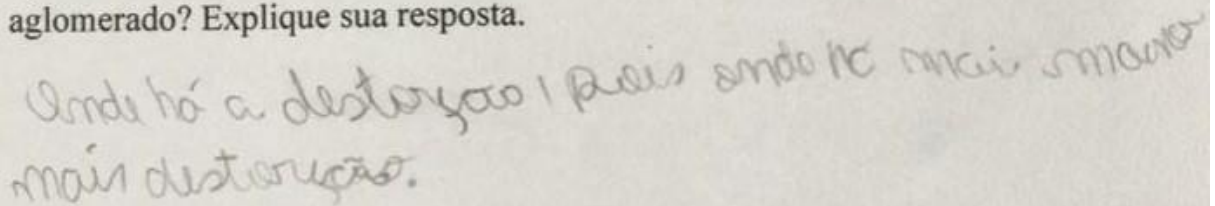
A resposta do grupo é incoerente.

Questão 10.1b

A primeira questão, parte b, apresenta quatro respostas N4 e duas N2. As figuras a seguir ilustram alguns exemplos das respostas dos estudantes:

Figura 119 – Resposta N4 para a questão 1b do décimo questionário.

b) Onde está localizada a maior concentração de massa do aglomerado? Explique sua resposta.



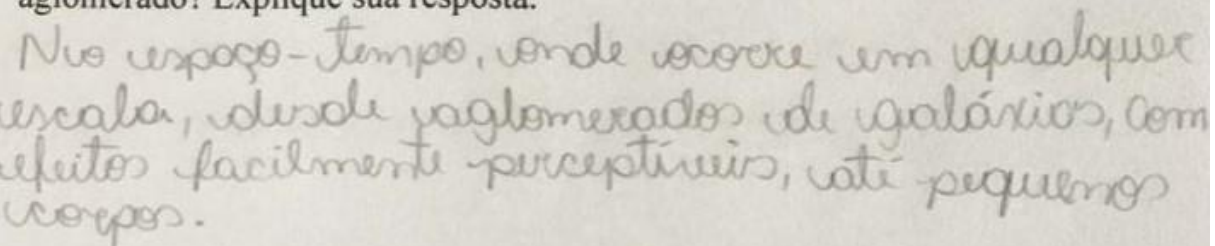
Onde há a distorção / pois sendo HC mais massa mais distorção.

Fonte: Registros das aulas.

A resposta do grupo mostra que o local onde há mais massa é onde se encontra a maior distorção dos objetos.

Figura 120 – Resposta N2 para a questão 1b do décimo questionário.

b) Onde está localizada a maior concentração de massa do aglomerado? Explique sua resposta.



Nos espaços-tempo, onde ocorre em qualquer escala, desde aglomerados de galáxias, com efeitos facilmente perceptíveis, até pequenos corpos.

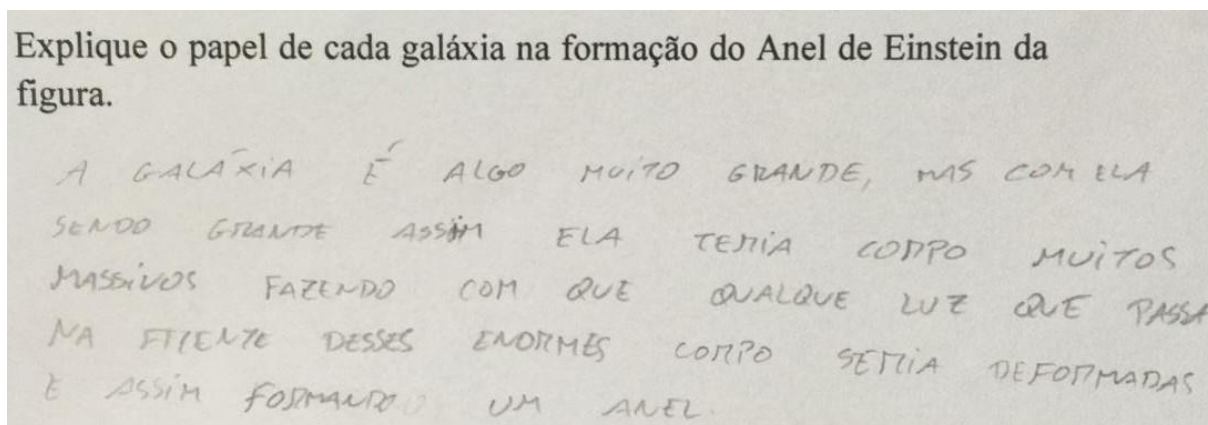
Fonte: Registros das aulas.

A resposta do grupo não atende ao que foi solicitado na questão.

Questão 10.2

A segunda questão apresenta três respostas N4 e três N3. As figuras a seguir ilustram alguns exemplos das respostas dos estudantes:

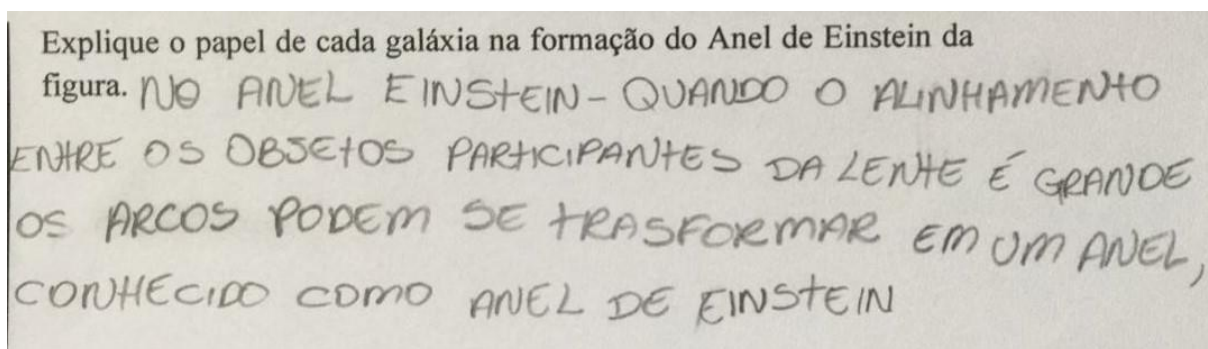
Figura 121 – Resposta N4 para a questão 2 do décimo questionário.



Fonte: Registros das aulas.

A resposta do grupo mostra que a massa de uma das galáxias desvia a luz da outra de modo a formar o Anel de Einstein, porém não explica como isso ocorre.

Figura 122 – Resposta N3 para a questão 2 do décimo questionário.



Fonte: Registros das aulas.

A resposta do grupo é uma cópia do texto de apoio.

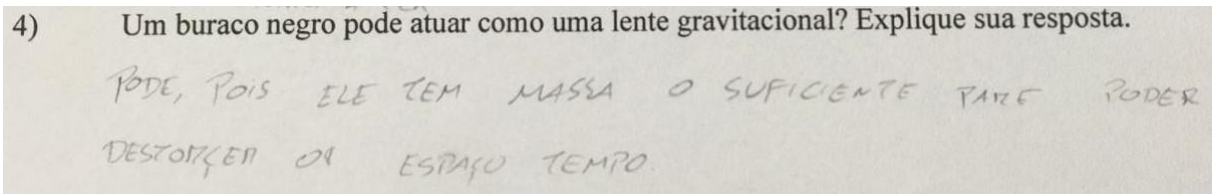
Questão 10.3

A terceira questão pedia que os estudantes fizessem um esboço da atuação de uma microlente gravitacional, porém eles não se interessaram em tentar fazer o esboço pedido, resultando em seis respostas N1.

Questão 10.4

A quarta questão apresenta uma resposta N4 e cinco N3. As figuras a seguir ilustram alguns exemplos das respostas dos estudantes:

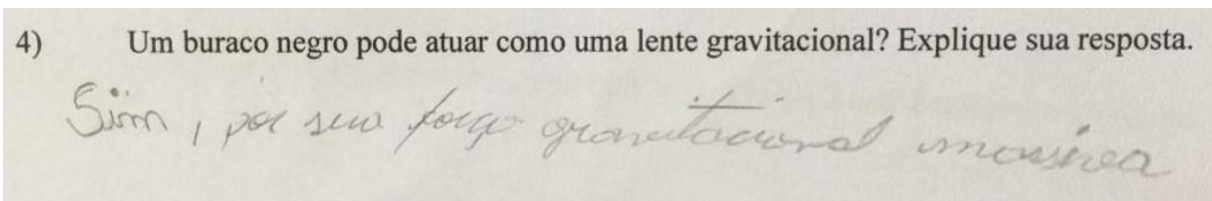
Figura 123 – Resposta N4 para a questão 4 do décimo questionário.



Fonte: Registros das aulas.

A resposta do grupo mostra que um buraco negro pode atuar como uma lente gravitacional porque sua massa distorce o espaço-tempo, porém não explica sob quais condições o efeito ocorre.

Figura 124 – Resposta N3 para a questão 4 do décimo questionário.



Fonte: Registros das aulas.

A resposta do grupo indica que a força gravitacional do buraco negro pode atuar na formação de uma lente gravitacional, porém o faz de forma confusa.

Questionário 11 – Utilizações das Lentes Gravitacionais

Esse questionário foi respondido por sete grupos com os resultados expostos na Tabela 14 a seguir:

Tabela 14 – Nível das respostas dadas pelos grupos ao questionário 11.

Questão	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8
1	3	3	3	4	3	3	3	-
2	2	2	3	2	3	4	2	-

Fonte: Elaboração própria.

Os dados mostram indícios de aprendizagem significativa, com duas das quatorze respostas avaliadas como N4 e de aprendizagem mecânica, com oito respostas N3.

A seguir, são mostrados os resultados de cada questão:

Questão 11.1

A primeira questão apresenta uma resposta N4 e seis N3. As figuras a seguir ilustram alguns exemplos das respostas dos estudantes:

Figura 125 – Resposta N4 para a questão 1 do décimo primeiro questionário.

1) Explique como as lentes gravitacionais podem ser utilizadas para entender como o universo evolui.

As lentes gravitacionais pode ajuda a acompanhar o crescimento do universo.

Fonte: Registros das aulas.

A resposta do grupo indica que as lentes podem ajudar a acompanhar o crescimento do universo, porém não explica como isso ocorreria.

Figura 126 – Resposta N3 para a questão 1 do décimo primeiro questionário.

1) Explique como as lentes gravitacionais podem ser utilizadas para entender como o universo evolui.

As lentes produzem múltiplas imagens de uma galáxia, cada imagem tem uma diferença temporal, assim, pode-se estudar como a galáxia evoluiu com esse intervalo de tempo.

Fonte: Registros das aulas.

A resposta do grupo é cópia do texto de apoio.

Questão 11.2

A segunda questão apresenta uma resposta N4, duas N3 e quatro N2. As figuras a seguir ilustram alguns exemplos das respostas dos estudantes:

Figura 127 – Resposta N4 para a questão 2 do décimo primeiro questionário.

2) Explique como uma lente gravitacional pode ser utilizada na visualização de uma estrela e de um exoplaneta no espaço.

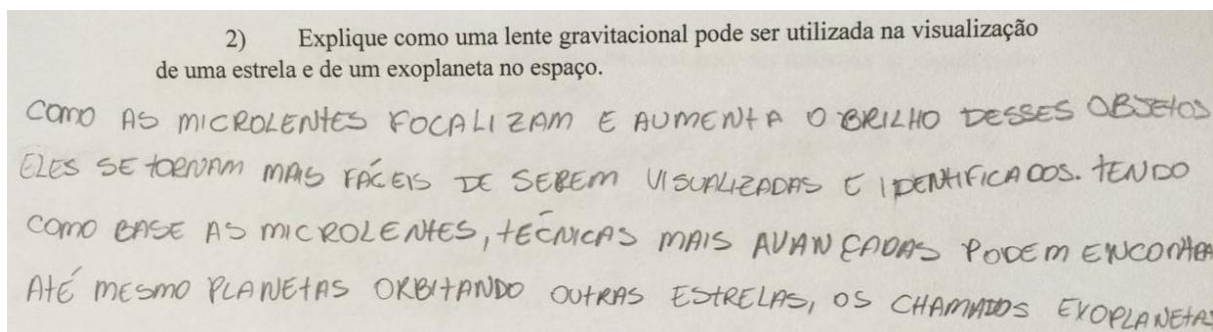
A lente gravitacional funciona como um telescópio, mas tem capacidade melhor que o telescópio.

As estrelas ofuscam os planetas pelo seu brilho, com a lente gravitacional, é possível detectar os planetas.

Fonte: Registros das aulas.

A resposta do grupo mostra que as lentes atuam como um telescópio natural, que seria melhor que os artificiais e, também, faz uma explicação superficial do seu funcionamento.

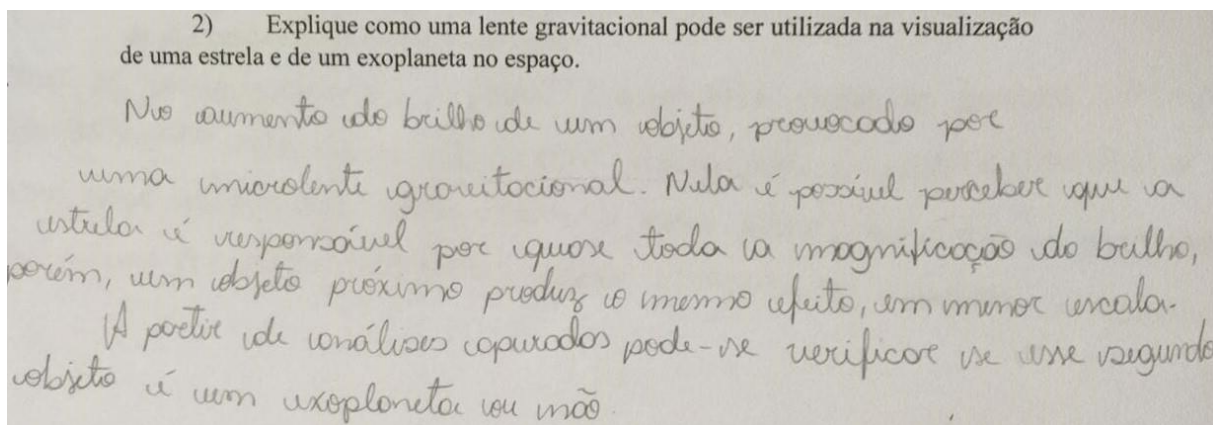
Figura 128 – Resposta N3 para a questão 2 do décimo primeiro questionário.



Fonte: Registros das aulas.

A resposta do grupo é cópia do texto de apoio.

Figura 129 – Resposta N2 para a questão 2 do décimo primeiro questionário.



Fonte: Registros das aulas.

A resposta do grupo não atende ao que foi pedido na questão.

5.4- Resumo dos Dados

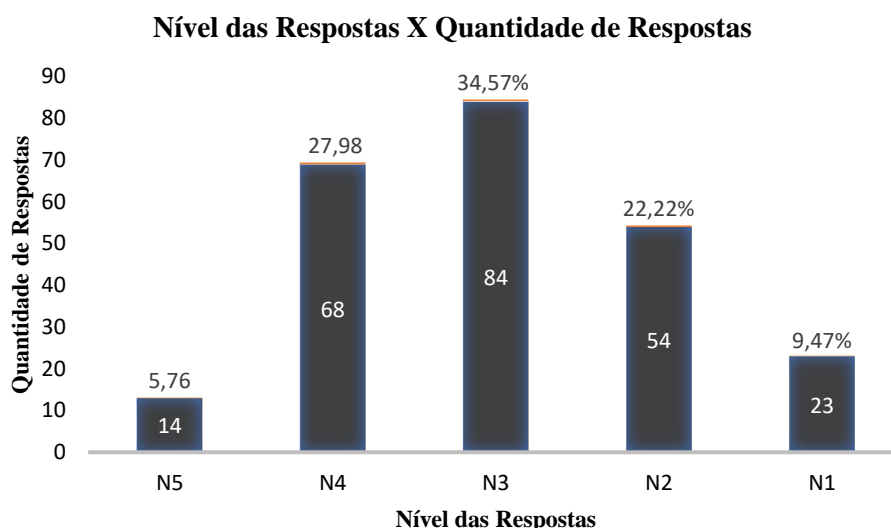
A Tabela 15 a seguir, faz um compilado da quantidade de respostas classificadas em cada nível para cada questionário. Já o Gráfico 1, ilustra a quantidade de questões avaliadas para cada nível. A partir desses dados é possível verificar que foram encontrados indícios de aprendizagem significativa em 33,74% das respostas avaliadas e de aprendizagem mecânica em 34,57% delas. Esses números mostram que o produto educacional atendeu parcialmente a seus objetivos e pode-se reconhecer alguns problemas para isso.

Tabela 15 – Número de respostas avaliadas em cada nível para cada questionário.

Questionário	N5	N4	N3	N2	N1
Q1	3	11	5	2	0
Q2	0	9	4	2	0
Q3	7	8	12	9	4
Q4	1	6	4	11	10
Q5	0	11	11	10	0
Q6	0	4	9	5	0
Q7	0	4	5	4	2
Q8	1	1	11	1	0
Q9	1	4	3	3	1
Q10	1	8	12	3	6
Q11	0	2	8	4	0
Total	14	68	84	54	23

Fonte: Elaboração própria.

Gráfico 1 – Quantidade de repostas avaliadas para cada nível.



Fonte: Elaboração própria.

A ausência ou baixa qualidade dos subsunçores adequados certamente foram fatores a influenciarem os resultados obtidos. Segundo Ausubel (1968), a aprendizagem significativa dos tópicos de gravitação, nesse caso específico, é facilitada quando há presença de conhecimentos prévios adequados ao tema na estrutura cognitiva dos estudantes. Desse modo, antes de chegarem à aprendizagem significativa dos temas, os estudantes alcançaram sua aprendizagem mecânica.

O conteúdo ministrado é novo aos estudantes e, mesmo tendo sido transposto para o ensino médio, ainda possui alto grau de complexidade, o que, certamente, influenciou em sua

assimilação. Isto é, os tópicos trazidos aos estudantes envolvem questões de complexidade acima das que são normalmente submetidos em seus cotidianos escolares normais.

Também deve ser levada em consideração a quantidade de faltas dos estudantes às aulas, o que os fez perderem parte do conteúdo e dificultou a formação, estabilização e modificação de seus subsunçores. A estrutura dos módulos do produto educacional foi montada de modo que os conteúdos do primeiro (gravitação universal) servissem como subsunçores do segundo (relatividade) e desse como subsunçores dos demais (buracos negros e lentes gravitacionais). Como isso, o excesso de faltas acabou por prejudicar a formação dos subsunçores necessários à aprendizagem significativa da matéria de ensino.

Tendo em vista os fatores expostos, é interessante incluir como indicador de sucesso do produto educacional a aprendizagem mecânica dos tópicos de ensino, pois os estudantes passaram do estado em que possuíam poucos subsunçores acerca dos conteúdos para outro estado em que o que foi aprendido mecanicamente, mesmo tendo sido assimilado de forma arbitrária ou literal pela estrutura cognitiva, pode servir de base para a aprendizagem significativa desses tópicos, caso haja interesse dos alunos em uma revisão ou em complementar os assuntos tratados.

6- Considerações Finais

A presente dissertação buscou analisar teoricamente e propor uma aplicação educacional para minimizar a precariedade do ensino de astronomia no ensino médio, tendo como pano de fundo, a educação pública do Distrito Federal. Nesse contexto, teve como objetivo principal a estruturação, aplicação e avaliação de uma possível articulação entre a aprendizagem significativa de Ausubel e o programa de filosofia de Lipman de modo a resultar em uma sequência didática para o ensino de tópicos de astronomia ligados à gravitação.

Para tanto, foi produzida uma sequência didática detalhada e embasada teoricamente na articulação citada acerca de temas de astronomia ligados à gravitação de Newton e à relatividade de Einstein. Ela é constituída de quatro módulos sequenciais e hierarquizados em que são tratados os seguintes subtemas: 1) gravitação universal e sistema solar; 2) relatividade geral; 3) buracos negros; e 4) lentes gravitacionais.

Os módulos foram construídos considerando a experiência do professor/autor dessa dissertação em sala de aula, os documentos curriculares oficiais (BNCC e PCN+ EM), bem como trabalhos do campo de ensino de astronomia. Como resultado, a sequência didática apresenta atividades diversificadas e que se utilizam de várias tecnologias educacionais (vídeos, demonstrações, simulações em computador, discussões em grupos, questionários, entre outras) voltadas à aprendizagem de astronomia pelos estudantes.

Essa sequência didática foi aplicada em uma turma do terceiro ano do ensino médio de uma escola pública do Distrito Federal, ao longo dos meses de outubro e novembro de 2019. Com relação ao interesse dos estudantes pelos temas tratados, verificou-se que ele foi maior que o que demonstram nas aulas a que normalmente são submetidos, principalmente durante as atividades que envolviam simulações ou demonstrações dos fenômenos e dos astros estudados. Além disso, relatos dos próprios estudantes colaboram com o que foi percebido pelo professor no decorrer das aulas.

Com relação ao desenvolvimento do pensamento de ordem superior, verificou-se que as comunidades de investigação estiveram ativas durante a aplicação da sequência didática. Os estudantes eram participativos nas discussões e constantemente interrompiam as explicações para fazerem perguntas ou comentários adicionais ao professor e à turma acerca dos conteúdos estudados. Desse modo, a partir desses questionamentos e participações dos estudantes nas discussões, percebeu-se que suas habilidades de ordem superior foram estimuladas, o que é um bom indicador no sentido de que o pensar superior também se desenvolveu.

Já com relação à aprendizagem significativa, foram encontrados indícios de sua ocorrência quando da participação dos estudantes nas discussões e em cerca de um terço das respostas dadas nos questionários respondidos. Outro um terço das respostas mostraram indícios da aprendizagem mecânica. O último terço mostrou respostas desconexas dos temas estudados ou foram deixadas em branco, indicando a não ocorrência de qualquer tipo de aprendizagem, significativa ou mecânica. Tendo em vista que os estudantes possuíam nenhum ou poucos subsunçores adequados aos temas propostos, esses resultados se mostram parcialmente satisfatórios, pois demonstram a evolução de seus conhecimentos.

Dessa forma, entende-se que os objetivos dessa dissertação foram alcançados. Isso porque foi desenvolvida uma sequência didática embasada teoricamente acerca de temas de interesse dos estudantes e com potencial de estimular suas habilidades de ordem superior ao mesmo tempo que promove a aprendizagem significativa desses conteúdos.

Para além desses resultados positivos, percebeu-se que a sequência didática poderia ser aprimorada com a adição de um módulo, que antecederia ao primeiro. Tendo em vista a ausência ou baixa qualidade dos subsunçores dos estudantes verificada na aplicação do produto, a inserção de temas relativos à história da ciência e da gravitação, como a filosofia natural de Aristóteles e a quebra desse paradigma defendida por Galileu, poderia minimizar esses problemas. Desse modo, o módulo extra poderia adicionar novos subsunçores nas estruturas cognitivas dos estudantes, que seriam utilizados para promover a aprendizagem significativa dos tópicos estudados no decorrer da sequência didática. Além disso, os conteúdos desse novo módulo poderiam ser utilizados para promover discussões de qualidade dentro das comunidades de investigação e, como consequência, para desenvolver o pensamento de ordem superior dos estudantes.

Nesse contexto, como forma de continuar e melhorar o trabalho desenvolvido nessa dissertação, pretende-se produzir mais um módulo para a sequência didática relatada. Após, planeja-se realizar uma nova aplicação e avaliação do produto em turmas do terceiro ano do ensino médio e, também, em turmas do primeiro ano. Essa nova aplicação tem a finalidade de verificar os possíveis ganhos em termos de aprendizagem do novo produto e fazer uma comparação com os resultados obtidos nas turmas do primeiro e terceiro anos do ensino médio. Cabe ressaltar que a continuidade da pesquisa, por meio da adição de um módulo extra, não influencia ou invalida os resultados gerais encontrados até o momento.

Tendo em vista essas considerações e a pesquisa como um todo, é possível perceber que o ensino de astronomia a partir de tópicos da TRG e embasado teoricamente na articulação entre

as teorias de Ausubel e Lipman é capaz de fornecer aos estudantes uma nova visão acerca das aulas de física. Essa perspectiva mostra aos estudantes novos campos de atuação da disciplina, que não se limitam ao desgastado currículo ao qual estão acostumados e, portanto, lhes parecem inovadores e interessantes. Isso ocorre porque os elementos metodológicos inseridos a partir de Lipman, além de fornecerem elementos concretos para a aferição da aprendizagem significativa, também faz com que os estudantes discutam qualitativamente a física, expondo suas ideias e preconceitos sobre ela, e lhes mostrando que ela é mais do que apenas os cálculos sem contexto adequado que estão acostumados.

Além disso, também é possível inferir que, se a introdução de temas relativos à TRG de Einstein pode ser satisfatoriamente realizada no ensino médio, no contexto limitado da escola pública, também o pode em outros temas da física moderna e contemporânea, como, por exemplo, matéria/energia escura, expansão acelerada do universo ou o bóson de Higgs. Com isso, este trabalho – com todas as necessárias ressalvas ao contexto, ao tema e à articulação teórico-metodológica de ensino – se direciona à atualização do currículo de física da educação básica e à reflexão sobre possíveis propostas didáticas correspondentes.

Referências

- ALMEIDA, L.; NASCIMENTO, J. D. Microlensing path parametrization for earth-like Exoplanet detection around solar mass stars. **arXiv.org**, 2018. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/1809.10230>. Acesso em: 05 set. 2019.
- AUSUBEL, D. **Educational Psychology: A Cognitive View**. USA: Holt, Rinehart and Winston, Inc., 1968.
- AUSUBEL, D.; ROBINSON, F. G. **School Learning: An Introduction to Educational Psychology**. USA: Holt, Rinehart and Winston, Inc., 1969.
- BARBOSA, L. V. Modelo 3D da deformação do espaço. **Tumblr**, 2016. Disponível em: https://66.media.tumblr.com/659da12fac7582bf5c47f4efbb2152d9/tumblr_o5ee0gLt591s5n147o1_500.gif. Acesso em: 17 jul. 2019.
- BARBOSA, L. V. Modelo 3D da deformação do espaço-tempo. **Wikipedia**, 2016. Disponível em: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/transcoded/f/f1/General_relativity_time_and_space_distortion.ogv/General_relativity_time_and_space_distortion.ogv.480p.vp9.webm. Acesso em: 2019 jul. 2019.
- BRASIL. PCN+ EM. **Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais do Ensino Médio: Ciências da Natureza e suas tecnologias**, 2002. Disponível em: <http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/CienciasNatureza.pdf>. Acesso em: 11 mar. 2020.
- BRASIL. BNCC. **Base Nacional Comum Curricular**, 2017. Disponível em: http://portal.mec.gov.br/index.php?option=com_docman&view=download&alias=85121-bncc-ensino-medio&category_slug=abril-2018-pdf&Itemid=30192. Acesso em: 11 mar. 2020.
- CODEPLAN. **Pesquisa distrital por amostra de domicílios PDAD - 2015**, Brasília, 2015.
- COSTA, M. R.; GUIMARÃES, E. S.; ROCHA, S. M. O. Sobre a infrequência de alunos no ensino médio numa escola pública do Maranhão. **Ensino & Multidisciplinaridade**, São Luís, v. 1, n. 2, p. 122-137, 2015.
- CRISPINO, L. C. B. Expedição do Observatório Real de Greenwich para Sobral em 1919 - Anotações Tomadas pela Comissão Britânica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 41, n. supl. 1, 2019.
- D'INVERNO, R. **Introducing Einstein's Relativity**. New York: Oxford University Press, 1992.
- EHT. Astronomers Capture First Image of a Black Hole. **Event Horizon Telescope**, 2019. Disponível em: <https://eventhorizontelescope.org/press-release-april-10-2019-astronomers-capture-first-image-black-hole#>. Acesso em: 20 abr. 2019.

- ESA/HUBBLE. Gravitational Lens G2237+0305. **HubbleSite**, 1990. Disponível em: https://imgsrc.hubblesite.org/hvi/uploads/image_file/image_attachment/159/full_tif.tif. Acesso em: 05 set. 2019.
- ESA/HUBBLE. Diferent tupes of gravitational lenses. **European Space Agency**, 2004. Disponível em: <https://sci.esa.int/web/hubble/-/34660-different-types-of-gravitational-lenses>. Acesso em: 20 fev. 2020.
- ESA/HUBBLE. Einstein Ring. **Hubble Space Telescope**, 2005. Disponível em: <https://www.spacetelescope.org/static/archives/images/original/opo0532g.tif>. Acesso em: 16 set. 2019.
- ESA/HUBBLE. Galaxy Cluster SDSS J1004+4112. **HubbleSite**, 2006. Disponível em: <https://hubblesite.org/contents/media/images/2006/23/1931-Image.html?news=true>. Acesso em: 16 set. 2019.
- ESA/HUBBLE. Abell 2218. **Hubble Space Telescope**, 2008. Disponível em: <https://www.spacetelescope.org/images/heic0814a/>. Acesso em: 16 set. 2019.
- ESA/HUBBLE. Galaxy Alignment. **Hubble Space Telescope**, 2011. Disponível em: <https://www.spacetelescope.org/static/archives/images/original/potw1151a.tif>. Acesso em: 15 set. 2019.
- ESA/HUBBLE. Gravitational Lensing in Action. **HubbleSite**, 2011. Disponível em: https://imgsrc.hubblesite.org/hvi/uploads/image_file/image_attachment/159/full_tif.tif. Acesso em: 05 set. 2019.
- ESA/HUBBLE. Lensed Galaxy MACS2129-1. **Hubble Space Telescope**, 2017. Disponível em: <https://cdn.spacetelescope.org/archives/images/large/opo1726a.jpg>. Acesso em: 16 set. 2019.
- ESO. First Image of a Black Hole. **European Southern Observatory**, 2019. Disponível em: <https://cdn.eso.org/images/large/eso1907a.jpg>. Acesso em: 20 abr. 2019.
- FERREIRA, M.; FILHO, O. L. S. Proposta de plano de aula para o ensino de física. **Physicae Organum**, Brasília, v. 5, n. 1, p. 39-44, 2019.
- FEYNMAN, R. P.; LEIGHTON, R. B.; SANDS, M. **Lições de Física**. Porto Alegre: Bookman, v. I, 2008.
- FREIRE, J. C. **Evolução de conceitos de mundo**: uma proposta para inserção da teoria da relatividade no ensino médio. Dissertação (Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física) - Instituto de Física, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2015.
- FROES, A. L. D. Astronomia, astrofísica e cosmologia para o Ensino Médio. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 36, n. 3, p. 1-15, 2014.
- ARMY, G. **Universe Sandbox**. Desenvolvido por Giant Army. Jogo Eletrônico, 2015.
- GUIMARÃES, R. Pesquisa Translacional: uma interpretação. **Ciência e Saúde Coletiva**, Rio de Janeiro, v. 18, n. 6, p. 1731-1744, 2013.

- INEP. Indicadores Educacionais. **INEP**, 2019. Disponível em: <http://portal.inep.gov.br/web/guest/indicadores-educacionais>. Acesso em: 02 jun. 2020.
- INEP. Censo da Educação Básica 2019: Resumo Técnico. **INEP**, 2020. Disponível em: http://portal.inep.gov.br/informacao-da-publicacao/-/asset_publisher/6JYIsGMAMkW1/document/id/6874720. Acesso em: 17 jun. 2020.
- INTERESTELAR. Direção: Christopher NOLAN. **Warner Bros. Pictures**. 2014.
- JÚNIOR, E. C. *et al.* Divulgação e ensino de Astronomia e Física por meio de abordagens informais. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 40, n. 4, 2018.
- LEITE, C.; HOSOUME, Y. Os professores de ciências e suas formas de pensar a astronomia. **Revista Latino-Americana de Educação em Astronomia**, São Paulo, n. 4, p. 47-68, 2007.
- LIN, D. *et al.* Multiwavelength follow-up of the hyperluminous intermediate-mass black hole candidate 3XMM J215022.4-055108. **The Astrophysical Journal Letters**, Washington, v. 892, n. 2, p. L25, 2020.
- LIPMAN, M. **O Pensar na Educação**. Petrópolis, RJ: Vozes, 1995.
- LIPMAN, M.; SHARP, A. M.; OSCANYAN, F. S. **A Filosófica na Sala de Aula**. Tradução de Ana Luzia Fernandes Falcone. 2ª. ed. São Paulo: Nova Alexandria, 1997.
- LUMINET, J. P. Black Holes: A general introduction. **arxiv.org**, 1998. Disponível em: [arXiv:astro-ph/9801252v1](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9801252v1). Acesso em: 04 mar. 2020.
- MOREIRA, M. A. **Teorias de Aprendizagem**. 2ª. ed. São Paulo: EPU, 2011.
- NASA. Planeta Vênus. **Nasa**, 1979. Disponível em: https://www.nasa.gov/sites/default/files/thumbnails/image/715px-venuspioneeruv_1.jpg. Acesso em: 02 set. 2019.
- NASA. Planeta Urano. **Nasa**, 1986. Disponível em: <https://www.nasa.gov/sites/default/files/thumbnails/image/uranus-voyager1.png>. Acesso em: 02 set. 2019.
- NASA. Planeta Netuno. **Nasa**, 1989. Disponível em: https://www.nasa.gov/sites/default/files/thumbnails/image/neptune_voyager1.jpg. Acesso em: 02 set. 2019.
- NASA. Fast-flying Black Hole. **Nasa**, 2002. Disponível em: https://www.nasa.gov/sites/default/files/thumbnails/image/hs-2002-30-a-full_jpg.jpg. Acesso em: 02 set. 2018.
- NASA. Planeta Mercúrio. **Nasa**, 2008. Disponível em: <https://photojournal.jpl.nasa.gov/jpeg/PIA13840.jpg>. Acesso em: 02 set. 2019.
- NASA. Black Hole Art. **Nasa**, 2013. Disponível em: https://www.nasa.gov/sites/default/files/images/729665main_A-BlackHoleArt-pia16695_full.jpg. Acesso em: 02 set. 2018.

NASA. Planeta Marte. **Nasa**, 2013. Disponível em:
https://solarsystem.nasa.gov/system/resources/detail_files/683_6453_mars-globe-valles-marineris-enhanced-full2.jpg. Acesso em: 02 set. 2019.

NASA. Smiling Lens. **Nasa**, 2015. Disponível em:
https://www.nasa.gov/sites/default/files/thumbnails/image/15861603283_3579db3fc6_o.jpg. Acesso em: 15 set. 2019.

NASA. Gravitational Microlensing Animation. **Nasa**, 2016. Disponível em:
https://svs.gsfc.nasa.gov/vis/a020000/a020200/a020242/Lensing_00789.png. Acesso em: 16 set. 2019.

NASA. Planeta Saturno. **Nasa**, 2017. Disponível em:
<https://www.nasa.gov/sites/default/files/thumbnails/image/pia12567-1600.jpg>. Acesso em: 02 set. 2019.

NASA. Planeta Terra. **Nasa**, 2017. Disponível em:
<https://www.nasa.gov/sites/default/files/thumbnails/image/abifulldiscindex.jpg>. Acesso em: 02 set. 2019.

NASA. The Bullet Cluster. **Nasa**, 2017. Disponível em:
<https://apod.nasa.gov/apod/ap170115.html>. Acesso em: 05 set. 2019.

NASA. Planeta Júpiter. **Nasa**, 2019. Disponível em:
<https://www.nasa.gov/sites/default/files/thumbnails/image/stsci-h-p1936a-m-1999x2000.png>. Acesso em: 02 set. 2019.

OLIVEIRA, V. H. R. **Alguns aspectos da física de buracos negros através da modelagem matemática**: uma intervenção didática para o ensino médio. Dissertação (Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, Goytacazes, 2017.

PERUZZO, J.; POTTKER, W. E.; PRADO, T. G. **Física Moderna e Contemporânea**: das teorias quânticas e relativísticas às fronteiras da física. São Paulo: Livraria da Física, v. 1, 2014.

PONTILI, R. M.; KASSOUF, A. L. Fatores que afetam a frequência e o atraso escolar, nos meios urbano e rural, de São Paulo e Pernambuco. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, Rio de Janeiro, v. 45, n. 1, p. 27-47, 2007.

RIVELLES, V. O. Introdução à Relatividade Geral. **Instituto de Física - USP**, 2006. Disponível em: http://itec.if.usp.br/~rivelles/Seminars/introd_relat_geral_aula1.pdf. Acesso em: 17 mar. 2020.

ROCHA, J. F. M. *et al.* **Origens e Evoluções das Ideias da Física**. Salvador: EDUFBA, 2002.

SÁ, M. R. R. **Teoria da Relatividade Restrita e Geral ao longo do 1º ano do ensino médio**: uma proposta de inserção. Dissertação (Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física) - Instituto de Física, Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

SAA, A. Cem anos de buracos negros: o centenário da solução de Schwarzschild. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 38, n. 4, p. e4201, 2016.

SANTANA, A. E. Espaço, Tempo e Estruturas das Teorias do Movimento. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 41, n. 1, 2019.

SANTOS, O. R. Grupo de Ensino e Pesquisa em Astronomia. **Universidade Tecnológica do Paraná**, 2020. Disponível em: <http://paginapessoal.utfpr.edu.br/oscarsantos/gepa>. Acesso em: 20 mai. 2020.

SARAIVA, M. F. O.; FILHO, K. S. O.; MÜLLER, A. M. Formação e Evolução Estelar. Departamento de Astronomia, **Universidade Federal do Rio Grande do Sul**, 2012. Disponível em: <https://www.if.ufrgs.br/tex/fis02001/aulas/Aula20-122.pdf>. Acesso em 04 set. 2020.

SCHUTZ, B. F. **A First Course in General Relativity**. 2^a. ed. New York: Cambridge University Press, 2009.

SILVA FILHO, O. L. *et al.* Normatividade e descritividade em referenciais teóricos na área de ensino de física, n. **No prelo**, 2020.

SILVA FILHO, O. L.; FERREIRA, M. Teorias da aprendizagem e da educação como referenciais em práticas de ensino: Ausubel e Lipman. **Revista do Professor de Física**, Brasília, v. 2, n. 2, p. 104-125, 2018.

SJØBERG, S. Project Rose. **Project Rose**, 2004. Disponível em: <https://roseproject.no/>. Acesso em: 08 jun. 2020.

SOARES, D. Espaço e Espaço-Tempo. **Universidade Federal de Minas Gerais**, 2013. Disponível em: <http://lilith.fisica.ufmg.br/~dsoares/esptmp/esptmp.htm>. Acesso em: 27 mar. 2020.

SOUZA, H. F. F. **A cosmologia de Newton a Einstein**: uma proposta para o ensino médio com recursos de hipermídia. Dissertação (Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física) - Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Macaé, 2017.

SOUZA, T. S. Ensino de Filosofia para crianças na perspectiva de Matthew Lipman. **Revista Filogênese**, Marília -SP, v. 6, n. 2, p. 13-26, 2013.

UFPE. **Universidade Federal de Pernambuco**, 2013. Disponível em: <https://www.ufpe.br/fisica-licenciatura-ccen>. Acesso em: 11 mar. 2020.

UFRGS. **Universidade Federal do Rio Grande do Sul**, 2018. Disponível em: http://www.ufrgs.br/ufrgs/ensino/graduacao/cursos/exibeCurso?cod_curso=1764. Acesso em: 11 mar. 2020.

UFRJ. **Universidade Federal do Rio de Janeiro**, 2010. Disponível em: <https://www.siga.ufrj.br/sira/temas/zire/frameConsultas.jsp?mainPage=/repositorio-curriculo/153686A1-92A4-F79B-1A98-293E206CD40D.html>. Acesso em: 11 mar. 2020.

UFRR. **Universidade Federal de Roraima**, 2018. Disponível em: https://sigaa.ufr.br/sigaa/public/curso/curriculo.jsf?lc=pt_BR&id=581610. Acesso em: 02 jun. 2020.

UNB. Universidade de Brasília, 2017. Disponível em:
<https://matriculaweb.unb.br/graduacao/curriculo.aspx?cod=1147>. Acesso em: 11 mar. 2020.

USP. Universidade de São Paulo, 2018. Disponível em:
<https://uspdigital.usp.br/jupiterweb/listarGradeCurricular?codcg=43&codcur=43031&codhab=1&tipo=N>. Acesso em: 11 mar. 2020.